

Bir Buhar Kazanının Enerji ve Ekserji Analizi Yoluyla Performansının Değerlendirilmesi

¹Çağdaş Filiz, ²Cüneyt Uysal, ²Enes Kılıç, ^{*2}Hüseyin Kurt
¹MYO, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye
²Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, Kardemir’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 kazanının enerji ve ekserji analizi yardımıyla performansı değerlendirilmiştir. 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.

Key words: Buhar kazanı, enerji analizi, ekserji analizi

Abstract

In this study, the performance of a gas-fired boiler existing in Kardemir 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. The boiler was tackled as the open system and single unit and the energy and exergy analysis were performed considering this state. As a result of analysis of boiler, energy and exergy efficiencies were found to be %91 and %46, respectively. It was determined that the energy and exergy loss are 6445.5 and 21185.81 kW, respectively.

Key words: Steam boiler, energy analysis, exergy analysis

1. Giriş

Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olması ve sürdürülebilir bir gelecek için gerekli olan enerjinin verimli kullanılması gerçeğinin giderek daha geniş kesimlerde anlaşılması, hükümetleri enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye ve enerji savurganlığını önlemeye yöneltmiştir. Bu olgu, bilimsel çevreleri enerji dönüşüm araçlarını yeniden değerlendirmeye ve var olan sınırlı enerji kaynaklarından daha çok yararlanabilmek için yeni yöntemler geliştirmeye itmiştir [1].

Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını birlikte ele alan ve enerjinin maksimum kullanımı veya kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir. 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. Bu nedenle ekserji analizine dayalı sistem değerlendirmeleri daha uygun bir yaklaşım olmaktadır. Enerji ve ekserji analizinden elde edilen sonuçlara göre,

*Corresponding author: Adres: Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Karabük Üniversitesi 78050, Karabük TURKIYE. E-mail address: hkurt@karabuk.edu.tr, Phone: +903704332021 Fax: +903704333290

tersinmezliklere bağılı olarak meydana gelen kayıplar tespit edilerek sistemde yapılması gereken iyileştirmeler belirlenebilmektedir. Bu kapsamda, endüstriyel tesislerdeki ısı sistemlerinin enerji ve ekserji analizi yoluyla performanslarının değerlendirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bodvarsson ve Eggers [2] 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 [3] yaptığı çalışmada; enerji ve ekserji analizini, yakıt-hücre sistemleri ile fosil yakıt ve nükleer buhar güç tesislerine uygulamıştır. Gaggioli vd. [4] 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. Tsatsaronis [5], bir enerji tesisine enerji sistemlerinin optimum tasarımını ve performansını hesaplamak için mühendislik ekonomisinin genel kavramları ile ekserjinin bir araya getirilmesinden oluşan termoekonomik analizi gerçekleştirmiştir. Pak ve Suzuki [6], bölgesel ısıtma ve soğutmada kullanılan gaz türbinli kojenerasyon sistemlerinin ekserji analizi yoluyla değerlendirmesini içeren bir çalışma yapmışlardır. Doldersum [7] yaptığı çalışmada; rafineride meydana gelen ekserji kayıplarını inceleyerek elde ettiği sonuçlar doğrultusunda ne tür iyileştirmeler yapılabileceğini göstermiştir. Habib vd.[8] 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. Kopaç ve Zemher [9], gaz türbinli bir kojenerasyon tesisinin ekserji analizini yaparak, buhar enjektörünün bir gaz türbininin ekserji verimine etkisini incelenmişlerdir. Aljundi [10], bir kuvvet santralinin performansını değerlendirmek için enerji ve ekserji analizi yapmıştır. Dragan vd.[11], bir kazanın ekipmanlarında meydana gelen enerji ve ekserji kayıplarını, yaptıkları enerji ve ekserji analizine göre belirlemişlerdir. Saidur vd. [12] yaptıkları çalışmada, boilerin enerji ve ekserji analizini yapmışlardır. Bu çalışmada ise, 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 belirlenmiştir.

2. Enerji Analizi

Bir sürekli akışlı açık sistem için termodinamiğin birinci yasası veya enerjinin korunumu ilkesi kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilirse, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g \quad (1)$$

Buhar kazanının ısı verimi aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği gibi, kazandan buhar ile elde edilen faydalı ısı miktarının, kazanda tüketilen yakıtın yanma entalpisine oranından bulunur.

$$\eta_{\text{ısı}} = [\dot{m}_{\text{buhar}} \times (h_{\text{buhar}} - h_{\text{besleme suyu}})] / (\dot{H}_u)_{\text{yakıt}} \quad (2)$$

2. Ekserji Analizi

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 sistemde meydana gelen 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 [1].

Akış halindeki bir maddenin, nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilimleri ihmal edildiği durumda ekserji potansiyel, kinetik, fiziksel ve kimyasal ekserji olmak üzere dört bileşene ayrılabilir. Buna göre, toplam özgül ekserji aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$ex^{top} = ex^k + ex^p + ex^{fiz} + ex^{kim} \quad (3)$$

Bulunduğu çevresine göre hareketsiz bir sistemde, kinetik ve potansiyel ekserjiler sıfır olarak düşünülebilir ve sistemin toplam ekserjisi fiziksel ve kimyasal ekserji bileşenlerinden oluşur ve toplam özgül ekserji aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$ex^{top} = ex^{fiz} + ex^{kim} \quad (4)$$

2.1. 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_o, T_o) ile termodinamik dengeye getirildiğinde sistemden elde edilebilecek maksimum iş olarak tanımlanır [13]. Saf maddelerin fiziksel ekserjisi aşağıdaki eşitlikten belirlenir.

$$ex^{fiz} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (5)$$

İdeal gazdan oluşan sistemin fiziksel ekserjisi ise aşağıdaki eşitliğe göre belirlenir.

$$ex^{fiz} = C_p[(T - T_o) - T_o \ln(T/T_o)] + RT_o \ln(P/P_o) \quad (6)$$

2.2. Kimyasal ekserji

Kimyasal ekserji, bir maddenin çevresiyle kimyasal denge haline geldiğinde ısı transferi ve madde alışverişi sonucu elde edilen maksimum iş olarak ifade edilebilir [13]. İdeal gazların molar kimyasal ekserjisi;

$$\bar{e}x^{kim} = \bar{R}T_o \sum y_i \ln(y_i/y) = \sum_i y_i \bar{e}x^{kim,i} + \bar{R}T_o \sum_i y_i \ln y_i \quad (7)$$

Suyun molar kimyasal ekserjisi;

$$(\bar{e}x^{kim})_{H_2O} = \bar{R}T_o \ln(P_{doyma}(T_o)/P_{oo}) \quad (8)$$

Gaz yakıtların kimyasal ekserjileri;

$$\varphi = ex^{kim}/(\dot{H}_u)_{yakıt} \quad (9)$$

eşitliklerine göre belirlenir.

2.3. Ekserji verimi

İkinci kanun veya ekserji verimi, kullanılabilir enerji kavramından yararlanarak işlemin ne derece iyi ve mükemmel yakın olduğunun incelenbilmesini sağlar. Buna göre, ekserji verimi toplam çıkan ekserjinin toplam giren ekserjiye oranı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\Psi = \sum \dot{E}x_c / \sum \dot{E}x_g \quad (10)$$

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

$$\sum \dot{E}x_g = \sum \dot{E}x_c + \sum \dot{E}x^{kayıp} \quad (11)$$

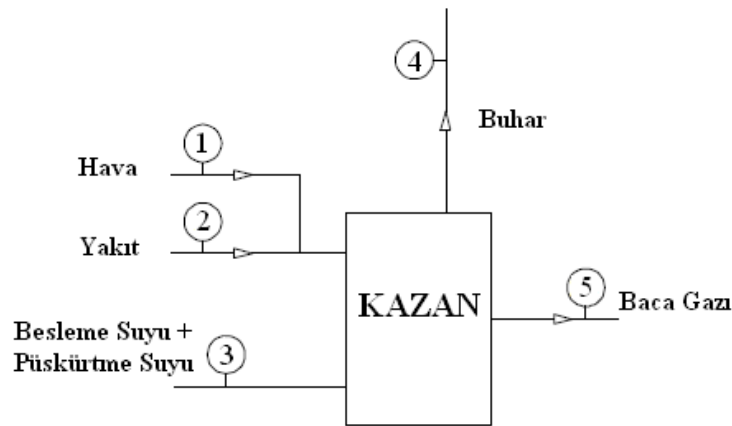
$$\sum I = \sum \dot{E}x_g - \sum \dot{E}x_c \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir.

3. Buhar Kazanı Enerji ve Ekserji Analizi

3.1. Buhar kazanı enerji analizi

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 kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazı karışımından oluşan gaz yakıtla çalışan bir kazan olup, saatte 385 °C sıcaklık ve 25 bar basınçta 50 ton buhar üretecek kapasiteye sahiptir.kazandır.



Şekil 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. Şekil 1’de sürekli akışlı sürekli açık bir sistem olarak ele alınan buhar kazanına giren ve çıkan ürünler görülmektedir.

3.1.1. Yakıtların yanma entalpilerinin belirlenmesi

Kazanda yakıt olarak kullanılan kok gazı, yüksek fırın gazı ve konverter gazının yanma entalpilerinin bulunabilmesi için, gerekli olan termofiziksel özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Hesaplamalarda, kazandaki nem oranları ölçülemediğinden dolayı nem oranları düzeltme faktörleri ihmal edilmiştir.

Tablo1. 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 Basıncı, P_m	104.165 kPa	104.255 kPa	109.325 kPa
Kazan Girişindeki Hacimsel Debisi, \dot{V}_i	0.83 Nm^3/s	2 Nm^3/s	3.05 Nm^3/s
Kazana Giriş Sıcaklıkları, T_i	30 °C	30 °C	30 °C
Kazan Girişindeki Yoğunlukları, ρ_i	0.486 kg/Nm^3	1.359 kg/Nm^3	1.511 kg/Nm^3
Molar Ağırlıkları, M_i	10.786 $kg/kmol$	30.44 $kg/kmol$	31.36 $kg/kmol$
Yakıtların alt ısıl değeri, H_u	16545 kJ/Nm^3	3109 kJ/Nm^3	6280 kJ/Nm^3
Yakıtların yanma entalpisi, \dot{H}_u	13732.35 kW	6218 kW	19154 kW
Yakıtın toplam entalpisi	39104.35 kW		

3.1.2. Baca gazı bileşenlerinin molar debilerinin belirlenmesi

Baca gazı bileşenlerinin molar debileri; buhar kazanındaki yanmanın tam olarak gerçekleştiği, baca gazı bileşenlerinin CO_2 , H_2O , O_2 ve N_2 olduğu kabulüne göre belirlenmiştir. Baca gazının bacadan çıkış sıcaklığı 168 °C olup, bir aspiratör yardımıyla dışarıya atılmaktadır. Aspiratör karakteristik çalışma eğrisinden baca gazının hacimsel debisi, 20 m^3/s olarak belirlenmiştir. İdeal gaz denkleminde baca gazının molar debisi aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$\dot{n}_{\text{baca gazı}} = P_{\text{baca gazı}} \times \dot{V}_{\text{baca gazı}} / \bar{R} \times T_{\text{baca gazı}} = 108.955 \times 20 / 8.314 \times 441.15 = 0.594 \text{ kmol/s} \quad (12)$$

Baca gazı bileşenlerinin molar debilerinin belirlenmesinde gerekli olan buhar kazanında kullanılan gaz yakıtların kimyasal bileşenleri, hacimsel oranları ve debileri Tablo 2’de verilmiştir.

Baca gazının çıkışında bulunan analizör sayesinde çıkan tüm gazların miktarları 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,

$$\frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{\text{bacaa gazı}}} = 0.032 \Rightarrow \frac{\dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{\text{bacaa gazı}}} = \frac{\dot{n}_{O_2}}{\dot{n}_{\text{bacaa gazı}}} = \frac{\dot{n}_{O_2}}{0.594} = 0.032 \Rightarrow \dot{n}_{O_2} = 0.01906 \text{ kmol/s} \quad (13)$$

olarak bulunmuştur. Baca gazı bileşimindeki CO₂, H₂O ve N₂ miktarı, yanma işlemine giren C, H₂ ve N₂ miktarının yanma işlemi sonucunda oluşacak baca gazı bileşimindeki C, H₂, N₂ miktarına eşit olması gerektiğinden yola çıkılarak yazılan reaksiyon denkleminde göre belirlenmiştir. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve molar oranları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 2. Yakıtların bileşenleri, hacimsel oranları ve hacimsel debileri

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

Tablo 3. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve molar oranları

Baca gazı bileşenleri	Molar debisi, n _i (kmol/s)	Molar oranı, y _i = (n _i /n _{bacaa})
CO ₂	0.1472	0.248
H ₂ O	0.0779	0.1312
O ₂	0.01906	0.032
N ₂	0.3498	0.589
Toplam	0.594	1

3.1.3. Baca gazı entalpisinin belirlenmesi

Baca gazının entalpi, baca gazının özgül ısısına göre belirlenmiştir. Baca gazının bacadan çıkış sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki entalpi farkı, sıcaklık farkı ile özgül ısısının çarpımına eşittir. Termodinamik tablodan 168 °C sıcaklıktaki baca gazı bileşenlerinin entalpi hesabı için özgül ısı kapasitesi değerleri kullanılarak baca gazı entalpi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\bar{c}_{p,\text{bacaa gazı}} = (\bar{h} - \bar{h}_o)/(T - T_o) \quad (14)$$

$$\bar{c}_{p,\text{bacaa gazı}} = y_{CO_2} \times \bar{c}_{p,CO_2} + y_{H_2O} \times \bar{c}_{p,H_2O} + y_{O_2} \times \bar{c}_{p,O_2} + y_{N_2} \times \bar{c}_{p,N_2} \quad (15)$$

$$\bar{C}_{p,baca\ gazı} = 0.248 \times 40.84 + 0.1312 \times 33.75 + 0.032 \times 29.1 + 0.589 \times 29.51 = 32.86 \text{ kJ/kmolK} \quad (16)$$

$$h - h_o = 32.86 \times (441.15 - 298.15) = 4699 \text{ kJ/kmol} \quad (17)$$

3.1.4. Yakma havası debisinin ve entalpisinin belirlenmesi

Sistemde, kazana yanma havasını sağlayan bir adet vantilatör bulunmaktadır. Emiş yapılan hava iki yakıcıdan 18000 m³/h olmak üzere toplamda 36000 m³/h'dir. Vantilatör karakteristik çalışma eğrisinden yakma havasının hacimsel debisi 10.1 m³/s, kütleli debisi ise 12.12 kg/s olarak bulunmuştur. Yakma havası, kazana ön ısıtma yapıldıktan sonra 200 °C sıcaklık ve 2.4 kPa basınçta girmektedir. Buna göre kazana giren yakma havasının özgül entalpi, termodinamik tablo kullanılarak 475.47 kJ/kg olarak bulunmuştur.

3.1.5. Buhar kazanından çevreye olan ısı kaybı ve ısı verimi

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 termodinamik tablolardan entalpi ve ekserji değerleri okunarak aşağıdaki enerji denge denkleminde yerine yazılmış, kazandan çevreye olan ısı kaybı bulunmuştur.

$$\dot{Q}_{kayıp} = \sum \dot{m}_g h_g - \sum \dot{m}_ç h_ç = (\dot{H}_u)_{yakıt} + \dot{H}_{hava} + \dot{H}_{besleme\ suyu} - \dot{H}_{buhar} - \dot{H}_{baca} \quad (18)$$

$$\dot{Q}_{kayıp} = 39104.35 + 5762.7 + (13.88 \times 640.23) - (13.88 \times 3207.26) - 2791.2 = 6445.5 \text{ kW} \quad (19)$$

Buhar kazanının ısı verimi ise aşağıdaki eşitlikten bulunmuştur.

$$\eta_{ısıl} = [\dot{m}_{buhar} \times (h_{buhar} - h_{besleme\ suyu})] / \dot{H}_u = [13.88 \times (3207.26 - 640.23)] / 39104.35 = \% 91 \quad (20)$$

3.2. Buhar Kazanı Ekserji Analizi

3.2.1. Besleme suyunun ekserjisi

Kazana 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 °C) = 3.169 kPa, atmosferdeki suyun standart kısmı basıncı P_{oo} = 0.88 kPa (0.0088 bar) [13] Bu değerler, aşağıdaki kimyasal ekserji eşitliğinde yerine yazılırsa, kazana giren besleme suyunun molar özgül kimyasal ekserjisi hesaplanmıştır.

$$(\bar{e}x^{kim})_{besleme\ suyu} = \bar{R}T_o \ln(P_{doy}(T_o)/P_{oo}) = 8.314 \times 298.15 \times \ln(3.169/0.88) = 3175.98 \text{ kJ/kmol} \quad (21)$$

Kazana giren besleme suyunun 107 °C ve 5 bar değerlerindeki entalpi ve entropi değerleri termodinamik tablolardan bulunarak, besleme suyunun özgül fiziksel ekserjisi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$(ex^{fiz})_{b.suyu} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) = (448.61 - 104.93) - 298.15(1.3812 - 0.3672) = 45.19 \text{ kJ/kg} \quad (22)$$

3.2.2. 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 termodinamik tablo kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$(ex^{fiz})_{\text{buhar}} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) = (3207.26 - 104.93) - 298.15 (6.9676 - 0.3672) = 1134.42 \text{ kJ/kg} \quad (23)$$

3.2.3. Yakıt ekserjisinin belirlenmesi

Yakıtların kimyasal ekserjilerini bulabilmek için gerekli olan ϕ değerleri; kok gazı için 1.05, yüksek fırın gazı için 0.98 ve konverter gazı için 0.973 olarak alınmıştır [13]. Yakıtların özgül kimyasal ekserjisi:

$$(ex^{kim})_{\text{kokg}} = \phi \times (H_u)_{\text{kokg}} = 1.05 \times 16545 = 17372.25 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (24)$$

$$(ex^{kim})_{\text{yfg}} = \phi \times (H_u)_{\text{yfg}} = 0.98 \times 3109 = 3046.82 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (25)$$

$$(ex^{kim})_{\text{kong}} = \phi \times (H_u)_{\text{kong}} = 0.973 \times 6280 = 6110.44 \text{ kJ/Nm}^3 \quad (26)$$

olarak bulunmuştur. Yakıtların fiziksel ekserjileri ise aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$(\bar{ex}^{fiz})_{\text{yakıt}} = \bar{C}_{p,\text{yakıt}} \times [(T - T_o) - T_o \ln(T/T_o)] + \bar{R}T_o \ln(P/P_o) \quad (27)$$

Eşitlikteki yakıtın özgül ısısı, sıcaklığa bağlı aşağıdaki eşitliğe göre belirlenmiştir [1]. Eşitlikteki a, b, c ve d katsayıları termodinamik tablolardan alınarak her bir yakıt için sıcaklığa bağlı özgül ısı değeri hesaplanmıştır.

$$\bar{C}_{p,\text{yakıt}}(T) = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3 \quad (28)$$

$$(\bar{ex}^{fiz})_{\text{kokg}} = 10.167[(303.15 - 298.15) - 298.15 \ln(303.15/298.15)] + 8.31 \times 298.15 \ln(104.165/101.325) = 68.94 \text{ kJ/kmol} \quad (29)$$

Yüksek fırın ve konverter gazının fiziksel ekserjileri de benzer şekilde belirlenmiştir.

3.2.4. Kazana giren yakma havası ekserjisinin belirlenmesi

Sistemde, kazana yanma havası vantilatör ile sağlanmakta olup iki yakıcıda toplam 36000 m³/h'dir. Birim zamanda kazana gönderilen hava debisi ise 10.1 m³/s olur.

$$\dot{m}_{\text{nemli hava}} = \dot{V}_{\text{nemli hava}} \times \rho_{\text{nemli hava}} = 10.1 \times 1.2 = 12.12 \text{ kg/s} \quad (30)$$

$$\dot{m}_{\text{nemli hava}} = \dot{m}_{\text{kuru hava}} + \dot{m}_{\text{su buharı}} \quad (31)$$

Kuru hava ve su buharı miktarı, kazanın bulunduğu bölgeye uygun bir psikometrik diyagrama göre belirlenmiştir. Kuru termometre sıcaklığı 25 °C, yaş termometre sıcaklığı ise 18 °C alınmış,

psikrometrik diyagramdan bağıl nem % 50, özgül nem ise 0.01 kg su buharı/kg kuru hava olarak bulunmuştur. Özgül nem değeri kullanılarak kuru hava debisinin 12 kg/s, su buharı debisinin ise 0.12 kg/s olduğu belirlenmiştir. Kuru havanın kütleli debisinin kuru havanın moleküler ağırlığı olan 28.97 kg/kmol değerine oranlanmasıyla 0.41 kmol/s olarak bulunmuştur. 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,

$$\phi = P_{\text{su buharı}}/P_{\text{doyma}} \Rightarrow P_{\text{su buharı}} = \phi \times P_{\text{doyma}} \Rightarrow P_{\text{su buharı}} = 0.50 \times 3.169 = 1.58 \text{ kPa} \quad (32)$$

$$\frac{\dot{n}_{\text{su buharı}}}{\dot{n}_{\text{kuru hava}} + \dot{n}_{\text{su buharı}}} = \frac{P_{\text{su buharı}}}{P_{\text{atm}}} \Rightarrow \frac{\dot{n}_{\text{su buharı}}}{0.41 + \dot{n}_{\text{su buharı}}} = \frac{1.58}{101.325} \Rightarrow \dot{n}_{\text{su buharı}} = 0.0065 \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \quad (33)$$

Tablo 4. 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 ₂ O	0.00652	0.003	11710
O ₂	0.41	0.209	3970
N ₂	1.54	0.787	720
Toplam	1.96	1	

Kazana giren yakma havasının kimyasal ekserjisi, aşağıdaki molar ekserji eşitliğine göre Tablo 4'deki değerler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\bar{e}_x^{kim} = \bar{R}T_o \sum y_i \ln(y_i/y) = \sum_i y_i \bar{e}^{kim,i} + \bar{R}T_o \sum_i y_i \ln y_i \quad (34)$$

$$(\bar{e}_x^{kim})_{\text{hava}} = (0.003 \times 11710) + (0.209 \times 3970) + (0.787 \times 720) + 8.314 \times 298.15 \times [0.003 \times \ln(0.003) + 0.209 \times \ln(0.209) + 0.787 \times \ln(0.787)] = 110.02 \text{ kJ/kmol} \quad (35)$$

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

$$(\bar{e}_x^{fiz})_{\text{hava}} = \bar{C}_{p,\text{hava}} \times [(T - T_o) - T_o \ln(T/T_o)] + \bar{R}T_o \ln(P/P_o) \quad (36)$$

Havanın sıcaklığa bağlı sabit basınçtaki molar özgül ısı kapasitesi aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\bar{C}_{p,\text{hava}}(T) = 1.04841 - 3.83719T/10^4 + 9.45378T^2/10^7 - 5.49031T^3/10^{10} + 7.92981T^4/10^{14} \quad (37)$$

$$\bar{C}_{p,\text{hava}}(473.15) = 1.04841 - 3.83719(473.15)/10^4 + 9.45378(473.15)^2/10^7 - 5.49031(473.15)^3/10^{10} + 7.92981(473.15)^4/10^{14} = 1.024 \text{ kJ/kmolK} \quad (38)$$

$$(\bar{e}_x^{fiz})_{\text{hava}} = 1.024 \times [(473.15 - 298.15) - 298.15 \times \ln(473.15/298.15)] + 8.314 \times 298.15 \times \ln(103.725/101.325) = 96.23 \text{ kJ/kmol} \quad (39)$$

Tablo 5. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri ve kimyasal ekserjileri

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

3.2.5. Baca Gazı Bileşenlerinin Ekserjilerinin Belirlenmesi

Baca gazı sıcaklığı 168°C olup, hacimsel debisi 20 m³/s, molar debisi ise 0.594 kmol/s olarak belirlenmiştir. Baca gazı bileşenlerinin molar debileri, molar oranları ve standart molar kimyasal ekserjileri Tablo 5’de verilmiştir. Bu değerler kullanılarak aşağıda verilen molar ekserji eşitliği yardımıyla baca gazının kimyasal ekserjisi hesaplanmıştır.

$$\bar{e}_X^{kim} = \bar{R}T_0 \sum y_i \ln(y_i/y) = \sum_i y_i \bar{e}^{kim,i} + \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln y_i$$

$$(\bar{e}_X^{kim})_{\text{baca gazı}} = [(0.1312 \times 11710) + (0.032 \times 3970) + (0.5889 \times 720) + (0.2479 \times 20140)] + 8.314 \times 298.15 \times [0.0320 \times \ln(0.0320) + 0.1312 \times \ln(0.1312) + 0.2479 \times \ln(0.2479) + 0.5889 \times \ln(0.5889)] = 4516.53 \text{ kJ/kmol} \quad (40)$$

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

$$(\bar{e}_X^{fiz})_{\text{baca gazı}} = \bar{C}_{p,\text{baca gazı}} \times [(T - T_0) - T_0 \ln(T/T_0)] + \bar{R}T_0 \ln(P/P_0) \quad (41)$$

Eşitlikteki baca gazı molar özgül ısı kapasitesi, termodinamik tablodan bulunan her bir baca gazının molar ısı kapasitesi ile molar oranlarının çarpımından bulunmuştur.

$$\bar{C}_{p,\text{baca gazı}} = y_{\text{CO}_2} \times \bar{C}_{p,\text{CO}_2} + y_{\text{H}_2\text{O}} \times \bar{C}_{p,\text{H}_2\text{O}} + y_{\text{O}_2} \times \bar{C}_{p,\text{O}_2} + y_{\text{N}_2} \times \bar{C}_{p,\text{N}_2} \quad (42)$$

$$\bar{C}_{p,\text{baca gazı}} = 0.2479 \times 7.63 + 0.1312 \times 6.25 + 0.032 \times 5.48 + 0.5889 \times 5.45 = 6.095 \text{ kJ/kmolK} \quad (43)$$

Baca gazının fiziksel ekserjisi,

$$(\bar{e}_X^{fiz})_{\text{baca gazı}} = 6.095 \times [(441.15 - 298.15) - 298.15 \times \ln(441.15/298.15)] + 8.314 \times 298.15 \times \ln(108.96/101.325) = 339.69 \text{ kJ/kmol} \quad (44)$$

3.2.6. Buhar kazanının enerji ve ekserji verimlerinin belirlenmesi

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

$$\sum \dot{I} = \sum \dot{E}_X^{\text{kayıp}} = \sum \dot{E}_{X_g} - \sum \dot{E}_{X_c} \quad (45)$$

$$\sum \dot{E}_{x_g} = (\dot{E}_{x^{top}})_{b.suyu} + (\dot{E}_{x^{top}})_{hava} + (\dot{E}_{x^{top}})_{yakıt} = 3076.22 + 84.56 + 39186.02 = 42265.13 \text{ kW} \quad (47)$$

$$\sum \dot{E}_{x_c} = (\dot{E}_{x^{top}})_{baca \text{ gazı}} + (\dot{E}_{x^{top}})_{buhar} = 2884.59 + 18194.73 = 21079.32 \text{ kW} \quad (48)$$

Buna göre toplam tersinmezlik veya toplam ekserji kaybı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\sum \dot{I} = \sum \dot{E}_{x^{kayıp}} = 42265.13 - 21079.32 = 21185.81 \text{ kW} \quad (49)$$

Buhar kazanının ekserji verimi ise aşağıdaki eşitlikten % 46 olarak bulunmuştur.

$$\Psi = 1 - \sum \dot{I} / (\dot{E}_{x^{top}})_{yakıt} = 1 - 21185.81 / 39186.02 = \% 46 \quad (50)$$

Enerji ve ekserji analizi sonucunda her bir düğüm noktası için hesaplanan enerji ve ekserji değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Enerji ve ekserji analizinden elde edilen sonuçlar

D. No	Akışkan	Kütleli debi (kg/s)	Molar debi (kmol/s)	Enerji (kW)	Fiziksel ekserji	Kimyasal ekserji	Özgül ekserji	Toplam ekserji (kW)	
1	hava	12.12	0.41	5762.7	96.23 kJ/kmol	110.02 kJ/kmol	206.25 kJ/kmol	84.56	
	Yakıt	kok gazı	0.403	39104.4	3.106 kJ/Nm ³	17372.25 kJ/Nm ³	14421.54 kW	39186.02	
		yüksek fırın gazı	4.608		0.146	9.078 kJ/Nm ³	6110.44 kJ/Nm ³		18664.53 kW
		konverter gazı	2.718		0.089	3.157 kJ/Nm ³	3046.82 kJ/Nm ³		6099.95 kW
3	besleme suyu	13.88		6226.7	45.19 kJ/kg	176.44 kJ/kg	221.63 kJ/kg	3076.22	
4	buhar	13.88		44516.8	1134.42 kJ/kg	176.44 kJ/kg	1310.86 kJ/kg	18194.73	
5	baca gazı		0.594	2791.2	339.69 kJ/kmol	4516.53 kJ/kmol	4856.22 kJ/kmol	2884.59	

4. Sonuç ve Öneriler

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. 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. Ekserji kaybının yüksek olmasının sebebi, yanma olayındaki kimyasal enerji, ısı enerjisi ve iç enerji gibi düzensizliklerin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Kazanda

meydana gelen enerji ve ekserji kaybını azaltabilmek için yapılabilecek iyileştirmeler olduğu gözükmektedir. 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.

6. Kaynaklar

- [1] Çengel YA, Boles MA. Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik. Derbentli T, Çeviri Editörü. İstanbul: Literatür; 1996, p. 369-791.
- [2] Bodvarsson G, Eggers DE. The exergy of thermal water. *Geothermics* 1972; 1: 93-95.
- [3] Rosen MA. 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* 1990; 15 (4): 267-74.
- [4] Gaggioli RA, Sama DA, Qian S, El-Sayed YM. 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* 1991; 113 (2): 170-83.
- [5] Tsatsaronis G. Thermoeconomic analysis and optimization of energy systems. *Progress in Energy and Combustion Science* 1993; 19 (3): 227-57.
- [6] Pak PS, Suzuki Y. Exergetic evaluation of gas turbine cogeneration systems for district heating and cooling. *International Journal of Energy Research* 1997; 21: 209-20.
- [7] Doldersum A. Exergy analysis proves viability of process modifications. *Energy Conversion and Management* 1998; 39 (16-18): 1781-89.
- [8] Habib MA, Said SAM, Al Zaharana I. Thermodynamic optimization of reheat regenerative thermal-power plants. *Applied Energy* 1999; 63: 17-34.
- [9] Kopaç M, Zemher B. Exergy analysis of the steam-injected gas turbine. *International Journal of Exergy* 2004; 1 (3): 363-74.
- [10] Aljundi Isam H. Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Chemical Engineering Department, Mutah University, Al-Karak, Jordan* 2009; 29: 324-28.
- [11] Dragan M, Uzuneanu K, Panait T, Gelu C. Thermal systems and environmental engineering department, 'Dunarea de Jos' University of Galati, Domneasca Street, Galati, Romania 2009; 263-66.
- [12] Saidur R, Ahamed JU, Masjuki HH. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia* 2010; 38: 2188-97.
- [13] Kotas T. The exergy method of thermal plant analysis. Florida: Krieger Publishing Company; 1995, p. 32-45.