

DOĞALGAZ YAKITLI KAZANDAN ÇIKAN ATIK BACA GAZININ EKSERJİ ANALİZİ

Kemal Çomaklı

Prof. Dr.,
Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum
kcomakli@atauni.edu.tr

Meryem Terhan*

Yrd. Doç. Dr.,
Kafkas Üniversitesi,
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Kars
meryembalcin@gmail.com

ÖZ

Bu çalışmada, bölgesel ısıtma sistemindeki doğalgaz yakıtlı kazanlardan çıkan atık baca gazının ekserji analizi yapılmıştır. Bu maksatla, bir bölgesel ısıtma sisteminin gerçek işletme verileri kullanılmıştır. Atık baca gazındaki kayıp ısıdan yararlanmak için ilave bir ısı geri kazanım sistemi planlanmıştır. Bu sistemle ısı merkezine yakın bir binanın ısıtılması amaçlanmıştır. Hesaplamalar sonucunda, kazanlardaki adyabatik yanma sıcaklığı, toplam tersinmezlik oranı ve ekserji verimi sırasıyla, 1846 °C, %61, %32,77'dir. Ayrıca ısıtma sisteminin baca gazı ekserji kaybı 868,29 kW ve ekserji kaybı oranı %6,14'tür. Tasarlanan ilave ısı geri kazanım sistemindeki ekonomizerin ekserji verimi %89 ve ekserji yok oluşu 13,4 kW'tır. Bu sistemdeki dağıtım borularındaki ekserji kaybı 3,35 kW olarak hesaplanmıştır. Bu ek sistem uygulanırsa, baca gazı ekserji kaybının %3,38'i geri kazanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Atık ısı geri kazanımı, ekserji analizi, baca gazının ekserji analizi

EXERGY ANALYSIS OF WASTE FLUE GAS COMING OUT A NATURAL GAS-FIRED BOILER

ABSTRACT

In this study, exergy analysis was done waste flue gas coming out natural gas fired boilers. For this purpose, actual operation data were used a district heating system. An additional heat recovery system was planned to take advantage of heat loss in waste flue gas. Heating a building near the Heat Plant was aimed with this system. As a result of calculations, adiabatic combustion temperature, total irreversibility ratio and exergy efficiency in boilers are respectively 1846 °C, 61%, 32,77%. Besides, flue gas exergy loss of heating system is 868,29 kW and exergy loss ratio is 6,14%. Exergy efficiency and destruction of the designed economizer in additional heat recovery system are 89% and 13,4 kW. Exergy loss of distribution pipes is calculated as 3,35 kW in this system. 3,38% part of flue gas exergy loss can be recovered if this additional system will be applicated.

Keywords: Waste heat recovery, exergy analysis, exergy analysis of flue gas

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 12.08.2015
Kabul tarihi : 02.12.2015

Çomaklı, K., Terhan, M. 2015. "Doğalgaz Yakıtlı Kazandan Çıkan Atık Baca Gazının Ekserji Analizi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 670, s. 58-64.

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacının önemli bir kısmı fosil yakıtlarla karşılanmaktadır ve bu yakıtların rezervleri sınırlı olduğundan maliyetleri yüksektir. Bu nedenle, enerji kaynakları mümkün olduğunca verimli kullanılmalıdır. Sınırlı enerji kaynaklarının verimli kullanımında en dikkat çekici yöntemlerden biri de atık ısı geri kazanımıdır [1].

Geleneksel bir kazanda üretilen enerjinin yaklaşık olarak %16-20 kadarı baca gazlarıyla sistemden ayrılır. Baca gazlarından atık ısının geri kazanımı, bu oranın çok yüksek olması nedeniyle, ısı geri kazanım sistemlerindeki gelişmeler için üzerinde durulması gereken bir konudur. Bu ısı kaybını geri kazanmak için birçok ısı geri kazanım cihazı kullanılabılır [2].

Ekonomizerler ve hava ön ısıtıcıları, kayıp ısıyı geri kazanma ekipmanları olarak sanayide yaygın olarak kullanılır. Ekonomizerlerin kazanlarda kullanımı yaygınken, hava ön ısıtıcıları ise kazanların ve ocakların her ikisinde de kullanılır [3].

Yakıt sistemlerinin karşılaştırılmasında enerji verimi yanında, ekserji veriminin de dikkate alınması gerekir. Çünkü enerji verimi, sistemlerin karşılaştırılmasında her zaman yeterli olmayabilir. Enerji veriminin giderilmesi gereken ilk eksikliği, pratikte farklı kalitelere olan enerji türlerini eşit olarak değerlendirmesidir. Termodinamiğin ikinci kanununa göre iş, ısıdan daha değerlidir. Çünkü iş tümüyle ısıya dönüşürken, ısı tümüyle ve devamlı olarak işe dönüşmez. Bir sistemden onu çevre şartlarına indirgeyerek elde edilebilecek maksimum faydalı iş miktarı, sistemin ve çevrenin bir özelliği olup, ekserji olarak tanımlanır. Enerjinin aksine ekserjinin korunumu değil yok oluşu söz konusudur [4].

Ekserji, enerjinin faydalı kısmı, başka enerji formuna dönüştürülebilen kısmıdır. Bir madde ya da bir enerji akışına bağlı ekserji; baca gazı, soğutma suyu ve ısı kaybı şeklinde çevreye atılır. Ekserji kaybı, termodinamiğin ikinci kanunu analizi de denilen ekserji analizinden saptanır. Ekserji yok oluşu, sistem içindeki tersinmezliklerin sonucunda meydana gelir. Karmaşık termodinamik sistemlerin optimizasyonunda, termodinamiğin ikinci kanununun çok güçlü bir vasıta olduğu kanıtlanmıştır. İkinci kanunun ışığında, mühendislik cihazlarının performanslarının belirlenebilmesi için; kullanılabilirlik, tersinir iş, tersinmezlik ve ikinci kanun veriminin tanımlamaları ile işe başlanmıştır. Kullanılabilirlik, verilen bir durumdaki sistemden elde edilebilen maksimum faydalı iş miktarıdır [5].

Ekserji analizi çeşitli süreçlerin ortak bir temele dayandırılarak tutarlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar. Ayrıca her süreçteki en verimsiz aşamaları ve bunların nedenlerini belirlemekte kullanılabilir [6].

Ekserji analizi ikinci kanuna dayandırıldığından procesteki

tersinmezliklerin enerji analizine göre daha iyi tespit edilmesini sağlamaktadır. Proseslerin ve güç tesislerinin artan karmaşıklığı, enerji kaynaklarının optimum kullanımını sağlamak için tam bir termodinamik analize gereksinim doğurmuştur. Bu sebeple, bazı termodinamikçiler hem birinci hem de ikinci kanunun birleştirilmesiyle oluşan yeni bir metod kullanırlar. Bu metoda kullanılabilirlik analizi denilmektedir [7].

Bu çalışmada, mevcut ısıtma sistemindeki kazanların ve baca gazı atık ısısını geri kazanıp bu ısıyı mahal ısıtmasında kullanmak için tasarlanan ek ısı geri kazanım sisteminin ekserji analizleri yapılmıştır.

2. EKSERJİ ANALİZİ

Ekserji, verilen şartlar altındaki bir sistemin çevresi ile aynı şartlara getirilmesi ile elde edilebilecek en büyük işe denir. Bir sistemin ölü halde olması, çevresiyle termodinamik dengede bulunmasıdır. Sistem ölü haldeyken çevresi ile eşit sıcaklık ve basınçta olup, çevreyle ısı ve mekanik dengededir. Ayrıca sistemin çevresine göre kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır ve ölü halde iken sistem çevre ile kimyasal reaksiyona girmez. Sistemin ölü haldeki özellikleri P_0 , T_0 , h_0 , u_0 ve s_0 ile gösterilip $P_0=1$ atm ve $T_0=25$ °C'dir. Enerjinin faydalı kısmına ekserji, kullanılmayan atık kısmına ise anerji denilmektedir. Enerji, ekserji ve anerjinin toplamıdır. Bütün termodinamik süreçlerde anerji ve ekserjinin toplamı ve tersinir süreçlerde ekserji sabit kalır. Tersinmez süreçlerde ise ekserjinin bir kısmı veya tamamı anerjiye dönüşürken anerji, ekserjiye dönüşmez [8].

Bir sistemde nükleer, manyetik, elektrik ve yüzey gerilim etkileri ihmal edilirse, sistemin ekserjisi dört bölümde incelenebilir. Bunlar; fiziksel ekserji, kimyasal ekserji, kinetik ve potansiyel ekserjidir [9].

Fiziksel Ekserji: Sistemin sıcaklığı T ve basıncı P ilk durumundan, T_0 , P_0 halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş olarak tanımlanır. Fiziksel ekserji, sıcaklık farkından dolayı ortaya çıkan termal bileşen ve basınç farkından dolayı oluşan basınç bileşeni olmak üzere iki bileşenden meydana gelir [8].

Kimyasal Ekserji: Çevre ile aynı sıcaklık ve basınca sahip olan bir sistemin kimyasal bileşiminin, çevre ile dengeye gelirken elde edilebilecek maksimum yararlı işe denir. Buradaki kimyasal dengelenme, reaksiyon ekserjisi ve konsantrasyon ekserjisi olmak üzere iki kısımdan oluşur [10].

2.1 Yakıtın Ekserji Analizi

Yakıtların standart kimyasal ekserjileri katı, sıvı ve gaz olma durumlarına göre farklılık gösterir. Doğalgaz gibi gaz yakıtların standart kimyasal ekserjisi aşağıda verilen formüllerle hesaplanabilir [11].

$$n_y \times \bar{\epsilon}_{x,0,y} = -\Delta G^0 + \sum_U n_U \times \bar{\epsilon}_{x,0,U} - \sum_R n_R \times \bar{\epsilon}_{x,0,R} \quad (1)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \times \Delta S^0 \quad (2)$$

$$\Delta G^0 = \left(\sum_U n_U \times \bar{h}_f^0 - \sum_R n_R \times \bar{h}_f^0 \right) - T^0 \times \left(\sum_U n_U \times \bar{s}_U^0 - \sum_R n_R \times \bar{s}_R^0 \right) \quad (3)$$

Denklemlerde yer alan h_f^0 , 25°C sıcaklık ve 1 atm basınçtaki oluşum entalpisini, s^0 mutlak entropiyi göstermektedir. Alt indis olarak gösterilen ü, doğalgaz yanma denklemindeki ürünleri, r reaktantları, n mol sayısını, $\epsilon_{x,o}$ standart molar kimyasal ekserjiyi göstermektedir.

Yakıt ekserjisi, doğalgaz gibi gaz yakıtlar için yakıtın molar kimyasal ekserjisi, aşağıda verilen eşitlikten elde edilir.

$$\dot{E}_{x,y} = (\dot{m}_y / Ma_y) \times \bar{\epsilon}_{x,o,y} \quad (4)$$

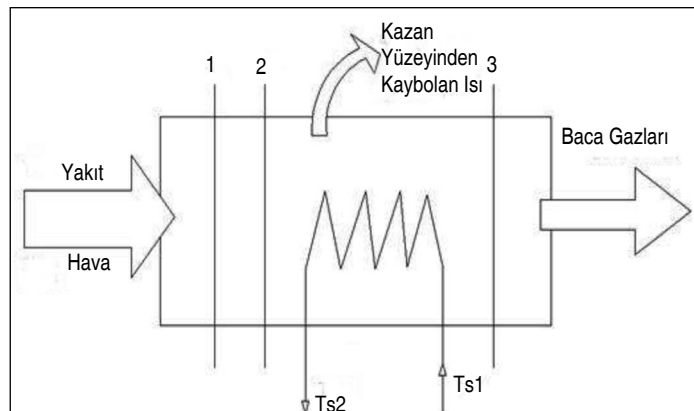
2.2 Kazanın Ekserji Analizi

Yakıt ve hava Şekil 1'de görüldüğü gibi, kazana T_0, P_0 şartlarında girdiği durumda ekserji dengesi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

Eşitlikteki $E_{x,y}$ yakıt ekserjisini, $E_{x,s,c}$ ve $E_{x,s,g}$ suya aktarılan ekserjiyi, $E_{x,k}$ kazan yüzeylerinden kaybolan ısıyla meydana gelen ekserji kaybını, $E_{x,b}$ baca gazlarıyla dışarı atılan ekserjiyi ve $\sum I_j$ kazanda oluşan tersinmezliklerinin toplamını ifade etmektedir.

$$\dot{E}_{x,y} = \dot{E}_{x,s,c} - \dot{E}_{x,s,g} + \dot{E}_{x,k} + \dot{E}_{x,b} + \sum I_j \quad (5)$$

Kazan yüzeylerinden olan ekserji kaybı da aşağıda verilen formülle hesaplanabilir. Formüldeki T_y kazan yüzey sıcaklığını Q_k ise kazan yüzeylerinden olan ısı kaybını göstermektedir [8].



Şekil 1. Kazanın Şematik Gösterimi

$$\dot{E}_{x,k} = \dot{Q}_k \times \left(1 - \frac{T_0}{T_y} \right) \quad (6)$$

Baca gazının ekserjisi, kimyasal ve fiziksel ekserji olmak üzere iki kısımdan oluşur. Baca gazı karışımının ideal gaz karışımı olduğu kabul edilerek baca gazının toplam ekserjisi aşağıda verilen formülle hesaplanabilir. Eşitlikte görülen a, b, c ve d katsayılarının değerleri de Tablo 1'den alınabilir.

$$\dot{E}_{x,b} = \dot{n}_{bg} \times \left(-\bar{R} \times T_0 \times \sum_{i=1}^N x_i \times \ln \frac{x_i^c}{x_i} \right) + (T_{bg} - T_0) \times \sum_k \dot{n}_k \times C_{p,k}^c \quad (7)$$

$$C_p^c = \frac{1}{(T - T_0)} \times \left[\frac{(a - b \times T_0) \times (T - T_0) + \frac{b - c \times T_0}{2} \times (T^2 - T_0^2)}{+ \frac{c - d \times T_0}{3} \times (T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4} \times (T^4 - T_0^4) - a \times T_0 \times \ln \frac{T}{T_0}} \right] \quad (8)$$

Kızgın suyun ekserjisi ise aşağıda verilen eşitlikten bulunur [8].

$$\begin{aligned} \dot{E}_{x,s,c} - \dot{E}_{x,s,g} &= \dot{m}_{su} \times \left[(h_{s,c} - h_{s,g}) - T_0 \times (s_{s,c} - s_{s,g}) \right] \\ &= \dot{m}_{su} \times \left[C_p \times (T_{s,c} - T_{s,g}) - T_0 \times C_p \times \ln \frac{T_{s,c}}{T_{s,g}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Kazanlarda tersinmezlikler iki çeşittir: Bunlardan biri, yakıtın hava ile yanması sırasında; diğeri ise sıcak yanma gazları ısısının suya aktarılması sırasında oluşur.

Tablo 1. Çeşitli Gazların Özgül Isı Katsayıları

Gaz	a	b	c	d
Oksijen	25,48	0,0152	-0,7155x10 ⁻⁵	1,312x10 ⁻⁹
Karbondioksit	22,26	0,0598	-3,501x10 ⁻⁵	7,469x10 ⁻⁹
Su buharı	32,24	0,0019	1,055x10 ⁻⁵	-3,595x10 ⁻⁹
Azot	28,90	-0,0016	0,8081x10 ⁻⁵	-2,873x10 ⁻⁹

Yanma sırasındaki tersinmezliğin bulunması için yanma sıcaklığının bilinmesi gerekir [8]. Yanmanın adyabatik olduğunu kabul ederek yanma sıcaklığını bulmak için aşağıda verilen eşitlik yardımıyla üç bilinmeyenli bir denklem elde edilir. Yanma sonu ürünlerin entalpileri sıcaklığın fonksiyonu olduğundan hareketle, yanma sıcaklığı deneme yanılma yöntemiyle iterasyon yapılarak bulunur [12].

$$\sum n_c \times (\dot{h}_f^0 + \bar{h} - \bar{h}^0)_c = \sum n_g \times (\bar{h}_f^0)_g \quad (10)$$

Kazanda yanma sonucundaki tersinmezlik I_j olarak gösterilmektedir ve ekserji dengesinden hesaplanır; yanma ekserjisi ile yanma sonunda oluşan gazların sahip olduğu ekserji arasındaki farktır. Eşitlikteki T_A , yanma sıcaklığıdır.

$$\dot{I}_1 = \dot{m}_y / Ma_y \times \bar{\epsilon}_{x,o,y} - \left[\dot{n}_{bg} \times \left(-\bar{R} \times T_0 \times \sum_{i=1}^N x_i \times \ln \frac{x_i^c}{x_i} \right) + T_A - T_0 \times \sum_k \dot{n}_k \times C_{p,k}^c \right] \quad (11)$$

Kazanlardaki diğer bir tersinmezlik, sıcak yanma gazları ısısının suya aktarılması sırasında meydana gelip \dot{I}_2 ile gösterilir ve yine ekserji dengesinden aşağıda verilen eşitliklerden bulunur.

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 - \dot{E}_{x,s,c} - \dot{E}_{x,s,g} - \dot{E}_{x,k} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \left[T_A - T_0 \times \sum_k \dot{n}_k \times C_{p,k}^c - T_{bg} - T_0 \times \sum_k \dot{n}_k \times C_{p,k}^c \right] \\ &\quad - \dot{Q}_k \times \left(1 - \frac{T_0}{T_y} \right) - \dot{m}_{su} \times \left[C_p \times T_{s,c} - T_{s,g} - T_0 \times C_p \times \ln \frac{T_{s,c}}{T_{s,g}} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Toplam tersinmezlik ise

$$\dot{I}_T = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{E}_{x,k} + \dot{E}_{x,b} \quad (14)$$

$$\dot{I}_T = \dot{m}_y / Ma_y \times \bar{\epsilon}_{x,o,y} - \dot{m}_{su} \times \left[C_p \times T_{s,c} - T_{s,g} - T_0 \times C_p \times \ln \frac{T_{s,c}}{T_{s,g}} \right] \quad (15)$$

yukarıda verilen eşitlikler yardımıyla bulunur.

Kazanın ekserji verimi de bu şekilde hesaplanabilir [8].

$$\eta_{II} = \psi = \frac{\dot{E}_{x,s,c} - \dot{E}_{x,s,g}}{\dot{E}_{x,y}} = 1 - \frac{\dot{I}_T}{\dot{E}_{x,y}} \quad (16)$$

2.3 Isı Değiştiricilerin Ekserji Analizi

Isıtma sistemindeki ısı değiştiricilerin ikinci kanun verimi de soğuk akışın (c) ekserjisindeki artışı, sıcak akışın (h) ekserjisindeki azalışa oranlanmasıyla elde edilir. Ekserji kaybı ise pay ile payda arasındaki farka eşittir [13].

$$\eta_{II} = \frac{(\dot{E}_{x,c} - \dot{E}_{x,g})_c}{(\dot{E}_{x,g} - \dot{E}_{x,c})_h} = \frac{\dot{m}_c \times C_{p-c} \times \left[(T_c - T_g) - T_0 \times \ln \frac{T_c}{T_g} \right]}{\dot{m}_h \times C_{p-h} \times \left[(T_g - T_c) - T_0 \times \ln \frac{T_g}{T_c} \right]} \quad (17)$$

$$\dot{I} = \dot{E}_{x,g} - \dot{E}_{x,c} - \dot{E}_{x,g} - \dot{E}_{x,c} \quad (18)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, kızgın sulu bölgesel ısıtma sistemiyle ısıtılan bir kampüsün gerçek işletme verileri kullanılmıştır. Mevcut ısı merkezinde 3 adet, her biri 12000000 kcal/h kapasiteli, alev/duman borulu, üç geçişli, 180/110 °C kızgın su kazanları kullanılmaktadır. Bu ısı merkezindeki kazanlardan atmosfere yayılan yüksek sıcaklıktaki baca gazının kayıp ısısının geri kazanılması ve geri kazanılan bu ısının bina ısıtması için kul-

lanılması durumunda yakıt tasarrufu elde etmek amaçlanmıştır.

Kazan duman borusuna yerleştirilecek bir ekonomizer yardımıyla, 158 °C sıcaklığındaki atık baca gazının enerjisi geri kazanılarak ısı merkezine yakın olan bir binanın ısıtılması planlanmıştır. Ekonomizer çıkışındaki baca gazı sıcaklığı 75 °C olup, 70 °C sıcaklığındaki tesisat dönüş suyu ise 90 °C'ye kadar ısıtılmış olur. Tasarlanan ekonomizer 34 mm dış çapında, 1,2 mm et kalınlığındaki U dönüşlü boru demetlerinden oluşmaktadır. Boru içlerinden tesisat suyu, yatay dizilmiş boru demetleri üzerinden yukarıdan aşağıya doğru baca gazı akmaktadır. Boru malzemesi, 304 kalite paslanmaz çelik olup, boru demeti paslanmaz çelik sac levha ile çevrelenip 10 cm kalınlığında, bir tarafı taş yünü, diğer tarafı paslanmaz çelik levhayla izole edilecek, y yönünde (en) 25 adet z yönünde (yükseklik) 32 adet, toplamda 800 adet borudan oluşacaktır. Yüzey alanı 85,45 m² olup, boru boyları 1 m'dir. Her bir kazan için birer tane olacak şekilde, toplam 3 adet, birbirine eş ekonomizer kullanılması tasarlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Isıtma sisteminde kullanılan yakıt, doğalgaz olduğundan ekserji analizine ilk önce doğalgazın standart kimyasal ekserjisinin bulunmasıyla başlanılmıştır. Doğalgazın kimyasal içeriği ve fiziksel bazı özellikleri Doğalgaz Dağıtım Şirketinden alınmıştır.

Tablo 2. Isı Merkezindeki Otomasyon Sisteminden Alınan Veriler

	1. Kazan	2. Kazan	3. Kazan
Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	1,1667	1,1732	1,1290
Baca Gazı Çıkış Sıcaklığı (°C)	161	157	158
Yakıt Sarfiyatı (m ³ /yıl)	4008087	4008087	4008087
Yanma Hava Sıcaklığı (°C)	20	20	20

Tablo 2'de verilen ısıtma sisteminde alınmış gerçek işletme verileri kullanılarak oluşturulan doğalgaz yanma denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} C_{1,0576} H_{4,0526} O_{0,0088} N_{0,0046} + 2,389(O_2 + 3,76N_2) \\ \rightarrow 1,058CO_2 + 2,026H_2O + 9,007N_2 + 0,323O_2 \end{aligned} \quad (19)$$

Doğalgazın standart molar kimyasal ekserjisi; denklem 1, 2 ve 3'ten yararlanarak 862365,68 kJ/kmol olarak hesaplanmıştır. Szargut'un [14] çalışmasında, metanın kimyasal ekserjisi 831200 kJ/kmol olarak verilmiştir. Doğalgaz yakıtının büyük çoğunluğu metandan oluştuğu için sonuçlar birbirine yakındır. Isıtma sistemindeki kazanlara ait toplam yakıt ekserjisi ise denklem 4 kullanılarak 14133 kW olarak bulunmuştur.

Baca gazı kayıp ekserjisi de iki çeşit olup, baca gazının sahip olduğu fiziksel ekserji tüm sistem için 529,14 kW, baca gazı kimyasal ekserjisi ise 339,09 kW olarak bulunmuştur. Toplam baca gazı ekserji kaybı, denklem 7 ve 8'den 868,29 kW olup, ekserji kayıp oranı %6,14 olarak hesaplanmıştır. Filiz vd. [15] yaptıkları çalışmada, toplam baca gazı ekserji kayıp oranı %7,36 çıkmaktadır. Kazanların yüzeylerinden olan toplam ekserji kaybı ise 10,32 kW olup, %0,07 oranına tekabül etmektedir.

Tablo 3. Tek Bir Kazan İçin Ekserji Analiz Sonuçları

		kW
1	Yakıt Ekserjisi	4711
2	Kazan Giriş Suyu Ekserjisi	3708
3	Baca Gazı Kayıp Ekserjisi	289,43
4	Kazan Yüzey Kayıp Ekserjisi	3,44
5	Kazan Çıkış Suyu Ekserjisi	8168,2
i_1	Yanma Tersinmezliği	1465,33
i_2	Isı Aktarım Tersinmezliği	1408,70
i_T	Toplam Tersinmezlik	3166,90

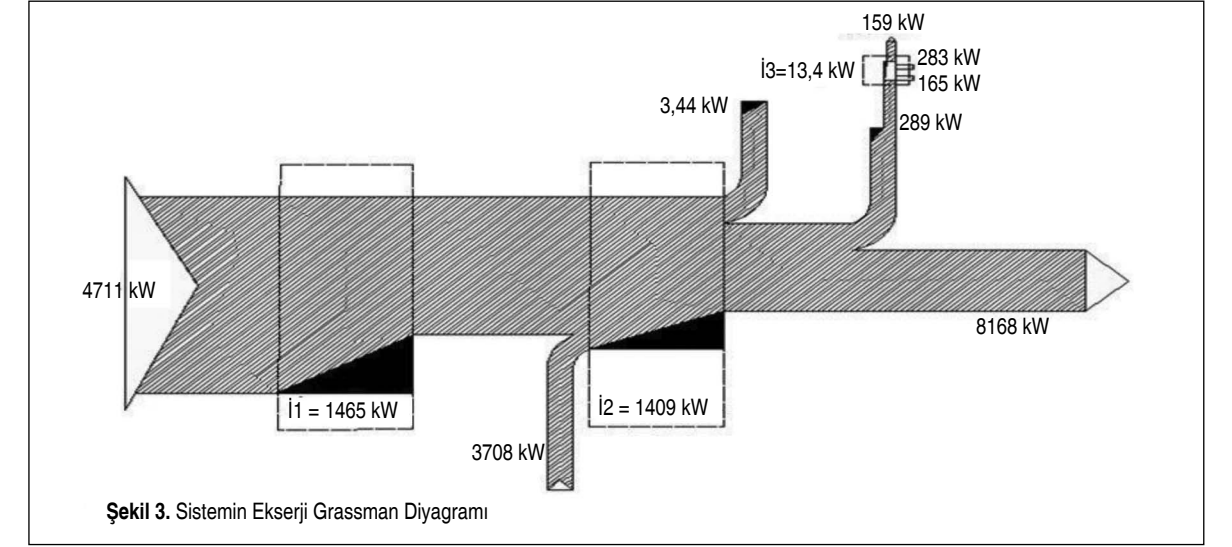
Kazanlardaki tersinmezliklerin hesaplanması için adyabatik alev sıcaklığı ya da yanma sıcaklığının hesaplanması gerekir. Denklem 10 kullanılarak ve bir grup iterasyon yapılması sonucunda yanma sıcaklığı 1846 °C olarak bulunmuştur.

Kazanlardaki toplam tersinmezlik oranı %61 ve kazan ekserji verimi ise %32,78 olarak hesaplanmıştır. Saidur et. al. [16] çalışmalarında, kazan ekserji verimi %25, Filiz vd. [15] yaptıkları çalışmada ise kazan ekserji verimi %46 olarak bulunmuştur. Tek bir kazana ait ekserji analiz sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Bölgesel ısıtma sistemindeki kazanların baca gazlarından ısı geri kazanımı sağlamak için planlanan mahal ısıtması durumu için ekserji analizi yapılmıştır.

Kazana giren yakıt ekserjisi, kazandan ısıtma suyuna aktarılan ekserji, baca gazı kayıp ekserjisi, baca gazının ısı değiştiricilerine girmesiyle oluşan ekserji dengesi, ısı değiştiriciden çıkan sıcak suyun dağıtım borularında oluşan boru kayıp ekserjisi, sirkülasyon pompalarındaki kayıp ekserji ve tüm sistemlerdeki tersinmezliklerin yerleri ve ekserji dengesi yapılmıştır (Şekil 2).

Baca gazının atık ısısından faydalanmak için kullanılan ekonomizer yardımıyla sistemde yakıt tasarrufu olacaktır. Bu yakıt tasarrufuyla, %6,14 olan baca gazı ekserji kaybının %3,38'i sisteme geri kazandırılabilir. Aşağıda, Şekil 3'te ekserji grassman diyagramında tersinmezliklerin yerleri gösterilmiştir. Bunlar, yanma sırasında oluşan tersinmezlik, ısı aktarım tersinmezliği ve ekonomizerde oluşan tersinmezliklerdir.

Ekonomizerin baca gazı ve su tarafı için ekserji dengesi, ekserji yok oluşu ve ekserji verimi Tablo 4'te gösterilmiştir. Isı değiştiricinin ekserji verimi %89,76 ve ekserji yok oluşu ise 13,40 kW olarak hesaplanmıştır.



Tablo 4. Ekonomizer Ekserji Analiz Sonuçları

	Giren Ekserji (kW)	Çıkan Ekserji (kW)	Ekserji Yok Oluşu (kW)	Ekserji Verimi (%)
Baca Gazı	289,43	158,48	13,40	89,76
Su	165,03	282,57		

5. SONUÇLAR

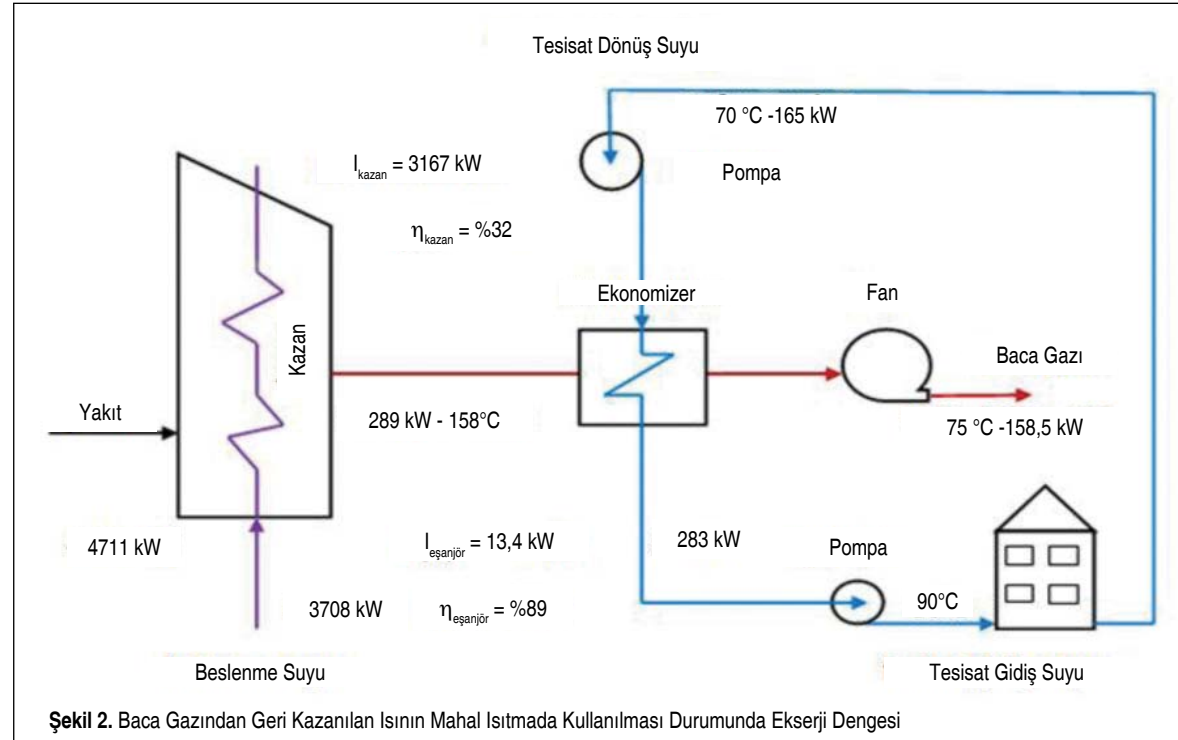
Bu çalışmada, doğalgaz yakıtlı 60 MW'lık bölgesel ısıtma sisteminin baca gazındaki kayıp ısıyı geri kazanmak amaçlanmıştır. Kayıp ısının geri kazanılması tek başına bir anlam ifade etmemektedir. Kazanılan bu ısının nerede ve nasıl kullanılacağı da önem arz etmektedir. Bunun için, geri kazanılan bu ısının ısı merkezine yakın bir binanın mahal ısıtması için kullanımı düşünülmüş; başlıca ekonomizer, su dağıtım boru hatları ve sirkülasyon pompalardan oluşan ek bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistemin ekserji analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

- Doğalgazın standart molar yakıt ekserjisi 862365,68 kJ/kmol olarak hesaplanmıştır.
- Isıtma sistemindeki kazanlara ait toplam yakıt ekserjisi ise 14133 kW'dir.
- Baca gazı kayıp fiziksel ekserjisi tüm sistem için 529,14 kW, baca gazı kimyasal ekserjisi ise 339,09 kW olarak bulunmuştur.
- Toplam baca gazı ekserji kaybı 868,29 kW olup, ekserji kayıp oranı %6,14 olarak hesaplanmıştır.
- Kazanların yüzeylerinden olan toplam ekserji kaybı ise 10,32 kW olup, %0,073 oranına tekabül etmektedir.

- Kazanlarda adyabatik yanma sıcaklığı 1846 °C olarak bulunmuştur.
- Kazanlardaki toplam tersinmezlik oranı %61 ve kazan ekserji verimi ise %32,77 olarak hesaplanmıştır.
- Ek sistem için yapılan ekserji analizinde ekonomizerin ekserji verimi 0,89 ve ekserji yok oluşu 13,4 kW'dir.
- Yeni mahallin ısıtılması için dönecek dağıtım borularındaki ekserji kaybı ise 3,35 kW olarak bulunmuştur.
- Bu ek sistemin uygulanmasıyla, %6,14 olan baca gazı ekserji kaybının %3,38'i geri kazanılabilir.

SEMBOLLER

C_p	Sabit basınçta ısı kapasitesi (kJ/kg.K)
C_p^e	Ekserjetik ısı kapasitesi (kJ/kmol.K)
E_x	Ekserji (kJ)
h_f^0	Ölü haldeki oluşum entalpisi (kJ/kmol)
I	Tersinmezlik (kJ)
m	Kütle (kg)
Ma	Mol kütlesi (kg/kmol)
n	Mol sayısı (kmol)
Q	Isı transfer hızı (W)
R_u	Evrensel gaz sabiti (kJ/kmol.K)
s^0	Ölü haldeki mutlak entropi (kJ/kmol.K)
T	Sıcaklık (°C)
T_A	Yanma sıcaklığı (°C)
T_0	Çevre sıcaklığı (°C)



Şekil 2. Baca Gazından Geri Kazanılan Isının Mahal Isıtmada Kullanılması Durumunda Ekserji Dengesi

x	Mol oranı
ε_x^0	Standart molar kimyasal ekserji (kJ/kmol)
η_{II}	İkinci yasa verimi

İndisler

-(üst çizgi)	Mol başına miktar
.(üst nokta)	Birim zamanda miktar
c	Soğuk akışkan
ç	Çıkış
CO ₂	Karbondioksit
h	Sıcak akışkan
H ₂ O	Su
g	Giriş
N ₂	Azot
O ₂	Oksijen
r	Reaktan
ü	Ürün
y	Yakıt

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Tübitak-BİDEB 2211-C Yurt İçi Lisans Üstü Doktora Teşvik Bursu kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Tübitak- BİDEB'e teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

1. **Varol, Y.** 1991. "Rejeneratif Isı Değiştirgeçleri Yardımıyla Enerji Geri Kazanımı," Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
2. **Willems, D.** 2006. "Advanced System Controls and Energy Savings for Industrial Boilers," Transactions of the Citrus Engineering Conference, Florida, vol. 52, p. 11- 22.
3. **Sinanoğlu, U., Esen, D. Ö., Karakaş, E.** 1996. "Enerji Ekonomisi Açısından Geri Kazanım Sistemleri," TMMOB 1. Enerji Sempozyumu, 12-14/11/1996, Ankara.
4. **Bilgen, S.** 2000. "Bazı Yakıtların Kimyasal Ekserji Değerlerinin Hesaplanması," Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
5. **Tekel, E.** 2006. "Termik Santrallerin Enerji ve Ekserji Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
6. **Mançuhan, E.** 2011. "Yaş Tuğla Kurutulan Bir Tünel Kurutucuda Enerji ve Ekserji Analizi," Tesisat Mühendisliği Dergisi, sayı 120, s. 35-42.
7. **Dazlak, S.** 2006. "Bir Doğalgaz Santralinde Atık Isı Kazanım Tesisinin Enerji ve Ekserji Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
8. **Çomaklı, K.** 2003. "Atatürk Üniversitesi Isıtma Merkezinin Enerji ve Ekserji Analizi," Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
9. **Tetik, T.** 2011. "Doğalgaz Yakıtlı Bireysel Isıtma Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çorum.
10. **Topaç, B.** 2008. "Kimyasal Ekserji Hesaplama Yöntemlerinin Petrol Türevi Hafif Yakıtlara Uygulanması," Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
11. **Kaushik, S. C., Singh, O. K.** 2014. "Estimation of Chemical Exergy of Solid, Liquid and Gaseous Fuels Used in Thermal Power Plants," J Therm Anal Calorim, vol. 115, p. 903- 908.
12. **Özen, D. N.** 2006. "Yoğuşmalı Kombilerde Hidrojen Takviyesi Doğalgaz Kullanımı ve Ekserji Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
13. **Coşkun, A., Geredelioğlu, Ç., Bolattürk, A., Gökaslan, M. Y.** 2013. "Çayırhan Termik Santralının Enerji ve Ekserji Analizi," 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 17-20/04/2013, İzmir.
14. **Szargut, J.** 2005. Exergy Method, Technical and Ecological Applications, WIT Press, Southampton, UK.
15. **Filiz, Ç., Uysal, C., Kılıç, E., Kurt, H.** 2014. "Bir Buhar Kazanımın Enerji ve Ekserji Analizi Yoluyla Performansının Değerlendirilmesi," 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 26-27/06/2014, Karabük.
16. **Saidur, R., Ahamed, J. U., Masjuki H. H.** 2010. "Energy, Exergy and Economic Analysis of Industrial Boilers," Energy Policy, vol. 38, p. 2188-2197.