

KAZANLARDA EKSERJİ ANALİZİ

Arş. Gör. Kemal ÇOMAKLI* - Prof. Dr. Bedri YÜKSEL**
Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl. - ERZURUM
e-mail: (*) kcomakli@atauni.edu.tr - (**) byuksel@atauni.edu.tr

Özet

Termodinamikte, tersinmezlikler, enerji dönüşümü sırasında oluşan düzensizliklerden kaynaklanmaktadır. İç enerji, ısı enerjisi ve kimyasal enerji, düzensizliklerin çok olduğu enerji türleridir. Bu enerjilerin dönüşümü sırasında, enerjinin önemli bir kısmı tersinmezliklere, yani kullanılmayan enerji olarak harcanmaktadır. Yanma olayları bu enerjilerin bütünü kapsadığından kazanlardaki tersinmezlikler büyük boyutta olmaktadır. Bundan dolayı kazanlarda kullanılabilirlik, yani ekserji analizi oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada, fuel-oil yakan bir kazanda ekserji analizi yapılarak kazanda yanma sırasında meydana gelen tersinmezlikler hesaplanmıştır.

1. Giriş

Dünya nüfusunun artması ve toplumların hızla sanayileşmesiyle birlikte, fosil kaynaklı enerji tüketimi de hızla artmıştır. 1800'li yıllarda dünya enerji tüketiminin %5'ini fosil kaynaklar oluştururken günümüzde bu oran %90'lar seviyesindedir. Fosil yakıt tüketimindeki bu hızlı artış hem kaynak sorununu hemde önemli çevre problemlerini de gündeme getirmiştir. Bu durum, bilim adamlarını enerjinin da-

ha verimli kullanılmasını araştırmaya, hükümetleri ise enerji politikalarını yeniden gözden geçirmeye yöneltmiştir. Bu gerçek, enerji dönüşüm sistemlerinin yeniden değerlendirilmesine ve enerji kaynaklarının maksimum verimde kullanılması için yeni yöntemler geliştirilmesine neden olmuştur.

Sınırlı rezervlere sahip olan dünyada, enerji talebini azaltmak için enerjiyi verimli kullanmak gerekmektedir. Özellikle enerji tüketimi yüksek olan tesislerde, enerjinin verimli kullanılması, enerji maliyetini düşüreceği gibi, kayıp enerjiyi geri kazanmak için yapılan sistemlerin maliyetlerini de en aza indirmiş olacaktır. Ayrıca fosil yakıt yakılan sistemlerde enerji dönüşümü sırasında, çevreye atılan zararlı emisyonların minimum miktarda olması çevreyi de daha az kirletecektir.

Enerji dönüşüme uğrarken çeşitli süreçlerden geçer. Bu süreçler termodinamik kanunlarına göre incelenir ve enerji dönüşüm sistemleri buna göre boyutlandırılır. Bunun için enerjinin korunumunu ifade eden Termodinamiğin I. Kanunu ile birlikte, sistemlerdeki kullanılabilir enerji miktarını da belirleyebilmek için, araştırmacılar Termodinamiğin II. Kanununa göre de sistemleri incelenmeye alırlar. Özellikle bir enerji sisteminin yapabi-

Arş. Gör. Kemal ÇOMAKLI

1994 yılında KTÜ Müh-Mim Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1997 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı Enerji Bilim dalında yüksek lisansını tamamladı. Halen aynı üniversitede doktora eğitimine devam eden Çomaklı Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Arş. Gör. olarak çalışmaktadır. İlgili alanları, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji tasarrufu, termal sistemlerde ekserji analizi.

Prof. Dr. Bedri YÜKSEL

1977 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1977-78 yıllarında T.C. Karayolları Genel Müdürlüğünde çalıştı. 1980 yılında Atatürk Üniversitesinde Araştırma görevlisi oldu. 1984 yılında doktora tamamladı. 1994 yılında doçent, 1999 yılında Profesör oldu. 9 yıl süreyle Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'nı, 8 yıl süre ile de Meslek Yüksek okulu Müdürlüğü yaptı. Halen Erzurum Meslek Yüksekokulu Müdürlüğünü yapmaktadır. Enerji ekonomisi, yeni ve yenilenebilir Enerji kaynakları, tesisat alanlarında çalışmalarını sürdürmektedir.

$$E_k = E_{kph} + E_{k0} \quad (2)$$

rasında meydana gelen tersinmezliklere bağlıdır. Tersinmezlikler, sistemin iş yapma yeteneğini azaltacağından, sistemlerde tersinmezliklerin az olması istenir. Buradan anlaşılacağı üzere, enerjinin ancak bir kısmı kullanılabilir. Enerjinin kullanılabilen kısmı "Ekserji" olarak adlandırılır ve Termodinamiğin II. Kanunu ile açıklanır.

Tersinmezlikler, enerji dönüşümü sırasında oluşan düzensizliklerden dolayı meydana gelmektedir. İç enerji, ısı enerjisi ve kimyasal enerji, düzensizliklerin çok olduğu enerji türleridir. Bu enerjilerin dönüşümü sırasında, enerjinin önemli bir kısmı tersinmezliklere, yani kullanılmayan enerji olarak harcanmaktadır. Yanma olayları, bu enerjilerin bütünü kapsadığından, kazanlardaki tersinmezlikler büyük boyutta meydana gelmektedir. Bunun için kazanlarda kullanılabilirlik, yani ekserji analizi oldukça önem arz etmektedir.

Ülkemizde tüketilen enerjinin büyük bölümü, termal sistemlerde harcanmaktadır. Termik santrallerde, sanayide, konutlarda ve diğer alanlarda ihtiyaç duyulan ısı enerjisi, kazanlarda yakılan yakıtlardan elde edilmektedir. Özellikle enerjimizin % 34'ünü kullanan konutların ısınma ihtiyacı tamamen kazanlar yoluyla sağlanmaktadır. Bundan dolayı ısı elde etmek için kullanılan kazanların, enerji tasarrufu ve hava kirliliği açısından incelenmesi, tasarlanması ve kullanılacak sisteme uygun kazan ve yakıt türü seçilmesi gerekir. Bu çalışmada fuel-oil yakan bir kazanda enerji ve ekserji analizi yapılarak kazanda yanma sırasında meydana gelen tersinmezlik hesaplanmıştır.

Bir sistem için ekserji dengesi;

$$\sum E_{kg} - \sum E_{kç} = -E_k^Q + W + I \quad (1)$$

giren çıkan

şeklinde yazılır[1]. Burada; Ek: ekserji, W: iş , I: tersinmezlik için kullanılan sembollerdir.

Bir madde için ekserji ise (kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilerek)

molar formu ise

$$e = e_{ph} + e^0 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. İdeal gazlar için fiziksel ekserji:

$$e_{ph} + C_p e (T - T_0) + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

burada; $C_p e$, Ekserjetik ısı kapasitesi olup T sıcaklığının bir fonksiyonudur. İdeal gaz karışımları için kimyasal ekserji e^0 :

$$e^0 = n_T \left[\sum_i x_i e_i^0 + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \right] \quad (5)$$

burada n_T , gazın toplam hacmini, x ise i gazının hacimsel oranını göstermektedir.

1. Kazanlarda Ekserji Analizi

Bilindiği gibi kazanlar, içerisinde yakılan yakıtın yanma enerjisini, sistemde iş gören akışkana aktarmak için kullanılan elemanlardır. Yanma sonucunda oluşan ısının tamamı akışkana aktarılmamaktadır. Isının bir kısmı kazanın yüzeylerinden, diğer kısmı ise baca gazı ile atmosfere atılmaktadır. Kullanılmayan ısının büyüklüğü, kazan verimini etkileyen önemli parametredir. Dolayısı ile yakıt tüketimi de verime bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte kazanların verimliliği, hem enerji açısından hem de ekserji açısından incelenmesi gerekir.

Yakıt ve hava kazana, T^0, P^0 şartlarında girdiğinde, ekserji denklemi aşağıdaki gibi yazılır[1].

$$E_{KYSÇ} = (E_{SG} - E_{SG}) + E_{KK} + E_{KB} + I \quad (6)$$

buradan kazanda meydana gelen tersinmezlik ise

$$I + E_{KE} - \left[E_{SÇ} - E_{SG} \right] + E_{KK} + E_{KB} \quad (7)$$



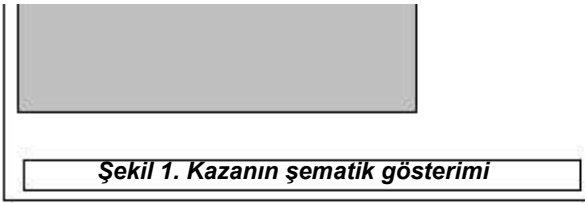
• Baca gazı ekserjisi E_{KB} :

Aşağıda verilen bağıntılardan hesaplanır.

$$E_{KB} = E_{Kim.} + E_{Fiz.} \quad (10)$$

$$E_{Kim.} = n_T e^0 \quad (11)$$

$$e^0 = \sum_k x_k e_k^0 + RT_0 \sum_k x_k \ln x_k \quad (12)$$



şeklinde hesaplanabilir.

• Yakıt ekserjisi E_{KY} :

$$E_{KY} = m \cdot f \cdot H_u \quad (8)$$

H_u yakıtın alt ısı değeri (kJ/kg), f ise yakıt ekserjisinin alt ısı değere oranıdır. Bu değer, yakıtların kimyasal bileşimlerinden hesaplanır ve petrol türevi yakıtlar için 1.04 ile 1.08 arasında değişir. Bazı yakıtlar için f değerleri Tablo1 verilmiştir.

Tablo 1. Bazı yakıtlar için f değerleri[1]

Yakıt	$f = e_Y / H_u$
Kök	1.05
Farklı tip kömürler	1.06-1.10
Odun	1.15-1.30
Fuel-oil tipleri	1.04-1.08
Doğal gaz	1.04 ± %0.5

• Kazan yüzeylerinden olan ekserji kayıpları E_{KK} :

$$E = Q_Y \left(1 - \frac{T_0}{T_Y} \right) \quad (9)$$

burada Q_Y kazan yüzeylerin çevreye olan ısı kayıplarını göstermektedir. Genellikle %1 civarında bir değer alınmaktadır [2]. T_Y ise kazan yüzey sıcaklığıdır.

el-oil ($H_u = 42250$ kJ/kg) yakan bir kalorifer kazanı için yukarıdaki hesaplar yapılmıştır. Kazan giriş suyu ve çıkış suyu sıcaklıkları uygulamada yaygın kullanılan sıcaklıklar olan sırası ile (ortalama) 65°C ile 85°C seçilmiştir. Kazan yüzeylerinden olan ısı kayıpları miktarı ise daha önceki çalışmalardan elde edilen değerler doğrultusunda %1 olarak alınmıştır [2]. Hesaplamalar hava fazlalık katsayısının altı değeri için yapılmıştır. (HFK=1.05, HFK=1.10, HFK=1.3, HFK=1.5, HFK=1.7, HFK=1.9).

HFK'nın iki değeri için baca gazı miktarları ve hacimsel oranları Tablo 2'de verilmiştir. Baca gazı sıcaklığı ortalama 160°C alınmıştır. Hesaplarda hacimsel oranı çok küçük olan baca gazları dikkate

$$E_{Fiz,k} = n \cdot e_{Fiz,k} \quad (13)$$

$$n_k \cdot e_{Fiz,k} = (T_2 - T_0) \cdot n_k \cdot C_{P,k}^e \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemlerde; n baca gazı hacmini, e^0 her bir gazın standart kimyasal ekserjisini, x gazların hacimsel oranlarını, $C_{P,k}^e$ her bir gazın baca gazı sıcaklığına tekabül eden ekserjetik ısı kapasitesini göstermektedir.

• Sıcak suyun ekserjisi ($E_{SÇ} - E_{SG}$):

$$E_{SÇ} - E_{SG} = m_S (h_{SÇ} - h_{SG}) - T_0 (s_{SÇ} - s_{SG}) \quad (15)$$

$$= m_S C_p (T_{SÇ} - T_{SG}) - T_0 C_p \ln \frac{T_{SÇ}}{T_{SG}}$$

şeklinde hesaplanır.

Kazanın enerji ve ekserji verimleri:

Kazanın enerji verimi;

$$h_I = \frac{m_S C_p (T_{SÇ} - T_{SG})}{m_Y H_u} \quad (16)$$

Ekserji verimi ise

$$h_{II} = \eta = \frac{E_{SÇ} - E_{SG}}{E_{KY}} \quad (17)$$

bağıntıları ile hesaplanır.

2. Örnek Hesaplama

Bir uygulama örneği olarak; yılda 100 000 kg fu-

dışarı atılmaktadır. Böyle durumlarda ise ekserji yanma kayıpları oluşur. Bunun için kazanlarda ekserji yanma ve baca kayıplarının en küçük değerlerinde çalışılmalıdır. Yanma olayları sırasında meydana gelen tersinmezliklerden ve ısının suya aktarımındaki tersinmezliklerden dolayı ekserji verimi kazanlarda düşük çıkmaktadır. Ayrıca baca gazı ekserjisinden yararlanılamaması bunun bir diğer nedeni de tersinmezliklerdir.

Tablo 4. Kazanda enerji ve ekserji değerleri

HFK=1.3	HFK=1.9
---------	---------

alınmamıştır. Baca gazları için standart kimyasal ekserjiler ile baca gazı sıcaklığına göre Ekserjetik ısı kapasiteleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. Baca gazı bileşenleri

Bileşen	HFK=1.3		HFK=1.9	
	n(kmol)	x (%)	n(kmol)	x (%)
CO ₂	7000	11.09	7000	7.7
H ₂ O	5500	8.72	5500	6.05
SO ₂	31.25	0.0049	31.25	0.0034
O ₂	2920	4.62	6814	9.64
N ₂	47626	75.5	62266	76.57

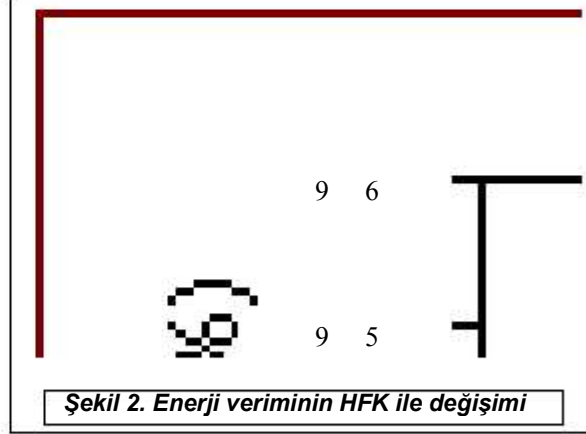
Tablo 3. Baca gazlarının e⁰, C_e^p değerleri [1]

	e ⁰	C _e ^p (T=160°C)
	kJ/kmol	kJ/kmol
CO ₂	20140	7.44
H ₂ O(g)	11710	5.91
SO ₂	303500	7.65
O ₂	3970	5.22
N ₂	720	5.20

4. Sonuç

Bu verilere göre kazan için enerji ve ekserji hesapları yapılmış ve sonuçlar Tablo 4, Şekil 1 ve Şekil 2 verilmiştir. Hesaplanan değerlerden görüldüğü gibi, hava fazlalık katsayısının artması ile verimlerde önemli ölçüde düşüş görülmektedir. Dolayısıyla kazan verimini doğrudan etkileyen etmenlerden biri yanma havasıdır. Fazla hava miktarının artması, yanmaya karışmayan havanın ısıtılarak bacadan dışarı atılması sonucunu ortaya çıkarmakta, bu da baca kayıplarını artırmaktadır. Eksik hava verilmesi durumunda ise yakıtın bir kısmı yanmadan

Q _B (kJ)	2.46x10 ⁹	3.50x10 ⁹
Q _S (kJ)	3.99x10 ⁹	3.89x10 ⁸
Q _K (kJ)	4.22x10 ⁷	4.22x10 ⁷
E _{KB} (kJ)	1.72x10 ⁸	1.75x10 ⁸
E _{KS} (kJ)	5.73x10 ⁸	5.58x10 ⁸
E _{KK} (kJ)	1.63x10 ⁶	1.63x10 ⁶
I (kJ)	3.73x10 ⁹	3.74x10 ⁹
h (%)	94.5	92.1
y (%)	12.79	12.46



Optimum hava fazlalık katsayısı yakıt türüne, kazan tasarımına ve işletme parametrelerine bağlıdır. Bundan dolayı termal bir sistem kurulurken sisteme göre kazan, kazana göre yakıt yakıtına göre HFK seçilmelidir. Örneğin fuel-oil yakan bir kazan için HFK 1.1-1.3 arasında değişmektedir[3]. Yapılan incelemeler sonucunda görülecektir ki; bir çok sistemde gereğinden fazla hava ile çalışılmaktadır. Bunun sonucunda hem hava gereksiz yere ısıtılıp atmosfere atılmakta, hem de yakıt tüketiminin artması sonucu çevre kirliliği ve ekonomik girdilerde artmaktadır.



Tablo1. Yakıtın kütleli analizi [4]

c	h	o	n	S
%	%	%	%	%

0.84 0.11 0.02 0.02 0.01

5. Kaynaklar

[1]. Kotas, T.J., 1995, The exergy method of thermal plant analysis. Krieger publishing

[2]. Akaya, E., 1995, Kazan bacalarındaki ısı kayıplarının belirlenmesi. Termodinamik şubat sayısı sayfa 47-48

[3]. Borat, O., Balcı, M., Sürmen A., 1992, Yanma bilgisi. Teknik eğitim vakfı yayınları.

[4]. Terzioğlu, T., 1997, Kazanlarda yanma verimi ve çevre kirliliğine etkisinin incelenmesi. Y.Lisans tezi, Atatürk Ün. Fen Bil. Enst.

[5]. Onat, K., 1990, Kullanılabilir enerji kaybının azaltılması. Termodinamiğin İkinci kanunu Çalışma Toplantısı, Erciyes Üni. 29-1

[6]. Cornelisen, R.L., 1997, Thermodynamics and sustainable development. Enschede Netherlands.

DUZELTME

Tesisat Mühendisliği Dergimizin 71. sayısında, Doç. Dr. Olcay KINCAIY, Doç. Dr. Recep ÖZTÜRK ve Mak. Müh. Ali Metin YÜCEL'in "Ülkemiz Enerji Bütünlemede Termik Enerji Santralleri" adlı makalesindeki 6. Tabloda bulunan Fuel-oil sütunundaki değerler yapılan bir hata neticesinde Diesel-oil için de aynen tekrarlanmıştır. Aşağıda Tablo

Fuel-oil verileri için yapılan bir daha incelemede Diesel-oil için de aynı verilerin doğruluğu Tablo 6'nın düzeltilmiş hali verilmiştir.

Tablo 6. 2000 Yılında Fuel-oil ve Diesel-oil Yakan TES'in Ana Özellikleri.				
Özellikler	Fuel-oil yakan TES		Diesel-oil yakan TES	
	Ambarlı	Hopa	Aliağa C.C.	Engil G.T.
Net Üretim (GWh)	3.820,8	184,0	852,7	7,3
Ünite Sayısı	5	2	6	1
I. Ünitenin Çalışma Tarihi	1967	1973	1975	1996
Toplam Kurulu Gücü (MW)	630	50	180	15
Yükleme Faktörü (%)	73,5	56,3	62,6	7,2
Yakıt Miktarı (ton/yıl)	96.637,9	67.302	216.912	2.944
Alt Isıl Değer (kw/kg)	40.193	40.193	43.124	43.124
Özgül Isı (MJ/MJ)	2.685	3.808	2,96	4,70
Özgül Yakıt (g/kWh)	252,9	365,8	254,4	403,3
Ortalama Isıl Verim(%)	37,2	26,3	33,8	21,3
Birim Maliyet	Bürüt			
(cent/kWh)	Net			
	4,08	7,02	16,60	28,58
	Karbon 81-86	Hidrojen 10-13	17,08	29,24
Kısa Yakıt Analizi (ağırlık) (%)	Sülfür 2-4 Nitrojen 0-2 Sodyum 3,5 ppm Sediment 0,5 mak.	Su 0-1 Oksijen 0-2 Kül 0,1 max Vanadyum 185 ppm	Karbon 81-86 Sülfür 1,0 max. Kül 0,01 max.	Oksijen 1,0 Hidrojen 0-12
Baca Gazı Emisyonları SO ₂ (kg/MWh)	20,23	29,26	0,51	0,51
NO _x	2,03	2,94	2,21	2,21
Toz	1,31	1,90		
Çevresel Etkileri MDC ^a	+	+	+	+
Önleme Olanakları FGD ^b	-	-	-	-
^a MDC: Mekanik toz tutucu ^b FGD: Baca gazı kükürt arıtma tesisi Kaynak: TEAŞ, 2000a; Anon, 2000b; Anon, 2002.				