

# BACA GAZI ATIK ISISI İLE KAZAN YAKMA HAVASININ ÖN ISITILMASININ FİZİBİLİTESİ

**Meryem Terhan\***

Yrd. Doç. Dr.  
Kafkas Üniversitesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü,  
Enerji Anabilim Dalı, Kars  
meryembalcin@gmail.com

**Kemal Çomaklı**

Prof. Dr.,  
Atatürk Üniversitesi,  
Makine Mühendisliği Bölümü,  
Enerji Anabilim Dalı, Erzurum  
kcomakli@atauni.edu.tr

## ÖZ

Bu çalışmada, atık baca gazından ısı geri kazanımı için bir sistem tasarlanmıştır. Geri kazanılan bu ısının, kazan yakma havasının ön ısıtılması için kullanımı düşünülmüştür. Bu sebeple, 60 MW'lık bir bölgesel ısıtma sisteminin gerçek işletme verileri kullanılmıştır. Sistemin tasarım hesapları ve ekonomik analizi yapılmıştır. Hesaplamalar bu sistemin baca gazından ısı geri kazanım potansiyelinin %1,3'e erişebileceğini göstermektedir. Sistemin geri ödeme süresi 5 ay olarak hesaplanmıştır. Sistemin 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı yakıt tasarrufu, Net Şimdiki Değer Metodu ile 1.523.208,85 TL olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Isı geri kazanımı, baca gazından ısı geri kazanımı, enerji analizi, ekonomik analiz

## FEASIBILITY OF BOILER COMBUSTION AIR PREHEATING WITH FLUE GAS WASTE HEAT

### ABSTRACT

In this study, a system is designed for heat recovery from waste flue gas. The recovered heat is considered to be used for preheating boiler combustion air. For this reason, actual operation data are taken in a 60 MW district heating system. Design calculations and economic analysis of the system are done. Calculations shows that this system can be reach to 1,3% potential heat recovery from flue gas. System's payback period is calculated as five months. During 20 years economic life fuel savings of the system are found to be 1.523.208,85 TL with Net Present Value Method.

**Keywords:** Heat recovery, heat recovery from flue gas, energy analysis, economic analysis

\* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 22.04.2015  
Kabul tarihi : 26.08.2015

Terhan, M., Çomaklı, K. 2015. "Baca Gazı Atık Isısı ile Kazan Yakma Havasının Ön Isıtılmasının Fizibilitesi," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 668, s. 56-63.

## 1. GİRİŞ

Enerjinin daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılmasına bugün için alternatif bir enerji kaynağı olarak yaklaşılmaktadır. Özellikle enerji tüketimi yüksek olan tesislerde, enerjinin verimli kullanılması enerji maliyetini düşürebileceği 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 [1].

Genel olarak kazanlar, yakıtın kimyasal enerjisini yanma sonucu ısı enerjisine dönüştürüp taşıyıcı akışkana ileten ve yüksek basınç altında çalışan kapalı kaplar olarak tanımlanır [2]. Günümüzde ısı ihtiyacını karşılamak için kazanlar kullanılmaktadır. Çeşitli özelliklere sahip bu kazanlar, kullanım yerlerine göre sürekli gelişmiş ve hemen her yerde ısı ihtiyacı için kullanılır duruma gelmiştir [3].

Endüstriyel işlemler açısından bakıldığında, verimliliği artırıcı çalışmalar yakıttan tasarruf sağlar, kaynakların verimli kullanımına ve çevre kirliliğinin azaltılmasına önemli bir katkıda bulunur. Enerji verimliliğinin artırılması, ısı kayıp yerlerinin ve miktarlarının belirlenmesi ile mümkündür [4]. Sanayi tipi bir kazanda kazan verimi %75 civarında, kayıp enerji ise borulardan oluşan kayıplar, radyasyon ve konveksiyon kaybı, sıcak baca gazı kayıpları olup, %25 oranındadır. Geleneksel bir buhar kazanında üretilen enerjinin yaklaşık %16-20 kadarı baca gazlarıyla sistemden ayrılır. Bu oranın çok yüksek olması nedeniyle, ısı geri kazanım sistemlerindeki gelişmeler için baca kayıpları üzerinde durulmalıdır [5].

Ekonomizerler ve hava ön ısıtıcıları, kayıp ısıyı geri kazanma ekipmanları olup, ekonomizerler sadece kazanlarda kullanılırken hava ön ısıtıcıları ise kazan ve ocakların her ikisinde de kullanılır. Kayıp ısıyı geri kazanma da büyük bir potansiyele sahiptirler [6].

Hava ön ısıtıcılarında, yakılan havanın müsaade edilebilir maksimum sıcaklığı, brülörün dizaynıyla sınırlıdır [7]. Genellikle bu sıcaklık, doğalgaz yakıtlı kazanlarda kullanılan brülörler için 60°C'dir.

Enerji fiyatlarındaki artış, ısı geri kazanım ekipmanlarının yatırımlarını karlı ve çoğunlukla birkaç ayda birkaç yıl arasında değişen kısa sürelerde kendini geri öder hale getirmiştir. Bu imkândan yararlanmak için uygun ve etkili bir ısı geri kazanım sisteminin geliştirilmesi önem taşımaktadır [8]. Geçmiş dönemlerde yatırım politikası olarak yatırım maliyeti az, işletme maliyeti yüksek sistemler tercih edilmiştir. Bu nedenle, sistemlerin pek çoğunda önemli ölçüde ısı geri kazanım potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyeli değerlendirmek üzere kurulacak aktif ısı geri kazanım sistemlerinde çoğu zaman yatırım geri ödeme süreleri yukarıda sözü edilen makul süreler içerisinde kalabilmektedir [9].

Bu çalışmada, doğalgaz yakıtlı kazanda bacadan atılan kayıp enerjinin geri kazanımı teorik olarak araştırılmış ve bu kayıp enerjinin geri kazanımı için kazan yakma havasının ön ısıtılması yöntemi incelenmiştir. Bunun için doğalgaz yakıtlı 60 MW'lık bölgesel ısıtma sistemindeki gerçek işletme verileri alınmıştır. Bu sistem için tasarlanan hava ön ısıtıcısı ile elde edilebilecek yakıt tasarrufu hesaplanmış, yöntemin enerji ve ekonomik analizi yapılmıştır.

## 2. ENERJİ ANALİZİ

Doğalgaz yakıtlı kazandan çıkan atık baca gazı enerjisinin değerini saptamak, bir hava ön ısıtıcısıyla bunun ne kadarının geri kazanılabileceğini hesaplamak için enerji analizi yapılmıştır.

Doğalgaz, %95 metan, az miktarda etan, propan, butan ve karbondioksitten oluşan renksiz, kokusuz, zehirsiz ve havadan hafif bir gazdır. Metan molekülünün kimyasal yapısının basit olması nedeniyle yanma işlemi kolay olup, yanma, tam gerçekleşir. Bu nedenle duman, is, kurum ve kül oluşturmaz. Yanması en kolay ayarlanabilen ve yanma verimliliği en yüksek olan yakıttır [10].

Doğalgazın kimyasal içeriği ve hacimsel yüzde değerleri kapalı formülünün hesaplanması için gereklidir.

Yakıtın kuru hava ile tam yanması reaksiyonu sonucunda meydana gelen yanma ürünleri ve mol miktarları aşağıda gösterilmiştir.

$$C_{(\alpha+2y+3z+4t+5u+6d+f)}H_{4x+6y+8z+10t+12u+14d}O_{2f}N_{2e} + \lambda a (O_2 + 3,76N_2) \rightarrow \alpha CO_2 + \beta H_2O + \varepsilon N_2 + \theta O_2 \quad (1)$$

Reaksiyon sonucu yanma ürünleri olarak CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> oluşur. Tablo 1'de, doğalgazın içeriği ve kapalı formülünün hesaplanması gösterilmiştir.

Ürünlerin mol miktarları aşağıdaki formüllerle kmol cinsinden hesaplanabilir.

$$\alpha = n_{CO_2} = (x + 2y + 3z + 4t + 5u + 6d + f) \quad (2)$$

$$\beta = n_{H_2O} = (2x + 3y + 4z + 5t + 6u + 7d) \quad (3)$$

$$a = (2x + 3,5y + 5z + 6,5t + 8u + 9,5d) \quad (4)$$

$$\theta = n_{O_2} = (\lambda - 1) \times (2x + 3,5y + 5z + 6,5t + 8u + 9,5d) \quad (5)$$

$$\varepsilon = n_{N_2} = \lambda \times (7,52x + 13,16y + 18,8z + 24,44t + 30,08u + 35,72d) + e \quad (6)$$

Toplam baca gazı miktarı ise

$$n_{bg} = n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} \quad (7)$$

şeklinde kmol cinsinden hesaplanır.

**Tablo 1.** Doğalgazın Kapalı Formülünün Hesaplanması

	Kimyasal Formülü	Mol Kesri	Kapalı Formülü
Metan	CH <sub>4</sub>	x	x+2y+3z+4t+5u+6d+f
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	y	
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	z	4x+6y+8z+10t+12u+14d
Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	t	
Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	u	2f
Hekzan	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	d	
Azot	N <sub>2</sub>	e	2e
Karbondioksit	CO <sub>2</sub>	f	

Baca gazlarını oluşturan bileşenlerin her birinin mol kesri ise

$$x_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{bg}} \quad x_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_{bg}} \quad x_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_{bg}} \quad x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{bg}} \quad (8)$$

şeklinde hesaplanır. Baca gazlarının ortalama özgül ısısı ise aşağıdaki formülden yararlanılabilir [11].

$$\bar{c}_{p-ort} = \bar{c}_{p-O_2} \times (x_{O_2}) + \bar{c}_{p-O_2} \times (x_{O_2}) + \bar{c}_{p-H_2O} \times (x_{H_2O}) + \bar{c}_{p-N_2} \times (x_{N_2}) \quad (9)$$

Yakıtın yanmasıyla elde edilen yakıt enerjisi aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$\dot{E}_{Ya} = \dot{V}_{Ya} \times H_u \quad (10)$$

Kütlenin korunumu kanunundan yola çıkarak baca gazlarının birim zamandaki kütlesi, yakıtın ve havanın birim zamandaki kütleleri toplamına eşittir.

$$\dot{m}_{Ya} + \dot{m}_{hava} = \dot{m}_{bg} \quad (11)$$

$$\dot{E}_{bg-duy} = \dot{m}_{bg} \times \bar{c}_{p-ort} \times (T_{bg} - T_o) \quad (12)$$

$$\dot{E}_{bg-giz} = (\dot{m}_{bg} \times x_{H_2O}) \times M_{H_2O} \times h_{fg} \quad (13)$$

$$\%e_{kay-duy} = \frac{\dot{E}_{bg-duy}}{\dot{E}_{Ya}} \times 100 \quad (14)$$

$$\%e_{kay-giz} = \frac{\dot{E}_{bg-giz}}{\dot{E}_{Ya}} \times 100 \quad (15)$$

Kayıp enerjinin yıllık parasal değeri; aşağıdaki formülle hesaplanabilir. Formüldeki f, 1 m<sup>3</sup> doğalgazın birim fiyatıdır.

$$P_{kay} = \frac{\dot{E}_{bg-duy} + \dot{E}_{bg-giz}}{4,18 \times H_u} \times f \times 60 \times 60 \times 24 \times 30 \times 12 \quad (16)$$

Baca gazlarının soğutulmasıyla geri kazanılan enerji, çiğlenme noktasının üzerindeki bir sıcaklığa (T<sub>bg-c</sub>) soğutulması durumunda sadece duyulur enerjinin bir kısmı geri kazanılabilir. Çiğlenme noktası altına inildiği zaman ise hem duyulur hem de gizli enerji geri kazanılabilir.

$$\dot{E}_{geri-kaz} = \dot{m}_{bg} \times \bar{c}_{p-ort} \times (T_{bg-g} - T_{bg-c}) \quad (17)$$

### 3. ISI TRANSFER ANALİZİ

Enerji analizinde bulunan baca gazından geri kazanılabilecek enerji için ne büyüklükte bir ısı değiştiricisine ihtiyacımızın olduğunu hesaplamak için ısı transfer analizi yapılmıştır. Isı değiştiricinin toplam boru sayısı, ısı transfer yüzey alanı, boru tarafı ve gövde tarafının basınç düşümleri hesaplanmıştır. Bu basınç düşümünü yenmek için gerekli fan güçleri de bulunmuştur.

Kazanlardan çıkan sıcak atık baca gazı, sisteme eklenecek bir ısı değiştiricisi sayesinde soğutulurken, buradan elde edilecek ısıyla kazan yakma havası ısıtılabilir. Bunun için borulu çapraz akışlı bir ısı değiştiricisi düşünülmüştür. Isı değiştiricisi boru demetlerinden meydana gelmektedir. Boru içlerinden yakma havası, gövdeden boru demetleri üzerinden de baca gazı akmaktadır.

Isı değiştiricinin boru içi hava tarafının ısı transfer katsayısı hesaplamak için gerekli formüller aşağıda verilmiştir [12].

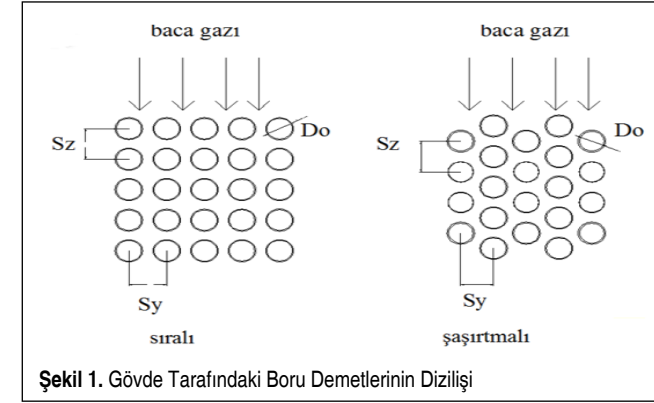
$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4} \quad Re > 10000 \quad (18)$$

$$h_{hava} = \frac{Nu \times k_{hava}}{d_i} \quad (19)$$

Baca gazı tarafındaki taşınım katsayısını bulmak için boru demetlerinin sıralı mı, şaşırtmalı mı dizildiği ve boru arasındaki mesafeler önem taşır. Şekil 1'de, boru demetlerinin sıralı ve şaşırtmalı dizilişi ile borular arasındaki enine adım (Sy) ve boyuna adım (Sz) mesafeleri gösterilmiştir.

$$Nu_D = 0,27 \times Re_{max}^{0,63} \times Pr^{0,36} \times (Pr/Pr_s)^{0,25} \quad (20)$$

$$1000 < Re_{max} < 2 \times 10^5$$



Baca gazı tarafının ısı taşınım katsayısı da aşağıda verilen formülle hesaplanır [13].

$$h_{bg} = \frac{Nu_D \times k_{bg}}{d_o} \quad (21)$$

Toplam ısı transfer katsayısı aşağıdaki formülden bulunabilir. Formüldeki k<sub>boru</sub>, ısı değiştirici boru malzemesinin ısı iletkenliğidir [14-15].

$$U_0 = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i} \times \frac{1}{h_{hava}} + \frac{r_o}{k_{boru}} \times \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{h_{bg}}} \quad (22)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{bg-g} - T_{hava-\zeta}) - (T_{bg-\zeta} - T_{hava-g})}{\ln\left(\frac{T_{bg-g} - T_{hava-\zeta}}{T_{bg-\zeta} - T_{hava-g}}\right)} \quad (23)$$

$$A_o = \frac{\dot{m}_{hava} \times c_{p-hava} \times (T_{hava-\zeta} - T_{hava-g})}{F \times U_0 \times \Delta T_{lm}} \quad (24)$$

Boru tarafı ve gövde tarafı basınç düşümünü hesaplamak için aşağıda verilen formüllerden yararlanılabilir.

$$\Delta P_{boru} = f \times \frac{L_{top}}{d_i} \times \rho_{hava} \times \frac{V_{hava}^2}{2} \quad (25)$$

Formülde verilen f sürtünme faktörü olup, Re sayısına ve türbülans akışa göre çeşitli korelasyonları bulunur. Filonenkonun düz dairesel borular için bulunduğu korelasyon ise aşağıdaki gibidir [14].

$$f = 0,046 \times Re^{-0,2} \quad 3 \times 10^4 < Re < 10^6 \quad (26)$$

Boru tarafındaki basınç düşümünü yenmek için gerekli fan gücü ise

$$W_{fan-hava} = \frac{\dot{Q}_{hava} \times \Delta P_{top}}{\eta_{fan}} \quad (27)$$

Formülde verilen Q<sub>hava</sub>, havanın hacimsel debisidir. η<sub>fan</sub> ise pompanın verimi olup %80 olarak alınmıştır [16].

Baca gazı tarafında boru demetleri üzerinden akan baca gazının giriş ve çıkışı arasındaki basınç düşümü aşağıda verilen formülle hesaplanabilir. Formülde gösterilen ζ değeri, basınç düşümü katsayısıdır ve boru demetlerinin dizilişlerine göre farklılık gösterir.

$$\Delta P_{gövde} = \zeta \times \left( \frac{\rho_{bg} \times V_{bg-ort}^2}{2} \right) \quad (28)$$

Sıralı diziliş için;

$$\zeta = 2 \times \left( \frac{S_y}{d} - 1 \right)^{-0,5} \times Re^{-0,5} \times N_z \quad (29)$$

Basınç düşümünü yenmek için gerekli olan fan gücü ise aşağıda verilen formülle hesaplanır. Formüldeki T<sub>bg-g</sub>, baca gazı giriş sıcaklığı; P<sub>d</sub>, basınç düşümü ile atmosfer basıncının toplamıdır. P<sub>i</sub> ise atmosfer basıncı olup, k, özgül ısı oranıdır. η<sub>fan</sub> ise kompresör verimi olup, bu çalışmada %80 olarak alınmıştır [17].

$$W_{fan-bg} = \frac{\dot{m}_{bg} \times c_{p-bg} \times T_{bg-g} \times \left[ \left( \frac{P_d}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{\eta_{fan}} \quad (30)$$

### 4. EKONOMİK ANALİZ

Isı transfer analiziyle tasarlanan ısı değiştiricinin sağlayacağı yakıt tasarrufu ve geri ödeme süresini irdelemek için ekonomik analiz yapılmıştır.

Ekonomik analizde karşılaştırılması gereken parametreler genellikle şunlardır.

- İlk yatırım maliyeti
- Ekonomik ömür
- Yıllık bakım ve işletme giderleri
- Yıllık tasarruf geliri
- Hurda değeri
- Faiz oranı

Geri kazanılan enerjinin yıllık parasal değeri, yani tasarruf miktarı da aşağıdaki formülle hesaplanabilir. Formüllerdeki f, 1 m<sup>3</sup> doğalgazın birim fiyatıdır.

$$F_{geri-kaz} = \frac{\dot{E}_{geri-kaz}}{4,18 \times H_u} \times f \times 60 \times 60 \times 24 \times 30 \times 12 \quad (31)$$

Ekonomik analizde kullanılan eşdeğer kıymet metodlarından net bugünkü değer metodundan yararlanılmıştır.



**Bugünkü Değer veya Net Bugünkü Değer Metodu:**

Gelecekteki alacak ve/veya borçların şimdiki değerini belirlemek için kullanılır. Bir alternatifte ilişkin şimdiki ve gelecekteki gelirler ile giderler biliniyorsa, uygun bir faiz oranı kullanılarak alternatifin şimdiki değeri hesaplanabilir. Böylece alternatifte ilişkin karar verme işlemi de kolaylaşmış olur. Aşağıda verilen formülle hesaplanabilir. Formülde F, gelirleri; C ise giderleri; bunların alt indisleri olan YM, ilk yatırım maliyetini; İM, işletme giderlerini; TM, büyük tamir ve bakım giderlerini; HD; hurda değerini, YK ise yıllık kar gelirini belirtmektedir. Ayrıca i, faiz oranını; t, büyük tamir ve bakım giderlerinin gerçekleştiği süre ve n ise ekonomik ömrü göstermektedir [18]. Tablo 2’de, bazı birleşik faiz formüllerine ve bunların sembollerine yer verilmiştir.

$$NBD = -C_{YM} - C_{IM} \times (P/A; \%i; n) - C_{TM} \times (P/F; \%i; t) + F_{HD} \times (P/F; \%i; n) + F_{YK} \times (P/A; \%i; n) \quad (32)$$

**Tablo 2.** Önemli Kesikli Birleşik Faiz Formülleri ve Sembollerle Gösterimi [19]

Aranan	Verilen	Formül	Sembol
F	P	$(1+i)^n$	$(F/P, \%i, n)$
P	F	$1/(1+i)^n$	$(P/F, \%i, n)$
F	A	$((1+i)^n - 1)/i$	$(F/A, \%i, n)$
A	F	$i/((1+i)^n - 1)$	$(A/F, \%i, n)$
P	A	$(1+i)^n - 1 / (1+i)^n \cdot i$	$(P/A, \%i, n)$
A	P	$(1+i)^n \cdot i / ((1+i)^n - 1)$	$(A/P, \%i, n)$

**5. SONUÇ**

Bölgesel ısıtma sistemindeki ısı merkezinde üç adet 12.000.000 kcal/h kapasiteli 180/110°C kızgın sulu alev duman borulu kazan bulunmaktadır. Isı merkezindeki otomasyon sisteminden alınan veriler Tablo 3’te gösterilmiştir.

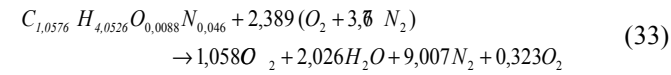
Doğalgaz yakıtlı bir kazanda yakıtın yakılmasıyla oluşan kütle ve enerji denkliklerini hesaplamak için enerji analizi programı yapılmıştır. Programın hazırlanmasında Java paket programı ve Netbeans IDE 7.4 metin editörü kullanılmıştır. Doğalgaz içerisindeki bileşenlerden yola çıkılarak ilk önce doğalgazın kapalı formülü hesaplanmıştır (Şekil 2). Doğalgazın kimyasal içeriği Doğalgaz Dağıtım Şirketi’nden alınmıştır.

**Tablo 3.** Isı Merkezindeki Otomasyon Sisteminden Alınan Veriler

	1. Kazan	2. Kazan	3. Kazan
Hava fazlalık katsayısı $\lambda$	1,16	1,17	1,13
Baca gazı çıkış sıcaklığı °C	161	157	158
Yakıt sarfiyatı m <sup>3</sup> /yıl	4008087	4008087	4008087
Yanma havası sıcaklığı °C	20	20	20

**Şekil 2.** Enerji Analizi Programında Doğal Gazın Kapalı Formülünün Hesaplanması

Doğalgaz kapalı formülü,  $C_{1,0576}H_{4,0526}N_{0,046}O_{0,0088}$ , mol kütleli 17,53 kg/kmol ve yoğunluğu ise 0,74 kg/m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Hava fazlalık katsayısının 1,15 alınmasıyla oluşturulan yanma denklemi aşağıda verilmiştir.

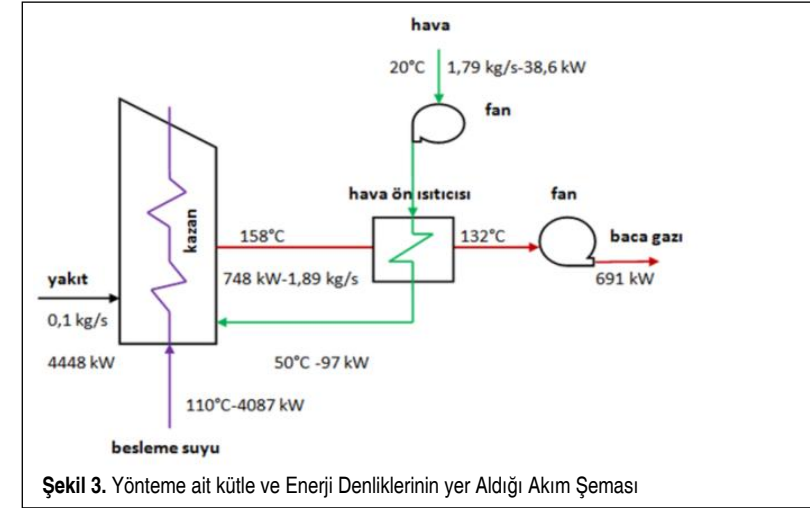
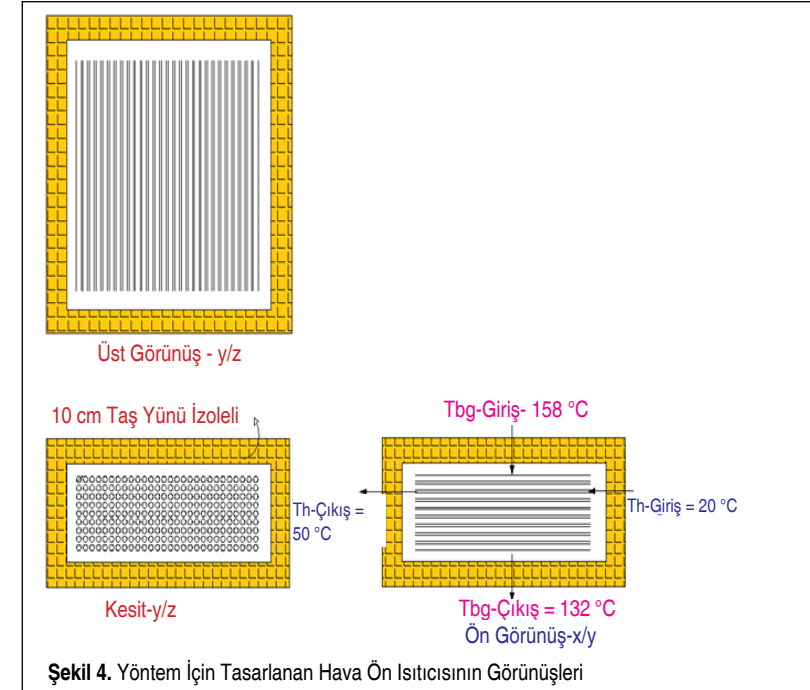
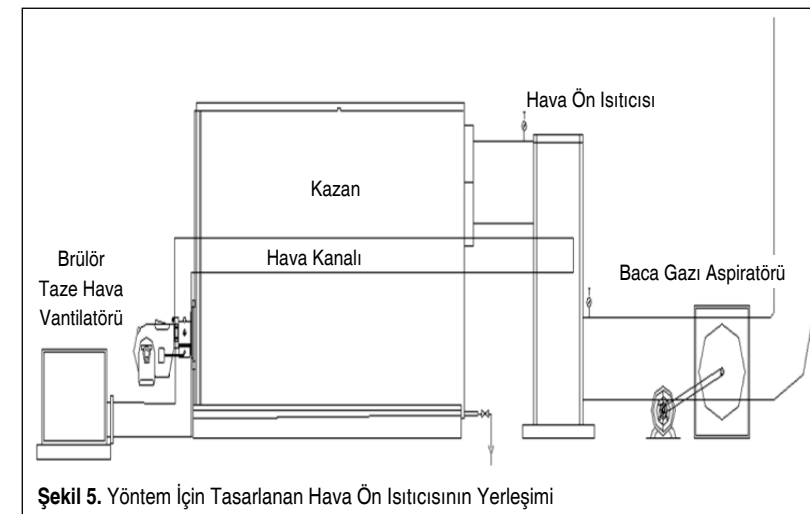


Isı merkezinden alınan verilere göre, yapılan enerji analizinde toplam baca gazı kaybı %16 civarındadır. Bu miktar, çok yüksek bir orandır. Her yıl bu miktarda enerji bacadan dışarı atılmaktadır. Bunun parasal değeri 3 kazan için toplam 1.659.294 TL’dir. Tablo 4’te, yapılan enerji analizinin bir kısım sonuçları gösterilmiştir.

Bu yöntemde, hava ön ısıtıcısı vasıtasıyla kazandan çıkan baca gazlarını soğutup kazana giren yakma havasının ısıtılması düşünülmektedir. 158°C sıcaklığındaki baca gazı

**Tablo 4.** Alınan Verilere Göre Enerji Analiz Sonuçları

	1. Kazan	2. Kazan	3. Kazan
Baca gazı duyulur ısı kaybı (%)	6,82	6,65	6,48
Baca gazı molar kesri H <sub>2</sub> O	0,1619	0,1611	0,1668
Baca gazı gizli ısı kaybı (%)	10,16	10,16	10,16
Baca gazı toplam ısı kaybı (%)	16,98	16,81	16,64
Baca gazı kaybının bedeli (TL/yıl)	558.631	553.115	547.548
Çiğlenme sıcaklığı (°C)	51,16	51,05	51,78
Yakıt debisi (kg/s)	0,1	0,1	0,1
Yakıt enerjisi (kJ/s)	4448	4448	4448
Hava debisi (kg/s)	1,81	1,82	1,75
Baca gazı debisi kg/s	1,90	1,92	1,85

**Şekil 3.** Yönteme ait kütle ve Enerji Denkliklerinin yer Aldığı Akım Şeması**Şekil 4.** Yöntem İçin Tasarlanan Hava Ön Isıtıcısının Görünüşleri**Şekil 5.** Yöntem İçin Tasarlanan Hava Ön Isıtıcısının Yerleşimi

132°C’ye soğurken, 20°C olan yakma havası da 50°C’ye kadar ısıtılmış olur (Şekil 3). Sistemin uygulanmasıyla geri kazanılabilecek enerji %1,3’tür. Baca gazı çıkış sıcaklığı yaklaşık 51°C olan çiğlenme noktası sıcaklığının üzerinde olduğundan, baca gazı içerisindeki su buharının çiğlenmesi gibi bir durum söz konusu olmayacaktır.

Isı merkezindeki kazanlarda kullanılan brülörlerin teknik özellikleri incelendiğinde, brülöre girecek maksimum hava sıcaklığının 60°C olduğu görülmüştür. Bundan dolayı, hava sıcaklığı 50°C’ye kadar ısıtılacak şekilde hava ön ısıtıcısı tasarlanmıştır. Hava ön ısıtıcısı, 25 mm dış çapında 1,2 mm et kalınlığında boru demetlerinden oluşmaktadır. Çiğlenme söz konusu olmadığından boru malzemesi karbon çeliği olarak düşünülmüş olup, boru demeti, sac levha ile çevrelenip 10 cm kalınlığında, bir tarafı taş yünü, diğer tarafı levhayla izole edilmiştir. y yönünde (en) 28 adet, z yönünde (yükseklik) 9 adet, toplamda 252 adet borudan oluşacaktır (Şekil 4). Yüzey alanı 19,79 m<sup>2</sup> olup, boru boyları L<sub>x</sub>, 1 m’dir. Borular arası mesafe, S<sub>y</sub> ve S<sub>z</sub> eşit olup, 0,035 ve borular sıralı dizilmiştir.

Hesaplamalarda ısı değiştirici malzemesi olarak karbon çeliği kullanılmış olup, ısıl iletkenliği k=60,5 W/m.K’dir. Hava ön ısıtıcısının yüksekliği 3 m ve 0,32 metrelik kısmında borular yerleştirilmiştir. Kazandan çıkan duman borusunun çapı 1100 mm olduğu için, ısı değiştiricinin alt ve üst kısmında baca gazının geçeceği boşluklar oluşturulmuştur ve uzunluğu 1,2 m ve genişliği de 1,25 m’dir.

Her bir kazan için bir tane olmak üzere, toplamda üç adet hava ön ısıtıcısı olacaktır (Şekil 5). Ayrıca Tablo 5’te, hava ön ısıtıcısının tasarım hesap sonuçları yer almaktadır.

Bu sistemde hava ön ısıtıcısından çıkan/ısıtılan havanın, brülöre gönderildiği hava kanalı 5 cm kalınlığında cam yünü levha ile yalıtılması ve ısı değiştiricisindeki boru demetlerinin de 1 mm et kalınlığında galvaniz saca kaplanması ve 10 cm taş yünü levha ile izole edilmesi planlanmıştır. Sistemin ekonomik ömrü 20 yıl olarak alınmıştır. Hesaplamalarda faiz oranı %5 olarak alınmıştır. Sisteme ait ekonomik analiz sonuçlarının bir kısmı Tablo 6’da verilmiştir.

Yukarıda verilen Tablodan da görüldüğü gibi,

**Tablo 5.** Yöntem için Kullanılacak Hava Ön Isıtıcısı Tasarım Hesap Sonuçları

	Boru Tarafı-Hava		Gövde Tarafı-Baca Gazı	
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış
$T_{giriş-çıkış}$ °C	20	50	158,67	132
$m$ kg/s	1,79		1,89	
$U$ m/s	7,35		2,27	
$U_{max}$ m/s			7,94	
$Re$	10568,8		7460,9	
$Nu$	33,54		64,76	
$h$ W/m <sup>2</sup> .K	36,99		91,42	
$d_o$ m	0,025		1x0,98x0,32	
$L_{top}$ m	252			
$k$ W/m.K	60,5			
$A$ m <sup>2</sup>	19,79			
$\Delta P$ kPa	5,82		0,0088	
<b>Güç</b> kW	0,045		0,034	

**Tablo 6.** Yöntemin Ekonomik Analiz Sonuçları

İlk yatırım maliyeti	42.938,40 TL
Yıllık tasarruf miktarı	125.671,71 TL
Ekonomik ömür	20 yıl
Hurda değeri	0 TL
Faiz oranı	0,05
Basit geri ödeme süresi	5 ay
İndirgenmiş geri ödeme süresi	5 ay
Bugünkü değer analizi ile sistemin toplam yakıt tasarrufu	1.523.208,85 TL

bu yöntemin geri ödeme süresi sadece 5 aydır. Bu süre, çok makul olup, atık ısı geri kazanımı için düşünülen bu tür sistemlerin ne kadar ekonomik olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca bu tür atık ısı geri kazanım sistemleri yakıt tasarrufu sağlanmasıyla birlikte çevre kirliliğini de azaltmaktadır.

## TEŞEKKÜR

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

Ayrıca Bilgisayar Mühendisi Yusuf DİKAN'a çalışmaya katkısından dolayı teşekkür ederiz.

## SEMBOLLER

$\mu$	Dinamik viskozite (kg/m.s)
$a$	Teorik hava miktarı (kmol)
$A$	Eşit taksit miktarı
$A_o$	Isı transfer alanı (m <sup>2</sup> )
$C_p$	Sabit basınçta ısı kapasitesi (kJ/kg.K)
$d$	Çap (m)
$E$	Enerji (kJ)
$f$	Sürtünme faktörü
$F$	Paranın gelecekteki değeri
$h$	Taşıyım ısı transfer katsayısı (W/m <sup>2</sup> .k)
$HD$	Hurda değer (TL)
$h_{fg}$	Suyun buharlaşma ısısı (kJ/kg)
$HU$	Yakıtın alt ısı değeri (kJ/m <sup>3</sup> )
$i$	Faiz oranı (%)
$\dot{I}M$	İşletme giderleri
$k$	Isıl iletkenlik (W/m.K)
$L$	Uzunluk
$m$	Kütle (kg)
$M_A$	Mol kütlesi (kg/kmol)
$n$	Ekonomik ömür (yıl)
$n$	Mol sayısı (kmol)
$Nu$	Nusselt sayısı
$P$	Basınç (kPa)
$P$	Paranın şimdiki değeri
$Pr$	Prandtl sayısı
$Q$	Hacimsel debi (m <sup>3</sup> /s)
$r$	Yarıçap (m)
$Re$	Reynolds sayısı
$T$	Sıcaklık (°C)
$T_{çığ}$	Çiğlenme noktası sıcaklığı (°C)
$TM$	Büyük tamir ve bakım giderleri (TL)
$T_s$	Yüzey sıcaklığı (°C)
$U_o$	Toplam ısı transfer katsayısı (W/m <sup>2</sup> .K)
$V$	Hız (m/s)
$W$	Güç (kW)

$x$	Mol oranı
$YK$	Yıllık kar (TL)
$YM$	İlk yatırım maliyeti (TL)
$\zeta$	Basınç düşümü katsayısı
$\eta$	Verim
$\lambda$	Hava fazlalık katsayısı
$\nu$	Kinematik viskozite (m <sup>2</sup> /s)
$\rho$	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )

## İNDİSLER

-(üst çizgi)	Mol başına miktar
.(üst mokta)	Birim zamanda miktar
atm	Atmosferik
$b$	Bulk
$bg$	Baca gazı
$\dot{ç}$	Çıkış
$\dot{çığ}$	Çiğlenme
$\dot{duy}$	Duyulur
$g$	Giriş
geri-kaz	Geri kazanılan
$giz$	Gizli
$i$	İç
$lm$	Logaritmik
$max$	Maksimum
$o$	Dış
$ort$	Ortalama
$top$	Toplam
$ya$	Yakıt

## KAYNAKÇA

1. **Çomaklı, K., Yüksel, B., Şahin, B., Karagöz, Ş.** 2006. "Kazan Bacalarında Meydana Gelen Enerji ve Ekserji Kayıpları. Tesisat Mühendisliği Dergisi," sayı 92, s. 12- 16.
2. **Şanlı, A., Sayın, C., Kılıçaslan, İ.** 2006. "Buhar Kazanlarında Değişken Hızlı Sürücü (DHS) Uygulanmasının Verime Etkisi," 9. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 16-17 Kasım 2006, Kırıkkale.
3. **Aras, H.** 1991. "Doğal Gaz Yakan Sistemlerde Baca Gazından Isı Geri Kazanımı. Yüksek Lisans Tezi," Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

4. **Ertem, G., Çelik, B., Yeşilyurt, S.** 2008. "Endüstriyel Tav Fırınlarda Isı Denkliği Hesaplamaları ve Enerji Verimliliğinin Belirlenmesi," IV. Ege Enerji Sempozyumu, 21-23 Mayıs 2008, İzmir.
5. **Willems, D.** 2006. "Advanced System Controls and Energy Savings for Industrial Boilers. Transactions of the Citrus Engineering Conference," vol. 52, p. 11- 22.
6. **Sinanoglu, U., Esen, D. Ö., Karakaş, E.** 1996. "Enerji Ekonomisi Açısından Geri Kazanım Sistemleri," TMMOB 1. Enerji Sempozyumu, 12-14 Kasım 1996, Ankara.
7. **Toklu, E., Kılıçaslan İ., Yiğit K. S., Korkmaz, Y.** 1995. "Tesisatlarda Ekonomizer Ve Hava Ön Isıtıcılarının Seçimi," II. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 10-14 Ekim 1995, Kocaeli.
8. **Selbaş, R.** 1992. "Atık Isı Enerjisinden Yararlanma Yöntemleri ve Uygulamaları," Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
9. **Arısoy, A.** 2001. "Duman Gazlarından Isı Geri Kazanımı," Tesisat Mühendisliği, sayı 64, s. 58-61.
10. **Börekçioğlu, S. S.** 2009. "Doğalgaz ve Altyapı," TMMOB İzmir Kent Sempozyumu, 8-10 Ocak 2009, İzmir.
11. **Çengel, Y. A., Boles, M. A.** 2006. Thermodynamics An Engineering Approach, McGraw- Hill, USA.
12. **Cortina, M.** 2006. "Flue Gas Condenser for Biomass Boilers," Master of Thesis, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Sweden.
13. **Çengel, Y. A.** 2011. Isı ve Kütle Transferi, Güven Bilimsel Yayınları, İzmir.
14. **Kakaç, S., Liu, H.** 1998. Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design. CRC Press, New York.
15. **Chen, Q., Finney, K., Li, H., Zhang, X., Zhou, J., Sharifi, V., Swithenbank, J.** 2012. "Condensing Boiler Applications in the Process Industry," Applied Energy, vol. 89, p. 30- 36.
16. **Goel, N.** 2012. "Design and Performance Analyses of Condensing Heat Exchangers for Recovering Water and Waste Heat From Flue Gas," Master of Science, Lehigh University, Department of Mechanical Engineering, Ann Arbor.
17. **Hazell, D. D.** 2011. "Modeling and Optimization of Condensing Heat Exchangers for Cooling Boiler Flue Gas," Master of Science, Lehigh University, Department of Mechanical Engineering, Ann Arbor.
18. **Okka, O.** 2006. Mühendislik Ekonomisine Giriş Problemler ve Çözümleri, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.