



Energy and economic assessments of waste heat recovery by designs of economizer, condensing economizer and air preheater

Meryem Terhan^{1*}, Emre Özağdaş², Muhammed Arslan Omar²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Gümüşhane University, 29050, Gümüşhane, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kafkas University, 36100, Kars, Türkiye

Highlights:

- Analysis of flue gas loss and recovery
- Design of heat recovery units
- Economic analysis of designed heat recovery units

Keywords:

- Energy efficiency
- Heat recovery units
- Condensing economizer
- Air preheater
- Economic analysis

Article Info:

Research Article

Received: 01.05.2022

Accepted: 19.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1112011

Correspondence:

Author: Meryem Terhan

e-mail:

meryem.terhan@gumushane.edu.tr

phone: +90 456 233 1000 / 1602

Graphical/Tabular Abstract

In the study, the effects of variants such as air excess coefficient, flue gas temperature, boiler capacity and fuel consumption on the heat recovery from the flue gas have been presented in detail. The heat recovery scenarios have been presented for reusing the waste energy from the flue gas for space heating, domestic hot water, and preheating combustion air and the applicability of these scenarios has been investigated in terms of thermodynamics and economics. According to the results of the study, in the second scenario examined to cover the domestic hot water need of the guest house building, the energy savings of the scenario can be provided during 20 years of economic life is \$122,820.83, and it has the highest savings income among the scenarios. In addition, it is possible to recover approximately 50% of the flue gas loss with thanks to the scenario (Figure A). On the other hand, the third scenario of heating the boiler combustion air with waste heat is the easiest and most economical scenario because its payback period is only one year, and there are no extra excavation and pipe costs.

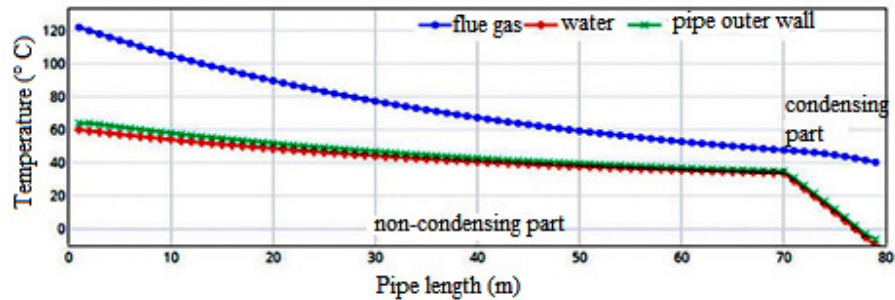


Figure A. Changes in temperatures of flue gas, water and outer wall of pipe depending on pipe length

Purpose: In the study, we have purposed heat recovery of waste flue gas from boilers of Kafkas University district heating system. The designs of heat recovery units are investigated in terms of thermodynamics and economics for applications such as space heating, domestic hot water and preheating combustion air thanks to the recovered heat.

Theory and Methods: The measurements such as flue gas temperature, air excess coefficient, and flue gas velocity were taken by TESTO flue gas analyzer and integrated pitot tube. Condensing economizer in the heat recovery unit is designed using Colburn and Hougen method and the one-dimensional finite difference method. The equivalent annual cost method is utilized for the economic analysis of the heat recovery units.

Results: The waste heat loss of flue gases from boilers of Kafkas University district heating system has been calculated between 6-8% according to the combustion analysis and annual cost of this heat loss has been found as \$58,658.79. Thanks to the condensing economizer with a heat transfer area of 6.53 m², the flue gas outlet temperature can be reduced to 40°C and 50% of the flue gas loss can be recovered.

Conclusion: There are high heat losses in district heating systems, and by determining the locations and qualities of these heat losses, the design and application of appropriate heat recovery systems can large extent contribute to the country's economy by reducing heat losses.



Ekonomizer, yoğuşmalı ekonomizer ve hava ön ısıtıcı tasarımları ile atık ısı geri kazanımının enerji ve ekonomik değerlendirilmesi

Meryem Terhan^{1*}, Emre Özağdas², Muhammed Arslan Omar²

¹Gümüşhane Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29050, Gümüşhane, Türkiye

²Kafkas Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 36100, Kars, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Baca gazı kaybı ve geri kazanımının analizi
- Isı geri kazanım ünitelerinin tasarımı
- Tasarlanan ısı geri kazanım ünitelerinin ekonomik analizi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 01.05.2022

Kabul: 19.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1112011

Anahtar Kelimeler:

Enerji verimliliği,
ısı geri kazanım üniteleri,
yoğuşmalı ekonomizer,
hava ön ısıtıcısı,
ekonomik analiz

ÖZ

Bu çalışmada, Kafkas Üniversitesi, bölgesel ısıtma sisteminin kazanlarından çıkan baca gazlarının atık ısı kaybının yapılan yanma analizine göre yaklaşık %6-8 arasında ve bu kayıp ısının yıllık giderinin 58.658,79 \$ olduğu hesaplanmıştır. Enerji verimliliği ve ülke ekonomisi açısından bu kayıp enerjinin mümkün olduğunca geri kazanılarak yakıt ve enerji tasarrufu elde edilmesi gerektiği düşünülmektedir. Bu kapsamda, hava fazlalık katsayısı, baca gazı sıcaklığı, kazan kapasitesi ve yakıt tüketimi gibi değişkenlerin atık baca gazı enerjisinin ısı geri kazanımına olan etkileri detaylıca incelenmiştir. Bu kayıp enerjiden mahal ısıtmasında, sıcak su eldesinde ve kazan yakma havasının ısıtılmasında yararlanılması gibi birkaç ısı geri kazanım yöntemi sunulmuş, bu yöntemlerin uygulanabilirliği termodinamik ve ekonomik açıdan araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, Konukevi binasının sıcak su ihtiyacının karşılanması için incelenen 2. yöntemin 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayabileceği enerji tasarrufu 122.820,83 \$ olup yöntemler arasında en yüksek tasarruf gelire sahiptir. Ayrıca, bu yöntemle baca gazı kaybının yaklaşık %50'sini geri kazanmak mümkündür. Buna karşılık kazan yakma havasının atık ısıyla ısıtılması yöntemi, geri ödeme süresinin sadece 1 yıl olması ve ekstra kazı ve boru maliyetlerinin olmaması sebebiyle uygulanması en kolay ve en ekonomik yöntemdir.

Energy and economic assessments of waste heat recovery by designs of economizer, condensing economizer and air preheater

H I G H L I G H T S

- Analysis of flue gas loss and recovery
- Design of heat recovery units
- Economic analysis of designed heat recovery units

Article Info

Research Article

Received: 01.05.2022

Accepted: 19.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1112011

Keywords:

Energy efficiency,
heat recovery units,
condensing economizer,
air preheater,
economic analysis

ABSTRACT

In this study, the waste heat loss of flue gases from the boilers of Kafkas University district heating system has been calculated between 6-8% according to the combustion analysis and the annual cost of this heat loss has been found as \$58,658.79. In terms of energy efficiency and the national economy, we think that this lost energy should be recovered as much as possible and fuel and energy savings should be achieved. In the paper, the effects of variants such as air excess coefficient, flue gas temperature, boiler capacity and fuel consumption on the heat recovery from flue gas have been presented in detail. The heat recovery scenarios have been presented for reusing this waste energy for space heating, domestic hot water, and preheating combustion air and the applicability of these scenarios has been investigated in terms of thermodynamics and economics. According to the results of the study, in the second scenario examined to cover the domestic hot water need of the guest house building, the energy savings of the scenario can be provided during 20 years of economic life is \$122,820.83, and it has the highest savings income among the scenarios. In addition, it is possible to recover approximately 50% of the flue gas loss with thanks to the scenario. On the other hand, the third scenario of heating the boiler combustion air with waste heat is the easiest and most economical scenario because its payback period is only one year, and there are no extra excavation and pipe costs.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *meryem.terhan@gumushane.edu.tr, emreozagdas@gmail.com, marslan.omar@gmail.com / Tel: +90 456 233 1000 / 1602

1. Giriş (Introduction)

Enerji, ekonomik gelişme ve refah seviyesinin artmasında önemli bir faktördür. Enerji tüketimi, yaşam standardındaki iyileşme ve büyük şehirlere göçün, nüfusun ve şehirleşmenin artmasına bağlı olarak hızlı bir şekilde artmaktadır [1]. Artan enerji talebi ve çevre bilinci bütün dünya üzerinde enerji kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanmayı zorunlu kılmaktadır. Bu yüzden fosil yakıtlı güç ve ısıtma sistemlerinin tasarım aşamasında ana amaç enerji tasarruflarının maksimize edilip enerji tüketiminin minimize edilmesidir [2]. Endüstri, konut, ulaşım ve tarım gibi alanlarda yüksek enerji tüketilmektedir. Özellikle bu alanlardan konut sektörü yüksek ısı kayıpları nedeniyle enerji tüketimi üzerinde bir hayli dikkat çekmektedir [3]. Dünyada küresel enerji talebinin en büyük kısımlarından birini %40 ile konut sektörü oluşturmaktadır. Konut sektöründe mahal ısıtmaya harcanan enerji tüketim miktarı, sıcak su ısıtması, pişirme, dondurma ve soğutma gibi diğer tüketim miktarlarından yaklaşık iki kat daha fazladır [4]. Konut sektöründe kullanılan enerjinin büyüklüğü dikkati yakma sistemlerine yani kazanlara çekmiştir.

Binaların ısıtma ve sıcak su ihtiyacı için kullanılan bölgesel ısıtma sistemleri, ısının bir merkezde üretilerek mahalle veya kampüs gibi bir bölge içerisindeki binalara aktarılmasıdır [5]. Bölgesel ısıtma sistemlerinin nasıl çalıştığını ve bu sistemleri belirleyen faktörler; ısı transfer akışkanı, taşınan ısı enerjisi ve kullanılan ısı kaynağıdır. Isı taşıyan akışkan olarak; genellikle düşük basınçlı buhar, sıcak su ve kızgın su kullanan sistemler tercih edilir [6]. Bölgesel ısıtma sistemleri, CO₂ emisyonunun azalmasıyla hava kalitesini iyileştirerek ve enerji ihtiyacının kontrol altına alınmasıyla enerji ihracatını düşürerek ülke ekonomisine katkı sağlamasından dolayı büyüyen şehirlerde artan enerji sorununun çözümü olmaktadır [7]. Bölgesel ısıtma sistemlerinin avantajları arasında ısı üretiminde yüksek verimlilik, kullanılabilen yakıt çeşitliliği ve çevre üzerinde nispeten düşük etkileşim sayılabilir [8]. Enerji verimliliği, hem çevre kirliliğinin azalmasını hemde kaynakların daha verimli kullanımını sağlar. Enerji verimliliğinin artması için ısı kayıp yerlerinin belirlenip bunların azaltılmasına yönelik işlemler yapmak gerekir [9]. Geleneksel sanayi tipi bir kazanın termal verimi %75 civarında olup, borulardan kaynaklanan kayıplar, kazanın radyasyon ve konveksiyon kaybı ve en önemli oranı oluşturan sıcak baca gazı kayıpların tümü ise %25 oranındadır [10]. Kazanlardaki baca gazlarından kaynaklanan kayıp ısının bir kısmı ekonomizer, yoğunlaşma ekonomizer ve hava ön ısıtıcısı gibi ısı değiştiriciler vasıtasıyla geri kazanılabilir. Ekonomizerler sadece kazanlarda kullanılırken hava ön ısıtıcısı ise kazan ve ocakların her ikisinde de kullanılır. Kayıp ısıyı geri kazanma da büyük bir potansiyele sahiptirler. [11]. Enerji bakımından dışa bağımlı olan ülkemizde birçok tesiste ciddi ısı kayıpları mevcuttur. Yeni yapılan tesislerde bu tür enerji geri kazanımlarına dikkat edilse de eski tesislerde hala ciddi kayıplar vardır. Bu kayıplardan en önemlisini, en yüksek orana sahip olan sıcak gazlar vasıtasıyla atmosfere atılan, dolayısıyla da çevre kirliliğine sebep olan baca gazı kaybıdır. Enerji tasarrufu için tüm bu tesislerdeki kayıp enerjilerden olabildiğince yararlanmak gerekir. Sadece ısıtma sistemlerinde değil fırınlarda, çimento, tekstil sanayi gibi birçok sanayi alanında bu çalışmada yapılması planlanan enerji geri kazanım sistemleriyle yüksek miktarda enerji geri kazanımı yapılabilir. Bu da topeykün bakıldığında ülke ekonomisine ciddi bir kazançtır. Ayrıca bu tür sistemlerin geri ödeme süreleri de birkaç yıl gibi oldukça kısa olmasına karşın kullanım ömürleri de en az 10 yılın üzerindedir.

Literatürde konu ile ilgili bazı çalışmalar özetlenirse; Che vd. [12] gaz yakıtlı yoğunlaşma bir kazanda baca gazını soğutmak için sıralı düz borulu bir yoğunlaşma ekonomizer tasarlamışlardır. Çalışmada yoğunlaşmayan gazlarla birlikte su buharından oluşan baca gazı

karişiminin yoğunlaşmasında Colburn Hougen metodu kullanılmıştır. Pena ve Blanco [13] bu çalışmada doğalgaz yakıtlı bir kazana bağlı ekonomizerdeki su buharının çığlenme noktasını, baca gazından yoğunlaşan suyun toplam miktarını ve yoğunlaşmanın hangi bölgede oluştuğunu belirlemişlerdir. Levy vd. [14] bir güç santralının atık baca gazındaki su buharının geri kazanımı için yoğunlaşma bir ekonomizerin kullanılmasını incelemişlerdir. Çalışmada baca gazı 40°C'ye kadar soğutulmuştur. Jeong vd. [15] baca gazındaki su buharının ısısını soğuk suya vererek bir yoğunlaşma ekonomizerde yoğunlaşmasıyla ilgili ısı ve kütle transfer bağıntıları için analitik bir model oluşturmuşlardır. Analitik modeli geçerliliğini göstermek için pilot ölçekli bir ısı değiştirici kullanılmıştır. Hill [16] tez çalışmasında bir tesis için atık ısı geri kazanım sistemi tasarımı yapmıştır. Bu tesis için birçok ısı geri kazanım sistemi düşünülmüş ve yoğunlaşma ekonomizer tasarımı yapılmıştır. Chen vd. [17] bu çalışmada 40 MW kapasiteli bir bölgesel ısıtma sistemindeki atık ısıyı geri kazanmak için kazana ilave edilecek tek geçişli gövde borulu yoğunlaşma bir ısı değiştirici tasarımının fizibilitesini yapmışlardır. Li vd. [18] çalışmalarında yoğunlaştırucularda yoğunlaşmayan gaz mevcudiyetindeki su buharının yoğunlaşmasını incelemek için bir matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Model sonuçları ile literatürdeki deneyel veriler karşılaştırılmış, uyumlu oldukları gözlenmiştir. Alkhamis vd. [19] Muthah Üniversitesi kampusunun enerji geri kazanım potansiyelini araştırarak öğrenci mutfak fırınının atık baca gazlarından enerji geri kazanmak amacıyla bir ısı değiştiricisi tasarlamışlardır. Bu ısı değiştiricisi sistemi vasıtasıyla atık ısının %60'dan fazlasının geri kazanılabileceği ve bu yatırımın geri ödeme süresinin oldukça kısa olduğu sonucuna varılmıştır. Bhattacharjee [20] çalışmasında bir kimya fabrikasındaki atık ısıyı geri kazanmak için yoğunlaşma ekonomizer kullanımını incelemiştir. Kullanılan yoğunlaşma ekonomizer yardımıyla kazanın besleme suyunun ısıtılması amaçlanmıştır. Yoğunlaşma ekonomizerin, ekonomik analizi yapılmış ve geri ödeme süresi bulunmuştur. Bujak [21] kazanlardaki kütle ve enerji denklemlerini incelemiş ve kazandan çıkan baca gazlarının taşıdığı enerjiyi geri kazanmak için kullandığı ekonomizer yardımıyla %4-7 oranında ısı geri kazanımı sağlamıştır. DeFrees vd. [22] bu çalışmada bir tesisten 180°C sıcaklıkta çıkan baca gazını soğutmak için 37 m² yüzey alanına sahip teflon kaplama bir yoğunlaşma ekonomizer tasarlamışlardır. Çalışmada yoğunlaşma ekonomizerde 15°C sıcaklığındaki giren şebeke suyunun sıcaklığı, baca gazlarından ısı çekerek 50°C'ye çıkarken baca gazı çıkış sıcaklığı ise 60°C'ye kadar düşmüş olup elde edilen yıllık enerji tasarrufu 4357 GJ olarak hesaplanmıştır. Hwang vd. [23] gaz yakıtlı bir kazandaki baca gazındaki gizli ısıyı geri kazanmak için titanyum borulu bir ısı değiştiricisi kullanılmasıyla ısı ve kütle transferi karakteristiklerini araştırmışlardır. Shi vd. [24] bir güç santralinin baca gazından duyulur ve gizli ısıyı geri kazanmak için kompakt bir ısı değiştirici kullanımını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Isı değiştiricideki ısı transfer ve basınç düşümü karakteristikleri teorik olarak çalışılmış olup yeni bir birleşik taşınım-yoğunlaşma ısı transferi korelasyonu ısı ve kütle transfer benzeşim modelleri kullanarak türetilmiştir. Xiao vd. [25] Çin'de 600 MW'lık güç santralini için bir ekonomizer sistemi tasarlamışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, asit çığlenme noktası sıcaklığı yakınına kadar baca gazı soğutulduğunda enerji tasarrufu etkilerinin oldukça yükseldiği görülmüştür. Tang vd. [26] bir kazan ekonomizeri tasarımı yaptıkları çalışmada, toplam ısı transfer alanı, boru demetlerinin sayısı, boru dış çapı gibi tasarım parametreleri verilmiştir. Babu vd. [27] çapraz akışlı sıralı dizilişli, kanatlı boru demetinden oluşan bir ekonomizer tasarlamışlardır. Tasarlanan ekonomizerle ısı transfer performansını artırıp, basınç düşümünü azaltmayı amaçlamışlardır. Chantasiwan [28] yaptığı çalışmada bir kazan için ekonomizer, hava ısıtıcısı ve baca gazı kurutucusunun kurulum maliyetini minimum yapacak optimum tasarım parametrelerini belirlemiştir. Eyoidoğan vd. [29] bir sanayi kuruluşunun LNG yakıtlı haddehane tav fırınında enerji verimliliği

çalışması yapmışlardır. Çalışmada, fırın için sıcaklık, basınç, hız ve yanma gazı ölçümleri yapılarak kütle ve enerji denklilikleri çıkarılmıştır. Çalışma sonucuna göre fırının genel verimi %52,76 olarak hesaplanmış olup fırına eklenecek yüksek kaliteli yeni bir reküperatör tasarımıyla yıllık 150910 \$ tasarruf edilebileceği ve geri ödeme süresinin 4,6 ay olduğu gibi sonuçlara varılmıştır. Topal vd. [30] Çatalağzı Termik Elektrik Santralının kojenerasyon tesise dönüştürülüp Zonguldak il merkezinde bölgesel ısıtma yapılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, santrali kojenerasyon sistemine dönüştürmek için dört farklı model geliştirilmiş ve enerji analizleri yapılmıştır. Bölgesel ısıtma yapmak için en uygun yerin, santralin enerjiden yararlanma oranını en yüksek yapan ara buhar alma yeri olduğu belirlenmiştir. Terhan ve Çomaklı [31] Atatürk Üniversitesi bölgesel ısıtma sisteminden çıkan atık baca gazlarındaki gizli ısıyı geri kazanmak için yoğunlaşmalı ekonomizer tasarımı yapmışlardır. Çalışmada tasarlanan yoğunlaşmalı ekonomizer yardımıyla baca gazı çıkış sıcaklığı 40°C'ye düşürülerek baca gazından %10,6 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada yüksek ısı kayıpları nedeniyle bölgesel ısıtma sistemindeki kazanlardan çıkan baca gazlarından enerji geri kazanarak mahal ısıtma, sıcak su üretimi ve kazan yakma havasının ısıtılması için kullanılacak ekonomizer, yoğunlaşmalı ekonomizer ve hava ön ısıtıcısı tasarım hesapları incelenmiştir. Kazanlara yanma analizi yapılarak geri kazanılması düşünülen enerjinin kalitesi ve ne maksatla kullanılabileceği termodinamik ve ekonomik açıdan ele alınmıştır. Bu çalışmanın literature katkısı, özgün değeri ve içerdiği yenilikler aşağıda özetlenmiştir:

- Çalışmada nemli hava ile doğalgaz yakıtın kazanda yanma denklemleri detaylı bir şekilde verilmiştir. Birçok çalışmada doğalgaz, gaz karışımı olarak değil sadece metan olarak ele alındığı görülmektedir.
- Hava fazlalık katsayısı, baca gazı sıcaklığı, kazan kapasitesi ve yakıt tüketimi gibi değişkenlerin atık baca gazı enerjisinin ısı geri kazanımına olan etkileri detaylıca incelenmiştir.
- Sonlu farklar metoduna göre yoğunlaşmalı ekonomizer tasarım hesapları kapsamlı olarak sunulmuştur.
- Yanma analizi, baca gazı enerji analizi ve ısı geri kazanım ünitelerinin ısı transfer analizleri ile ekonomik analiz kısımları tek bir çalışma altında verilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Kafkas Üniversitesi'ne bağlı Merkez kampüsünde 1 No'lu Isı Merkezi ve Paşayaır kampüsünde ise 2 No'lu ısı merkezi olmak üzere iki tane ısı merkezi bulunmaktadır. Her bir kampüsün birbirinden bağımsız olarak bölgesel ısıtma sistemi ile ısı ihtiyacı karşılanmaktadır. Merkez kampüsündeki 1 No'lu Isı Merkezi'nde farklı kapasitelerde birçok kazan bulunmakla birlikte 5.000.000 ve 10.000.000 kcal/h kapasitelerde iki kazan aktif olarak kullanılmaktadır. Kampüs içerisinde fakülte binaları, idari binalar, hastane binaları, lojman binaları, kapalı yüzme havuzu binası, öğrenci yurt binaları, kongre binası ve merkezi kafeterya binası bulunmaktadır. Paşayaır kampüsü 2 No'lu Isı Merkezi'nde 2.500.000 kcal/h eş kapasitelerde 4 adet kazan bulunmakta olup 3 tanesi aktif olarak kullanılmaktadır. Kampüs içerisinde fakülte binaları, lojman binaları, Kaz Üretim Tesisi, Et ve Süt Ünitisi Tesisi, KAKÜV okul binası ile konukevi bulunmaktadır. Her iki kampüse ait yakıt tüketim değerleri, KARGAZ doğalgaz firmasından alınmıştır. Aktif olarak çalışan kazanların baca gazı ölçümleri için TESTO 340 baca gazı analizörü kullanılmıştır. Bu cihazla takılabilen Pitot tüpü vasıtasıyla baca gazı hız değerleri elde edilmiştir. TESTO 435 Çok Fonksiyonlu Ölçüm Cihazı ve Termal Kamera vasıtasıyla yüzey sıcaklık değerleri, ortam sıcaklığı ve nem değerleri alınmıştır. Yoğunlaşmalı ekonomizer tasarım hesaplarında

Colburn Hougén metodu ve tek boyutlu sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Isı geri kazanım ünitelerinin ekonomik analizleri için yıllık eşdeğer analiz metodu kullanılmıştır.

3. Teorik Analiz (Theoretical Analysis)

Doğalgazın bir kazanda nemli hava ile tam yanma reaksiyonu R1'de gösterilmiş olup reaksiyondaki a değeri ise Eş. 1'de yanma ürünlerinin mol miktarları ise Eş. 2-Eş. 5'te gösterilmiştir. Baca gazının toplam mol miktarı ise Eş. 6'da verilmiştir [32].

$$C_{(x+2y+3z+4t+5u+6d+f)}H_{(4x+6y+8z+10t+12u+14d)}O_{2f}N_{2e} + \lambda a(O_2 + 3,76N_2 + \varepsilon(H_2O)) \rightarrow \alpha CO_2 + \beta(H_2O) + \phi N_2 + \theta O_2 \quad (R1)$$

$$a = 2x + 3,5y + 5z + 6,5t + 8u + 9,5d \quad (1)$$

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

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

$$\phi = n_{N_2} = e + (a \cdot \lambda) \quad (4)$$

$$\theta = n_{O_2} = (a \cdot \lambda) - a \quad (5)$$

$$n_{bg} = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} + n_{O_2} \quad (6)$$

Kazana kütle denkliği uygulanırsa baca gazının birim zamandaki kütlesi, yakıtın ve havanın birim zamandaki kütleleri toplamına eşit olup olmaktadır. Yakıt, hava ve baca gazının birim zamandaki kütleleri sırasıyla Eş. 7-Eş. 9 yardımıyla hesaplanabilir. Eşitliklerde kullanılan λ , M_a , \bar{c}_p ve ρ_y ifadeleri, sırasıyla hava fazlalık katsayısını, mol kütlelerini, baca gazı karışımının ortalama molar özgül ısısını ve yakıtın yoğunluğunu göstermektedir [33]. Baca gazının mol kütlesi Eş. 10 ve baca gazının molar özgül ısısı ise Eş. 11 vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$\dot{m}_y + \dot{m}_{hava} = \dot{m}_{bg} \quad (7)$$

$$\dot{m}_y = \dot{V}_y \times \rho_y \quad (8)$$

$$\dot{m}_{hava} = \frac{\dot{m}_y \times 4,76 \times \lambda \times M_{ahava}}{M_{ayakit}} \quad (9)$$

$$M_{abg} = x_{CO_2} \times M_{aCO_2} + x_{H_2O} \times M_{aH_2O} + x_{O_2} \times M_{aO_2} + x_{N_2} \times M_{aN_2} \quad (10)$$

$$\bar{c}_{p-bg} = x_{CO_2} \times \bar{c}_{p-CO_2} + x_{H_2O} \times \bar{c}_{p-H_2O} + x_{O_2} \times \bar{c}_{p-O_2} + x_{N_2} \times \bar{c}_{p-N_2} \quad (11)$$

Doğalgazın yanmasıyla elde edilen yakıt enerjisi ise Eş. 12 ile hesaplanır. Formüldeki V_y , yakıt sarfiyatı olup H_u ise yakıtın alt ısıl değeridir.

$$\dot{E}_y = \dot{V}_y \times H_u \quad (12)$$

Baca gazlarının duyulur ve gizli enerjisi sırasıyla Eş. 13 ve Eş. 14 vasıtasıyla hesaplanabilir. Formülde h_{fg} , suyun buharlaşma ısısını, T_o ise ortam sıcaklığını göstermektedir [34].

$$\dot{E}_{bg-duy} = \frac{\dot{m}_{bg}}{M_{abg}} \times \bar{c}_{p-ort} \times (T_{bg} - T_o) \quad (13)$$

$$\dot{E}_{bg-giz} = \left(\frac{\dot{m}_{bg}}{M_{abg}} \times \frac{n_{H_2O}}{n_{bg}} \right) \times M_{aH_2O} \times h_{fg} \quad (14)$$

Baca gazı duyulur ve gizli ısı kayıp oranı ise Eş. 15 ile hesaplanabilir.

$$\eta_{bg-duy} = \frac{\dot{E}_{bg-duy}}{\dot{E}_y} \quad \eta_{bg-giz} = \frac{\dot{E}_{bg-giz}}{\dot{E}_y} \quad (15)$$

Baca gazından enerji geri kazanımını sağlayacak ekonomizer, yoğuşmalı ekonomizer ve hava ön ısıtıcısı gibi ısı değiştiricileri tipleri için çapraz akışlı, sıralı düz boru demetli tasarım ele alınmıştır. Ekonomizer ve yoğuşmalı ekonomizerde boru içinden su, hava ısıtıcısında hava akarken, boru demetleri üzerinden baca gazı akmaktadır. Ekonomizer ve hava ön ısıtıcısında baca gazı tarafında herhangi bir yoğuşma gözlenmediğinden tek fazlı akış söz konusudur. Yoğuşmalı ekonomizerde ise baca gazından soğuk suya transfer edilen ısıyla baca gazı soğurken ısı değiştiricinin dış duvar sıcaklığı su buharının çiğlenme noktası sıcaklığına ulaşınca baca gazındaki su buharı yoğuşarak sıvı hale geçmeye başlar. Bu durumdan sonra ısı değiştiricinin baca gazının aktığı kısım olan gövde tarafında iki fazlı akış (yoğuşan su ve baca gazındaki yoğuşmayan gazlar) ve suyun aktığı kısım olan boru tarafındaysa tek fazlı akış söz konusudur.

Yoğuşmalı ekonomizer hesaplarında sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Isı değiştiricisi boru boyunca meshlere ayrılıp her bir kontrol hacmi için, su ve baca gazının giriş ve çıkış sıcaklıkları, boru duvarının iç ve dış sıcaklıkları hesaplanmaktadır. Böylece bir önceki kontrol hacminden çıkan sonuçlar bir sonraki kontrol hacmine giren değerler olarak ele alınmaktadır. Isı değiştiricinin girişinde yoğuşma henüz başlamadığından dolayı giriş boru duvar sıcaklığı baca gazı ve soğuk su arasındaki toplam ısı dengesinin kullanılmasıyla hesaplanabilir [10]. Toplam ısı transfer hızı Eş. 16 ile toplam ısı direnç Eş. 17'de verilmiştir. Ayrıca baca gazının çıkış sıcaklığı Eş. 23'le, suyun çıkış sıcaklığı ise Eş. 24'le hesaplanabilir. Şekil 1'de yoğuşma başlamadan önce baca gazı ve soğuk su için ısı direnç ağı gösterilmiştir.

$$\dot{Q} = \frac{T_{bg} \times T_{su}}{R_{top}} \quad (16)$$

$$R_{top} = R_{bg} + R_{duvar} + R_{su} \quad (17)$$

$$R_{bg} = \frac{1}{2 \times \pi \times r_2 \times L_{boru} \times h_{bg}} \quad (18)$$

$$R_{duvar} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times \pi \times k \times L_{boru}} \quad (19)$$

$$R_{su} = \frac{1}{2 \times \pi \times r_1 \times L_{boru} \times h_{su}} \quad (20)$$

$$\dot{Q} = h_{bg} \times A_o \times (T_{bg} - T_{do}) \quad (21)$$

$$T_{do1} = T_{bg1} - \frac{\dot{Q}_1}{h_{bg} \times A_o} \quad (22)$$

$$T_{bg2} = \frac{(\dot{m}_{bg} \times c_{p-bg} - \frac{h_{bg} \times A_o}{2} \times T_{bg1} + h_{bg} \times A_o \times T_{do1})}{\dot{m}_{bg} \times c_{p-bg} + \frac{h_{bg} \times A_o}{2}} \quad (23)$$

$$T_{su2} = T_{su1} - \frac{h_{bg} \times A_o \times (T_{bgort} - T_{do1})}{\dot{m}_{su} \times c_{p-su}} \quad (24)$$

$$T_{di2} = T_{su2} + \frac{\dot{m}_{su} \times c_{p-su} \times (T_{su1} - T_{su2})}{h_{su} \times A_i} \quad (25)$$

$$T_{do2} = T_{di2} + \frac{\dot{m}_{su} \times c_{p-su} \times (T_{su1} - T_{su2}) \times \ln(r_2/r_1)}{2 \times \pi \times k \times L_{boru}} \quad (26)$$

Isı değiştiricisinde yoğuşma başladığı zaman yukarıdaki bağıntılar yoğuşmalı kısımda eksik kalmış olur. Yoğuşan gaz karışımının sıcaklık ve konsantrasyon gradyanı Şekil 2'de gösterilmiştir.

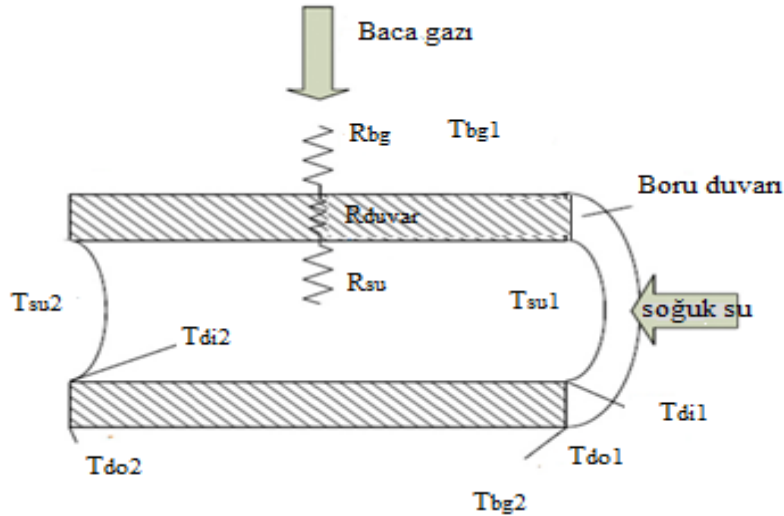
Baca gazı su buharı ile yoğuşmayan gaz karışımında olduğu için baca gazındaki su buharının yoğuşması olayında ana taşınım eşitliğini Colburn ve Houggen geliştirmiştir. Colburn-Houggen denkleminin kirlenme faktörü, boru duvar direnci ve yoğuşma filminin termal direncinin ihmal edilmesiyle elde edilen son hali Eş. 27'de verilmiştir [10].

$$[h_{bg} \times (T_{bg} - T_i) + k_m \times h_{fg} \times (x_{H_2O-b} - x_{H_2O-i})] \times dA = \dot{m}_{su} \times c_{p-su} \times dT_{su} \quad (27)$$

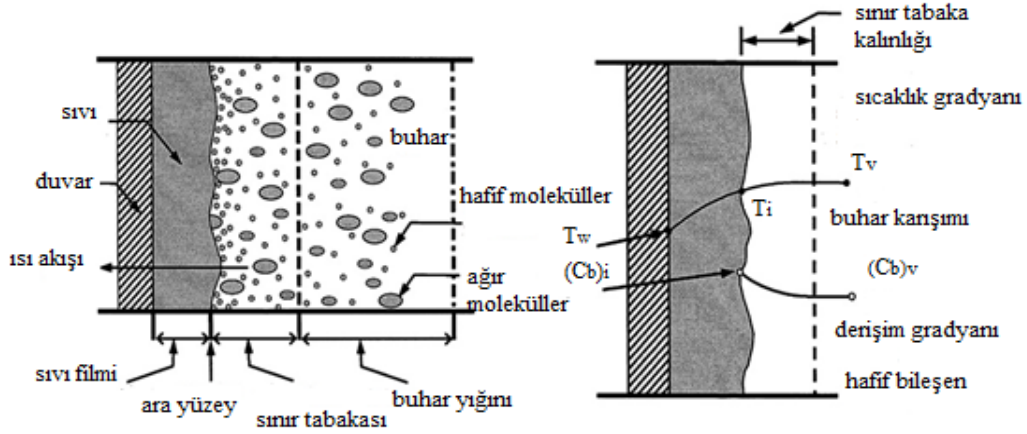
Baca gazındaki su buharının yoğuşma hızı, kütle taşınım katsayısı ve ara yüzey ile bulk akış arasındaki buhar fazı konsantrasyon farkıyla orantılıdır. Yoğuşma hızı Eş. 28 ile hesaplanabilir.

$$d\dot{m}_{yoğ} = k_m \times (x_{H_2O-b} - x_{H_2O-i}) \times dA \quad (28)$$

k_m 'yi hesaplamak için kütle difüzyonu ile ısı transferi arasındaki ilişkiyi belirleyen Lewis bağıntısı kullanılır. Kütle taşınım katsayısı Eş. 29'da verilmiştir.



Şekil 1. Yoğuşma başlamadan önce baca gazı ve su için ısı direnç ağı
(Thermal resistance network for flue gas and water before condensation begins)



Şekil 2. Gaz karışımının yoğuşması, sıcaklık ve konsantrasyon gradyanı
(Condensation of gas mixtures, and gradient of temperature and concentration)

$$k_m = \frac{h_{bg} \times M_{H_2O}}{c_{p-g} \times M_{bg} \times x_{lm} \times Le_{H_2O-gaz}^{2/3}} \quad (29)$$

x_{lm} logaritmik mol kesri farkı, Eş. 30 ile hesaplanabilir. Eşitlikteki x_{ni} , baca gazı içerisindeki yoğuşmayan gazların ara yüzeydeki mol kesri; x_{nb} ise yoğuşmayan gazların bulktaki mol kesridir.

$$x_{lm} = \frac{x_{ni} \times x_{nb}}{\ln(x_{ni}/x_{nb})} \quad (30)$$

$$Le_{H_2O-gaz} = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\alpha_{bg}}{D_{H_2O-gaz}} \quad (31)$$

Su buharının ara yüzeydeki mol kesri, Eş. 32'de verilen Antoine eşitliği vasıtasıyla bulunabilir. Eşitlikte P_{top} , kPa ve T_i :°C biriminde olmalıdır [10].

$$x_{H_2O-i} = \frac{\exp(a - \frac{b}{T_i + c})}{P_{top}} \quad a = 16,262 \quad b = 3799,89 \quad c = 226,35 \quad (32)$$

T_i ara yüzey sıcaklığı bir dizi iterasyon sonucunda bulunup yoğuşmalı kısım için ayrıştırma yöntemine devam edilir. Yoğuşma başladığı zaman ise kontrol hacminden çıkan baca gazı ve su çıkış sıcaklığını bulmak için Eş. 33 ve Eş. 34 kullanılır.

$$T_{bg2} = \frac{(\dot{m}_{bg} \times c_{p-bg} - \frac{h_{bg} \times A_0}{2}) \times T_{bg1} + h_{bg} \times A_0 \times T_{i1}}{\dot{m}_{bg} \times c_{p-bg} + \frac{h_{bg} \times A_0}{2}} \quad (33)$$

$$T_{su2} = T_{su1} - \frac{[h_{bg} \times (T_{bg} - T_{i1}) + h_{fg} \times k_m \times (x_{H_2O} - x_i)] \times A_i}{\dot{m}_{su} \times c_{p-su}} \quad (34)$$

Yoğuşmalı ekonomizerin etkinliği (ϵ) ise Eş. 35'ten hesaplanabilir [14].

$$\epsilon = \frac{(\dot{m}_{su} \times c_{p-su} \times (T_{su2} - T_{su1}))}{\dot{m}_{bg} \times c_{p-bg} \times (T_{bg} - T_{ci}) + (\dot{m}_{su} \times c_{p-su} \times (T_{ci} - T_{su1}))} \quad (35)$$

Mühendislik uygulamalarında ekonomik analizin yapılarak ilk yatırım ve işletme maliyetleri en düşük olan, geri ödeme süresi en kısa olan projenin tercih edilmesi gerekir. Ekonomik analizde ilk yatırım maliyeti, varlığın beklenen ömrü, yıllık bakım ve işletme maliyetleri, hurda değeri ve faiz oranı gibi kriterler belirlenip değerlendirilir. Ekonomik analiz metodu olarak yıllık eşdeğer hâsıla yöntemi kullanılmıştır. Yıllık eşdeğer hasıla (YEH) metodunda alternatifler eşdeğer toplam nakitlere göre değil yıllık eşdeğer nakit akışlara dayanılarak karşılaştırılır. Yıllık nakit akış analizinde amaç, paranın yıllık eşdeğer maliyete, gelire veya kâra dönüştürülmesidir. Yıllık

eşdeğer hasıla, Eş. 36 kullanılarak hesaplanabilir. Eşitlikte F gelirleri, C ise giderleri, i faiz oranını ve n ise ekonomik ömrü göstermektedir [35].

$$YEH = \left[\sum_{n=1}^t \frac{F_n}{(1+i)^n} - \sum_{n=1}^t \frac{C_n}{(1+i)^n} \right] \times \frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \quad (36)$$

Devletleştirmenin ve teknolojik buluşların yoğun olduğu sektörlerden, en kısa sürede, proje yatırım tutarını geri elde etmek çok önem arz ettiğinden benzer alternatifler arasında en kısa zamanda geri dönen projenin tespiti ve seçimi amaç olmalıdır. Geri ödeme süresi (GÖS) yatırımın kazançlarının, yatırımın maliyetine eşit oluncaya kadar geçen süreye denir. Geri ödeme süresi analizinde karar kriteri geri ödeme devresi en küçük olan projeyi seçmektir [10]. Geri ödeme süresi (GÖS), Eş. 37 yardımıyla hesaplanabilir.

$$GÖS = \frac{\text{ilk yatırım maliyeti}}{YEH} \quad (37)$$

4. Bulgular (Results)

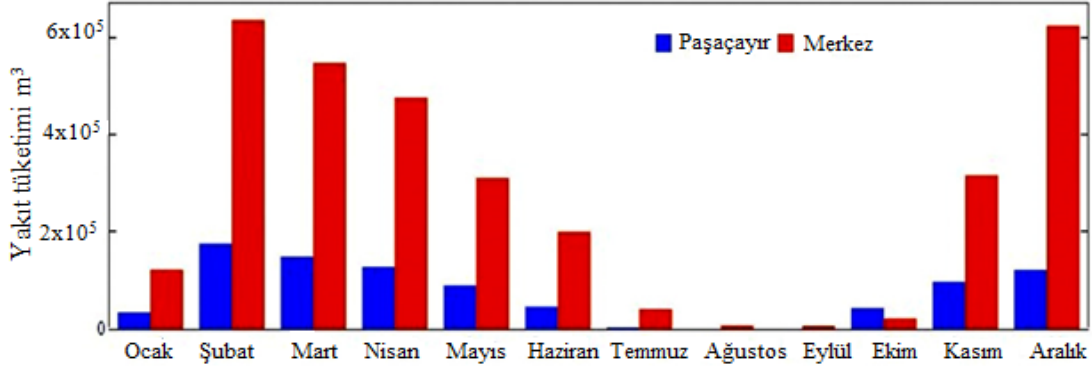
Kafkas Üniversitesi, bölgesel ısıtma sistemi ile ısıtılmakta ve yakıt olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Yıllık toplam doğalgaz tüketimi ortalama 4.192.241,5 m³ olup bunun %21'i Paşacayır kampüsünde harcanmaktadır. Şekil 3'de aylara göre doğalgaz tüketim değerlerinin değişimi her iki kampüs için gösterilmiştir. Isı merkezlerinde bulunan kazanlardan çıkan baca gazlarının sıcaklıkları, ortam sıcaklıkları, % CO₂ ve % O₂ oranları aylık olarak ölçülmüştür. Tablo 1'de Ocak ayında yapılan ölçümlerin ortalama değerleri verilmiştir.

Baca gazındaki % CO₂ ve % O₂ ölçümleri kullanılarak hava fazlalık katsayıları ile baca gazının basınç farkı ölçümleri yapılarak baca gazı hız değerleri hesaplanmıştır. Buradan bulunan debi değerleriyle kazan kütle denkleğinden bulunan debi değerleri birbiriyle örtüşmektedir. Baca gazının duyulur enerjisi, baca gazının sıcaklığına ve hava fazlalık katsayısına bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla baca gazının duyulur enerjisi artarken, gizli enerjisi sabit kalmaktadır. Hava fazlalık katsayısının artışı ise baca gazının duyulur enerjisini artırırken, baca gazının gizli enerjisini azaltmaktadır. Şekil 4'te duyulur baca gazı kaybının sıcaklık ve hava fazlalık katsayısıyla değişimi gösterilmiştir.

Baca gazı bir ısı değiştiricide ısısını suya transfer ederek soğurken su buharının çiğlenme noktası sıcaklığına kadar baca gazında herhangi bir faz değişimi gözlenmezken, çiğlenme noktası sıcaklığında ise baca gazındaki su buharının bir kısmı sıvı faza geçerek yoğuşmaya başlar. Baca gazının gizli enerjisi, çiğlenme noktasına kadar sabit kalır. Daha

düşük sıcaklıklara inildikçe baca gazının taşıdığı gizli enerji miktarı yoğunlaşmanın etkisiyle azalır. Çünkü yoğunlaşma ile baca gazı içerisindeki su buharının mol oranı azalmaktadır. Şekil 5'te 10.000 kcal/h

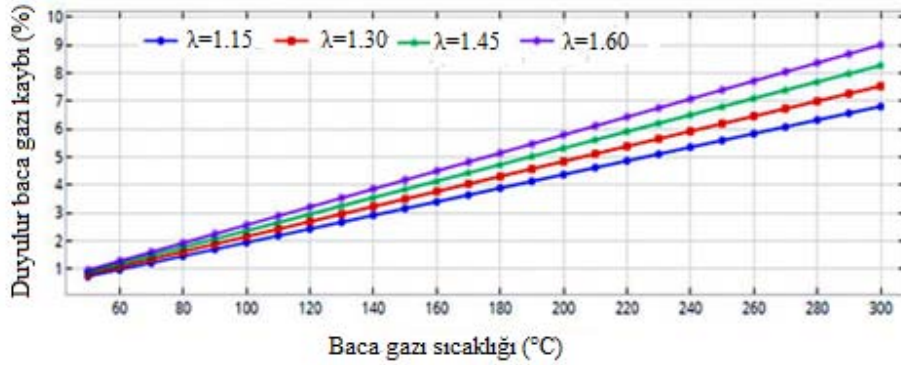
kapasitesindeki kazandan çıkan atık baca gazının duyulur ve gizli enerjisinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Şekilde de bu etki net bir şekilde gözlenmektedir.



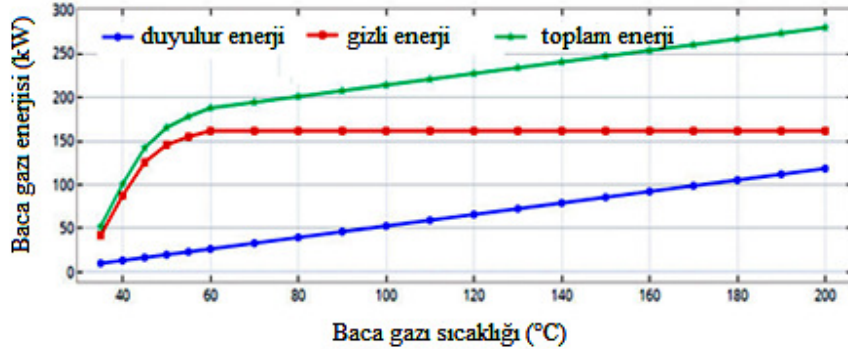
Şekil 3. Kafkas Üniversitesi kampüslerine ait aylık yakıt tüketim değerleri
(Monthly fuel consumption values of Kafkas University campus)

Tablo 1. Isı merkezlerinden ölçülen ortalama değerler (Ocak ayı verilerine göre)
(The average measurement values taken from heat plants (According to values of January month))

	Merkez Kampüs 1 Nolu Isı Merkezi		Paşaçayır Kampüs 2 Nolu Isı Merkezi		
	5.000.000 kcal/h (Kazan 1)	10.000.000 kcal/h (Kazan 2)	2.500.000 kcal/h (Kazan 1)	2.500.000 kcal/h (Kazan 2)	2.500.000 kcal/h (Kazan 3)
Baca gazı sıcaklığı °C	70,0	69,5	122,1	120,8	112,7
% CO ₂	9,23	8,17	6,25	8,33	7,54
% O ₂	4,84	6,91	10,10	6,45	7,82
Ortam sıcaklığı °C	22,1	23,2	24,8	27,8	26,8



Şekil 4. Duyulur baca gazı kaybının sıcaklıkla ve hava fazlalık katsayısıyla değişimi
(Variation of sensible energy of flue gas with temperature and air excess coefficient)



Şekil 5. Baca gazının toplam enerjisinin sıcaklıkla değişimi (Variation of total energy of flue gas with temperature)

Baca gazı içerisindeki su buharının çığlenme noktası sıcaklığı, atmosfer basıncından etkilenmektedir. Deniz seviyesinden yükseklere çıkıldıkça atmosfer basıncı ile atmosfer basıncındaki doymuş suyun kısmi basıncı ve havadaki bağıl nem düşer. Havadaki nem miktarının azalması da havadaki su buharının kısmi basıncının düşmesine neden olur. Kazanlar için kütle ve enerji dengesi eşitlikleri çıkarılarak yakıt sarfiyatı, sıcaklık ve hava fazlalık katsayısı gibi ölçümler esas alınarak baca gazının kütleli debisi, mol kütlesi ve baca gazı sıcaklığına bağlı olarak taşıdığı duyulur ve gizli enerjisi, baca gazının toplam ısı kaybı hesaplanmıştır. Hesaplamaların bir kısmı Tablo 2’de verilmiştir. Baca gazı çıkış sıcaklığı, su buharının çığlenme noktası sıcaklığına geldiğinde baca gazındaki su buharı yoğunlaşmaya başlar. Çığlenme noktasının altındaki sıcaklıklara soğutulan baca gazı içerisindeki suyun doyma basıncı azaldığından baca gazından yoğunlaşan su miktarı artmaktadır. Baca gazının yoğunlaşan su miktarına hava fazlalık katsayısı da etki eder. Hava fazlalık katsayısının artması baca gazı içerisindeki su buharının mol kesrinin azalmasına sebep olduğundan yoğunlaşan su miktarını düşürmektedir (Şekil 6).

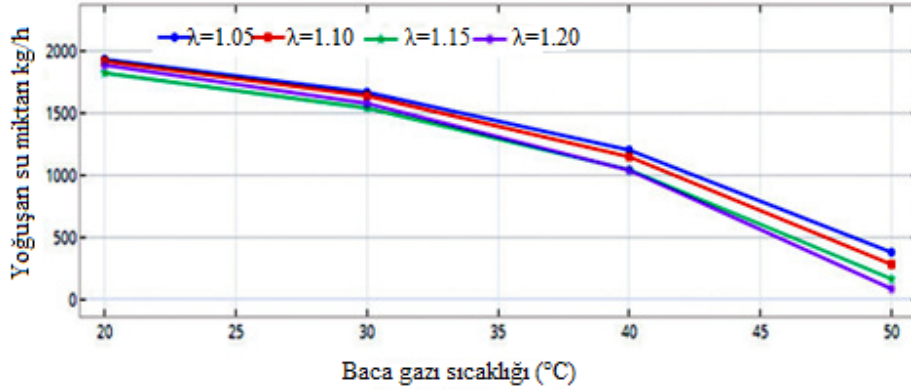
Baca gazı bir ısı değiştiricisinde soğutulduğu zaman çığlenme noktası sıcaklığına kadar sadece baca gazının duyulur enerjisini suya transfer edilirken, çığlenme noktası altına inildiğinde baca gazının duyulur enerjisi yanında gizli enerjisi de suya aktarılır. Dolayısıyla baca gazından daha fazla enerji ve yakıt tasarrufu sağlanır. Hava fazlalık

katsayısının artmasıyla çığlenme noktası sıcaklığı düşer. Çığlenme noktası sıcaklığının düşmesi genellikle istenilen bir durum değildir. Doğalgazda diğer yakıtlara oranla çığlenme noktası yüksek olduğundan dolayı baca gazından enerji geri kazanım uygulamaları için doğalgaz yakıtlı sistemler daha uygundur. Ayrıca hava fazlalık katsayısının artması, baca gazı miktarını artırdığından daha fazla miktarda ısı suya transfer edilmiş olur.

Kazanlardan çıkan baca gazlarının atık ısı kayıpları %6-8 arasında olup bu kayıp enerjiden yararlanılması gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli yöntemler araştırılarak termodinamik ve ekonomik açıdan uygunlukları incelenmiştir. Bu yöntemler;

- Yöntem 1: Atık enerjiden yararlanarak mahal ısıtma,
- Yöntem 2: Atık enerjiden yararlanarak sıcak su eldesi
- Yöntem 3: Atık enerjiden yararlanarak kazana giren yakma havasının ısıtılması

Yöntem 1: Atık enerjiden yararlanarak mahal ısıtma: Bu yöntemde sıcak atık baca gazları ekonomizer(ler) vasıtasıyla soğutularak buradan elde edilecek ısı vasıtasıyla bina ya da binaların ısıtılmasının sağlanması amaçlanmaktadır. Binaların mevcut ısıtma tesisatlarına yapılacak düzenlemelerle atık ısı sistemde geri kullanılarak yakıt tasarrufu elde edilebilecektir. Bu kapsamda elde edilecek atık



Şekil 6. Farklı hava fazlalık katsayılarında ve baca gazı sıcaklıklarında yoğunlaşan su miktarı
(The amount of condensed water at different air excess coefficients and flue gas outlet temperature)

Tablo 2. Yıl boyunca alınan verilere göre enerji analiz sonuçları (Energy analysis results according to data received throughout the year)

	Merkez Kampüsü 1 Nolu Isı Merkezi		Paşacayır Kampüsü 2 Nolu Isı Merkezi		
	5.000.000 kcal/h (Kazan 1)	10.000.000 kcal/h (Kazan 2)	2.500.000 kcal/h (Kazan 1)	2.500.000 kcal/h (Kazan 2)	2.500.000 kcal/h (Kazan 3)
Baca gazı debisi kg/s	0,30	0,32	0,10	0,09	0,10
Hava debisi kg/s	0,27	0,27	0,09	0,08	0,09
Hava fazlalık katsayısı	1,29	1,29	1,59	1,43	1,60
Yakıt debisi m ³ /s	0,0354	0,0708	0,01	0,01	0,01
Yakıt enerjisi kJ/s	1223,24	2446,49	327,55	327,55	327,55
Baca gazı duyulur ısı kaybı %	1,35	1,33	3,31	2,95	2,99
Baca gazındaki H ₂ O mol kesri	0,1469	0,1469	0,1216	0,1342	0,1213
Çığlenme noktası sıcaklığı °C	45,70	47,61	45,71	47,61	45,67
Baca gazı gizli ısı kaybı %	5,26	5,26	5,23	5,22	5,23
Baca gazı toplam ısı kaybı %	6,61	6,59	8,54	8,17	8,22
Baca gazı kaybının toplam bedeli \$/yıl	14.640,37	29.220,47	5.069,48	4.848,50	4.879,97

enerjinin Isı Merkezlerine kısmen yakın binaların ısıtma enerjisinin tamamını karşılayıp karşılamayacağı araştırılmıştır. Paşaçayır kampüsündeki 2 No'lu Isı Merkezi binasına yakın konumdaki KAKÜV okul binası veya Kaz Üretim Çiftliği binasının ısıtma enerjisi ihtiyacının elde edilecek atık enerjiyle karşılanabileceği sonucuna varılmıştır. Kampüs içerisindeki birçok binanın destek ısıtması olarak bu sistemden yararlanılabilir; fakat sağladıkları yakıt tasarrufuna oranla ilk yatırım maliyetinin yüksek olması yani geri ödeme sürelerinin yüksek olması nedeniyle tercih edilmemiştir.

Yöntem 2: Atık enerjiden yararlanarak sıcak su eldesi: Bu yöntem ile kazan baca gazlarının ekonomizer ya da yoğunlaşma ekonomizer(ler) vasıtasıyla soğutulmasıyla elde edilecek enerjinin bölgesel ısıtma sistemi tarafından sıcak su ihtiyacı karşılanmayan binaların özellikle lojman binalarının sıcak su ihtiyacını gidermek amaçlanmıştır. Böylece binalar daha konforlu hale gelirken elektrik ya da doğalgazla karşılanmaya çalışılan sıcak su ihtiyacı atık enerjiden sağlanacağı için yakıt tasarrufu elde edilecek ve konutlar daha konforlu hale getirilecektir. Bu kapsamda Merkez kampüsündeki hastane binasının sıcak su ihtiyacının karşılanması düşünülse de Isı Merkezi ile hastane arasındaki mesafenin uzunluğu ve boru maliyetinin fazlalığı nedeniyle vazgeçilmiştir. Fakat, Paşaçayır kampüsündeki Konukevi binasının veya lojman binalarının sıcak su ihtiyacının karşılanabileceği sonucuna varılmıştır.

Yöntem 3: Atık enerjiden yararlanarak kazana giren yakma havasının ısıtılması: Bu yöntemde Isı Merkezleri'ndeki kazan veya kazanlara eklenecek hava ön ısıtıcı(ları) yardımıyla baca gazları soğutulurken elde edilen atık enerjiyle birlikte kazana giren yakma havasının ısıtılması amaçlanmaktadır. Mevcut kazanların yakma havası vantilatörler vasıtasıyla kazan dairesi ortam havasından sağlanmaktadır. Kurulacak sistemle kazana giren yakma havası ısıtılarak enerji tasarrufu elde edilir. Bu sistem tüm Isı Merkezlerinde aktif olarak kullanılan tüm kazanlara uygulanabilir durumdadır.

1 No'lu ısı merkezindeki kazanlarda yer alan ekonomizerler nedeniyle kazandan çıkan baca gazı sıcaklıkları 70°C civarındadır. Bu sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklara yapılacak bir soğutma sonucunda baca gazı içerisindeki su buharı yoğunlaşacaktır. Bu nedenle bu kazanlara sadece yoğunlaşma ekonomizer ilavesi yapılabilir. Fakat, 2 No'lu ısı merkezinde kullanılan kazanlarda herhangi bir ekonomizer

ilavesi olmadığından baca gazı sıcaklığı 120°C gibi yüksek bir sıcaklıkta olup bu kazanlara her tür Enerji Geri Kazanım Cihazı entegre edilebilir. Tablo 3'te baca gazlarının 45°C'ye soğutulmasına göre elde edilebilecek enerji geri kazanım değerleri ve bunların yıllık enerji tasarruf değerleri verilmiştir.

Yöntem 1: kazan çıkışına yerleştirilen ekonomizer yardımıyla elde edilecek enerji, ısı merkezi yakınındaki KAKÜV okul binasının veya Kaz Üretim Çiftliği binasının ısıtılması amacıyla kullanılacaktır. Isıtma kış sezonunda yapılacağı için tasarım hesaplarında yakıt tüketimi, baca gazı sıcaklıkları, baca gazı hızları gibi değerlerin tüm bir yılın ortalama değerleri değil sadece kış sezonunun ortalama değerleri temel alınmıştır. Ekonomizer çıkışında baca gazı sıcaklığı 75°C düşürürken ekonomizere giren 70°C'deki tesisat dönüş suyu da 90°C'ye yükselmiş olur. KAKÜV okul binasının tümünün ısıtma enerjisi ihtiyacının karşılanabilmesi için her bir kazana birer tane olmak üzere özellikleri aşağıdaki çizelgede verilen 3 adet ekonomizere ihtiyaç varken; Kaz Üretim Çiftliği binasının ısıtma ihtiyacını 1 adet ekonomizer karşılamaktadır.

Isı değiştirici tasarlanırken boru çapı, boru arası mesafeler akışkan hızları, ısı transfer katsayıları, basınç düşümleri, ısı transfer alanı, pompa ve fan güçleri gibi parametrelere dikkat edilmelidir. Tablo 4'te farklı boru çaplarına göre hesaplanan çeşitli tasarım özellikleri gösterilmiştir. Baca gazı ısı transfer katsayısının büyük olması ekonomizer alanını azaltırken basınç düşümlerinin fazla olması pompa ve fan güçlerini yükseltmekte bu da işletme maliyetini artırmaktadır. Ayrıca borular arası mesafenin değişmesi basınç düşümlerini ve baca gazı hızlarını etkilemekte bunun sonucunda ısı transfer katsayısını, pompayı ve fan gücünü değiştirmektedir. Baca gazı akış yönüne doğru enine boru sıra sayısı (N_y) arttıkça baca gazının ısı transfer katsayısı azalmaktadır. Boruların sıra sayısının artması sonucu baca gazının hızı düşmekte ve bu da baca gazı ısı transfer katsayısının düşmesine neden olmaktadır. Baca gazının ısı transfer katsayısı, suya göre oldukça küçük olduğundan dolayı ısı transferinde darboğaz oluşturmaktadır. Dolayısıyla baca gazı ısı transfer katsayısını düşürecek etkilerden mümkün olduğunca kaçınmak gerekir.

Bu yöntem için dış çapı 22 mm, et kalınlığı 2 mm olan U dönüşlü düz boru demetli ekonomizer tasarlanmıştır. Boru boyları 1m olup enine

Tablo 3. Baca gazının 45°C'ye soğutulmasıyla geri kazanılan enerji miktarı (Recovered energy amount by cooling at 45°C of flue gas)

	Merkez Kampüsü 1 Nolu Isı Merkezi		Paşaçayır Kampüsü 2 Nolu Isı Merkezi		
	5.000.000 kcal/h (Kazan 1)	10.000.000 kcal/h (Kazan 2)	2.500.000 kcal/h (Kazan 1)	2.500.000 kcal/h (Kazan 2)	2.500.000 kcal/h (Kazan 3)
Baca gazı giriş sıcaklığı °C	70	69,5	122	120	112
Baca gazı çıkış sıcaklığı °C	45	45	45	45	45
Geri kazanılan duyulur enerji kJ/s	7,995	14,405	8,109	6,984	7,055
Baca gazındaki su buharının mol kesri	0,1469	0,1469	0,1215	0,1342	0,1213
Baca gazındaki su buharının çığırma noktası °C	45,71	47,61	45,71	47,61	45,67
Baca gazındaki yoğunlaşan suyun mol miktarı, kmol	$3,6 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-4}$	$1,685 \times 10^{-5}$	$5,994 \times 10^{-5}$	$1,588 \times 10^{-5}$
Geri kazanılan gizli enerji kJ/s	14,7165	29,4330	0,6880	2,4472	0,6483
Baca gazındaki yoğunlaşmayan gazların mol miktarı, kmol	0,01036	0,0207	0,0034	0,0031	0,0034
Toplam geri kazanılan enerji kJ/s	22,9361	45,4993	8,8724	9,6788	7,7739
Geri kazanılan enerji oranı %	1,88	1,86	2,71	2,95	2,37

(y) 15 adet, yüksekliğine 20 adet (z) olmak üzere toplam 300 adet borudan oluşmaktadır. Borular arası mesafeler eşit, sıralı dizilmiş $S_y=S_z=0,030$ m'dir. Ekonomizerin ısı transfer yüzey alanı ise $20,73$ m² olarak hesaplanmıştır. Boru malzemesi olarak 304 kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. Şekil 7'de ekonomizerin boru dizilişleri ile kazan duman borusuna yerleşimi gösterilmiştir.

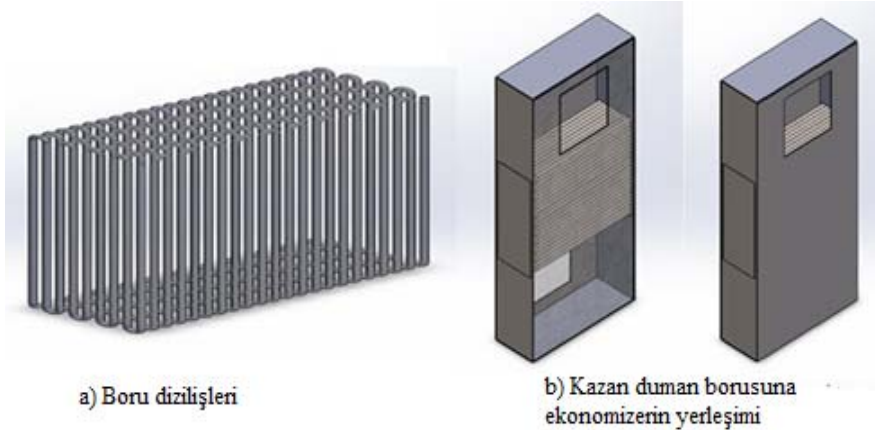
Boru tarafında tesisat suyu, gövde tarafından boru demetleri üzerinden yukarıdan aşağıya doğru baca gazı akmaktadır. Ekonomizere giren tesisat suyu $0,14$ kg/s ve baca gazı kütleli debisi ise $0,23$ kg/s'dir. Baca gazı tarafındaki basınç düşümü çok düşük seviyede olduğundan baca gazı tarafı için herhangi bir fan düşünülmezken su tarafı için pompaya ihtiyaç vardır.

Yöntem 2: bu yöntemde yoğuşmalı ekonomizer yardımıyla baca gazından geri kazanılacak enerji, Paşaçayır kampüsü içerisindeki lojman binalarının veya Konukevi binasının sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılacaktır. Sıcak su ihtiyacı tüm yıl boyunca devam ettiği için verilerin ortalama yıllık değerleri kullanılmıştır.

Yoğuşmalı ekonomizere baca gazı giriş sıcaklığı 122°C olup 10°C 'deki soğuk suya ısıyı transfer ederek 60°C sıcaklıkta sıcak su elde edilir. Baca gazıda soğuyarak su buharı çiglenme noktası altında 40°C 'de ekonomizere çıkar. Yoğuşma etkileri de düşünüldüğünde yoğuşmalı ekonomizer boru malzemesi için korozyona daha dayanıklı 316 kalite paslanmaz çelik seçilmiştir. Isı değiştiricinin belli bir kısmında su buharının yoğuşması durumu gerçekleşeceği için ısı

Tablo 4. Farklı boru çaplarına bağlı olarak hesaplanan çeşitli tasarım parametreleri
(Various design parameters calculated depending on different pipe sizes)

$d_o=15$ mm								
Boru tarafı	$d_{iç}$ mm		U_{su} m/s	h_{su} W/m ² K	ΔP_{su} kPa	W_{su} kW		
	13,5		1,39	8231,6	22,62	0,0056		
Gövde tarafı	Sy	Sx	U_{bg-max} m/s	U_{bg-ort}	h_{bg} W/m ² K	Alan m ²	ΔP_{bg} kPa	W_{bg} kW
	20	20	5,20	1,30	70,38	19,08	0,0190	7,53
	23	23	3,25	1,13	52,34	25,58	0,0075	3,08
	26	26	2,36	1,00	42,83	31,25	0,0040	1,65
	29	29	1,86	0,90	28,91	36,35	0,0025	1,03
	32	32	1,53	0,81	26,23	41,06	0,0017	0,70
	35	35	1,30	0,74	24,19	45,47	0,0012	0,51
$d_o=20$ mm								
Boru tarafı	$d_{iç}$ mm		U_{su} m/s	h_{su} W/m ² K	ΔP_{su} kPa	W_{su} kW		
	18,5		0,74	4668,5	6,41	0,0016		
Gövde tarafı	Sy	Sx	U_{bg-max} m/s	U_{bg-ort}	h_{bg} W/m ² K	Alan m ²	ΔP_{bg} kPa	W_{bg} kW
	25	25	5,20	1,04	63,27	21,32	0,0190	7,53
	28	28	3,25	0,93	47,06	28,58	0,0075	3,08
	31	31	2,36	0,84	38,50	34,86	0,0040	1,65
	34	34	1,86	0,76	33,07	40,54	0,0025	1,03
	37	37	1,53	0,70	29,27	45,77	0,0017	0,70
	40	40	1,30	0,65	20,95	50,68	0,0012	0,51
Boru tarafı	$d_{iç}$ mm		U_{su} m/s	h_{su} W/m ² K	ΔP_{su} kPa	W_{su} kW		
	28,5		0,31	2144,7	1,14	0,0003		
Gövde tarafı	Sy	Sx	U_{bg-max} m/s	U_{bg-ort} m/s	h_{bg} W/m ² K	Alan m ²	ΔP_{bg} kPa	W_{bg} kW
	35	35	5,20	0,74	54,46	25,06	0,019	7,53
	38	38	3,25	0,68	40,50	33,48	0,0075	3,08
	41	41	2,36	0,63	33,14	40,79	0,0040	1,65
	44	44	1,86	0,59	28,47	47,38	0,0025	1,03
	47	47	1,53	0,55	25,19	53,47	0,0017	0,70
	50	50	1,30	0,52	22,74	59,17	0,0012	0,51



Şekil 7. Ekonomizer boru dizilişleri ile kazan duman borusuna yerleşimi (Line-up of economizer pipe bundle and connection to boiler)

değiştirici yoğuşmaz ve yoğuşmalı kısım olmak üzere iki kısımda incelenmiştir.

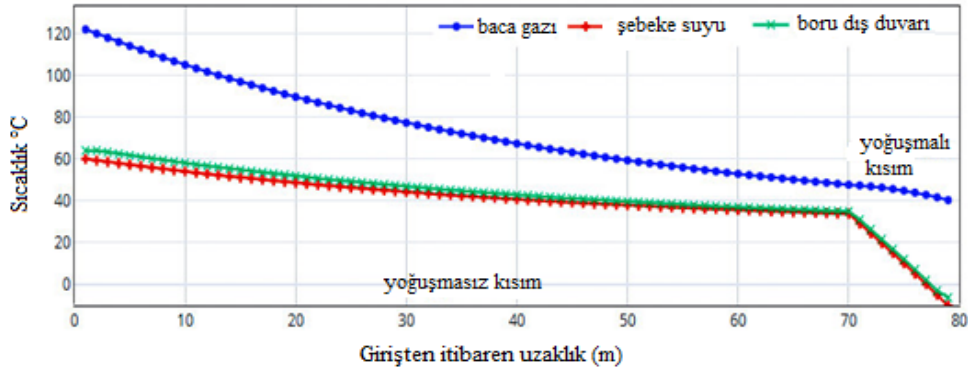
Konukevi binasının tümünün sıcak su ihtiyacının karşılanabilmesi için her bir kazana birer tane olmak üzere 3 adet yoğuşmalı ekonomizere ihtiyaç vardır. Bu yöntem için dış çapı 26 mm, et kalınlığı 2 mm olan U dönüşlü düz boru demetli ekonomizer tasarlanmıştır. Boru boyları 1 m olup enine (y)10 adet, yüksekliğine (z) 8 adet olmak üzere toplam 80 adet burudan oluşmaktadır. Borular arası mesafeler eşit, sıralı dizilmiş $S_y=S_z=0,032$ m'dir. Ekonomizerin ısı transfer yüzey alanı ise $6,53$ m² olarak hesaplanmıştır.

Boru malzemesi olarak 316 kalite paslanmaz çelik kullanılmıştır. Boru tarafında şebeke suyu, gövde tarafından boru demetleri üzerinden yukarıdan aşağıya doğru baca gazı akmaktadır. Yoğuşmalı ekonomizere giren şebeke suyu $0,063$ kg/s ve baca gazı kütleli debisi ise $0,09$ kg/s'dir. Şekil 8'de yoğuşmalı ekonomizerde baca gazı ve şebeke suyu sıcaklıkları ile boru dış duvar sıcaklık değerleri boru boyunca gösterilmiştir. Yoğuşmaz kısım uzunluğu ise 69 m olup ısı transfer yüzey alanı ise $5,64$ m² olarak hesaplanmıştır. Yoğuşmalı kısım toplam uzunluğu 11 m ve ısı transfer yüzey alanı ise $0,89$ m²'dir. Yoğuşmalı kısımda ısı değiştirici çıkışına doğru, baca gazı içerisindeki su buharı oranı yoğuşma etkisiyle azalırken, baca gazındaki yoğuşmayan gazların oranı da artmaktadır. Şekil 9'da arayüzey ve bulkteki baca gazındaki su buharı ve yoğuşmayan gazların mol kesri değerleri gösterilmiştir. Tablo 5'te yöntem 2 için tasarlanan yoğuşmalı ekonomizerin hesap sonuçları verilmiştir. Bu yöntemle baca gazı kaybının yaklaşık %50'sini geri kazanmak mümkündür.

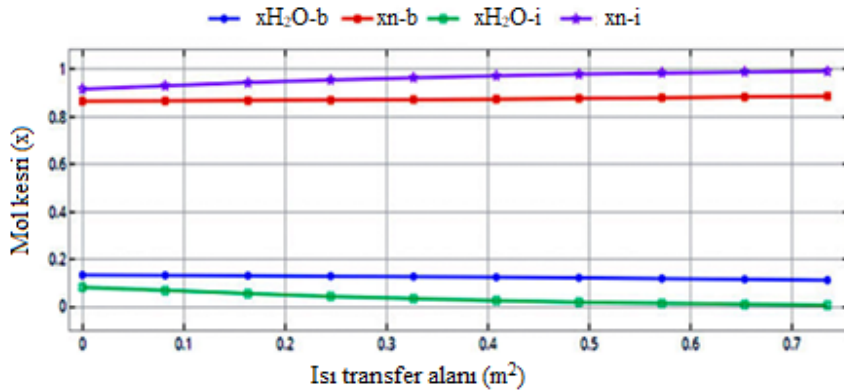
Yöntem 3: bu yöntemde ise bir hava ön ısıtıcısı yardımıyla yüksek sıcaklıktaki baca gazının ısısının, kazana iç ortamdan çekilen yanma havasına aktarılması planlanmaktadır. Hava ön ısıtıcısına gövde tarafından 122°C 'de giren baca gazı ısısını havaya aktararak 87°C 'de çıkarken, boru tarafına 20°C 'de giren kazan yanma havası da 60°C 'ye kadar ısıtılır. Hava ön ısıtıcısı tasarımında boru malzemesi olarak karbon çeliği seçilmiş olup çapraz akışlı düz sıralı boru demetleri kullanılmıştır. Bu yöntem için sıcak hava daha ziyade kış sezonu gerekli olduğu için hava ön ısıtıcısının tasarım hesaplarında kış sezonu ortalama değerleri dikkate alınmıştır.

Baca gazı çığlenme noktası üzerinde hava ön ısıtıcısından çıktığı için baca gazı içerisinde herhangi bir yoğuşma olmayacaktır. Tasarlanan hava ön ısıtıcısı 32 mm dış çapında 50 adet boru demetinden oluşmuş ısı transfer yüzey alanı $5,03$ m²'dir. Şekil 10'da hava ön ısıtıcısının sisteme entegrasyonu görülmektedir. Tablo 6'da yöntem 3 için tasarlanan hava ön ısıtıcısının tasarım sonuçları verilmiştir.

Kafkas Üniversitesi kampüsünün bölgesel ısıtma sisteminden geri kazanılabilecek atık enerjiler için makul ısı geri kazanım yöntemleri için gerekli ısı geri kazanım cihazlarının tasarım sonuçları yukarıda verildi. Bu yöntemlerin uygulanabilirliği incelenmiştir. Fakat bir sistemin uygulanabilir olması maliyet etkin bir dünyada tek başına yeterli değildir. Aynı zamanda ekonomik olması gerekir. Yani uygulanacak ısı geri kazanım yöntemlerinin geri ödeme sürelerinin nispeten düşük olması çok önemlidir. Bu nedenle tüm yöntemlerin ekonomik analizleri yapılmış ve ilk yatırım maliyetleri, işletme giderleri, sağlayacakları yıllık enerji tasarrufları ve geri ödeme süreleri açısından incelenmiştir.



Şekil 8. Baca gazı, boru dış duvar ve su sıcaklıklarının boru girişinden itibaren değişimleri (Changes of flue gas, outer pipe wall and water temperatures with distance from inlet pipe)



Şekil 9. Yoğuşmalı kısım için baca gazındaki su buharı ve yoğuşmayan gazların mol oranları (Mole fraction of water vapour and non condensing gas in flue gas)

Tablo 5. Yöntem 2 için yoğuşmalı ekonomizer tasarım sonuçları (Design results of condensing economizer for Scenario 2)

	Boru tarafı-su		Gövde tarafı-baca gazı			
	Giriş	Çıkış	Yoğuşmasız kısım		Yoğuşmalı kısım	
T : °C	60	10	122	47,61	47,61	40
m : kg/s		0,063		0,09		
U : m/s		0,14		0,31		
U _{max} : m/s				2,31		
Re		4685,56		2740,35		
Nu		37,32		34,62		
h : W/m ² .K		968,71		41,97		
d _o : m		0,026		1x0,3x0,24		
L : m		80	69			11
k : W/m.K			14,9			
A : m ²		6,53	5,64			0,89
ΔP : kPa		1,52		0,0020		
Q : kW		0,000122		0,00035		

Tablo 6. Yöntem 3 için hava ön ısıtıcısı tasarım sonuçları (Design results of air preheater for Scenario 3)

	Boru tarafı-hava		Gövde tarafı-baca gazı		
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
T : °C	20	60	122	87	
m : kg/s		0,22		0,23	
U : m/s		25,32		0,59	
U _{max} : m/s				2,95	
Re		47134,64		4614,13	
Nu		110,91		48,18	
h : W/m ² .K		94,24		45,56	
d _o : m		0,032		1x0,4x0,2	
L _{top} : m			50		
k : W/m.K			60,5		
A : m ²			5,03		
ΔP : kPa		27,44		0,0012	
Güç : kW		0,65		0,00022	

Ekonomik analizde değerlendirme metodlarından Yıllık Eşdeğer Analiz metodu kullanılmıştır. Bu metod kapsamında ısı geri kazanım cihazlarının ekonomik ömürleri 20 yıl, faiz oranı ise %10 olarak alınmıştır. Hurda değerleri ise dikkate alınmamıştır.

Yöntemlerin Ekonomik Analiz Sonuçları: Paşaçayır kampüsündeki 2 No'lu Isı Merkezi binasına yakın konumdaki KAKÜV okul binası veya Kaz Üretim Çiftliği binasının ısıtma enerjisi ihtiyacının elde edilecek atık enerjiyle karşılanabileceği sonucuna varılmıştır. KAKÜV okul binasının ısıtma enerjisini karşılamak için 3 adet ekonomizere, Kaz Üretim Çiftliği binasının ısıtma enerjisi ihtiyacını karşılamak için de 1 adet ekonomizere ihtiyaç vardır.

KAKÜV okul binası veya Kaz Üretim Çiftliği binasının ekonomizer yardımıyla baca gazının atık ısısından yararlanılması yönteminin geri ödeme süreleri sırasıyla 8 yıl ve 6 yıl olarak hesaplanmıştır. 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacakları tasarruf miktarı ise sırasıyla 76.487,38 \$ ve 27.492,47 \$ olarak hesaplanmıştır.

2. yöntemde yoğuşmalı ekonomizer yardımıyla geri kazanılacak enerji, Paşaçayır kampüsündeki Konukevi binasının sıcak su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılacaktır. Konukevi binasının tümünün sıcak su ihtiyacının karşılanabilmesi için her bir kazana birer tane olmak üzere 3 adet yoğuşmalı ekonomizere ihtiyaç vardır. Bu yöntemde ait ilk yatırım maliyeti Tablo 7'de verilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı gibi yöntemin ilk yatırım maliyetini, yoğuşmalı ekonomizer maliyeti, pompa maliyeti, boru hatları ve kazı maliyeti ile mekanik tesisat maliyeti oluşturmaktadır. Yöntemin faizli

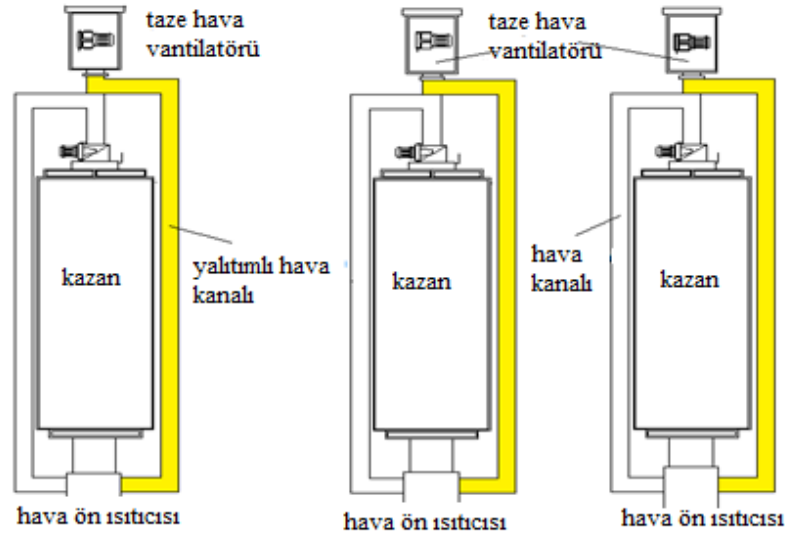
indirgenmiş geri ödeme süresi 6 yıl olup yöntemin 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı enerji tasarruf değeri 122.820,83 \$'dir. İlk yatırım maliyeti aşağıda verilen maliyetin büyük bir kısmını toprak altına döşenecek sıcak su ve sirkülasyon hattının boru ve kazı maliyeti oluşturmaktadır. Bu nedenle atık ısının ısı merkezine yakın kısımlardaki yerlerde geri kullanılması maliyeti oldukça düşürecektir.

3. yöntemde ise hava ön ısıtıcıları vasıtasıyla baca gazlarını soğutup 2 No'lu ısı merkezindeki kazanlara giren yakma havasının ısıtılması düşünülmektedir. Isı merkezindeki her bir kazan için ayrı olmak üzere 3 adet hava ön ısıtıcısı kullanılacaktır. Mevcut sistemdeki vantilatör basınç farkını karşılamaya yeterli olduğundan yeni bir vantilatöre gerek olmadığından işletme gideri bulunmamaktadır. Bu yöntemin indirgenmiş geri ödeme süresi çok makul olup 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı enerji tasarrufu 119.231,30 \$'dir. Analiz sonuçlarına göre 3. yöntemin geri ödeme süresi 1 yıl olduğundan diğer yöntemler arasında en karlı ve en ekonomik olan yöntemdir. Tüm yöntemlerin enerji ve ekonomik analiz sonuçlarının özeti Tablo 8'de sunulmaktadır.

3. yöntemde ise hava ön ısıtıcıları vasıtasıyla baca gazlarını soğutup 2 No'lu ısı merkezindeki kazanlara giren yakma havasının ısıtılması düşünülmektedir. Isı merkezindeki her bir kazan için ayrı olmak üzere 3 adet hava ön ısıtıcısı kullanılacaktır. Mevcut sistemdeki vantilatör basınç farkını karşılamaya yeterli olduğundan yeni bir vantilatöre gerek olmadığından işletme gideri bulunmamaktadır. Bu yöntemin indirgenmiş geri ödeme süresi çok makul olup 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı enerji tasarrufu 119.231,30 \$'dir. Analiz

Tablo 7. Yöntem 2'nin ilk yatırım maliyetinin metrajı (Quantity of initial investment cost of Scenario 2)

Sıcak su tesisatı-Ekonomizerler ve Pompalar			
No	Tanımı	Birimi	Miktarı
1	TERMOMETRE, MADENİ, 250 C. ø 100 mm.	AD	6,00
2	DİK. GALVANİZLİ ÇELİK BORU 1 1/4" (Bina İçi Vidalı)	MT	85,00
3	DİK.GALVANİZLİ ÇELİK BORU 1 1/2" (Bina İçi Vidalı)	MT	10,00
4	SANTRİFÜJ POMPA 1500 D/dk. 3-5 m3/h. 30.1-40 mSS.	AD	3,00
5	SANTRİFÜJ POMPA 1500 D/dk. 5.1-10 m3/h.40.1-60 mSS	AD	2,00
6	SANTRİFÜJ POMPA 1500 D/dk.10.1-20 m3/h.60.1-80 mSS	AD	2,00
7	316 KALİTE PASLANMAZ ÇELİK İMALAT YAPILMASI	KG	845,12
8	10 CM TAŞ YÜNÜ LEVHA İLE ISI YALITIMI YAPILMASI	M ²	36,00
Sıcak su tesisatı -boru-kazı			
No	Tanımı	Birimi	Miktarı
1	MAKİNE İLE TUVENAN KUM ÇAKIL TEMİN EDİLEREK, MAKİNE İLE SERME, SULAMA,SIKIŞTIRMA YAPILMASI	M ³	600,00
2	DİK.GALVANİZLİ ÇELİK BORU 1 1/2" (Bina Dışı Kanala)	MT	500,00
3	DİK.GALVANİZLİ ÇELİK BORU 2 1/2" (Bina Dışı Kanala)	MT	500,00
4	TİTREŞİM YUTUCULARI, PN 16, ø 40 mm.	AD	1,00
5	TİTREŞİM YUTUCULARI, PN 16, ø 65 mm.	AD	1,00
6	40 mm.C.YÜNÜ ÜZ.ALÜM.FOLYO KAPLI BORU İZOLAS.ø 70mm	MT	1000,00
7	ø 500 MM SİRİRAL SARIMLI Y.ALTİ YAĞM.SUYU,KANALİZASYON BORUSU (HPDE)	MT	500,00
8	MAKİNE İLE HER DERİNLİK VE HER GENİŞLİKTE YUMUŞAK VE SERT TOPRAK KAZILMASI (DERİN KAZI)	M ³	600,00
Sıcak su tesisatı-vana-kollektör			
No	Tanımı	Birimi	Miktarı
1	SOĞUK VE SICAK SU KOLLEKTÖR BORUSU 3" 80Ø mm.	MT	17,00
2	KOLLEKTÖR AĞZI ø 32 mm. Flanşlı	AD	9,00
3	KOLLEKTÖR AĞZI ø 40 mm. Flanşlı	AD	6,00
4	KOLLEKTÖR AĞZI ø 50 mm. Flanşlı	AD	3,00
5	KOLLEKTÖR AĞZI ø 65 mm. Flanşlı	AD	4,00
6	KÜRESEL VANA (Pirinç,Teflon Contalı) 32 Ø mm.	AD	12,00
7	KÜRESEL VANA (Pirinç,Teflon Contalı) 40 Ø mm.	AD	6,00
8	KÜRESEL VANA (Pirinç,Teflon Contalı) 50 Ø mm.	AD	7,00
9	PİSLİK TUTUCU,PN 16,(Buhar+Su için,Pik Dök.)ø 50 mm	AD	1,00
10	GERİ TEPME VENTİLİ,PN-16,Pik Döküm,Buhar İçin ø 32 mm	AD	4,00
11	GERİ TEPME VENTİLİ,PN-16,Pik Döküm,Buhar İçin ø 65 mm	AD	1,00

**Şekil 10.** Hava ön ısıtıcısının sisteme entegrasyonu (Integration of the air preheater into the system)

sonuçlarına göre 3. yöntemin geri ödeme süresi 1 yıl olduğundan diğer yöntemler arasında en karlı ve en ekonomik olan yöntemdir. Tüm

yöntemlerin enerji ve ekonomik analiz sonuçlarının özeti Tablo 8'de sunulmaktadır.

Tablo 8. Tüm yöntemlerin enerji ve ekonomik analiz sonuçları (Energy and economic analysis results of all scenarios)

	1. Yöntem	1.Yöntem	2.Yöntem	3.Yöntem		
	KAKÜV Isıtma	Kaz Çiftliği Isıtma	Konukevi Sıcak su	Yakma havası ısıtma		
Yoğuşmalı ekonomizer veya Yoğuşmalı ekonomizer Ekonomizer	T _{su giriş} (°C)	70	70	10	-	
	T _{su çıkış} (°C)	90	90	60	-	
	m _{su giriş} (kg/s)	0,14	0,14	0,06	-	
	m _{bg giriş} (kg/s)	0,23	0,23	0,09	-	
	T _{bg giriş} (°C)	122	122	122	-	
	T _{bg çıkış} (°C)	75	75	40	--	
	Yüzey alanı (m ²)	20,73	20,73	6,53	-	
	Adet	3	1	3	-	
	Hava ön ısıtıcısı	T _{hava giriş} (°C)	-	-	-	20
		T _{hava çıkış} (°C)	-	-	-	60
		m _{bg giriş} (kg/s)	-	-	-	0,23
		m _{hava giriş} (kg/s)	-	-	-	0,22
		T _{bg giriş} (°C)	-	-	-	122
		T _{bg çıkış} (°C)	-	-	-	87
Yüzey alanı (m ²)		-	-	--	5,03	
Adet		-	-	-	3	
Yoğuşmalı ekonomizer ve pompaların maliyeti (\$)	16.549,02	5.840,43	13.491,89	4.729,72		
Tesisat maliyeti (\$)	533,38	533,38	489,58	637,42		
Kazı ve boru maliyeti (\$)	13.324,33	1.196,99	23.504,66	0		
İlk yatırım maliyeti (\$)	30.406,74	7.570,81	37.936,14	5.367,14		
Yıllık işletme ve bakım giderleri (\$)	691,01	463,38	1.493,13	0		
Yıllık eşdeğer analizle tasarruf (\$ /yıl)	3.824,36	1.374,62	6.141,04	5.961,56		
Geri ödeme süresi(yıl)	8	6	6	1		
Geri kazanılan enerji oranı %	1,52	2,06	4,05	1,10		

5. Simgeler (Symbols)

ϵ	: Havadaki nemin mol sayısı, kmol
ϵ	: Yoğuşmalı ekonomizerin etkinliği
λ	: Hava fazlalık katsayısı
C	: Karbon
CO ₂	: Karbondioksit
H	: Hidrojen
H ₂ O	: Su
N ₂	: Azot
O ₂	: Oksijen

5.1. Alt İndisler (Subscripts)

atm	: Atmosferik
b	: Bulk
çığ	: Çiğlenme noktası
f	: Film
H ₂ O	: Su
i	: Arayüzey
i	: İç
l	: Sıvı
lm	: Logaritmik
o	: Dış
ort	: Ortalama
s	: Yüzey
sw	: Yoğuşan su
v	: Buhar
w	: Duvar
y	: Yakıt
yoğ	: Yoğuşma

5.2. Kısaltmalar (Nomenclature)

a	: Teorik hava miktarı (kmol)
A	: Isı transfer alanı (m ²)

C _p	: Sabit basınçta ısı kapasitesi (kJ/kg.K)
GÖS	: Geri ödeme süresi(yıl)
h	: Taşınım ısı transfer katsayısı (W/m ² .k)
h _{fg}	: Suyun buharlaşma ısı (kJ/kg)
H _u	: Yakıtın alt ısı değeri (kJ/m ³)
i	: Faiz oranı (%)
k	: Isıl iletkenlik (W/m.K)
k _m	: Kütle taşınım katsayısı (kg/s.m ²)
L	: Uzunluk (m)
Le	: Lewis sayısı
m	: Kütle (kg)
M _A	: Mol kütlesi (kg/kmol)
n	: Ekonomik ömür (yıl)
n	: Mol sayısı (kmol)
Q	: Isı transfer hızı (W)
R	: Isıl direnç (K/W)
r	: Yarıçap (m)
T	: Sıcaklık (°C)
T _o	: Çevre sıcaklığı (°C)
x	: Mol oranı
YEH	: Yıllık eşdeğer hasıla

6. Sonuçlar (Conclusions)

Kafkas Üniversitesi, bölgesel ısıtma sistemi ile ısıtılmakta ve yakıt olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Üniversitenin yıllık toplam doğalgaz tüketimi ortalama 4.192.241,5 m³ olup bunun %21'i Paşacayır kampüsünde harcanmaktadır. Bölgesel ısıtma sistemindeki kazanlar için kütle ve enerji denklemleri oluşturulmuştur. Hava fazlalık katsayısı, baca gazı sıcaklığı, kazan kapasitesi ve yakıt tüketimi gibi değişkenlerin atık baca gazı enerjisinin ısı geri kazanımına olan etkileri detaylıca incelenmiştir. Baca gazının duyulur enerjisi, baca gazının sıcaklığına ve hava fazlalık katsayısına bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla baca gazının duyulur enerjisi artarken, gizli enerjisi sabit kalmaktadır. Hava fazlalık katsayısının artışı ise baca gazının duyulur

enerjisini artırırken, baca gazının gizli enerjisini azaltmaktadır. Baca gazının gizli enerjisi ise çığlenme noktasına kadar sabit kalırken baca gazı daha düşük sıcaklıklara soğutuldukça baca gazının taşıdığı gizli enerji miktarı yoğunlaşmanın etkisiyle azalır. Çünkü yoğunlaşmayla baca gazı içerisindeki su buharının mol oranı azalmaktadır. Baca gazı içerisindeki su buharının çığlenme noktası sıcaklığı, atmosfer basıncından etkilenmektedir. Deniz seviyesinden yükseklere çıkıldıkça atmosfer basıncı ile atmosfer basıncındaki doymuş suyun kısmi basıncı ve havadaki bağıl nem düşer. Havadaki nem miktarının azalması da havadaki su buharının kısmi basıncının düşmesine neden olur. Baca gazı çıkış sıcaklığı, su buharının çığlenme noktası sıcaklığına geldiğinde baca gazındaki su buharı yoğunlaşmaya başlar. Çığlenme noktasının altındaki sıcaklıklara soğutulan baca gazı içerisindeki suyun doyma basıncı azaldığından baca gazından yoğunlaşan su miktarı artmaktadır. Baca gazından yoğunlaşan su miktarına hava fazlalık katsayısı da etki eder. Hava fazlalık katsayısının artması baca gazı içerisindeki su buharının mol kesrinin azalmasına sebep olduğundan yoğunlaşan su miktarını düşürmektedir.

Baca gazı bir ısı değiştiricisinde ısı geri kazanımı amacıyla soğutulduğu zaman çığlenme noktası sıcaklığına kadar sadece baca gazının duyulur enerjisini suya transfer edilirken, çığlenme noktası altına inildiğinde baca gazının duyulur enerjisi yanında gizli enerjisi de suya aktarılır. Dolayısıyla baca gazından daha fazla enerji ve yakıt tasarrufu sağlanır. Hava fazlalık katsayısının artmasıyla çığlenme noktası sıcaklığı düşer. Çığlenme noktası sıcaklığının düşmesi genellikle istenilen bir durum değildir. Doğalgazda diğer yakıtlara oranla çığlenme noktası yüksek olduğundan dolayı baca gazından enerji geri kazanım uygulamaları için doğalgaz yakıtlı sistemler daha uygundur. Ayrıca hava fazlalık katsayısının artması, baca gazı miktarını artırdığından daha fazla miktarda ısı suya transfer edilmiş olur.

Kazanlardan çıkan baca gazlarının atık ısı kayıpları %6-8 arasında olup bu kayıp enerjiden yararlanılması gerekmektedir. Bu nedenle birkaç atık enerji geri kazanım yöntemi termodinamik ve ekonomik açıdan incelenmiştir. 1. yöntemde 2 No'lu Isı Merkezi'ndeki kazan çıkışına yerleştirilen ekonomizer yardımıyla geri kazanılacak enerjiyle, ısı merkezi yakınındaki Kaz Üretim Çiftliği veya KAKÜV okul binasının ısıtılması amaçlanmıştır. Kaz Üretim Çiftliğinin ısıtılması ile %2,06 ve KAKÜV okul binasının ısıtılması ile %1,52 oranında baca gazından enerji geri kazanılabilir. Bu yöntemin ilk yatırım maliyetleri KAKÜV okul binasının ısıtılması için 30.406,74 \$ ve Kaz Üretim Çiftliği binasının ısıtılması için 7.570,81 \$ olup geri ödeme süreleri sırasıyla 8 yıl ve 6 yıl olarak hesaplanmıştır. 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacakları toplam enerji tasarrufu sırasıyla 76.487,38 \$ ve 27.492,47 \$ olarak hesaplanmıştır. 2. yöntemde yoğunlaşmalı ekonomizer yardımıyla geri kazanılacak enerjiyle, Paşacayır kampüsündeki Konukevi binasının sıcak su ihtiyacını karşılanması amaçlanmaktadır. Bu yöntemle baca gazı kaybının %4,05'ini geri kazanmak mümkündür. Tasarlanan her biri 6,53 m² yüzey alanlı yoğunlaşmalı ekonomizerle baca gazı sıcaklığı yoğunlaşma sınırının altına 40°C'ye düşürülmektedir. Bu yöntemle baca gazı kaybının yaklaşık %50'sini geri kazanmak mümkündür. Yöntemin ilk yatırım maliyeti 37.936,14 \$ olup faizli indirgenmiş geri ödeme süresi 6 yıl ve ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı enerji tasarrufu 122.820,83 \$ olup yöntemler arasında en yüksek enerji tasarrufu gelirine sahiptir. Fakat özellikle kazı ve yoğunlaşmalı ekonomizer maliyetlerinin yüksekliği nedeniyle geri ödeme süresi artmaktadır. 3. yöntemde ise hava ön ısıtıcıları vasıtasıyla baca gazlarını 87°C'ye soğutup 2 No'lu ısı merkezindeki kazanlara giren 20°C yakma havasını 60°C'ye ısıtıp tekrar kazana verilmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemle atık baca gazından %1,10 oranında ısı geri kazanılabilir. Bunun için tasarlanan hava ön ısıtıcısının her biri 5,03 m² yüzey alana sahip olup bu yöntemin ilk yatırım maliyeti 5.367,14 \$ ve 20 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı enerji

tasarruf miktarı 119.231,30 \$'dır. Analiz sonuçlarına göre 3. yöntemin geri ödeme süresinin sadece 1 yıl olması ve ekstra kazı ve boru maliyetlerinin olmaması sebebiyle uygulanması en kolay ve en ekonomik yöntemdir.

Bölgesel ısıtma sistemlerinde yüksek miktarda ısı kaybı mevcuttur. Bu kayıpların yerlerinin ve kalitesinin belirlenerek uygun ısı geri kazanım sistemlerinin tasarlanması ve uygulanması ile ülke ekonomisine büyük ölçüde katkı sağlanabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmaya finansal katkılarından dolayı Kafkas Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz (Proje No: 2017-FM-82).

Kaynaklar (References)

- [1] Rosti B., Omidvar A., Monghasemi N., Optimal insulation thickness of common classic and modern exterior walls in different climate zones of Iran, *Journal of Building Engineering*, 27, 100954, 2020.
- [2] Kayfeci M., Determination of energy saving and optimum insulation thicknesses of the heating piping systems for different insulation materials, *Energy and Buildings*, 69, 278-284, 2014.
- [3] Keçebaş A., Determination of optimum insulation thickness in pipe for exergetic life cycle assessment, *Energy Conversion and Management*, 105, 826-835, 2015.
- [4] İlhan U., Optimum insulation thickness for pipes in district heating systems, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 42, 225-232, 2018.
- [5] Mazhar A.R., Liu S., Shukla A., A state of art review on the district heating systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 420-439, 2018.
- [6] Lake A., Rezaie B., Beyerlein S., Review of district heating and cooling systems for a sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 417-425, 2017.
- [7] Sayegh M. A., Danielewicz J., Nannou T., Miniewicz M., Jadwiszczak P., Piekarska K., Trends of European research and development in district heating technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 1183-1192, 2017.
- [8] Jie P., Tian Z., Yuan S., Zhu N., Modeling the dynamic characteristics of a district heating network, *Energy*, 39, 126-134, 2012.
- [9] Ertem G., Çelik B., Yeşilyurt S., Endüstriyel tav fırınlarında ısı denkliliği hesaplamaları ve enerji verimliliğinin belirlenmesi, IV. Ege Enerji Sempozyumu, İzmir-Türkiye, İzmir, 1-8, 21-23 Mayıs, 2008.
- [10] Terhan M., Doğalgaz yakıtlı bir kazanda baca gazından enerji geri kazanımı ve yoğunlaşma olayının enerji, ekserji ve ekonomik yönden incelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2015.
- [11] Sinanoğlu U., Esen D.Ö., Karakaş E., Enerji ekonomisi açısından geri kazanım sistemleri, TMMOB 1. Enerji Sempozyumu, Ankara-Türkiye, 101-110, 12-14 Kasım, 1996.
- [12] Che D., Da Y., Zhuang Z., Heat and mass transfer characteristics of simulated high moisture flue gases, *Heat Mass Transfer*, 41, 250- 256, 2005.
- [13] Pena F., Blanco J. M., Evaluation of the physical dew point in the economizer of a combined cycle burning natural gas, *Applied Thermal Engineering*, 27, 2153-2158, 2007.
- [14] Levy E., Bilirgen H., Jeong K., Kessen M.J., Samuelsen C., Whitcombe C., Recovery of water from boiler flue gas, Final Technical Report, Lehigh University, Energy Research Center, Bethlehem, 2008.
- [15] Jeong K., Kessen M.J., Bilirgen H., Levy K.E., Analytical modeling of water condensation in condensing heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2361- 2368, 2010.
- [16] Hill J.M., Study of low-grade waste heat recovery and energy transportation systems in industrial applications, Master of Science, Alabama University, Department of Mechanical Engineering, Alabama, 2011.
- [17] Chen Q., Finney K., Li H., Zhang X., Zhou J., Sharifi V., Swithenbank J., Condensing boiler applications in the process industry, *Applied Energy*, 89, 30- 36, 2012.

18. [18] Li J., Saraireh M., Thorpe G., Condensation of vapor in the presence of non-condensable gas in condensers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4078- 4089, 2011.
19. [19] Alkhamis T.M., Alhusein M.A., Kablan M.M., Utilization of waste heat from the kitchen furnace of an enclosed campus, *Energy Conversion and Management*, 10, 1113-1119, 1998.
20. [20] Bhattacharjee K., Energy conservation opportunities in industrial waste heat recovery systems, *Energy Engineering*, 107, 7-13, 2010.
21. [21] Bujak J., Mathematical modelling of a steam boiler room to research thermal efficiency, *Energy*, 33, 1779- 1787, 2008.
22. [22] DeFrees J., Stuckey R., Condensing economizers, *Ashrae Journal*, 49 (11),16-23, 2007.
23. [23] Hwang K., Song C.H., Saito K., Kawar S., Experimental study on titanium heat exchanger used in a gas fired water heater for latent heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, 30, 2730-2737, 2010.
24. [24] Shi X., Che D., Li H., Agnew B., Gao J., An investigation of the performance of compact heat exchanger for latent heat recovery from exhaust flue gases, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 606-615, 2011.
25. [25] Xiao P., Zhang Y., Wang Y., Wang J., Analysis of an improved economizer system for active control of the coal-fired boiler flue gas temperature, *Energy*, 170, 185-198, 2019.
26. [26] Tang W., Feng H., Chen L., Xie Z., Shi J., Constructal design for a boiler economizer, *Energy*, 223, 120013, 2021.
27. [27] Babu C. R., Kumar P., Roy S., Kanungo D., CFD analysis of an economizer for heat transfer enhancement using serrated finned tube equipped with variable fin segments, *Materials Today: Proceedings*, 45, 222-230, 2021.
28. [28] Chantasiriwan S., Optimum installation of economizer, air heater, and flue gas dryer in biomass boiler, *Computers and Chemical Engineering*, 150, 107328, 2021.
29. [29] Eyidoğan M., Kaya D., Dursun Ş., Taylan O., Energy saving and emission reduction opportunities in an industrial annealing furnaces, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (4), 735-743, 2014.
30. [30] Topal H. İ., Kopaç M., Eyriboyun M., Çatalağzı termik enerji santrali ile bölgesel ısıtma yapılabiliğinin enerji analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 37 (1), 139-146, 2017.
31. [31] Terhan M., Comaklı K., Design and economic analysis of a flue gas condenser to recover latent heat from exhaust flue gas, *Applied Thermal Engineering*, 100, 1007-1015, 2016.
32. [32] Terhan M., Yoğuşmalı ısı geri kazanım cihazlarının tasarımına çığır noktası sıcaklıklarının etkisinin yakıt tiplerine göre araştırılması, *Politeknik Dergisi*, 24 (1), 31-38, 2021.
33. [33] Comaklı K., Terhan M., Energy and economic analysis of heat recovery from boiler exhaust flue gas, *International Journal of Energy and Power Engineering*, 10 (4), 450-458, 2016.
34. [34] Terhan M., Comaklı K., Baca gazı atık ısı ile kazan yakma havasının ön ısıtılmasının fizibilitesi, *Mühendis ve Makina*, 56, 56-63, 2015.
35. [35] Okka O., Mühendislik ekonomisi, Nobel Yayın Dağıtım, Türkiye, 2006.