

Atık Isı Geri Kazanım Sistemlerine Yönelik Literatür Araştırması ve Sanayiden Örnek Vaka İncelemesi

Nehir TOKGÖZ*¹, Ömer ÖZGÜN¹

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

Geliş tarihi: 16.01.2019

Kabul tarihi: 28.06.2019

Özet

Yaşanan hızlı nüfus artışı, sanayileşme oranının yükselmesi ve teknolojiye enerjiye duyulan ihtiyacı günden güne arttırmaktadır. Dünya genelinde birçok endüstriyel tesise ait enerji tüketiminin yaklaşık olarak dörtte birinin atmosfere atılan atık gazlar ile kaybolduğu varsayılmaktadır. Çok büyük miktarda olan bu kaybın tekrar kazanılması geri kazanım sistemleri ile mümkün hale gelmektedir. Bu çalışmada atık ısı geri kazanım sistemleri üzerine yapılmış olan daha önceki çalışmalar sınıflandırılarak incelenmiştir. Ayrıca örnek bir vaka çalışması yapılarak doğalgaz yakıtlı bir kazan için baca gazı ısı geri kazanım potansiyeli araştırılmış, atık baca gazındaki ısıdan yararlanmak amacıyla ısı geri kazanım sistemi (reküperatör) tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem için; enerji analizleri, ısı transfer analizleri ve ekonomik analizler yapılmış, sistemin 15 yıllık ekonomik ömrü boyunca sağlayacağı yakıt tasarrufu, Net Bugünkü Değer Metodu ile 1.121.410,23 TL olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık ısı, Atık ısı geri kazanım sistemleri, Reküperatör, Isı transferi

A Review on Waste Heat Recovery Systems and a Case Study from Industry

Abstract

Rapid population growth, increase in the industrialization rate and technological developments increase the need for energy day by day. It is assumed that about one-fourth of the energy consumption of many industrial plants throughout the world is lost waste gases discharged into the atmosphere. Recovering this huge waste heat is possible with heat recovery systems. In this study, literature review and classifications on waste heat recovery systems have been investigated. In addition, a case study was conducted to investigate the potential of exhaust gas heat recovery for a natural gas-fired boiler. Results led us design a heat recovery system to utilize the waste heat from the exhaust gas. For this design; energy, heat transfer and economic analysis have been made and the fuel savings of the system was calculated 1.121.410, 23 TL for 15 years economic life with present value method.

Keywords: Waste heat, Waste heat recovery systems, Recuperator, Heat transfer

*Sorumlu (Başlıca) yazar (Corresponding author): Nehir TOKGOZ, nehirtokgoz@osmaniye.edu.tr

1. GİRİŞ

Dünyada ve ülkemizde hızlı nüfus artışı ve sanayideki gelişmeler ile doğru orantılı olarak enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Mevcut enerji kaynakları artan enerji ihtiyaçlarını karşılayamaz duruma gelmiştir. Bunun sonucunda enerji verimliliği kavramı ortaya çıkmıştır. Harcanan enerji miktarının, üretimden elde edilen ürün miktarını ve kalite oranını düşürmeden, ekonomik gelişmeleri ve sosyal refahı olumsuz etkilemeyecek şekilde en aza indirilmesi enerji verimliliği olarak adlandırılmaktadır.

Başka bir deyişle enerji verimliliği; sistemdeki gaz, buhar, ısı, hava ve elektriksel enerji kayıplarını engellemek, sistemden atık olarak uzaklaştırılan oluşumların geri kazanımı ve tekrar değerlendirilmesi veya üretim miktarını düşürmeden ihtiyaç duyulan enerji ihtiyacının azaltılması, verimi daha yüksek enerji kaynakları, daha gelişmiş endüstriyel süreçler, enerji geri kazanımı gibi verimlilik artırıcı önlemlerin tamamıdır. Enerji verimliliğinde esas olan herhangi bir tasarrufa veya kısıtlamaya gidilmeden enerjinin etkin bir şekilde kullanılarak tüketimin azaltılmasıdır. Üretim kapasitesi yüksek ve enerji tüketimi fazla olan sanayi tesislerinde enerjinin verimli bir şekilde kullanılması maliyetleri düşürdüğü gibi enerji eldesi için gerekli olan kaynak tüketimini de ciddi derecede azaltmaktadır [1].

Dünya genelinde birçok endüstriyel tesise ait enerji tüketiminin yaklaşık olarak dörtte birinin atmosfere atılan ısı ve gaz ile kaybolduğu varsayılmaktadır [2].

Çok büyük miktarda olan bu kaybın tekrar kazanılması geri kazanım sistemleri ile mümkün hale gelmektedir. İlk yatırım maliyetleri yüksek olduğu halde uzun vadede sağladığı faydalardan dolayı endüstriyel tesislerde geri kazanım sistemleri kurulmaya başlanmıştır. Geri kazanım sistemleri hem endüstriyel tesislerin enerji ihtiyaçları için ayırdıkları payı azaltmakta hem çevreye verdiği zararı düşürmekte hem de enerjinin en verimli şekilde kullanılmasını

sağlamaktadır [2]. Örneğin; endüstriyel bir kazanda verim yaklaşık %75 civarında, enerji kayıpları (boru kayıpları, radyasyon ve konveksiyon kayıpları, sıcak baca gaz kayıpları) yaklaşık %25 civarındadır. Geleneksel bir buhar kazanında üretilen enerjinin takribi %16-20 kadarı atık ısı olarak baca gazları ile beraber sistemden ayrılmaktadır. Oranın yüksek olması, geri kazanım sistemlerinin baca gazları için önemini açıkça göstermektedir [3].

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Endüstriyel tesislerde maliyeti oluşturan en büyük ana girdilerden biri enerji olduğu için, işletmelerinin her bölümünde enerji verimliliği ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Tesislerin en büyük enerji kayıplarından birini ise atık ısılar oluşturmaktadır. Bu kaybı azaltabilmek için ısı enerjisinin kullanıldığı hemen hemen her sektörde atık ısı geri kazanım sistemleri kullanılmaktadır. Herhangi bir üretim işlemi sonrası açığa çıkan ve atmosfer sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta bulunan ısıya atık ısı, bunları geri kazanmak için tasarlanan sistemlere de atık ısı geri kazanım sistemleri denilmektedir. Atık ısı sıcaklık değerlerine göre 650 °C üzerindeki yüksek sıcakta ısı, 120 °C-650 °C arası orta sıcaklıkta ısı ve 120 °C altındaki düşük sıcaklıkta ısı olmak üzere sınıflandırılabilir. Atık ısı ve geri kazanılmasıyla ilgili bilim adamları tarafından yapılan birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalardan bir kısmı sınıflandırılarak özetlenmeye çalışılmıştır.

2.1. Isı Borusu ile Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Güngör, son yıllarda değişik, verimli ve çok üstün uygulamaları ile yaygın bir kullanım alanı bulan ısı borularının; temel prensipleri, kullanılan malzemeler, çalışma akışkanları üzerine inceleme yapmış, ısı borulu ısı değiştiricilerin enerji geri kazanım ve özellikle iklimlendirmedeki uygulamalarını incelemiştir [4]. Ersöz, ısı borusu vasıtasıyla atık ısıların geri kazanımı için baca gazlarından yararlanma yolu deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yorumlanarak ne kadarlık bir ısı kazancı olduğu incelenmiştir [5]. Ersöz yaptığı bir diğer çalışmasında [6] ısı borusu

yardımla baca gazları ile atılan ısının geri kazanılmasını deneysel olarak incelemiştir, inceleme sonuçlarında ise baca gazı sıcaklığının derecesine bağlı olarak ısıtılmak istenilen akışkanında elde edilen sıcaklık değerlerini yorumlamıştır.

Ürün, [7] ısı borulu atık baca gazlarından geri kazanılabilecek ısı için kurulu bir sistemin ısı performansını deneysel olarak incelemiştir. Sistem için, R-134a soğutucu akışkanın, R-410a soğutucu akışkanına göre daha etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Remeli, [8] bir ısı borusu termoelektrik jeneratörü kullanarak, ısı geri kazanım ve güç üretimi için pasif bir ısı transferi sistemi geliştirmiştir. Sistemin, aynı anda atık ısıyı geri kazanma ve herhangi bir yardımcı güç olmaksızın tamamen pasif bir sistemden elektrik enerjisi üretme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Jouhara, [9] çelik endüstrisinde kullanılmak üzere düz ısı borusu ısı değiştiricisi ile ısı geri kazanım sisteminin tasarımı ve üretimini incelemiştir. Çalışmasının sonucunda düz ısı borusu ısı değiştiricisinin endüstriyel uygulamalarda atık ısı geri kazanımı için yenilikçi yüksek verimli bir teknoloji olduğunu belirtmiştir.

2.2. Eşanjör Uygulamaları ile Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Oğulata ve Doba, [10] yaptıkları çalışmalarında, atık ısı geri kazanım sistemlerindeki yüksek verimlerden dolayı çapraz akışlı levhalı tip ısı değiştiricisini incelemişlerdir. Sıcaklık, hava hızı ve sistemdeki basınç kayıplarını ölçmüş ve sistemin etkinliğini belirlemişlerdir.

Şahan, [11] çalışmasında HVAC sistemlerinde, plakalı ısı değiştiricisi ile yapılabilecek geri kazanım uygulamalarını incelemiş, havadan havaya plakalı eşanjörler kullanıldığında, projede meydana gelen değişiklikleri ve elde ettiği bulguları örnekler üzerinde değerlendirmiştir.

Atalay, [12] atık ısı geri kazanımı sağlamak için kullanılan döner tip ısı değiştiricisini incelemiştir.

Eşanjörün etkinliği için dönme hızı ve hava debisine bağlı olarak deneysel, analitik ve sayısal hesaplamalar yapmıştır. Belirli bir değere kadar dönme hızının artmasıyla, ısı değiştiricisi tarafından taşınan sıvının arttığını ve akış hızının azalmasıyla, etkililiğin arttığını belirtmiştir. Goel, [13] çalışmasında baca gazı atık ısı ve atık su geri dönüşümü için yoğunlaşma ısı değiştiricisi tasarlamış ve performans analizlerini yapmıştır.

2.3. Isı Pompası ile Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Yamankaradeniz, [14] bir tekstil fabrikasından elde ettiği verileri kullanarak atık ısıdan enerji geri kazanımından kullanılan klasik sistemlerle ısı pompası sistemlerinin karşılaştırılmasını yapmıştır. Boyahaneden 65°C'de çıkan atık suyun enerjisinden yararlanmak için kullanılan plakalı ısı eşanjörü yerine ısı pompası kullanılması halinde, yeni sisteme ait ekonomik analizleri yapmış, yıllık enerji tasarruf miktarları ve geri ödeme süreleri hesaplanmıştır.

Yamankaradeniz yapmış olduğu bir diğer çalışmada, [15] enerji geri kazanımı sağlamak için iki farklı prototip ısı pompası deney tesisatı tasarlamıştır. İlk çalışmada, endüstride kullanılan kurutma proseslerinde, kurutma odasından çıkan nemli ve sıcak havanın ısını geri kazanmak amacıyla, ikinci çalışmada ise endüstride birçok proses sonucu açığa çıkan ve drenaja atılan düşük sıcaklıktaki atık sıvılardan faydalanmak amacı ile prototip ısı pompası tesisatı kurmuştur. Her iki çalışmasının sonucunda ısı pompası kullanımının oldukça verimli olduğu ortaya koymuştur.

Muslu, [16] ısı pompası destekli ısı geri kazanım cihazının farklı sıcaklıklardaki performans analizlerini yapmış, ülkemizde üretilen bir ısı pompası destekli ısı geri kazanım cihazını kullanmış ve farklı sıcaklıklarda performans ölçümlerini yapmıştır.

Farshi, [17] kademeli sıkıştırma-emme ısı pompası adı verilen yeni bir ısı pompası tasarlayarak diğer ısı pompaları (sıkıştırma, soğurma ve hibrid sıkıştırma-emme) ile karşılaştırılmıştır. Dört farklı ısı pompasının özelliklerini belirlemek için enerji ve ekserji analizlerini yaparak karşılaştırılmıştır.

2.4. Ekonomizer ile Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Gibbs, [18] bir kazana ekonomizer takılması ile elde edilecek yakıt tasarrufunu incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonrasında yakıt tasarrufunun %6-16 arasında olduğunu ortaya koymuştur.

Butcher ve Litzke, [19] çalışmalarında, yakıt olarak kömür kullanılan kazanlarda kullanılan yoğunlaşmalı ekonomizerlerin verimliliğini ve baca gazına ait çıktıların emisyon kontrolleri açısından olası kullanımlarını hesaplamışlardır. Çalışmalarında, ısı transfer hesaplamaları yaparak bu tür kazanlara entegre edilen hava ve su soğutmalı ekonomizerlerle ilgili deneysel incelemeler yapmışlardır.

Çıtır, [20] ray ve profil haddehanesinde bulunan tav fırınında ekonomizer kullanılması durumunda atık ısı geri kazanım çalışması yapmıştır. Çalışmasında baca gazı ölçümleri sonuçları alıp, kütle ve enerji denklemlerini elde ederek ekonomizerden enerji kullanım imkanları, tasarım kriterleri ve amortisman süreleri hesaplanmıştır. Ekonomizerin %84 verimle çalıştığı tespit etmiş ve ekonomizer kullanımı sonucu yıllık kazancın toplamda 513,916 € sistemin amortisman süresinin ise 3,6 yıl olacağını hesaplamıştır.

He, [21] kömürle çalışan elektrik santrali için düşük basınçlı ekonomizeri atık ısı geri kazanım sistemi olarak tasarlamış ve termodinamik analizlerini yapmıştır. Düşük basınçlı ekonomizerin kullanılmasıyla, egzoz baca gazı içerisindeki ısının etkin bir şekilde geri kazanılabileceğini ve aynı zamanda su tüketiminin de azaltılabileceğinden bahsetmiştir.

Kılınc, [22] demir çelik sektöründeki endüstriyel bir tesise ait tav fırını bacasından atılan atık gazın ekonomizer vasıtasıyla geri kazanılması sonucu elde edilen ısı enerjisinin merkezi ısıtma-soğutma sistemlerinde ve sıcak su kullanım yerlerinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Fırın bacasından atılan gazın sıcaklığına bağlı olarak ısı kapasite hesaplamaları ve optimum değerler tespit edilmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde tesisin ihtiyacı olan sıcak suyun, ekonomizer vasıtasıyla geri kazanılan atık ısı enerjisi ile elde edilmesi sonucu

yıllık yaklaşık olarak 6.300.000 TL'lik tasarruf sağlandığı hesaplanmıştır.

2.5. Reküperatör ile Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Aras, [23] baca gazlarını kullanarak kazan ön yakma havasının ısıtılması ve sıcak su temini için bir reküperatör tasarımı yapmıştır. Çalışma sonucunda, kazan veriminin %92'den %99'a yükseleceğini, reküperatör kullanımı sonucu 5 Nm³/h yakıt tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir.

Selimli, [24] bir tesisin tav fırınında, yakıt optimizasyonu sağlamak ve yüksek enerjili fırın egzoz gazından (700 °C-850 °C) fırın yakma havasına ısı transfer sağlamak amacıyla reküperatör tasarlamıştır. Tasarlanan reküperatör vasıtası ile 820 °C baca gazı sıcaklığı ile 575 °C yakma havası elde edilmiştir. Bu sayede enerji geri kazanımı ve emisyon azalımı sağlanırken, ayrıca yüksek kaliteli ürün ve düşük maliyetli üretim elde edilmiştir.

2.6. Kazan Uygulamalarında Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Willems, [25] endüstriyel kazanlar için gelişmiş sistem kontrolleri ve enerji tasarrufu yöntemlerini incelemiş, kazanlarda enerji tasarrufu için uygulanabilecek yöntemleri anlatmıştır.

Cortina, [26] çalışmasında biyo-yakıtlı kazanlar için kondensörlerin önemini vurgulamış, kondenser kullanılarak geri kazanılabilecek ısıdan bahsetmiştir.

Ünlü, [27] buhar kazanının verimini yükseltmek için, kazan yüzey blöfünün yapılması ve blöften enerji kazanımı, kondensin geri döndürülmesi, buhar kaplarındaki buhar kaçaklarının önlenmesi, atık ısıdan ve flaş buhardan ısı geri kazanımı üzerine çalışmalar yapmıştır.

Terhan, [28] Atatürk Üniversitesi'nde kurulu bulunan ısıtma merkezindeki kazanlardan egzoz gazı olarak dışarıya atılan atık enerjinin geri kazanımı ve atılan enerjinin tesislerde kullanım potansiyelini araştırmıştır. Neticede, egzoz edilen

baça gazı enerjisinin sistemde yeniden kullanımı ile kazan veriminin artacağı, yakıt tasarrufu sağlanacağı ve mahal ile sıcak su ısıtılmasında kullanılabilceğini tespit etmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda yıllık 413.673,07 m³ yakıt tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

Wang, [29] endüstriyel buhar kazanı atık ısı ve su geri kazanımı için geliştirilen membran bazlı yoğunlaştırıcı teknolojiyi incelemiştir. Egzoz su buharının %40 oranında azaltıldığı ve toplam verimliliğin %5'ten fazla bir artış gösterildiği görülmüştür.

Görgülü, [30] bir tesiste baca gazından çıkan atık ısı enerjisini geri kazanarak çift etkili absorpsiyonlu soğutma sistemi tasarlamıştır.

2.7. Atık Isı Geri Kazanımında ORÇ Uygulamalarının İncelendiği Çalışmalar

Yağlı, [31] bir tav fırınının bacasından atmosfere atılan egzoz gazı atık ısını kullanması için organik Rankine çevrimi tasarlamıştır. ORÇ tasarımı toluen akışkanı kullanılarak yapılmış ve ardından çevrimin iyileştirilmesi için farklı akışkanlar incelenmiştir. Her bir akışkan için enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Peris, [32] seramik endüstrisinde düşük dereceli atık ısı geri kazanımında organik Rankine çevriminin deneysel olarak uygulanmasını yapmıştır. Çalışmasında, organik Rankine çevriminin gerçek endüstriyel koşullarda performansını doğrulamak ve uygulamanın kârlılığını değerlendirmeyi amaçlayan araştırmacı, laboratuvar ve endüstriyel uygulama testlerinin ORÇ performans verilerinden, ısı geri kazanım sistemi modeli geliştirilmiştir. Modelin kullanılması ile beraber, çalışma yılı boyunca sistemin elektrik üretimi simüle edilerek 115 MWh üzerinde enerji üretimi elde edilmiştir. Seyedkavoosi, [33] içten yanmalı bir motordan atık ısı geri kazanımı için iki kademeli organik Rankine çevriminin ekserji analizini yapmıştır. Isı geri kazanım sistemi için çalışma sıvıları R-123, R-134a ve su seçilmiştir. Sonuçlar, dikkate alınan koşullar altında R-123'ün, %21'lik bir ekserji verimi ve 468 kW'lık net güç üretmesi sebebi ile sistem için en iyi çalışan akışkan olduğunu ortaya koymuştur.

Ramirez, [34] bir çelik fabrikasında atık ısı geri kazanım ünitesi ile birlikte büyük ölçekli bir organik Rankine çevrimi pilot tesisi tasarlanmıştır. Atık ısı, doymuş buhar üretmek için elektrikli ark ocağının dumanlarından geri kazanılmış ve daha sonra ısıtma mevsiminde bir bölgesel ısıtma tesisatına ve yılın geri kalanında da elektrik üretimi için organik Rankine çevrimine gönderilmiştir. Organik Rankine çevriminin nominal güç çıkışı 1,8MW ve net verimlilik %21,7 olarak hesaplanmıştır.

2.8. Gaz Türbinlerinde Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Srikanth, [35] dizel yakıtı kullanan gaz türbininin egzoz gazını kullanarak atık ısı geri kazanım kazanlarında, kazan borularının korozyondan kaynaklanan arızalarını analiz etmiştir. Kazanın düşük sıcaklıktaki bölgelerinde yüksek korozyon eğilimi ve buna bağlı arızaların, bu bölgelerdeki hidratlı ferrik sülfat oluşumu ile doğrudan ilişkili olduğu bulunmuştur.

Yaylacı, [36] enerji sektörünün en önemli donanımlarından biri olan gaz türbini, atık ısı kazanı, konvansiyonel kazan ve buhar türbinlerinden oluşan TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi kuvvet santrali ünitesinin simülasyon modelini hazırlanmıştır. Kullanmış olduğu program vasıtası ile sisteme ait termodinamik hesaplamalar yapmıştır. Sistemin ekserji analizini yaparak ekserji veriminin optimizasyonunu yapmıştır.

Sharma, [37] gemi gaz türbininde kritik üstü ve transkritik karbondioksitin kullanılması sonucu elde edilecek gücün termodinamik analizlerini yapmıştır. Belirtilen çalışma koşulları altında önerilen sistemin, sağlayacağı güç çıktısını yaklaşık %18 artırma potansiyeline sahip olduğunu bulmuştur. Ayrıca, kullanılan sistem ile beraber genel verim %11'den fazla arttığını tespit etmiştir.

2.9. Sektörel Bazlı Yapılan Çalışmalar

2.9.1. Tekstil Sektöründe Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Can, [38] boyama işleminden elde edilen atık ısının geri kazanım potansiyelini değerlendirmiştir. Sudan suya gövde ve boru ısı eşanjörü ile atık ısı

geri kazanım sisteminin etkin çalışma koşullarını optimize etmek için ekserji temelli bir yaklaşım uygulanmıştır. Atık su giriş sıcaklığı, kütle akış hızı, soğutma suyu giriş basıncı ve referans durum koşulları gibi sistem performansını etkileyen parametreler incelenmiştir. Koçlu, [39] boyama işlemi sonrası atılan yüksek yoğunluktaki ve yüksek sıcaklıktaki akışkanların plakalı ısı değiştirici yardımıyla geri kazanımını ve sistemin performans analizlerini incelemiştir. Sistemin kurulması ile birlikte 1 kg pamuk boyama için harcanan doğalgaz miktarında aylık ortalama %28,36 oranında bir azalma kaydedilmiştir.

2.9.2. Demir-Çelik Sektöründe Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Kaşka, [40] çelik endüstrisinde kullanılan tav fırınların atılan ısının geri kazanımı için kullanılan organik Rankine çevriminin performansını incelemiştir. Evaporatör ve yoğurturucu basınçları, buharlaştırıcı çıkışındaki aşırı ısınma, yoğunlaştırıcıdaki aşırı soğutma ve buharlaştırıcıdaki ısı değişiminin sıkışma noktası sıcaklık farkı gibi bazı çalışma parametrelerinin incelenmesi, tesisin çalışması ve ısı çevrimi prosesine dair önemli bilgiler vermiştir. Eyidoğan, [41] endüstriyel bir tesise ait sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) yakıtlı haddehane tav fırınında enerji verimliliği çalışmaları yapmıştır. Fırın verimliliği ve tasarruf potansiyellerini hesaplayabilmek için çeşitli ölçümler yapmıştır. Ölçüm sonuçlarından elde edilen verileri kullanarak enerji-kütle dengeleri kurmuştur. Hesaplamalar sonucunda fırın genel verimi %52,76 olarak hesap etmiştir. Tav fırınında yapılan incelemeler sonucu potansiyel enerji tasarruf noktalarının, yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalıştırılma ve reküperatörün ısı transfer alanının yetersiz kalması olduğu görülmüştür. Bu noktalara yapılacak iyileştirmeler ile, yıllık 150.910\$ tasarruf elde edileceği ve yıllık 678,500 kg CO₂ emisyon salınımının önlenilebileceğini belirtmiştir. Akın, [42] ergimiş cürufun sahip olduğu ısı enerjisinin geri kazanılmasına olanak sağlayacak yenilikçi bir sistem tasarlanmıştır. Ayrıca, tasarlanan sistemin maliyet muhasebesi yapılmış ve ticari yönden kullanılabilirliği analiz edilmiştir. Deng, [43] çelik endüstrisinde cüruf soğutma işleminde atık ısının geri kazanılması için kullanılan ısı borusu ısı

değiştiricisini incelemiştir. Isı değiştiricisini temsil eden ana parametreler, deneysel ve teorik olarak araştırılarak en uygun işletme koşulları termodinamiğin birinci ve ikinci kanunları ile belirlenmiştir. Sonuçta, ısı transfer oranı ve ısı transfer katsayısının, su akış hızına bağlı olarak arttığını ortaya koymuştur. Jouhara, [44] çelik üretiminde açığa çıkan yüksek sıcaklıktaki ısının geri kazanımı için düz ısı borusu ısı eşanjörü tasarlamış ve test etmiştir. Tasarlanan ısı değiştiricisinin termal performansı ve ısı transfer hızı araştırılmıştır. Sonuçlar, sistemin ısı geçiş kabiliyetinin yüksek sıcaklık kaynağının sıcaklığından çok fazla etkilendiğini göstermektedir. Chang, [45] atık ısı geri kazanımıyla birlikte, demir çelik sektöründe kok üretim sürecini modellenmiştir. Gerçek fabrika verileri, literatür verileri ile karşılaştırılmıştır, söndürme moduna ve atık ısı geri kazanımına dayanan kok üretim süreci termodinamik, tekno-ekonomik ve CO₂ emisyon analizi üzere üç metot ile analiz edilmiştir. Çalışmalar sonucunda atık ısı geri kazanımı ile enerji ve ekonomik verimliliğin artacağı ve CO₂ emisyonlarının azaltılabileceği tespit edilmiştir.

2.9.3. Çimento ve Orman Sektöründe Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Karellas, [46] endüstride fırın ve ön ısıtıcıların radyasyon ve konveksiyon kayıpları nedeniyle sisteme giren ısının geri kazanımı için su buharı, Rankin ve organik Rankine çevrimlerini karşılaştırılmıştır. Neticede organik Rankine çevriminin daha verimli olduğu görülmüştür. Ekonomik açıdan bakıldığında, atık ısı geri kazanım tesisi ile geri kazanılan ısı enerjisi ile ciddi miktarlarda para tasarrufu yapılabileceği görülmüştür. Tütüncü, [47] çimento fabrikalarında atık ısı geri kazanım sistemlerinin enerji verimliliğine olan etkileri, sistemin termodinamik olarak incelenmesi ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Güneş, [48] bir orman endüstri tesisinde kojenerasyon sistemi ile elde edilebilecek elektrik enerjisi ve ısı enerjisinin potansiyelini araştırmıştır. Sistemin uygulanması ile beraber tesis için hem elektrik hem de ısı enerjisi üretilebileceği belirtilmiştir. Sistemin yıllık 1,8 milyon TL enerji tasarrufu sağlayacağı ve kendini 2 ay içerisinde amorti edeceği görülmüştür.

2.9.4. Gıda Sektöründe Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Aneke, [49] enerjiyi yoğun olarak kullanan cips üretim sürecinin fritöz bölümüne vurgu yaparak, ısı geri kazanımının önemini vurgulamıştır. Fritöz bölümünden çıkan atık ısının elektrik enerjisine çevrilmesi ve bu çevrim için bir çift ısı kaynağı sistemi kullanımını önermektedir. Önerilen teknolojinin şu anda 216 kW kapasiteli olan tesisin günlük en yüksek elektrik ihtiyacının yaklaşık %92'sini ürettiğini göstermektedir. Yaşam döngüsü değerlendirme çalışması, üretilen elektriğin, kömürle çalışan geleneksel bir elektrik santralinden üretilen elektriğin yerini almak için kullanımı halinde CO₂ emisyonunu 139,580 kg/yıl azaltabileceğini göstermektedir. Manno, [50] endüstriyel makarna üretim sürecini incelenmiş ve kurutma işleminden gelen atık ısıyı geri kazanmak için bir adsorpsiyon çevrimi tasarlamış ve elde edilebilecek enerji tasarruflarını değerlendirmiştir. Yapılan analizler sonucu elde edilen veriler, %40-50 aralığında ısı enerjisi tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir.

2.9.5. Enerji Üretim Tesisinde Atık Isı Geri Kazanımının İncelendiği Çalışmalar

Eyriboyun, [51] Zonguldak Çatalağzı Termik Elektrik Santrali'nin yoğunlaştırıcı soğutma suyu atık ısısının, yerleşim yerlerinin ısıtılmasında kullanılmasını incelenmiştir. Kullanılacak olan ısı pompası sistemiyle yoğunlaştırıcı soğutma suyu atık ısısının geri kazanılarak konut ısıtılmasında kullanılmasının hem ekonomik kazanç sağlayacağı hem de doğal kaynakların korunması hem de çevre kirliliğinin azaltılması amaçlanmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre; işletme giderleri ve enerji tasarrufu bakımından ısı pompası sistemi avantajlı olsa bile ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve de konuyu sahiplenen resmi bir kurum olmaması nedeniyle bu ısının kullanılmadığından bahsetmiştir. Enç ve Kasırga, [52] Depo Gazı Enerji Üretim Tesisinde oluşan ve atmosfere atılan atık ısının değerlendirilmesini araştırmışlardır. Dizayn edilen atık ısı geri dönüşüm sistemiyle ısı geri kazanımı sağlanmış ve bu ısı sera ısıtılmasında kullanılmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

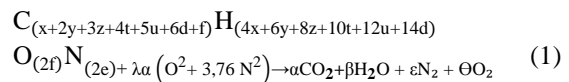
Sunulan bu çalışmada orman endüstri sektöründe hizmet veren bir tesisin atık ısı geri kazanım potansiyeli araştırılmıştır. Tesiste ısıtma, sıcak su ve proses ihtiyaçlarını tedarik edebilmesi için 2 adet doğalgaz yakıtlı alev borulu kızgın sulu kazan sistemi kullanılmaktadır. Mevcut sistemin enerji, ısı transferi ve ekonomik çözümlenmeleri [28] yapılarak elde edilen sonuçlar neticesinde atık ısıdan yararlanmak için ön hava ısıtıcı tasarımı (reküperatör) ve uygulaması yapılmıştır.

3.1. Enerji Hesaplamaları

Bu bölümde yakıt olarak doğalgaz kullanılan kazanlardan atık baca gazı olarak çıkan enerjinin büyüklüğünü tespit etmek, ön ısıtıcı ile ne kadarlık kısmının tekrar kazanılabileceğini hesaplamak için enerji analizi yapılmıştır. Tesiste kullanılan doğalgazın %92'si metan, geri kalan %8'lik kısmı propan, bütan, az miktarda etan ve karbondioksitten oluştuğu kabul edilmiştir. Doğal gazın özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. İçeriğinde bulunan metan moleküllerinin kimyasal yapısının basitliği nedeniyle yanma işlemi kolay olup, tam yanma gerçekleşmektedir. Kapalı formülünün çıkarılabilmesi için doğalgazın kimyasal içeriğine ve hacimsel yüzde değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Hava ile yakıtın tam yanması sonucu açığa çıkan yanma ürünleri ve mol miktarları Eşitlik 1'de gösterilmiştir [53].

Çizelge 1. Doğal gazın özellikleri

Yakıt	Alt Isıl Değer (H _u) [kJ/kg]	Üst Isıl Değer (H _o) [kJ/kg]
Doğal Gaz	45000	50000
Metan	50050	55530
Propan	46340	50330
Bütan	45370	49150



Yanma reaksiyonu neticesinde ürün olarak CO₂, H₂O, O₂ ve N₂ meydana gelmektedir. Yanma ürünlerine ait mol miktarları kmol cinsinden kimyasal denkleştirme yapılarak hesaplanabilir.

Toplam baca gazı miktarı kmol cinsinden Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır.

$$n_{bg} = n_{O_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} \quad (2)$$

Bacadan çıkan egzoz gazlarını meydana getiren bileşenlerin her birine ait mol kesirleri Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır.

$$x_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{bg}}, \quad x_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_{bg}}, \quad x_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_{bg}}, \quad x_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{bg}} \quad (3)$$

Egzoz gazlarının ortalama özgül ısı Eşitlik 4 ile hesaplanmıştır [53].

$$c_{p,ort} = c_{p(CO_2)}x_{CO_2} + c_{p(O_2)}x_{O_2} + c_{p(H_2O)}x_{H_2O} + c_{p(N_2)}x_{N_2} \quad (4)$$

\dot{c}_p değeri ise; özgül ısı değerini ifade etmekte olup birimi kJ/kg.K olarak alınmıştır. Yakıtın yanması sonucu elde edilen yakıt enerjisi Eşitlik 5 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{yakıt} = \dot{Q}_{yakıt} x H_u \quad (5)$$

Eşitlikteki $\dot{Q}_{yakıt}$ birim zamanda sarf edilen yakıt olup birimi m^3/s 'dir. H_u ise yakıtın alt ısı değerini ifade etmekte olup birimi kJ/ m^3 'tür. Baca gazlarının birim zamandaki kütlesi, yakıtın ve havanın birim zamandaki kütlelerinin toplamına eşittir.

$$\dot{m}_{yakıt} + \dot{m}_{hava} = \dot{m}_{baca\ gazı} \quad (6)$$

Havanın birim zamandaki kütlesi (kg/s);

$$\dot{m}_{hava} = \frac{\dot{m}_{yakıt} x 4,76 x \lambda x Ma_{hava}}{Ma_{yakıt}} \quad (7)$$

Eşitlik ile hesaplanır. $\dot{m}_{yakıt}$ yakıtın birim zamandaki kütlesini, λ hava fazlalık katsayısını, Ma_{hava} havanın mol ağırlığını ve $Ma_{yakıt}$ ise yakıtın mol ağırlığını ifade etmektedir. Yakıtın birim zamandaki kütle değeri (kg/s);

$$\dot{m}_{yakıt} = \dot{Q}_{yakıt} x \rho_{yakıt} \quad (8)$$

Eşitlik 8 ile hesaplanır. Eşitlikteki $\dot{Q}_{yakıt}$ değeri, birim zamanda sarf edilen yakıt olup gaz yakıtlar için birimi m^3/s 'dir. $\rho_{yakıt}$ ise yakıtın ortam şartlarındaki yoğunluğunu ifade etmektedir. Gaz yakıtlar için yakıt yoğunluğu ortam koşullarına göre (1 atm basınç ve T_o ortam sıcaklığı °K);

$$\rho_{yakıt} = \frac{Ma_{yakıt} x 273}{22,4 x T_o} \quad (9)$$

Baca gazlarının birim zamandaki kütle ve mol miktarları Eşitlik 10 ve 11'den hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{baca\ gazı} = \dot{m}_{yakıt} + \frac{\dot{m}_{yakıt} x 4,76 x \lambda x Ma_{hava}}{Ma_{yakıt}} \quad (10)$$

$$\dot{n}_{baca\ gazı} = \frac{\dot{m}_{baca\ gazı}}{Ma_{baca\ gazı}} \quad (11)$$

Yakıtın yanması sonucu açığa çıkan enerjinin bir kısmı baca gazları ile beraber atmosfere atılmaktadır. Baca gazlarının enerjisi; baca gazı sıcaklığından ileri gelen duyulur ısı (Eşitlik 12) ve su buharına ait gizli ısıdan (Eşitlik 13) meydana gelir.

$$\dot{E}_{bg,duy} = \dot{n}_{bg} x \dot{c}_{p,ort} x (T_{bg} - T_o) \quad (12)$$

$$\dot{E}_{bg,giz} = (\dot{n}_{bg} x x_{H_2O}) x xM_{H_2O} x h_{fg} \quad (13)$$

Baca gazından dışarı atılan (kayıp) duyulur ve gizli ısı yüzdeleri Eşitlik 14 ve 15 ile hesaplanmıştır.

$$\%e_{kay,duy} = \frac{\dot{E}_{bg,duy}}{\dot{E}_{ya}} x 100 \quad (14)$$

$$\%e_{kay,giz} = \frac{\dot{E}_{bg,giz}}{\dot{E}_{ya}} x 100 \quad (15)$$

Yanma işleminin gerçekleştiği proseslerden enerji kaybının çok büyük bir bölümü baca gazları kayıplarından meydana gelmektedir. Kazan kayıpları hesaplanırken meydana gelen kayıplar baca gazı kayıpları ve diğer kayıplar olmak üzere iki ana başlıkta ele alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Baca gazlarının sahip olduğu enerji duyulur ve gizli enerjinin toplamından hesaplanmıştır. Toplam baca gazı kayıpları, yüzde baca gazı kayıpları ve kazan kayıpları Eşitlik 16, 17 ve 18 ile hesaplanmıştır [54].

$$\dot{E}_{top,bg} = \dot{E}_{bg,duy} + \dot{E}_{bg,giz} \quad (16)$$

$$\% \text{ baca kayıpları} = \frac{\dot{E}_{top,bg}}{\dot{E}_{yakıt}} \times 100 \quad (17)$$

$$\% \text{ kazan kyp.} = \% \text{ baca kyp.} + \% \text{ diğer kyp.} \quad (18)$$

Bacadan atılarak kayba uğrayan enerjinin yıllık parasal değeri, Eşitlik 19 ile hesaplanmıştır. Kazanın 24 saat, 30 gün ve 12 ay balistiği kabul edilmiştir. Verilen eşitlikteki m değeri, 1 m³ doğalgaza ait birim fiyatı göstermektedir.

$$P_{kay} = \frac{\dot{E}_{bg,duy} + \dot{E}_{bg,giz}}{4,18 \times H_u} \times m \times 60 \times 60 \times 24 \times 30 \times 12 \quad (19)$$

Egzoz edilen baca gazlarının soğutulması ile beraber geri kazanım sağlanan enerji, çiylenme noktasının üzerindeki bir sıcaklığa ($T_{bg,c}$) soğutulması halinde yalnızca duyulur enerjinin bir kısmı geri kazanılabilir. Hem duyulur hem de gizli enerjiden geri kazanım sağlanabilmesi için çiylenme noktasının altına inilmelidir.

$$P_{su} = x_{H_2O} \times P_{atm} \quad (20)$$

Denklemden verilen x_{H_2O} baca gazları içerisindeki suyun mol kesri, P_{atm} ise atmosfer basıncıdır. Geri kazanılan enerji miktarı, enerji kütle denkliği yazılarak Eşitlik 21 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{E}_{geri,kaz} = \dot{m}_{bg} \times c_{p,ort} \times (T_{bg,g} - T_{bg,c}) \quad (21)$$

Geri kazanılan ısı miktarının yüzdesel değeri Eşitlik 22 ile hesaplanmıştır.

$$\% \dot{e}_{geri-kazan} = \frac{\dot{E}_{geri,kaz}}{\dot{E}_{yakıt}} \times 100 \quad (22)$$

3.2. Isı Transfer Hesaplamaları

Yapılan enerji analizi neticesinde elde edilen baca gazı enerjisinden geri kazanım sağlayabilmek için ne büyüklükte ısı değiştirici tasarlanması gerektiğini belirlemek için ısı transfer analizi yapılmıştır. Isı transferi için, ısı değiştiricinin geometrik özellikleri toplam boru sayısı, ısı transfer yüzey alanı, boru tarafı ve gövde tarafının basınç düşümleri hesaplanmıştır. Basınç

kayıplarını karşılayabilmek için ihtiyaca duyulacak fan kapasitesi belirlenmiştir. Kazanlardan atık ısı olarak atılan sıcak baca gazı, sisteme dahil edilecek bir ısı değiştiricisi vasıtası ile soğutulurken, elde edilecek ısı sayesinde kazana ait yakma havasına on ısıtma yapılması amaçlanmaktadır. Söz konusu sistem için çapraz akışlı ısı değiştirici tasarlanması öngörülmüştür. Isı değiştiricisinin içerisindeki boru demetlerinden ısıtılmak istenen yakma havası, demetlerin üzerinden baca gazı geçirilerek ısı geçişi sağlanmaktadır. Seçilen ısı değiştiricinin her iki akışkanını içinde ısı transfer katsayısı hesaplanmalıdır. Boru demetleri içinden akan hava tarafının ısı transfer katsayısını hesaplamak için Eşitlik 23'de verilen Dittus-Boelter denkleminde faydalanılmıştır [55]. Eşitlikten elde edilen Nusselt sayısı Eşitlik 24'e uygulanmış ve hava tarafı için ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır.

$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4} \quad Re > 10000 \quad (23)$$

$$h_{hava} = \frac{Nu \times k_{hava}}{d_i} \quad (24)$$

Yukarıdaki eşitliklerde verilen, Nu: Nusselt sayısını, Re: Reynolds sayısını, Pr: Prandtl sayısını, h_{hava} havanın taşınım ısı transfer katsayısını (W/m².K), k_{hava} havanın ısı iletkenlik katsayısını (W/m.K) ve d_i ise borunun iç çap ölçüsünü (m) ifade etmektedir. Seçilen ısı değiştiricinin boru içi hava tarafının ısı transfer katsayısını hesaplamak için Eşitlik 25 ve 26 kullanılmıştır [56].

$$v_{hava} = \frac{4 \times m_{hava}}{\rho_{hava} \times \pi \times (d_i)^2} \quad (25)$$

$$Re = \frac{\rho_{hava} \times d_i \times v_{hava}}{\mu_{hava}} \quad (26)$$

Egzoz gazının taşınım katsayısını hesaplamak için sistemdeki boru demetlerinin sıralı tip mi, şaşırtmalı tip mi olduğu önem arz etmektedir. Sunulan çalışmada boru dizilişleri sıralı tip olarak belirlenmiştir. Bu belirlemeye göre Nusselt sayısı Eşitlik 27 ile hesaplanmıştır [57].

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

$$1000 < Re_{max} < 2 \times 10^5 \quad (27)$$

Sisteme ait bacadan çıkan egzoz gazına ait ortalama hız;

$$V_{bg,ort} = \frac{\dot{m}_{bg}}{\rho_{bg} \times L_z \times L_y} \quad (28)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Eşitlikte verilen L_z ısı değiştiricisinin uzunluğunu, L_y ise ısı değiştiricisinin genişliğini göstermektedir. Baca gazına ait maksimum hız Eşitlik 29'dan [56];

$$V_{bg,max} = V_{bg,ort} \times \frac{S_z}{(S_z - d_0)} \quad (29)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. S_z boruların arasındaki boşlukların z yönündeki mesafesini göstermektedir. Baca gazı tarafına ait Re sayısı da Eşitlik 30 ile hesaplanmıştır [56].

$$Re_{max} = \frac{\rho_{bg} \times d_0 \times V_{bg,max}}{\mu_{bg}} \quad (30)$$

Baca gazı tarafına ait ısı taşınım katsayısı Eşitlik 31 ile hesaplanmıştır [58]. Eşitlikte belirtilen, k_{bg} baca gazına ait ısıl iletkenlik katsayısını ve d_0 ise borunun dış çap ölçüsüdür.

$$h_{bg} = \frac{Nu_D \times k_{bg}}{d_0} \quad (31)$$

Nusselt sayısı Eşitlik 32'den hesaplanır. Eşitlikte yer alan F düzeltme faktörünü ilgili tablolardan ($N_z=10$ ' y yönündeki boru demeti sayısı) 0,98 seçilmiştir [58].

$$Nu_{D,N_z} = Nu_D \times F \quad (32)$$

toplam ısı transfer katsayısı Eşitlik 33 ile hesaplanmıştır. Eşitlikte bulunan k_{boru} , ısı değiştirici boru malzemesine ait ısıl iletkenlik katsayısıdır [59,60].

$$U_0 = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i} \times \frac{1}{h_{hava}} + \frac{r_o}{k_{boru}} \times \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + \frac{1}{h_{bg}}} \quad (33)$$

Soğuk ve sıcak akışkanlar arasındaki sıcaklık farkı (ΔT), ısı değiştiricinin giriş kısmında çıkış kısmına

nazaran daha yüksektir. Sıcaklık farkı, çıkış kısmına doğru üstel olarak azalır. Bu değer, logaritmik ortalama sıcaklık farkı olarak adlandırılır ve aşağıdaki denklem ile hesaplanır [59,60].

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{bg,g} - T_{hava,\zeta}) - (T_{bg,\zeta} - T_{hava,g})}{\ln\left(\frac{T_{bg,g} - T_{hava,\zeta}}{T_{bg,\zeta} - T_{hava,g}}\right)} \quad (34)$$

Sistemin ait ısı transfer alanı Eşitlik 35 ile hesaplanmıştır.

$$A_o = \frac{\dot{m}_{hava} \times c_{p,hava} \times (T_{hava,\zeta} - T_{hava,g})}{F \times U_0 \times \Delta T_{lm}} \quad (35)$$

Boru ve gövde taraflarına ait basınç düşümleri Eşitlik 36 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta P_{boru} = f \times \frac{L_{top}}{d_i} \times \rho_{hava} \times \frac{V_{hava}^2}{2} \quad (36)$$

Denklemden verilen L_{top} , toplam boru uzunluğunu ve f , sürtünme faktörünü temsil etmektedir. Sürtünme faktörü için literatürde kabul görmüş birçok denklem mevcuttur. Sunulan çalışmada bu denklemlerden düz dairesel borular için kullanılan Eşitlik 37'deki Filonenko denklemi kullanılmıştır. [61].

$$f = 0,046xRe^{-0,2} \quad 3 \times 10^4 < Re < 10^6 \quad (37)$$

Boru tarafında oluşan basınç düşümünü aşabilmek için gerekli fana ait güç Eşitlik 38 ile hesaplanmıştır.

$$\dot{W}_{fan,hava} = \frac{\dot{Q}_{hava} \times \Delta P_{top}}{\eta_{fan}} \quad (38)$$

Yukarıdaki denklemden belirtilen \dot{Q}_{hava} havaya ait hacimsel debiyi, η_{fan} ise verimi ifade etmekte olup, %85 alınmıştır. [62]. Baca gazı kısmında boru demeti üstünden akan baca gazına ait giriş ve çıkış arasındaki basınç düşümü Eşitlik 39 ile hesaplanmıştır. Basınç düşüm katsayısı Eşitlik 40 ξ ile gösterilir ve boru demeti dizilimine göre değişkenlik gösterir [63].

$$\Delta P_{gövde} = \xi \times \left(\frac{\rho_{bg} \times V_{bg,ort}^2}{2} \right) \quad (39)$$

Bu denklem sıralı boru dizilimi için;

$$\xi = 2x \left(\frac{S_y}{d} - 1 \right)^{-0,5} \times Re^{-0,5} \times N_z \quad (40)$$

Sistemde meydana gelecek basınç düşümünü aşabilmek için gerekli fan gücü denklem 3.41 ile hesaplanmıştır. Denklemden belirtilen; $T_{bg,g}$ baca gazı giriş sıcaklığını, P_d ise basınç düşümü ile atmosfer basıncının toplamını ifade eder. P_i atmosfer basıncını ifade etmekte olup, k ise özgül ısı oranıdır. Bu çalışmada η_{fan} %85 olarak kabul edilmiştir [63].

$$\dot{W}_{fan,bg} = \frac{\dot{m}_{bg} \times c_{p,bg} \times T_{bg-g} \times \left[\left(\frac{P_d}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{\eta_{fan}} \quad (41)$$

3.3. Ekonomik Analiz

Sistem için ekonomik analiz, bir önceki bölümde tasarlanan ısı değiştirici vasıtası ile elde edilecek yakıt tasarrufu ve amortisman süresini hesaplayabilmek için yapılmaktadır. Ekonomik analiz yapılırken; ilk yatırım maliyetleri, ekonomik ömür, senelik bakım ve işletme harcamaları, senelik kar miktarı, hurda değeri ve faiz oranları önem arz etmektedir. Kurulacak sistem vasıtası ile geri kazanılan enerjinin yıllık maddi değeri (tasarruf miktarı), Eşitlik 42 ile hesaplanmıştır. Eşitlikteki m değeri 1 m^3 doğalgaza ait birim fiyatı göstermektedir.

$$F_{geri,kaz} = \frac{\dot{E}_{geri-kaz}}{4,18 \times H_u} \times m \times 60 \times 60 \times 24 \times 30 \times 12 \quad (42)$$

Ekonomik analiz yapılırken net bugünkü değer metodundan faydalanılmıştır. Bu metod gelecek dönemde alınacak ve/veya verilecek paranın şimdiki değerini belirlemek amacı ile kullanılmaktadır. Şimdiki ve gelecekteki gelir ile giderler herhangi bir alternatif için bilinebiliyorsa, uygun bir faiz oranı kullanılarak alternatifte ait şimdiki değer hesaplanabilir. Eşitlik 43 ile net bugünkü değer NBD hesaplamaları yapılmıştır. Eşitlikteki n , yatırımın faydalı ömrünü A_i , yatırımdan sağlanacak nakit girişlerini, r faiz oranını, H yatırımın faydalı ömrü sonundaki hurda değerini, C_i yatırım için yapılması gereken nakit çıkışlarını ifade etmektedir [64].

$$NBD = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{(1+r)^i} + \frac{H}{(1+r)^{n+1}} - \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (43)$$

Kazan sistemine uygulanacak olan projenin amortisman süresi geri ödeme süresi ile hesaplanmıştır. Yıllara göre sağlanan gelirin değişmediği kabulü ile yatırım tutarının, 1 yıllık yatırım gelirine, K bölünmesi ile geri ödeme süresi hesaplanmıştır (Eşitlik 44).

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{I}{K} \quad (44)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Çalışmanın yapıldığı endüstriyel tesiste 2 adet 18.000.000 kcal/h kapasiteli 180/120 °C kızgın sulu alev duman borulu kazan bulunmaktadır. Bu endüstriyel tesiste yakıt olarak doğalgaz kullanılmaktadır. Endüstriyel tesise ait kazan otomasyon sisteminden alınan veriler Çizelge 2'de sunulmuştur. Alınan veriler neticesinde yapılan enerji analizinde toplam baca gazı kayıplarının yaklaşık olarak %17 olduğu hesaplanmıştır. Bu kayıp tesiste bulunan her iki baca için de büyük bir enerji potansiyeline sahiptir. Kayıp baca gazlarının yıllık maddi değeri her iki baca için toplamda 1.119.792 TL'dir. İki kazanın yıllık yakıt tüketimi toplamda 13.320.644 m^3 'tür. Kazanlar yılın 365 günü ve 24 saat çalışmaktadır. Kazanların saatlik yakıt tüketimi 1520 m^3 , günlük tüketimi ise 36.494,9 m^3 'tür. Çizelge 3'de kazan verilerine göre yapılan analiz sonuçları sunulmuştur.

Çizelge 2. Otomasyon sisteminden alınan veriler

Alınan Değerler	1.Kazan	2.Kazan
Hava fazlalık katsayısı λ	1,13	1,17
Baca gazı çıkış sıcaklığı °C	156	152
Yakma havası °C	30	30

Baca gazının kayıp enerjisi, baca gazının sıcaklığıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. Baca gazı sıcaklığı arttıkça, baca gazının duyulur enerji kaybı artmaktadır. Baca gazı gizli enerji kaybı artan sıcaklıktan etkilenmemektedir. Baca gazı gizli kayıp değeri doğrudan baca gazı içerisindeki su buharı ile doğru orantılıdır. Kazan verimi baca gazı sıcaklığı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Baca gazı sıcaklığı arttıkça kayıplar artmakta, bu da kazandan elde edilen verimin düşmesine neden

olmaktadır. Hava fazlalık katsayısının artması da toplam baca gazı miktarını arttırmaktadır. Artan baca gazı ile beraber duyulur baca gazı ısı kaybı artmakta ve dolayısı ile verim düşmektedir. Baca gazından kaybedilen kayıp ısılar baca gazının soğutulması veya baca gazındaki su buharının yoğuşturulması ile büyük bir kısmı tekrar kazanılabilir. Su buharının yoğuşabilmesi için çiylenme sıcaklığının altına kadar soğutulması gereklidir.

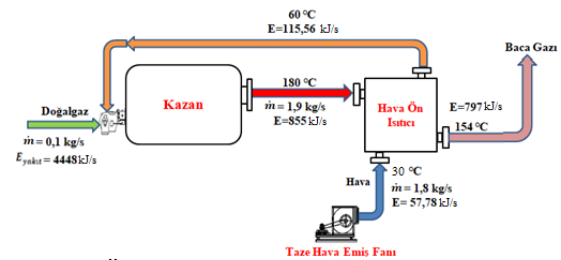
Çizelge 3. Analiz sonuçları

Analiz	1.Kazan	2.Kazan
Baca Gazı Duyulur Isı Kaybı (%)	6,78	6,72
Baca Gazı Molar Kesri (H ₂ O)	0,1629	0,1638
Baca Gazı Gizli Isı Kaybı (%)	10,32	10,32
Baza Gazı Toplam Isı Kaybı (%)	17,1	17,04
Baca Gazı Kaybının Bedeli (TL/yıl)	560.880	558.912
Çiylenme Sıcaklığı	62,24	62,86
Yakıt Debisi (kg/s)	0,1	0,1
Yakıt Enerjisi (kJ/s)	4448	4448
Hava Debisi (kg/s)	1,78	1,82
Baca Gazı Debisi (kg/s)	1,88	1,92

4.1. Sisteme Ait Hava Ön Isıtıcısının Dizaynı

Tesiste bulunan kazandan çıkan 180°C sıcaklığındaki baca gazı ön ısıtma ünitesine girmektedir. Ön ısıtıcıya (rekuperator) giren hava dış sıcaklığın etkisi ile beraber soğumaya başlar. Yaklaşık olarak 154-°C'ye kadar soğuma olmaktadır. Aynı zamanda 30 °C olan kazan yakma havası 60 °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Baca gazına ait çıkış sıcaklık değeri çiylenme noktasının üzerinde olduğundan baca gazı içerisindeki su buharının çiylenmesi mümkün olmayacaktır. Sıcaklığı artan hava tekrar kazana verilir. Isınan havanın tekrar kazana verilmesi ile beraber kazan verimi artar. Kazan veriminin artması ile beraber daha iyi bir yanma meydana gelir ve kazan kayıpları azalır. Sistemde kullanılan kazanda bulunan brülör maksimum hava sıcaklığının 80 °C'ye kadar dayanım sağlamaktadır. Ön ısıtma sistemi için tasarımı yapılırken havanın 60-°C'ye kadar ısıtılması hedeflenmiştir. Ön ısıtma sisteminde oluşabilecek ısı kayıplarını minimize etmek amacıyla dış kısmı yalıtım malzemesi ile çevrilmiştir. Hava ön ısıtıcısının içi de sıralı tip boru demeti ile çevrilmiştir. Boru demetinde yer alan boruların dış çapları 30 mm, iç çapları ise 27 mm olup et kalınlığı 1,5 mm olarak seçilmiştir. Sistemin çiylenme

sıcaklığı 60-°C olduğu için paslanma beklenmemektedir. Çiğlenme söz konusu olmayacağı için boru demetinde karbon çeliği kullanılmıştır. Ön ısıtıcı içerisinde yer alan borular yatayda 30 sıra, düşeyde 10 sıra olmak üzere toplamda 300 tanedir. Boru demeti etrafı karbon çeliği levha ile çevrilmiş olup, diğer kısmı 15 cm kauçuk köpük (k=0,038 W/m.K) ile çevrilerek izole edilmiştir. Boru demetinde yer alan boruların birbirlerine olan mesafeleri enine ve boyuna eşit mesafede olacak şekilde konumlandırılmış ve 0,040 m olarak ayarlanmıştır. Boru demetinde yer alan her bir borunun boyu eşit ve 1 m olarak seçilmiştir. Ön ısıtıcı içerisinde yer alan boru demetinden oluşan ısı değiştiricinin malzemesi olarak seçilen karbon çeliğine ait ısı iletkenlik katsayısı k=60,5 W/m.K olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Hava ön ısıtıcı içerisinde boru demeti 0,35'lik kısma yerleştirilmiştir. Hava ön ısıtıcının yüksekliği ile kazan çıkışında yer alan baca gazı borusunun çapı ön ısıtıcının yüksekliğinden daha küçüktür. Ön ısıtıcının yüksekliği 2 m olarak tasarlanmıştır. Kazan çıkışında bulunan bacanın çapı 1,5 m ve bacanın uzunluğu 12 m'dir. Ön ısıtıcıdan çıkan ve burada ısıtılan havanın kazan brülörüne iletildiği hava kanalında oluşabilecek kayıpları minimize etmek için dış kısmı 10 cm kalınlığında cam yünü (k=0,040 W/m.K) ile kapatılmıştır. Tesiste aynı kapasitede iki kazan olduğu için her bir kazan için birer tane ön ısıtıcı eklenmiştir. Sisteme ait ön ısıtma ünitesinin şematik gösterimi, kazan sistemdeki yerleşimi ve enerji-kütle denklileri Şekil 1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 1. Ön ısıtıcı şematik yerleşimi

4.2. Sistem için Tasarlanan Hava Ön Isıtıcısının Analiz Sonuçları

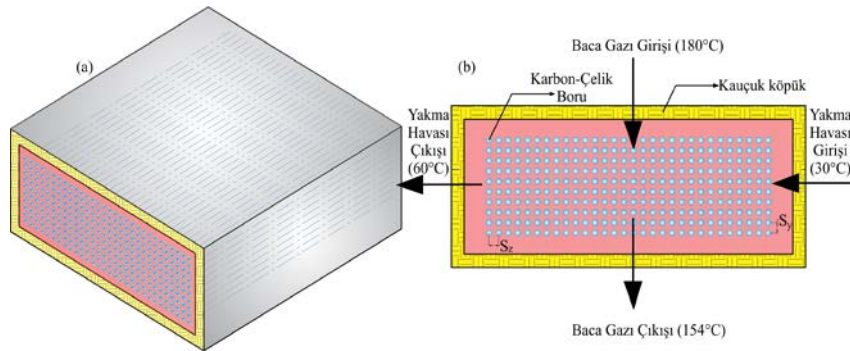
Kazan sisteminde kullanılan ön ısıtıcı için yapılan tasarıma ait hesaplamalar Çizelge 4'de, tasarlanan

ısı değiştiricinin izometrik ve kesit görünüşü de Şekil 2’de verilmiştir. Hava için yapılan hesaplamalarda, Nusselt sayısı, $Nu=38,95$, ısı iletim katsayısı, $k_{hava}:0,024 \text{ W/m.K}$ ve $d_i:0,027 \text{ m}$ olarak hesaplanmıştır. Baca gazı için yapılan hesaplamalarda, Nusselt sayısı, $Nu_D=65,65$, $k_{hava}:0,035 \text{ W/m.K}$ ve $d_o: 0,03 \text{ m}$ olarak alınmıştır. L_{top} ; toplam boru boyu uzunluğudur ve 300 m olarak alınmıştır. Bir boruya ait yüzey alanı $0,094 \text{ m}^2$ ’dir. Boru tarafı için yapılan hesaplamalarda, f sürtünme faktörü: $0,016$, $L_{top}: 300 \text{ m}$, $d_i:0,027 \text{ m}$, $\rho_{hava}:1,164 \text{ kg/m}^3$ (30°C için) ve $V_{hava}:7,42 \text{ m/s}$ olarak alınmıştır. Gövde tarafı için yapılan hesaplamalarda, basınç düşümü katsayısı (ξ): $0,144$, $\rho_{hava}: 4,5 \text{ kg/m}^3$ ve ortalama baca gazı hızı $(V_{bg, ort})^2= 5,17 \text{ m/s}$ olarak alınmıştır. Boru tarafı için yapılan hesaplamalarda,

havanın hacimsel debisi $\dot{Q}_{hava}: 0,422 \text{ m}^3/\text{s}$ ve fanın verimi, $\eta_{fan}:\%85$ olarak alınmıştır. Gövde tarafı için yapılan hesaplamalarda, kütleli debi (\dot{m}_{bg}): $1,9 \text{ kg/s}$, baca gazı giriş sıcaklığı ($T_{bg,g}$): 180°C ve baca gazı özgül ısısı ($c_{p,bg}$): $0,33 \text{ kcal/Nm}^3\text{K}$ olarak alınmıştır. Ekonomik analizlerde; geri kazanılan enerji, $\dot{E}_{geri,kaz}=10181,2 \text{ kJ}$, yakıtın alt ısıl değeri, $H_u=34535 \text{ kJ/m}^3$ ve 1 m^3 doğalgazın birim fiyatı, $f=0,075 \text{ TL/m}^3$ olarak alınmıştır. Hesaplamalar sonucunda $164.528,34 \text{ TL}$ yıllık tasarruf elde edildiği görülmüştür. Ön ısıtıcının ilk yatırım maliyeti $62.670,80 \text{ TL}$ ’dir. Kurulan ön ısıtıcının ekonomik ömrü 15 yıl , faiz oranı $\%4$ ve hurda değeri ‘0’ olarak alınmıştır. Sistemin büyük tamir ve bakım maliyetleri 25.000 TL , işletme maliyeti 40.000 TL ’dir. Geri ödeme süresi 7 aydır .

Çizelge 4. Kazan sisteminde kullanılan ön ısıtıcı için yapılan tasarıma ait hesaplamalar

		T ($^\circ\text{C}$)	\dot{m} (kg/s)	V (m/s)	V_{max} (m/s)	Nu	h ($\text{W/m}^2\text{.K}$)	L_{top} (m)	k (W/m.K)	A (m^2)	ΔP (kPa)	Güç (kW)
Boru Tarafı Hava	Giriş	30	1,8	7,42	38,95	34,62	300	60,5	28,2	5,69	0,0469	
	Çıkış	60										
Gövde Tarafı Baca Gazı	Giriş	180	1,9	2,32	8,02	65,65	76,59	300	60,5	28,2	0,0086	0,03
	Çıkış	154										



Şekil 2. Tasarlanan ısı değiştiricinin izometrik ve kesit görünüşü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir sanayi kuruluşuna ait 2 adet kızgın sulu alev borulu kazanda enerji verimliliği çalışmaları yapılmış olup, enerji analizleri, ısı transferi analizi ve ekonomik analizler için çeşitli hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan analiz ve hesaplamalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Sisteme ait kazanların yıllık yakıt tüketimi ortalama $13.320.644 \text{ m}^3/\text{yıl}$ civarındadır. Yakıtın yıllık parasal değeri $6.232.587,4 \text{ TL}$ ’dir.
- Kazan bacalarından çıkan gazın toplam ısı kaybı $\%17$ civarındadır. Baca gazı kaybının yıllık bedeli her iki baca için toplamda $1.119.792 \text{ TL}$ ’dir.
- Kazan çıkışından atılan baca gazına ait sıcaklık 180°C ’dir. Kazandan atılan bu sıcak gazın geri

kazanımı için bir ön ısıtıcı imal edilmiştir. Ön ısıtıcı ilk yatırım maliyeti 62.670,80 TL, tamir ve bakım maliyeti 25.000 TL ve işletme maliyeti olarak 40.000 TL olarak hesaplanmıştır. Sistemin ekonomik ömrünün 15 yıl ve geri ödeme süresinin ise 7 ay olacağı hesaplanmıştır.

- Yapılan hesaplamalar sonucunda yıllık tasarruf miktarının 164.528,34 TL ve toplam yakıt tasarrufunun 1.121.410,23 TL olacağı görülmüştür.

Ayrıca söz konusu ön ısıtıcı uygulaması ile ısıtılan kazan yakma havası sayesinde kazan verimi artacak, beraberinde de atmosfere salınan CO₂ oranı azalacaktır. Azalan CO₂ oranı ile beraber baca gazı kaynaklı çevre kirliliği de azalacaktır. Atık ısı geri kazanımın sağlanabileceği benzer kazan uygulamalarında aynı metot ile enerji ve yakıt tasarrufu sağlanılabileceği düşünülmektedir. Bu geri kazanım yönteminin benzer uygulamalar için kullanılması önerilebilir.

6. KAYNAKLAR

1. Angın, B., 2007. Cam Sanayinde Geleneksel Yakıtlar Yerine Doğal Gaz Kullanımının Enerji Ekonomisi Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi. Mersin, 1-68.
2. Selbaş, R., 1992. Atık Isı Enerjisinden Yararlanma Yöntemleri ve Uygulamaları, Akdeniz Üniversitesi F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, Antalya, 1-57.
3. Willems, D., 2006. Advanced System Controls and Energy Savings for Industrial Boilers, Transactions of the Citrus Engineering Conference, 52, 11- 22.
4. Güngör, A., 1995. İklimlendirmede Enerji Geri Kazanımında Isı Borulu Isı Değiştiriciler, Makine Mühendisleri Odası, II.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 639-655.
5. Ersöz, M.A., 2002. Baca Gazlarındaki Atık Isının Isı Borusu ile Geri Kazanımının Araştırılması, Gazi Üniversitesi F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, Ankara,1- 133.
6. Ersöz, M., 2009. Baca Gazlarındaki Atık Isının Isı Borusu İle Geri Kazanımının Deneysel İncelenmesi, IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 133-141.
7. Ürün, E.,2010. Atık Baca Gazlarından Isı Geri Kazanımının Deneysel Olarak İncelenmesi, Karabük Üniversitesi F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 1-71.
8. Remeli, M., 2015. Simultaneous Industrial Waste Heat Recovery and Power Generation Using Heat Pipe Assisted Thermoelectric Generator, Manufacturing Engineering College of Science Engineering and Health RMIT University, Master's Thesis, Australia, 1-158
9. Jouhara, H., 2017. Experimental Investigation on a Flat Heat Pipe Heat Exchanger for Waste Heat Recovery in Steel Industry, 1st International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains, Berkshire-UK, 1-15.
10. Ogulata, R. T., Doba, F., & Yılmaz, T. (1999). Second-law and experimental analysis of a cross-flow heat exchanger. Heat transfer engineering, 20(2), 20-27.
11. Şahan, A.M., 1999. HVAC Uygulamalarında Isı Geri Kazanımı, IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 151-161.
12. Atalay, B., 1998. Waste Heat Recovery Using Regenerative Heat Exchanger, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Master's Thesis, Adana,1-96
13. Goel, N., 2012. Design and Performance Analyses of Condensing Heat Exchangers for Recovering Water and Waste Heat from Flue Gas, Lehigh University, Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis, Ann Arbor, 1-107
14. Yamankaradeniz, N., 2007. Tekstil Sanayiinde Atık Isıdan Yararlanılarak Enerji Tasarrufunda Klasik Sistem ile Isı Pompasının Karşılaştırılması, Uludağ Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi Dergisi, 12(1), 115-124.
15. Yamankaradeniz, N., 2009. Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları, Dora Yayıncılık, 2, 13-14.
16. Muslu, M. 2017. Isı pompası destekli ısı geri kazanım cihazının farklı sıcaklıklardaki performans analizi, Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-72.
17. Farshi, L.G., 2018. Thermodynamic Analysis of a Cascaded Compression Absorption Heat

- Pump and Comparison with Three Classes of Conventional Heat Pumps for the Waste Heat Recovery, *Applied Thermal Engineering Journal*, 128, 282–296.
18. Gibbs, B.M., 1987. Boiler Fuel Savings by Heat Recovery and Reduced Standby Losses, *Heat Rec. Systems and CHP Journal*, 7, 151-157.
 19. Butcher, T.A., Litzke W., 1994. Condensing Economizers For Small Coal- Fired Boilers and Furnaces, U.S. Energy Pittsburgh Energy Technology Center, Master's Thesis, New York, 1-80.
 20. Çıtır, H., 2013. Endüstriyel Tav Fırınında Ekonomizer Tasarımı, Karabük Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 1-50.
 21. He, B., 2014. Thermodynamic Analysis of a Low-Pressure Economizer Based Waste Heat Recovery System for a Coal-Fired Power Plant, *Energy Journal*, 65, 80-90.
 22. Kılınç, H., 2016. Endüstriyel Tav Fırını Bacalarından Atık Isının Geri Kazanımı, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, Hatay, 1-56.
 23. Aras, H., 1991. Doğal Gaz Yakan Sistemlerde Baca Gazından Isı Geri Kazanımı, Anadolu Üniversitesi F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 1-60.
 24. Selimli, S., 2012. Endüstriyel Tav Fırını için Reküperatör Tasarımı, Karabük Üniversitesi F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, 1-73.
 25. Willems D., 2006. Advanced System Controls and Energy Savings for Industrial Boilers, *Transactions of the Cit. Eng. Conference, USA*, 11-22.
 26. Cortina, M., 2006. Flue Gas Condenser for Biomass Boilers, Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Master's Thesis, Sweden, 1-76.
 27. Ünlü, C., 2008. Buharlı Sistemlerde Enerji Geri Kazanımı, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 108, 53-63.
 28. Terhan, M., 2010. Atatürk Üniversitesi Isıtma Sistemi Kazan Bacalarında Isı Geri Kazanım Potansiyelinin Araştırılması, Atatürk Üniversitesi F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum, 1-192.
 29. Wang, D., 2012. Coal Power Plant Flue Gas Waste Heat and Water Recovery, *Applied Energy Journal*, 91, 341–348.
 30. Görgülü, B., 2013. Atık Isı Kaynaklı Çift Etkili Absorpsiyonlu Soğutma Sisteminin Termodinamik Analizi, Süleyman Demirel Üniv, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, 1-99.
 31. Yağlı, H., 2013. Atık Isının Organik Rankine Çevrimi ile Kullanılabilirliği ve Ekserjisi, 9. Ulusal Temiz Enerji Semp., Konya, 394-401.
 32. Peris, B., 2015. Experimental Study of an ORC for Low Grade Waste Heat Recovery in a Ceramic Industry, *Energy Journal*, 85, 534-542.
 33. Seyedkavoosi, S., 2017. Exergy-Based Optimization of an Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery from an Internal Combustion Engine, *Applied Thermal Engineering Journal*, 126, 447–457.
 34. Ramirez, M., Epelde, M., de Arteche, M. G., Panizza, A., Hammerschmid, A., Baresi, M., & Monti, N. 2017. Performance evaluation of an ORC unit integrated to a waste heat recovery system in a steel mill. *Energy Procedia*, 129, 535-542.
 35. Srikanth, S., 2003. Analysis of Failures in Boiler Tubes Due to Fireside Corrosion in a Waste Heat Recovery Boiler, *Engineering Failure Analysis Journal*, 10, 59–66.
 36. Yaylacı, Ç., 2015. Konvansiyonel ve Atık Isı Kazanlarda Buhar Üretimi Sürecinin Enerji ve Ekserji Analizleri, GTÜ, Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 1-73.
 37. Sharma, O.P., 2018. Thermodynamic Analysis of a Supercritical/Transcritical CO₂ Based Waste Heat Recovery Cycle for Shipboard Power and Cooling Applications, *Energy Con. and Manag.*, 155, 262–275.
 38. Can, M., 2009. Waste-Heat Recovery Potential in Turkish Textile Industry: Case Study for City of Bursa, *Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal*, 13, 663–672.
 39. Koçlu, A., 2011. Tekstil Endüstrisi Boyama Prosesinde Plakalı Isı Değiştiricilerle Atık Isı Geri Kazanım Sistemi Enerji ve Ekserji Analizi, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 1913-1925.
 40. Kaşka, Ö., 2014. Energy and Exergy Analysis of an Organic Rankine for Power Generation from Waste Heat Recovery in Steel Industry,

- Energy Conversion and Management Journal, 77, 108-117.
41. Eyidoğan, M., 2014. Endüstriyel Tav Fırınlarında Enerji Tasarrufu ve Emisyon Azaltım Fırsatları, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 29(4), 735-743,
 42. Akın, S., 2016. Demir Çelik Endüstrisinde Ergimiş Cürufan Elde Edilen Atık Isının Geri Kazanımı, Bursa Teknik Üniversitesi F.B.E, Bursa, 1-118.
 43. Deng, Y., 2017. Investigation on Thermal Performance of Steel Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump Systems Using Full-Scale Experiments and Numerical Simulations, App. Ther. Engineering, 91-98.
 44. Jouhara, H., Almahmoud, S., Chauhan, A., Delpech, B., Nannou, T., Tassou, S. A., ... & Arribas, J. J. (2017). Experimental investigation on a flat heat pipe heat exchanger for waste heat recovery in steel industry. Energy Procedia, 123, 329-334.
 45. Chang, S., 2017. Modeling Thermodynamic and Techno-Economic Analysis of Coke Production Process with Waste Heat Recovery, Energy, 141, 435-450.
 46. Karellas, S., 2013. Energetic and Exergetic Analysis of Waste Heat Recovery Systems in the Cement Industry, Energy Journal, 58, 147-156.
 47. Tütüncü, G., 2012. Çimento Sektöründe Atık Isı Geri Kazanım (WHR) Sisteminin Termodinamik İncelemesi, Ege Üniversitesi F.B.E, İzmir, 1-98.
 48. Güneş, M.F., 2001. Energy and Cost Analysis of A Cogeneration System, Dokuz Eylül Üniversitesi F.B.E, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 1-138.
 49. Aneke, M.C., 2012. Optimising Thermal Energy Recovery, Utilisation and Management in the Process Industries, University of Northumbria, Master's Thesis, 1-210.
 50. Manno, M., 2017. Adsorbent Materials for Low-Grade Waste Heat Recovery: Application to Industrial Pasta Drying Processes, Energy Journal, 140, 729-745.
 51. Eyriboyun, M., 2017. Çatalağzı Termik Elektrik Santrali ile Bölgesel Isıtma Yapılabilirliğin Enerji Analizi, Isı Bil. ve Tek. Dergisi, 37(1), 139-146.
 52. Enç, V., Kasırğa, M., 2012. Depo Gazı Enerji Üretim Tesisi Baca Gazı Atık Isısının Seralarda Değerlendirilmesi: İstanbul Örneği, Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi, 1(4), 298-309.
 53. Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2006. Thermodynamics an Engineering Approach, McGraw- Hill, USA, 1-865.
 54. Terhan, M., Çomaklı, K. 2015. Baca Gazı Atık Isisi Ile Kazan Yakma Havasının Ön Isıtılmasının Fizibilitesi. Engineer & The Machinery Magazine, 56, 668.
 55. Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 1996, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, New York, 1-959
 56. Cortina, M., 2006. Flue Gas Condenser for Biomass Boilers, Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Master's Thesis, Sweden, 1-76
 57. Gnielinski, V., 2010. Heat Transfer in Cross Flow Around Single Rows of Tubes and Through Tube Bundles, in VDI Heat Atlas, ed. VDI, Springer Verlag, Berlin, Germany, 725-729.
 58. Çengel, Y.A., 2011. Isı ve Kütle Transferi, Güven Bilimsel Yayınları, İzmir.
 59. Kakaç, S., Liu, H., 1998. Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design, CRC Press, New York, 1-676
 60. Chen, Q., Finney, K., Li, H., Zhang, X., Zhou, J., Sharifi, V., Swithenbank, J., 2012. Condensing Boiler Applications in the Process Industry, Applied Energy, 89, 30- 36.
 61. Gaddis, E.S., 2010. Pressure Drop of Tube Bundles in Cross Flow, in VDI Heat Atlas, ed. VDI, Springer Verlag, Berlin, Germany, 1076-1091.
 62. Hazell, D.D., 2011. Modeling and Optimization of Condensing Heat Exchangers for Cooling Boiler Flue Gas, Lehigh University, Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis, 1-109.
 63. Okka, O., 2006. Mühendislik Ekonomisine Giriş Problemler ve Çözümleri, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 1-334.