



Endüstriyel Tav Fırınlarında Bir ORC Sistemi Uygulaması ile Enerji Tasarrufu

Fatma ÇANKA KILIÇ^{1,*}, Mehmet Önder SERT², Muharrem EYİDOĞAN², Durmuş KAYA², Necmi Cemal ÖZDEMİR³

^{1,*}Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı, Mahmutpaşa Mah. Mahmutpaşa Cad. No:151, 41140 Kullar/Başiskele/KOCAELİ

²Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 41380 Umuttepe/KOCAELİ

³Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği, 41380 Umuttepe/KOCAELİ

Öz

Bu çalışmada, bir sanayi kuruluşunun doğalgaz yakıtlı haddehane tav fırınında enerji verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, fırına ait egzoz gazı atık ısı potansiyeli incelenmiştir. Yapılan detaylı incelemelerde; atık ısı potansiyeli 3.630,31 kW olarak bulunmuştur. Tav fırını atık ısı potansiyelinin değerlendirilmesi amacıyla, Organik Rankine Çevrimi (ORC) sistemi kullanılarak elektrik üretimi gerçekleştirilmek üzere, teknik ve fizibilite çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tav fırını egzoz gazı atık ısı kullanılarak net %16 verimle elektrik enerjisi üretecek bir ORC sistemi vasıtasıyla, 1.626.378,88 kWh/yıl elektrik enerjisi üretilebileceği hesaplanmıştır. Elde edilecek bu enerjinin mali değeri 436.032,18 TL/yıl ve yatırımın basit geri ödeme süresi de 8,12 yıl olarak tespit edilmiştir. Tav fırınının çalışma süresi 2800 saat/yıl olduğu için, yatırım fizibilite çalışmaları yönünden uygulanabilir bulunmamıştır. Ancak, tav fırını tam kapasite ile yıllık 8.000 saat ve üzerinde çalıştığında, yatırımın uygunluğunun sağlanacağı tespit edilmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 17/04/2017
Düzelme: 14/12/2017
Kabul: 18/01/2018

Anahtar Kelimeler

Haddehane tav fırını
Enerji verimliliği
Enerji tasarrufu
Atık ısı geri kazanımı
ORC

Keywords

Rolling mill annealing
furnace
Energy efficiency
Energy saving
Waste heat recovery
ORC

Energy Saving in Industrial Annealing Furnaces

Abstract

In this study, an energy efficiency studies have been carried out in a natural gas-fired rolling mill annealing furnace of an industrial establishment. In this context, exhaust gas from the furnace has been examined in terms of waste heat potential. In the examinations that have been made in detail; waste heat potential was found as 3.630,31 kW. Technical and feasibility studies have been carried out to realize electricity production through an Organic Rankine Cycle (ORC) system for evaluating the waste heat potential of the annealing furnace. It has been calculated that 1.626.378,88 kWh/year of electricity can be generated by using the exhaust gas waste heat of the annealing furnace through an ORC system to produce electric energy with a net efficiency of 16%. The financial value of this energy was determined as 436.032,18 TL/year and the simple repayment period of the investment was 8,12 years. Since the annealing period of the annealing furnace is 2800 hours/year, the investment has not been found to be feasible in terms of the feasibility studies. However, the investment suitability can be assured when the annealing furnace is operating at full capacity for 8,000 hours or more annually.

*İletişim yazarı, e-mail: fatmacanka@hotmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gerek ülkemizde gerekse dünyada enerjinin verimli bir şekilde kullanımı günümüzün en önemli teknik konularından birisidir. Sera gazı etkisi, küresel ısınmadan dolayı gerçekleşen iklim değişiklikleri, hava kirliliği ve tüm bunların canlı ekosisteme etkileri ve daha birçok olumsuz çevresel problemlerin kaynağı enerji üretimi ve kullanımına dayanmaktadır [1]. Endüstriyel işletmeler açısından incelendiğinde, enerji verimliliğini artırıcı çalışmalar, kaynakların verimli kullanımı ve çevre kirliliğinin azaltılması yönünden bu problemlerin çözümü için önemli katkılarda bulunmaktadır [2,3].

Farklı üretim sektörlerinde yapılan enerji etüt çalışmalarından elde edilen verilere göre; sanayi tesislerinin ve endüstriyel işletmelerin %95'inde, enerji verimliliğinin artırılabilirlik oranı %5 ile %40 arasında olacağı öngörülmektedir. Daha da önemlisi, sanayi tesislerinde ve endüstriyel işletmelerde yatırım yapmaksızın veya düşük yatırımlı olarak alınacak önlemlerin uygulanması sayesinde minimum %10 oranında enerji verimliliğinin artırılması söz konusudur. Böylece enerji verimliliğinin önemi rakamlarla vurgulanmıştır [4].

Demir-çelik sektörü enerji yoğun sektörlerden birisidir ve bu sektörde tüketilen enerji dünyanın toplam enerji tüketiminin %5'ini oluşturmaktadır [5]. Sektörün üretim maliyetleri içerisinde %27~%33'lük payını enerji maliyetleri oluşturmakta ve üretim maliyetlerinin düşürülmesinde üzerinde çalışılan konulardan biridir. Endüstriyel fırınlar, özellikle de yüksek sıcaklıklarda çalışan ısı işlem fırınları, endüstriyel işletmelerde gerek yakıt tüketimi açısından gerekse atmosfere saldırdığı emisyonlar bakımından mümkün olduğunca verimli çalıştırılması gereken sistemlerdir [6].

Rankine çevrimi yüksek kapasiteli termal enerjinin güce dönüştürülmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Örnek olarak nükleer santraller ve kömür santralleri verilebilir. Buharlı güç çevrimlerinin başlıca ekipmanları; kondenser, pompa, kazan, türbin ve iş yapan akışkandır. Geleneksel Rankine çevrimde, su iş yapan akışkan olarak kullanılmaktadır.

Rankine çevrimde akışkan olarak suyun kullanılmasının avantajları;

- Çok iyi termal / kimyasal stabilite,
- Çok düşük viskozite (düşük pompalama işi),
- İyi enerji taşıma kabiliyeti (yüksek buharlaşma ve özgül ısı),
- Zehirsiz, tutuşmaz ve çevreye zarar vermez,
- Ucuz ve bol miktarda doğada bulunmakta,

Bu avantajlarının yanında akışkan olarak su kullanıldığında karşılaşılan problemler [7];

- Buhar türbininde genleşme sırasında yoğuşmayı önlemek için kızgın buhar elde edilmesi gerekmekte,
- Türbin kanatçıklarında korozyon riski,
- Buharlaştırıcıda yüksek basınçla çalışma,
- Kompleks ve pahalı türbinler kullanılmaktadır.

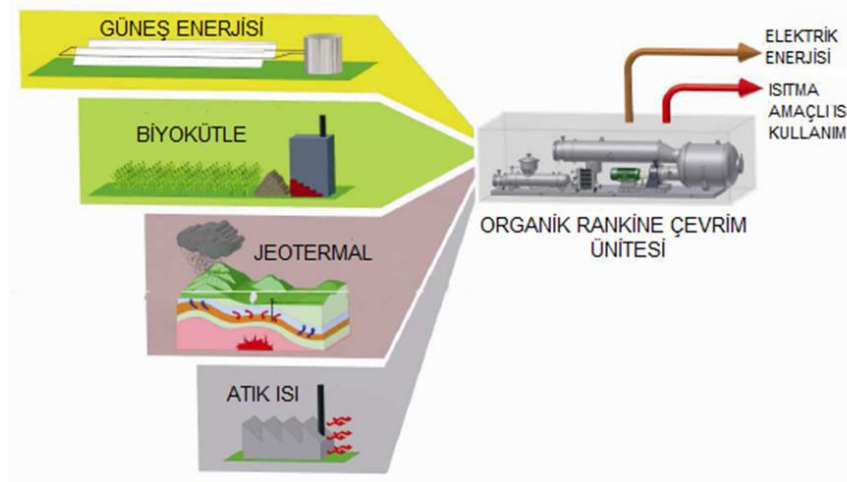
Yukarıda bahsedilen nedenlerden dolayı su, yüksek sıcaklık uygulamaları ve büyük merkezi sistemler için daha uygundur. Küçük ve orta ölçekli güç çevrimlerinde, su kullanımıyla karşılaşılan problemler uygun akışkan kullanımıyla kısmen azaltılabilir. Bu akışkanlar sudan daha yüksek molekül ağırlığına ve düşük kritik sıcaklığa sahip olup organik akışkan olarak adlandırılırlar ve "Organik Rankine Çevrimi" adı verilen buhar çevrimlerinde kullanılırlar. ORC sistemi ve ORC sisteminde kullanılan enerji kaynakları Şekil 1.'de verilmiştir [8]. Bir Organik Rankine Çevriminin, geleneksel buhar çevrimlerine göre bazı avantajları vardır;

- Buharlaşma süresi boyunca daha az ısıya ihtiyaç duyulmaktadır.
- Buharlaşma işlemi düşük basınç ve düşük sıcaklıkta gerçekleşmektedir.

- Genleşme süreci buhar bölgesinde bitmekte, bu nedenle aşırı kızdırmaya gerek duyulmamaktadır. Böylelikle türbin kanatlarındaki aşınma riski azalmaktadır.
- Buharlaştırma ve yoğunlaşma arasındaki sıcaklık farkının az olması, genleşme esnasında basınç düşüşünün az olacağı anlamına gelmektedir. Bu yüzden genleşme için basit tek kademeli türbinler kullanılmaktadır. Organik Rankine Çevrimi için kullanılan başlıca akışkanlar Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. ORC sistemlerinde kullanılan organik akışkanlar [9].

Uygulamalar	Evaporatör Sıcaklığı (°C)	Kondenser Sıcaklığı (°C)	Uygun Organik Akışkanlar
Endüstri kaynaklı atık ısı geri kazanımı	120	30-50	R11, R113, R114
	150-200	30	HCFC-123, izopentan, HFE 7100, benzen Tolüen, p-ksilen
	60-100	35	HFC-245fa, HCFC-123, HFC-134a, n-pentan
	100-210	25	R113, 123, R245ca, izobutan
	145	25	Su, amonyak, bütan, izobutan, R11, HCFC-123, R141B, R236EA, R245CA, R113
	120	40	Alkanlar, benzen, R113, HCFC-123, R141b, R236ea, R245ca, HFC-245fa, R365mfc, tolüen
İçten yanmalı motordan atık ısı geri kazanımı	60-150	55	Su, HCFC-123, izopentan, R245ca, HFC-245fa, bütan
	170	50	R365mfc, heptan, pentan, R12, R141b, etanol
	96-221	35	HFC-134a, R11, benzen
Jeotermal	70-90	30	Amonyak, n-pentan, HCFC-123, PF5050
	100	30	Alkanlar, florlu alkanlar, eterler ve florlu eterler
	80-115	25	Propilen, R227ea, RC318, R236fa, izobutan, HFC-245fa
Güneş	60-100	35	Soğutucu akışkanlar
	120-230	45	Su, n-pentan, HFE 7100, siloksan, tolüen, HFC-245fa, n-dodekan, izobutan
	150	~30	n-pentan, SES36, R245fa, R134a, R245fa



Şekil 1. ORC sisteminde kullanılan enerji kaynaklarının şematik resmi [10]

Organik Rankine Çevriminde kullanılan akışkan, sistemin performansını ve güç santralinin ekonomisini belirlediği için çok önemli bir rol oynamaktadır [11]. Bu gerekçelerle farklı ısı geri kazanım uygulamalarında, iyi bir akışkana sahip olmak için literatürde birçok çalışma yapılmış olup, iyi bir akışkanda bulunması gereken özellikler aşağıda listelenmiştir [12-18]:

- Sıfır veya pozitif eğimli doyma eğrisi (izentropik veya kuru sıvılar),
- Yüksek buharlaşma gizli ısısı,
- Yüksek yoğunluk (sıvı/buhar fazı),
- Yüksek özgül ısı,
- Uygun kritik parametreler (sıcaklık, basınç),
- Kabul edilebilir yoğuşma ve buharlaşma basıncı (>1 bar ve <25 bar),
- Uygun ısı transfer özellikleri (düşük viskozite, yüksek ısıl iletkenlik),
- Uygun ısıl ve kimyasal kararlılık (yüksek sıcaklıklarda kararlı olması),
- Malzemeler ile uyumlu olması (korozyon etkisi olmamalı),
- Yüksek termodinamik performans (yüksek enerji/ekserji verimi),
- Güvenlik karakteristiğinin iyi olması (zehirsiz olmalı ve yanıcı olmamalı),
- Düşük çevresel etki,
- Düşük maliyet ve kolay bulunabilirlik.

ORC sistemleri, 1880'li yıllardan beri üzerinde araştırmalar yapılmasına rağmen günümüze kadar çok fazla yaygınlaşmamıştır. Fosil yakıtların gelecekte tükenmesi ve çevresel baskıların artmaya başlaması düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarının güç üretim sistemlerinde kullanımını artırmıştır. ORC sistemleri, düşük sıcaklıklarda çalışmaya imkân tanınması nedeniyle güneş enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle, baca gazı atık ısıları gibi çeşitli enerji kaynaklarından elektrik üretimini mümkün kılmaktadır. ORC sistemleri ABD, Kanada, İtalya, Avusturya, Almanya, Hollanda, İsviçre ve diğer ülkeler tarafından birçok yerde test edilip kullanılmaktadır [19-22].

Bu çalışmada bir sanayi kuruluşunun doğalgaz ile çalışan tav fırınında enerji verimliliğine yönelik detaylı ölçümler yapılmış ve ölçüm sonuçları kullanılarak enerji tasarruf imkânları geri ödeme süreleriyle birlikte belirlenmiştir. Ayrıca, tav fırını egzoz gazı atık ısısının ORC sistemi ile değerlendirilerek elektrik üretim potansiyeli ve fizibilite hesabı yapılmıştır.

2. ÖLÇÜMLER VE HESAPLAMALAR (MEASUREMENTS AND CALCULATIONS)

Atık ısı, yanma prosesi veya herhangi bir kimyasal reaksiyon/ısıl proses esnasında açığa çıkan ve kullanılmayan ısı olup doğrudan atmosfere atılmaktadır. Endüstriyel enerji yoğun prosesler, içten yanmalı motorlar ve mekanik ekipmanlar yüksek miktarda atık ısı açığa çıkarırlar [23-25]. Atık ısılar sadece yüksek ekserji içermezler, bunun yanı sıra karbondioksit (CO₂), azot oksitler (NO_x) ve kükürt oksitler (SO_x) gibi bol miktarda kirletici emisyon açığa çıkarırlar. Bazı gelişmiş ülkeler, atık ısılarını değerlendirerek bir yandan enerji ithalatını azaltırken diğer yandan emisyonlarını azaltmaktadırlar.

Atık ısının geri kazanılması için birçok enerji geri kazanım teknolojisi geliştirilmiştir. Bunlar; farklı türlerde ısı değiştiricileri (reküperatörler, rejeneratörler, hava ön ısıtıcıları, ekonomizerler, ısı boruları, atık ısı kazanları vb.), ısı pompaları, absorpsiyon/adsorpsiyon soğutma makinaları ve ısı-elektrik dönüştürücüleridir. Atık ısıdan güç üretimi termodinamik çevrimler kullanılarak elde edilebilirler [26]. Bunlar; buharlı Rankine çevrimi, organik Rankine çevrimi, Kalina çevrimi, Gaswami çevrimi ve transkritik/süper kritik çevrimler veya termiyonik, termoelektrik ve piezoelektrik ekipmanları gibi doğrudan dönüşüm sistemleridir [27]. Termodinamik güç çevrimleri halihazırda kullanılıyor olmasına rağmen doğrudan dönüşüm sistemleri hala gelişme safhasındadır.

Genelde konveksiyonel buhar çevrimleri orta ve yüksek sıcaklıklarda çalışmalarına rağmen küçük ölçekli sistemlerde veya düşük sıcaklıklarda ekonomik olmamaktadır [28]. Düşük ve orta sıcaklıklarda organik Rankine çevrimleri ve Kalina çevrimler daha kompleks olmayan yapıya sahip oldukları için avantajlı durumdadırlar.

Sıcak ısı sığasından güç çevrimine ısı transferi iki yöntemle gerçekleşmektedir; (1) duman gazı/proses ısı ve iş yapan akışkan aynı ısı değiştiricide ısı transferi gerçekleşmekte veya (2) organik akışkanın tutuşma riskine karşı termal yağ ara akışkan olarak kullanılmaktadır. ORC sisteminin teçhizat seçimi öncelikli olarak ısı kaynağının sıcaklığı ve arzu edilen güç miktarına bağlıdır [29].

ORC teknolojisi, atık ısının bulunduğu proseslerde yakıt tasarrufu sağlamak ve çevreyi koruma amacıyla geliştirilmiştir. Düşük sıcaklıktaki kullanılmayan atık ısının elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyetine sahip Organik Rankine Çevrimleri enerji mühendisliği ve birçok akademik ve endüstriyel çalışmada önemli konulardan biridir. ORC'nin birçok yönü irdelenmiş fakat çoğu zaman araştırmalar çalışma akışkanı ve çevrimin optimum dizaynına yoğunlaşmıştır [30-37].

Tav fırınının atık ısı potansiyeli hesaplanmasında aşağıdaki ölçümler gerçekleştirilmiştir;

- Baca gazı sıcaklığı ve ortam sıcaklığı:

$$T_{\text{ Baca gazı}} = 433,1^{\circ}\text{C} \text{ ve } T_{\text{ ortam}} = 30^{\circ}\text{C}$$

- Baca gazının dinamik basıncı:

$$P_{\text{ dinamik Baca gazı}} = 0,13 \text{ hPa}$$

- Baca gazı analizi:

$$\text{Baca gazı analizi sonuçları: } O_2 = \%6,5 \text{ CO}_2 = \%6,54 \text{ N}_2 = \%71,83 \text{ Ar} = \%0,18 \text{ H}_2\text{O} = \%14,27$$

Baca gazı ölçümleri için baca gazı analizörü ve dinamik basınç ölçümü için pitot tüpü kullanılmıştır.

Doğalgaz debisi, hat üzerindeki doğalgaz sayacından alınmıştır.

$$Q_{\text{ doğalgaz}} = 2.397 \text{ Nm}^3/\text{h} \text{ ve } d_{\text{ Baca}} = 2,22 \text{ m}$$

Bu ölçümler sonucunda aşağıdaki hesaplamalar yapılmıştır;

- Baca gazının hızı:

$$J_{\text{ Baca gazı}} = \frac{\sqrt{(574,2 * T_{\text{ Baca gazı}}) + (156842,77)}}{\sqrt{100910}} * \sqrt{(P_{\text{ dinamik}} * 100)} \quad (1)$$

$$J_{\text{ Baca gazı}} = \frac{\sqrt{(574,2 * 433,1) + (156842,77)}}{\sqrt{100910}} * \sqrt{(0,13 * 100)}$$

$$J_{\text{ Baca gazı}} = 7,23 \text{ m/s}$$

- Baca gazının hacimsel debisi:

$$V_{\text{ Baca gazı}} = J_{\text{ Baca gazı}} * A_{\text{ Baca}} * 3600 \quad (2)$$

$$V_{\text{ Baca gazı}} = 7,23 \text{ m/s} * \left(\frac{\pi * d * d}{4}\right) \text{ m}^2 * 3600$$

$$V_{\text{ Baca gazı}} = 7,23 \text{ m/s} * 3,87 \text{ m}^2 * 3600$$

$$V_{\text{ Baca gazı}} = 100.728,36 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Baca gazı yoğunluğu ve ısınma ısısı:

Baca gazı yoğunluğu ve baca gazı ısınma ısısı; ölçüm değerleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Baca gazı yoğunluğu 0,4838 kg/m³ ve ısınma ısısı 1,1505 kJ/kg.K

- Baca gazının kütleli debisi:

$$Q_{\text{ Baca gazı}} (\text{kg/h}) = V_{\text{ Baca gazı}} (\text{m}^3/\text{h}) * \rho_{\text{ Baca gazı}} (\text{kg/m}^3) \quad (3)$$

$$Q_{\text{ Baca gazı}} (\text{kg/h}) = 100.728,36 \text{ m}^3/\text{h} * 0,4838 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_{\text{ Baca gazı}} = 48.732,38 \text{ kg/h}$$

- Atık ısı miktarı:

$$\text{Atık ısı miktarı} = (\text{Baca gazı debisi} * \text{Sıcaklık farkı} * \text{Isınma ısısı}) / 3600 \quad (4)$$

$$Q_{\text{ atık ısı}} = (48.732,38 \text{ kg/h} * (433,1 - 200) \text{ }^\circ\text{C} * 1,1505 \text{ kJ/kg.K}) / 3600$$

$$Q_{\text{ atık ısı}} = 3.630,31 \text{ kW}$$

Tav fırını egzoz gazı atık ısı miktarı belirlendikten sonra ORC sistemi ile üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır. Böylece ORC sistemi ile elektrik enerjisi üretimi için fizibilite çalışması yapılmıştır.

3. HESAP SONUÇLARI VE ÖNERİLER (CALCULATION RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Hesaplarda kullanılan baca gazı ölçüm değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Baca gazı ölçüm sonuçları ve ölçüm cihazı belirsizlikleri.

Ekipman	Baca Gazı Ölçümü				Doğalgaz Debisi	Baca Çapı	Hız
	Baca Gazı Sıcaklığı	O ₂	CO ₂	CO			
	°C	%	%	ppm			
Tav fırını bacası soğuk şarj	433,10	6,50	6,54	-	2.397,00	2,22	7,23
Ölçüm cihazlarına ait belirsizlik değerleri (%)	±1,01	±3,00	-	±5,10	-	-	±0,92

Tablo 2 değerleri kullanılarak baca gazı ve tasarruf potansiyeli hesapları Tablo 3 ve Tablo 4’de verilmiştir.

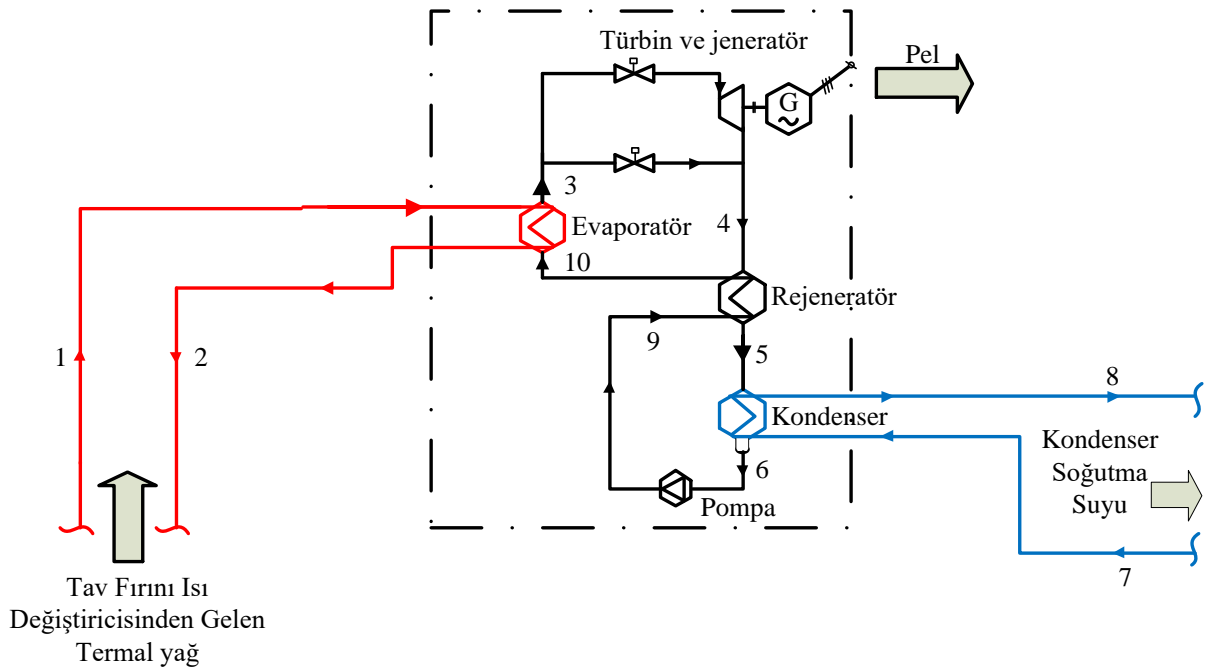
Tablo 3. Atık ısı potansiyel hesaplamaları.

Ekipman	Debi	Yoğunluk	Isınma Isısı	Debi	Isı Değiştirici Giriş Sıc.	Isı Değiştirici Çıkış Sıc.	Atık Isı Miktarı	Elde Edilecek Elektrik*
	m ³ /h	kg/m ³	kJ/kg.K	kg/h	°C	°C	kW	kW
Tav fırını bacası soğuk şarj	100.728,36	0,4838	1,1505	48.732,38	433,10	200	3.630,31	580,85

Tablo 4. Tasarruf potansiyeli hesaplamaları.

Atık Isı Miktarı	Elde Edilecek Elektrik*	Çalışma Saati	Enerji Kazancı	Elektrik Birim Maliyeti**	Mali Tasarruf	Yatırım Maliyeti	BGÖS
kW	kW	h/yıl	kWh/yıl	TL/kWh	TL/yıl	TL	yıl
3.630,31	580,85	2.800	1.626.378,88	0,2681	436.032,18	3.540.790	8,12

Atık ısı potansiyeli 3.630,31 kW olarak hesaplanmıştır. Kullanılacak ORC sisteminin verimi %16 olarak kabul edilmiştir. ORC sisteminin şematik resmi Şekil 2’de verilmiştir.

**Şekil 2.** ORC sisteminin şematik resmi

Tav fırını egzoz hattına bir adet ısı değiştirici monte edilerek, ısı değiştiricide 210~220 °C’de termal yağ elde edilecektir. Isı değiştiricide elde edilen kızgın yağ ise ORC evaporatörüne gönderilerek, evaporatörde organik akışkanın (hexamethyldisiloxane) buharlaşması sağlanacaktır. Tasarlanan ORC sisteminin termal gücü (evaporatör) 6300 kW, brüt elektrik üretimi 1100 kW, organik akışkanın pompa etiket gücü 90 kW, kondenser soğutma suyunun kondensere geliş ve dönüş sıcaklıkları sırasıyla 30 °C ve 45 °C olarak öngörülmüştür.

- Elde edilecek elektrik gücü = Atık ısı miktarı * Sistem verimi (5)

$$Q_{\text{elektrik}} = 3.630,31 \text{ kW} * 0,16$$

$$Q_{\text{elektrik}} = 580,85 \text{ kW}$$

- Tav fırını çalışma saati 2.800 h/yıl
- Enerji kazancı=Elektrik gücü*Çalışma saati (6)

$$Q_{\text{enerji}} = 580,85 \text{ kW} * 2.800 \text{ h/yıl}$$

$$Q_{\text{enerji}} = 1.626.378,88 \text{ kWh/yıl}$$

- Elektrik birim maliyeti; firmanın son elektrik faturasından 0,2681 TL/kWh olarak hesaplanmıştır.
- Mali tasarruf=Enerji kazancı*Elektrik birim maliyeti (7)

$$Q_{\text{mali kazanç}} = 1.626.378,88 \text{ kWh/yıl} * 0,2681 \text{ TL/kWh}$$

$$Q_{\text{mali kazanç}} = 436.032,18 \text{ TL/yıl}$$

- ORC sisteminin yatırım maliyeti 3.540.790,00 TL'dir.
- Yatırımın geri ödeme süresi=Yatırım maliyeti/Mali kazanç (8)

$$\text{BGÖS} = (3.540.790,00 \text{ TL}) / (436.032,18 \text{ TL/yıl})$$

$$\text{BGÖS} = 8,12 \text{ yıl.}$$

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu araştırmada, endüstriyel bir işletmeye ait tav fırınında, enerji verimliliği ve tasarruf potansiyellerinin belirlenmesine yönelik ölçümler yapılmıştır. Elde edilen verilerden yola çıkılarak tav fırını atık ısı potansiyeli belirlenmiştir. Tav fırını egzoz gazı atık ısıyla net %16 verimle elektrik enerjisi üretecek bir ORC sistemi kurulabilecektir. Böylelikle işletmenin elektrik tüketiminin bir kısmı bu ORC sisteminden karşılanacak ve enerji maliyetleri önemli oranda düşürülecektir.

Belirlenen ORC sisteminin uygulaması ile 1.626.378,88 kWh/yıl elektrik enerjisi üretilbileceği hesaplanmıştır. Üretilen bu enerjinin mali değeri 436.032,18 TL/yıl, ORC sisteminin yatırım bedeli ise 3.540.790,00 TL olacaktır. Projenin basit geri ödeme süresi 8,12 yıl olarak tespit edilmiştir. Tav fırınının çalışma süresi 2800 saat/yıl olduğu için, yatırım fizibilite çalışmaları yönünden uygulanabilir bulunmamıştır. Ancak, tav fırını tam kapasite ile yıllık 8.000 saat ve üzerinde çalıştığında, yatırımın uygunluğu tespit edilmiştir.

NOMENKLATÜR (NOMENCLATURE)

Ar = Argon (%)

BGÖS= Yatırımın Basit Geri Ödeme Süresi (yıl)

CO = Karbonmonoksit (ppm)

CO₂ = Karbondioksit (%)

d_{baca} = baca çapı (m)

H₂O = Su (%)

J_{baca gazı} = Baca gazının hızı (m/s)

N₂ = Azot (%)

O₂ = Oksijen (%)

ORC = Organik Rankine Çevrimi

P_{dinamik baca gazı} = Baca gazının dinamik basıncı (hPa)

Q_{atık ısı} = Atık ısı miktarı (kW)

Q_{baca gazı} = Baca gazının kütleli debisi (kg/h)

Q_{doğalgaz} = Doğal gaz debisi (Nm³/h)

Q_{elektrik} = Elde edilecek elektrik gücü (kW)

Q_{enerji} = Enerji kazancı (kWh/yıl)

$Q_{\text{mali kazanç}}$ = Mali tasarruf (TL/yıl)

T_{bacagazi} = Baca gazı sıcaklığı (°C)

T_{ortam} = Ortam sıcaklığı (°C)

V_{bacagazi} = Baca gazının hacimsel debisi (m³/h)

ρ_{bacagazi} = Baca gazı yoğunluğu(kg/m³) ve ısınma ısısı 1,1505 kJ/kg.K

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. McAllister, J. Chen, and A. C. Fernandez-Pello, Thermodynamics of Combustion, Fundamentals of Combustion Processes. 1st Edition, Springer, USA, 18-20, 2011.
- [2] U.K. Terzi and R. Baykal. Efficient and effective use of energy: A case study of Tofas, Environmental Research, Engineering and Management, 1: 55 (2011) 29-33.
- [3] B. Simsek, E.H. Simsek and T. Altunok, Empirical and statistical modeling of heat loss from surface of a cement rotary kiln system. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28: 1 (2013) 59-66.
- [4] O. Ünlü, Sanayide enerji tasarrufu çalışmalarının önemi ve buhar sistemleri ile ilgili uygulama örnekleri". IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi Bildirileri, 2009.
- [5] C. Xu and D. Cang, A brief overview of low CO₂ emission technologies for iron and steel making. Journal of Iran and Steel Research, International, 17: 3 (2010) 1-7.
- [6] M. Eyidoğan, D. Kaya, Ş. Dursun, O. Taylan, Endüstriyel tav fırınlarında enerji tasarrufu ve emisyon azaltma fırsatları. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29: 4 (2014) 735-743.
- [7] E. Wali, Optimum working fluids for solar powered Rankine cycle cooling of buildings. Solar Energy, 25: 3 (1980) 235-241.
- [8] M. Eyidoğan, Organik Rankine Çevrimli Güç Üretim Sisteminin Enerji ve Ekserji Analizi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [9] Quoilin S, Broek MVD, Declaye S, Dewallef P, Lemort V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. Renew Sust Energ Rev 2013;22:168-186.
- [10] Singh, A. Organic Rankine Cycle Power Plant for Renewable Energy Resources, In Partial Fulfilment of the Requirement for the Degree of a Bachelors of Technology in Production and Industrial Engineering, Mavlana Azad National Institute of Technology, India.
- [11] B. F. Tchanche, S. Quoilin, S. Declaye, G. Papadakis and V. Lemort, Economic Optimization of Small Scale Organic Rankine Cycles". 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS), Lausanne, Switzerland, 1-10, 2010.
- [12] Papadopoulos, A. I., Stijepovic, M. and Linke, P. On the systematic design and selection of optimal working fluids for organic Rankine cycles. Applied Thermal Engineering, 30: 6-7 (2010) 760-769.
- [13] O. Badr, S. D. Probert and P. W. O'Callaghan, Selecting a working fluid for a Rankine cycle engine. Applied Energy, 21:1 (1985) 1-42.

- [14] V. Maizza, and A. Maizza, Unconventional working fluids in organic Rankine cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering*, 21: 3 (2001) 381-390.
- [15] H. Chen, D. Y. Goswami, and E. K. Stefanakos, A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 9 (2010) 3059-3067.
- [16] B. F. Tchanche, G. Papadakis, G. Lambrinos and A. Frangoudakis, Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*, 29: 11-12 (2009) 2468-2476.
- [17] E. Wali, Working fluids for solar Rankine-cycle cooling systems. *Energy*, 5: 7 (1980) 631-639.
- [18] T. C. Hung, T. Y. Shai and S. K. Wang, A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22: 7 (1997) 661-667.
- [19] Total references, “Turboden references”, <http://www.turboden.eu/en/references/references-searchpdf.php?country=all&application=all&power=all>, 2013.
- [20] Reference selection “Tri-o-gen references” <http://www.triogen.nl/references/reference-overview>, 2013.
- [21] Global project map “Ormat Inc” <http://www.ormat.com/global-project>, 2013.
- [22] Ergun, A., Ozkaymak, M., Aksoy Koc, G., Ozkan, S. and Kaya, D. (2017), Exergoeconomic Analysis of a Geothermal Organic Rankine Cycle Power Plant Using the SPECO Method. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, 36: 936–942. DOI:10.1002/ep.12532.
- [23] J. J. Bonilla, J. M. Blanco, L. Lopez and J. M. Sala, Technological recovery potential of waste heat in the industry of the Basque Country. *Applied Thermal Engineering*, 17: 3 (1997): 283-288.
- [24] S. R. Latour, J. G. Menningmann, and B. L. Blanney, Waste heat recovery potential in selected industries. (EPA), 30: 7 (1982) 1-6.
- [25] S. Quoilin, and V. Lemort, Technological and economical survey of organic Rankine cycle systems. 5th European Conference on Economics and Management of Energy in Industry, Algarve-Portugal, 4-5, 2009.
- [26] N. Galanis, E. Cayer, P. Roy, E. S. Denis, and M. Desilets, Electricity generation from low temperature sources. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2: 2 (2009): 55-67.
- [27] BCS Inc. Waste heat recovery: technologies and opportunities in U.S. industry. US Dept. of Energy (DOE), USA, 25-29, 2008.
- [28] R. Bohl, Waste heat recovery from existing simple cycle gas turbine plants – A case study. 18th Symposium on Industrial Application of Gas Turbines (IAGT), Banff, Alberta, Canada, 1-14, 2009.
- [29] S. Quoilin, S. Declayend and V. Lemort, Expansion machine and fluid selection for the organic Rankine cycle. 7th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT), Antalya, Turkey, 1-7, 2010.
- [30] V. Maizza, and A. Maizza, Unconventional working fluids in organic Rankine cycles for waste energy recovery systems. *Applied Thermal Engineering*, 21: 3 (2001) 381-390.
- [31] H. Chen, D. Y. Goswami, and E. K. Stefanakos, A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 9 (2010) 3059-3067.
- [32] T. C. Hung, T. Y. Shai, and S. K. Wang, A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22: 7 (1997) 661-667.

- [33] R. Chacartegui, D. Sanchez, J. M. Munoz and T. Sanchez, Alternative ORC bottoming cycles for combined cycle power plants. *Applied Energy*, 86: 10 (2009) 2162-2170.
- [34] G. Angelino, and P. Colonna di Paliano, Multicomponent working fluids for organic Rankine cycles (ORCs). *Energy*, 23: 6 (1998): 449-463.
- [35] H. Chen, D. Yogi Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, Energetic and exergetic analysis of CO₂-and R32-based transcritical Rankine cycles for low-grade heat conversion. *Applied Energy*, 88: 8 (2011) 2802-2808.
- [36] N. A. Lai, M. Wendland and J. Fischer, Working fluids for high-temperature organic Rankine cycles. *Energy*, 36: 1 (2011) 199-211.
- [37] E. Cayer, N. Galanis, M. Desilets, H. Nesreddine and P. Roy, Analysis of a carbon dioxide transcritical power cycle using a low temperature source, *Applied Energy*, 86: 7-8 (2008) 1055-1063.