

# KAZAN VE BUHAR SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ: İŞLETME ÖRNEĞİ

Filiz UĞUR NİGİZ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye

## Öz

Kazan, endüstrilerde ve enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılan bir buhar üretim sistemidir. Dünyadaki enerji tüketiminin önemli bir kısmı kazanlarda tüketilmektedir. Kazan verimliliğinde yapılacak küçük bir iyileştirme, büyük miktarda fosil yakıt tasarrufu yapılmasına ve CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasına yardımcı olacaktır. Bu çalışma, kazanlarda kullanılan enerji miktarını, enerji verimliliğini değerlendirmek için kullanılan yöntemleri, meydana gelen kayıpları ve nedenlerini, atık ısı geri kazanım yollarını ve teknolojileri kullanarak ısı kaybını en aza indirmeyi, bakım faaliyetlerinin rolünü göstermek amacı ile hazırlanmıştır. Deneysel çalışma ve ölçümler için örnek kazanlar bir Yağ Dönüşüm Firmasında Temin edilmiştir. Kazan sistemleri incelenmiş, verilere göre enerji tasarruf noktaları belirlenmiş buna göre gerekli tasarruf tedbirleri belirlenmiştir. Yapılan analizlere göre sistemde en büyük kayıpların baca gazı sistemlerinde entegre sistem olmamasından, reküpatör ve ekonomizer kullanımıyla atık ısı kazanımının mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca sistemde otomasyon bulunması ile hava/yakıt oranının uygun ayarlanması gerektiği ve yakıtı uygun kazan kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kazanlarda verimlilik, sanayi kazanları, enerji tasarrufu

## ENERGY EFFICIENCY IN BOILER AND STEAM SYSTEMS: AN INDUSTRIAL EXAMPLE

### Extended abstract

Boiler is a steam generation system widely used in industries and power plants. A significant portion of the world's energy consumption is consumed in boilers. A small improvement in boiler efficiency will help to save a large amount of fossil fuels and reduce CO<sub>2</sub> emissions. This study was prepared to show the amount of energy used in boilers, the methods used to evaluate energy efficiency, the losses that occur and their causes, the ways of waste heat recovery and minimizing heat loss using technologies, and the role of maintenance activities. Sample boilers for experimental work and measurements were obtained from an Oil Recycling Company. Boiler systems were examined, energy saving points were determined according to the data and necessary saving measures were determined accordingly. According to the analysis, it was concluded that the biggest losses in the system are due to the lack of an integrated system in the flue gas systems, and that waste heat recovery is possible with the use of recuperators and economizers. In addition, it was concluded that with the presence of automation in the system, the air / fuel ratio should be adjusted appropriately and a boiler suitable for the fuel should be used.

**Keywords:** Boiler efficiency, industrial boilers, energy saving

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author): Filiz UĞUR NİGİZ

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya  
Mühendisliği Bölümü, Çanakkale, Türkiye  
filiz.ugur@comu.edu.tr

Geliş (Received) : 09.03.2025  
Kabul (Accepted) : 25.07.2025  
Basım (Published) : 31.07.2025

## 1. Giriş

Kazanlar, endüstriyel süreçlerin temel taşlarından biri olarak, birçok sektörde kritik bir rol oynamaktadır (Eze vd. 2024). Enerji üretimi, ısıtma, buhar üretimi ve çeşitli kimyasal süreçlerde kullanılan kazanlar, işletmelerin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmada önemli bir unsurdur. Birçok endüstriyel süreç, belirli sıcaklık ve basınçta buharı ihtiyaç duyar. Kazanlar, bu ihtiyacı karşılayarak, üretim süreçlerinin kesintisiz ve verimli bir şekilde devam etmesini sağlar (Tsoumalis vd. 2022). Örneğin, gıda, tekstil, kimya ve enerji sektörlerinde, kazanlar sayesinde buhar üretimi gerçekleştirilir ve bu da ürün kalitesini artırır.

Kazanlar, suyu ısıtmak veya buhar üretmek amacıyla kullanılan basınçlı kaplardır. Endüstride ısı tesisatı sağlamak ve buhar türbinleriyle elektrik üretmek için kullanılırlar. Kazanlar ayrıca binalar için alan ısıtması sağlamanın yanı sıra çamaşırhane ve mutfak gibi kullanıcıların ihtiyaç duyduğu sıcak su ve buharı üretmek için de kullanılır (Jayamaha, 2006). Kömür, gaz, petrol vb. gibi fosil yakıtlar ve nükleer enerji, dünya elektriğinin büyük bir kısmını üretmek için kullanılmaktadır ve genellikle kazanlar bu tür enerjiyi elektriğe dönüştürmek için en iyi seçenektir. Bu nedenle, bir buhar kazanının verimliliğinin sadece küçük bir kısmının artırılması, elektrik üretiminde büyük miktarda enerji tüketimini azaltacaktır. Bununla birlikte, fosil yakıt rezervlerinin tükenmesine ve çevre koruma sorunlarına rağmen, petrol, doğal gaz ve kömür talebinin 2030 yılları arasında %94,7 oranında artması beklenmektedir (Som vd. 2008).

Kazanlarda yanma, genellikle bir yanma odasında gerçekleşir. Burada, yakıtın yanma verimliliğini artırmak için hava akışı dikkatlice kontrol edilir. Yanma odasında elde edilen ısı, suya transfer edilerek buhar üretilir. Bu buhar, türbinleri döndürerek elektrik enerjisi üretmekte veya endüstriyel proseslerde kullanılmaktadır (Demirbaş, 2007; Rosen ve Dinçer, 2004; Beer, 2000). Yanma, temelde üç ana bileşenin bir araya gelmesiyle gerçekleşir: yakıt, oksijen ve ısınma. Kazanlarda kullanılan yakıtlar, fosil yakıtlar (kömür, doğalgaz, petrol) veya biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklar olabilir. Yanma işlemi, yakıtın türüne göre değişiklik gösterse de, genel olarak oksijenle birleşerek karbondioksit, su buharı ve diğer yan ürünleri oluşturur. Sıcak baca gazı, konveksiyon ısı transferi yoluyla suya ısı transfer ettiği için, ısı enerjisinin büyük bir kısmı çıkıştaki baca gazı yoluyla kaybolur. Bir kazandan ayrılan baca gazının tipik olarak 150 ila 250 °C arasında olduğu düşünüldüğünde, ısı enerjisinin yaklaşık %10-30'u bu süreçte kaybolmaktadır (Barma vd. 2017).

Kazan sistemlerinin verimliliği, ısı kayıplarını minimize etme yeteneğine bağlıdır. Kazanlardaki ısı kayıplarının birçok nedeni vardır ve bu kayıpların anlaşılması, enerji verimliliğini artırmak ve işletme maliyetlerini düşürmek açısından son derece önemlidir. Başlıca kayıplar şöyle sıralanabilir: eksik yanma, fazla hava, baca gazında su buharı nedeniyle olan ısı kaybı, baca gazı sıcaklığı, yakıt cinsi, kazan yükü, kazan yüzeyinden olan ısı kayıpları, ısıtıcı yüzey kirliliği şeklinde sıralamak mümkündür (Kılıç, 2017).

Kazanların çalışma koşulları da ısı kayıplarını etkileyen önemli bir faktördür. Aşırı yüklenme, düşük sıcaklıkta çalışma veya dengesiz yük koşulları, kazanların verimliliğini azaltarak ısı kayıplarını artırabilir (Behzad vd. 2019; Reguis vd. 2021). Kazanların dış yüzeyinin yalıtılmaması veya yetersiz yalıtım, ısı kayıplarının en önemli nedenlerinden biridir. Yalıtım malzemeleri, ısının dışarı kaçmasını engelleyerek enerji verimliliğini artırır (Savaş ve Kocabaş, 2022). Yetersiz yalıtım, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan kazanlar için ciddi ısı kayıplarına yol açabilir (Singh vd. 2018). Kazanlarda oluşan atık ısının geri kazanılması, enerji kaybını azaltmanın etkili bir yoludur. Atık ısı geri kazanım sistemleri, kazanlardan çıkan sıcak gazların, başka bir süreçte kullanılmasını sağlar. Örneğin, atık ısı, önceden ısıtılmış su elde etmek veya başka bir prosesin ısısını artırmak için kullanılabilir. Bu sayede, enerji tüketimi düşer ve kazan verimliliği artar. Atık ısı geri kazanım sistemleri, enerji maliyetlerini de önemli ölçüde azaltabilir. Kazan sistemlerinde hava sızıntıları, ısı kaybına neden olan bir diğer etkidir. Kazanın bağlantı noktaları, kapaklar ve valflerdeki sızıntılar, sıcak havanın dışarı çıkmasına ve soğuk havanın içeri girmesine neden olur (Bhatia vd. 2012). Bu durum, kazan verimliliğini düşürerek daha fazla yakıt tüketimine yol açar. Kazanlarda kullanılan yakıtın yanma verimliliği de ısı kayıplarını etkileyen önemli bir faktördür. Kazanın yanma verimliliği hem yanmanın kalitesine hem de yanma sonucu açığa çıkan ısı enerjisinin kazan içerisindeki akışkana transfer miktarına bağlı olarak değişmektedir. Elektronik baca gazı analiz cihazlarında kullanılan yanma formüllerden biri Siegert formülü olup yüksek hassasiyette sonuç vermektedir. Siegert formülüyle bacada ölçülen oksijen değeri ve sıcaklık farkları (ortam havası ve baca gazı sıcaklıkları) kullanarak kazanın yanma verimliliği hesaplanabilir (Savaş ve Kocabaş, 2019).

Yetersiz yanma, enerji kaybına neden olur ve bu da ek ısı kayıplarını doğurur (Som ve Datta, 2008, Demirbaş, 2005). Yanma sürecinin optimize edilmemesi durumunda, enerji verimli bir şekilde kullanılmaz ve ısı kayıpları artar. Zamanla kazan bileşenlerinin aşınması ve yıpranması, ısı kayıplarını artırabilir. Özellikle borular, ısı değiştiriciler ve diğer kritik parçalar zamanla deformasyona uğrayabilir (Arjunvadkar, 2016). Bu durum, ısı transferinde verimlilik kaybına yol açar ve dolaylı olarak ısı kayıplarını artırır. Kazanlarda kullanılan suyun kalitesi

de ısı kayıplarını etkileyebilir. Sert su, kireçlenmeye ve tortu oluşumuna yol açarak ısı transfer yüzeylerinin verimliliğini düşürür (Ranaraja, 2020; Bhatia, 2012). Bu da daha fazla enerji harcayarak ısı kaybına neden olur. Bu aşamada blöf miktarı ve blöften ısı kazanımı da önemli bir parametredir. Kazan içerisindeki suyun bir miktarının belli aralıklarla boşaltılmasına BLÖF adı verilir. Blöf, kazan suyu içinde buharlaşma sonucu konsantrasyonu artan çözünmüş ya da askıda kalmış katı madde miktarını kazan için belirlenen limitlere çekebilmek amacıyla kazan suyunun bir kısmının sistemden atılması işlemidir.

Otomatik kontrol sistemleri, kazan sıcaklığını, basıncını ve diğer kritik parametreleri sürekli olarak izler. Bu sayede, kazanların ideal çalışma koşullarında çalışması sağlanır. Aşırı ısınma veya düşük verimlilik durumlarında, sistem otomatik olarak düzeltici önlemler alabilir. Ayrıca, enerji tüketimini optimize etmek için akıllı sistemler kullanılabilir. Bu sistemler, farklı yük koşullarında kazanların en verimli şekilde çalışmasını sağlar (Gilman 2010; Kristinsson ve Lang, 2011; Raja 2024; Behera vd. 2022).

Kazanlar, doğru yönetildiğinde çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilen kazan sistemleri, işletmelerin karbon ayak izini azaltmalarına yardımcı olur. Ayrıca, atık ısı geri kazanım sistemleri ile kazanlardan elde edilen enerji, işletmelerin enerji verimliliğini artırırken, çevre dostu bir yaklaşım sergilemelerini sağlar (Minoofar vd. 2023; Mostafaeipour vd. 2022).

Kazanların işletmedeki önemi sadece enerji ve verimlilikle sınırlı değildir. Aynı zamanda güvenlik açısından da kritik bir rol oynarlar. Doğru tasarlanmış ve düzenli bakımları yapılan kazanlar, işletmelerin güvenliğini artırır. Ayrıca, birçok ülkede kazanların işletilmesiyle ilgili belirli yönetmelikler ve standartlar bulunmaktadır. Bu yönetmeliklere uyum, işletmelerin yasal yükümlülüklerini yerine getirmesi açısından da önemlidir (Meha vd. 2020; Liu vd. 2022).

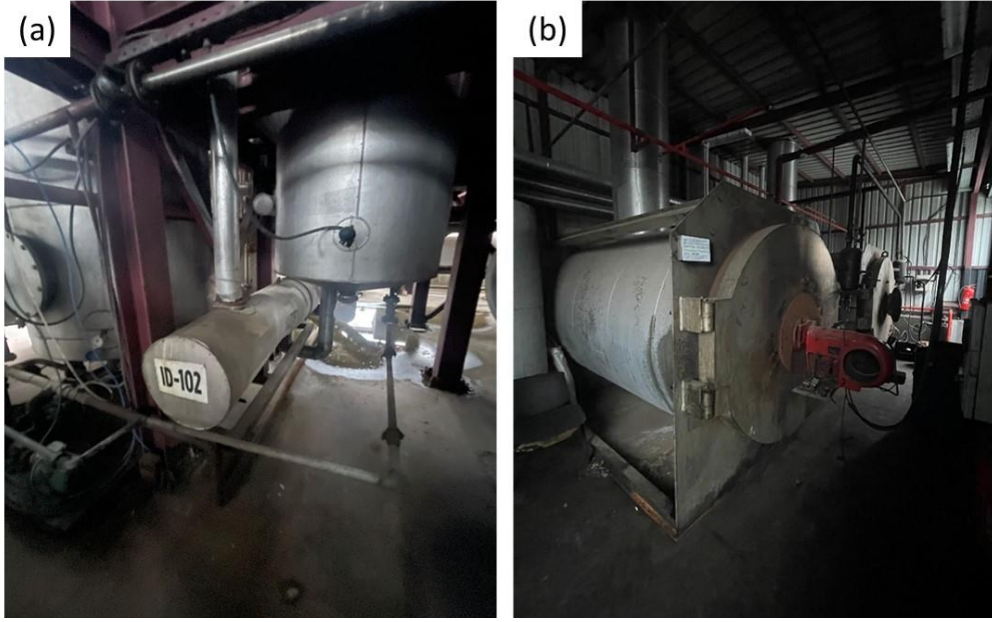
Bu çalışmada, örnek bir endüstriyel tesiste kullanılan kazanlar dikkate alınarak olası kayıplar, nedenleri ve çözüm yöntemleri farklı kalite araçları kullanılarak analiz edilmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Vaka İncelemesi: Yağ Geri Kazanım Fabrikası

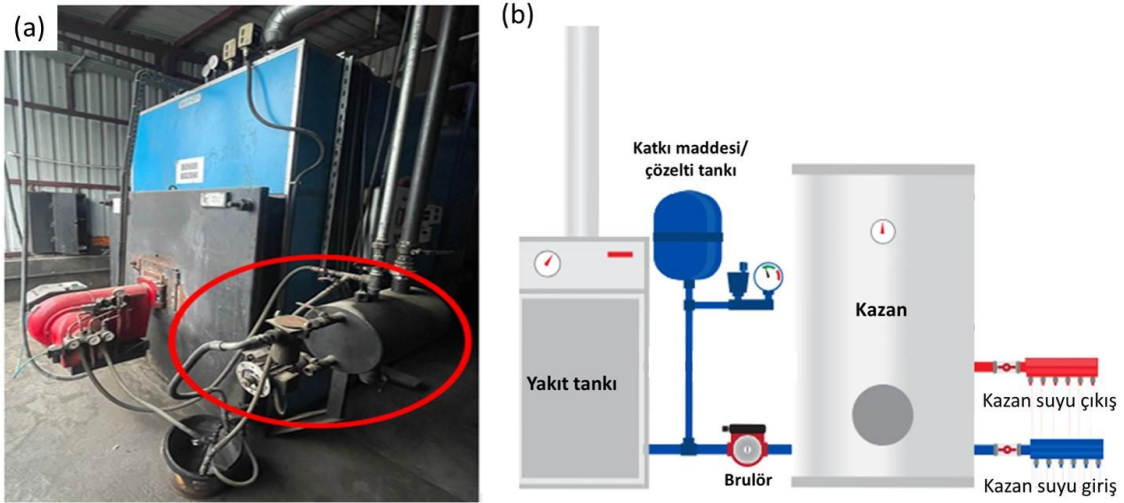
Bir Organize Sanayi Bölgesi'nde Avrupa Standartlarında üretim yapabilecek şekilde 30.000 ton/yıl kapasite ile kurulan firma, mevcut dönemde Atık Yağ Rafinasyon Lisansı ve Tehlikeli Atık Geri Kazanım Lisansı almıştır. Geri kazanımını sağlanan atık yağlardan baz yağ elde ederek, madeni yağ üretimi gerçekleştirilmektedir. Tesise ulaşan atık yağlardan TS 13369 standardına uygun olarak baz yağ elde edilmektedir.

Tesiste 2 adet, atık yağlardan ısı enerjisi elde eden yağ kazanı bulunmaktadır. Bunlardan biri yağ kazanı olarak satın alınmış diğeri ise doğal gaz kazanından dönüştürülmüştür. Kullanılan bu kazanlar yakıt olarak dönüştürülemeyen yağları yakıp, dönüştürülebilen yağların ısısal işlemlerinde kullanılmaktadır. Tesiste kullanılan 1 numaralı yağ kazanı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Yağ kazanı

Şekil 1’de görülen ID 102 kodlu kısım kazandan çıkan ısının buhar ürettiği eşanjör kısmıdır. İçten borulu olan eşanjörün boru dışından yağdan kaynaklanan alev geçerken, boru içinden su geçmekte ve buhar üretilmektedir. Şekilde yanma odasında, hava/yakıt oranının ayarlanmasını sağlayan brülör kırmızı renkte görülmektedir. Nispeten eski olan bu kazanda, ilk ateşleme yağ değil gaz yakıtla gerçekleştirildikten sonra yağlar yakılmaktadır. İşletmede kullanılan diğer kazan ise Şekil 2’de verilmektedir. Şekil 2a’da sistem resmi gösterilirken, Şekil 2b’ de sistemin şematik gösterimine yer verilmiştir.



Şekil 2. Doğal gaz buhar kazanı

Şekil 2a ve Şekil 2b’de görüldüğü gibi, kazan tek odalı içten borulu ve boru içi buhar geçişli bir kazandır. Yanma odasına bağlı olan kırmızı renkte görülen brülör ile hava/yakıt oranı ayarlanmaktadır. Bu kazan doğalgaz kazanı olarak tasarlanmasına rağmen firmada atık yağlar bol bulunduğu için yakıt olarak atık yağ kullanılmaktadır. Bu nedenle ilk ateşleme gazla yapılmaktadır. Yağın yüksek viskozitesi, kirletici içeriği (metal parçacıklar, karbon tortuları), ve düşük uçuculuğu gibi faktörler yanma verimini olumsuz etkiler. Bu nedenle, viskoziteyi düşürmek, atomizasyonu iyileştirmek ve daha temiz yanma sağlamak için uygun çözelti ve katkı maddelerinin kullanılması gerekir. Bu işletmede, yağ içine yanıcı ve performans artırıcı ksilen/toluen bazlı solvent %10 oranında eklenmektedir.

Tablo 1’de kazanla ilgili veriler bulunmaktadır. Bu verilerden gaz kompozisyonu, fazla hava oranı ve yanma verimi, 4 haftalık periyotlarda, aynı oranda yanma ve üretim yapılan zaman dilimlerinde alınarak ortalamaları yansıtılmıştır.

Tablo 1. Buhar kazan verileri (2. Kazan)

Kapasite	1000 m <sup>3</sup>
Yakıt türü	Atık Yağ
Kazan Türü	Gaz yakıtlı
Hava/yakıt oranı	17/1
Teorik hava oranı	1.3
Kazan sıcaklığı °C	600
Baca gazı sıcaklığı °C	250
Baca gaz kompozisyonu	CO <sub>2</sub> (120 ppm), CO (20 ppm), SO <sub>2</sub> (5 ppm), O <sub>2</sub> (0), NO <sub>2</sub> (15 ppm)
Maksimum kazan yüküne göre kazan yük oranı (%)	70
Buhar üretim kapasitesi (kcal/h)	650.000

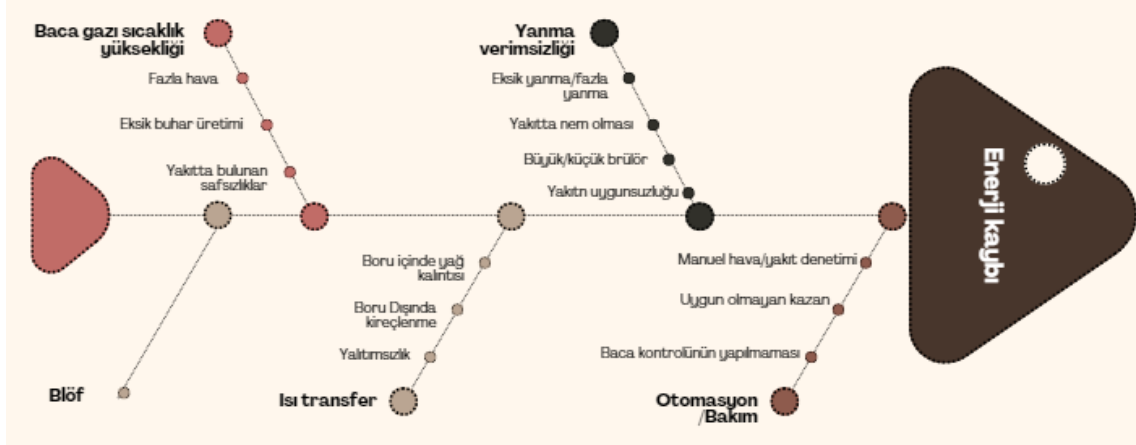
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde yağ dönüşüm fabrikasındaki vaka olaylarında kazanlarda meydana gelme potansiyeli olan enerji kayıpları verilen bilgiler ışığında analiz edilecek, ardından riskler ve çözüm yöntemleri belirlenecektir. Enerji kayıplarının sebep sonuç ilişkileri, balık kılçığı ile olası risk saptanabilirlikler FMEA (hata türleri ve etkileri analizi) ile olası çözümler ise neden-sonuç ağaçları ile analiz edilecektir.

Kalite araçları, endüstriyel süreçlerde, hataların, türlerin, bunlara neden olan sebeplerin, sonuçlarının ve olası çözümlerin resmedildiği çok önemli araçlardır. Bunların içinden en çok bilineni balık kılçığı yöntemidir. Balık kılçığı tekniğine sebep-sonuç ya da Ishikawa diyagramı ismi de verilmektedir. Analizin temel sonucun ve bu sonuca neden olan ana ve ara nedenlerin belirlendiği genel bir diyagramdır.

#### 3.1. Balık kılçığı yöntemi ile olası kazan enerji kayıplarının analizi

Şekil 3’de firmadaki 2. Kazan sistemindeki (Şekil 2a ve Şekil 2b) enerji kayıplarının analizi yapılmıştır. Enerji kayıplarının nedenleri verilere göre düzenlenmiştir. Kaybın ilk nedeni olarak baca gazı seçilmiştir. Baca gazı çıkış sıcaklığı 200 °C’nin üzerindedir. Bu sıcaklık hem yüksek enerji kaybı demektir hem de çevre ekosistemine zarar vermektedir. Bu nedenle enerjinin %10-30 arasının baca gazı nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu sıcaklığa neden olan nedenlerden biri fazla hava beslenmesidir. Yanma işleminin kimyasal sürecine göre her 1 kg karbonu ideal olarak yakmak için gerekli oksijen miktarı 2.66 kg’dır. Dolayısıyla hava içindeki oksijen yüzdesi de göz önüne alındığında ideal bir yanma için gerekli minimum oksijen miktarı yaklaşık 14.7 kg olmaktadır. İşletmedeki bu sistemde ise 1 kg yağ için 17 kg hava beslenmektedir. Yüksek oranda beslenen hava, yakıt içinde fazlaca oksijen azot ve diğer bileşenlerin olmasına neden olmaktadır. Yakıt, enerjisinin bir kısmını bu gazları ısıtmak için kullanmıştır. Nedenlerden bir diğeri ise, eksik yükte çalışan kazanların, aldığı enerjiyi tamamen verememesi yani yeterince suyu ısıtamaması nedeniyle yine sıcak havanın ısını transfer etmeden atmosfere verilmesidir. Diğer bir neden ise yakıtta bulunan kükürtlü bileşenlerin yanma sırasında hapsettiği enerjidir. Yağ yakıtlı kazanlarda birçok safsızlık bulunmaktadır ve bunların yanması sonucu atmosfere farklı bileşenler verilmektedir. Ölçüm yaptığımız cihaz yalnızca N, S, H, C ve oksitlerini ölçtüğü için toplam konsantrasyon değerine bakılarak %5’in üzerinde belirlenemeyen bileşen olduğu görülmüştür.



Şekil 3. Balık kılıçığı diyagramı

Diğer temel neden grubu ise yanma ile ilgili sebeplerdir. Yanmanın verimsiz olması giriş ve çıkış enerji miktarından kolaylıkla hesaplanabilir. Ayrıca baca gazı konsantrasyonundan da otomatik olarak verilebilir. Optimal MRU gaz analizörünün verdiği değere göre verim %60-70 civarındadır. Buradaki verimin düşük olmasının nedenlerinden biri eksik/fazla yanma olarak verilebilir. Daha önce de belirtildiği gibi uygun hava yakıt oranı beslenmediğinde, bacada karbonmonoksit veya oksijen fazlalığı görülebilir. Karbonmonoksit eksik yanmaya, oksijen ise fazla yanmaya işaret eder. Yapılan analize göre, bacada hem oksijen hem de karbonmonoksit görülmüştür. Bu nedenle hem hava/yakıt oranının ayarlanamamasından hem de içeride bulunan safsızlıktan dolayı tam yanma olmaması olabilir.

Yanma verimine etki eden diğer neden ise, hava veya yakıtta nem olmasıdır. Bu nem yanma sırasında ısının bir kısmını tutarak verimi düşürür. Diğer neden ise brülörün uygun seçilmemesi veya düzgün çalışmamasıdır. Brülör, hava yakıt oranını ayarlayan sistemlerdir. Bu işletmede yağ yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu işletmede yağ yakıt olarak kullanılmaktadır ancak yağ içine yanma verimini arttırmak için ksilen/tolüen karışımı %10 oranında eklenmektedir. Uygun yakıt kullanılması, yağın kalorifik değerinin oldukça düşük olması da yanma verimini düşürmektedir. Şekilde blöf kayıpları da enerji kaybına neden olabilir. Blöfün fazla yapılması blöfle ısı ve enerji kaybına sebep olmaktadır.

İşletmedeki kazanda görüldüğü üzere herhangi bir yalıtım yapılmamış olması, ısı yitimi ile ısı transfer kayıplarına sebep olmaktadır. Yağ yakmalı kazanlarda ışıma (radyasyon) ile ısı kaybı, özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan yüzeylerden çevreye yayılan kızılötesi enerji şeklinde gerçekleşir. Bu tür kayıplar genellikle kazan gövdesinden, baca borularından ve ısı transfer yüzeylerinden kaynaklanır. İyi yalıtılmamış sistemlerde toplam verim kaybının %5-15'i yalnızca ışımadan kaynaklanabilir. Özellikle düşük kapasiteli (örneğin 650 kcal/h) sistemlerde bu kayıp göreceli olarak daha yüksek olabilir. Bunun dışında, yakılan yağ nedeni ile yanma sırasında çok fazla birikinti olan boru içlerinde ısı transfer kaybı olacağı aşikârdır. Benzer şekilde işletmede kullanılan ısıtma suyuna uygulanan bir yumuşatma işlemi olmadığı için boru dışlarında da kireç ve kalıntı birikmesi olmaktadır. Bu da hem verimi düşürmekte hem baca sıcaklığını arttırmakta dolayısıyla enerji kaybına neden olmaktadır.

Son olarak işletmedeki kazan sisteminde herhangi bir otomasyon bulunmaması büyük bir enerji kaybı sağlamaktadır. Baca gazı kontrolleri manuel yapılmakta ve hava yakıt oranı bu değerlere bakılmaksızın ayarlanmaktadır. Ayrıca kullanılan kazan yağ yakıt kazanı değil doğal gaz kazanıdır. Ancak yakıt olarak yağ yakılmaktadır. Bu durumda boru, ateşleme ve eşanjör kısmı doğalgaza uygun olup yağa uygun değildir. Bu da ısıtmanın verimini düşürmektedir.

### 3.2. Olası Hata Türleri ve Etki Analizi (FMAE)

Olası Hata Türleri ve Etki Analizi, herhangi bir sistemin tamamı veya bölümleri ele alınıp, bunlardaki kısımlarda, ortaya çıkabilecek sorunlardan ilgili bölümün ve tüm sistemin etkilene derecesini ve sonucunu ortaya koyan önemli bir risk analiz yöntemidir. Bu çalışmada en çok enerji tüketimine neden olan baca gazı sıcaklığının atılması ile ilgili FMEA analizi yapılmıştır.

FMEA'da belirlenmesi gereken unsurlar şunlardır:

- Analiz edilecek kısmın işlevi
- Hata çıkarma potansiyeli,

- Hatanın etkileri,
- Hatanın nedenleri,
- Nedenlerin saptanabilirliği (Enes İnce, 2010),

Hata/zarar Etkileri:

Belirlenen bazı olası durumların neden olduğu problemlerin proses üzerinde zararların etkisinin belirlenmesidir.

$RÖS = P(\text{olasılık/ihtimal}) \times S(\text{şiddet}) \times D(\text{fark edilebilirlik})$

P: Hatanın oluşma olasılığıdır. 1-10 arasında çok azdan ½ kesinliğe kadar numaralandırılır.

Ş: Hatanın şiddeti, hata olduğunda mevcut durum üzerine etkisini (bu çalışmada enerji kaybına etkisini) belirlememizi sağlar. Yok durumundan uyarısız gelen tehlikeye doğru 1 ile 10 arasında değişir.

D: Hata/zarar getirecek durumun keşfedilmesinin zorluk derecelendirmesidir. Kesin tespit edilebilirden tespit edilemeze kadar 1 ile 10 arasında puanlanır. RÖS: Risk öncelik Sayısı. 1-1000 arasında bir değeri vardır. Değer büyüdükçe belirlenen riskin proses üzerindeki etkisi büyük demektir ve ilk buralardan çözüme başlanır. RÖS değeri 1-50 arası düşük risk, 50-100 Orta riskli, 100-200 Yüksek riskli, 200-1000 çok yüksek riskli.

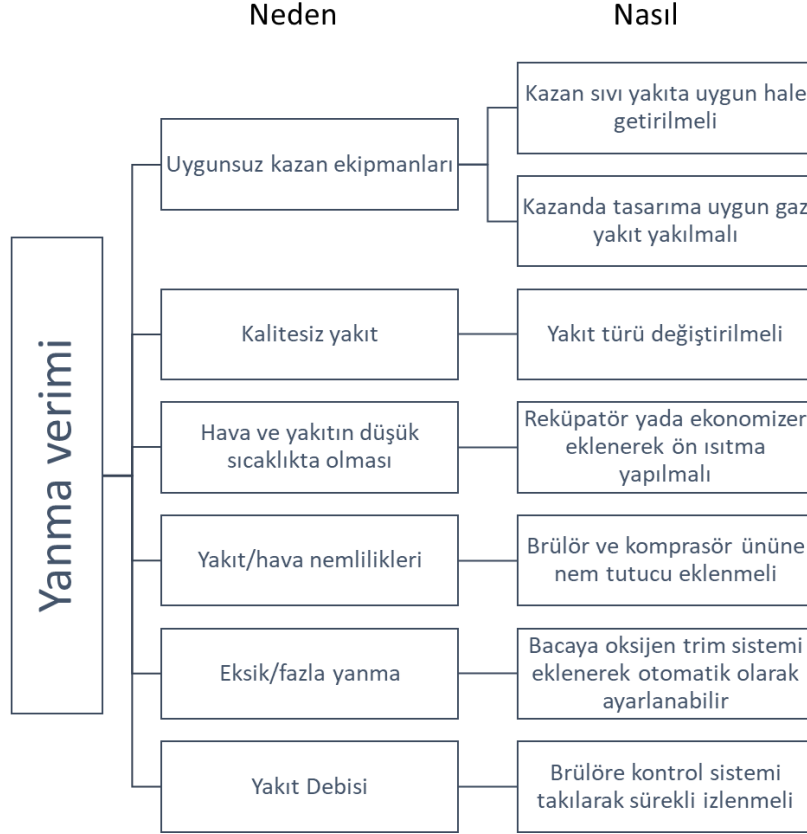
Balık kılıçlığı yönteminde enerji kaybına neden olan değişkenler belirlenmiş, genel durum belirlenmiştir. Bunların içinde en fazla kaybı olabilecek kısım baca gazından ve yakıt verimsizliğinden kaynaklanan enerji kaybı olarak düşünülmektedir. Bu nedenle bu kısımlara FMEA analizi yapılarak (Tablo 2) enerji kaybına neden olan risk faktörü belirlenerek neden-nasıl ağaç diyagramları ile de çözüm üretilmiştir. Benzer bir çalışma Kocabaş ve Savaş tarafından 2019 yılında da yapılmıştır.

Tablo 2: Yanma verimine yönelik FMEA tablosu

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)							
İyileştirme gereken	Hata Nedenleri	Hata etkileri	Tespit	Ş	P	D	RÖS
Yanma verimsizliği	Kazan uygunsuzluğu	Doğru olmayan ısı transfer dağılımı olmasına sebep olur.	Baca ölçümleri	8	9	3	216
	Yakıtın kalorifik değerinin düşük olması	Yanma için daha fazla yakıt kullanılmasına neden olur. Aynı yakıtla ise daha az verim alınır.	Baca ölçümleri, yanma verimi	8	7	3	168
	Yakıtta nem olması	Yanma işlemi sırasında ısıyı hapsedir.	Baca sıcaklığı, göstergelerle basınç kontrol, ısı kapasite kontrolleri	8	6	4	192
	Havada nem olması			8	6	4	192
	Eksik yanma	Karbonmonoksit üretilerek reaksiyon sonucu daha az enerji açığa çıkmasına neden olur.	Baca gazı ölçümleri hava/yakıt oran göstergeleri	8	7	3	168
	Fazla yanma	Fazladan beslenen diğer gazların ısınmasından dolayı akışkana enerji geçişi azalır.	Baca gazı ölçümleri hava/yakıt oran göstergeleri	8	7	3	168
	Hava ve yakıtın düşük sıcaklıkta olması	İlk yanmada enerji tüketir.	Brülöre sıcaklık kontrolü	8	6	3	144
	Yanma debisi yüksekliği	Bacadan enerji atılır.	Baca gazı ölçümleri hava/yakıt oran göstergeleri	8	3	3	72

Elde edilen bulgularla hazırlanan bu tabloya göre, kazanın uygun olmaması en büyük risk sebebi ve hemen çözülmesi gereken önemli bir hata olarak görülmektedir. Yanma debisi yüksekliği ise orta seviyede hata getirmekteyken, işletmedeki diğer tüm hata getirileri yine yüksek seviyede ve çözülmesi gereken eksiklikler olarak belirlenmiştir.

Yukarıda belirtilen risklere göre olası çözümler Şekil 4’de neden nasıl ağaç diyagramında verilmiştir.



Şekil 4. Yanma verimi neden-nasıl diyagramı (1. Vaka)

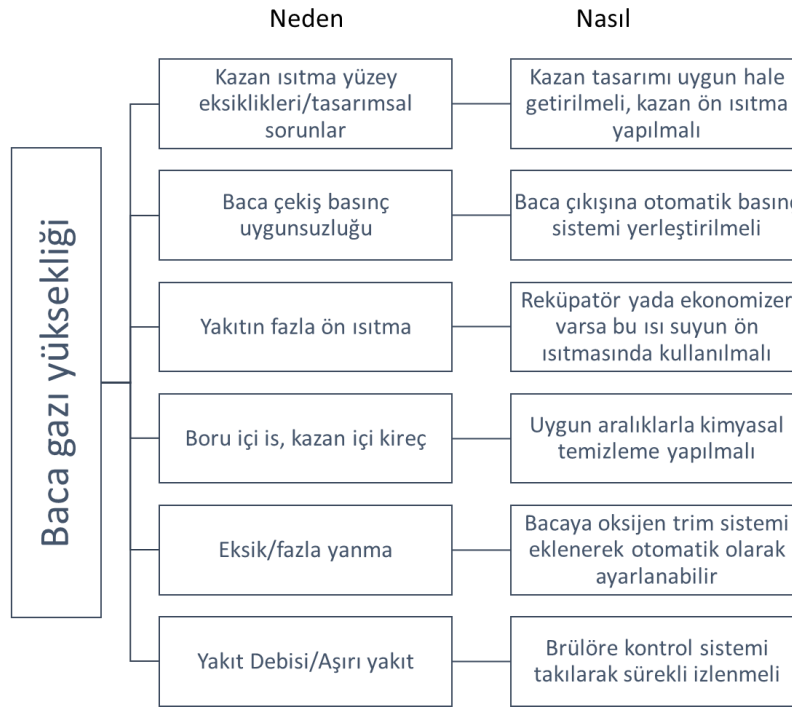
İşletme örneğinde enerji kaybına sebep olan diğer önemli bir gösterge de baca gazı sıcaklığıdır. Yağ kazanlarında yani sıvı yakıt kazanlarında baca gazı sıcaklığı ideal olarak 130-175 °C arasında değişmektedir (Toygarlar, 2014). Bu işletmede ise sıcaklık 230-250 °C arasında olup, ideal değerden daha yüksek olduğu görülmektedir ki sürekli çalışan bir sistem için bu enerjide %20 üzerinde kayıp demektir. Bu nedenle bu kayıp için de FMEA analizi (Tablo 3) ve neden-nasıl ağaç diyagramına (Şekil 5) yer verilmiştir.

Tablo 3: Baca gazı sıcaklığına yönelik FMEA tablosu

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)							
İyileştirme gereken	Hata Nedenleri	Hata etkileri	Tespit	Ş	P	D	RÖS
Baca gazı sıcaklığı	Yakıt debisi yüksekliği	Yanma ısısı kapasite üstü olduğu için fazla enerji bacadan atılır.	Baca gazı sıcaklık göstergeleri, brülör akış göstergesi	8	4	4	128
	Aşırı yakıt	Yanma ısısı kapasite üstü olduğu için fazla enerji bacadan atılır.		8	3	4	96
	Fazla hava	Bacadan yanma dışı gazların da atılmasını ve ısınmasını sağlayarak ısı transferini azaltır.	Brülör akış göstergesi, rutin baca gaz konsantrasyon ölçümleri	8	4	4	128
	Eksik hava	Tam yanma olmadığı için aktarılamayan enerji bacadan çıkar.		8	4	4	128

Kazan içi kurum ve kireç birikimi	Duman borulu sistemde boru içi eksik yanmayla is oluşması, boru dışı sudan dolayı kireç oluşumu ısının uygun transferini	Baca gazı sıcaklık göstergeleri, rutin baca gaz konsantrasyon ölçümleri	7	3	5	105
Baca çekiş basınç yüksekliği	Isı transferini engelleyecek şekilde bacadan ısı çekilmesi.	Baca basınç göstergeleri, sıcaklık göstergeleri	7	2	3	42
Kazan ısıtma yüzeyinin eksikliği	Borulardaki ısının yetersiz yüzeyden dolayı suya aktarılamaması.	Baca gazı sıcaklık göstergeleri	9	6	3	162
Kazan tasarım hatası	Kazanın borularının gaza uygun olması nedeniyle uygun transfer yüzeyinin sağlanamaması.	Baca gazı sıcaklık göstergeleri	9	6	4	216
Yüksek ön ısıtma	Kapasite üstünde ısı aktarımı, ısı fazlasının bacaya geçmesi.	Brülör akış ve sıcaklık göstergesi	7	2	3	42

Tablo 3 incelendiğinde en büyük risk faktörleri, yakıtla ilgili otomasyon sisteminin olmadığı görülmüştür. Baca ve brülör arasında kurulacak otomatik bir trim sistemi ile bacadan çıkan fazla oksijen veya karbonmonoksit ölçülerek fazla veya eksik hava, ayrıca bunların debilerinin ayarlanması otomatik olarak belirlenip, brülördeki akış buna göre ayarlanabilir. Ancak bu şirketteki temel sorun, ayarlamanın minimum yapılmasının yanında, yakıt olarak düşük kalite yağ kullanıldığı için ilk ateşleyicinin gazla yapılmasıdır. Tüm bunları otomasyonla kontrol etmek de güçtür bu nedenle öncelikle kazan tasarımının uygun hale getirilmesi ya da yakıt türünün değiştirilmesi elzemdir. Tablo 3’de de görüldüğü üzere en büyük risk tasarımdan kaynaklı risktir (RÖS değeri 216).



Şekil 5. Baca gazı sıcaklık yüksekliği neden-nasıl diyagramı

FMEA analizi yapılan enerji kayıp noktaları dışında önemli kayıp noktaları ve çözümleri aşağıda sıralanmıştır.

**Kazan dış yüzeyden ısı kaybı:** Sistemden görüldüğü gibi ne kazan ne de eşanjörde bir yalıtım işlemi uygulanmamaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi kazan dış yüzeyinin 50 °C üzerinde olması çok büyük ısı kayıplarına neden olmaktadır. Bunun için mutlaka yalıtım yapılması gereklidir.

**Blöfle ısı kaybı:** İşletmede blöf işlemi manuel olarak yapılmaktadır. Oysa bu değer sürekli kontrol edilmesi, blöf suyunun ve kazan suyunun TDS gibi değer kontrolleri yapılarak tahliye edilmesi gerekmektedir. Bu işlemde uygun proses kontrol ekipmanları sağlanarak TDS değerlerine bakılarak yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde eksik blöf kazan kireçlenmesine, boru dış yüzey kirlenmesine neden olur. Bu da suya ısı transferini azaltır ve baca sıcaklığı enerji kaybının göstergesi olarak artar. Fazla yapılan blöf ise, kazanın içindeki buharın ısısının kaybolması anlamına gelmektedir.

**Reküpator eksikliği:** Reküpator, bacadan atılan gazın atılmadan başlangıçtaki yakıt ve havayı ısıttığı bir çeşit ısı değiştirici sistemdir. Bu sayede hem bacadan fazla ısı atılmaz hem de yanma maddeleri ön ısıtılarak tutuşmanın daha hızlı ve verimin yüksek olması sağlanır. İşletmede bu sistem olmaması enerjinin kaybına neden olmaktadır.

**Boru dışı kireç:** Isıtma borularının dışından geçen su içindeki maddeler boru yüzeyinde tortu oluşturmaktadır. Uygun temizleme yapılmadığı, blöf yapılmadığı durumda bu kireç tabakası ısıtma verimini önemli derecede azaltmaktadır. Benzer şekilde dumanlı boru içinde biriken isler de, ki özellikle yağ yakıtlı bir sistemde ısı transferine engel olmaktadır. Bu nedenle düzenli bakım sağlanmalıdır.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, bir Kimya Fabrika İşletme örneğinden bina ısıtma kazanlarından veriler alınmış, bu veriler ışığında olası enerji kayıp noktaları ve tasarruf tedbirleri ve önlemleri kalite araçları da kullanılarak analiz edilmiştir. İşletme örneğinde ise, başta kazanın tasarımının uygun olmaması başta olmak üzere otomasyon sisteminde çalışmasındaki eksiklik nedeniyle birçok noktada enerji kaybı saptanmıştır.

Önemli miktarda enerjinin yüksek sıcaklıktaki atık gaz veya kazan egzozu yoluyla israf edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, yağ içerisinde bulunan safsızlıklar, kazandan radyasyonla ısı kaybı gibi nedenlerden dolayı enerji kayıpları da meydana gelmektedir. Bununla birlikte, atık ısı farklı teknolojiler kullanılarak elektrik, ısı, soğutma etkisi vb. gibi faydalı bir enerji biçimi olarak geri kazanılabilir. Kazanın verimliliği, planlı bakım çalışmaları yaparak artırılabilir. Bu da kazanın en yüksek verimlilikte çalışmasına yardımcı olur.

Kazanlarda enerji kaybını azaltmak hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemlidir. Doğru tasarım, iyi izolasyon, uygun yakıt seçimi, gelişmiş kontrol sistemleri, düzenli bakım ve atık ısı geri kazanım sistemleri gibi yöntemler, kazan verimliliğini artırabilir ve enerji kaybını minimize edebilir. Ayrıca, enerji yönetim sistemleri ve çalışan eğitimleri ile desteklenen bu yöntemler, işletmelerin enerji maliyetlerini düşürmesine ve sürdürülebilir bir üretim süreci oluşturmaya katkı sağlar. Enerji verimliliği, sadece işletmeler için değil, aynı zamanda çevre için de büyük bir kazanımdır. Bu nedenle, enerji kaybını azaltma çabaları her zaman öncelikli hedef olmalıdır.

#### Teşekkür

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar ve Proje Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje No: FYL-2021-3774)

#### Kaynaklar

1. Arjunwadkar, A., Basu, P., & Acharya, B. (2016). A review of some operation and maintenance issues of CFBC boilers. *Applied Thermal Engineering*, 102, 672-694.
2. Barma, M. C., Saidur, R., Rahman, S. M. A., Allouhi, A., Akash, B. A., & Sait, S. M. (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and sustainable energy reviews*, 79, 970-983.
3. Beer, J. M. (2000). Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(4-6), 301-327.
4. Behera, C., Patil, S. M., Mishra, S. K., Reddy, G. H. K., & Goswami, A. K. (2022). Control and analysis of crucial parameters for an automatic boiler unit in a chemical industry. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 14(3), 94-103.
5. Behzad, M., Kim, H., Behzad, M., & Behambari, H. A. (2019). Improving sustainability performance of heating facilities in a central boiler room by condition-based maintenance. *Journal of Cleaner Production*, 206, 713-723.
6. Bhatia, A. (2012). Improving energy efficiency of boiler systems. *Continuing education and development engineering*, 1-55.
7. Boopathi Raja, G. (2024). Industrial boiler safety monitoring system. *Industrial Control Systems*, 15-36.

8. Kılıç, F. Ç. (2017). Endüstriyel kazanlarda enerji verimliliği ve emisyon azalımı fırsatları. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 5(2), 147-158.
9. Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in energy and combustion science*, 31(2), 171-192.
10. Demirbas, A. (2007). Combustion systems for biomass fuel. *Energy Sources, Part A*, 29(4), 303-312.
11. Eze, V. H. U., Tamball, J. S., Uzoma, O. F., Sarah, I., Robert, O., & Okafor, W. O. (2024). Advancements in energy efficiency technologies for thermal systems: A comprehensive review. *INOSR Applied Sciences*, 12(1), 1-20.
12. Gilman, G. J., & Gilman, J. (2010). *Boiler control systems engineering*. Isa.
13. İnce, M. E., (2020). Olası hata türü ve Etkileri analizi (FMEA), Konya Ticaret Odası, 2020.
14. Jayamaha L. (2006). Energy-efficient building systems: green strategies for operation and maintenance. McGraw Hill Professional; 2006.
15. Kocabaş, C., & Savaş, A. F. (2019). Endüstriyel Kazanlardaki Baca Kaybının Kalite Geliştirme Araçları Kullanılarak Azaltılması. *Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi*.
16. Toygarlar, H. A. (2014). Endüstriyel tesiste enerji verimliliği üzerine bir çalışma (Master's thesis, Dokuz Eylül Üniversitesi (Turkey).
17. Kristinsson, H., & Lang, S. (2011). Boiler control improving efficiency of boiler systems. *CODEN: LUTEDX/TEIE*.
18. Liu, Z., Li, Y., Fan, G., Wu, D., Guo, J., Jin, G., ... & Yang, X. (2022). Co-optimization of a novel distributed energy system integrated with hybrid energy storage in different nearly zero energy community scenarios. *Energy*, 247, 123553.
19. Meha, D., Pfeifer, A., Duić, N., & Lund, H. (2020). Increasing the integration of variable renewable energy in coal-based energy system using power to heat technologies: The case of Kosovo. *Energy*, 212, 118762.
20. Minoofar, A., Gholami, A., Eslami, S., Hajizadeh, A., Gholami, A., Zandi, M., ... & Kazem, H. A. (2023). Renewable energy system opportunities: A sustainable solution toward cleaner production and reducing carbon footprint of large-scale dairy farms. *Energy Conversion and Management*, 293, 117554.
21. Mostafaiepour, A., Bidokhti, A., Fakhrzad, M. B., Sadegheih, A., & Mehrjerdi, Y. Z. (2022). A new model for the use of renewable electricity to reduce carbon dioxide emissions. *Energy*, 238, 121602.
22. Reguis, A., Vand, B., & Currie, J. (2021). Challenges for the transition to low-temperature heat in the UK: A review. *Energies*, 14(21), 7181.
23. Rosen, M. A., & Dincer, I. (2004). A study of industrial steam process heating through exergy analysis. *International journal of energy research*, 28(10), 917-930.
24. Savaş, A. F., & Kocabaş, C. (2019). Endüstriyel kazanlarda yanma veriminin süreç geliştirme teknikleri kullanılarak iyileştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 357-368.
25. Savaş, A. F., & Kocabaş, C. (2022). Reducing surface heat loss in steam boilers. *Open Chemistry*, 20(1), 1458-1466.
26. Singh, A., Sharma, V., Mittal, S., Pandey, G., Mudgal, D., & Gupta, P. (2018). An overview of problems and solutions for components subjected to fireside of boilers. *International Journal of Industrial Chemistry*, 9, 1-15.
27. Som, S. K., & Datta, A. (2008). Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes. *Progress in energy and combustion science*, 34(3), 351-376.
28. Tsoumalis, G. I., Bampos, Z. N., Chatzis, G. V., & Biskas, P. N. (2022). Overview of natural gas boiler optimization technologies and potential applications on gas load balancing services. *Energies*, 15(22), 8461.