

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ENERJİ VERİMİNİN ARTIRILMASINDA SÜREÇ İYİLEŞTİRME
TEKNİKLERİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ
CEYDA KOCABAŞ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. AHMET FEVZİ SAVAŞ

BİLECİK, 2021

10404379

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ENERJİ VERİMİNİN ARTIRILMASINDA SÜREÇ İYİLEŞTİRME
TEKNİKLERİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ
CEYDA KOCABAŞ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. AHMET FEVZİ SAVAŞ

BİLECİK, 2021

10404379

T.C.
BILECIK SEYH EDEBALI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCES
DEPARTMENT OF ENERGY SYSTEMS ENGINEERING

**INDUSTRIAL APPLICATION OF PROCESS IMPROVEMENT TECHNIQUES IN
INCREASING ENERGY EFFICIENCY**

DOCTORAL THESIS
CEYDA KOCABAŞ

THESIS ADVISOR
ASSOC. PROF. DR. AHMET FEVZİ SAVAŞ

BILECIK, 2021

10404379

BEYAN

“Enerji Veriminin Artırılmasında Süreç İyileştirme Tekniklerinin Endüstriyel Uygulaması” adlı doktora tezimin yazımı sırasında bilimsel ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte beyan edilmelidir.			
DESTEK ALINMIŞTIR	X	DESTEK ALINMAMIŞTIR	
Destek alındı ise;			
Destekleyen Kurum: Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyonu			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)	X	2019-01.BŞEÜ.07-01	
2- TÜBİTAK			
3- Diğer;			

Ceyda KOCABAŞ

...../...../.....

İmza

ÖN SÖZ

Doktora eğitimim süresince ilgisini ve desteğini hiç esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet Fevzi Savaş'a katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez izleme sürecim boyunca yorum ve destekleri ile katkı sağlayan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Hasan Yalık ve Dr. Öğr. Üy. Şenol Avcı'ya içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmaları yürütmüş olduğumuz Bilecik Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Doğu Suni Deri Kösele Sanayi ve Ticaret A.Ş.'nin saygıdeğer yöneticileri Şermin Kahraman ve Şener Taylan'a, değerleri katkı ve yardımlarını esirgemeyen firma bakım ekibinde yer alan Volkan ve Mustafa Bey'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gönülden desteklerinden ve sabırlarından dolayı her zaman yanımda olan, gittiğim her yolda ve attığım her adımda beni yüreklendiren, doktora sürecimin en büyük destekçisi eşim Mete Kocabaş'a ve ailemizin en küçük bireyi oğlum Salih Onur Kocabaş'a her zaman yanımda oldukları ve manevi desteklerini esirgemedikleri için teşekkür ederim.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ceyda KOCABAŞ

...../...../

ÖZET

ENERJİ VERİMİNİN ARTIRILMASINDA SÜREÇ İYİLEŞTİRME TEKNİKLERİNİN ENDÜSTRİYEL UYGULAMASI

Bir tekstil firmasında distilasyon prosesinde kullanılmakta olan buhar kazanı sisteminde gerçekleşen ısı kayıpları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu kayıplar temel olarak; kazan kayıpları, proses kayıpları ve dağıtım kayıpları olmak üzere 3 ana başlıkta incelenmiştir. Her bir kayıp türüne ait kayıp miktarları ayrı ayrı hesaplanmış ve sistem verimi %80 olarak bulunmuştur. Bu kayıpların azaltılması ve sistem veriminin artırılması için kalite/süreç iyileştirme tekniklerinden faydalanılmıştır. Bu tekniklerden biri olan FMEA (Hata Türleri ve Etkileri Analizi) tekniği enerji alanına uyarlanarak kullanılmıştır. Bu doğrultuda kayıplara neden olan her bir risk, iyileştirmeye açık alan olarak değerlendirilmiş ve her biri için günümüz teknolojik imkanları göz önünde bulundurularak çeşitli iyileştirme önerileri sunulmuştur. Bu önerilere ait yatırımların ekonomik analizleri gerçekleştirilmiş ve geri ödeme süreleri ortaya konmuştur. Seçilen iyileştirme önerilerinin firmadaki kazan sistemine uygulanması halinde kazan sistem veriminin %96'ya yükseltilebileceği tespit edilmiştir. Bu durumda yaklaşık %16,8 oranında yakıt tasarrufu sağlanarak yıllık 587 ton CO₂ salınımının önüne geçilmiş olacaktır. Bu çalışmanın endüstriyel kazan kullanan diğer sanayi kuruluşlarına da örnek teşkil edeceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Buhar Kazanı, Enerji Verimi, Kazan Isı Kayıpları, Süreç İyileştirme Teknikleri, FMEA.

ABSTRACT

INDUSTRIAL APPLICATION OF PROCESS IMPROVEMENT TECHNIQUES IN INCREASING ENERGY EFFICIENCY

The heat losses in the steam boiler system used in the distillation process in a textile company are discussed in detail. These losses are examined under three main headings: boiler losses, process losses, and distribution losses. Loss amounts for each type of loss were calculated separately, and the system efficiency was found %80. Quality/process improvement techniques were used to reduce these losses and increase system efficiency. FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) technique, which is one of these techniques, was used by adapting it to the energy field. In this direction, each risk that causes losses has been evaluated as an improvement area, and various improvement suggestions have been presented for each of them, considering today's technological opportunities. The economic analyzes of the investments of these proposals were performed, and the payback periods were revealed. It has been determined that if the selected improvement suggestions are applied to the boiler system in the company, the boiler system efficiency can be increased to %96. In this case, approximately 16,8% fuel savings will be achieved, and annual 587 tons of CO₂ emissions will be prevented. It is expected that this study will set an example for other industrial establishments using industrial boiler.

Key Words: Steam Boiler, Energy Efficiency, Boiler Heat Losses, Process Improvement Techniques, FMEA.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
2.1. Buhar Kazanı Sistemleri Enerji Verimi İyileştirme Çalışmaları.....	5
2.2. Buhar Kazanı Sistemlerinde FMEA Uygulamaları	20
3. MATERYAL VE METOD	23
3.1. Süreç İyileştirme Teknikleri.....	23
3.1.1. Beyin Fırtınası.....	23
3.1.2. Akış Diyagramı	23
3.1.3. Sebep Sonuç Diyagramı.....	24
3.1.4. Çetele Diyagramı.....	24
3.1.5. Pareto Analizi.....	25
3.1.6. Kuvvet Alan.....	26
3.1.7. Ağaç Diyagramı.....	26
3.1.8. PUKÖ Döngüsü.....	27
3.1.9. Gruplandırma (Tabakalandırma).....	27
3.1.10. İlişki Diyagramı.....	27
3.1.11. Tek Nokta Dersi (One- Point Lesson)	28

3.1.12. 8D Yöntemi.....	28
3.1.13. Poka- Yoke Yöntemi.....	29
3.1.14. FMEA.....	29
3.1.15. Kaizen	30
3.1.16. 5S Yöntemi.....	30
3.2. Enerji FMEA.....	31
4. BUHAR KAZANI ENERJİ VERİMİ	37
4.1. Endüstride Buhar Kullanımı.....	37
4.2. Buhar Kazanı	38
4.3. Buhar Kazanı Verimi.....	40
4.4. Buhar Kazanı Sistem Verimi ve Isı Kayıpları	42
5. BUHAR KAZANI SİSTEMİ ISI KAYIPLARININ AZALTILMASI.....	44
5.1. Kazan Kayıpları.....	44
5.1.1. Baca Gazı Kaybı.....	45
5.1.1.1. Baca Gazı Kaybı Hesaplama Yöntemi	46
5.1.1.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Baca Gazı Kaybı.....	47
5.1.1.3. Baca Kaybı.....	47
A. Baca Kaybı Enerji FMEA Çalışması.....	48
B. Baca Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar.....	50
C. Baca Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama.....	52
5.1.1.4. Yanma Kaybı.....	54
A. Yanma Verimini Etkileyen Faktörler	55
B. Yanma Verimi Hesaplama Yöntemi.....	57
C. Yanma Kaybı Enerji FMEA Çalışması.....	58
D. Yanma Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar.....	61
E. Yanma Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama	62

5.1.1.5. Entalpi Kaybı.....	64
A. Entalpi Kaybı Enerji FMEA Çalışması	64
B. Entalpi Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar	64
C. Entalpi Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama.....	65
5.1.1.6. Baca Gazı Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama.....	66
5.1.2. Blöf Kaybı.....	67
5.1.2.1. Blöf Çeşitleri	69
A. Yüzey Blöf.....	69
B. Dip Blöf.....	71
5.1.2.2. Blöf Kaybı Hesaplama Yöntemi	72
5.1.2.3. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Blöf Kaybı.....	72
5.1.2.4. Blöf Kaybı Enerji FMEA Çalışması	74
5.1.2.5. Blöf Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar.....	76
A. Flaş Buhar ile Isı Geri Kazanımı	76
B. Ters Ozmoz Sistemi ile Besleme Suyunun Arıtılması	79
5.1.2.6. Blöf Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama	82
5.1.3. Yüzeyden Isı Kaybı.....	84
5.1.3.1. Yüzeyden Isı Kaybı Hesaplama Yöntemi	86
5.1.3.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Yüzeyden Isı Kaybı.....	86
5.1.3.3. Yüzeyden Isı Kaybı Enerji FMEA Çalışması.....	89
5.1.3.4. Yüzeyden Isı Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar.....	90
5.1.3.5. Yüzeyden Isı Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama	90
5.2. Proses Kayıpları.....	93
5.2.1. Degazör Kaybı.....	93
5.2.1.1. Degazör Kaybı Hesaplama Yöntemi	95
5.2.1.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Degazör Kaybı.....	95

5.2.1.3. Degazör Kaybı Enerji FMEA Çalışması.....	97
5.2.1.4. Degazör Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar.....	98
5.2.1.5. Degazör Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama	98
5.2.2. Kondens Kaybı.....	99
5.2.2.1. Kondens Kaybı Hesaplama Yöntemi	101
5.2.2.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Kondens Kaybı.....	101
5.2.2.3. Kondens kaybı Enerji FMEA çalışması.....	102
5.2.2.4. Kondens Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar.....	103
5.2.2.5. Kondens Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama	105
5.3. Dağıtım Kayıpları.....	107
5.3.1. Dağıtım Kayıpları Hesaplama Yöntemi	108
5.3.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Dağıtım Kayıpları.....	109
5.3.3. Dağıtım Kaybı Enerji FMEA Çalışması.....	111
5.3.4. Dağıtım Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar	113
5.3.5. Dağıtım Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama	113
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	116
6.1. İyileştirmeler Öncesi Kazan Sisteminde Kayıplar	116
6.2. İyileştirmeler Sonrası Kazan Sisteminde Kayıplar	119
6.3. İyileştirmeler Sonrası Enerji FMEA Çalışması	123
6.4. İyileştirmeler Sonrası Kazan Sistemi Görünümü.....	125
6.5. İyileştirme Yatırımlarının Ekonomik Analizi.....	128
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	130
KAYNAKÇA	132

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. FMEA örneği.....	29
Tablo 3.2. Olasılık, şiddet, saptanabilirlik derecelendirme ölçeği	32
Tablo 3.3. FMEA derecelendirme tablosu.....	33
Tablo 3.4. RÖS değerlendirme ölçeği	34
Tablo 3.5. Enerji FMEA derecelendirme tablosu	35
Tablo 5.1. Doğalgazın stokiyometrik yanma sonucu tepkime bileşenleri.....	46
Tablo 5.2. Mevcut durumda gerçekleşen baca gazı kaybı.....	47
Tablo 5.3. Baca Kaybı Enerji FMEA Çalışması	49
Tablo 5.4. Türbülator takılması durumunda baca gazı kaybı	53
Tablo 5.5. Türbülator takılması durumunda enerji tasarrufu.....	53
Tablo 5.6. Yanma kaybı Enerji FMEA çalışması.....	59
Tablo 5.7. Kazana Trim kontrol sistemin dahil edilmesi sonrası baca gazı kaybı	63
Tablo 5.8. O ₂ /CO Trim kontrolü sisteminin kurulması durumunda enerji tasarrufu.....	63
Tablo 5.9. Entalpi kaybı Enerji FMEA çalışması.....	64
Tablo 5.10. Yoğuşmalı ekonomizör sisteminin dahil edilmesi sonrası baca gazı kaybı	66
Tablo 5.11. Yoğuşmalı ekonomizör eklenmesi durumunda enerji tasarrufu.....	66
Tablo 5.12. Trim kontrol ve yoğuşmalı ekonomizör sisteminin birlikte dahil edilmesi sonrası baca gazı kaybı	67
Tablo 5.13. Trim kontrol ve yoğuşmalı ekonomizör sisteminin birlikte dahil edilmesi sonrası enerji tasarrufu.....	67
Tablo 5.14. Blöf kaybı Enerji FMEA çalışması	74
Tablo 5.15. Flaş buhar ünitesi ilave edilmesi durumunda enerji tasarrufu.....	79
Tablo 5.16. Ters Ozmoz ünitesi ilave edilmesi durumunda enerji tasarrufu.....	82

Tablo 5.17. Flaş buhar ve Ters Ozmoz ünitesinin birlikte dahil edilmesi durumunda enerji tasarrufu.....	84
Tablo 5.18. Buhar kazanı yüzeyden ısı kayıpları	87
Tablo 5.19. Hesaplamalarda kullanılan katsayılar.....	87
Tablo 5.20. Yüzeyden ısı kaybı Enerji FMEA çalışması	89
Tablo 5.21. Yalıtım çalışmaları sonrası buhar kazanı yüzeyden ısı kayıpları	92
Tablo 5.22. Kazan yüzeylerine yalıtım yapılması durumunda enerji tasarrufu.....	93
Tablo 5.23. Degazör Kaybı Enerji FMEA Çalışması	97
Tablo 5.24. Degazör çıkışına eşanjör ilave edilmesi durumunda enerji tasarrufu.....	99
Tablo 5.25. Kondens kaybı Enerji FMEA çalışması	103
Tablo 5.26. Flaş buhar tankı uygulaması Önce - Sonra Kaizen çalışması	106
Tablo 5.27. Flaş buhar tankı ilavesi durumunda enerji tasarrufu	107
Tablo 5.28. Vana - Flanş çifti sayıları ve toplam ısı kaybı.....	110
Tablo 5.29. Buhar kazanı dağıtım kayıpları	110
Tablo 5.30. Dağıtım kaybı Enerji FMEA çalışması	112
Tablo 5.31. Vana ceketi uygulaması Önce- Sonra Kaizen çalışması	114
Tablo 5.32. İzolasyonlu durumda vana kayıpları	114
Tablo 5.33. Vana ceketi uygulaması sonrası buhar kazanı dağıtım kayıpları	115
Tablo 5.34. Vana ceketi uygulaması sonrasında enerji tasarrufu	115
Tablo 6.1. Mevcut kazan sisteminde meydana gelen ısı kayıpları	116
Tablo 6.2. Mevcut kazan sisteminde meydana gelen ısı kayıpları (%)	118
Tablo 6.3. Önerilen iyileştirmeler öncesi ve sonrası kazan sistemindeki ısı kayıpları.....	119
Tablo 6.4. Önerilen iyileştirmeler sonrası kazan sistemi ısı kayıpları.....	120
Tablo 6.5. Kazan sistem kayıpları Kaizen çalışması	122
Tablo 6.6. İyileştirmeler sonrası kazan sistemi Enerji FMEA çalışması.....	124
Tablo 6.7. İyileştirme öncesi ve sonrası kazan sistemi ısı kayıpları ve geri ödeme süreleri .	128

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 3.1. Sebep- Sonuç diyagramı	24
Şekil 3.2. Pareto diyagramı örneği.....	25
Şekil 3.3. Ağaç diyagramı.....	26
Şekil 3.4. PUKÖ Döngüsü	27
Şekil 3.5. İlişki diyagramı örneği.....	28
Şekil 4.1. Sanayide enerji tüketiminin sektörel dağılımı	40
Şekil 4.2. Genel kazan sistemi kayıp diyagramı	43
Şekil 5.1. Kazan sisteminde kayıplar	44
Şekil 5.2. Buhar kazanı kayıpları	45
Şekil 5.3. Baca gazı kaybı.....	45
Şekil 5.4. Baca gazı sıcaklığı balık kılçığı diyagramı.....	48
Şekil 5.5. Neden- Nasıl Ağaç diyagramı.....	50
Şekil 5.6. Kazana türbülator yerleştirilmesi.....	52
Şekil 5.7. Türbülatorlü ve türbülatorsüz kazanlarda baca gazı sıcaklıkları	52
Şekil 5.8. Yanma tepkimesinde CO-O ₂ eğrisi.....	56
Şekil 5.9. Yanma kaybı ilişkiler diyagramı.....	60
Şekil 5.10. Erimiş katı maddelerin sisteme etkisi	68
Şekil 5.11. Otomatik blöf sistemi.....	70
Şekil 5.12. Otomatik dip blöf sistemi	71
Şekil 5.13. Mevcut kazan blöf çalışma sistemi	73
Şekil 5.14. Blöf kaybı Nasıl-Nasıl ağaç diyagramı.....	75
Şekil 5.15. Flaş buhar sistemi ile ısı geri kazanımı.....	76
Şekil 5.16. Flaş buhar tankı ilaveli kazan sistemi	78
Şekil 5.17. Ters Ozmoz tekniği kullanılarak suyun yumuşatıldığı kazan sistemi	81

Şekil 5.18. Ters Ozmoz ve flaş buhar tankının birlikte kullanıldığı kazan sistemi	83
Şekil 5.19. Buhar kazanı yüzey sıcaklıkları	87
Şekil 5.20. Buhar kazanı ısı kayıpları dağılım grafiği	88
Şekil 5.21. Buhar kazanı yüzey sıcaklıkları Pareto diyagramı.....	89
Şekil 5.22. Ön kapak yan yüzey sıcaklığı (221 °C)	90
Şekil 5.23. Ön kapak ön yüzeyi sıcaklığı (107 °C).....	90
Şekil 5.24. Ön kapak için önerilen yalıtım ceketini	91
Şekil 5.25. Arka kapak yan yüzey sıcaklığı (249 °C)	91
Şekil 5.26. Arka kapak ön yüzey sıcaklığı (142 °C)	91
Şekil 5.27. Arka kapak için önerilen yalıtım yastığı.....	91
Şekil 5.28. Duman borusu (161 °C).....	92
Şekil 5.29. Duman borusu için önerilen yalıtım ceketini ve yastığı	92
Şekil 5.30. Proses Kayıpları	93
Şekil 5.31. Kazan dairesinde degazör kullanımı.....	94
Şekil 5.32. Mevcut durumda degazör kütle ve enerji denge şeması	96
Şekil 5.33. Bakır borulu eşanjörde kütle ve enerji dengesi.....	98
Şekil 5.34. Buhar dağıtım elemanlarının dış yüzey sıcaklıkları Pareto diyagramı	109
Şekil 5.35. Buhar dağıtım elemanlarının ısı kaybı Pareto diyagramı	111
Şekil 5.36. Dağıtım hatlarında vana ceketini uygulaması.....	113
Şekil 6.1. Kazan sisteminde kayıplar	116
Şekil 6.2. Mevcut buhar kazan sistemi ısı kayıpları Pareto diyagramı	117
Şekil 6.3. Mevcut buhar kazan sistemi ısı kayıpları Sankey diyagramı.....	118
Şekil 6.4. Mevcut kazan sistemine ait kayıp diyagramı.....	119
Şekil 6.5. İyileştirme sonrası kazan sistemi ısı kayıpları Pareto diyagramı.....	120
Şekil 6.6. Önerilen iyileştirmeler sonrası kazan sistemi ısı kayıpları Sankey diyagramı	121
Şekil 6.7. Önerilen iyileştirmeler sonrası kazan sistemine ait kayıp diyagramı	121

Şekil 6.8. Mevcut durum ve iyileştirmeler sonrası kazan sistemi ısı kayıpları kıyaslaması..	123
Şekil 6.9. İyileştirmelerden sonra bakır borulu eşanjörde kütle ve enerji dengesi	126
Şekil 6.10. İyileştirmelerden sonra degazör kütle ve enerji dengesi.....	127

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

B	: Yakıt debisi (Nm^3/h)
F	: Alan (m^2)
h	: Entalpi (kJ/kg)
H_u	: Yakıt alt ısı değeri (kWh/Nm^3)
k	: Konveksiyon ısı transfer katsayısı ($\text{kJ/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
kWh	: Kilo Watt saat
<i>m</i>	: Kütleli debi (kg/h)
n	: Mol (mol)
Nm³	: Normal metre küp
Q	: Isı (kJ)
Sm³	: Standart metre küp
T	: Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)
<i>V</i>	: Hacimsel debi (m^3/h)
ϵ	: Siyah cisim katsayısı
λ	: Hava fazlalık katsayısı
σ	: Planck katsayısı ($\text{kJ/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4$)
η	: Verim (%)
μS	: Micro Siemens

Kısaltmalar

CFB	: Circulating Fluid Bed Boiler (Dolaşımli Akışkan Yataklı Kazan)
ÇVD	: Çözüm Var Danışmanlık
EN	: European Norm (Avrupa Normu)
EİEİ	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü
EPA	: Environmental Protection Agency
ESC	: Energy Solution Center
EWMA	: Exponentially Weighted Moving Average (Üstel Ağırlıklı Hareketli Ortalama)
FMEA	: Failure Mode Effects Analysis (Hata Türleri ve Etkileri Analizi)
FMECA	: Failure Mode Effects Criticality Analysis (Hata Modu Etkileri Kritiklik Analizi)
GA	: Genetic Algorithm (Genetic Algoritma)
ppm	: Parts Per Million (Milyonda Bir Parça)
PSO	: Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyonu)
RÖS	: Risk Öncelik Sayısı
RSM	: Response Surface Method (Yanıt Yüzey Metodu)
TDS	: Total Dissolved Solid (Toplam Erimiş Katı Madde)
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu
TMD	: Termal Membran Distilasyon
TS	: Türk Standardı
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
8D	: 8 Disiplin

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji tüketim giderlerinin azaltılarak dünyadaki doğal kaynakların korunması için enerjinin mümkün oldukça etkin kullanılması gerekmektedir. Dünya üzerindeki doğal gaz rezervlerinin 60, petrol rezervlerinin 47 ve kömür rezervlerinin de yaklaşık olarak 119 yıllık ömrü kaldığı tahmin edilmektedir (TKİ, 2017: 17). Görüldüğü üzere fosil kaynaklı yakıtlar hızla tükenmekte ve bu yakıtların yanması sonucu açığa çıkan sera gazı emisyonları ise küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine yol açarak geleceğimizi tehdit etmektedir. Bütün bunların yanında enerji kaynakları kullanımında büyük oranda ihracata bağımlı olunması son yıllarda enerji verimine gösterilen önemi oldukça artırmıştır (Karyeyen vd., 2012: 2).

Ülkemizde sanayi sektörü nihai enerji tüketimi içinde yaklaşık %34'lük paya sahip olup yüksek enerji tasarrufu potansiyeli taşımaktadır. Bu alanda tüketilen enerjinin ticari enerji olması nedeniyle de enerji tasarrufuyla ilgili çalışmalarda öncelikli alanlardan biridir (Mumlu, 2008: 50; Kocabaş ve Savaş, 2019a: 351). Sanayi kuruluşlarında enerji kaynakları etkin ve verimli kullanılmalıdır. Bu amaçla üretimin tüm aşamalarında harcanan enerji miktarı azaltılmalı ve enerji verimini artırmaya yönelik çalışmalar yürütülmelidir (Akbaş vd., 2018: 86). Enerji verimliliği; kuruluşlarda üretim kalitesi ve miktarından taviz vermeden birim ürün başına düşen enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Bu doğrultuda ürünün üretimi, dağıtımı ve kullanımı sırasında çeşitli önlemler alarak her adımda kullanılan enerji miktarının düşürülmesine yönelik çalışmalar yapmaktır. Bu amaçla; ısı, elektrik, gaz, buhar, hava vb. enerji kayıplarının önüne geçmek, daha verimli ve temiz enerji kaynaklarının kullanımına yönelmek, çeşitli atıkların geri kazanılarak değerlendirilmesini sağlamak, enerji geri kazanım tekniklerinden yararlanmak, daha verimli endüstriyel proses teknolojilerini tercih etmek gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir (Karyeyen vd., 2012: 2; Kocabaş ve Savaş, 2019a: 352). Enerji tasarruf çalışmaları yürütülürken kullanılan bütün enerji türleri tartışılmalı, atık enerjilerden yararlı iş elde edilmeye çalışılmalı, ısı geri kazanım yöntemleri uygulanarak atık enerji miktarı azaltılmalıdır. Ayrıca uygulanması planlanan enerji tasarruf önerisi işletmenin diğer giderlerini artırmamalıdır (Yücer, 2017: 71).

Küreselleşen dünyada giderek artan rekabet şartları nedeniyle endüstriyel işletmeler enerji maliyetlerini azaltmak zorunda kalmaktadırlar. Daha önceki yıllarda yakıt fiyatının ucuz ve rekabetin daha az olmasından dolayı enerji maliyetleri günümüzdeki kadar çok önemsenmiyordu. Bugün ise sanayi kuruluşlarının ve endüstriyel tesislerin gereksiz yere yakıt tüketme lüksü bulunmamaktadır. Birçok gelişmiş ülkede olduğu gibi tek amaç, minimum yakıt

tüketimiyle maksimum enerjinin sağlanması olmalıdır. Enerji tasarrufunu prensip edinmiş ve çalışmalarını bu doğrultuda planlamış işletmeler aynı işi daha az enerji kullanarak elde edebilecekler ve rekabette avantajlı konuma geçebileceklerdir (Ünlü, 2009: 79).

Sanayide enerji harcamaları işletmelerin toplam giderleri içerisinde önemli bir paya sahiptir. Bir fabrikadaki üretim maliyetlerini temel olarak hammadde, işçilik ve enerji maliyetleri oluşturmaktadır. İşletmelerde genellikle enerji giderleri ayrı bir kalem olarak ele alınmamakta ve basit bir şekilde toplam üretim maliyetlerine dahil edilmektedir. Bu durum enerji maliyetlerinin toplam giderler içerisindeki payının gözden kaçmasına sebep olmaktadır. Ancak eğer harcama giderleri dikkatli incelenirse; enerji maliyetlerinin kullanılan prosese, hammadde ve üretilen ürüne bağlı olarak değişmekle beraber toplam üretim maliyetlerinin %50'sinin bile üzerine çıkabileceği saptanmıştır (Bulgurcu vd., 2014: 25). İşletmelerdeki kalite iyileştirme çalışmalarındaki hedeflerden biri de maliyetleri düşürmek olup enerji verimini artırmaya yönelik her türlü girişim bu çalışmalara da destek niteliği taşıyacaktır (Çarkacı, 2014: 3). Bu sayede üreticiler aynı miktardaki ürün veya hizmeti daha az enerji harcayarak veya aynı miktar enerji ile daha çok ürün ve hizmet üreterek hem ulusal hem de uluslararası alanlarda rekabet etme şanslarını artıracaklardır (Karakurt, 2006: 85; Kanoğlu, 2010: 1).

Gelişmiş ülkelerde enerji tüketim değerleri çok yüksek olmakla birlikte kayıplar da çok düşük değerdedir. Fakat ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkelerde kayıplar, enerji tüketim maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu nedenle kayıpları minimuma indirerek enerji maliyetlerini azaltmak büyük önem arz etmektedir (Mumlu, 2008: 10). Belirlenmiş bir program uygulamadan yürütülen enerji verimi çalışmalarında alınan basit tedbirlerle %10'a varan miktarlarda enerji tasarrufu elde edilebilmektedir. Planlı ve geniş kapsamlı enerji yönetim programları uygulanması durumunda ise çalışmaların sürekli hale getirilmesiyle %25'in üzerinde tasarruf sağlanabilmektedir (Bulgurcu vd., 2014: 25). Enerji verimliliğinin arttırılmasına yönelik yapılacak yatırımlar yeni enerji kaynaklarının devreye sokulması için yapılacak yatırımlardan ekonomik olarak daha caziptir. Enerji tasarrufu çok çabuk ve ucuza elde edilebilen bir enerji kaynağı niteliği taşımakta olup ülkelerin enerji teminiyle ilgili sorunlarının çözümüne küçümsenemeyecek düzeyde katkısı olabilecektir (Mumlu, 2008: 50). Şu bilinmelidir ki; enerjinin verimli kullanılması ile elde edilecek her türlü kazanç işletme için kârdır. Enerji tasarruf çalışmalarının tüm sanayi dallarında yürütülmesi ile özellikle enerjide dışa bağımlı olan ülkelerde enerji ithalatında azalma sağlanarak ülke ekonomisine büyük katkı sağlanabilecektir (Uylukçuoğlu, 2009: 84).

Enerji tasarrufu ile çevre arasında yakın bir ilişki bulunmaktadır. Enerjiden tasarruf edilmesiyle yakıt kullanım miktarı azaltılabilecektir. Bu durum daha az CO₂ gazı ve çevreyi kirleten emisyon anlamına gelmektedir (Özbakır, 2006: 9). Enerji verimliliği uygulamaları küresel ısınmayı tetikleyen bu gazların salınımının düşmesine katkı sağladığı için büyük önem taşımaktadır. Verimlilik çalışmaları hızlandıkça fosil yakıtların yanması sonucu oluşan CO₂ salınımları ve karbon emisyonunun sebep olduğu küresel ısınma etkileri azalmaya devam edecektir (Karyeyen vd., 2012: 3; Kanoğlu, 2010: 29).

Enerji tasarrufu projelerinin birçoğu çok az bir yatırımla veya hiç yatırım yapmaya gerek olmadan uygulanabilir özelliktedir. Bazılarını uygulamak için ise çok büyük miktarlarda sermayeye ihtiyaç duyulabilir. Enerji tasarrufuna yönelik gerçekleştirilecek yatırımlar işletmede yapılan diğer yatırımlarla (kapasite artırımı, proses ekipmanının modernizasyonu, yeni binalar vb.) aynı biçimde değerlendirilmelidir. Genel anlamda enerji tasarrufu yatırımları diğer birçok işletme yatırımına göre ekonomik açıdan daha caziptir. Enerji verimi çalışmaları sırasında işletmede kullanılan tüm cihazların incelenmesi sonucunda başka alanlarla da ilgili maliyetleri azaltma fırsatı yakalanabilir (Mumlu, 2008: 49). Yatırımların geri ödeme süresine göre değerlendirilmesi üst yönetimin onayı açısından önemlidir. Yapılan iyileştirme yatırımları sonucunda elde edilen enerji tasarruf miktarı ve yatırımların geri ödeme süreleri yatırımdan elde edilen kazanımlara bağlı olarak değişmektedir (Öztürk, 2012: 90).

Bu tez çalışmasında Bilecik Organize Sanayi Bölgesinde tekstil sektöründe 1991 yılından bu yana faaliyet gösteren Doğuş Suni Deri Kösele firmasının buhar üretim sistemi (1320 TEP) ve sistemdeki ısı kayıpları detaylı olarak incelenmiştir. Tesiste 5000 kg/h buhar kapasiteli 10 bar işletme basıncında buhar üreten buhar kazanı bulunmakta ve kazan koagüle üretiminin distilasyon prosesinde kullanılmak üzere yılda ortalama 5760 saat çalıştırılmaktadır. Tesisteki kazan sistemindeki ısı kayıpları ayrı ayrı incelenerek hesaplanmış ve bu kayıpların azaltılması için çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur. Çalışmalarda sadece buhar kazanı değil tüm buhar üretim sistemi bütüncül olarak ele alınmıştır. Sistem; beyin fırtınası, balık kılıcı, Pareto analizi vb. kalite araçları kullanarak analiz edilmiştir. Buhar üretim prosesi için FMEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) çalışması yapılmıştır. Proses akışı boyunca proseste, buhar kazanı ve buhar üretimiyle ilgili ekipmanlarda meydana gelebilecek hatalar ve riskler incelenmiştir. Bu hataların üretime ve enerji verimine olan etkileri araştırılmıştır. Bu risklerin meydana gelme olasılıkları ve risklerle ilgili herhangi bir tedbir alınıp alınmadığı ortaya konmuştur. Son olarak hatanın/riskinin nasıl tespit edildiği belirtilerek RÖS (Risk Öncelik

Sayıları) birer birer belirlenmiştir. Enerji kullanımında azalma sağlayacak öneriler tartışılmış ve yatırımların geri dönüş süreleri hesaplanmıştır.

Literatürde hâlihazırda firmalarda enerji iyileştirme faaliyetlerinin tüm buhar üretim sistemini kapsayacak şekilde ele alıp risk analizlerinin gerçekleştirildiği ve süreç iyileştirme tekniklerinin enerji kaynaklı kayıpların tespitinde ve azaltılmasında kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma ile buhar sisteminde enerji optimizasyonu ile ilgili literatüre yeni ve önemli bilgiler kazandırılması öngörülmektedir. Bu çalışmada önerilen iyileştirmelerin diğer kuruluşlara da uygulanabilir olması ve endüstrinin hizmetine sunulması sayesinde sanayide enerji verimine yönelik çalışmalara önemli ölçüde katkıda bulunulacağı düşünülmektedir. Enerji kayıplarının azaltılması ve tasarruf önerilerin uygulanması halinde hem ekonomik hem de çevresel kazançlar sağlanacaktır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Buhar Kazanı Sistemleri Enerji Verimi İyileştirme Çalışmaları

Buhar kazanlarında enerji yönetimi ile ilgili olarak bugüne kadar yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların bir kısmı aşağıda özet olarak verilmektedir.

Akbaş ve arkadaşları (2018), bir otomobil montaj tesisinde enerjinin yoğun kullanıldığı sistemleri incelemiş ve verimliliğin artırılması için yapılabilecek çalışmaları belirlemişlerdir. Buhar kazanı baca gazı analizi yaparak ölçüm sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Buhar kazanı enerji denkleğini Sankey diyagramıyla şematik olarak göstermişlerdir. Elde edilen veriler doğrultusunda kazan veriminin beklenen değerlerde olduğu tespit etmişlerdir. Oksijen oranının %3'ün altına düşürülmesi durumunda enerji tasarrufu sağlanabileceğini vurgulamışlardır. Gerekli görülen alanlarda iyileştirmeler yaparak yatırımların geri ödeme sürelerini hesaplamışlardır.

Öztürk (2012), tekstil sektöründe faaliyet gösteren bir firmada üretim hatları ve makinelerin enerji tüketimlerini inceleyerek enerji tasarrufunun yapılabileceği alanları tespit etmeye çalışmıştır. Kazan sisteminde ekonomizör performansının artırılması, buhar ve kondens hatlarındaki vana ve armatürlere izolasyon ceketinin uygulanması, kondens dönüş oranının artırılması, blöf suyu atık ısısının kazanılması ve flaş buharın değerlendirilmesine yönelik projeler sunmuştur. Her bir proje için tasarruf edilen buhar miktarını, yıllık parasal karşılığını ve geri ödeme süresini hesaplamıştır.

Uylukçuoğlu (2009), otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmada ısı ve elektrik enerjisinde yapılabilecek tasarruf olanaklarını araştırmıştır. Baca gazı kayıplarını ve yüzeyden ısı kayıplarını dikkate alarak kazan verimini %94,1 olarak hesaplamıştır. Yanma havasının ısıtılması, baca gazı sıcaklığının düşürülmesi, eksik yalıtımın giderilmesi durumunda doğalgaz tüketiminde elde edilecek tasarruf miktarını ortaya koymuştur. Yanma havasının ısıtılması ve baca gazının sıcaklığının düşürülmesi neticesinde kazan veriminin %96,7 seviyesine yükseldiğini belirtmiştir.

Kanoğlu (2010), sanayi tesisleri için bazı önemli enerji tasarruf yöntemlerini örnekler üzerinden açıklamıştır. Kazanlarda verimin artırılması için hava-yakıt oranının optimize edilmesi, baca gazı kayıplarının ve yüzeyden kaybedilen ısıнын azaltılması gerektiğini vurgulamıştır. Blöf enerjisinin bir flaş tankı ile değerlendirilerek buradan elde edilen ısıнын havanın ön ısıtılmasında veya mekân ısıtması, proses ısıtması gibi başka faydalı amaçlar için

kullanılabileceğini belirtmiştir. Fazla havanın azaltılması, yakma havasının ısıtılması, sıcak yüzeylerin yalıtılması durumunda elde edilecek yakıt ve para tasarruf miktarlarını hesaplamıştır.

Kaya ve Öztürk (2012), sanayide enerji verimliliği alanında hazırladıkları kitapta; kazanlarda enerji verimini etkileyen faktörleri ortaya koymuşlardır. Kazanlarda potansiyel enerji tasarruf alanlarına örnekler vermişler ve bu alanlarda yapılabilecek iyileştirmelerle elde edilecek enerji tasarruf miktarlarını açıklamışlardır. Reküperatör kullanılarak yanma havasının ısıtılmasında durumunda ve flaş buharın geri kazanılması neticesinde elde edilecek doğalgaz tasarrufunu hesaplamışlardır. Blöf atıl enerjisinin besleme suyunun ısıtılması amacıyla kullanılması durumunda sağlanacak tasarruf miktarını ortaya koymuşlardır. Kazanların daha verimli çalıştırılabilmesi için baca gazı analizlerinin ve baca gazı sıcaklığının sürekli takip edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Isı transfer yüzeylerinin sık sık temizlenmesi gerektiğine vurgu yapmışlardır.

Ünlü (2009), sanayide enerji tasarruf çalışmalarının önemine vurgu yapmıştır. Kazan sistemlerinde enerjinin üretilmesi, dağıtılması ve tüketilmesi sırasında oluşan kayıpları açıklamıştır. Kazan kayıplarının toplamı %15, dağıtım kayıplarının yaklaşık %5-7 civarında, kondens toplama hatlarında ve atmosfere atılan flaş buhar nedeniyle oluşan kaybın ise %20 oranında gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Atık baca gazı ısısının değerlendirilmesi, manuel blöften otomatik yüzey blöfüne geçilmesi, flaş buhar geri kazanım sistemi kurulması, kazan teşhis ve tanı sistemi uygulanması, baca gazının analiz edilmesi ve buhar dağıtım hatlarının izole edilmesi durumunda elde edilecek tasarruf miktarlarını ve yatırımların amortisman sürelerini hesaplamıştır.

Çınar (2008), tekstil sektöründe faaliyet gösteren ve enerji tüketimi yoğun olan altı adet tekstil fabrikası seçmiştir. Fabrikalarda bulunan kazanlarda ve yakıt kullanılan diğer makinelerde baca gazı analizleri gerçekleştirmiştir. Baca gazındaki O₂ miktarının düşürülmesi durumunda sağlanacak yıllık enerji tasarrufunu ve bu tasarruflardan doğacak mali kazançları her bir fabrika için ayrı ayrı hesaplamıştır. Kazan dairelerinde gerçekleştirilen çalışmalar sırasında tespit edilen enerji tasarrufuna yönelik bulguları sıralamıştır. Kondens geri kazanım çalışmaları yapılması, yüksek sıcaklıktaki yüzeylerin izolasyonlarının yapılması, blöf kayıplarının azaltılması, yanmanın iyileştirilmesi, baca gazı analiz cihazının edinilmesi, kondenstop bağlantılarıyla ilgili düzenleme yapılması bunlardan bazılarıdır.

Mumlu (2008), bir sanayi kuruluğu seçerek enerji tasarrufu iyileştirme projelerine örnekler sunmuştur. Bu projelerden birinde dış hava sıcaklığına bağılı olarak kazan suyu sıcaklığını değırtmek ve uygun olduğıunda düşürmek, hatta üretim olmadığı günlerde kazanı kapatmak suretiyle enerji tasarrufu sağlanmıştır. Bir diğerk projede bağımsız ısıtma çalışmasıyla fabrika içerisindeki uzak noktalara merkezi sistem yerine lokal ısıtmaya geçilmiştir. Ayrıca; kazan, vana ve borulardaki ısı kayıpları termal kamerayla tespit edilerek izolasyonu eksik olan vanalar için vana ceketı takılmış ve yeni durumdaki ısı kaybı izolasyonsuz durumla kıyaslanmıştır. Çalışma neticesinde her bir projeden elde edilen enerji tasarrufu hesaplanmıştır.

Kaya ve Güngör (2002), Türkiye'nin değışik illerinde ve ABD'nin Arizona ve Nevada eyaletlerindeki farklı sanayi tesislerinde gerçekleştirilmiş enerji tasarruf çalışmalarından örnekler vermişlerdir. Kazanlarda potansiyel enerji tasarruf alanları için sundukları örneklerden biri yakma havasının baca gazıyla ısıtılmasıdır. Diğeri ise buhar kazanında buharın taşınmasında kullanılan boru hatları, vanalar, kondens tankı ve kollektörlerin yalıtımıdır. Her iki uygulama ile elde edilen tasarruf miktarını, tasarrufun ekonomik tutarını, yatırım maliyetini ve geri ödeme sürelerini hesaplamışlardır.

Bilgin (2007), kazanlarda enerji verimliliğı üzerine yaptığı çalışmada; baca gazı analizörünün kazan veriminin tespiti ve yanmanın optimize edilmesi amacıyla kullanılması gerektiğine vurgu yapmıştır. Büyük kapasiteli kazanlar için tam otomatik mikro modüasyonlu O₂ Trim kontrol sistemlerinin daha uygun olduğunu belirtmiştir. Duruş zamanlarının neden olduğu iç soğuma kayıplarının azaltılması için brülör ve kazan dizaynında gerekli tedbirlerin alınmasının önemli olduğunu ifade etmiştir. Kazan suyu sıcaklığının istenilenden yüksek tutulmaması ve kazan sızdırmazlığının tam sağlanmasının gerekliliğı üzerinde durmuştur. Baca gazlarındaki gizli ısıdan da yararlanmak amacıyla yoğunlaştıruculu kazanların tercih edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Bilgiç (2004), endüstrideki kazan dairelerinde enerji tasarrufunun 3 şekilde yapılabileceğinden bahsetmiştir. Sistemin çalışması esnasında yapılacak enerji tasarrufu uygulamalarını detaylı olarak açıklamıştır. Baca kayıplarının azaltılması için alınacak önlemlerden bahsetmiş; bu noktada türbülator ve ekonomizör kullanımını önermiştir. Flaş buhar kayıplarının azaltılması için flaş buhar ünitesinin sisteme dahil edilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Geri ödeme süresi 2 ay olan ısı geri kazanım sistemi uygulayarak blöf nedeniyle meydana gelen kayıpların büyük oranda azaltılabileceğini öne sürmüştür.

Özer (2004), bir oluklu mukavva fabrikasında kullanılan 14 bar basınçlı buhar kazanında gerçekleştirilen enerji geri kazanım uygulamalarından bahsetmiştir. İlk olarak manuel blöf sistemi yerine otomatik blöfe geçilmesiyle %8,21 daha az blöf yapılacağını ve sistemin kendini 39 günde amorti edeceğini ifade etmiştir. İkinci olarak otomatik blöf sistemi çıkışına flaş buhar sistemi kurulması ve aynı zamanda flaş buhar tankında geri kalan suyun değerlendirilmesi ile sağlanan enerji tasarruf miktarını hesaplamıştır. En son olarak da proseslerde kullanılan buharın yoğunlaşarak toplandığı ana kondens dönüşüne flaş buhar tankı konulması ile saatte 980 kg flaş buhar elde edildiğini ve bunun buhar ihtiyacı olan başka bir proseste kullanımının sağlandığını belirtmiştir.

Durukafa (2010), tekstil sektöründe faaliyet gösteren bir firmada 6 bar işletme basıncında çalışan buhar üretim tesisini analiz ederek çeşitli iyileştirmeler gerçekleştirmiştir. Kazan sistemine daha verimli bir yanma için yanma kontrol otomasyon sistemi eklemiştir. Otomatik yüzey blöfüne geçilerek blöf çıkışında ve kondens dönüşünde oluşan flaş buharın geri kazanılması için sisteme flaş buhar cihazları dahil etmiştir. Degazör gaz atma hattına ısı değiştirici ilave ederek taze besi suyunun yoğunlaşmalı ekonomizör e gönderilmeden önce ön ısıtmasını sağlamıştır. Kazan dış cidarındaki izolasyon kalınlığının artırılması ile tüm vana ve flanş çiftlerinin izolasyon ceketleriyle kaplanması çalışmalarını gerçekleştirmiştir. İyileştirme çalışmalarından sonra bütün kayıpları tekrar hesaplamış ve sistem veriminin %76,68 düzeyinden %96,70 düzeyine çıktığını belirtmiştir. İyileştirmelerin toplam yatırım maliyetlerini ve yıllık toplam tasarruf miktarını tespit etmiştir.

Karakurt (2006), bir deri işleme fabrikasında bulunan 7 bar basınçlı buhar kazanını ele alarak fabrikanın mevcut hali ile konvansiyonel enerji tasarruf yöntemlerinin uygulandığı yeni halini kıyaslamıştır. Yanma havasının reküperatör kullanılarak baca gazıyla ısıtılması, kapalı kondens kullanılması, blöf sonucu oluşan flaş buharın geri kazanılması, blöfün atıl ısısından yararlanılarak besi suyunun ısıtılması durumunda %14,5 civarında enerji tasarrufu elde edilebileceğini belirtmiştir. Sanayide enerjinin etkin kullanılmasının; birim ürün başına daha az yakıt tüketilmesi ve zararlı emisyonların çevreye vereceği olumsuz etkilerin azalması anlamına geldiğini ifade etmiştir.

Nagar vd. (2013), Hindistan’da bulunan bir termik santrale ait buhar kazanının işletme verimliliğinin belirlenmesiyle ilgili çalışma yürütmüşlerdir. Dolaylı yöntem kullanılarak kazandaki ısı kayıplarını hesaplamışlar ve kazandaki en büyük ısı kaybının baca gazı kaybı (%7,3) nedeniyle meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Hata ağacı analiziyle ısı kayıplarının

başlıca nedenlerini tespit etmişler ve bu nedenlere dayanarak kazan performansını artırmak için düzeltici eylemler önermişlerdir.

Barma vd. (2017), buhar üretim sistemindeki ısı kaybının nedenlerine ve enerji tasarrufu fırsatlarına yönelik çalışmaları derlemişlerdir. Enerji denetiminin, enerji kullanımının analiz edilmesinde yararlı bir araç olduğunu vurgulamışlardır. Kazandan ısı kaybının; baca gazı kaybı, yüzey kayıpları, kısa çevrim kayıpları, blöf kayıpları, yakıttaki nem ve eksik yanma nedeniyle oluşan kayıplar olarak çeşitli şekillerde gerçekleştiğini ve baca gazı kaybının kazan sistemindeki en yüksek ısı kaybı kaynağı olduğunu savunmuşlardır. Kazan için enerji tasarrufu önlemlerini de ayrıntılı olarak incelenmiş ve tartışmışlardır. Fazla havanın kontrolü, yanma veriminin artırılması, baca gazının atık ısı içeriğinin kullanımı, yanma havasının ısıtılması, kondensin geri kazanımı, buhar kapanlarının takibi ve düzenli bakımı, ısının geri kazanılması, kazan bakım ve temizliğinin sistematik olarak yapılması, kazan yalıtımı, blöf miktarının azaltılması, teknik ekibin bilgisinin eğitim ve bilinç seviyesinin sürekli artırılması gibi çeşitli tasarruf yöntemleri sunmuşlardır.

Saidur vd. (2010), bir kazandaki enerji ve ekserji akışlarını analiz etmişlerdir. Kazan enerji verimini %72,46 ve ekserji verimini ise %24,89 olarak tespit etmişler ve bunları önceki çalışmalarda elde edilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Kazanların enerji kullanımlarını azaltmak için çeşitli yöntemler bulunduğunu ifade etmişlerdir. Ancak çalışmalarında sadece kazan fanının hızının düşürülmesinde değişken hızlı sürücü kullanımı ve baca gazlarından ısı geri kazanımını ele almışlardır. Bu iki enerji tasarruf yöntemini maliyet-fayda analizi yaparak tartışmışlardır. Geri ödeme sürelerini, baca gazından ısı geri kazanım sistemi için yaklaşık 1 yıl ve değişken hız sürücü yatırımı için 3 yıl olarak tespit etmişlerdir.

Chen vd. (2017), baca gazından ısı geri kazanımı sağlayarak besleme havasını ısıtmak amacıyla yeni bir ısı değiştirici önermişler ve enerji tasarrufu oranını araştırmak için termodinamik model oluşturmuşlardır. Önerilen sistemde baca gazından daha fazla ısı emebilmek için besleme havasının içerisine su püskürtmüşler ve daha sonra yoğuşmalı ısı değiştiriciden geçirmişlerdir. Bu şekilde, besleme havasının ısı kapasitesi, baca gazına uygun hale getirilerek baca gazından daha derin bir ısı geri kazanımı sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Önerilen ısı geri kazanım cihazının kazan verimliliğini diğer sistemlerle karşılaştırmışlardır. Buna göre yeni kazan sisteminde, yoğuşmalı kazana göre %6 ve ısı geri kazanım sistemi olmayan geleneksel kazana göre %13 daha yüksek verim elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Madejski ve Żymelka (2020), buhar kazanının enerji ve ekserji analizinin metodolojisine dair çalışma hazırlamışlardır. Farklı kısmi yükler altında farklı kömür türlerinin yakılması sırasında kazan veriminin ve temel kazan parametrelerinin değişimini tespit etmek için hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir. Bu modeli kullanarak farklı kazan yükleri ve yakıtlar için simülasyonlar gerçekleştirmişler ve elde edilen sonuçları ölçüm sisteminden toplanan verilerle karşılaştırılmışlardır. En yüksek verimin orta kazan yükünde elde edildiğini saptamışlardır. Bu tür izleme sistemlerinin uygulanmasının prosesin yüksek enerji ve ekserji verimliliğini sağlamak ve sürdürmek için kullanabileceğini belirtmişlerdir.

Behbahaninia vd. (2017), ekserji kaybının ana kaynaklarını göstermek için buhar kazanını analiz etmişlerdir. Kazanda ekserji bozulması, kazan cidarından ekserji kaybı, gazlı hava ısıtıcısında ekserji yıkımı, baca gazı egzozuna bağlı kayıp, yanmamış hidrokarbon emisyonundan kaynaklanan kayıp ve CO oluşumundan kaynaklanan kayıp olmak üzere altı temel kaybı kullanarak kazanların ekserji denetimine yönelik bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde uygun olmayan şekilde çalışan bileşenleri tespit ederek denetçilerin sistem performansını iyileştirebileceğini ifade etmişlerdir. Kayıp kaynaklarının ayrı ayrı hesaplanmasının sistemin verimliliğini artırmada görüş açısını ve kavrayışı artırdığını vurgulamışlardır.

Patro (2016), yakıt olarak düşük kaliteli kömür ve pirinç kabuğunun kullanıldığı kombine borulu kazanlardaki çeşitli ısı kayıplarını araştırmıştır. Kuru baca gazı kaybı, yakıttaki hidrojene bağlı kayıp, yakıttaki nem kaybı, havadaki nemden kaynaklanan kayıp, CO oluşumuna bağlı ısı kaybı, yüzey ısı kayıpları, uçucu külde ve taban külünde tam yanmamaya bağlı kayıp olmak üzere 8 farklı ısı kaybını ayrı ayrı hesaplamıştır. Kombine borulu kazanlarda en önemli kaybın kuru baca gazı kaybı olduğu sonucuna varmıştır. Bu kazanların verimlerini hem direkt yöntemle hem de ısı kaybı metoduyla incelemiş ve elde edilen verileri birbiriyle kıyaslamıştır. Sonuçlara göre her iki yöntemde yaklaşık aynı verim değerini elde etmiştir. Bu kazanların düşük dereceli yakıtlarda bile kabul edilebilir verim (%75) sağladığını tespit etmiştir.

Yang vd. (2009), dolaşan akışkan yataklı (CFB) kazanının verimini ısı ve ekserji dengesi yöntemlerini kullanarak analiz etmişlerdir. Kazanın ısı verimini %91,56 ve ekserji verimini ise %47,75 olarak hesaplamışlardır. Dış kayıpların yanı sıra kazanda dahili kayıpların da gerçekleşmesi nedeniyle ekserji veriminin daha düşük çıktığını belirtmişlerdir. Yanma ve ısı transfer süreçlerinin tersinmez proses olmalarının bu iç kayıplara temel sebep teşkil ettiğini

vurgulamışlardır. Kazanın ana dış kayıplarının baca gazından ve mekanik eksik yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı olduğunu ortaya koymuşlardır. Kazan çalışma yükü, baca gazı sıcaklığı, fazla hava faktörü, hava sıcaklığı, buhar ve besleme suyu sıcaklığı gibi parametrelerin ekserji verimine etki derecelerini ayrıntılı olarak tartışmışlardır. Baca gazı sıcaklığı, fazla hava faktörü ve hava sıcaklığının, kazanın ekserji katsayısı üzerinde büyük etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Kazanın termal ve ekserji katsayısını iyileştirmek için; fazla hava faktörünün ve baca gazı sıcaklığının düşürülmesi, buhar ve besleme suyunun sıcaklıklarının artırılması, kazan odasındaki gaz sıcaklığı dağılımının iyileştirilmesi amacıyla yanma ayarının geliştirilmesi, kombine gaz-buhar döngüsünün kullanılması gibi öneriler sunmuşlardır.

Nguyen vd. (2018), kazanları kirletici maddelerden korumak ve termal iletkenlik etkinliklerini artırmak amacıyla külün yapışmasını önleyen bir kaplama geliştirmişlerdir. Enerji verimliliğini değerlendirmek için seramik kaplamalı ve kaplamasız çelik numuneler hazırlayarak bunları kirlenme önleyici teste tabi tutmuşlardır. Test sonucunda seramik kaplamaya sahip numunenin uçucu kül kirlenmesini önlemede iyi performans gösterdiğini ancak kaplamasız çeliğin ciddi şekilde kirlendiğini tespit etmişlerdir. Termal iletkenlik testi gerçekleştirdiklerinde ise kaplanmış çeliğin yüzeyinin termal iletkenliğinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Seramik kaplama sayesinde kazan borularının enerji verimliliğinin önemli ölçüde iyileştirilebileceğini tespit etmişlerdir. Geliştirilen kompozit kaplamaların etkinliklerini değerlendirmek için gerçek hayattaki bir kazanın dış yüzeylerine spreyci kaplama yöntemi kullanarak uygulamışlardır. Kazanın üç aylık çalışmasını incelemiş ve kazan yüzeylerinin kaplanmış alanlarının çok daha temiz olduğunu gözlemlemişlerdir. Kazanın ısı verimini kompozit seramik kaplamanın uygulanmasından önce ve sonra hesaplamışlar ve kaplama uygulandıktan sonra termal verimliliğin yaklaşık %62,34 arttığını ortaya koymuşlardır. Seramik kaplamanın, genel termal verimi artırmak için gerçek kazan sistemlerinde uygulanma potansiyeline sahip olduğu sonucuna varmışlardır.

Nikula vd. (2016), kazan performansının iyileştirilmesi amacıyla buhar kazanının izlenmesine ve görüntülenmesine odaklanan yeni bir yöntem önererek bu yöntemi iki güç istasyonundan alınan ölçümlerle doğrulamışlardır. Geçmiş verim değerlerine dayanarak beklenen verim değerlerini tahmin edebilen ve mevcut prosesin en yüksek verimde çalışmasını sağlayabilecek bir model geliştirmişlerdir. Beklenen ve gerçek verim arasındaki farkı EWMA (üstel ağırlıklı hareketli ortalama) çizelgesi kullanılarak izlemişler ve istatistiksel olarak zayıf işlem performansını tespit edebilmişlerdir. Bu yöntemle elde edilen bilgilerin verim performansının artırılmasına rehberlik edebileceğini ifade etmişlerdir.

Ostrowski vd. (2020), bir buhar kazanı dairesinde modernizasyon gerçekleştirerek baca gazını çığ noktasının altına soğutmuşlar ve geri kazanılan enerjiyi yanma havasının ısıtılmasında kullanmışlardır. Geliştirilen öneriyi bir gıda endüstrisi fabrikasında uygulayarak kazan dairesinin modernizasyon öncesi ve sonrası enerji verimliliğini hesaplamışlardır. Kazan verimin hesaplanmasında hem doğrudan hem de dolaylı yöntemi kullanılarak iki ayrı hesaplama yöntemi sunmuşlardır. Modernizasyondan sonra enerji kayıplarının %15,33'ten %0,98'a düştüğünü, ekserji veriminin ise %2.27 arttığını tespit etmişlerdir. Modernizasyon sonrası yakıt maliyetlerinde sağlanan tasarrufları da ortaya koyarak ekonomik fayda sağlandığını belirtmişlerdir.

Huang vd. (2017), kazan blöfünden kaynaklanan su kaybını telafi etmek için büyük miktarda taze su gerektiğini ve su arıtımının oldukça enerji yoğun olduğunu belirterek suyun arındırılmasında yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemde Ters Ozmoz (RO) ünitesi ve Termal Membran Distilasyon (TMD) ünitesi birlikte kullanılmaktadır. Bu sistemle toplam taze su talebini ve yakıt tüketimini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Geliştirdikleri bu metodolojiyi kullanarak bir vaka çalışması gerçekleştirmişlerdir. Altı senaryo içeren farklı optimal tasarım konfigürasyonunda veriler sunmuşlar ve yeni sistemin yararlarını geleneksel sistemle karşılaştırarak göstermişlerdir. Çalışmanın gerçekleştirildiği sistemde gerekli olan taze su miktarı 140,6 kg/s iken önerilen yöntem uygulandığında bu miktarın 64,7 kg/s'ye düştüğünü, yakıt tüketiminin ise %1,7 oranında azaldığını ortaya koymuşlardır.

Bujak (2008), buhar kazanı, boru hatları ve buharın kullanıldığı cihazdan oluşan bir buhar sisteminde enerji yönetiminin iyileştirilmesi üzerine çalışma yürütmüştür. Mevcut sistemde kazan, açık bir yoğuşma tankı ile birlikte çalışmakta ve bu nedenle de ikincil buharlaşmadan kaynaklanan enerji kayıpları meydana gelmektedir. Bu kayıpları ortadan kaldırmak için kapalı bir tank sistemi önermiştir. Açık tank ve kapalı tankla çalışma durumunda elde edilen termal performans katsayılarını ve enerji kayıplarını karşılaştırmıştır. Kapalı buhar sisteminin kayıplarının her zaman açık sistemden daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Performans katsayısının önerilen modernizasyonla yaklaşık %8 artırılabilirliğini belirtmiştir. Ayrıca, besleme suyu ve su arıtımında kullanılan kimyasal madde tüketimlerinde %90 oranında azalma sağlandığını vurgulamıştır. Modernizasyon masraflarının geri kazanımının çok hızlı olduğunu ve 1 yıl içinde kendini geri ödeyebileceğini ifade etmiştir.

Azami vd. (2018), bir katı atık enerji kazanının termodinamik analizini kapsamlı bir şekilde gerçekleştirerek; tüm kazan ve bileşenleri üzerinde kütle, enerji ve ekserji denge

denklemleri oluşturmuşlardır. Kazan içindeki tersinmezliğin ana kaynaklarını belirlemek için birinci ve ikinci yasa verimliliklerini hesaplamışlardır. Enerji akış diyagramını oluşturarak kazan temel enerji kayıplarının; baca gazı, dip külü, yüzey ısı kaybı ve blöf kaybindan kaynaklandığını göstermişlerdir. Toplam enerji kaybını %21,3 olarak tespit etmişler, baca gazına bağlı duyulu ve gizli ısı kayıplarının %20,2 oranı ile kazandaki en büyük kayıp olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, blöf oranının %0,5'ten %5,0'e yükselmesiyle kazan enerji veriminin kademeli olarak %77,9'dan %74,5'e düştüğünü tespit etmişlerdir.

Terhan ve Çomaklı (2017), bir bölgesel ısıtma sistemindeki doğalgaz yakıtlı kazanların enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Kazan ve bileşenleri için kütle, enerji ve ekserji denge denklemlerini oluşturarak enerji kayıplarını incelemişlerdir. Enerji ve Grossman ekserji akış diyagramlarında tersinmezliklerin yerlerini belirleyerek göstermişlerdir. Enerji akış diyagramında en yüksek kaybın %16,81 ile baca gazına bağlı duyulur ve gizli ısı kaybindan kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Radyasyon ve konveksiyonla gerçekleşen ısı kaybının ise %1 olduğunu belirterek, kazanın enerji ve ekserji verimini sırasıyla %82,2 ve %32,78 olarak hesaplamışlardır.

Morales vd. (2018), ISO 50001 standardı ile buhar kazanındaki enerji tasarrufu potansiyelinin belirlenmesine yönelik uygulamalı bir araştırmanın sonuçlarını ortaya koymuşlardır. Altı aylık bir süre boyunca buhar kazanının enerji takibini yapmış, tüketim ve enerji üretim kontrol çizelgelerini kullanarak buhar üretim ve gaz tüketim davranışını incelemişlerdir. Ek olarak, enerji verimliliğinde hedef belirlemek, süreçteki verimliliği ve verimsizliği göstermek için 100 baz endeksi hesaplanmışlardır. Çalışmada, verimlilik oranı 100'ün altında gerçekleşen verileri enerji verimsizliğinin zirveleri olarak kabul etmişler ve bunun operasyonel kontrol, bakım yönetimi, üretim planlaması için enerji tasarrufu fırsatları anlamına geldiğini belirtmişlerdir. Enerji göstergelerinin değerlendirmesi sonucunda operasyonel sapmaların ve anormalliklerin daha kolay gözlemlenebileceğini vurgulamışlardır.

Tanasić vd. (2016), endüstriyel bir buhar kazanının enerji verimini artırmak amacıyla pulverize kömür yakma işlemini deneysel olarak incelemişlerdir. Yanma işlemi parametrelerini minimumdan maksimuma kadar olan dört tipik çalışma koşulunda ölçmüşler ve termal sensörlü kamera kullanarak yanma sürecini görüntülemişlerdir. En yüksek verimi nominal kazan yükünde çalışırken %87,85 olarak kaydetmişlerdir. Çalışma sonucunda kazan verimini artırmaya yönelik 5 iyileştirme önerisi geliştirerek bu önerilerle elde edilecek yakıt ve elektrik tasarrufunu, CO₂ emisyonlarındaki azalmayı, para tasarrufunu, yatırım miktarını ve geri ödeme

sürelerini tahmin etmişlerdir. Bu 5 önlem şunlardır: Kazan kontrol sisteminin modernizasyonu ve baca gazındaki O₂ içeriğinin sürekli ölçümü ile yanma sürecinin otomasyonu, sistemde otomatik blöf ve suyun tuzdan arındırılması uygulaması, düşük buhar tüketimi sırasında kazanın tek değirmen ile çalıştırılması, frekans dönüştürücü kullanarak değirmenin elektrik enerjisi tüketimi açısından iyileştirilmesi ve optimizasyonu ve son olarak yanma havası fan sürücüsü için frekans dönüştürücü uygulamasıdır.

Cortes-Rodríguez vd. (2017), Brezilya'nın São Paulo eyaletinde çalışan şeker fabrikası kojenerasyon sistemlerinin bir parçasını oluşturan kazanların gerçek performans testlerinden toplanan verileri kullanarak verim analizi gerçekleştirmişlerdir. Termodinamiğin birinci yasasını kullanarak altı farklı kazandaki enerji kayıplarını belirlemişler ve Sankey diyagramı üzerinde göstermişlerdir. Kazandaki kayıpları hesaplayarak bir kazanının verimliliğindeki etkili kaybın yakıttaki nem kaybı (%17 – 18) olduğunu vurgulamışlardır.

Jamil vd. (2020), baca gazından duyulur ve gizli ısıyı yakalamak amacıyla yeni bir atık ısı geri kazanım sistemi önerisi sunmuşlardır. Önerilen sistem, dolaylı temas yoğunlaştırma ünitesi, mekanik sıkıştırmalı ısı pompası ve iki hava ön ısıtıcısının birleşiminden oluşmaktadır. Bu sistemle baca gazı sıcaklığını 30 °C'ye kadar düşürmüşler ve elde edilen ısıyı; alan ısıtma için sıcak hava sağlanması, dönüş suyu sıcaklığının 50 °C'den 55,21 °C'ye yükselmesi ve kazan besleme havası sıcaklığının 47,61 °C'ye yükselmesi olmak üzere üç şekilde kullanılmışlardır. Dönüş suyu sıcaklığı ve kazan besleme havası sıcaklığının yükselmesiyle kazanın verimliliğinde %10,47 ve ekserji verimliliğinde %4,87 artış kaydettiklerini bildirmişlerdir. Ekonomik açıdan sistemin 5,44 yılda maliyetini geri alabileceği sonucuna varmışlardır.

Zhao vd. (2017), bir doğal gaz kazanından baca gazının atık ısı geri kazanım potansiyelini analiz etmişler ve baca gazının çıkış sıcaklığını 25 °C'nin altına düşürebilecek yeni bir proses geliştirmişlerdir. Bu sistemde yoğunlaşmalı kazan ve ısı pompasını bir arada kullanmışlardır. Geliştirdikleri sistem modelini gerçek sisteme uygulanmışlar ve simülasyon modelinin gerçek sistemi yansıtabildiğini gözlemlemişlerdir. Enerji tüketiminde %10 ile %15 arasında bir düşüş sağlandığını ve sistemin geri ödeme süresinin 3 yıldan daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Chao vd. (2017), egzoz gazı ve giriş havası sıcaklığının kazan ısı verimi üzerindeki etkisini incelemek için yeni bir metodoloji önermişlerdir. Optimize edilmiş 7 farklı şema tasarlayarak her bir kazan sistemi için verimi değerlendirmişlerdir. Termal verimi iyileştirme ve egzoz gazı sıcaklığını düşürme üzerine ayrıntılı bir analiz yapmışlardır. Çalışma sonucunda,

giriş havası sıcaklığı 10-15 °C arttırıldığında, egzoz gazına bağlı ısı kaybının %0,8-1 oranında azaldığını ve kazan sisteminin ısı veriminin %0,8-1 arttığını tespit etmişlerdir. Kazanın ısı veriminin, tabakalı yanma teknolojileri kullanılarak, hava ön ısıtıcıları ve ısı yalıtım önlemleri eklenerek etkin bir şekilde iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

Maddah vd. (2019), gaz rafineri tesisindeki kazanların ısı davranışlarını inceleyerek verimi ve kayıpları hesaplamışlardır. Fazla hava, yakıt nemi, hava nemi, yakıt ve hava sıcaklığı, yanma gazlarının sıcaklığı ve yakıtın ısı değeri gibi çeşitli parametrelerin verimlilik üzerine etkisini analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçları kullanarak Yanıt Yüzey Metoduyla (RSM) kazanların optimizasyonu için analiz gerçekleştirmişler ve bu doğrultuda çeşitli önerilerde bulunmuşlardır. Buhar akış hızı ve çıkış sıcaklığını bağımsız değişkenler, kazan verimini ise bağımlı değişken olarak belirlemişlerdir. Sıcaklık arttıkça önce verimin arttığını sonra azaldığını belirterek, tüm akış hızları için maksimum verim değerinin 196 °C sıcaklıkta elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca debi değişkeni için duyarlılık analizi yapmışlar ve 15,7 kg/s debide maksimum verim elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Vandani vd. (2015), blöf ısı geri kazanımının kazanın enerji ve ekserji verimliliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kazan blöf suyundan ısının geri kazanılması için bir flaş tankı kullanmışlardır. Flaş tankının sistemin enerji verimini %31,68'den %31,91'e çıkarılabileceğini belirtmişlerdir. Ekserji verimliliği açısından ise %0,22'lik bir artış elde edilebileceğini savunmuşlardır. Ayrıca flaş tankı kullanımıyla yılda toplam 25444,47 m³ su tasarrufu sağlanabileceğini tespit etmişlerdir. Tesisin verimliliğini optimize etmek için Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) olmak üzere iki optimizasyon algoritması kullanmışlardır. Optimizasyon sonuçlarını birbirleriyle kıyaslamışlar ve benzer sonuçlar elde ederek çalışmayı doğrulamışlardır.

Bahadori ve Vuthaluru (2010), flaş buhara dönüşen blöf yüzdesini tahmin edebilen kullanımı kolay bir yöntem formüle etmişlerdir. Blöfteki ısının büyük bir kısmının kanalizasyona boşaltılmadan önce, flaş buhar tankından ve ısı değiştiriciden oluşan iki aşamalı sistemden geçirilerek geri kazanılabileceğini belirtmişlerdir. Elde edilen flaş buharın doğrudan proseste veya degazörde kullanımını önermişlerdir. Flaş buhar tankında kalan sıcak suyun ise besi suyunun veya diğer proses buharlarının ısıtılmasında kullanılabileceğini ifade etmişlerdir. Flaş tankı ve ısı eşanjör sisteminden geri kazanılabilen toplam ısı yüzdesini hesaplayarak blöf ısı enerjisinin yaklaşık %73,7 sinin geri kazanılabileceğini tespit etmişlerdir.

Arunkumar vd. (2014), buhar kazanında blöften ısı geri kazanımını araştırmışlardır. Normal bir buhar jeneratöründe, sıcak suyun yaklaşık %4'ünün blöf olarak boşa harcandığını belirterek kayıpları en aza indirmek için bir ısı geri kazanım sistemi tasarlamışlardır. Flaş buhardan ve ısı değiştiriciden geçirilen blöften geri kazanılan ısı miktarını hesaplayarak flaş buhar yoluyla degazöre transfer edilen enerjiyi tespit etmişlerdir.

Sabzpooshani vd. (2019), bir buhar santrali için kazandan gelen blöf suyunun yeniden kullanımına yönelik yeni bir modifikasyon önermiş ve değerlendirmişlerdir. Türbin giriş sıcaklığı, kondenser basıncı ve kazan giriş sıcaklığı gibi farklı parametrelerin ekserji verimi ve ekserji yıkımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tersinmezliğin başlıca nedenlerini belirlemişlerdir. Ayrıca, flaş tank sistemi ve blöfün türbin ve çevrim verimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Eşanjörlerde blöf suyunun eşzamanlı kullanımı ile döngünün simülasyonunu Bulanık Çıkarım Sistemi (FIS) kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Özellikle blöf dikkate alındığında, ısı eşanjörlerinde bir flaş tankı kullanılması durumunda daha fazla ekserji verimi elde edildiği sonucuna varmışlardır.

Sunudas and Prince (2013), Hindistan'da bulunan 10 tekstil firmasında deneysel analiz yapmış ve blöf oranlarını karşılaştırmışlardır. İşletmelerde gerçekleştirdikleri denetimlerde, toplam yakıt tüketiminin yaklaşık %1,3'ünün blöf yoluyla boşa harcandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca fiili blöf kaybının, besleme suyu maliyetini ve bu suyu arıtma maliyetini de içerdiğini belirtmişlerdir. Kazandaki blöfü optimize etmek ve blöften ısı geri kazanımını en üst düzeye çıkarmak suretiyle israfı önlemeyi amaçlamışlardır. 10 firmada da flaş kabı ve ısı değiştirici kullanarak ısı geri kazanım sağlamışlar ve toplam boşa harcanan yakıtın yaklaşık %85'inin geri kazanıldığını belirlemişlerdir. Isı geri kazanımlı ve ısı geri kazanımsız sistemleri karşılaştırdıklarında kazanın veriminin yaklaşık %1 arttığını görmüşlerdir.

Dhanre vd. (2014), termik santrallerde kullanılan kazanlarda enerji denetimi gerçekleştirilmesi üzerine derleme hazırlamışlardır. Enerji denetiminin sanayi sektöründe enerji tasarrufu fırsatlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Bu denetimlerin sorunlara nihai cevabı vermezken enerji tasarrufu potansiyelinin belirlenmesine yardımcı olduklarını ve şirketleri bu alandaki çabalara odaklanmaya teşvik ettiğini ifade etmişlerdir. Genel literatür incelemesinden, enerji denetimi sayesinde enerji tüketimini azaltmanın pek çok yolu olduğu sonucuna varmışlardır. Bu nedenle her fabrikanın yılda bir kez enerji denetimi geçirmeye ihtiyacı olduğunu vurgulamışlardır.

Vakkilainen ve Ahtila (2011), kazan verimini hesaplamak için yakıt alt ısı değerinin kullanıldığı bir yöntem sunmuşlardır. Buhar jeneratörü kabul testleri için kabul edilen EN 12952-15:2003 standardının geri kazanım kazanlarına nasıl uygulanabileceğini incelemişlerdir. Kazan dairesinde kazanı çevreleyen alana giren ve çıkan birçok akış olduğu için radyasyon ve konveksiyon ısı kayıplarının ölçülmesi zor olduğunu belirtmişlerdir. Konveksiyon ve iletimden kaynaklanan enerji kayıplarını hesaplamak için yeni ve daha doğru bir yöntem olarak Tappi fonksiyonunun kullanımını önermişlerdir. Kazandaki başlıca ısı kayıplarını açıklayarak en büyük kaybın, çıkan baca gazı ile kaybedilen ısı olduğunu ifade etmişlerdir.

Gupta vd. (2011), bir selüloz ve kâğıt fabrikasında gerçekleştirilen kazan dairesi verim iyileştirme çalışmalarının bulgularını sunmuşlardır. Düşük kazan verimliliğinin; atıkta yanmamış karbon nedeniyle kayıp, kuru baca gazından kaynaklanan kayıp, yakıttaki nem kaybı, radyasyona bağlı kayıp, blöften kaynaklanan kayıp ve eksik yanma nedeniyle kayıp gibi çeşitli ısı kayıplarından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Firmadaki ısı kayıplarını analiz ederek kazan veriminin artırılmasına yönelik tesis yönetimine uygulamaları için bir dizi tavsiyede bulunmuşlardır. Ekonomik analiz gerçekleştirerek önerilen sisteme yönelik harcamaların kısa sürede geri kazanılacağını ortaya koymuşlardır. Tesis yönetimi tarafından 5 önemli öneri uygulandığını ve bu sayede genel kazan veriminin %2 artarak %80,98'den %82,98'e yükseldiğini tespit etmişlerdir. Eski kazan dairesi ekipmanının yerini hiçbir yeni ekipmanla değiştirmedikleri göz önüne alındığında dikkate değer bir artış elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Charde vd. (2017), Hindistan'da bir termik santralde kullanılan buhar kazanının performansını analiz etmişler ve kayıplara yönelik öneriler sunmuşlardır. Kazanın performansını etkileyen faktörleri ve kazandaki başlıca enerji kayıplarını ayrıntılı olarak açıklamışlardır. Blöfün uygun olmayan şekilde gerçekleştirilmesi halinde önemli bir ısı kaybı kaynağı olacağını vurgulayarak otomatik blöf ekipmanı kullanımını önermişlerdir. Baca sıcaklığının mümkün olduğunca düşük olması için baca gazı analizörü ile kontrol edilmesi ve değişken hız sürücü ve pompa kullanımının tercih edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Operatöre optimum çalışma için kılavuzluk etmek üzere taşınabilir oksijen analizörleri ve hava akım göstergeleri temin edilmesini tavsiye etmişlerdir. Kazanların düzenli bakımı, kazan suyu arıtımı ve enerji tasarruf fırsatlarının kazan verimi açısından önemini ortaya koymuşlardır.

Karataev ve Karataeva (2019), buhar kapasitesi 4 ton/h olan bir buhar kazanında ısıtma yüzeylerinin sıcaklık durumunu belirlemek için termal kamera kullanarak kazanın termal görüntülerini elde etmişlerdir. Görüntüleri incelediklerinde kazanın bazı yerlerinde yüzeydeki

sıcaklığın iki hatta üç katına çıktığını tespit etmişlerdir. Bu doğrultuda kazan ünitesi ayarının doğrudan işlevlerini yerine getirmediği ve bazı kısımlarda ısı yalıtımının eskimiş olduğu sonucuna varmışlardır. Kazan ünitesinin termal kamera ile sürekli izlenmesi sayesinde yalıtımdaki yetersiz termal korumaya sahip alanların zamanında tespit edilebileceğini ve bu kusurların düzeltilmesi sonucunda ısı kayıplarının azalacağını ifade etmişlerdir.

Djayanti (2019), bir ilaç fabrikasında kullanılan 1,5 ton/h kapasiteli bir buhar kazanındaki buhar akışını analiz etmiş ve bu analizlerin sonuçlarına dayanarak birkaç potansiyel enerji tasarrufu önermiştir. Başlıca 3 öneri şunlardır: O₂ bileşimini ve fazla havayı optimize etmek için yanma odasındaki hava kanalının yan tarafına vana/damper yerleştirilmesi, yanma performansını iyileştirmek için bir gaz sensörü analizörü kullanılarak verimin otomatik olarak izlenip ayarlanması ve buhar dağıtım kanalının onarılmasıdır. Kazan verimini %53,67 olarak hesaplamıştır. Verim düşüklüğünün temel sebebinin, fazla hava oranının çok yüksek olmasına bağlı olarak kuru baca gazı kaybının %42,03 olmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Çözüm olarak fazla havayı kontrolü altına almak için yanma odasına giren havanın düzenlenmesi gerektiğini ve bu sayede %15 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceğini ifade etmiştir.

YEGM (2017), endüstriyel buhar sistemi optimizasyonuna yönelik kılavuz hazırlanmışlardır. Bu kılavuzu, kullanıcılara ve enerji danışmanlarına buhar sistemlerinin nasıl değerlendirildiğini ve optimize edildiğini öğretmek üzere tasarlamışlardır. Çalışmada; buhar üretimini, buhar dağıtımını, buhar son kullanım yerlerini, kondens geri kazanımını ayrıntılı olarak açıklamışlar ve buhar sisteminin optimizasyonu için performans iyileştirme fırsatlarını tanımlanmışlardır. Endüstriyel buhar sistemlerinin modellenmesi için kullanılabilecek yazılım araçlarını kitapta tanıtmışlardır.

İbrahim vd. (2020), kazan suyundaki çözünmüş katıların konsantrasyonlarını ölçerek yüzey blöf sürecini kontrol eden yeni bir elektronik devreli otomatik kontrol sistemi önermişlerdir. Bu sayede blöf miktarını 2245 kg/h'ten 1111 kg/h'ye düşürmüşlerdir. Bunun yanı sıra, yüzey blöf atık ısısının geri kazanılması için kabuk ve sarmal boru tipi bir ısı eşanjörü tasarlamış ve üretmişlerdir. Bu iki sistemi birlikte uyguladıklarında blöf suyuyla boşa harcanan enerjinin %83,15'inin geri kazanılmasına katkıda bulunmuşlardır. Bu sistemin dolaylı kayıpları azalttığını ve aynı zamanda kazan sisteminin verimliliğini artırdığını belirtmişlerdir.

Ranaraja vd. (2020), kazandaki baca gazı kayıpları, besleme suyu kayıpları, radyasyon kayıpları ve blöf kayıpları gibi enerji kayıplarını ele almışlardır. Bu kayıpları en aza indirmek,

endüstriyel kazan işlemlerini optimize etmek ve kazan enerji verimliliğini artırmak için bazı yöntemler sunmuşlardır. Kazan yakma sistemi yönetimi, besleme suyu ön arıtması, kazan yalıtımı, blöften ısı geri kazanımı, havanın ve yakıtın ön ısıtılması, kondens suyunun geri döndürülmesi ve ekonomizör kullanımına yönelik tavsiyelerde bulunmuşlardır. Verim artışının enerji verimliliği, kaynak tasarrufu, maliyet tasarrufu ve kirlilik kontrolü açısından muazzam bir pozitif kazanca yol açtığını belirtmişlerdir.

Saha vd. (2021), buhar sistemi performansının değerlendirilmesi üzerine gerçekleştirdikleri araştırmalarında toplam 15 hazır giyim fabrikasını incelemişlerdir. Buhar üretim ve dağıtımında süreçlerinde meydana gelen çeşitli ısı kayıplarının miktarını hesaplamışlardır. İnceledikleri 15 fabrikada kullanılan buhar üretim ünitelerinin ortalama verimliliğini %76 olarak bulmuşlardır. Buhar sistemi yönetimindeki güncel uygulamaları araştırmış ve iyileştirme fırsatlarını ele almışlardır. Son olarak, buhar üretim ünitesinin proses parametrelerini termodinamik olarak optimize etmek için Genetik Algoritma yaklaşımını kullanmışlardır. Termodinamik proses parametrelerini optimize ederek enerji verimliliğini neredeyse %3 oranında artırmanın mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

Kadric vd. (2021), buhar üretimi ile ilgili enerji tasarruf potansiyellerini araştırmışlardır. Ayrıntılı olarak analiz ettikleri 4 enerji tasarruf alanı şunlardır: mevcut buhar kazanının yoğuşmalı kazanla değiştirilmesi, buhar ve kondens geri kazanım dağıtım hatlarında yalıtımın yenilenmesi, kondens dönüş hattına ısı geri kazanım sisteminin kurulması, eski düşük verimli buhar kazanının daha yüksek verimli olan buhar kazanı ile değiştirilmesi. Önerilen tüm tedbirlerin uygulanması durumunda enerji maliyetlerinin önemli ölçüde azalacağını belirtmiş ve yatırımın kendini 4 yıldan kısa bir sürede amorti edebileceğini ortaya koymuşlardır.

Abdi vd. (2021), çalışmalarında olası kayıpları ve enerji tasarruf fırsatlarını belirlemek için iki farklı buhar kazanının performansını değerlendirmişlerdir. Kazanların baca gazı kaybını, eksik yanmaya bağlı kaybı, radyasyona ve konveksiyona bağlı ısı kaybını hesaplamışlar ve bu kayıpları Sankey diyagramı üzerinde göstermişlerdir. Kazanların ısı performansını dolaylı yöntem kullanılarak analiz etmişler ve elde edilen kazan verimlerini sırasıyla %81 ve %80 olarak bulmuşlardır. Enerji tasarrufu fırsatı olarak egzoz baca gazından ısı geri kazanımı yapılmasını ve oksijen analizörü kullanarak fazla havanın kontrol edilmesini önermişlerdir. Çalışma sonucunda önerilen yatırımların geri ödeme sürelerini ortaya koymuşlardır.

Gök (2019), kazanlarda bacadan kaynaklı kayıpları azaltmak için ekonomizör, O₂ Trim kontrol vb. çeşitli uygulamalar bulunduğunu ancak bacadan çekiş fazlalığı nedeniyle meydana gelen kaybı önlemenin tek yolunun çekiş düzenleyici veya diğer adıyla sekonder klape kullanmak olduğunu ifade etmiştir. Çekiş düzenleyicinin aynı zamanda ek havanın baca gazına girmesini sağlayarak baca gazının hızını artırıp çığ noktasını düşürdüğünü ve brülör çalışmadığı zamanlarda bacayı havalandırarak bacadaki ıslaklığı kurutmak amacıyla da kullanılabileceğini belirtmiştir. Sekonder klape kullanımı sonrasında sağlanacak tasarrufla klape yatırımının kendini 0,15 yılda geri ödeyebileceğini hesaplamıştır.

2.2. Buhar Kazanı Sistemlerinde FMEA Uygulamaları

Kazanlarda FMEA tekniği kullanılarak yapılan çalışmalar araştırılmış ve bu çalışmalardan bazıları aşağıda özet olarak verilmiştir.

Kumar vd. (2014), FMEA metodunu kazanlardaki su tüplerine uygulamışlardır. Tesiste sürekli enerji üretimini sağlamak amacıyla arıza ve spesifik güç tüketimini azaltmaya çalışmışlardır. Kazanda birçok kritik arıza modu olduğunu tespit ederek özellikle su tüplerinde meydana gelen arızalara odaklanmışlardır. Bu doğrultuda son üç yılda, su tüplerinde oluşan arıza türlerini ve sayılarını ortaya koymuşlardır. Bu arızaların nedenlerini tespit ederek risk öncelik katsayısını hesaplamışlardır. Daha sonra önerilen iyileştirmelerle risk katsayısının 315'ten 216'ya düştüğünü belirtmişlerdir.

Mashal (2015), bir soğutma tesisinde ısı geri kazanım buhar jeneratörleri üzerinde FMEA gerçekleştirmiştir. Evaporatör tüpleri, ekonomizör tüpleri, kazan besleme suyu pompası ve buhar tamburu gibi alt ekipmanlar üzerine odaklanarak her bir alt sistem/bileşenle ilişkili arızaları tanımlamıştır. Arızaları gidermek için gerekli iyileştirici yöntemlerini tespit ederek FMEA tablosu hazırlamıştır. Risk Öncelik Numarası (RÖS) kullanarak buhar jeneratöründe kritik ekipmanın evaporatör tüpü olduğu sonucuna varmıştır. Önerilen FMEA metodolojisinin buhar jeneratörü hataları ve güvenilirliğinin analiz edilmesine yardımcı olabileceğini belirtmiştir.

Ahmed ve Gu (2020), bir deniz kazanındaki potansiyel arıza modlarını ve sistemin operasyonel zorluklarını hata modu etkileri ve kritiklik analizi (FMECA) kullanarak incelemişlerdir. Kazanın çalışması sırasında yaşanabilecek en kötü durum senaryolarını tespit etmek amacıyla geçmiş kaza verilerini ve raporlarını inceleyerek olası arıza modlarını belirlemişlerdir. Patlama, yangın, kesinti ve ciddi operasyonel aksama sorunlarına neden olan

13 önemli deniz kazasına odaklanmışlardır. Risklerin sayısallaştırılması ve önceliklendirilmesi için bulanık mantık sistemi yaklaşımı geliştirmiş, modellemiş ve test etmişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçların, potansiyel arızaların ortadan kaldırılmasına yardımcı olarak gemi emniyetine ve sistem güvenilirliğine katkıda bulunabileceğini belirtmişlerdir.

Putra and Purba (2018), bir buhar santrali kazanında sıklıkla meydana gelen arızaları FMEA yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Kazan arızalarının nedenlerini bulmak için neden sonuç diyagramı oluşturmuşlar ve ardından bu arızaların risk öncelik sayılarını hesaplamışlardır. Bu riskleri ve etkilerini azaltmak için birtakım öneriler sunmuşlardır. FMEA tekniğinin genel olarak başarısızlığın nedenlerini analiz etmeye yardımcı olduğunu ve bu nedenle servis sağlayıcıların ekipmanı her zaman yapılandırılmış bir şekilde koruyabilmesinin önünü açacağını belirtmişlerdir.

Mariajayaprakash and Senthilvelan (2013), bir şeker fabrikasında kullanılan kojenerasyon kazanında sıklıkla meydana gelen arızaları tespit etmişlerdir. Şeker fabrikalarındaki plansız kazan kesintilerinin, üretim kaybıyla sonuçlanan büyük bir sorun olduğunu; kazanların mekanik arıza, elektrik arızası ve sıcaklık sensör arızası gibi birkaç nedenden dolayı arızalanabildiğini belirtmişlerdir. Ishikawa diyagramı, FMEA tekniği ve Taguchi yöntemi olmak üzere üç önemli araç kullanmışlardır. Ishikawa diyagramını kazanın arızalanmasına yol açan parametrelerin ortaya çıkarılmasında kullanmışlardır. Ardından, FMEA kullanarak kazan arızalarına neden olabilecek en önemli parametreler belirlemiş ve son olarak, Taguchi yöntemi kullanarak parametreleri optimize etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda ise arızaları en aza indirecek çözüm önerileri sunmuşlardır.

Afey (2010), bir buhar tesisinde bulunan kazanda güvenilirlik merkezli bakım metodolojisinin uygulaması üzerine araştırma gerçekleştirmiştir. Bu amaçla öncelikle kazan ekipmanlarında oluşabilecek arızaları, bunların kök nedenlerini ve etkilerini FMEA kullanarak tanımlamış ve kritiklik analizi gerçekleştirmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda kestirimci bakım planı hazırlamıştır. Çalışma sonucunda ise geliştirilen bakım planlaması sayesinde işçilik maliyetinin yaklaşık %25,8 düştüğünü ifade etmiştir.

Igboanugo vd. (2013), bir yağ fabrikasındaki kazan sisteminin kritik bileşenleri üzerine FMEA gerçekleştirmişlerdir. FMEA ile sistemin başarısız olabileceği çeşitli yolları ve arızaların kazan sistemi performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. FMEA analizine göre oluşma olasılığı çok yüksek olan bileşenlerin sistem güvenilirliğinde bozulmanın potansiyel kaynakları olduğunu ve bu nedenle özel dikkat gerektirdiğini belirtmişlerdir. En çok dikkat

edilmesi gereken bölgeleri kritiklik matrisiyle göstermişlerdir. Kritiklik matrisi sonuçlarının FMEA'nın bulgularını doğruladığını belirtmişlerdir.

Literatürde sunulan çok yararlı çalışmalara rağmen, ele alınması gereken boşluklar vardır. Öne çıkanlar aşağıda belirtilmiştir:

- Literatürden görüldüğü üzere kazanlarda yürütülen FMEA çalışmaları kazan ekipmanlarındaki güvenlik ve operasyonel riskleri analiz etmeye ve azaltmaya yöneliktir. Kazanlardaki enerji kaybını azaltmaya yönelik yapılan FMEA çalışmasına rastlanmamıştır.
- Kazanlarda enerji performansının sürekli iyileştirilmesi için sistematik bir yaklaşım bulunmamaktadır.
- Kalite iyileştirme araçlarının enerji yönetiminde kullanılmasıyla ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Literatür çalışması neticesinde; sanayide faaliyet gösteren bir firmada gerçekleştirilecek çalışmalarla, ürün başına tüketilen enerjiyi azaltacak, kayıpların önüne geçerek faturaları aşağıya çekecek, firmalara çevreye daha duyarlı üretim yapma imkânı verecek enerji iyileştirme uygulamaları üzerine doktora tez çalışması yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Süreç İyileştirme Teknikleri

Süreç iyileştirme teknikleri; problemleri net bir şekilde ortaya koymak, çözüme yönelik veri üretimini kolaylaştırmak ve problemleri sistematik biçimde incelemek amacıyla tasarlanmışlardır. Bu teknikler grafiksel ve görsel nitelikleriyle problemlerin daha kolay anlaşılıp yorumlanmasını sağlarlar. Problemin temel kaynağına inerek; problemin nedenlerini, toplam içerisindeki paylarını, ortaya çıkma olasılıklarını ve en uygun çözümü belirlemeyi temel alırlar. Bu teknikler doğru ve yerinde kullanıldığında problemin çözümünü kolaylaştırır. Ürün üretiminin tasarım, yeni ürün geliştirme, imalat, paketleme, sevkiyat vb. hemen hemen her aşamasında bu tekniklerin bilinçli ve düzenli bir şekilde uygulanmasıyla gerçekleştirilen çok sayıda “iyileştirme” projesiyle kuruluşlar sürekli gelişmeyi başarmış olur. Süreç geliştirmede kullanılan birçok araç ve teknik vardır. Bu tekniklerden bazıları aşağıda verilmiştir (Kocabaş ve Savaş, 2019a: 356).

3.1.1. Beyin Fırtınası

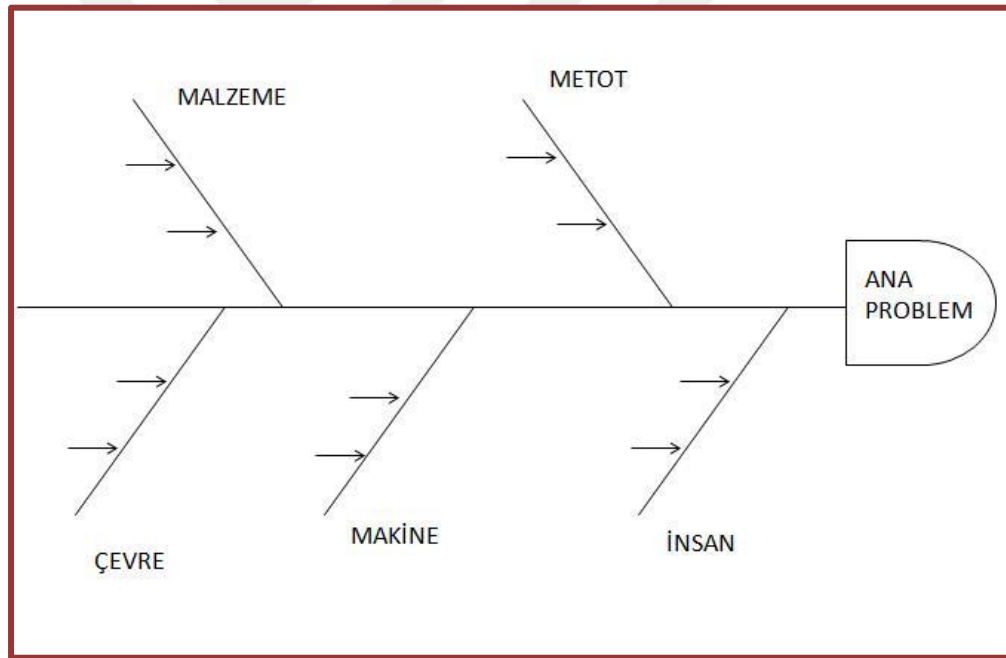
Beyin fırtınası; problemler, problemlerin nedenleri, çözüm ve uygulama önerileri ve problemlerin çözümünde karşılaşılabilecek engeller gibi konularda bir fikir listesi elde etmek amacıyla yapılır. Bu teknik çalışanların katılımını teşvik eder ve yaratıcılıklarının artmasını sağlar. Bu yöntemde temel amaç çok sayıda fikir üretmektir (Kocabaş ve Savaş, 2019a: 356; Dumantepe, 2017: 20). Bu teknik uygulanırken katılımcıların önerdikleri fikirlerin eleştirilmemesi, sınırsız düşünebilmenin özendirilerek birbirlerinin fikirlerinden esinlenebilmeleri için gerekli ortamın sağlanması gerekmektedir (Söyü Eren, 2017: 29). Katılımcılardan sinerji oluşturacak yeni fikirler üretmesi beklenmektedir (Sevinç, 2014: 120).

3.1.2. Akış Diyagramı

Akış diyagramı herhangi bir ürün ya da hizmet üretim sürecindeki hataları, tekrarları veya yarar sağlamayan işlem adımlarını tespit etmek için kullanılmaktadır. Bu teknikte sürecin gerçek ve ideal akışları karşılaştırılır. Akış diyagramı sürecin tüm basamaklarını gösteren resimsel bir tanıtım aracı niteliği taşımaktadır. Akış diyagramları kullanılarak daha önce gözden kaçan ve sorunun kaynağı olabilecek adımlar bulunabilmektedir (Dumantepe, 2017: 20). Bu nedenle bir sürecin kontrol altına alınmasında ve iyileştirme fırsatlarının belirlenmesinde öncelikli olarak sürecin akışının bilinmesi gerekmektedir (Dumantepe, 2017: 18).

3.1.3. Sebep Sonuç Diyagramı

Kalite iyileştirmede sıklıkla kullanılan yöntemlerden bir tanesi de Sebep Sonuç diyagramıdır. Bir balığın omurgasını andırdığı için "Balık Kılçığı Diyagramı" da denilmektedir. Bir probleme neden olan veya problemin oluşumunu etkileyen sebep ve faktörleri tespit etmek amacıyla oluşturulur. Problemlere çok daha geniş bir çerçeveden bakabilme olanağı sunar. Problemin teşhisini ve süreci iyileştirmeyi kolaylaştırır. Bu yöntemi uygularken problemi gösteren bir ok (ana kılçık) çizilir. Bu kılçığın üzerinde problemin olası temel sebepleri gösterilir. Süreçlerde en çok kullanılan temel sebepler, 4M+1E olarak adlandırılan beş grupta toplanmaktadır. Bunlar; makine (Machine), insan (Man), yöntem (Method), malzeme (Material) ve çevre (Environment) dir. Bu temel sebeplere bazen yönetim (Management), bakım (Maintenance) ve para (Money) da eklenebilir (Oskaloğlu, 2019: 43). Temel sebeplerin bulunduğu kılçıkların alt kılçıklarına ise varsa alt sebepler yazılır. Sebep- sonuç diyagramında ana ve alt sebeplerin kılçıklar üzerinde gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sebep- Sonuç diyagramı

Kaynak: (Wikiwand, 2021)

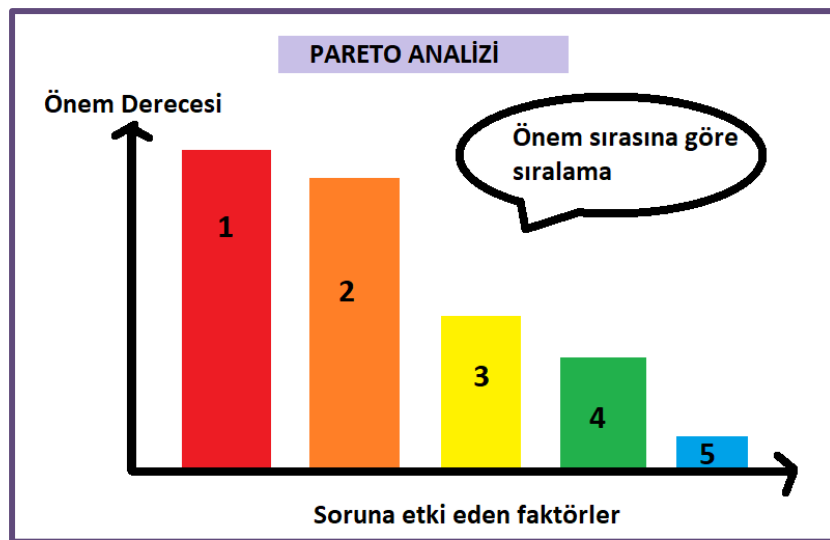
3.1.4. Çetele Diyagramı

Herhangi bir konuda muayene, kontrol ve test verilerinin kaydedildiği forma “kontrol tablosu” veya “çetele tablosu” adı verilir. Ölçülen veriler çetele tablosuna işlenir. Bir gözlemi, eylemi veya gerçekleşmeyi yansıtmak için bir “√” veya “/” işareti koymak yeterlidir. Bir ürünlerdeki kusurların yerlerini gösteren bir çizim de çetele olarak kullanılabilir. Çetele tabloları;

verilerin doğru olarak toplanmasını, özetinin ve analizinin sağlıklı olarak yapılmasını sağlar (Kocabaş ve Savaş, 2019a: 357; Dumantepe, 2017: 21). Çetele diyagramı üretim süreçlerinde hataların yoğunlaştığı bölgeler ve hataların ne sıklıkla oluştuğu hakkında objektif bilgiler toplayan, toplanan bilgilerin kullanımını kolaylaştırmak için onları belirli bir formatta düzenleyen süreç iyileştirme tekniğidir. Kontrol tabloları ile toplanan bu bilgiler sayesinde iyileştirme çabalarına ilişkin önemli bilgiler sağlanarak iyileştirme sürecinde nereye odaklanılması gerektiği kolaylıkla bulunabilmektedir. Aynı zamanda istenen bilgilerin farklı kişiler tarafından benzer yollarla toplanmasına da olanak sunmaktadır (Oskaloğlu, 2019: 50).

3.1.5. Pareto Analizi

Pareto diyagramı, süreç iyileştirme çalışmalarında en çok kullanılan tekniklerden birisidir. Pareto analizi bir problemi oluşturan nedenleri önem derecesine göre sıralayarak, önemlileri önemsizlerden ayırt etmeye ve dikkatleri önemli nedenler üzerinde toplamaya yarar (Dumantepe, 2017: 22). Pareto analizinin temelini İtalyan ekonomist Pareto'nun geliştirdiği 80/20 kuralı oluşturur. Bu kurala göre bir problemin %80'lik kısmına %20'lik kısım neden olmakta ve problemin çözümü için bu önemli %20'lik payın üzerinde yoğunlaşılması gerekmektedir (Kocabaş ve Savaş, 2019a: 357). Pareto analizi aslında bir sistem veya süreçteki faktörleri; etki derecesine, önem sırasına ya da tekrar sayısına bağlı olarak azalan sırayla sunan bir sütun grafiğidir. Olayların sıklık sırasına göre sıralanması, hangi sorunun daha önce ele alınması gerektiği hususunda çalışmaya yön vermektedir (Söyü Eren, 2017: 26). Pareto diyagramı örneği Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Pareto diyagramı örneği

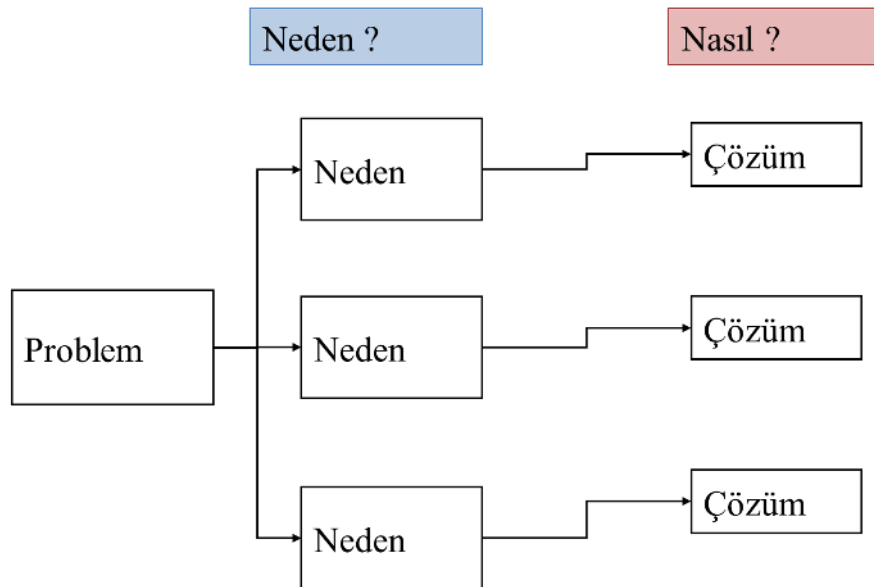
Kaynak: (ÇVD, 2009: 15)

3.1.6. Kuvvet Alan

Bir sorunun çözümünü destekleyen veya engelleyen etkenlerin ortaya çıkarılması için kullanılan bir tekniktir. Bu tekniğin uygulanmasında da beyin fırtınası yöntemi kullanılır. Sorunun çözümüne destek veren itici etkenler bir tarafta sıralanırken çözümü zorlaştırıcı sorunun çözüme kavuşmasını engellediği düşünülen etkenler diğer tarafta sıralanır (Sevinç, 2014: 122). Çözüm sürecinde itici kuvvetler güçlendirilir, kötüye iten kuvvetler ise zayıflatılır veya ortadan kaldırılır (Kocabaş ve Savaş, 2019a: 357).

3.1.7. Ağaç Diyagramı

Bir problemin nedenlerini veya çözüm yollarını ya da her ikisini birden ayrıntılı biçimde tespit etmeye yarayan kalite geliştirme araçlarından biridir. Bu yöntemde problemi ve çözümü oluşturan etmenler, ağaç dallarına benzer şekilde gösterilerek sistematik biçimde sıralanmaktadır (Kocabaş ve Savaş, 2019c: 196). Genel amaçların özel uygulama detayına indirgenmesi gerektiğinde, bütün uygulama seçeneklerinin belirlenmesi gerektiğinde, temel sebepleri belirlemek için sebep-sonuç diyagramına alternatif olarak, bir uygulama gerçekleşirken olabilecek engeller/aksaklıkların ve bunların etkilerini azaltmak için ne yapılabileceğinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilir. Ağaç diyagramı örneği Şekil 3.3'te verilmiştir.

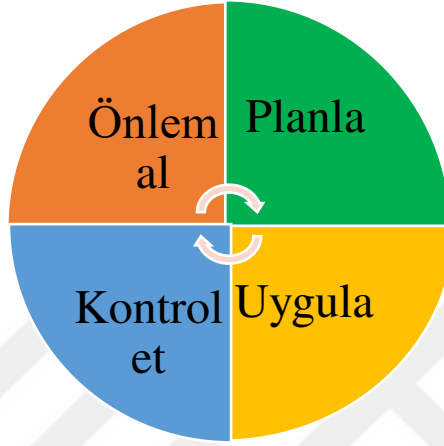


Şekil 3.3. Ağaç diyagramı

Kaynak: (Kocabaş ve Savaş, 2021: 4)

3.1.8. PUKÖ Döngüsü

Süreç iyileştirme alanında kullanılan tekniklerden biri de PUKÖ Döngüsüdür. PUKÖ; Planla, Uygula, Kontrol et, Önlem al adımlarından oluşan bir tekniktir. Bu döngü sayesinde yöntem sistematik hale gelmekte ve sürekli iyileştirme ile kayıpların sıfırlanması hedeflenmektedir (Oskaloğlu, 2019: 98; Kocabaş ve Savaş, 2019a: 358). PUKÖ döngüsü örneği Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. PUKÖ Döngüsü

Kaynak: (İdealkoç, 2021)

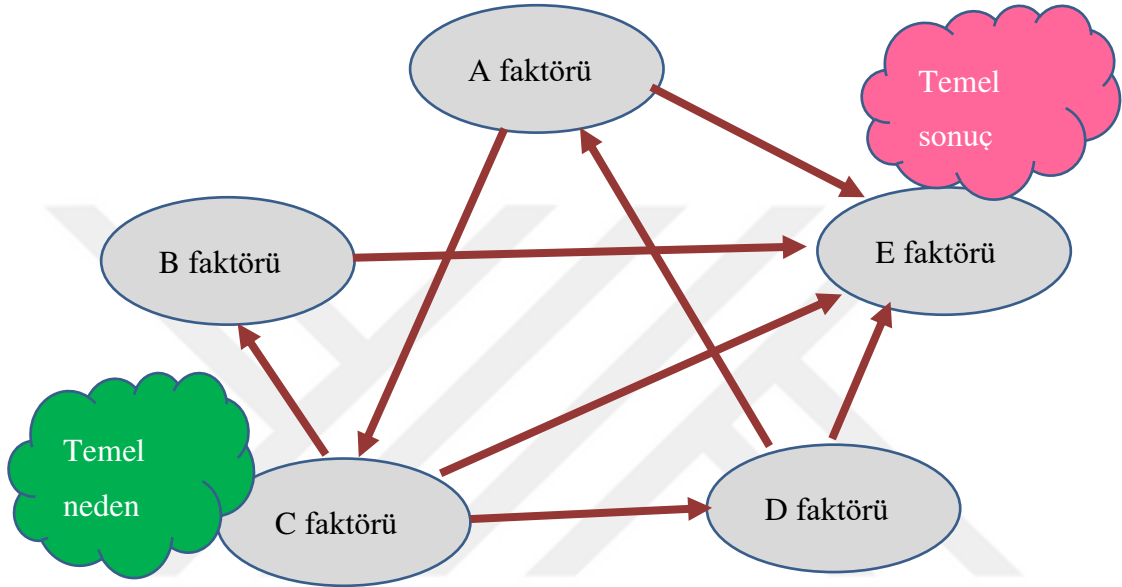
3.1.9. Gruplandırma (Tabakalandırma)

Gruplandırma veya diğer adıyla gruplandırma yöntemi belirli kategori ve özelliklere göre bilgilerin sınıflandırılmasına dayanmaktadır. Gruplandırma bir sorunun parçalara ayrılıp tek tek incelenmesi olarak tanımlanmaktadır. Gruplandırma problemlerin kaynaklarının ve varyasyonların nedenlerinin belirlenmesinde kullanılan faydalı bir araçtır (Dumantepe, 2017: 23).

3.1.10. İlişki Diyagramı

İlişki diyagramı; birkaç fikir arasındaki sebep ve sonuç bağlarının grafiksel gösterimidir. Karmaşık bir yapıya sahip problem veya durumu oluşturan iç içe geçmiş nedensel faktörlerin belirlenmesi ve bu faktörler arasındaki mantıksal ilişkilerin ortaya çıkarılması sağlar. İlişki diyagramının kullanılması problemin tamamına geniş bir perspektiften bakılmasına olanak sunmaktadır. Bu yöntem, problemin büyük oranda çözülmesini sağlayan sebep-sonuç ilişkilerini veya nedensel faktörler ile problem kaynakları arasındaki ilişkileri açıkça ortaya koyabilmektedir (Anagün ve Soy, 1999: 441). İlişki diyagramında, dikkate alınan etkenler veya sorunun kaynakları dikdörtgen veya elips şekilleriyle gösterilir. Etkenleri tanımlarken seçilen

sözcüklerin kısa, net ve herkesçe kolay anlaşılabilir olmasına dikkat edilir. Etkenler arasındaki geçişler, neden-sonuç ilişkilerini belirtecek şekilde oklarla ifade edilir. Ok, nedenden sonuca doğru çizilir ve okun ucu sonucu gösterir (Anagün, 1999: 442). Daha sonra diyagram analiz edilir. Her fikre ait giriş ve çıkış okları sayılır. En fazla oka sahip fikirler ana fikirlerdir. Kendisinden en fazla ok çıkan fikir problemin temel sebebi, kendisine gelen ok sayısı en fazla olan fikir ise temel sonucu göstermektedir (Savaş ve Kocabaş, 2019: 6). İlişki diyagramı örneği Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. İlişki diyagramı örneği

3.1.11. Tek Nokta Dersi (One- Point Lesson)

Sürekli iyileştirme tekniklerinden bir tanesi de tek nokta dersi. Tek nokta dersi; tek sayfada, 5-10 dakikalık zaman içerisinde, tek bir etkili fikri aktarmak için kullanılır. Etkili bir tek nokta dersi görsel olmalı; resim, grafik ve çizimlerle desteklenmelidir. Açıklamalar kısa ve hedef odaklı olmalı, uzun ifadelerden kaçınılmalıdır (Kocabaş ve Savaş, 2019b: 441).

3.1.12. 8D Yöntemi

Tüm hata önleyici tedbirler alınmasına rağmen hatalı bir ürün üretildiğinde, hatanın giderilmesi ve tekrarının önlenmesi amacıyla çalışma yapılması zorunludur. Bunun için 8D adı verilen bir rapor hazırlanabilir. 8D yöntemi farklı disiplinleri içeren 8 adımdan oluşmaktadır. Bu yöntemde farklı birimlerden oluşan takım kurularak hatanın oluşmasına neden olan sorunlar tespit edilerek çözümler aranır. Analizlerde kök nedene inecek şekilde çeşitli bilgiler toplanmaya çalışılır (Türkan ve Görener, 2017: 27).

3.1.13. Poka- Yoke Yöntemi

Poka; dalgınlık, görülmeyen hata gibi anlamlara gelirken Yoke ise; önlemek, azaltmak anlamı taşımaktadır. Bu yöntem insan hatalarından kaynaklanan problemlerin süreçten elimine edilmesi, uzaklaştırılması için tasarlanmıştır. Özellikle el ile yapılan işlerde insanlar hata yapmaya eğilimlidir ve ortaya çıkan hatalarda kişiler suçlanabilmektedir. Poka-Yoke anlayışında problemin temel sebebi kişiler değildir. Hataların ortaya çıkmasına neden olan durum analiz edilir ve hemen kaynağında önlenmeye çalışılır (Türkan ve Görener, 2017: 26). Bu yaklaşımın temeli, hataları önlemek veya hatalı ürünün bir sonraki aşamaya geçmediğinden emin olmaktır. Poka-Yoke, üretim ekipmanlarının hata oluşturmalarını engel olan veya oluştuktan sonra hataların tespit edilmesini sağlayan bir araçtır (Söyü Eren, 2017: 16).

3.1.14. FMEA

FMEA (HTEA- Hata Türü ve Etkileri Analizi), üretim hatalarının azaltılması yoluyla üretim kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla da kullanılabilen hata önleyici bir araçtır. Veri elde etmenin zor olduğu durumlarda ekip tecrübesini işin içine katan bu yöntem, mevcut sistemin iyileştirilmesi için de kullanılabilmektedir (Karaçizmeli ve Kaya, 2018: 252). Bu yöntemde tüm hataların risk öncelik katsayıları hesaplanır ve daha sonra risk öncelik katsayısı en yüksek olan potansiyel hatadan başlayarak tüm riskler için alınması gerekli önlemler belirlenir. Alınan önlemlerin uygulanmasından sonra ise risk öncelik katsayıları tekrar hesaplanarak sağlanan gelişme ortaya konur. FMEA örneği Tablo 3.1’de verilmiştir (Eren ve Pamuk, 2020: 1539).

Tablo 3.1. FMEA örneği

FMEA (HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ) FORMU														
Üretilen ürün:				FMEA sorumluları:				FMEA No:						
Başlangıç tarihi:				Proses sorumlusu:				Sayfa No:						
Öngörülen bitiş tarihi:				Hazırlayan:				Revizyon tarihi:						
Proses	Hata Türü	Hatanın Etkileri	Hatanın Sebepleri	Mevcut Kontroller	Mevcut Durum				Önerilen Faaliyetler	Sorumlu ve Termin Tarihi	Sonuç			
					Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	Risk Öncelik Sayısı			Olasılık	Şiddet	Saptanabilirlik	Risk Öncelik Sayısı

3.1.15. Kaizen

Japoncada kai değişimi zen de iyiye ifade eder (Oslakoğlu, 2019: 85; Kocabaş ve Savaş, 2019b: 440). Japon veya genel olarak uzakdoğu felsefesine göre, hiçbir şey mükemmel değildir ve her şeyi daha ileriye götürmek mümkündür. Mükemmele erişme yolunda durmak kabul edilmez, sürekli olarak daha iyiye arama çabası vardır. Japon şirketleri, “Kaizen” adını verdikleri “iyileştirme” anlamına gelen stratejileri ile şirketin herhangi bir biriminde herhangi bir gelişmenin olmadığı tek bir gün dahi geirmemeyi ilke edinmişlerdir. Kaizenin amacı; proseslerde kk değişiklik ve iyileştirmelerle, sonucun iyileştirilmesini sağlamaktır. İşletmelerde genellikle önce- Sonra kaizen ve Kobetsu kaizen olmak üzere iki çeşit kaizen uygulanmaktadır. İyileştirme çalışmalarının en kk yapı taşı olan önce-Sonra kaizenleri, her alanda ve birçok kişi tarafından uygulanabilecek en temel iyileştirme tekniğidir. Çoğunlukla alışanların veya danışmanların nerileri ile gelen, sonuçlanması kısa süren iyileştirmeleri ifade etmektedir. ncesini ve çözümlerin uygulanması sonrasındaki kazanımları karşılaştırmalı olarak gösterirler. Kobetsu kaizen ise odaklanmış kaizen olarak da adlandırılmaktadır. Kobetsu kaizende esas önemli nokta, ekip çalışması ile işçilik, enerji kullanımı, teçhizat, envanterlere yönelik israfların ve firelerin azaltılmasıdır (Oskaloğlu, 2019: 97-98).

3.1.16. 5S Yöntemi

“5S” kelimesi görsel çalışma alanını korumak için kullanılan 5 adımı temsil eder. Bu adımlar sırasıyla: sınıflandırma, düzenleme, temizlik, standartlaştırma ve disiplindir. Genel olarak 5S; gereksiz olan her şeyin azaltılıp uzaklaştırılmasına, çalışma alanının düzenlenmesine, malzeme ve ekipmanlara ulaşmada yaşanılan aksaklıların en aza indirilmesine dayanan bir felsefedir. Bu felsefe etkin bir çalışma ortamının oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (Oskaloğlu, 2019: 101).

Yukarıda belirtilen yöntemler gibi daha birçok süreç iyileştirme yöntemi bulunmaktadır. İstenen verimliliğin sağlanması için her işletmenin kendi süreçlerine uygun olan iyileştirme yöntemini seçmesi gerekmektedir. Genel olarak; beyin fırtınası ile işletmelerin problemleri belirlenmekte ve balık kılçığı ile bu problemlerin nedenlerinin saptanabilmektedir. Problemlerin en önemli nedenini tespit etmek için ise Pareto analizlerinden yararlanılmaktadır. Akış diyagramından yararlanılarak süreçlerdeki eksiklikler görülerek giderilmektedir. İş süreçlerinin gözlemlenmesiyle olası hataların belirlenmesi, hataların nedenleri ve iş sürecine etkilerinin saptanmasında FMEA yöntemi kullanılarak iyileştirmeler sağlanabilmektedir (Deste ve Berber, 2018: 215)

3.2. Enerji FMEA

FMEA; ürün, sistem ve proseslerde meydana gelebilecek hataları önceden tahmin ederek önlemimizi sağlayan sistematik bir tekniktir. Hata modlarını tanımlama sürecini kolaylaştırmak için özellikle karmaşık sistemlere uygulanan modern teknolojilerden biridir (Putra ve Purba, 2018: 2). Olası hata modlarını, bunların nedenlerini ve etkilerini belirlemek için sistematik bir prosedür niteliği taşımaktadır (Mariajayaprakash ve Senthilvelan, 2013: 19). FMEA tekniği, güncel durum ve gelişmeleri sürekli takip eden bir iyileştirme mekanizması sunmaktadır. Çünkü FMEA’da ele alınan kavramlarla ilgili parametreler değiştiğinde ya da güncellendiğinde yapılan analizler de revize edilmektedir (Sönmez ve Ünğan, 2016: 219).

FMEA ilk olarak Amerikan ordusu tarafından sistemsal ve donanımsal hataların tespit edilmesi ve bu hataların oluşmadan önlenmesi amacıyla geliştirilmiştir. FMEA daha sonra 1960-1965 döneminde NASA’nın ay seyahati programlarında uygulanmıştır. 1970-1975 yıllarında ABD uçak endüstrisinde, 1972’de Ford Motor bünyesinde, 1975’te bilgisayarın üretilmesi aşmasında ve Japonya’da NEC firması bünyesinde endüstriyel uygulamalarda kullanılmıştır. Daha sonra 1998’de Amerika’da faaliyet gösteren önemli üç otomotiv şirketinde; Chrysler, Ford ve General Motors bünyesinde genel standart olarak kabul edilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır (Demiral, 2019:66). Günümüzde ise; ISO/TS 16949, ISO 9001 ve diğer yönetim sistemlerinde FMEA’nın kullanımı zorunlu hale getirilmiştir (Tok Ünlü, 2019: 11; Sönmez ve Ünğan, 2017: 219).

FMEA tekniğinde hata türleri risk düzeylerine göre sıralanmakta, en yüksek önceliğe sahip hata türlerinden başlanarak önlemler belirlenmektedir. FMEA, çok sayıda hatanın iyileştirilmesi yerine sisteme en çok katkı sağlayacak hata türlerine öncelik vererek çözüm üretmektedir. Özellikle balık kılçığı diyagramı oluşturulduktan sonra, FMEA yapılması şiddetle tavsiye edilmektedir (Mariajayaprakash ve Senthilvelan, 2013: 19). FMEA, işletmeler tarafından çok ilgi görmüş ve rekabette güç sağlayabilmek için en çok tercih edilen risk değerlendirme araçlarından biri olmuştur. Kimya, uzay, otomotiv, elektrik gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Putra ve Purba, 2018: 3). Bunun yanında çeşitli tesis ekipmanlarında oluşabilecek kusur ve arıza durumlarının ve bunların sisteme olan zararlı etkilerinin incelenmesinde de kullanılmaktadır (Baysal, 2002: 83).

Yöntem, sistemin kritik olarak incelenerek hataya açık taraflarının bulunması, bulunan hataların olası sebeplerinin belirlenmesi, hatanın yarattığı sonuçların ve tehlikelerin

derecelendirilmesi, hatanın oluştuktan sonra tespit edilebilirliğinin ortaya konması olmak üzere dört temel aşamadan oluşmaktadır:

1. Hata türünün belirlenmesi: Olası hata türleri belirlenmeye çalışılır. Hata türü, sistem içerisindeki bir bileşenin uygunsuz olabileceği durumlardır. Hata türü, hatanın nedenini değil hatanın meydana gelme şeklini ifade etmektedir (Tok Ünlü, 2019: 13).

2. Olası hata sebeplerinin bulunması: FMEA ekibinde yer alan kişilerin fikir ve tecrübelerinden yararlanılarak hatanın sebepleri tespit edilmeye çalışılır. Hata sebeplerinin belirlenmesinde beyin fırtınası, balık kılçığı diyagramı gibi yöntemlerden yararlanılır.

3. Hatanın muhtemel etkisinin belirlenmesi: Hatanın oluşması durumunda bu hatanın neden olacağı muhtemel problemler ve tehlikeler ortaya konulur.

4. Hatanın saptanabilirliği: Hata oluştuğunda bu hatanın fark edilebilirliğidir. Hatalar sadece kontrol sırasında değil çeşitli uyarıcı ekipman kullanımı ve gerçekleştirilen diğer faaliyetlerle de fark edilebilirler (Baysal vd., 2002:85; Kocabaş ve Savaş, 2019b: 441). FMEA ile hatalar incelenirken üç gösterge göz önünde bulundurulur. Bunlar:

Olasılık: Hatanın ortaya çıkma frekansı

Şiddet: Hatanın ortaya çıktığındaki etkisi

Saptanabilirlik: Hatanın tespiti ve fark edilmesi

Olasılık, şiddet, saptanabilirlik göstergelerine sayısal değer atamada kullanılan sayı aralığının büyüklüğüne ilişkin bir standart yoktur. Bugün uygulamalarda sıkça kullanılan iki aralık 1–5 ve 1–10 aralıklarıdır. 1–5 aralığının kullanılması yorumlama kolaylığı sağlamasına rağmen duyarlılık yönünden yetersizdir. Bu nedenle yaygın olarak kullanılan aralık 1–10 aralığıdır (Tok Ünlü 2019: 14). Sayılara karşılık gelen olasılıklar ve sözel ifadeler işletmelerin yapısına ve müşterilerin beklentilerine göre değişmekle beraber genellikle Tablo 3.2’de verilen derecelendirme ölçeği kullanılmaktadır (Kocabaş ve Savaş, 2019b: 441; Baysal vd., 2002: 86). Bu tabloda olasılık, şiddet ve saptanabilirlik göstergeleri 1’den 10’a kadar değer alırlar.

Tablo 3.2. Olasılık, şiddet, saptanabilirlik derecelendirme ölçeği

Ölçekler	Parametreler									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Olasılık	Hatanın oluşma olasılığı yok Hata kesin oluşur									
Şiddet	Hata ciddi değil..... Hata son derece ciddi									
Saptanabilirlik	Hata hemen fark edilir..... Hata asla fark edilmez									

Kaynak: (Büyüktuna, 2012: 41)

Hataların ortaya çıkma olasılığı, ortaya çıktığında yok açabileceği sorunun şiddeti ve hata oluştuğunda bunun saptanabilme olasılığını tayin etmek için kullanılan derecelendirme metodu Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. FMEA derecelendirme tablosu

Hatanın Olasılığı	Puan	Şiddet Etkisi	Puan	Saptanabilme Olasılığı	Puan
½'den fazla	10	Uyarısız gelen yüksek tehlike	10	Fark Edilemez	10
1/3	9	Uyarısız gelen tehlike	9	Çok az	9
1/8	8	Çok yüksek	8	Az	8
1/20	7	Yüksek	7	Çok düşük	7
1/80	6	Orta	6	Düşük	6
1/400	5	Düşük	5	Orta	5
1/2000	4	Çok düşük	4	Yüksek Ortalama	4
1/15000	3	Küçük	3	Yüksek	3
1/150000	2	Çok küçük	2	Çok yüksek	2
1/150000'den düşük	1	Yok	1	Kesin	1

Kaynak: (Türkan ve Görener, 2017: 28)

FMEA yönteminde her bir olası hatanın risk esasına göre kritikliği belirlenir. Kritikliği belirleyen ölçüt, kritiklik sayısı veya onun eşdeğeri olan Risk Öncelik Sayısıdır (RÖS). Her bir riske ait RÖS hesaplanarak, öncelikle ele alınması gereken riskler belirlenir ve düzeltici faaliyetler bu sıraya göre gerçekleştirilir (Sönmez ve Ünğan, 2017: 226). Risk öncelik sayısı (RÖS); Olasılık, şiddet ve saptanabilirlik göstergelerine atanan değerlerin birbirleriyle çarpılmasıyla hesaplanır.

$$\text{Risk Öncelik Sayısı (RÖS)} = \text{Oluşma Olasılığı} \times \text{Şiddet} \times \text{Saptanabilirlik}$$

FMEA tekniğinde sisteme ilişkin iyileştirme çerçevesi adım adım oluşturulmaktadır. FMEA uygulama aşamaları şu şekilde özetlenebilir (Kocabaş ve Savaş, 2019b: 441):

- Tehlike kaynaklarının ve tehlikelerin belirlenmesi
- Olası hata nedenlerinin, etkilerinin ve mevcut kontrollerin belirlenmesi
- Olasılık, şiddet, tespit ve RÖS değerlerinin belirlenmesi,
- RÖS'e göre hataların sıralanması, alınacak önlemlerin belirlenmesi

- Öngörülen önlemlerin hayata geçirilmesinin ardından RÖS değerlerinin yeniden hesaplanması (Türkan ve Görener, 2017: 27).

1’den 10’a kadar değer aldıklarından RÖS’ün değeri 1 ile 1000 arasında değişecektir. RÖS hesaplanarak hatalar risk derecelerine göre sıralanır. RÖS, hangi öğelerin ilave iyileştirmeye ihtiyaç duyduğuna öncelik vermek için kullanılır. Amaç, RÖS’ü 1’e doğru çekmek için çeşitli önleyici faaliyetler geliştirmektir. En yüksek RÖS değerine sahip hatalardan başlayarak tüm hatalar ve arızalar için düzeltici eylem alınması önerilir (Dieter ve Schmidt 2013: 14; Eren ve Pamuk, 2020: 1536; Sönmez ve Ünğan, 2017: 226).

RÖS değerinin büyüklüğü önlem durumunun belirlenmesinde en önemli kriterdir. Risk öncelik sayısına ilişkin değerlendirme ölçeği Tablo 3.4’te verilmiştir (Eren ve Pamuk, 2020: 1536; Türkan ve Görener: 2017: 28; Sönmez ve Ünğan, 2017: 226). Bu ölçeğe göre RÖS değeri 40’tan küçük ise önlem almaya gerek yoktur. RÖS değeri 40 ile 100 arasındaysa önlem alınabilir. RÖS değeri 100’den büyük ise mutlaka önlem alınması gerekmektedir (Kocabaş ve Savaş, 2019b: 443).

Tablo 3.4. RÖS değerlendirme ölçeği

RÖS Değeri	Önlem Durumu
$RÖS < 40$	Önlem almaya gerek yok.
$40 \leq RÖS \leq 100$	Önlem alınabilir.
$RÖS > 100$	Kesinlikle önlem alınması gereklidir.

Süreç iyileştirmede hangi hataya öncelik verileceğini belirlemek ve böylelikle kaynak tasarrufu sağlamak amacıyla FMEA tekniğinden yararlanılmaktadır (Tok Ünlü, 2019: 12). Bu yöntem aynı zamanda enerji verimliliğini düşüren risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesinde de kullanılabilir. Enerji FMEA, hangi enerji tasarruf alanının iyileştirme için başlangıç noktası olması gerektiğini belirlemede önemli bir rol oynayabilir.

Enerji FMEA yöntemini uygulamak için öncelikle ürün ve bakım odaklı FMEA derecelendirme tabloları enerji alanına göre uyarlanmış ve bu doğrultuda Tablo 3.5’te gösterilen derecelendirme tablosu hazırlanmıştır. Bu tabloda olasılık, şiddet ve saptanabilirlik göstergeleri 1 (En iyi) ila 10 (En kötü) arasında puanlanmıştır.

Tablo 3.5. Enerji FMEA derecelendirme tablosu

Olasılık	Puan	Şiddet	Puan	Saptanabilirlik	Puan
Oluşma olasılığı son derece yüksek	10	Tehlikeli, Uyarı yapmadan oldukça çok yüksek enerji kaybı	10	Enerji kaybını tespit etmek imkânsız	10
Oluşma olasılığı çok yüksek	9	Kritik etki, Uyarı ile oldukça çok yüksek enerji kaybı	9	Enerji kaybını tespit etmek neredeyse imkânsız	9
Oluşma olasılığı yüksek	8	Aşırı etki, çok yüksek enerji kaybı	8	Enerji kaybını tespit etme şansı oldukça düşük	8
Sıklıkla oluşabilir	7	Büyük etki, yüksek enerji kaybı	7	Enerji kaybını tespit etme şansı çok düşük	7
Orta sıklıkla oluşabilir	6	Orta etki, orta derecede enerji kaybı	6	Enerji kaybını tespit etme şansı düşük	6
Ara sıra oluşabilir	5	Düşük etki, düşük enerji kaybı	5	Enerji kaybını tespit etme şansı orta düzey	5
Oluşma olasılığı düşük	4	Çok hafif etki, çok düşük enerji kaybı	4	Enerji kaybını tespit etme şansı orta derecede yüksek	4
Oluşma olasılığı çok düşük	3	Oldukça hafif etki, oldukça düşük enerji kaybı	3	Enerji kaybını tespit etme şansı yüksek	3
Oluşma olasılığı yok	2	Oldukça çok hafif etki, oldukça çok düşük enerji kaybı	2	Enerji kaybını tespit etme şansı çok yüksek	2
Oluşma olasılığı hiç yok	1	Fark edilmeyen etki, enerji kaybı yok	1	Enerji kaybını tespit etmek nerdeyse kesin	1

Kaynak: (Suresh vd., 2014: 28 ve Dieter ve Schmidt 2013: 663'ten uyarlanmıştır)

Enerji FMEA tablosu oluşturulurken öncelikle enerji verimini düşüren olası hata türleri tespit edilmelidir. Olası hata türlerini belirlemede firma enerji denetim raporları, arıza-bakım raporları, firmanın kendisi tarafından yapılan veya bağımsız kuruluşlara yaptırılan testlerin ve analizlerin sonuçları kullanılabilir. Ayrıca teknik personelin tecrübe ve bilgi birikimlerinden yararlanılabilir. Hataların olasılık, şiddet ve saptanabilirlik göstergelerinin belirlenmesinde Tablo 3.5'te verilen derecelendirme tablosu kullanılabilir. Bu tabloya göre olasılık derecesinin en küçüğü için “1” ve en büyüğü için “10” sayısal değerleri verilebilir. “Olasılık” derecesi, öngörülen enerji kaybı hatasıyla belirlenen zaman içerisinde hangi sıklıkta karşılaşıldığını göstermektedir. Hata şiddetine değer atanmasında “1” en düşük önemi, “10” en büyük önemi gösterir. “Şiddet” derecesi, enerji tüketimin artmasına, prosesin kötüye gitmesine, can güvenliğinin tehlikede olup olmamasına bağlı olarak değişmektedir. Öngörülen enerji kaybı hatasıyla karşılaşılmaması durumunda hangi metotla veya hangi ölçüm aletleriyle bu hatanın tespit

edildiği ortaya konarak hatanın tespit edilmesindeki başarının bir ölçüsü olarak “Saptanabilirlik” değeri belirlenir. Hata saptama değeri çalışanlar tarafından fark edilme olasılığına göre değerlendirilirse, kolayca fark edilen risk için değer “1”, fark edilemeyen risk için ise “10” olacaktır.

Bu çalışmada, buhar üretimi sürecinde meydana gelen enerji kaybını değerlendirmek için FMEA tekniği kullanılmıştır. Proses akışı boyunca proseste ve buhar üretimiyle ilgili ekipmanlarda meydana gelebilecek enerji kaybına yol açan hatalar ve riskler incelenmiştir. Bu hataların üretime ve enerji verimine olan etkileri araştırılmıştır. Bu risklerin meydana gelme olasılıkları ve risklerle ilgili herhangi bir tedbir alınıp alınmadığı ortaya konmuştur. Son olarak tüm riskler için Risk Öncelik Sayıları birer birer hesaplanmıştır. RÖS puanı 40’ın altında kalanlar önemsiz risk sınıfına girmekte olup yeşil renk ile gösterilmiştir. 40-100 arasında olanlar sarı, 100’den çok olanlar ise kırmızıyla gösterilmiştir. Yüksek RÖS puanına sahip kırmızı alanlar iyileştirme çalışmasına başlamada öncelikli alanlardır. Firmada bulunan 5 ton/h doymuş buhar kapasiteli ve 10 bar çalışma basınçlı buhar kazanının verimini etkileyen riskler için hazırlanan Enerji FMEA çalışmaları ilerleyen her bir ilgili bölümde tablo olarak verilmiştir.

Bu çalışmayla; kalite iyileştirme araçlarından biri olan FMEA, enerji verimi iyileştirme alanına uyarlanarak ilk kez kullanılmıştır. FMEA çalışması sırasında yüksek öncelikli enerji riskleri için günümüzün teknolojik imkanları ölçüsünde iyileştirme önerileri getirilmiştir. FMEA hiç bitmeyen bir çalışma niteliği taşımakta olup teknolojik imkanlar ilerledikçe bu yenilikler sisteme dahil edilebilir ve FMEA çalışması bu doğrultuda güncellenebilir.

4. BUHAR KAZANI ENERJİ VERİMİ

4.1. Endüstride Buhar Kullanımı

Buhar, yaklaşık 250 yıldan buyana insanlığın hizmetindeki en büyük güçlerden biridir. Su buharının günümüze kadar yaygın bir kullanımı alanı bulmasının başlıca nedenleri şunlardır:

- Buhar, birim kütle başına (gizli ısı biçiminde) aktarılabilen en yüksek miktarda enerjiye sahiptir ve bu yüzden ısı transferi için son derece maliyet etkin bir araçtır.
- Buhar, pompa benzeri dış enerji kaynakları tarafından yardım almaksızın sistemin içinde akar. Böylece bu makineleri tahrik eden elektrik motorlarının harcamayacağı elektrik enerjisinden tasarruf edilir.
- Son kullanımlara giden buhar basıncı değiştirilerek sistem sıcaklığı çok hassas biçimde kontrol edilebilir.
- Buhar, doğası gereği çok esnek bir enerji transfer ortamıdır (YEGM, 2017: 2).

Buhar üretmek için endüstrilerde ve enerji santrallerinde yaygın olarak kazan sistemleri kullanılmaktadır (Barma, 2017: 970). Su, buhar kazanında ısıtıldığında ısısı artar. Bu şekilde suya verilen ısıya duyulur ısı denir. Duyulur ısı kaynama noktasına (buhar kazanının çalıştığı basınca göre değişir) ulaşmaya kadar yükseltilebilir. Kaynama noktasına ulaşıldığı zaman suya verilmekte olan ısı artık sıcaklığı yükseltmez ve suyun fiziksel özelliğini değiştirmeye başlar. Bu noktadan sonra buharlaşma başlar. Kaynayan suyu aynı sıcaklıkta buhara dönüştüren ısıya gizli ısı denir. Gizli ısı miktarının, suyun sıcaklığını kaynama noktasına kadar yükseltmek için verdiğimiz ısıdan oldukça fazla olduğunu belirtmek gerekir. Genel bir yaklaşım olarak, buharın gizli ısısı buhar basıncına bağlı olarak toplam ısısının %70-80'i kadardır. (Özer, 2004: 6; Mumlu 2008: 13).

Buharın sahip olduğu ısı enerjisi; ısıtma, kurutma, sterilizasyon, pişirme vb. çeşitli proseslerde, buhar türbinlerinde, buhar makinesi gibi güç makinelerinde kullanılmaktadır. Çamaşırhane, boyahane gibi proseslerde saatte birkaç kilogram buhar kapasitelerinde çalışılabilir gibi, termik santrallerde saatte yüzlerce ton buhar üretimi kapasitelerinde de çalışabilmektedir. Üretilen su buharının basıncı 370 bar, kızgın buhar sıcaklığı ise 650 °C değerlerinin üzerine çıkabilmektedir (Özer, 2004: 1). Endüstriyel buhar sistemleri, buhar kullanım miktarına dayalı olarak büyük ölçekli, orta ölçekli ve küçük ölçekli olmak üzere üç kategoride sınıflandırılabilir (YEGM, 2017: 2):

Büyük Ölçekli Buhar Kullanıcıları

- Petrokimyasallar
- Arıtma
- Orman ürünleri
- Yiyecek ve içecek
- Plastikler
- Lastik
- Tekstil
- Ecza ürünleri
- İmalat montaj

Orta Ölçekli Buhar Kullanıcıları

- Büyük ticari ısıtma
- Bira fabrikaları
- Çamaşırhaneler
- Unlu mamul fırınları
- Metal imalatı
- Büyük soğutucu (chiller) tesisleri

Küçük Ölçekli Buhar Kullanıcıları

- Elektronik sektörü
- Boya kabinleri
- Nemlendirme sistemleri

4.2. Buhar Kazanı

Kazanlar genel olarak, yakıttaki kimyasal enerjiyi ısı enerjisi şeklinde açığa çıkartarak taşıyıcı akışkana ileten ve basınç altında çalışan kapalı kaplar olarak adlandırılır (Kaya ve Öztürk, 2014: 276). Buhar kazanı ise; istenilen basınç, sıcaklık ve miktarda buhar üreten cihazlardır. Bunun için herhangi bir yolla elde edilen ısı enerjisinin kapalı bir kap içerisindeki suya verilerek buharlaşması sağlanır (Özer, 2004: 1). Günümüzde buhar üretimi esas olarak fosil yakıtlardan, özellikle de doğalgazdan elde edilen ısı enerjisine dayanmaktadır (Durukafa, 2010: 15).

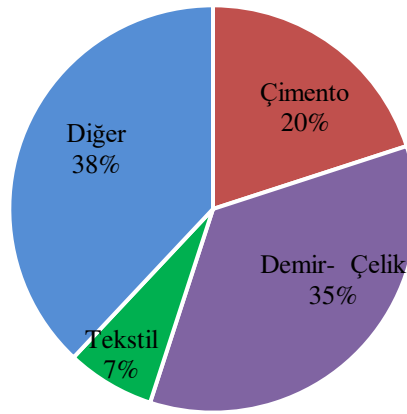
Yaygın kullanıma ve yüksek yakıt tüketimine sahip ekipmanlar için enerji verimliliği çalışmaları büyük önem taşımaktadır (Pusat, 2019: 167). Bir kazan birçok endüstriyel uygulamada yer alıp önemli miktarda enerji kullandığından verimliliğinin artırılması, enerji tasarrufu ve çevre kirliliğinin azaltılmasında önemli bir rol oynayacaktır (Saidur, 2010: 2189). Dünya enerji tüketiminin önemli bir kısmı kazanlarda kullanılmaktadır. Gazbir tarafından 2017 yılında yayınlanan raporda yer alan sektörlere göre doğalgaz tüketimi tablosundan yapılan çıkarıma göre Türkiye sanayisinde kullanılan doğalgazın yaklaşık olarak %45'i kazanlar tarafından tüketilmektedir (Durukafa, 2019: 478). Bu nedenle enerji geri kazanım çalışmalarında buhar sistemi ilk sıralarda yerini almaktadır (Öztürk, 2012: 25). Buhar kazanlarının çalışması optimize edilerek önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabilir. Bu amaçla bir kazan tesisini maksimum verimlilikte çalıştırmak için, enerji kayıplarının ana kaynaklarını belirlemek ve boşa harcanan enerjiyi geri kazanmak gerekir (Saidur, 2010: 2188).

Ülkemizde kurulu buhar üretim tesislerinin çok büyük kısmı düşük enerji verimliliği ile çalışmakta ve yüksek enerji verimlilik artış potansiyeli taşımaktadır (Durukafa, 2014: 24; Durukafa, 2010: 12). Günümüz yakma ve ısı teknolojilerinin sunduğu teknik ve mali açıdan uygulanabilirliği olan teknolojik imkânlar sayesinde yüksek verim değerleri elde etmek mümkündür. Ayrıca verim artışının sağladığı enerji tasarrufu sayesinde bu uygulamaların gerektirdiği ilk yatırım maliyetleri de kısa süre içinde kendini geri ödemektedir (Durukafa, 2014: 24).

Türkiye sanayisinde ısı üretimi fosil yakıtlara, özellikle de ithal doğalgaza dayalıdır. Her geçen gün artan yakıt maliyetleri, enerji maliyetlerinin toplam ürün maliyetinde en büyük paylardan birine sahip olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca düşük verimle çalışan buhar santralleri, çevreye zararlı gaz emisyonlarının da artmasına sebep olmakta, finansal maliyetin yanına çevresel maliyeti de eklemektedir (Durukafa, 2014: 24). Fosil yakıtların yakılması sonucu ortaya çıkan karbon emisyonlarını minimize ederek bu emisyonların neden olduğu küresel ısınma ve buna bağlı olarak ortaya çıkan iklim değişikliklerini önlemenin iki temel yolu vardır: Birincisi fosil yakıtlar yerine yenilenebilir çevre dostu enerji kaynaklarını kullanmak, ikincisi ise enerjiyi daha verimli kullanmak ve enerji tasarrufu yapmaktır. Kazan verimliliğindeki küçük bir iyileştirme, büyük miktarda fosil yakıt tasarrufuna ve CO₂ emisyonunun azaltılmasına yardımcı olacaktır (Barma, 2017: 971). Enerji İşleri Genel Müdürlüğüne açıklanan istatistiklere göre 2018 yılında Türkiye'de toplam 49,9 milyar Sm³ doğalgaz tüketilmiştir. Söz konusu toplam tüketimin %36'sı sanayi tesislerinin tüketimidir. Türkiye'de işletilen buhar kazanlarının yıllık gaz tüketimi 8 milyar Sm³ civarındadır. Çeşitli

iyileştirmelerin yaygın olarak uygulanması sonucu ülke genelinde yılda kolaylıkla 500 milyon Sm³ doğalgaz tasarrufu sağlanabilir. Ayrıca böylesi bir tasarruf ile ülke genelinde yılda bir milyon tonun üzerinde CO emisyonu da önlenebilecektir (Durukafa, 2019: 478).

Tekstil sektörü enerjinin yoğun ve verimsiz kullanılması nedeniyle sanayi sektörleri içerisinde büyük enerji tasarruf potansiyeline sahip sektörler arasında yer almaktadır. Türkiye’de endüstride tüketilen enerjinin alt sektörler göre dağılımı Şekil 4.1. ile verilmiştir. Tekstil sektörü toplam enerji tüketiminin %6-7’lik kısmını oluşturarak demir-çelik (%35) ve çimento sektöründen (%20) sonra üçüncü sırada yer almaktadır (Güven, 2019: 4).



Şekil 4.1. Sanayide enerji tüketiminin sektörel dağılımı

Kaynak: (Güven, 2019: 4)

Ülkemizde buhar sistemleri hakkında akademik olarak pek çok çalışma olmasına karşın, uygulamada gerek bu sistemlerinin projelendirilmesi gerek kurulumu gerekse de işletimi alanında önemli bir açık olduğu söylenebilir (Durukafa, 2014: 25; Durukafa, 2010: 12).

4.3. Buhar Kazanı Verimi

Termodinamik olarak kazan verimi, kazandan elde edilen ısı enerjisinin kazana yakıt formunda verilen ısı enerjisine oranıdır. (4.1) nolu eşitlik kullanılarak kazan verimi hesaplanabilir (Ünlü, 2009: 71).

$$\text{Kazan Verimi} = \frac{\text{Elde edilen ısı enerjisi}}{\text{Verilen ısı enerjisi}} \quad (4.1)$$

Kazan ısı verim hesabı TS 4041’de tanımlanmış olup kazan verimi direkt ve dolaylı olmak üzere iki yöntemle hesaplanabilmektedir (Kaya ve Öztürk, 2014: 277).

a) Direkt yöntem: Bu yöntemi pratikte uygulamak zordur. Çıkan buhardaki faydalı ısıyı belirlemek için, birçok parametrelerden yararlanılır (Karakurt, 2006: 34; Kaya ve Öztürk, 2014: 277). Bu yöntemde bilinmesi gerekli olan parametreler şunlardır:

- Besi suyu ve buhar miktarları
- Besi suyu ve ara buharın sıcaklık ve basınçları
- Yakıt besleme miktarı
- Yakıt alt ısı değeri

Ölçülen bu değerler yardımıyla kazan verimi (4.2) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$\text{Kazan Verimi} = \frac{(\text{Buharın kütleli debisi} \times \text{Buhar entalpisi}) - (\text{Suyun kütleli debisi} \times \text{Su entalpisi})}{\text{Yakıt debisi} \times \text{Yakıt alt ısı değeri}} \quad (4.2)$$

b) Dolaylı yöntem: Bu yöntemde kazan verimi bütün kayıpların miktarı ölçülerek hesaplanmaktadır. Bu metot genelde daha pratiktir ve önerilir. Dolaylı yöntemde kazan verimi (4.3) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Karakurt, 2006: 35; Kaya ve Öztürk, 2014: 277):

$$\text{Kazan verimi} = 1 - \sum \text{kayıplar} \quad (4.3)$$

Bu yöntemde bilinmesi gerekli olan parametreler şunlardır:

- Baca gazı analizi (baca gazında sıcaklık, hız, basınç toz ölçümü, gaz analizi)
- Yakma havası debisi ve sıcaklığı
- Kazan dış cidar sıcaklıkları
- Blöf miktarı
- Yakıtın alt ısı değeri ve elementel analiz

Baca gazı kaybı, yüzey kaybı ve blöf kaybı (%) bilinirse kazan verimi (4.4) nolu eşitlik kullanılarak kolayca hesaplanabilir:

$$\text{Kazan verimi (\%)} = 100 - (\text{baca gazı kaybı} + \text{yüzey kaybı} + \text{blöf kaybı}) \quad (4.4)$$

Tipik kazan verimi %75-90 aralığındadır ve kazanın verimi çeşitli önlemler alınarak geliştirilebilir (Barma, 2017: 973). Kazan verimini arttırmak için hava-yakıt karışım oranını optimize etmek; bacagazı kayıplarını, yüzeyden konveksiyon- radyasyon ile kaybedilen ısıyı ve blöf miktarını azaltmak gerekir (Kanoğlu, 2010: 15).

Ülkemizde, buhar kazanlarının verimleri ile ilgili çok fazla literatür çalışması olmamakla birlikte çeşitli projelerden elde edilen veriler, ülkemizdeki buhar kazanlarının genel durumu ile ilgili gerekli bilgileri sağlamaktadır. Verim ile ilgili elde edilen bilgi göstermektedir ki ülkemizdeki buhar kazanı verimleri olması gereken değerin çok altındadır. Günümüz teknolojisinde buhar kazanlarının verimleri %100'e oldukça yaklaşmıştır. Kazan verimleri ile ilgili yapılan değerlendirmede kazanların operatör kontrolünde ve bilinçsiz olarak işletilmesinin en büyük verimsizlik kaynağı olduğu görülmektedir (Pusat, 2019: 167).

4.4. Buhar Kazanı Sistem Verimi ve Isı Kayıpları

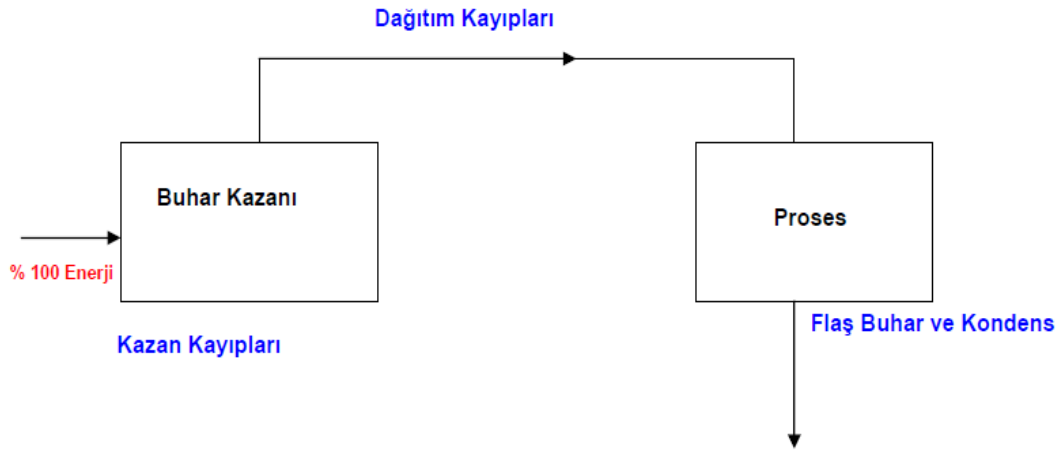
Her türlü endüstriyel yardımcı işletme sistemini anlamak ve değerlendirmek için maliyet etkinliğin anahtarı, “sistem yaklaşımı” uygulamaktır. Sistem yaklaşımı için sadece tek bir bileşeni incelemek yerine, kullanıcının tüm buhar sistemini dikkate alması gerekmektedir (YEGM, 2017: 2). Sistem elemanlarının herhangi birinde sağlanacak verim artışı, toplam sistem verimini büyük ölçüde etkiler (Uylukçuoğlu, 2009: 52). Kazan sistemleri şekil ve boyut olarak farklılık gösterebilir de tipik olarak bir buhar kazanı, yumuşatma cihazı, degazör ve kondens adı verilen yardımcı sistemlerden oluşur (Öztürk, 2012: 26).

Değişik sanayi tesislerini yakından tanıma fırsatı bulmuş olanlar genellikle buharın tüketimi sırasında üretilirken gösterilen dikkatin gösterilmediğini şaşkınlıkla izleyecektir. Kazanda üretilen buharın, üretimiyle birlikte tüketilene kadar kontrol altında bulundurulması gereklidir (EİEİ, 1999: 1112). Buhar kazanında yakıttan alınan enerjinin kazan suyuna verilmesiyle meydana gelen buhar kullanım yerlerine taşınır. Doğal olarak buhar, kazandan ayrılır ayrılmaz hemen ısısını dışarı vermek isteyecektir. Buharın sahip olduğu ısıyı kullanmak istediğimiz noktaya ulaşmadan önce mümkün olduğu kadar az miktarda kaybolmasını sağlamamız gerekmektedir (Mumlu, 2008: 14). Buhar proseste kullanıldıktan sonra yoğunlaşarak su olarak toplanır ve tekrar kazana gönderilerek çevrimini tamamlar. Yoğuşan kondens suyunun buhar kullanım yerlerinden uygun şekilde toplanıp, en az kayıpla kazana gönderilmesi gerekir. Bu çevrimdeki işlemlerin verimli bir şekilde yapılması ve kayıpların en aza düşürülmesi ile sistemin toplam verimi artar (Özer, 2004: 7).

Proses sunulan enerjinin harcanan yakıtın toplam enerjisine oranı; toplam sistem verimidir. Buhar üretmek için kullanılan yakıtın barındırdığı enerji ile proseste sunulan enerji arasında, sistemde yaşanan ısı kayıplarından kaynaklanan bir fark bulunur. Bir kazan tesisinin çalışmasını optimize etmek için, atık veya kayıp kaynaklarının nerede meydana gelebileceğini belirlemek gerekir. Kayıp kaynaklarının ayrı ayrı tespiti, sistem verimliliğini artırmak için yol

haritası sunar (Saidur, 2010: 2188). Sistemdeki enerji kayıpları kazan dış cidar kayıpları, baca gazı kayıpları, blöf kayıpları, flaş buhar kayıpları, tasarım ve uygulama hatalarına bağlı kayıplar olarak sınıflandırılabilir (Durukafa, 2014: 25; Durukafa, 2010: 67). Kazanın verimi, atık ısı kaynaklarının potansiyelini kontrol edecek önlemler alınarak geliştirilebilir (Barma, 2017: 980).

Buhar kullanan bir işletmede, kazanda yakıtın yanmasıyla elde edilen ısı enerjisi ile buhar üretilir. Buhar, dağıtım hatları ile enerjinin tüketileceği proses ekipmanına sevk edilir. Buharlaşma ısısını ısı transfer yüzeylerinden prosese aktaran buhar, aynı basınçta kondens (su) fazına geçerek kazan dairesine geri gönderilir. Buharın üretilmesi, dağıtılması ve tüketilmesi sırasında Şekil 4.2’de görüldüğü gibi kayıplar meydana gelmektedir (Ünlü, 2009: 70).



Şekil 4.2. Genel kazan sistemi kayıp diyagramı

Kazan sisteminde gerçekleşen bu enerji kayıplarının, alınacak önlemlerle en aza indirilmesi mümkündür. Gerekli ısı geri kazanım cihazları ve modern otomasyon sistemleri sayesinde yüksek verimli bir buhar kazanı işletmesi sağlanabilir (Durukafa, 2014: 25; Durukafa, 2010: 74). Baca gazı ile atmosfere atılan duyulur ısı, yanma ürünü olan su ile atılan gizli ısı, sistemde oluşan kondensin, oluşan flaş buharın, kazan blöfleri ile atılan ısı geri kazanılması, yakma sisteminin baca gazı emisyon değerlerine göre kontrol edilmesi, sıcak yüzeylerin yalıtım eksikliklerinin giderilmesi vb. pek çok uygulama buhar sisteminin verimini %30’a kadar artırma imkânı sunmaktadır (Durukafa, 2014: 24).

Toplam sistem verimi; kazan kaybı, dağıtım kaybı ve proses kaybı (%) hesaplanarak bulunabilir. Kazan sistem verimini hesaplamak için (4.5) nolu eşitlik kullanılabilir:

$$\text{Kazan Sistem verimi (\%)} = 100 - (\text{kazan kaybı} + \text{dağıtım kaybı} + \text{proses kaybı}) \quad (4.5)$$

5. BUHAR KAZANI SİSTEMİ ISI KAYIPLARININ AZALTILMASI

Buhar üretim sistemlerinde verim kavramı genellikle sadece kazan verimi ile sınırlı olarak değerlendirilmektedir. Ancak kazan verimi, toplam buhar üretim sistemi veriminin sadece bir bölümünü oluşturmaktadır. Sistemdeki diğer kayıplar hesaba katılmadan gerçekçi bir verim ölçümü mümkün değildir (Durukafa, 2019: 468). Kazan sistemlerinde ısı kayıpları Şekil 5.1’deki gibi üç bölümde incelenebilir (Karakurt, 2006: 73):



Şekil 5.1. Kazan sisteminde kayıplar

Kazan kayıpları: Buhar üretimi esnasında kazan dairesinde, buhar kazanı ve yardımcı ekipmanlarında meydana gelen kayıplardır.

Dağıtım kayıpları: Buhar dağıtım tesisatında, buhar borularında, kontrol vanaları ve kondens toplarlarda meydana gelen kayıplardır.

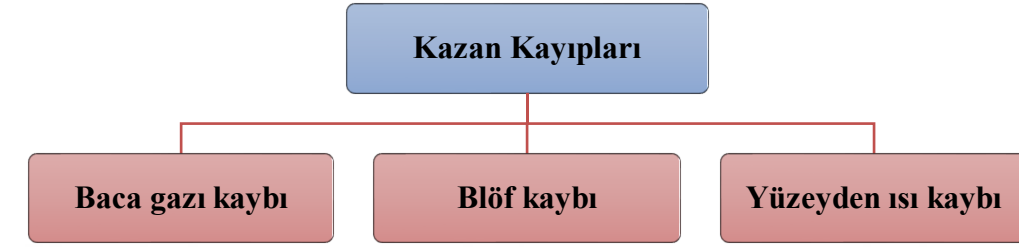
Proses kayıpları: Kondens toplama tesisatında, kondens boruları ve tanklarında, degazörde, flaş buhar tankında meydana gelen kayıplardır.

Bir kazan sistemindeki ısı kayıpları detaylı bir şekilde analiz etmek için 1991 yılından bu yana Bilecik’te tekstil sektöründe faaliyet göstermekte olan Doğuş Suni Deri Kösele fabrikası ile birlikte çalışılmıştır. Tesiste 5000 kg/h buhar kapasiteli 10 bar işletme basıncında buhar üreten buhar kazanı bulunmakta ve kazan koagule üretiminin distilasyon prosesinde kullanılmak üzere yılda ortalama 5760 saat çalıştırılmaktadır. Tesisteki kazan sistemi ısı kayıpları ayrı ayrı incelenerek hesaplanmış ve bu kayıpların azaltılması için çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur.

5.1. Kazan Kayıpları

Bütün kazanlar kurulum aşamalarında belirli bir kazan (kurulum) verimine sahiptirler. Ama belirli bir süre sonra kazan verimleri hesaplandığında, hesaplanan değer set-up verimlerinden düşük olduğu görülecektir. Bunun nedeni kayıplardır ve bu kayıplar azaltılarak

tasarruf sağlanabilir (Kanoğlu, 2010: 15). Her kazan üreticisi belli kabuller çerçevesinde kazan verimini beyan etse de toplam erimiş katı madde (TDS) seviyesi, izolasyon durumu, hava yakıt oranı, baca gazı sıcaklığı gibi parametrelerin zamana bağlı olarak değişim göstermesi kazan verimini ve yakıt tüketimini değiştirir. Sonuç olarak kazan verimi düşer ve kazan kayıpları artar (Sarı, 2019: 185). Kazan kayıpları; baca gazı kaybı, blöf kaybı ve yüzeyden ısı kaybı olmak üzere 3 ana başlıkta sınıflandırılabilir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Buhar kazanı kayıpları

Baca Gazı Kaybı: Baca gazı yoluyla gerçekleşen ısı enerjisi kaybıdır.

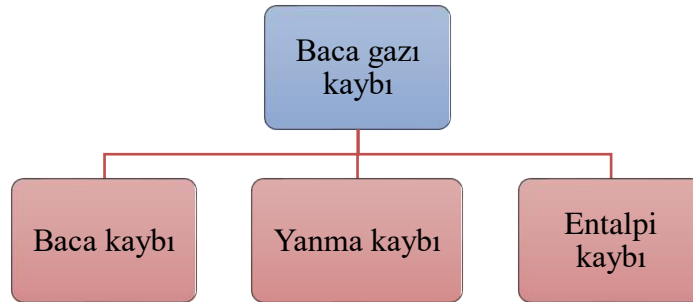
Blöf Kaybı: Kazandan yapılan yüzey ve dip blöflerle atılan ısı enerjisi kaybıdır.

Yüzeyden Isı Kaybı: Kazanın dış yüzeyinden ortama radyasyon ve konveksiyonla atılan ısı enerjisi kaybıdır.

Genellikle kazan kayıplarının toplamı %15 oranında olmaktadır. Bu oranın üzerinde olduğu durumlarda kazanda ciddi bir problem olduğuna işaret etmektedir ve gerekli düzeltici faaliyet başlatılmalıdır (Ünlü, 2009: 71).

5.1.1. Baca Gazı Kaybı

Kazanlarda baca gazı kaybı; baca kaybı, yanma kaybı ve entalpi kaybı olmak üzere Şekil 5.3'te gösterildiği gibi 3 ana başlıkta incelenebilir (Ünlü, 2009: 71).



Şekil 5.3. Baca gazı kaybı

Baca Kaybı: Isının atık gazlarla bacadan dışarı atılmasıyla gerçekleşen kayıptır.

Yanma Kaybı: Yanmamış yakıt ve eksik yanma nedeniyle oluşan kayıptır.

Entalpi Kaybı: Isının hem gizli hem de duyulur ısıyı içerecek şekilde, sıcak su buharıyla bacadan dışarı taşınmasıyla gerçekleşen kayıptır (Ünlü, 2009: 71).

5.1.1.1. Baca Gazı Kaybı Hesaplama Yöntemi

Baca gazı yoluyla kaybedilen verimi hesaplamak için öncelikle doğalgazın yanma reaksiyonu incelenmelidir. Doğalgazın yakıt olarak kullanılması durumunda stokiyometrik yanma sonucu oluşacak baca gazı ürünleri ve miktarları Tablo 5.1’de gösterilmiştir (Durukafa, 2010: 87).

Tablo 5.1. Doğalgazın stokiyometrik yanma sonucu tepkime bileşenleri

Gaz	Doğalgazdaki mol oranı (100)	Yakma karışımı (mol)			Yanma ürünleri (mol)			
		Yakıt	O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂
CH ₄	96,32	0,09632	1,9264	7,2432	0,0632	2	Stokiyometrik yanma ürünü olarak O ₂ açığa çıkmaz.	7,2432
C ₂ H ₆	1,94	0,0194	0,0679	0,2553	0,0388	3		0,2553
C ₃ H ₈	0,62	0,0062	0,0310	0,1166	0,0186	4		0,1166
C ₄ H ₁₀	0,20	0,0020	0,0130	0,0489	0,0080	5		0,0489
C ₅ H ₁₂	0,02	0,0002	0,0016	0,0060	0,0010	6		0,0060
N ₂	0,84	0,0084	-	-	-	-		0,0006
CO ₂	0,06	0,0006	-	-	0,0006	-		-
Toplam	100	1	2,039	7,670	1,030	2,020		7,670

Yanma ürünlerinin miktarları (kmol) bilinirse baca gazındaki O₂ miktarı aşağıdaki (5.1) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanabilir:

$$O_2 = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2}} \quad (5.1)$$

Kuru hava yaklaşık mol olarak %2 O₂ ve %79 N₂ içerir. Bu nedenle yanma odasına giren havada her 1 kmol O₂ için 3,76 kmol N₂ bulunur. Baca gazındaki toplam N₂ miktarı (mol) (5.2) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Durukafa, 2010: 81; Pınarbaşı, 2008: 4).

$$n_{N_2} = 7,670 + (3,76 \times n_{O_2}) \quad (5.2)$$

5.1.1.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Baca Gazı Kaybı

Firmadaki kazanda ekonomizör takılı olup yanma havası ısıtılmaktadır. Kazanın saatlik doğalgaz tüketimi 375 Nm³ tür. Ekonomizör çıkışı baca gazı sıcaklığı 130 °C olup baca gazındaki O₂ miktarı %2 dir. Bu durumda tepkimeye giren O₂ ve N₂ miktarları (kmol) yukarıda verilen (5.1) ve (5.2) nolu eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$0,02 = \frac{n_{O_2}}{1,030 + 2,020 + n_{O_2} + (7,67 + 3,76 \times n_{O_2})}$$

$$n_{O_2} = 0,237 \text{ mol}$$

$$n_{N_2} = 7,670 + (3,76 \times 0,237)$$

$$n_{N_2} = 8,561 \text{ mol}$$

Normal şartlar altında 1 kmol gaz 22, 4 m³ hacim kaplamaktadır. 1 m³ doğalgaz (44, 64 mol/m³) için baca gazı bileşenleri ve bunların 130 °C'deki entalpileri hesaplanarak Tablo 5.2'de gösterilmiştir. 130 °C'de 1 m³ doğalgaz için baca gazı bileşenlerinin toplam entalpisi 1713,01 kJ/m³ olarak bulunmuştur. Saatlik 375 Nm³ doğalgaz tüketimi dikkate alındığında toplamda baca gazı yoluyla kaybedilen ısı miktarının 178 kW olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.2. Mevcut durumda gerçekleşen baca gazı kaybı

	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	TOPLAM
1 kmol doğalgazın yanması sonucu baca gazı bileşenleri (kmol)	1,030	2,020	0,237	8,561	11,848
1 m ³ (44,64 mol/m ³) doğalgaz için baca gazı bileşenleri (mol/m ³)	45,991	90,179	10,576	382,174	528,920
130 °C'de entalpi (kJ/mol)	4,137	3,556	3,12	3,059	13,872
1 m ³ doğalgaz için baca gazı bileşenlerinin entalpisi (kJ/m ³ doğalgaz)	190,265	320,675	32,997	1169,071	1713,01
Kaybedilen ısı miktarı (kJ/h) (saatlik doğalgaz tüketimi 375 Nm ³ alınmıştır)					642.378
Kaybedilen ısı miktarı (kW) (saatlik doğalgaz tüketimi 375 Nm ³ alınmıştır)					178

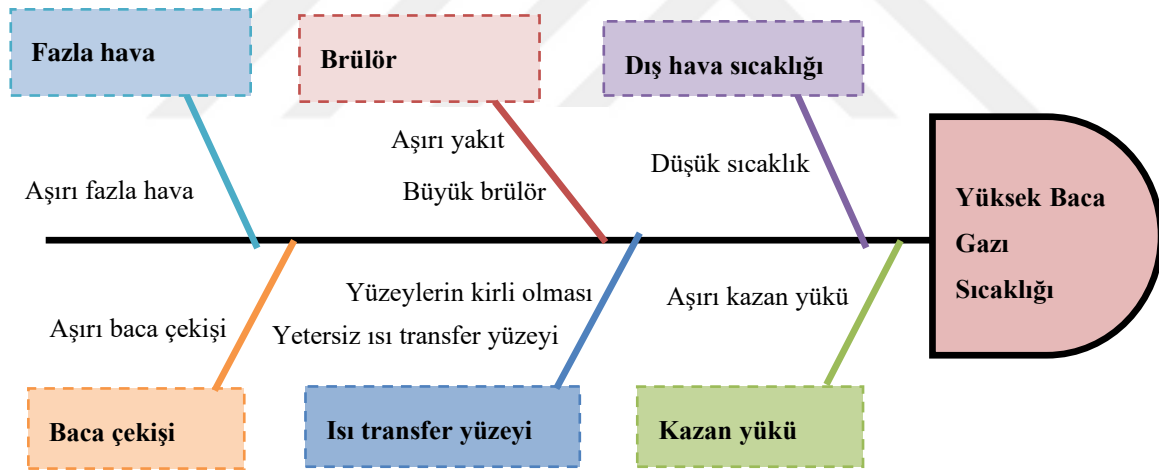
Kaynak: (Büyüktür, 1985: 660, Durukafa, 2010: 88)

5.1.1.3. Baca Kaybı

Bacadan atılan gazın sıcaklığına bağlı duyulur ısı enerjisi kaybıdır. Yanma sonucu oluşan atık gazlar bacadan atmosfere atılırlar. Bacadan çıkan atık gazlar, genellikle üretilen buharın sıcaklığından 40 °C ile 80 °C daha yüksek sıcaklıktadır. Atmosfere atılan baca gazının

sıcaklığı arttıkça dışarı atılan enerjinin miktarı da artar. Bu durumda kazan veriminde azalma olur (Kaya ve Öztürk, 2014: 309; Uylukçuoğlu, 2009: 41).

Baca gazının ideal sıcaklık değerleri, kullanılan yakıt ile doğrudan ilişkilidir. Doğalgaz yakıtlı buhar kazanlarında 130-150 °C, katı ve sıvı yakıtlı kazanlarda ise 130-175 °C baca gazı sıcaklıkları ideal değerler olarak kabul edilmektedir (Kaya ve Öztürk, 2014: 289; Bilgin, 2007: 61). Baca gazı sıcaklığının kabul edilen değerlerin üzerinde olması halinde, bacadan atmosfere fazla enerji atılmış olacaktır. Baca gazında, normal sıcaklığın üzerindeki her 17 °C'lik artış, verimde yaklaşık olarak %1 oranında azalmaya neden olmaktadır (Kaya ve Öztürk, 2014: 281; Uylukçuoğlu, 2009: 42). Baca gazı sıcaklığı, baca gazlarının yoğuşamayacağı sıcaklık değerine kadar düşürülebilir. Bu sınırın altına inilmesi durumunda korozyon oluşmakta ve baca çekişinde önemli düşüşler meydana gelebilmektedir (Uylukçuoğlu, 2009: 41; Duru Kan, 1997: 5). Baca gazı sıcaklığı için optimum değer aralığının belirlenip o aralıkta çalışmanın sürdürülmesi oldukça önem arz etmektedir. Baca gazı sıcaklığının yükselmesine neden olan faktörler balık kılçığı diyagramı kullanılarak tespit edilmiş ve Şekil 5.4'te gösterilmiştir (Kocabaş ve Savaş, 2019c: 199).



Şekil 5.4. Baca gazı sıcaklığı balık kılçığı diyagramı

A. Baca Kaybı Enerji FMEA Çalışması

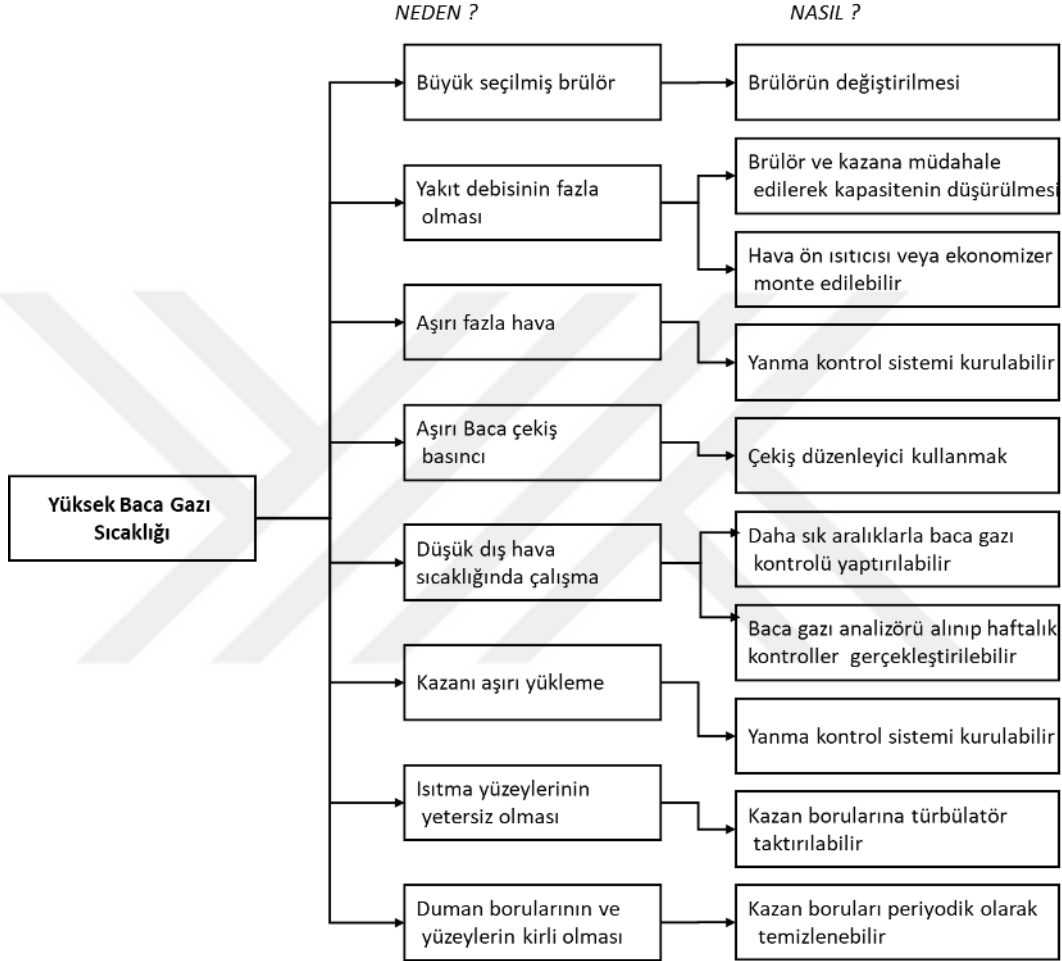
Buhar üretimi prosesinde baca kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.3'te gösterilmiştir (Kocabaş ve Savaş, 2019c: 200). Baca kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır. Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip riskler “sisteme aşırı fazla hava verilmesi” ve “kazanın aşırı yüklenmesidir”. Bu riskler hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.3. Baca Kaybı Enerji FMEA Çalışması

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/ İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar Üretimi	Yüksek baca gazı sıcaklığı	Kazan kapasitesine kıyasla büyük seçilmiş brülör	Gereksiz yere fazla enerji harcanmasına neden olur.	Göstergelerle baca gazı sıcaklığı kontrolü,	8	3	4	96
		Yakıt debisinin fazla olması, yoğun yanma	Kazanı terk eden gazlar normalden çok daha yüksek sıcaklıkta dışarı atılırlar. Enerji kaybı artar, yanma verimi ve kazan verimi düşer.	Oransal hava/yakıt kontrolü ve 6 ayda bir yaptırılan baca gazı analizleri	8	3	3	72
		Aşırı fazla hava ($\lambda > 1$)	Daha fazla çekilen hava nedeniyle hava fazlalık katsayısı artar. Dolayısıyla ısıtılıp dışarıya atılan hava miktarı da artar.		8	4	4	128
		Aşırı baca çekiş basıncı	Aşırı çekiş basıncı gazın yanma odasında kalış süresini kısaltarak ısı transferini azaltacak ve sonuçta yüksek baca gazı sıcaklığına neden olacaktır. Aşırı çekiş basıncı fazla hava miktarını ve baca gazı net sıcaklığını da artıracaktır.	Baca çekiş basıncı ölçümleri	8	2	3	48
		Düşük dış hava sıcaklığında çalışma, brülör ayarlarının hava sıcaklığı yüksek iken yapılmış olması	Daha fazla çekilen hava dolayısıyla hava fazlalık katsayısı ve baca gazı sıcaklığı yükselir.	Göstergelerle baca gazı sıcaklığı kontrolü,	8	1	3	24
		Kazanı aşırı yükleme		Oransal hava/yakıt kontrolü ve 6 ayda bir yaptırılan baca gazı analizleri	8	4	4	128
		Kazan ısıtma yüzeylerinin yetersiz olması	Bacadan atmosfere fazla enerji atılır. Yanma ve kazan verimi düşer.		8	4	3	96
		Duman boruların ve yüzeylerin kirli olması			8	4	3	96

B. Baca Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

Baca kaybını azaltmak için yapılabilecek iyileştirmeleri tespit etmek amacıyla balık kılçığı diyagramı ve FMEA tablosunda elde edilen verilerden yararlanarak neden nasıl ağaç diyagramı çizilmiştir. Şekil 5.5'te gösterilen ağaç diyagramında her bir hataya sebep olan etkene karşı en az bir çözüm önerisi geliştirilmiştir (Kocabaş ve Savaş, 2019c: 202).



Şekil 5.5. Neden- Nasıl Ağaç diyagramı

Şekil 5.5'te verilen Neden – Nasıl ağaç diyagramında baca gazı sıcaklığını azaltmaya yönelik tespit edilen önerilerin firmadaki mevcut uygulamaları veya uygulanabilirliklerinin her biri incelenmiş ve aşağıda belirtilmiştir:

Brülörün değiştirilmesi: Buhar kazanındaki brülör büyük seçilmiştir fakat değiştirilmesi düşünülmemektedir.

Brülör ve kazana müdahale edilerek kapasitenin düşürülmesi: Kazanlarda bulunan sıcaklık göstergeleri yardımıyla baca gazı sıcaklığı takip edilmektedir. Çok yüksek sıcaklıklara çıkıldığında teknik görevliler tarafından müdahale edilmektedir.

Hava ön ısıtıcısı veya ekonomizör monte edilmesi: Hava ön ısıtıcısı, ekonomizör gibi cihazlar monte edilerek baca gazı sıcaklığı düşürülebilir. Firmadaki buhar kazanında yanma havasının ön ısıtılması amacıyla ekonomizör kullanılmaktadırlar. Bu sayede baca gazı sıcaklığı 250 °C'den 130 °C'ye düşürülmektedir.

Yanma kontrol sistemi: Mevcut kazanda oransal kontrollü brülör kullanılmaktadır. Yakıt/hava oranlarının ayarlanması geleneksel olarak ayar kamı ve mekanik bağlantılarla yapılmaktadır. Kazan ve brülör otomatik ayarlarında çalışmasını sürdürmektedir. 6 ayda bir periyodik olarak yaptırılan baca gazı ayarı dışında bir ayar yapılmamaktadır. Hava/ yakıt oranının optimize edilmesine yönelik bir çalışma yoktur. Kazana yanma kontrol sistemi ilave edilmesi sonucunda oluşabilecek etkiler teknik ve ekonomik olarak araştırılabilir.

Çekiş düzenleyici kullanılması: Bacadan kaynaklı çekiş fazla olduğunda yararlanılmadan dışarıya atılan ısınmış hava miktarı da artar. Bunu önlemek için çekiş düzenleyici emniyet damperi kullanılabilir.

Baca Gazı kontrolü: Baca gazı analizleri şehir dışında faaliyet gösteren ilgili firmalardan gelen yetkililerce kış ve yaz sezonu olmak üzere yılda iki defa gerçekleştirilmektedir.

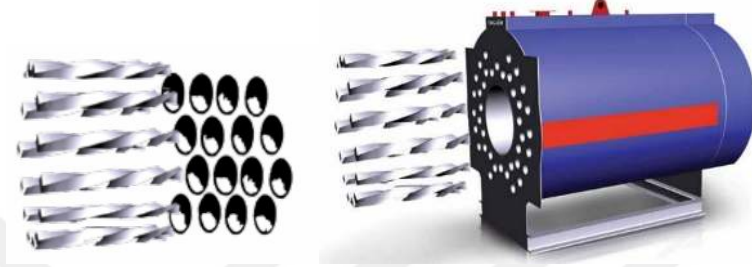
Baca Gazı analizörü kullanılması: Baca gazı analizörü satın alınarak haftalık ölçümlerle baca gazının takip edilmesi gerekliliği firma çalışanlarına açıklanmıştır. Ancak fabrika teknik personeli sadece kazanın açılması/kapanması ve arıza giderme aşamalarında görev almakta olduklarını belirtmişler, baca gazı analizörü alınsa bile kazana müdahale edecek yetkinlikte olmadıklarını ifade etmişlerdir. Bu nedenle bu fikirden vazgeçilmiştir.

Kazan borularına türbülator taktırılması: Buhar kazanına türbülator taktırılabilir ve böylece aynı miktardaki yakıttan yararlanma oranı artırılarak baca gazı sıcaklığı düşürülebilir.

Kazan borularının periyodik olarak temizlenmesi: Kazan borularının periyodik olarak temizlemesine yönelik bir uygulama bulunmamaktadır. Ancak baca gazı sıcaklığı, yüzeyler temizken olması gereken sıcaklığın 30 °C kadar üstünde ise kazanın temizlenmesi gerekmektedir (Kaya ve Öztürk, 2014: 321). Bu konuya ilişkin bakım planı hazırlanabilir.

C. Baca Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

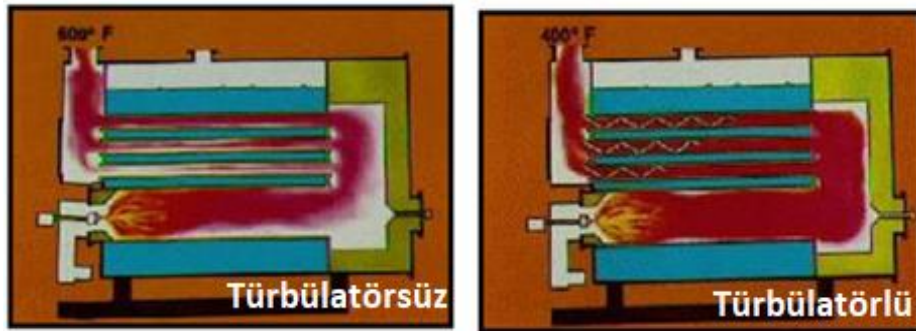
Baca kayıplarını azaltmak için tercih edilebilecek en ekonomik yöntemlerden biri türbülator kullanmaktır. Türbülatorler; duman borularında bulunan gazlara türbülans kazandırıp geçiş hızlarını düşürerek duman gazlarının yüzeyle olan temaslarını artıran ve ısı transfer artışı sağlayan ekipmanlardır. (4e Mühendislik, 2019). Şekil 5.6’da türbülatorün kazana nasıl yerleştirileceği gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Kazana türbülator yerleştirilmesi

Kaynak: (Meksis, 2019:1)

Kazanda yanma sonucu oluşan sıcak gazlar, türbülanslı bir akış rejiminde duman borularına girer ancak birkaç metre içinde laminer akış başlar ve borunun duvarları boyunca bir sınır soğutucu gaz tabakası oluşur. Bu katman, ısı transferini geciktiren bir bariyer görevi görür. Küçük bölmelerden, açısız metal şeritlerden, spiral kanatlardan veya sargılı tellerden oluşan türbülatorler kazan borularına yerleştirildiklerinde laminer sınır katmanının kırılmasını sağlarlar (ESC, 2019; EPA 2010: 17). Bu sayede kazan suyuna aktarılan ısı miktarı artarak duman gazlarının çıkış sıcaklığı düşer. Aynı zamanda kazan içindeki ısı dağılımı daha düzenli hale gelir ve kazanın ömrü uzar (4e Mühendislik, 2019). Şekil 5.7’de türbülator kullanılması durumunda baca gazı sıcaklığının önemli ölçüde düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 5.7. Türbülatorlü ve türbülatorsüz kazanlarda baca gazı sıcaklıkları

Kaynak: (ESC, 2019)

Türbülatorler, daha maliyetli bir ekonomizör veya hava ön ısıtıcısının yerine geçmiştir. Basit, kurulumu kolay ve düşük maliyetlidirler. Mevcut türbülator tasarımları, basınç düşüşlerinde önemli bir artışa neden olmaz ve doğal gaz yakıtlı kazanlarda kurum oluşumuna katkıda bulunmaz (Kocabaş ve Savaş, 2019c: 203; EPA, 2010: 18). Türbülator yatırıma geçilmesinden önce mali analizin yanında ayrıntılı bir teknik fizibilite çalışması yapılmalıdır.

Mevcut sisteme türbülator ilave edilmesi durumunda baca gazı sıcaklığı 80 °C olarak alınmış olup baca gazındaki O₂ miktarı 2 olarak kalacaktır. 1 m³ doğalgaz için baca gazı bileşenleri ve bunların 80 °C'deki entalpileri bulunmuştur. Firmada bulunan buhar kazanına türbülator takılması halinde gerçekleşecek baca gazı kaybı 91 kW olarak hesaplanmış ve Tablo 5.4'te gösterilmiştir. Mevcut durumda sistemde baca gazı kaybı 178 kW olup 87 kW tasarruf sağlanabilecektir.

Tablo 5.4. Türbülator takılması durumunda baca gazı kaybı

	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	TOPLAM
1 kmol doğalgazın yanması sonucu baca gazı bileşenleri (kmol)	1,030	2,020	0,237	8,561	11,848
1 m ³ (44,64 mol/m ³) doğalgaz için baca gazı bileşenleri (mol/m ³)	45,991	90,179	10,576	382,174	528,920
80 °C'de entalpi (kJ/mol)	2,155	1,859	1,63	1,6	7,244
1 m ³ doğalgaz için baca gazı bileşenlerinin entalpisi (kJ/m ³ doğalgaz)	99,111	167,642	17,239	611,479	895,47
Kaybedilen ısı miktarı (kJ/h) (saatlik doğalgaz tüketimi 366 Nm ³ alınmıştır)					327.742
Kaybedilen ısı miktarı (kW) (saatlik doğalgaz tüketimi 366 Nm ³ alınmıştır)					91

Kaynak: (Büyüktür, 1985: 660, Durukafa, 2010: 88)

Buhar kazanına türbülator takılması durumunda saatlik 87 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 89.851 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.5'te gösterilmiştir. Türbülator yatırımının kendini 3,5 ay gibi bir sürede geri ödeyebileceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.5. Türbülator takılması durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	87	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	501.120	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	89.851	TL/yıl
Yatırım Maliyeti	26.250	TL
CO ₂ Emisyonunda Azalma	85	ton/yıl
Geri ödeme süresi	3,5	ay

5.1.1.4. Yanma Kaybı

Yanma kaybı; brülörden yanmamış olarak atılan yakıtın sahip olduğu ısı enerjisine bağlı kayıptır. Yakıt tamamen yandığında, içerisindeki karbon (C) karbondioksit (CO₂), hidrojen (H₂) su buharına (H₂O), kükürt (S) kükürt-dioksit (SO₂) dönüşmektedir. İdeal- stokiyometrik koşullarda C ve H₂'nin tam yanması halinde yanma denklemleri verilmiştir (Bilgin, 2007: 59):

Tam Yanma



Oksijenin yetersiz olması durumunda yanma tam olarak gerçekleşmeyecek karbon karbondioksit yerine karbonmonoksit (CO) oluşacaktır. Bunun sonucunda ise (5.6) nolu eşitlikte verilen yanma denkleminde görülebileceği gibi eksik yanma nedeniyle %70 civarında enerji kaybı yaşanacaktır (Bilgin, 2007: 60).

Eksik Yanma



Bir kazanın yanma hücresinde iyi bir yanma gerçekleşebilmesi için yakıt ve hava uygun oranlarda karıştırılmalıdır. Baca gazı analizörü kullanılarak baca gazlarında bulunan oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit değerleri düzenli olarak izlenerek yanma verimi optimize edilebilmektedir. Baca gazları içerisinde oksijen (O₂) oranının mümkün olduğunca düşük olması istenmektedir. Doğalgazda %2-3, sıvı yakıtta %3-4, katı yakıtta %5-6 O₂ oranı baca gazı analizleri için ideal değerler olarak kabul edilir. Karbondioksitin (CO₂) baca gazları içerisinde yüksek oranda bulunması, iyi bir yanmanın göstergesi olmakla birlikte CO₂'in sera etkisine sebep olması nedeniyle emisyon olarak değerlendirilmektedir. Baca gazında karbonmonoksit (CO) bulunması eksik-yetersiz yanmanın en iyi kanıtıdır. Yakıtta verilen O₂ artırılarak, eksik yanma tamamlanmalıdır. CO mutlaka CO₂'e dönüştürülmelidir. Baca gazı analizlerinde CO miktarı, 100 ppm değerine kadar normal kabul edilir (Kaya ve Öztürk, 2014: 287; Bilgin, 2007: 60; Savaş ve Kocabaş, 2019: 360).

Yakma sistemlerinden beklenen temel işlev daha verimli, temiz ve güvenli yanmanın sağlanmasıdır. Günümüz yakma ve ısı teknolojilerinin sunduğu, teknik ve mali açıdan uygulanabilirliği olan teknolojik imkânlar sayesinde yüksek verim değerleri elde etmek

mümkündür. Sabit bir kazan ısı çıkış oranı için, yanma veriminde olacak her %1’lik bir artış, %1’lik bir yakıt tasarrufu demektir (Kanoğlu, 2010: 15). Verim artışının sağladığı enerji tasarrufu sayesinde bu uygulamaların gerektirdiği ilk yatırım maliyetleri de kısa süre içinde kendini geri ödeyecektir (Durukafa, 2014: 24). Yanmanın optimum düzeyde gerçekleşmesiyle enerji maliyetleri düşecek, cihazların ömrü artacak ve çevreye duyarlı üretim yapma imkânı doğacaktır (Kaya ve Öztürk, 2014: 296).

A. Yanma Verimini Etkileyen Faktörler

a. Fazla Hava

Yanma olayı hava ve yakıtın karıştırılması ile meydana gelir. Tam yanma veya teorik yanma bir birim yakıt ile bir birim havanın kimyasal reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Yalçın, 2007: 3). Az hava ile yanmada yetersiz oksijen (O_2) sebebi ile karbondioksit (CO_2) yerine karbonmonoksit (CO) oluşur. Mükemmel yanmanın sağlanması için, genel bir kural olarak her zaman teorik ihtiyaçtan daha fazla hava kullanılır. Buna fazla hava denilmektedir (Bilgin, 2007: 60; Ünlü, 2009: 77). Hava miktarının teorik miktardan çok fazla veya az olması verimi düşürür. Bu nedenle fazla hava miktarının mümkün olan en uygun seviyede tutulması gerekir (Uylukçuoğlu, 2009: 39). Yakıt olarak doğalgazın kullanıldığı kazanlarda fazla hava oranı için optimum değer %10 olarak kabul edilebilir. Bu değer üzerinde çalışıldığı durumlarda önemli miktarda hava ısıtılarak atmosfere verilmiş olur (Çanka Kılıç, 2017: 153). Baca gazında ölçülen O_2 değerleri kullanılarak fazla hava oranı (5.7) nolu eşitlikte verilen formül yardımıyla hesaplanabilir (Savaş ve Kocabaş, 2019: 360; Uylukçuoğlu, 2009: 39):

$$\text{Fazla Hava Oranı (\%)} = \left(\frac{O_2}{21 - O_2} \right) \times 100 \quad (5.7)$$

Fazla hava oranı yerine hava fazlalık katsayısı da kullanılabilir. Birim miktarda yakıtı yakmak için verilen gerçek hava debisinin, teorik hava debisine oranına hava fazlalık katsayısı (λ) denir (Duru Kan, 1997: 12; Uylukçuoğlu, 2009: 39). Optimum yanma, hava fazlalık katsayısı 1 değerinde iken sağlanır. Hava fazlalık katsayısı (5.8) nolu eşitlik kullanılarak belirlenebilir (Duru Kan, 1997: 13).

$$\lambda = 1 + \left(\frac{O_2}{21 - O_2} \right) \quad (5.8)$$

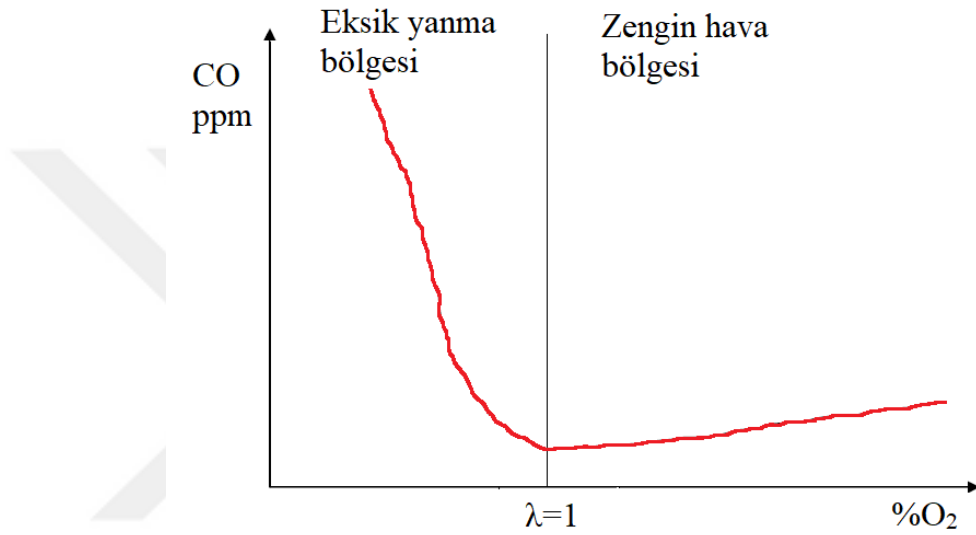
Yakma teknolojisinde amaç; hava fazlalık katsayısının 1 ($\lambda=1$) olmasını sağlayacak şekilde verilen yakıtı göre hava miktarını ayarlamaktır. O_2 ile CO arasındaki ilişki Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi O_2 ’nin az olduğu bölgede, CO değeri hızla artmakta, yani

yakıtın bir kısmı yanmaya müdahil olmadan atılmaktadır. Zengin hava karışımı bölgede ise CO çok az miktarda artmasına karşılık O₂ değerinin yüksek olmasından dolayı, yanmaya müdahil olmayan bağımsız O₂ molekülleri ocak içindeki ısıyı bünyesinde hapsederek ısı kaybına yol açmaktadır (Yalçın, 2007: 3).

$\lambda=1$: Tam yanma (eksiksiz yanma) sınırı

$\lambda<1$: Eksik yanma bölgesi

$\lambda>1$: Zengin hava karışımı yanma bölgesi



Şekil 5.8. Yanma tepkimesinde CO-O₂ eğrisi

Kaynak: (Yalçın, 2007: 5)

b. Baca Çekişi

Verimli bir yanma tesisi için ölçümü gerekli bir parametrede baca çekiş basıncıdır. Baca çekiş basıncı, yanma gazlarının kazan içerisindeki geçiş hızını ve dışarıdan kazan içine emilecek ikincil hava miktarını belirler (Duru Kan, 1997: 7). Baca çekişinin aşırı olması durumunda baca gazı miktarı artar ve artan bu miktardaki hava, baca gazı sıcaklığına kadar ısınıp enerji alacağı için çok daha fazla ısınıp bacadan atılmasına sebep olur. Ayrıca baca gazı miktarının artması, gaz debisinin dolayısıyla hızının artmasına ve ısı transferinin düşmesine neden olmaktadır (Uylukçuoğlu, 2009: 39). Baca çekişinin yetersiz olması durumunda ise içeriye giren hava miktarı azalır. Bu durum; yanmanın kötüleşmesine, yoğun duman oluşmasına ve yüksek miktarda CO emisyonuna neden olur (Duru Kan, 1997: 4).

c. Hava kaçakları

Brülör ve kazan niteliğinden kaynaklanan hava kaçakları yakıt/O₂ dengesinin bozulmasına dolayısıyla eksik yanmaya neden olur. Bu nedenle; brülör bağlantı flanşı contalı olmalı, patlama kapakları kasıtlı olmamalı, contalı ve tam kapanabilir olmalıdır (Kaya ve Öztürk, 2014: 284; Bilgin 2007: 63).

d. Yakıt Sıcaklık ve Basıncı

Brülörlerde kullanılan yakıt basıncının ve sıcaklığının arzu edilen değerde olmaması, yakıtın yeterince atomize olmamasına buda eksik yanmaya sebep olur (Kaya ve Öztürk, 2014: 283). Ateşleme için gerekli sıcaklığın altına düşüldüğünde o noktadaki yanma son bulabilir. Yakıt basıncının uygun değerlerde olmaması durumunda yakıt/O₂ dengesi bozulur, yanma verimsizleşir (Duru Kan, 1997: 6).

e. Dış Sıcaklık Değişimi

Ortam sıcaklığı değiştikçe çekilen fazla hava miktarı da değişmekte dolayısıyla yanma süreci dış hava sıcaklığındaki değişimlerden etkilenmektedir. Yüksek bir dış hava sıcaklığında brülör ayarı yapıp aynı brülör ayarıyla sıfırın altında bir dış sıcaklık değerinde çalışıldığında, daha fazla çekilen hava dolayısıyla hava fazlalık katsayısı ve baca gazı miktarı yükselecektir. Tam tersi bir durumda, yani brülör ayarının soğuk havada yapılması ve dış sıcaklığın artması halinde ise, çekilen hava miktarı azalacak ve hava fazlalık katsayısı düşecektir. Bu durumda yanma kötüleşecek, kurum oluşacak ve yakıtın bir kısmı yanmadan dışarı atılacaktır (Savaş ve Kocabaş, 2019: 361; Ünlü, 2009: 78).

B. Yanma Verimi Hesaplama Yöntemi

Bacada ölçülen oksijen değeri, ortam havası sıcaklığı ve baca gazı sıcaklığı bilinirse Siegert formülü kullanarak kazan yanma verimliliği kolayca hesaplanabilir (Kaya ve Öztürk, 2014: 289; Bilgin, 2007: 62). Siegert formülü (5.9) nolu eşitlikte verilmiştir (DÇD Baltur, 2010: 43). Bu formül elektronik baca gazı analiz cihazlarında kullanılan formüllerden biri olup yüksek hassasiyette sonuç vermektedir (Duru Kan, 1997: 8). Bu formüle göre doğalgaz yakıtlı kazanlarda baca gazındaki O₂ miktarının %1 azalması, yanma veriminin yaklaşık %0,6 oranında artmasına neden olmaktadır. Diğer bir deyişle, baca gazındaki her %2 O₂ düşüşü yanma verimine %1 artış getirmektedir. (5.10) nolu eşitlik kullanılarak yanma verimi hesaplanabilir (Savaş ve Kocabaş, 2019: 362).

$$Q_s = (T_f - T_a) \times \left[\frac{A_2}{21 - O_2} + B \right] \quad (5.9)$$

$$\eta = 100 - Q_s \quad (5.10)$$

Q_s : Bacadaki ısı kaybı (%)

T_f : Baca gazlarının sıcaklığı (°C)

T_a : Yanma havası sıcaklığı (°C)

η : Yanma verimi (%)

O_2 : Ölçülen O_2 değeri (%)

$A_2 = 0,66$ (Doğalgaz için tipik yakıt değeri)

$B = 0,009$ (Doğalgaz için tipik yakıt değeri)

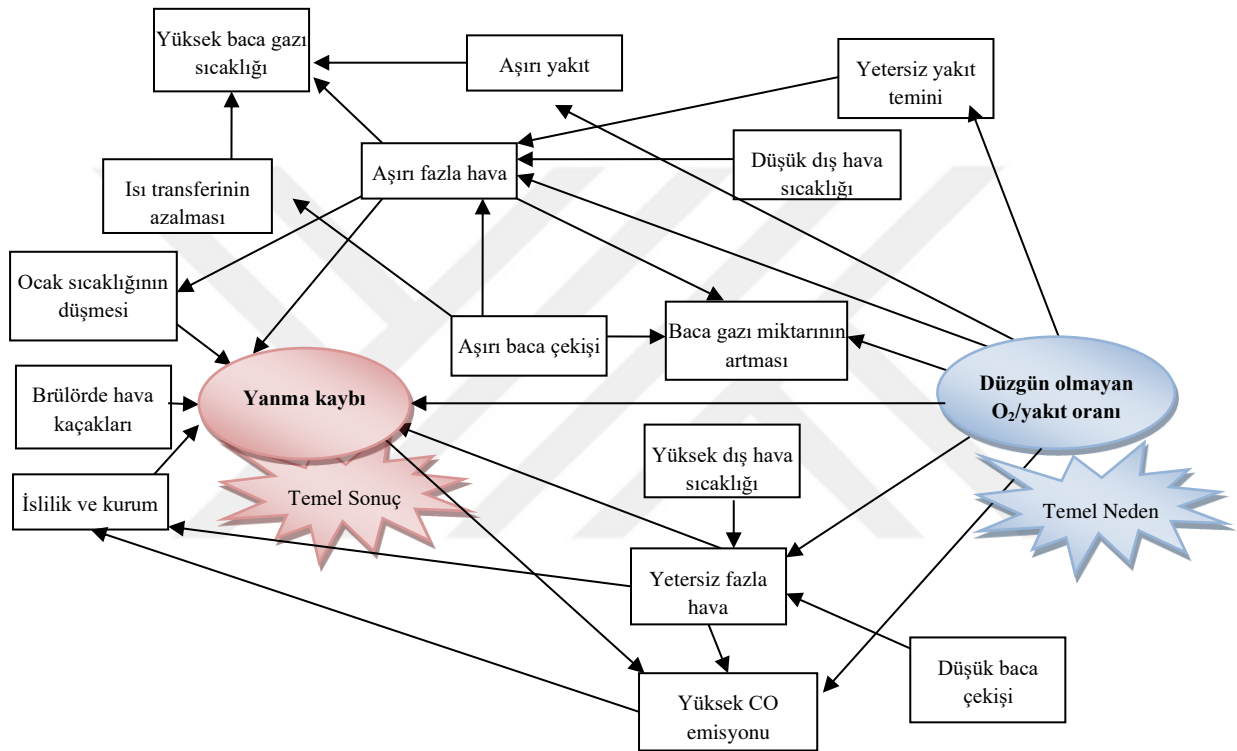
C. Yanma Kaybı Enerji FMEA Çalışması

Buhar üretimi prosesinde yanma kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.6'da gösterilmiştir. Yanma kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır (Savaş ve Kocabaş, 2019: 363). Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip riskler “eksik fazla hava, $\lambda < 1$ ” ve “aşırı fazla hava, $\lambda > 1$ ” dır. Bu riskler hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.6. Yanma kaybı Enerji FMEA çalışması

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/ İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar üretimi	Yüksek CO emisiyonu	Alevin yanma odasındaki soğuk yüzeylere çarpması	Yanmanın eksik ve yetersiz olduğunun bir göstergesi olup çevre kirliliğine neden olur. Isı ve kuruma neden olarak ısı transferini güçleştirir.	6 ayda bir baca gazı analizi	6	1	6	36
		Baca çekişinin düşük olması						
		Yetersiz fazla hava						
	Eksik fazla hava, $\lambda < 1$	Uygun olmayan O ₂ /yakıt oranı	Üretilen enerji düşer. Isı ve kurum oluşumu başlar. Isı ve kurum alevin oluşmasını engelleyerek yanma verimini düşürür.	6 ayda bir baca gazı analizi	7	3	6	126
		Baca çekişinin düşük olması						
	Aşırı fazla hava, $\lambda > 1$	Uygun olmayan O ₂ /yakıt oranı	Yanmaya iştirak etmeyen hava ocakta ısıtılarak bacadan atılır, yanma dengesi bozulur ve yanma verimi düşer. Soğuk hava ile seyreltmeyle birlikte gelen enerji kayıpları yaşanır.	6 ayda bir baca gazı analizi	7	4	6	168
		Yetersiz yakıt temini						
		Aşırı baca çekişi						
	Brülörde eksik yanma	Yakıt basıncının ve sıcaklığının istenilen değerde olmaması	Yanma verimi düşer.	Göstergelerle kontrol, 6 ayda bir baca gazı analizi	8	1	5	40
		Hava kaçakları						
	Yüksek dış hava sıcaklığı	Brülör ayarının kış şartlarına göre yapılmış olması	Hava miktarı azalarak hava fazlalık katsayısı ve dolayısıyla yanma verimi düşer.	6 ayda bir baca gazı analizi	8	2	6	96
	Düşük dış hava sıcaklığı	Brülör ayarının yaz şartlarına göre yapılmış olması	Çekilen fazla hava oranı artar ve baca gazı sıcaklığı yükselir.	6 ayda bir baca gazı analizi	8	2	6	96

Literatür ve hazırlanan FMEA tablosu incelendiğinde kazanlardaki yanma kaybına ilişkin birbiriyle bağlantılı çok fazla etken olduğu ve problemin karmaşık bir yapı içerdiği sonucuna varılmıştır. Yanma kaybını azaltmaya yönelik yapılacak iyileştirme çalışmasını belirleyebilmek için öncelikle bu etkenler arasındaki ilişkileri tanımlamak ve problemin asıl kaynağına ulaşmak gerekmektedir. Bu sebeple ilişki diyagramı kullanılmasına karar verilmiş ve yanma kaybında söz konusu riskler ve aralarındaki ilişkiler Şekil 5.9’da verilen ilişki diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Yanma kaybı ilişkiler diyagramı

Kaynak: (Savaş ve Kocabaş, 2019: 364)

Şekil 5.9’da verilen diyagrama göre kendinden çıkan ok sayısı en fazla olan sorun “düzensiz olmayan O₂/yakıt oranı” olarak tespit edilmiştir. Bu duruma göre yanma kaybıyla ilgili problemin temel nedeni “düzensiz olmayan O₂/yakıt oranı” dır. Gelen ok sayısı incelenerek problemin temel sonucunun “yanma kaybı” olduğu belirlenmiştir. Bu diyagramdan çıkarılabilecek sonuç şöyle özetlenebilir: “Düzensiz olmayan O₂/yakıt oranı nedeniyle yanma kaybı gerçekleşmektedir”. Bu nedenle, O₂/yakıt oranının sürekli ve düzenli bir şekilde kazana temin edilmesine yönelik iyileştirme çalışmalarına öncelik vermek gerekmektedir.

D. Yanma Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

Yanma kaybını azaltmak amacıyla günümüzde yapılan başlıca uygulamalar ve çalışmanın yürütüldüğü fabrikada bu uygulamaların gerçekleştirilme durumları açıklanmıştır:

a. Baca Gazı Ölçümü: Kazanlarda yüksek yanma verimi elde edilmesi, bunun sürekliliğinin sağlanması ve aynı zamanda emisyonların azaltılabilmesi için baca gazı analizörleri yardımıyla, baca gazı bileşenleri periyodik olarak izlenebilir. Böylece baca gazı sıcaklığı ve baca gazı bileşim değerleri kontrol edilerek yakma havası ayarlanabilir, optimum yanma oluşması için yanmaya etki eden parametrelere zamanında müdahale edilebilir (Ünlü, 2009: 78; Bilgin, 2007: 59; Bilgiç 2004).

Mevcut Uygulama: Baca gazı analizleri kış ve yaz sezonu olmak üzere yılda toplam iki kere şehir dışındaki ilgili firmalardan gelen yetkililerce gerçekleştirilmektedir. Kazan ve brülör otomatik ayarlarında çalışmasını sürdürmektedir. 6 ayda bir periyodik olarak yaptırılan baca gazı ayarı dışında bir ayar yapılmamaktadır.

b. Yanma Havaının Isıtılması: Besleme havası sıcaklığı brülör için izin verilen sıcaklığa kadar yükseltilebilir. Kazanlarda yanma havası olarak verilen havanın ısıtılması ile kazan veriminde artış sağlamak mümkündür. Bu enerjinin kaynağı olarak kompresörlerden gelen hava veya baca gazı atık ısısı kullanılabilir. Yanma havasının ısıtılmasıyla sağlanacak her 28 °C'lik sıcaklık artışı kazan verimini yaklaşık olarak %1 oranında artırabilmektedir (Uylukcuoğlu, 2009: 40; Kanoğlu, 2010: 18).

Mevcut Uygulama: Mevcut kazan sisteminde yanma havasının ısıtılmasını sağlayan ekonomizör bulunmaktadır. Bu sayede yanma havası sıcaklığı yaz ve kış şartlarında 118 °C'ye getirilerek kullanılmaktadır.

c. Yakma Yönetim Sistemleri: Hem hava/yakıt ayar kontrolü hem de brülör kontrolünü sağlamak amacıyla günümüzde kullanılan en son teknoloji mikroprofesör tabanlı O₂/CO Trim yakma yönetim sistemidir (Bilgin, 2007: 63). Trim kelimesi, düzeltme anlamına gelmekte olup burada ufak hava ayar düzeltmelerini ifade etmek için kullanılmaktadır (Hızıroğlu, 2007: 148). Bahsedilen sistemle baca gazı ölçümleri sürekli ve otomatik şekilde yapılmakta; oksijen, karbonmonoksit ve karbondioksit değerleri, baca gazı sıcaklığı ile yanma verimi sürekli olarak takip edilmekte, yakıt karakterinde ve dış hava şartlarında olabilecek değişikliklerin etkisi sistemin yakıt/hava ayarına otomatik müdahalesiyle önlenabilmektedir. Ayrıca frekans konvertörlü brülör fanları da sisteme ilave edildiğinde fan enerji tüketiminden

de tasarruf elde edilmekte, hassas ve oransal kontrol sayesinde tam yanma gerçekleştirilerek kazan verimi artırılmakta ve yakıt tasarrufu sağlanabilmektedir (Bilgin, 2007: 63). Söz konusu sistem, aynı zamanda çevreye atılan emisyonların azaltılmasında da önemli bir etkiye sahiptir.

Mevcut Uygulama: Hava/ yakıt oranının optimize edilmesine yönelik bir çalışma yoktur. Fabrika teknik personeli sadece kazanın açılması/kapanması ve arıza giderme aşamalarında görev almakta, kazan ve brülöre müdahale etmemektedir. İşletmeye alma sırasında ayarlanmış hava/yakıt oranlarının her zaman aynı kalabilmesini sağlayan yakma yönetim sistemi kazana adapte edilebilir.

E. Yanma Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

İlişkiler diyagramında öne çıkan O_2 /yakıt oranının sürekli optimum değerlerde çalıştırılmasının sürekliliğini ve devamlılığını sağlamak amacıyla çeşitli çözümler üretilmiştir. Bu çözümlerden ilki temin edilen baca gazı analizörü aracılığıyla baca gazı değerlerini haftalık olarak kontrol ederek kazana müdahale etmektir. Ancak yetersiz sayıda personel olması ve mevcut personellerin kazana müdahale edecek yetkinliklerinin olmaması dolayısıyla bu fikir çözüm önerileri arasından çıkarılmıştır. Diğer bir çözüm önerisi olan yakma havasının ön ısıtılması firmada hâlihazırda buhar kazanında bulunan ekonomizör vasıtasıyla uygulanmaktadır. Yanma verimi kazanlarda kullanılan enerji tüketimini büyük oranda etkilediğinden burada insan hatasından bağımsız ve çevresel etkenlerden çok fazla etkilenmeyecek hata önleyici Poka-Yoke tekniği uygulanmasının uygun olacağı ön görülmüştür. Bu noktada yakma yönetim sistemleri kullanılması düşünülebilir.

Hava/yakıt ayar kontrolünü sağlamak amacıyla günümüzde kullanılan en son teknoloji kapalı kontrol mantığı ile çalışan mikropfesör tabanlı O_2 /CO Trim yakma yönetim sistemidir (Ünlü, 2009: 78). Bacaya monte edilen baca gazı sensörü ve transmidi vasıtasıyla baca gazındaki O_2 ve CO miktarı ölçülerek optimum hava/yakıt oranını sağlayacak şekilde oluşturulan "Kapasite-Oksijen Eğrisi", sürekli olarak denetlenerek en ideal eğri biçimini otomatik olarak kendisi düzeltmektedir. Bu eğri; mevsimsel değişen barometrik koşullar, yakıt ve hava teknik değerleri gibi tüm işletme şartlarındaki değişimleri algılayarak optimizasyon eğrisini sürekli yenilemektedir (Savaş ve Kocabaş, 2019: 365). Hava yakıt oranının optimizasyonunu cihazın kendisi "Öğrenme Eğrisi" mantığıyla sürekli olarak denetlediği için optimizasyon eğrisinin oluşumunu devreye alma ekibinin iradesine bırakmaz. Bu sistem kazan sistemlerine uyarlanarak her koşulda yanma verimini insanın yanlış müdahalesine veya havanın sızması riskine karşı sürekli optimize etmektedir (Yalçın, 2007: 6).

Yanma kaybını önlemek için sisteme O₂/CO Trim kontrol sistemi eklenecek olursa baca gazındaki O₂ miktarı 2 değerinden 1,2'ye kadar düşürülebilir. Siegert yanma formülüne göre doğalgaz yakıtlı kazanlarda baca gazındaki O₂ miktarının %1 azalması, yanma veriminin yaklaşık %0,6 oranında artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yanma veriminin yaklaşık % 0,5 artması durumunda baca gazı sıcaklığının 130 °C'den yaklaşık 120 °C'ye düşeceği öngörülmüştür. Bu durumda baca gazı kaybı Tablo 5.7'de hesaplanarak verilmiştir. Bu tabloya göre sisteme Trim kontrol ilave edildiğinde yanma kaybı 154 kW olarak gerçekleşecektir. Mevcut durumda sistemde baca gazı kaybı 178 kW olup 24 kW tasarruf sağlanabilecektir.

Tablo 5.7. Kazana Trim kontrol sistemin dahil edilmesi sonrası baca gazı kaybı

	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	TOPLAM
1 kmol doğalgazın yanması sonucu baca gazı bileşenleri (kmol)	1,030	2,020	0,1364	8,1829	11,370
1 m ³ (44,64 mol/m ³) doğalgaz için baca gazı bileşenleri (mol/m ³)	45,991	90,179	6,089	365,308	507,567
120 °C'de entalpi (kJ/mol)	3,732	3,214	2,82	2,766	12,532
1 m ³ doğalgaz için baca gazı bileşenlerinin entalpisi (kJ/m ³ doğalgaz)	171,639	289,834	17,172	1010,442	1489,09
Kaybedilen ısı miktarı (kJ/h) (saatlik doğalgaz tüketimi 373 Nm ³ alınmıştır)					555.429
Kaybedilen ısı miktarı (kW) (saatlik doğalgaz tüketimi 373 Nm ³ alınmıştır)					154

Kaynak: (Büyüktür, 1985: 660, Durukafa, 2010: 88)

Buhar kazanına O₂ / CO Trim kontrol sisteminin adapte edilmesi durumunda saatlik 24 kW tasarruf elde edilebilecektir. Bahsedilen sisteme inverter kontrollü brülör fanları ilave edilerek fan enerji tüketiminden de ilave tasarruf sağlanarak toplamda yıllık 32.878 TL tasarruf sağlanacağı öngörülmüştür. Bu durumda yatırımının geri ödeme süresi 4,9 yıl olarak belirlenmiş ve Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. O₂/CO Trim kontrolü sisteminin kurulması durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	24	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	138.240	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	24.786	TL/yıl
İnverter Kontrol ile Elektrik Tüketimi Tasarrufu	8.092	TL/yıl
Toplam Enerji Tasarrufu	32.878	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	23	ton/yıl
Toplam Yatırım maliyeti	160.000	TL
Geri ödeme süresi	4,9	yıl

5.1.1.5. Entalpi Kaybı

Bacadan atılan gazın içerisinde bulunan su buharı ile taşınan gizli ısı enerjisi kaybıdır. Hidrojen kökenli yakıtlarda yanma sonucu oluşan baca gazı bileşenlerinden biri de su buharıdır (H₂O). Yanma denklemi (5.11) nolu eşitlikte gösterilmiştir. Burada 4 gr hidrojen (H₂), 32 gr oksijenle (O₂) birleşerek 36 gr su (H₂O) oluşturmaktadır. Bir başka ifadeyle 1 gr hidrojen (H₂), 9 gr su (H₂O) oluşumuna neden olmakta ve ortaya çıkan su ise baca gazları içerisinde su buharı olarak kazanı terk etmektedir (Bilgin, 2007: 59). 1 m³ metan (CH₄) yandığında yaklaşık 1, 6 kg su oluşacaktır. Doğalgazın yanması sonucu oluşan duman gazında bulunan su buharı ile taşınan enerji, toplam yanma enerjisinin %6'sı kadardır (Durukafa, 2010: 70).



A. Entalpi Kaybı Enerji FMEA Çalışması

Buhar üretimi prosesinde entalpi kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.9'da gösterilmiştir. Entalpi kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır. Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip risk "baca gazında su buharı oluşması" dır. Bu risk hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.9. Entalpi kaybı Enerji FMEA çalışması

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar üretimi	Baca gazında su buharı oluşması	Yanma sonucu su buharı açığa çıkması	Kazandaki faydalı enerjinin bir kısmının su buharı şeklinde bacadan atılmasına neden olur. Kazan verimi düşer.		8	5	4	160

B. Entalpi Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

Entalpi kaybını azaltmak amacıyla günümüzde yapılan başlıca uygulamalar ve çalışmanın yürütüldüğü fabrikada bu uygulamaların gerçekleştirilme durumları açıklanmıştır:

Yoğuşmalı ekonomizör kullanılması: Doğalgaz gibi hidrojen kökenli yakıtlarda yanma sonucu baca gazlarında oluşan su buharı yoğuşturularak duyulur ısıya ilaveten gizli ısınin da geri kazanımı sağlanabilir. Bu işlem için paslanmaz çelik yoğuşmalı ekonomizer kullanılabilir (Bilgin, 2007: 65; Durukafa, 2010: 94).

Mevcut Uygulama: Firmadaki buhar kazanında ekonomizör bulunmakta ve yanma havasının ön ısıtılmasında kullanılmaktadırlar. Mevcut ekonomizöre yoğuşmalı ekonomizör ilave edilerek baca gazı sıcaklığı bir miktar daha düşürülebilir. Bu sayede entalpi kaybı azaltılabilir. Yoğuşmalı ekonomizörden elde edilen atık ısı besi suyunun ısıtılmasında kullanılabilir.

C. Entalpi Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

Doğalgaz, LPG, motorin gibi kükürt içermeyen yakıtların duman gazı, uygun malzemeden yapılan ekonomizörler vasıtasıyla yoğuşturularak önemli miktarda ısı geri kazanımı gerçekleştirilebilir. Baca gazının gizli enerjisinden faydalanabilmek için krom ve nikel alaşımlı çelik malzemeden üretilmiş yoğuşmalı ekonomizörler kullanılır. Özellikle kondens dönüşünün olmadığı ya da çok düşük olduğu sistemlerde taze besi suyunun besi suyu tankına girmeden önce ısıtılması için yoğuşmalı ekonomizör kullanılması yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlar. Bu sayede 10-20 °C’de gelen taze besi suyu 90-100 °C’ye yükseltilir ve degazöre beslenmesi gereken buhar miktarında ciddi miktarda azalma sağlanır (Durukafa, 2014: 28; Durukafa, 2010: 78).

Mevcut kazan sisteminde entalpi kaybını önlemek için sisteme yoğuşmalı ekonomizör eklenecek olursa baca gazı sıcaklığı 130 °C’den 45 °C’ye kadar düşürülebilir. Baca gazındaki O₂ miktarı değişmeyeceği için 2 olarak kalır. Elde edilen ısı kazan besleme suyunun ısıtılmasında kullanılabilir. Firmada bulunan buhar kazanına yoğuşmalı ekonomizör ilave edildiğinde gerçekleşecek entalpi kaybı 32 kW olarak hesaplanmış ve Tablo 5.10’da gösterilmiştir. Mevcut durumda sistemde baca gazı kaybı 178 kW olup yaklaşık 146 kW tasarruf sağlanabilecektir. Bu ısı prosesten geri dönmeyen kondensi telafi etmek için sisteme eklenen 18 °C taze besi suyunu ısıtmak için kullanılabilir.

Tablo 5.10. Yoğuşmalı ekonomizör sisteminin dahil edilmesi sonrası baca gazı kaybı

	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	TOPLAM
1 kmol doğalgazın yanması sonucu baca gazı bileşenleri (kmol)	1,030	2,020	0,237	8,561	11,848
1 m ³ (44,64 mol/m ³) doğalgaz için baca gazı bileşenleri (mol/m ³)	45,991	90,179	10,576	382,174	528,920
45 °C’de entalpi (kJ/mol)	0,776	0,673	0,589	0,579	2,617
1 m ³ doğalgaz için baca gazı bileşenlerinin entalpisi (kJ/m ³ doğalgaz)	35,689	60,690	6,229	221,279	323,89
Kaybedilen ısı miktarı (kJ/h) (saatlik doğalgaz tüketimi 360 Nm ³ alınmıştır)					116.599
Kaybedilen ısı miktarı (kW) (saatlik doğalgaz tüketimi 360 Nm ³ alınmıştır)					32

Kaynak: (Büyüktür, 1985: 660, Durukafa, 2010: 88)

Buhar kazanına yoğuşmalı ekonomizör ilave edilerek baca gazı sıcaklığı 45 °C civarlarına kadar düşürülebilir. Bu durumda saatlik 146 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 150.784 TL tasarruf sağlanacağı öngörülmüştür. Yoğuşmalı ekonomizör yatırımının geri ödeme süresi 18 ay olarak belirlenmiş ve Tablo 5.11’de gösterilmiştir.

Tablo 5.11. Yoğuşmalı ekonomizör eklenmesi durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	146	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	840.960	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	150.784	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	142	ton/yıl
Toplam Yatırım maliyeti	220.000	TL
Geri ödeme süresi	18	ay

5.1.1.6. Baca Gazı Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

İyileştirme önerileri hem mali hem de teknik yönden tek tek değerlendirilmelidir. Mevcut kazanın karşı basıncı çok yüksek olup duman gazı hızları da yüksektir ve bu kazanlarda türbülátörler titreşime yol açarak faydadan çok zarar getirebilir. Bundan dolayı mevcut sisteme türbülátör ilave edilmesi önerisinden vazgeçilmiştir. Bunun yerine yoğuşmalı ekonomizör ve O₂/CO Trim kontrol sisteminin her ikisi birlikte kazana dahil edilebilir. Her iki sistem birden uygulandığında O₂ miktarı 2 değerinden 1,2’ye inecek ve baca gazı sıcaklığı da 130 °C’den 45 °C’ye kadar düşürülebilecektir. Bu durumda gerçekleşecek baca gazı kaybı 31 kW olarak hesaplanmış ve Tablo 5.12’de verilmiştir.

Tablo 5.12. Trim kontrol ve yoğunlaşmalı ekonomizör sisteminin birlikte dahil edilmesi sonrası baca gazı kaybı

	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	TOPLAM
1 kmol doğalgazın yanması sonucu baca gazı bileşenleri (kmol)	1,030	2,020	0,1364	8,1829	11,370
1 m ³ (44,64 mol/m ³) doğalgaz için baca gazı bileşenleri (mol/m ³)	45,991	90,179	6,089	365,308	507,567
45 °C’de entalpi (kJ/mol)	0,776	0,673	0,589	0,579	2,617
1 m ³ doğalgaz için baca gazı bileşenlerinin entalpisi (kJ/m ³ doğalgaz)	35,689	60,690	3,587	211,513	311,48
Kaybedilen ısı miktarı (kJ/h) (saatlik doğalgaz tüketimi 360 Nm ³ alınmıştır)					112.132
Kaybedilen ısı miktarı (kW) (saatlik doğalgaz tüketimi 360 Nm ³ alınmıştır)					31

Kaynak: (Büyüktür, 1985: 660, Durukafa, 2010: 88)

Buhar kazanına yoğunlaşmalı ekonomizör ve O₂ Trim kontrol sisteminin her ikisi birlikte kazana dahil edilebilir. Mevcut durumda sistemde baca gazı kaybı 178 kW olup her iki öneri birden uygulandığında saatlik 147 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 151.817 TL tasarruf sağlanacağı öngörülmüştür. Bahsedilen sisteme inverter kontrollü brülör fanları ilave edilerek fan enerji tüketiminden de 8.092 TL ilave tasarruf sağlanabilecektir. Bu durumda yatırımının geri ödeme süresi 28,5 ay olarak belirlenmiş ve Tablo 5.13’te gösterilmiştir.

Tablo 5.13. Trim kontrol ve yoğunlaşmalı ekonomizör sisteminin birlikte dahil edilmesi sonrası enerji tasarrufu

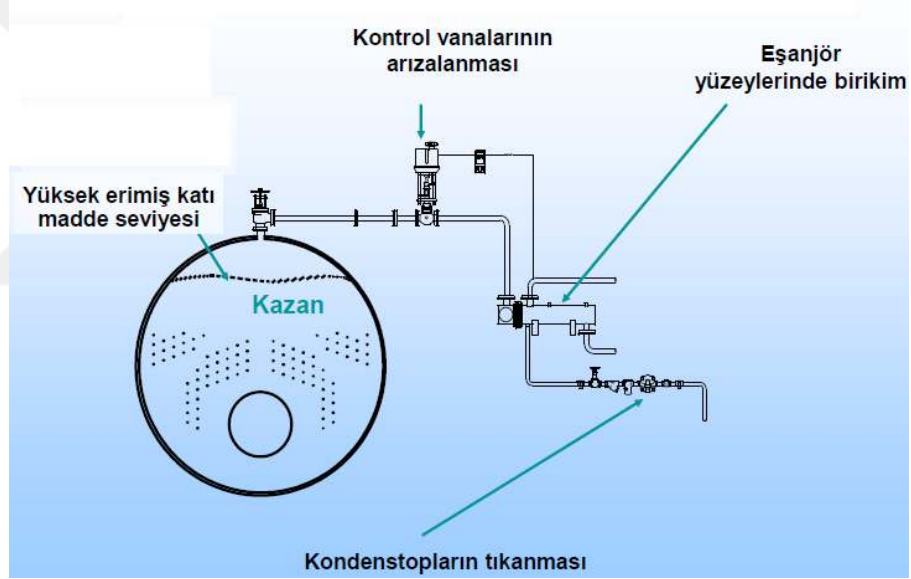
Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	147	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	846.720	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	151.817	TL/yıl
İnverter Kontrol ile Elektrik Tüketimi Tasarrufu	8.092	TL/yıl
Toplam Enerji Tasarrufu	159.909	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	143	ton/yıl
Toplam Yatırım maliyeti	380.000	TL
Geri ödeme süresi	28,5	ay

5.1.2. Blöf Kaybı

Kazan içerisinde bulunan su tamamen saf değildir ve katı partiküller içermektedir. Kazan suyu içinde çözünmüş olan katı maddeler TDS (toplam çözünmüş katı) olarak adlandırılır. Bu katı maddeler, kazan suyu buharlaşırken geride kalır ve buharlaşma devam ettikçe su yüzeyine yakın bölgede TDS konsantrasyonu artar. Bu durum suyun iletkenliğinin de artmasına yol açar (Karakurt, 2006: 47; Durukafa, 2010: 25). İletkenlik; suyun içerdiği çözünmüş iyonların miktarını belirler. Birimi direnç biriminin tersi olup $\mu\text{S/cm}$ (Micro

Siemens) ya da ppm'dir. (parts per million, 1 ppm= 0,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Kızıltan, 2008: 13; Ünlü, 2009: 73). Su saflaştıkça iletkenlik azalır. Su içerisinde yalnızca 100 mg/lit NaCl tuz varsa ve başkaca hiçbir eriyik yoksa bu suyun iletkenliği 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'dir (Burkut, 1997: 1). Kazan suyundaki katı madde miktarının ölçülerek maksimum 6000-7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sınırında tutulması gerekmektedir (Özer, 2004: 25).

Kazan imalatçıların belirlediği iletkenlik üst limit aşıldığında su yüzeyinde köpürme başlar. Oluşan bu köpük tabakası buharlaşmayı zorlaştırır ve köpük buharla birlikte tesisata taşınır. Bu durum buharın kuruluk derecesini düşürürken yüksek miktarda yabancı madde içermesine de sebep olur. Şekil 5.10'da şematik olarak gösterildiği gibi yabancı maddeler; proses cihazları, eşanjörler, kontrol vanaları, kondensstoplar vb. sistem elemanlarının kirlenmesine, tıkanmasına, performanslarının düşmesine ve arızalanmalarına yol açar (Karakurt, 2006: 47; Durukafa, 2010: 25).



Şekil 5.10. Erimiş katı maddelerin sisteme etkisi

Kaynak: (Çubuk, 2019: 72)

Erimiş katı maddeler kazan ısıtıcı yüzeylerinde birikir ve bir tabaka oluşturarak ısı transferini engeller ve sistemin ömrünü kısaltır (Karakurt, 2006: 47; Durukafa, 2010: 25). Kazan ısıtıcı yüzeylerinde biriken kireç taşı kalınlığına bağlı olarak, kazanda tüketilen yakıt miktarı artar. Örneğin; 2 mm kireç tabakasından dolayı kazanda tüketilen yakıt miktarındaki artış yaklaşık %14 olacaktır. Bu problemlerin oluşmaması için, kazan içerisindeki iletkenlik değerleri belirli mertebelerde tutulmaya çalışılmalı, kazan suyunun içerdiği çözünmüş katı miktarı sınırlandırılmalıdır (Ünlü, 2009: 73; Durukafa, 2010: 25).

Kazan suyu TDS seviyesinin veya iletkenliğinin verilen limitlerin arasında tutulabilmesi için katı maddelerin kazandan uzaklaştırılması işlemine blöf adı verilmektedir (Karakurt, 2006: 47; Öztürk, 2012: 31). Blöfle dışarıya atılan yüksek derişiklikteki suyun yerine çok daha düşük derişiklikte yabancı madde içeren taze besi suyu kazana alınır. Böylece kazandaki katı madde derişikliği kontrol edilir (Ünlü, 2009: 73). Yapılan blöf ile kazan suyunda ki safsızlıklar kazan dışına atılarak istenen sınır değerlerin altına düşürölür. Eğer blöf ile kazan suyu ayarlanmazsa buhar kalitesi bozulur ve kısa zaman sonra kazan çalışmaz hale gelir. Kazan suyu sınır değerleri; kazan ve sistem türü ile özellikle kazanın çalışma basıncına bağılıdır (Öztürk, 2012: 31). Blöf işlemi yüzey blöf ve dip blöf olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır.

5.1.2.1. Blöf Çeşitleri

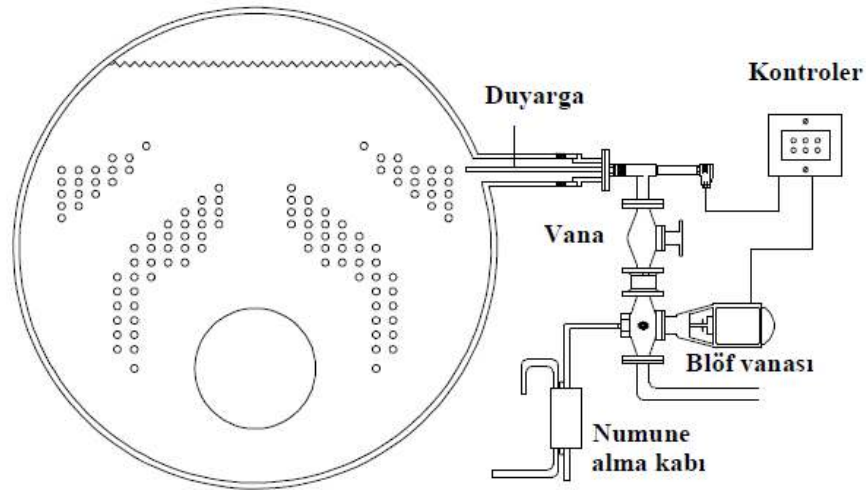
A. Yüzey Blöf

Katı maddeler kazan dibine çökmemiş ve su içinde erimiş halde ise yüzeyden yapılan blöf işlemi ile sistemden tahliye edilirler (Çubuk, 2019: 77). Buhar üretimi sırasında saf su buhar olarak yüzeyden uzaklaştığı için iletkenlik, suyun yüzeye yakın kısmında artar. Bu nedenle, iletkenlik kontrolü ve yüzey blöfü yüzeye yakın noktadan çıkan yüzey blöf borusundan yapılır (Karakurt, 2006: 48). Yüzey blöf ile dışarı atılan yüksek sıcaklıktaki kazan suyu ile birlikte bir miktar enerji de kaybedilir. Bu nedenle yüzey blöfü gerektiği kadar ve kontrollü olarak yapılmalıdır. Gereğinden fazla blöf yapıldığı takdirde, kazana ilave edilen taze su kazan suyundan düşük sıcaklıkta olduğu için bu suyun ısıtılması için enerji harcanacak, ayrıca taze suya ilave edilen kimyasal katkı maddeleri de işletmeye ek maliyet getirecektir (Ünlü, 2009: 73; Durukafa 2010: 26). Yüzey blöf; manuel blöf, devamlı blöf ve otomatik blöf olmak üzere 3 şekilde yapılır (Özer, 2004: 26; Kızıltan, 2008: 16).

a. Manuel blöf: Bu sistemde blöf vanası manuel olarak açılarak ölçülen iletkenlik değerine göre kazan suyu blöf edilir (Kaya ve Öztürk, 2014: 300; Karakurt, 2006: 48). Burada vana belirli bir süre açılarak iletkenlik değeri belirlenen değerde sabit tutulmak istenir. Bu şekilde yapılan blöf ile gereğinden az ya da çok blöf yapılır. Az yapılan blöf, iletkenlik değerini istenen değerin üstünde tutar. Bu durum ısı transfer yüzeyinde kışır tabakasının oluşumuna sebep olur. Yani enerji aktarımını güçleştirir (Kızıltan, 2008: 17). Manuel blöf ile kazana verilen suyun %10-12'si dışarıya atılmakta dolayısıyla enerji kaybı oldukça fazla olmaktadır (Karakurt, 2006: 80).

b. Devamlı blöf: Devamlı yüzey blöf ile belirli açıklıkta bulunan iğne vana sürekli açık konumdadır. Dışarıya gereğinden fazla yüksek basınç ve sıcaklıkta kazan suyu atılmaktadır. Atılan su yerine kazana düşük sıcaklıkta su alınmakta ve onu aynı şartlara getirmek için kazana daha fazla yakıt gönderilmektedir. Bu durum enerji sarfiyatına neden olmaktadır (Kızıltan, 2008: 17).

c. Otomatik blöf: Otomatik blöf sistemi, kazan suyu anlık olarak TDS seviyesini sürekli ölçerek, yüzey blöf vanasının açıklığını değiştirmek suretiyle gerekli miktarda blöf yapılmasını sağlamaktadır. Kazan suyundaki TDS ölçümü için iletkenlik sensörleri kullanılmakta ve iletkenlik, set edilen değerin üstüne çıktığı zaman blöf yapılmaktadır (Durukafa, 2010: 26; Pusat, 2019: 168). Buhar kazanlarının işletilebilmesi için gerekli kazan donanımlarını tanımlayan Avrupa Normu EN 12953-6'ya göre buhar kazanlarının 72 saat gözetimsiz işletilebilmesi için yüzey blöf işlemi otomatik olarak gerçekleştirilmelidir (Durukafa, 2010: 26). Otomatik yüzey blöfünde iletkenlik en üst düzeye yakın konumda tutulur ve çok az değişimle sabit kalması sağlanır (Karakurt, 2006: 49). Bu durumda enerji sarfiyatı optimum olur (Kızıltan, 2008: 17). Otomatik blöfte kazana alınan suyun sadece %4-6'ı kadarı dışarı atılmaktadır. Böylece; manuel blöf yerine otomatik blöf kullanılması durumunda, kazan veriminde artış meydana gelecektir. Ayrıca otomatik blöf sayesinde su ve kazan kimyasalları yönünden de önemli tasarruf sağlanacaktır (Karakurt, 2006: 80; Kaya ve Öztürk, 2014: 300; Pusat, 2019: 168). Şekil 5.11'de otomatik yüzey blöf sistemi şematik olarak gösterilmiştir.

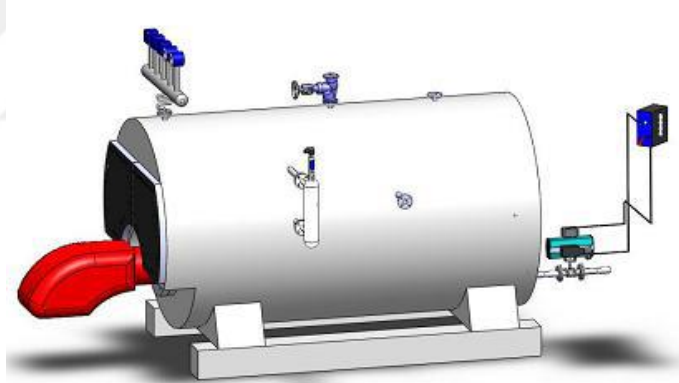


Şekil 5.11. Otomatik blöf sistemi

Kaynak: (Karakurt, 2006: 49)

B. Dip Blöf

Buharlaşma esnasında kazan suyunda oluşan çalkalanmanın etkisiyle katı partiküller su içinde askıda kalır. Ancak buharlaşmanın ve dolayısı ile çalkalanmanın durması ile birlikte bu askıdaki partiküller yerçekimi etkisi ile kazanın alt kısmında toplanır. özünmemiş bu maddeler zaman içinde amursu bir birikim meydana getirir (Durukafa, 2010: 27). Bunlar çoğalarak ısıtma yüzeylerinde izolasyon katmanı oluşturacaktır. Bu durum ısı iletimini düşürecektir. Bu sebeple çamur birikintilerini düzenli olarak deşarj etmek gerekir (Karakurt, 2006: 49). Oluşan amursu birikimin tahliyesi, kazandan dışarı ani ve kısa süreli bir akış sağlanarak gerçekleştirilir. Bu akış, kazanın en alt noktasına yerleştirilen bir nozula bağlanan ve ani açılma özelliğine sahip bir vana ile yapılır. Bu ani tahliye işlemi **dip blöf** olarak adlandırılır (Durukafa, 2010: 27). Dip blöften atılan su, doymuş buhar sıcaklığında olduğundan çok sayıda ve uzun süreli yapılan dip blöfler enerji sarfiyatına neden olur (Karakurt, 2006: 49). Dip blöf işlemi her 8 saatte bir 4 saniye boyunca yapılır. EN 12953-6'ya göre buhar kazanlarının 72 saat gözetimsiz işletilebilmesi için dip blöfün istenen periyotta otomatik olarak açılması gerekmektedir (Durukafa, 2010: 28). Otomatik dip blöf sistemi şekil 5.12'de gösterilmiştir.



şekil 5.12. Otomatik dip blöf sistemi

Kaynak: (ubuk, 2019: 80)

Buhar sisteminin verimliliği açısından blöfün iki önemli sakıncası şunlardır;

1. Buhar kazanına besleme suyu, su tasfiye cihazından kimyasallar kullanılarak yumuşatılıp alınmaktadır. Blöfün yapılmasıyla, atılan blöf miktarı kadar ham su, tekrar tasfiye cihazlarında kimyasal işlem görerek kazana alınacaktır.

2. Kondens sıcaklığı 70–80 °C civarında olmasına rağmen besleme suyunun sıcaklığı 10–20 °C'dir. Bu durum da enerji kaybına sebep olacaktır (Karakurt, 2006: 48; Kaya ve Öztürk, 2014: 300).

5.1.2.2. Blöf Kaybı Hesaplama Yöntemi

Yüzey blöf yoluyla tahliye edilen su miktarının hesaplanması için besi suyunun ve kazan suyunun iletkenlikleri bilinmelidir. Bu değerler bilinirse kazanda yapılması gereken blöf miktarı şu şekilde hesaplanabilir: (Özer, 2004: 28; Ünlü, 2009: 73; Kaya ve Öztürk, 2014: 300).

$$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}} = \frac{\dot{m}_{\text{buhar kapasitesi}} \times \text{TDS}_{\text{besi suyu}}}{\text{TDS}_{\text{kazan suyu}} - \text{TDS}_{\text{besi suyu}}} \quad (5.12)$$

$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}}$: Yüzey blöf debisi (kg/h)

$\dot{m}_{\text{buhar kapasitesi}}$: Kazan buhar üretim kapasitesi (kg/h)

$\text{TDS}_{\text{besi suyu}}$: Besi suyu iletkenliği ($\mu\text{S/cm}$ veya ppm)

$\text{TDS}_{\text{kazan suyu}}$: Kazan suyu iletkenliği ($\mu\text{S/cm}$ veya ppm)

5.1.2.3. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Blöf Kaybı

Mevcut sistemde otomatik yüzey blöf sistemi kurulmuştur. Ayrıca 72 saat gözetimsiz işletme koşullarını sağlamak için kazanda otomatik dip blöf sistemi de mevcuttur. 8 saatte bir sadece 4 sn boyunca dip blöf yapıldığı için bu yolla sistemi terk eden debi ihmal edilecektir. Fabrikada besi suyu olarak kuyu suyu kullanılmaktadır ve iletkenliği $673 \mu\text{S/cm}$ 'dir. Kazan suyu iletkenlik değeri EN 12953-10 tarafından tanımlanmış olan sınır değere çok yakın olan $5500 \mu\text{S/cm}$ 'e otomatik yüzey blöf sistemiyle set edilmiştir. Mevcut sistemde kazandan yapılan blöf miktarı (5.12) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 697 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{buhar kapasitesi}} = 5000 \text{ kg/h}$$

$$\text{TDS}_{\text{besi suyu}} = 673 \mu\text{S/cm}$$

$$\text{TDS}_{\text{kazan suyu}} = 5500 \mu\text{S/cm}$$

$$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}} = \frac{5000 \times 673}{5500 - 673} = 697 \text{ kg/h}$$

Kazanın buhar basıncı 10 bar'dır. 10 bar'da yüzey blöf yoluyla kaybedilen enerji miktarı (5.13) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 152 kW olarak bulunmuştur ($1 \text{ kW} = 3600 \text{ kJ/h}$). Entalpi değerleri su ve su buharı tablosundan okunmuştur (Büyüktür, 1995: 257).

$$Q_{\text{yüzey blöf}} = \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times h_{s10\text{bar}} \quad (5.13)$$

$Q_{\text{yüzey blöf}}$: Yüzey blöfle kaybedilen enerji miktarı (kJ/h veya kW)

$h_{s10\text{bar}}$: 10 bar'daki doymuş suyun entalpisi (kJ/kg)

$$Q_{\text{yüzey blöf}} = 697 \times 781 = 544357 \text{ kJ/h} = 152 \text{ kW}$$

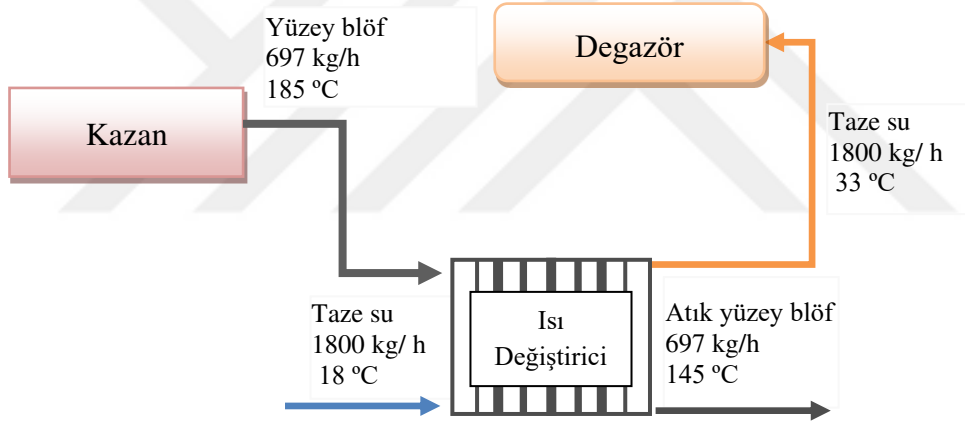
Blöfle dışarı atılan kazan suyundaki enerjinin bir kısmı ısı değiştirici yardımıyla geri kazanılarak taze besi suyunun ısıtılması amacıyla kullanılmaktadır. Isı değiştiriciye 697 kg/h debi ve 185 °C sıcaklıkta giren blöf, ısı değiştiriciden 145 °C'de çıkmaktadır. Geri kazanılan enerji miktarı (5.14) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 32 kW bulunmuştur. Bu durumda gerçekleşen net blöf kaybı 120 kW'dır (Kocabaş ve Savaş, 2021:5).

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times (h_{\text{giren}} - h_{\text{çıkan}}) \quad (5.14)$$

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times (h_{s185^\circ\text{C}} - h_{s145^\circ\text{C}})$$

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = 697 \times (781 - 612) = 117\,793 \text{ kJ/h} = 32 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{net yüzey blöf}} = 152 - 32 = 120 \text{ kW}$$



Şekil 5.13. Mevcut kazan blöf çalışma sistemi

Kazandaki mevcut blöf sisteminin şematik resmi Şekil 5.13'te verilmiştir. Isı değiştiriciye giren ve çıkan enerji denklilikleri kurularak taze besi suyu sıcaklığının yaklaşık 33 °C'ye yükseldiği tespit edilmiştir.

$$\sum Q_{\text{giren}} = \sum Q_{\text{çıkan}}$$

$$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times h_{s185^\circ\text{C}} + \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{s18^\circ\text{C}} = \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{\text{taze su}} + \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times h_{s145^\circ\text{C}}$$

$$697 \times 781 + 1800 \times 74 = 1800 \times h_{\text{taze su}} + 697 \times 612$$

$$h_{\text{taze su}} = 139.4 \text{ (33 } ^\circ\text{C)}$$

5.1.2.4. Blöf Kaybı Enerji FMEA Çalışması

Buhar üretimi prosesinde blöf kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.14'te gösterilmiştir (Kocabaş ve Savaş, 2021: 6). Blöf kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır. Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip risk “gereğinden fazla blöf yapılması”dır. Bu risk hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.14. Blöf kaybı Enerji FMEA çalışması

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Önlem, Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar üretimi	Gereğinden fazla blöf yapılması	Düzgün olmayan blöf ayarı, besî suyu iletkenliğinin yüksek olması	Gereğinden fazla yapılan blöf yüksek enerji kayıplarına yol açar. Yakıt ve kimyasal tüketimi artar.	Otomatik blöf mevcut, su yumuşatma sistemi kullanılıyor, ısı değiştiriciyle ısı geri kazanımı yapılıyor.	8	5	4	160
	Besleme suyunun özelliklerinin iyi olmaması	Ham suyun içinde çözünmüş oksijen ve karbondioksit gazları	Kazan yüzeylerinde korozyona neden olur.	Degazör ile suyun gazı alınıyor.	6	1	2	12
		Organik maddeler, kazan suyunda katı madde konsantrasyonunun izin verilen sınırın üzerine çıkması	Su sürüklenmesi ve köpürmeye yol açar. Buhar kalitesi düşer. Proses işlem süreleri artar. Zamanla çamur meydana getirerek kazan verimini düşürür.	Otomatik blöf sistemi mevcut. Kazan kimyasalları ve yumuşatma sistemi kullanılıyor.	6	3	4	72
		Tuzlar	Kazan cidarlarında kazan taşının veya çamurunun oluşmasına neden olur. Isı iletimi azalır, kazan verimi düşer.		6	3	4	72
		Besî suyu iletkenliğinin fazla olması	Kazanda çok sık blöf yapılmasına neden olur. Kazan verimini düşürür.	Su yumuşatma sistemi kullanılıyor.	7	5	3	105

Blöf esnasında suyun özelliğine bağlı olarak %1-3 arasında verim kaybı olur. Çeşitli uygulamalarla bunun %70-75'i geri kazanılarak verim kayıpları, %0,3-1 aralığına getirilebilir (Durukafa, 2010: 71; Bilgiç, 2004: 5). Blöf kaybını azaltmak için yapılabilecek iyileştirmeleri tespit etmek amacıyla FMEA tablosunda elde edilen verilerden yararlanarak nasıl-nasıl ağaç diyagramı çizilmiştir. Nasıl-Nasıl ağaç diyagramı yöntemi, bir soruna pratik çözüm ararken kullanılmaktadır. Bu yöntemde cevaba ulaşana kadar probleme “Bu nasıl çözülür?” sorusunu sorulmaktadır. Şekil 5.14’te gösterilen ağaç diyagramında blöf kaybına yol açan etkenlere karşı en az bir çözüm önerisi geliştirilerek blöf kaybını azaltmanın yolları ortaya konmuştur (Kocabaş ve Savaş, 2021: 7).



Şekil 5.14. Blöf kaybı Nasıl-Nasıl ağaç diyagramı

Nasıl–Nasıl ağaç diyagramında blöf kaybını azaltmaya yönelik iki yöntem öne çıkmıştır. Bu yöntemlerden ilki blöf ısıısının geri kazanılması diğeri ise blöf miktarının azaltılmasıdır. Bu diyagramda tespit edilen önerilerin firmadaki mevcut uygulamaları veya uygulanabilirliklerinin her biri incelenmiştir:

Flaş buhar kullanımı: Fabrikadaki mevcut sistemde flaş buhar ünitesi bulunmamaktadır. Sisteme flaş buhar tankı eklenerek blöfün sahip olduğu enerjiden daha fazla yararlanılabilir.

Isı değiştirici kullanımı: Fabrikadaki mevcut sistemde blöf ısıısı ısı değiştirici ile geri kazanılarak taze besi suyunun ısıtılmasında kullanılmaktadır.

Otomatik blöf: Fabrikadaki mevcut sistemde buhar kazanından otomatik blöf sistemi bulunmaktadır.

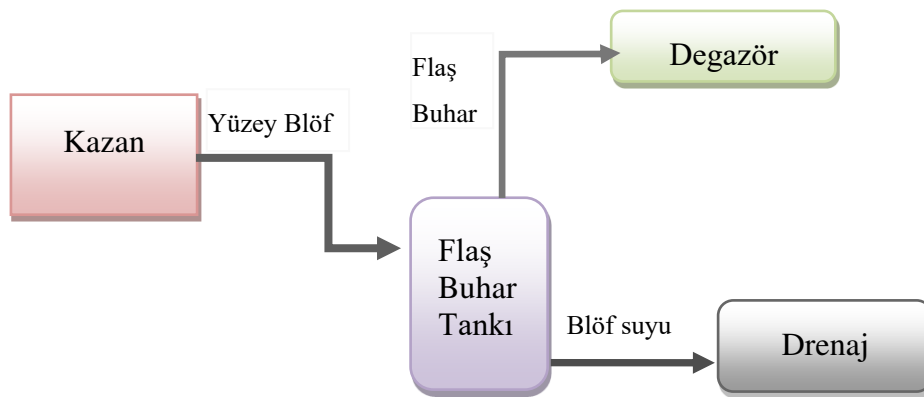
Su iletkenliğinin azaltılması: Buhar kazanında besleme suyu olarak kuyu suyu kullanılmaktadır. Bu su yumuşatma ünitelerinden geçirilerek kazana verilmektedir fakat buna rağmen yüksek bir iletkenliğe sahiptir. Besleme suyunun iletkenliğinin daha da azaltılması için Ters Ozmoz sistemi mevcut yumuşatma sistemine dahil edilebilir.

5.1.2.5. Blöf Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

A. Flaş Buhar ile Isı Geri Kazanımı

En başta ve en çok kullanılan ısı geri kazanım sistemi flaş buharın elde edilmesidir. Isı transfer yüzeylerinden buharlaşma ısısını veren doymuş buhar, aynı basınçta kondens haline dönüşür ve doymuş su entalpisi içerir. Isı transferi sonrasında doymuş su entalpisi içeren kondens, daha düşük basınçlara sahip ortamlara (tanklara) gönderildiğinde bu düşük basınç ortamında bir miktar enerji açığa çıkarır. Açığa çıkan enerji kondensin bir kısmını buharlaştırır. Bu buhara *flaş buhar* adı verilir (Karakurt, 2006: 79; Kaya ve Öztürk, 2014: 301).

Flaş buhar tankı yüzey blöf suyunu alarak genellikle 0,2 – 0,5 bar(g) pozitif basınca dönüştüren ekipmandır (Sarı, 2019: 190). Bir ekipman olarak bakıldığında, flaş tankı çok basit bir birimdir ve çok ucuz olarak temin edilebilir (YEGM, 2017: 43). Şekil 5.15'te gösterildiği gibi flaş buhar olarak blöf ısısını geri kazanmak için kazandan alınan blöf önce bir flaş buhar tankına gönderilebilir. Tankta blöften ayrılan flaş buhar genellikle degazör tankının ısıtılması amacıyla kullanım yerine ulaştırılır (Özer, 2004: 27; Sarı, 2019: 190).



Şekil 5.15. Flaş buhar sistemi ile ısı geri kazanımı

Flaş buharın geri kazanılması için sisteme bir flaş buhar cihazı eklenebilir. Flaş buharın boşalma anındaki basıncı 0,2 bar olarak alınabilir. Bu sayede 10 bar'dan 0,2 bar'a genişleyen

doymuş suyun bir kısmı flaş buhar olarak geri kazanılabilir. Sisteme flaş buhar ünitesi eklenmesi durumunda yüzey blöf yoluyla atılan doymuş suyun %15,2'sinin geri kazanılabileceği (5.15) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{flaş buhar (\%)} = \frac{h_{s10\text{bar}} - h_{s0,2\text{bar}}}{h_{b0,2\text{bar}} - h_{s0,2\text{bar}}} \quad (5.15)$$

$$\text{flaş buhar (\%)} = \frac{781-439}{2683-439} \times 100 = \%15,2$$

Flaş tankında oluşacak flaş buhar miktarı (5.16) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 106,3 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times \% \text{ flaş buhar} \quad (5.16)$$

$\dot{m}_{\text{flaş buhar}}$: Flaş tankında oluşan flaş buhar debisi (kg/h)

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = 697 \times 0,152 = 106,3 \text{ kg/h}$$

Bu durumda yüzey blöf miktarı 697 kg/h olduğundan flaş tankında oluşacak kondensin miktarı (5.17) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 590,7 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}} = \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} - \dot{m}_{\text{flaş buhar}} \quad (5.17)$$

$\dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}}$: Flaş tankında oluşan kondens debisi (kg/h)

$$\dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}} = 697 - 106,3 = 590,7 \text{ kg/h}$$

Elde edilen flaş buhar geri kazanılırken geride kalan blöf suyu 0,2 bar'da doymuş su olarak kanala atılırsa bu su ile kaybedilen enerji miktarı (5.18) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 72 kW olarak bulunmuştur.

$$Q_{\text{yüzey blöf}} = \dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}} \times h_{s0,2 \text{ bar}} \quad (5.18)$$

$$Q_{\text{yüzey blöf}} = 590,7 \times 439 = 259 273 \text{ kJ/h} = 72 \text{ kW}$$

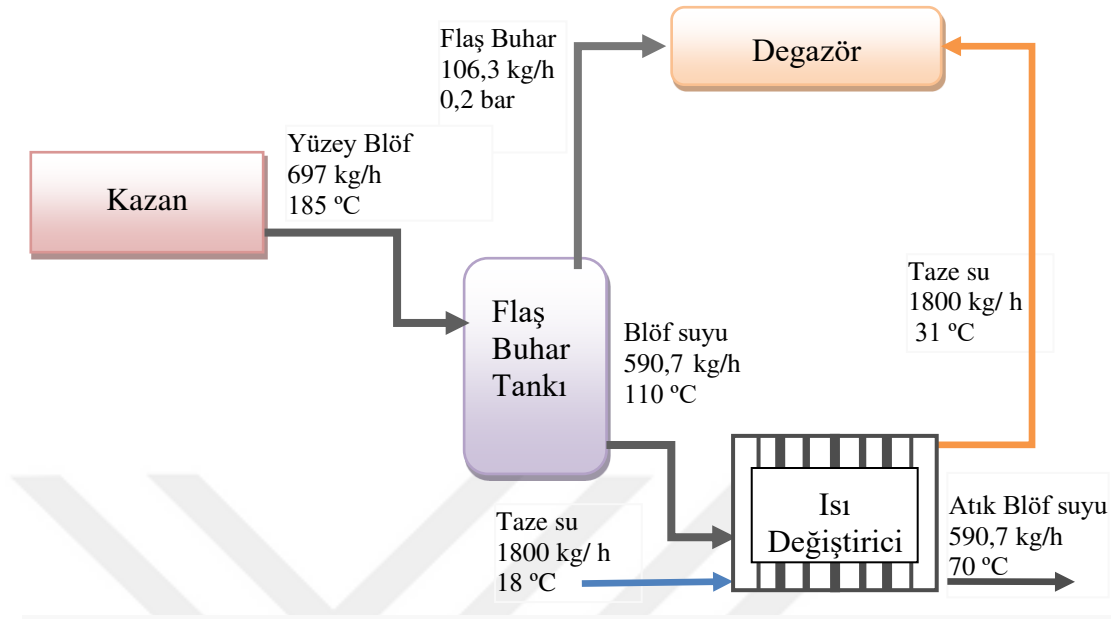
Flaş buhar tankında geri kalan su kanalizasyona gönderilmeden önce ısı değiştiriciden geçirilerek besi suyunun ısıtılması amacıyla kullanılmaya devam edebilir. Bu sayede enerjinin bir kısmı daha geri kazanılmış olur. Tankta kalan sıvı ısı değiştiriciye 110 °C sıcaklıkta girip, 70 °C'de çıkmaktadır. Bu durumda geri kazanılan enerji miktarı (5.19) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 27 kW bulunmuştur. Bu durumda net blöf kaybı 45 kW olur.

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = \dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}} \times (h_{\text{giren}} - h_{\text{çıkan}}) \quad (5.19)$$

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = \dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}} \times (h_{s110^\circ\text{C}} - h_{s70^\circ\text{C}})$$

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = 590,7 \times (458 - 295) = 96\,284 \text{ kJ/h} = 27 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{net yüzey blöf}} = 72 - 27 = 45 \text{ kW}$$



Şekil 5.16. Flaş buhar tankı ilaveli kazan sistemi

Kaynak: (Kocabaş ve Savaş, 2021: 7)

Flaş buhar ünitesi ilave edilmesi durumunda kazan sisteminin şematik görünümü Şekil 5.16'da gösterildiği gibi olacaktır. Isı değiştiriciye giren ve çıkan enerji denklilikleri kurularak taze besi suyu sıcaklığının yaklaşık 31 °C'ye yükseleceği hesaplanmıştır.

$$\sum Q_{\text{giren}} = \sum Q_{\text{çıkan}}$$

$$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times h_{s110^\circ\text{C}} + \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{s18^\circ\text{C}} = \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{\text{taze su}} + \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times h_{s70^\circ\text{C}}$$

$$590,7 \times 458 + 1800 \times 74 = 1800 \times h_{\text{taze su}} + 590,7 \times 295$$

$$h_{\text{taze su}} = 127,5 \text{ (31 } ^\circ\text{C)}$$

Buhar kazanına flaş buhar ünitesi eklenmesi durumunda saatlik 75 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 77.458 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.15'te gösterilmiştir. Flaş buhar ünitesi yatırımının kendini 8 ay gibi bir sürede geri ödeyeceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.15. Flaş buhar ünitesi ilave edilmesi durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	75	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	432.000	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	77.458	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	73	ton/yıl
Yatırım Maliyeti	51.600	TL
Geri ödeme süresi	8	ay

B. Ters Ozmoz Sistemi ile Besleme Suyunun Arıtılması

Kazan besleme suyu, blöf ve buharlaşma ile kaybolan suyu telafi etmek için kazana eklenen sudur (Öztürk, 2012: 26). Genellikle kazan suyu kalitesi en fazla besleme suyundan etkilenir (YEGM, 2017: 40). Buhar kazanı ve elemanlarının ömrü ve veriminde, kazan imalat kalitesi kadar besi suyun özellikleri de çok büyük önem taşımaktadır (Yalçın ve Akdemir, 2015: 2668). Buhar elde ederken kullandığımız sular suyun çıkarıldığı yörenin özellikleriyle bağlantılı olarak çok farklı karakteristik özellikler gösterirler. Tam anlamı ile saf su yoktur. Yağmur olarak toprağa düşen su toprakta çeşitli katmanlardan geçerek aşağılara doğru iner. Bu esnada temas ettiği kaya, mineraller ve toprakta bulunan organiklerden aldığı gazları da çözerek bünyesine alır. Ancak buhar sistemlerinde yüksek saflıkta suya ihtiyaç vardır. Kötü sular ile beslenen bir buhar kazanı için kazan broşürlerinde belirtilen verim değerleri kısa bir süre sonra geçerli sayılmaz. (Özer, 2004: 29). Bu nedenle sisteme ilave edilmeden önce besleme suyunun şartlandırılması gerekir. Besleme suyunun kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılan başlıca yöntemler şunlardır (YEGM, 2017: 41):

- Sodyum-çevrimi ile yumuşatma
- Demineralizasyon
- Ters Ozmoz şartlandırması

Buhar sistemlerinde besi suyu hazırlamada kullanılan en iyi yöntemler, sudaki minerallerin yaklaşık %95-99'unu ayırarak suyu saflaştıran Ters Ozmoz veya demineralize yöntemleridir. Fakat, ülkemizdeki işletmelerin neredeyse %90'ında su yumuşatma sistemi kullanılmaktadır. Suyun yumuşatılması yalnızca suda bulunan ve taş yapma özelliğine sahip olan kalsiyum ve magnezyum minerallerinin reçine yöntemi ile alınarak yerine taş yapma özelliği olmayan sodyum minerallerinin verilmesidir. Neticede su saflaşmaz. Sudan bazı

mineraller alınırken yerine başka minerallerin verilmesi yani iyon değiştirme işlemi yapılır. Silikat camın hammaddesidir ve çok sert yapıya sahip bir mineraldir. Bu minerali su yumuşatma cihazı alamaz. Su yumuşatma cihazının alamadığı bu mineralin kazana girip, kazandan atılamaması durumunda kazan gövde ve duman boruları yüzeyine yapışır ve kazan verimi düşer. Tuz oranı yüksek olan bölgelerdeki suların yumuşatılması da pek mümkün olmamaktadır (zer, 2004: 21).

Kuyu suyu, yüzey suyu, hatta deniz suyundan dahi çok kaliteli su üreten Ters Ozmoz cihazları ekonomik avantajlarından dolayı dünyanın birçok ülkesinde sanayide buhar kazanı besı suyu hazırlamada kullanılmaktadır (Burkut, 1997: 6). Kazan blöf miktarı besı suyu kalitesi ile orantılı olduğundan, besı suyu kalitesi kazanın işletme verimini etkiler. Besı suyunun iletkenliği yüksek ise kazandan yapılacak blöf de aynı oranda yüksek olacaktır. Düşük iletkenlikte su ile beslenen kazanın işletme verimi çok yükseleceği gibi, kazanın diğer sorunlarının birçoğu da ortadan kalkar (zer, 2004: 34). Mevcut olan en yüksek kalitede besleme suyu yapılması gereken blöf miktarını azaltacaktır (YEGM, 2017: 41). Ters Ozmoz yöntemi ile hazırlanan yüksek kalitede bir besı suyu ile işletilen buhar sisteminde elde edilecek diğer avantajlar şöyle özetlenebilir:

- Kazan suyuna verilen kimyasalların çoğuna ihtiyaç kalmaz.
- Taş oluşmaz, dolayısı ile kazanın ısı geçirgenliği ve ısı verimi yüksek olur.
- Bakımlar en aza iner.
- Köpürme ve buhar ile sisteme mineral kaçmaz, üretilen buharın kalitesi yükselir.
- Kazan içinde karbondioksit oluşmaz, dolayısı ile kondens borularının korozyonu en aza iner (Burkut, 1997: 3).

Mevcut kazan sisteminde yüzey blöf miktarının azaltılması için besı suyu yumuşatma nitesi bulunmaktadır. Buna sisteme Ters Ozmoz nitesi de ilave dılebilir. Ters Ozmoz nitesinin sisteme ilave edilmesi durumunda iletkenliğin 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'e düşürülebileceği öngörülmüştür. Besı suyu iletkenliğinin 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'e düşürülmesi durumunda yapılması gereken blöf miktarı (5.12) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 9 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{buhar kapasitesi}} = 5000 \text{ kg/h}$$

$$\text{TDS}_{\text{besı suyu}} = 10 \mu\text{S}/\text{cm}$$

$$\text{TDS}_{\text{kazan suyu}} = 5500 \mu\text{S}/\text{cm}$$

$$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}} = \frac{5000 \times 10}{5500 - 10} = 9 \text{ kg/h}$$

Her ne kadar hesaba dayalı yüzey blöf miktarı 9 kg/h olsa da pratikte kazan kapasitesinin min. %2'si kadar blöf yapılması önerilir (Durukafa, 2019: 475). Bu durumda yapılması gereken minimum yüzey blöf miktarı 100 kg/h olacaktır.

$$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}} = 5000 \times 0,02 = 100 \text{ kg/h}$$

Ters Ozmoz ünitesinin sisteme dahil edilmesi durumunda kazandan 10 bar'da yüzey blöf yoluyla kaybedilecek enerji miktarı (5.13) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 47 kW olarak bulunmuştur.

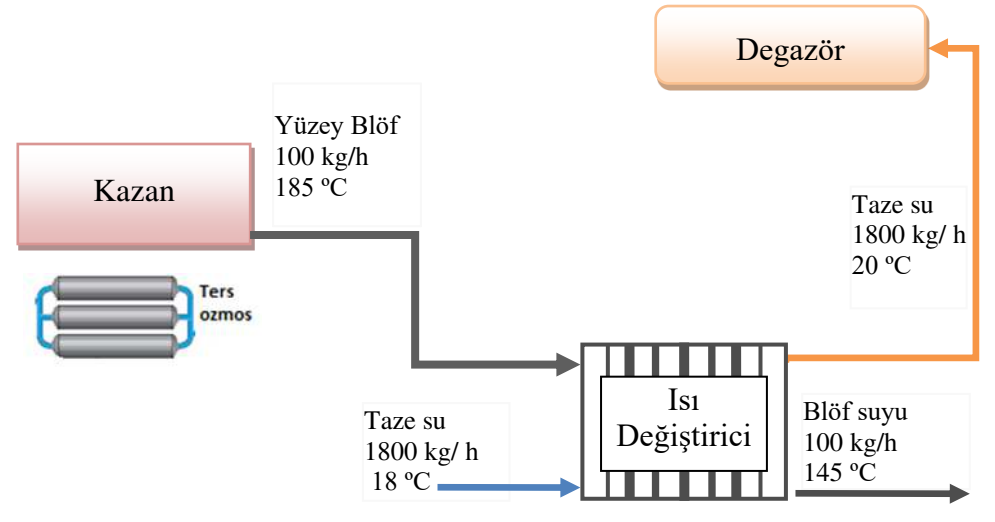
$$Q_{\text{yüzey blöf}} = 100 \times 781 = 78\,100 \text{ kJ/h} = 47 \text{ kW}$$

Blöfle dışarı atılan su ısı değiştiriciden geçirilerek besi suyunun ısıtılması amacıyla kullanılmaya devam edilebilir. Isı değiştiriciye 100 kg/h debi ve 185 °C sıcaklıkta giren blöf ısı değiştiriciden 145 °C'de çıkmaktadır. Bu durumda geri kazanılan enerji miktarı (5.14) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış 4,6 kW olarak bulunmuştur. Net blöf kaybı 42,4 kW olur (Kocabaş ve Savaş, 2021: 7).

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times (h_{s185^\circ\text{C}} - h_{s145^\circ\text{C}})$$

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = 100 \times (781 - 612) = 16\,900 \text{ kJ/h} = 4,6 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{net yüzey blöf}} = 47 - 4,6 = 42,4 \text{ kW}$$



Şekil 5.17. Ters Ozmoz tekniği kullanılarak suyun yumuşatıldığı kazan sistemi

Sisteme Ters Ozmoz ünitesinin dahil edilmesi durumunda kazan sisteminin şematik resmi Şekil 5.17’de gösterildiği gibi olacaktır. Isı değiştiriciye giren ve çıkan enerji denklilikleri kurularak taze besi suyu sıcaklığının yaklaşık 20 °C’ye yükseleceği hesaplanmıştır.

$$\sum Q_{giren} = \sum Q_{çıkan}$$

$$\dot{m}_{yüzey\ blöf} \times h_{s185\text{ }^{\circ}\text{C}} + \dot{m}_{taze\ su} \times h_{s18\text{ }^{\circ}\text{C}} = \dot{m}_{taze\ su} \times h_{taze\ su} + \dot{m}_{yüzey\ blöf} \times h_{s145\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

$$100 \times 781 + 1800 \times 74 = 1800 \times h_{taze\ su} + 100 \times 612$$

$$h_{taze\ su} = 83.38\text{ } (20\text{ }^{\circ}\text{C})$$

Buhar kazanına Ters Ozmoz ünitesi eklenmesi durumunda saatlik 77,6 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 80.143 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.16’da gösterilmiştir. Flaş buhar ünitesi yatırımının kendini 22 ay gibi bir sürede geri ödeyeceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.16. Ters Ozmoz ünitesi ilave edilmesi durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	77,6	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	446.976	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	80.143	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	75	ton/yıl
Yatırım Maliyeti	150.000	TL
Geri ödeme süresi	22	ay

5.1.2.6. Blöf Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

Hem flaş buhar ünitesi hem de Ters Ozmoz ünitesi kazan sistemine birlikte dahil edilebilir. Kazanda iletkenlik miktarının sınırlı tutulması için yapılan blöf kanala gitmektedir. Mevcut durumda blöf miktarı buhar üretiminin yaklaşık %14’lük (697/5000) kısmını teşkil etmektedir. Ters ozmoz tekniği kullanılarak yapılması gereken blöf miktarı 697 kg/h’ten 100 kg/h’e düşürülebilir. Flaş buhar sistemi eklenirse blöfün yaklaşık %15,2’sinin flaş buhar olarak geri kazanılabileceği (5.15) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmıştı. Bu durumda Ters Ozmozla blöf debisi 100 kg/h’e indiğinde oluşan flaş buhar miktarı (5.16) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 15,2 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{flaş\ buhar} = 100 \times 0,152 = 15,2\text{ kg/h}$$

Bu durumda yüzey blöf miktarı 100 kg/h olduğundan flaş tankında oluşacak kondensin miktarı (5.17) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 84,8 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}} = 100 - 15,2 = 84,8 \text{ kg/h}$$

Elde edilen flaş buhar geri kazanılırken geride kalan blöf suyu 0,2 bar'da doymuş su olarak kanala atılırsa bu su ile kaybedilen enerji miktarı (5.18) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 10,3 kW olarak bulunmuştur.

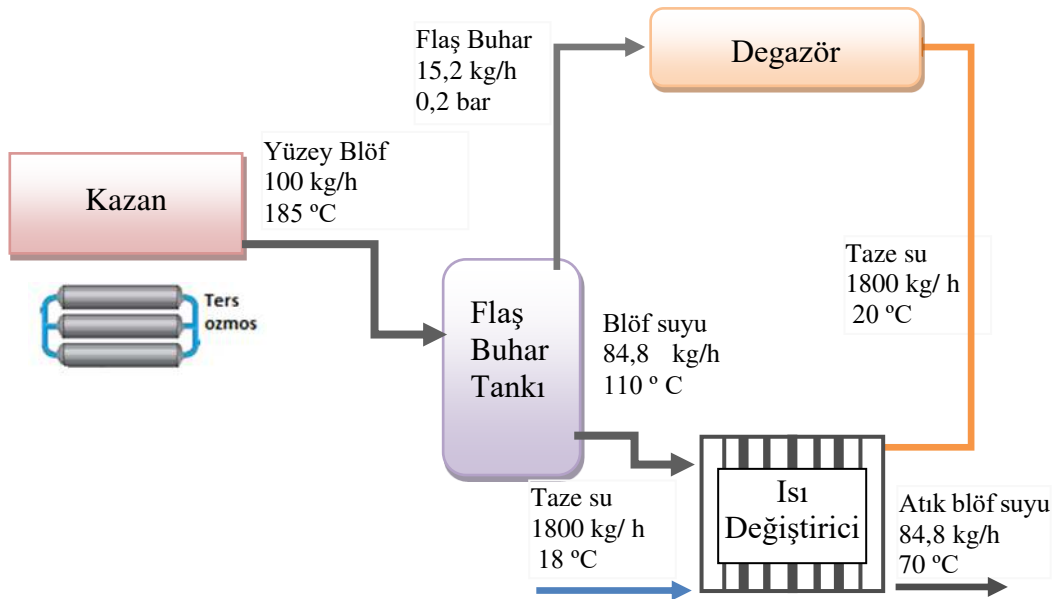
$$Q_{\text{yüzey blöf}} = 84,8 \times 439 = 37\,174 \text{ kJ/h} = 10,3 \text{ kW}$$

Flaş buhar tankında geri kalan su kanalizasyona gönderilmeden önce ısı değiştiriciden geçirilerek besi suyunun ısıtılması amacıyla kullanılmaya devam edebilir. Bu sayede enerjinin bir kısmı daha geri kazanılmış olur. Tankta kalan sıvı ısı değiştiriciye 110 °C sıcaklıkta girip ısı değiştiriciden 70 °C'de çıkmaktadır. Bu durumda geri kazanılan enerji miktarı (5.19) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 3,8 kW olarak bulunmuştur. Bu durumda net blöf kaybı 6,5 kW olur.

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = \dot{m}_{\text{flaş tankı kondens}} \times (h_{s110^\circ\text{C}} - h_{s70^\circ\text{C}})$$

$$Q_{\text{geri kazanılan}} = 84,8 \times (458 - 295) = 13\,822 \text{ kJ/h} = 3,8 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{net yüzey blöf}} = 10,3 - 3,8 = 6,5 \text{ kW}$$



Şekil 5.18. Ters Ozmoz ve flaş buhar tankının birlikte kullanıldığı kazan sistemi

Sisteme Flaş buhar ünitesi ve Ters Ozmoz ünitesinin birlikte dahil edilmesi durumunda kazan sisteminin şematik resmi Şekil 5.18’de gösterildiği gibi olacaktır. Isı değiştiriciye giren ve çıkan enerji denklikleri kurularak taze besi suyu sıcaklığının yaklaşık 20 °C’ye yükseleceği hesaplanmıştır.

$$\sum Q_{\text{giren}} = \sum Q_{\text{çıkan}}$$

$$\dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times h_{s110^{\circ}\text{C}} + \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{s18^{\circ}\text{C}} = \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{\text{taze su}} + \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \times h_{s70^{\circ}\text{C}}$$

$$84,8 \times 458 + 1800 \times 74 = 1800 \times h_{\text{taze su}} + 84,8 \times 295$$

$$h_{\text{taze su}} = 81,7 (20^{\circ}\text{C})$$

Buhar kazanına hem Flaş buhar ünitesi hem de Ters Ozmoz ünitesi eklenmesi durumunda saatlik 113,5 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 117.219 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.17’de gösterilmiştir. Flaş buhar ünitesi yatırımının kendini 20,6 ay gibi bir sürede geri ödeyeceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.17. Flaş buhar ve Ters Ozmoz ünitesinin birlikte dahil edilmesi durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	113,5	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	653.760	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	117.219	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	110	ton/yıl
Yatırım Maliyeti	201.600	TL
Geri ödeme süresi	20,6	ay

5.1.3. Yüzeyden Isı Kaybı

Yüksek bir kazan verimi elde etmek için kazan dış yüzey sıcaklıklarının mümkün olan en düşük değerlerde olması gerekir. Bir buhar kazanının dış yüzeylerinde farklı sıcaklık dağılımları mevcuttur. Mineral esaslı kalın malzeme ile izole edilen kazan gövdesi 35-50 °C aralığındadır. Brülör bağlantı flanşı, kazan kapıları, duman sandığı, patlama kapağı gibi duman gazı ile temas halinde olan kısımlarda ise 120-200 °C yüzey sıcaklıkları söz konusudur (Durukafa, 2010: 67). Açık yüzeylerin sıcaklıkları buhar kazanının ürettiği buharın doyma sıcaklığına göre değişmektedir (Karakurt, 2006: 52).

Sistemle çevre arasındaki sıcaklık farkı, sistemden çevreye veya çevreden sisteme doğru bir ısı akışı meydana getirir. Sıcaklık farkı arttıkça, transfer edilen ısı miktarı da o ölçüde artar. İki sistem arasındaki ısı akışını, akışın bulunduğu yola termal izolasyon sağlayan malzemeler yerleştirerek yavaşlatabiliriz. Kazan yalıtımının en önemli amaçları; sıcak akışkanın özelliklerinin istenilen seviyede tutulmasını sağlamak, yüzeyden gerçekleşen ısı kayıplarını düşürmek, yanma odası ve bacada çok yüksek sıcaklıklarda gazlarla temas eden yüzeyleri korumaktır. Termal izolasyonlar, bütün enerji verimli sistem ve ekipmanların tasarım ve üretiminde dikkate alınırlar (Kanoğlu, 2010: 20). Buhar kazanlarını tarif eden Avrupa Normu EN 12953'e göre bir kazanın dış cidar kayıpları toplam kazan kapasitesinin %1'i ile sınırlı olmalıdır (Sarı, 2019: 187; Durukafa, 2010: 67).

Kazanların yalıtımı imalatçı firmalar tarafından ya imalat yerinde ya da kazanların yerleştirileceği tesiste yapılmaktadır (Mumlu, 2008: 40). Buhar kazanları 80-120 mm kalınlığında mineral esaslı taş yünü ile izole edilir. İzolasyon 1 mm kalınlığında çelik veya alüminyum sac ile korumaya alınır. Brülör bağlantı ağzı, ön duman sandığı, arka temizleme kapağı gibi yüksek sıcaklıktaki gazlara su soğutması olmaksızın maruz kalan kazan parçalar çelik malzemenin zarar görmemesi için refrakter malzeme ile kaplanır (Durukafa, 2010: 17). Tasarım ve kurulum esnasında mümkün olan en düşük seviyede dış cidar kayıp oranına sahip kazanların tercih edilmesi gerekir (Durukafa, 2010: 83).

Kazan ve ekipmanlarının yalıtım durumu zaman zaman kontrol edilmelidir. Yalıtımın dış yüzeyinde oluşan sıcaklık artışı veya proses ekipmanlarının çalışma sıcaklıklarında meydana gelen düşüş yalıtımın etkinliğinin azaldığının göstergelerindendir (Kanoğlu, 2010: 21). Tesis personelinin termal kamera kullanarak sıcak noktaları ($> 70^{\circ}\text{C}$) araması ve herhangi bir onarım gerekli olup olmadığını tespit etmesi gerekir. Hasarlı veya eksik yalıtımın birkaç nedeni vardır. Bunlardan bazıları şöyledir (YEGM, 2017: 51):

- Bakımın kolay yapılması amacıyla yalıtımın yapılmamış olmaması
- Kötü kullanım nedeniyle yalıtımın hasara uğraması
- Kazalar nedeniyle yalıtımın hasara uğraması
- Ortam koşulları nedeniyle yalıtımın aşınması ve yırtılması
- Tasarımında hiçbir yalıtım öngörülmediği için vanalar ve diğer bileşenlerin yalıtımsız olması.

Yalıtım ile temin edilecek tasarruf miktarının belirlenmesi için mevcut durumdaki ve yalıtım sonrası sıcak yüzeylerden olan ısı kayıplarının hesaplanması gereklidir (Kaya ve

Güngör, 2002: 10; Uylukçuoğlu, 2009: 47). Kazanda yüzey kayıplarını belirlemek amacıyla termal kamerayla tüm kazan yüzeyi taranarak zayıf yalıtımlı bölgeler tespit edilebilir. Yalıtım uygulamalarının ekonomik faydaları uygulamadan uygulamaya değişmektedir. Özellikle buhar kazanının düşük kapasitelerde çalıştığı durumlarda azaltılan dış cidar kayıpları verime olumlu katkıda bulunacaktır (Sarı, 2019: 188). Yalıtım, ısı kaybı miktarını azalttığı için yakıt ve paradan tasarruf sağlar. Bu yüzden sisteme yapılan yalıtım kendisini sağladığı enerji tasarrufu ile çabucak amorti edecektir. Geniş bir çerçeveden bakacak olursak, yalıtımın enerji tüketimini azaltmakla çevreyi de koruduğu kolaylıkla görülür (Kanoğlu, 2010: 20).

5.1.3.1. Yüzeyden Isı Kaybı Hesaplama Yöntemi

Kazan dış yüzeyinde ısı kayıpları taşınım (konveksiyon) ve ışıınım (radyasyon) şeklinde iki farklı yolla gerçekleşir. Taşınımla gerçekleşen ısı kaybı cidar sıcaklıklarıyla, ışıınımla gerçekleşen ısı kayıpları ise bu sıcaklıkların 4. Kuvveti ile doğru orantılıdır. Yüzeylerden taşınım yoluyla kaybedilen ısı miktarı (W), (5.20) nolu denklem kullanılarak hesaplanabilir. F toplam yüzey alanını (m^2), k toplam konveksiyon ısı transfer katsayısını, T_y yüzey sıcaklığını ($^{\circ}C$) ve T_o ortam sıcaklığını ($^{\circ}C$) ifade etmektedir (Sarı, 2019: 188; Durukafa 2010: 68).

$$Q_{\text{taşınım}} = F \times k \times (T_y - T_o) \quad (5.20)$$

İşınımla kaybedilen ısı miktarı (W) ise (5.21) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanabilir. Burada ϵ siyah cisim katsayısını, σ Planck katsayısını ifade eder.

$$Q_{\text{ışıınım}} = F \times \epsilon \times \sigma \times (T_y^4 - T_o^4) \quad (5.21)$$

Taşınım ve ışıınım ile kaybedilen toplam ısıyı bulmak için (5.20) ve (5.21) nolu eşitlikler farklı sıcaklıklardaki yüzeylere ayrı ayrı uygulanır ve çıkan sonuçlar toplanır. Toplam dış cidar kaybı (W), taşınım ve ışıınım kayıplarının toplanması ile elde edilir (Durukafa, 2010: 68).

5.1.3.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Yüzeyden Isı Kaybı

1991 yılından bu yana işletilmekte olan kazanda yalıtımsız veya yalıtımı eskimiş bölgeleri tespit etmek için çalışma yürütülmüştür. Bu amaçla kazanının farklı bölgelerindeki dış yüzey sıcaklıkları Fluke VT04 tipi kızılötesi termal kamera ($-10/+250^{\circ}C$) kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümlerin alındığı kazan dairesinin sıcaklığı $18^{\circ}C$ ölçülmüş olup kazanda yaklaşık $185^{\circ}C$ sıcaklığında buhar üretilmektedir. Kazanın ön kapak, arka kapak, duman sandığı gibi kısımları farklı renklerde gösterilerek tabakalandırma (gruplandırma) yapılmıştır. Böylece kazanın farklı bölgelerindeki sıcaklık dağılımları ortaya konmuştur. Ölçülen yüzey sıcaklıkları Şekil 5.19'da verilmiştir. Bu şekil

incelendiğinde kazan yan yüzeyleri ile ön ve arka yüzeylerin izolasyonlu olduğu görülmektedir. Ancak ön kapak ve arka kapak yüzeylerinde yüksek ($>70\text{ }^{\circ}\text{C}$) sıcaklık değerleri ölçülmüştür.



Şekil 5.19. Buhar kazanı yüzey sıcaklıkları

Kazanın farklı bölgelerindeki ısı kayıpları ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 5.18’de gösterilmiş ve toplam ısı kaybı 18,5 kW olarak bulunmuştur.

Tablo 5.18. Buhar kazanı yüzeyden ısı kayıpları

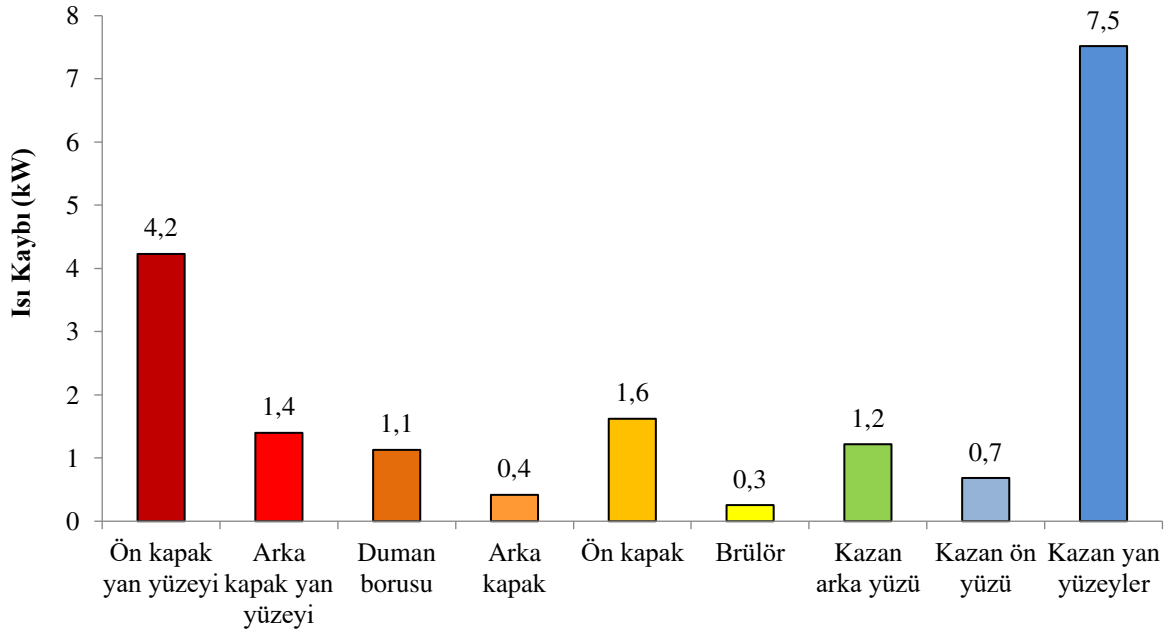
Yüzey	Ön kapak yan yüzeyi	Arka kapak yan yüzeyi	Duman borusu	Arka kapak	Ön kapak	Brülör	Kazan arka yüzü	Kazan ön yüzü	Kazan yan yüzeyler	
Ortalama sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	219	214	161	141	102	46	44	39	33	
Alan (m^2)	0,96	0,33	0,42	0,19	1,19	0,64	3,3	2,32	36,13	
Taşıyma ısı kaybı (kW)	1,57	0,53	0,49	0,19	0,81	0,15	0,70	0,40	4,41	
Işınım ısı kaybı (kW)	2,66	0,87	0,64	0,23	0,81	0,11	0,52	0,29	3,11	
Toplam Kayıp (kW)	4,2	1,4	1,1	0,4	1,6	0,3	1,2	0,7	7,5	18,5 kW
Kayıp %	29,7	9,8	7,9	2,9	11,4	1,8	8,6	4,8	52,8	

Tablo 5.19’da taşıma ve ışıma yüzeyden ısı kaybının hesaplanmasında kullanılan katsayılar verilmiştir.

Tablo 5.19. Hesaplamalarda kullanılan katsayılar

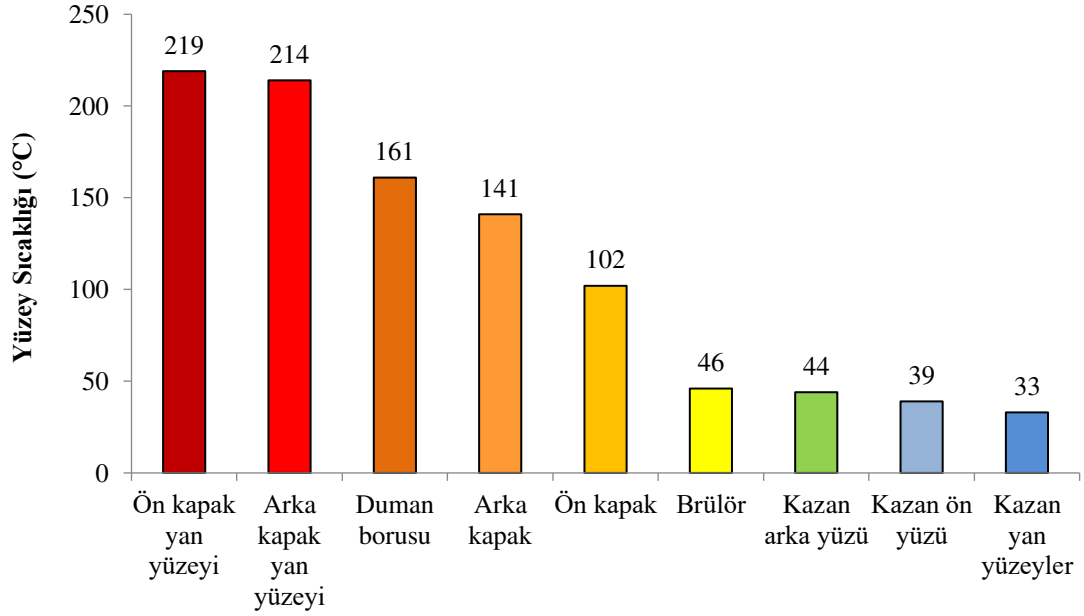
Isı taşıma katsayısı (k)	8,14	$\text{kJ/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Siyah cisim katsayısı (ϵ)	0,95	
Planck katsayısı (σ)	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$\text{kJ/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}^4$

Kazan dış cidar kayıplarının bölgelere göre değişimini yansıtan ısı kaybı dağılım grafiği Şekil 5.20’de verilmiştir. Bu grafiğe göre ısı kaybı en fazla kazanın yan yüzeylerinde meydana gelmektedir.



Şekil 5.20. Buhar kazanı ısı kayıpları dağılım grafiği

Şekil 5.19 detaylı olarak incelendiğinde kazan yan yüzeylerinin 33 °C sıcaklığa sahip olup zaten yalıtılmış olduğu görülmektedir. Dolayısıyla sıcaklığı yüksek olan bölgelerin yalıtımı üzerine yoğunlaşmak daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu doğrultuda kazan dış cidar sıcaklıklarının en yüksek olduğu bölgeleri gösteren Pareto diyagramı hazırlanarak Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Bu şekil analiz edildiğinde özellikle ön ve arka kapaklarda sıcaklığın çok yüksek olduğu ve buralardan önemli miktarda ısı kaybedildiği tespit edilmiştir. Böylece iyileştirme çalışmalarına nerelerden başlanabileceği konusunda fikir oluşturulmuştur.



Şekil 5.21. Buhar kazanı yüzey sıcaklıkları Pareto diyagramı

5.1.3.3. Yüzeyden Isı Kaybı Enerji FMEA Çalışması

Buhar üretimi prosesinde yüzeyden ısı kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.20’de gösterilmiştir. Yüzeyden ısı kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır. Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip risk “Yüzey sıcaklığının yüksek olması” dır. Bu risk hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.20. Yüzeyden ısı kaybı Enerji FMEA çalışması

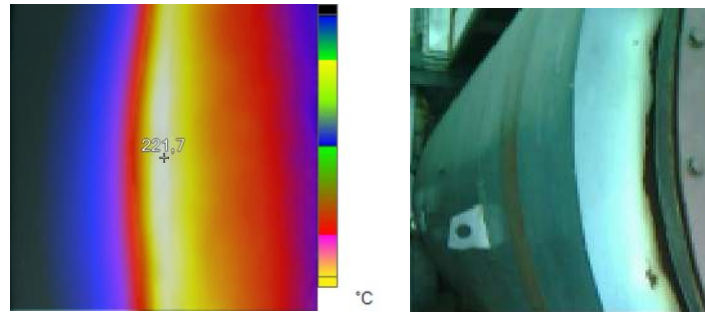
HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Önlem, Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar üretimi	Yüzey sıcaklığının yüksek olması	Yalıtımın olmaması veya eksik, yetersiz olması	Akışkana aktarılan ısı miktarı ve prosese gönderilen buhar sıcaklığı düşer, kazan verimi azalır	Yüzeyin dokunulamayacak kadar sıcak olması	6	5	4	120

5.1.3.4. Yüzeyden Isı Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

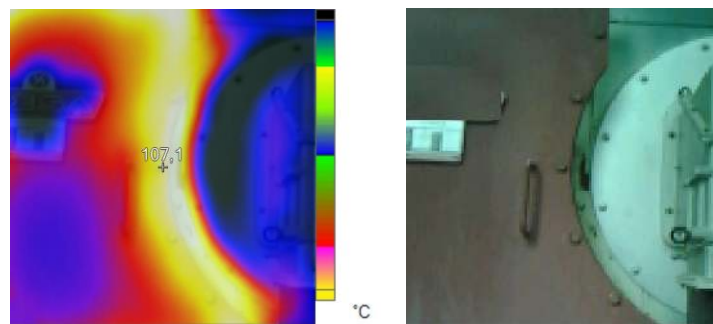
Kazan kapakları genelde kazan üreticileri tarafında yalıtımsız bırakılır ya da yetersiz bir yalıtım uygulanır. Bu bölgelerde kazan kapağı ceketleri kullanılabilir. Kazan kapaklarından ısı kaybını önlemek amacıyla doğru yalıtım malzemesi ve kumaşlarla gereken ölçüler alınarak, istenilen yüzeye uygun, açık kısım kalmayacak şekilde kazan kapakları yalıtım ceketleri ile kaplanabilmektedir. Uygulama yapılacak yere göre imalatı yapılan bu ürünler yüzeyden ısı kaybını önleyecek şekilde makine veya ekipmana giydirilir. Montaj ve demontajları çok kolay olup periyodik bakım yada onarım sırasında kolayca sökülebilirler. Gerekli tamirat yapıldıktan sonra ceketler ve yastıklar yine eski yerlerine konarak makine çok kısa sürede çalışmaya hazır hale gelebilmektedir. Bu uygulamalar uzun yıllar özelliklerini kaybetmeden enerji tasarrufu sağlamaya devam eder (ETS, 2019; Sezgin İzolasyon, 2019).

5.1.3.5. Yüzeyden Isı Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

Firmada kullanılan buhar kazanının ön ve arka kapaklarında, duman sandığında ciddi ısı kayıpları tespit edilmiştir. Kazan dış cidarlarından kaybedilen ısı, kazan ceketleri ve yastıkları kullanılarak minimize edilebilir. Kazan kapakları, kapak yüzeyine uygun ve açık kısım kalmayacak şekilde yalıtım ceketleri vasıtasıyla kaplanabilir. Şekil 5.22 – 5.29’da yüzey sıcaklıklarının yüksek olduğu kazan kısımlarının termal görüntüleri verilmiş ve bu bölgeler için uygulanabilecek yalıtım ceketleri ve yastık örnekleri gösterilmiştir:



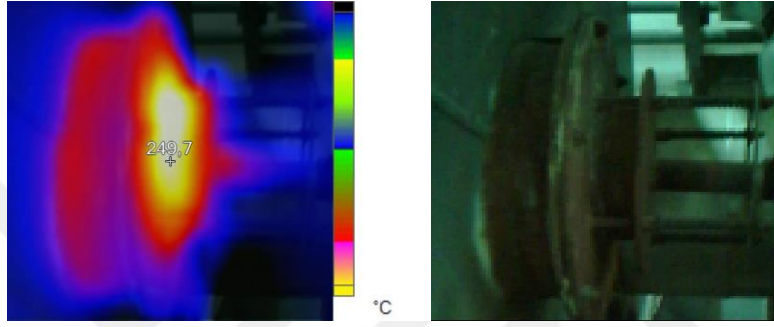
Şekil 5.22. Ön kapak yan yüzey sıcaklığı (221 °C)



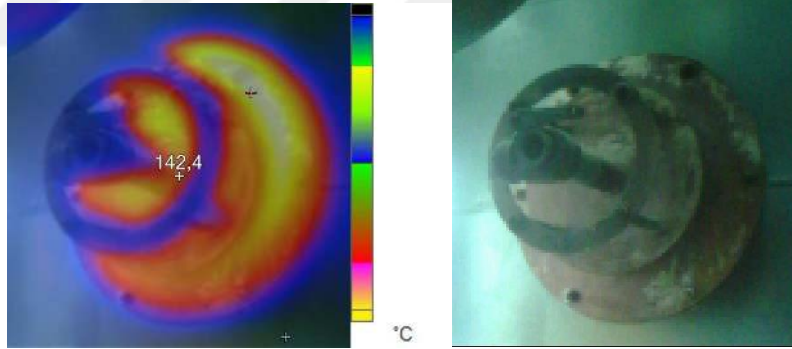
Şekil 5.23. Ön kapak ön yüzeyi sıcaklığı (107 °C)



Şekil 5.24. Ön kapak için önerilen yalıtım ceket



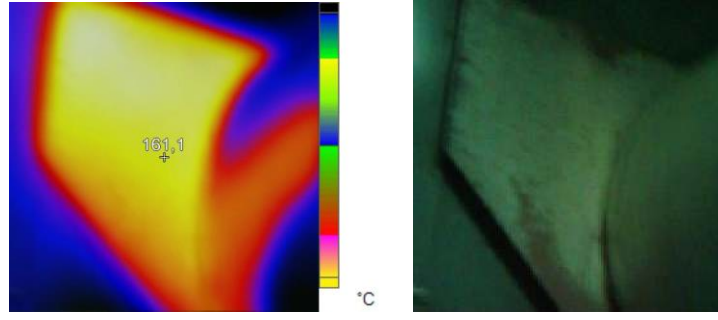
Şekil 5.25. Arka kapak yan yüzey sıcaklığı (249 °C)



Şekil 5.26. Arka kapak ön yüzey sıcaklığı (142 °C)



Şekil 5.27. Arka kapak için önerilen yalıtım yastığı



Şekil 5.28. Duman borusu (161 °C)



Şekil 5.29. Duman borusu için önerilen yalıtım ceket ve yastığı

Yalıtım ile temin edilecek tasarruf miktarının belirlenmesi için mevcut durumda ve yalıtım sonrasında sıcak yüzeylerden gerçekleşen ısı kayıpları hesaplanmıştır. Kazanın yüksek sıcaklığa sahip bölgeleri için yalıtım ceketleri ve yastıkları kullanılarak yüzey sıcaklıklarının 38 °C'ye getirilmesi durumunda toplam ısı kaybı 18,5 kW'den 10,5 kW'ya düşecektir. Önerilen durumda oluşacak toplam ısı kayıpları Tablo 5.21'de gösterilmiştir.

Tablo 5.21. Yalıtım çalışmaları sonrası buhar kazanı yüzeyden ısı kayıpları

Yüzey	Ön kapak yan yüzeyi	Arka kapak yan yüzeyi	Duman borusu	Arka kapak	Ön kapak	Brülör	Kazan arka yüzü	Kazan ön yüzü	Kazan yan yüzeyler	
Ortalama sıcaklık (°C)	38	38	38	38	38	46	44	39	33	
Alan (m ²)	0,96	0,33	0,42	0,19	1,19	0,64	3,3	2,32	36,13	
Taşımla ısı kaybı (kW)	0,16	0,05	0,07	0,03	0,19	0,15	0,70	0,40	4,41	
İşinimla ısı kaybı (kW)	0,11	0,04	0,05	0,02	0,14	0,11	0,52	0,28	3,11	
Toplam Kayıp (kW)	0,27	0,09	0,12	0,05	0,33	0,26	1,22	0,68	7,52	10,5 kW
Kayıp %	2,6	0,9	1,1	0,5	3,2	2,4	11,6	6,5	71,3	

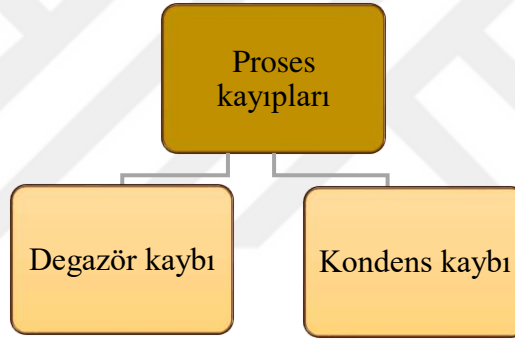
Buhar kazanında eksik yalıtımların tamamlanması durumunda saatlik 8 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 8.262 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.22'de gösterilmiştir. Kazan yüzey yalıtım yatırımının kendini 4,2 ay gibi bir sürede geri ödeyeceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.22. Kazan yüzeylerine yalıtım yapılması durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	8	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	46.080	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	8.262	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	8	ton/yıl
Yatırım Maliyeti	2.900	TL
Geri ödeme süresi	4,2	ay

5.2. Proses Kayıpları

Proses kayıpları Şekil 5.30’da gösterildiği gibi degazör kaybı ve kondens kaybı olmak üzere 2 farklı şekilde gerçekleşmektedir.



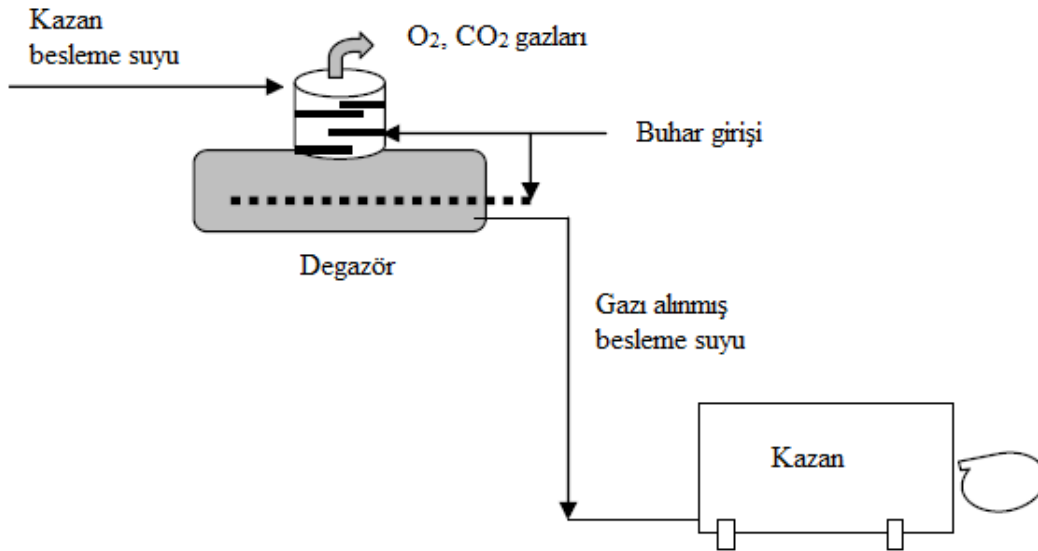
Şekil 5.30. Proses Kayıpları

5.2.1. Degazör Kaybı

Kazana basılan besi suyunda erimiş halde serbest oksijen (O₂) ve karbondioksit (CO₂) bulunabilir. Bu gazlar; kazan ısıtma yüzeylerinin su tarafında, buhar tesisatlarında ve kondens hatlarında korozyona sebep olurlar (Karakurt, 2006: 14; Burkut, 1997: 3). Bu gazlar mutlaka etkisiz hale getirilmelidir. Aksi takdirde sudaki çözünmüş O₂’nin metalik demir ile yapacağı reaksiyon sonucu, kazan borularının su tarafında oluşan mercimek büyüklüğündeki oyuklar kazanın ömrünün azalmasına sebep olur (Karakurt, 2006: 78; Özer, 2004: 36). CO₂ gazı buhar ile beraber taşınır. Buhar kondens haline dönüştüğünde CO₂ kondens içinde çözünür ve karbonik asit (CO₃) oluşur. CO₃ ise kondens borularında boylamasına yarıklar meydana getirir. Bu etkilerden korunmak için kazana verilen besi suyunun içerisindeki gazların çok iyi bir şekilde alınması gerekmektedir (Özer, 2004: 36). EN 12953, işletme basıncı 20 bar’a kadar olan

buhar kazanlarında besi suyundaki O_2 sınırını 0,05 mg/l olarak tanımlamıştır (Durukafa, 2019: 472; Durukafa, 2010: 38). Ayrıca kazan besi suyu CO_2 gazından tamamen arındırılmış olmalıdır (Özer, 2004: 36).

Gazların sudan ayrılması fiziksel ve kimyasal yöntemler ile gerçekleştirilebilir (Özer, 2004: 36). Kimyasal yöntemde besi suyundaki O_2 miktarı oksijen bağlayıcı kimyasallar kullanılarak azaltılabilir. Ancak besi suyunda bulunan tüm oksijenin kimyasallar vasıtasıyla arıtılması ekonomik değildir (Durukafa, 2010: 41). Bu nedenle buhar tesislerinde kullanılan en uygun ve en yaygın yöntem degazör kullanarak gazları fiziksel olarak ayırmaktır. Korozyif gazları besi suyundan ayıran cihazlara degazör (gaz ayırıştırıcı) denir (Özer, 2004: 36). Degazör gaz alma sistemi sayesinde yumuşatma sisteminden gelen ek besi suyu, prostenen dönen kondensle birlikte ısı olarak da işlenerek gazlardan arındırılmış ve böylece buhar kazanlarında buhar üretimi için kullanılacak en ideal kazan besleme su elde edilmiş olur (Yalçın ve Akdemir, 2015: 2677; Durukafa, 2010: 41). Şekil 5.31’de kazan dairesinde kullanılan degazör, şematik olarak gösterilmiştir (Karakurt, 2006: 78).



Şekil 5.31. Kazan dairesinde degazör kullanımı

Kaynak: (Karakurt, 2006: 78)

Degazörün başlıca fonksiyonu çözülmüş gazların sudan uzaklaştırılması yani ayırma işlemidir (YEGM, 2017: 45). Ayırma işlemi için sistemde üretilen taze buhar kullanılır. Bu durum; sistemdeki buharın bir kısmının burada harcanmasına yol açarak verim kaybı oluşturmaktadır. 60 °C’de CO_2 sudan ayrılır ve 85 °C mertebelerinde ise su içerisinde erimiş halde bulunan O_2 bileşenleri korozyon oluşturmayacak seviyelere iner ve 102 °C’de ayırıştırma

işlemi tamamen gerçekleştirilmiş olur (Özer, 2004: 36). Besi suyu bu sayede 102 °C'ye yükseltilir. Bu sıcaklık altında besi suyu içindeki çözünmüş CO₂ tamamen tasfiye olurken, O₂ derişimi 0,05 mg/l'nin altına iner (Durukafa, 2010: 41). Bir endüstriyel buhar sisteminde birçok fonksiyonu yerine getiren degazör bu şekilde takviye suyunun ön ısıtılmasını da sağlamış olur (YEGM, 2017: 45). Ayrıca bu sayede kazana buhar sıcaklığına yakın sıcaklıkta besleme suyu verilerek, kazanda oluşabilecek ısıl gerilmeler ve termal şoklar en aza indirilir (Özer, 2004: 37).

5.2.1.1. Degazör Kaybı Hesaplama Yöntemi

Degazörde besi suyundan ekstrakte edilen koroziif gazlar, degazör domunun en üst noktasında bulunan gaz tahliye vanası yoluyla tahliye edilir. Bu işlem esnasında bir miktar buhar da bu gazlarla birlikte sistemi terk eder. Pratikte kaybedilen buhar miktarı, sistemin toplam buhar üretim kapasitesinin %0,5'i olarak alınır (Durukafa, 2019: 470).

5.2.1.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Degazör Kaybı

Mevcut sistemde kazan kapasitesi 5000 kg/h olduğundan atık buhar debisi 25 kg/h olarak bulunmuştur.

$\dot{m}_{\text{atık buhar}}$: atık buhar debisi (kg/h)

$$\dot{m}_{\text{atık buhar}} = 5000 \times 0,005 = 25 \text{ kg/h}$$

Gaz alma sıcaklığının sağlanması için degazör 0,2 bar buhar basıncı altında işletilir (Durukafa, 2019: 472). Degazör gaz atma vanasından atık gazla birlikte tahliye edilen yaklaşık 25 kg/h buhar ile dışarı atılan enerji (5.22) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 18,6 kW olarak bulunmuştur.

$$Q_{\text{atık buhar}} = \dot{m}_{\text{atık buhar}} \times h_{b0,2\text{bar}} \quad (5.22)$$

$$Q_{\text{atık buhar}} = 25 \times 2683 = 67\ 085 \text{ kJ/h} = 18,6 \text{ kW}$$

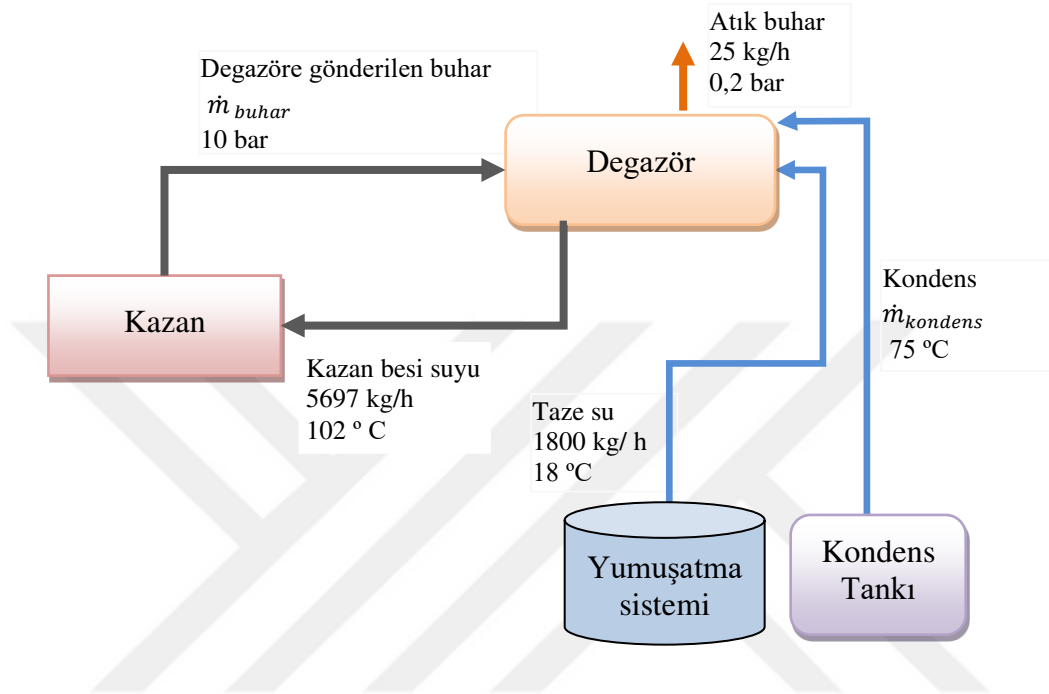
Kazana gönderilen besi suyu debisi kazanın buhar kapasitesi ve blöf yoluyla tahliye edilen kazan suyu miktarının toplamına eşit olmalıdır. Kazan kapasitesi 5000 kg/h ve mevcut durumda yüzey blöf debisi 697 kg/h'tir. Bu durumda (5.23) nolu eşitlik kullanılarak besi suyu debisi 5697 kg/h olarak bulunmuştur.

$\dot{m}_{\text{besi suyu}}$ = Kazan besi suyu debisi (kg/h)

$$\dot{m}_{\text{besi suyu}} = \dot{m}_{\text{buhar kapasitesi}} + \dot{m}_{\text{yüzey blöf}} \quad (5.23)$$

$$\dot{m}_{\text{besi suyu}} = 5000 + 697 = 5697 \text{ kg/h}$$

Tesiste bulunan buhar kazanı tam yükte 5 ton/h ve 10 bar basınçta buhar üretmektedir. Ancak üretilen toplam buharın bir kısmı degazör ısıtmasında kullanılmaktadır. Mevcut durumda degazördeki kütle ve enerji denge şeması Şekil 5.32’de verilmiştir. Net buhar üretiminin belirlenmesi için degazöre gönderilen buhar miktarının hesaplanması gereklidir (Durukafa, 2019: 475).



Şekil 5.32. Mevcut durumda degazör kütle ve enerji denge şeması

Degazör için sırasıyla kütle ve enerji dengesini gösteren (5.24) ve (5.25) nolu eşitlikler kullanılarak degazöre giren kondens miktarı 3463 kg/h ve degazöre gönderilmesi gereken buhar miktarı 460 kg/h olarak hesaplanmıştır. Bu durumda kazanın net buhar üretimi 4540 kg/h olarak bulunmuştur.

Kütle dengesi:

$$\sum \dot{m}_{giren} = \sum \dot{m}_{çıkan} \quad (5.24)$$

$$\dot{m}_{buhar} + \dot{m}_{taze\ su} + \dot{m}_{kondens} = \dot{m}_{besi\ suyu} + \dot{m}_{atık\ buhar}$$

$$\dot{m}_{buhar} + 1800 + \dot{m}_{kondens} = 5697 + 25$$

$$\dot{m}_{buhar} + \dot{m}_{kondens} = 3922$$

$$\dot{m}_{buhar} = 3922 - \dot{m}_{kondens}$$

Enerji dengesi

$$\sum Q_{giren} = \sum Q_{çıkan} \quad (5.25)$$

$$\dot{m}_{buhar} \times h_{b10bar} + \dot{m}_{taze su} \times h_{s18^\circ C} + \dot{m}_{kondens} \times h_{s75^\circ C} = \dot{m}_{besi suyu} \times h_{s102^\circ C} + \dot{m}_{atık buhar} \times h_{b0,2 bar}$$

$$\dot{m}_{buhar} \times 2779,7 + 1800 \times 75,7 + \dot{m}_{kondens} \times 314 = 5697 \times 427 + 25 \times 2683$$

$$(3922 - \dot{m}_{kondens}) \times 2779,7 + 1800 \times 75,7 + \dot{m}_{kondens} \times 314 = 5697 \times 427 + 25 \times 2683$$

$$\dot{m}_{kondens} = 3463 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{buhar} = 460 \text{ kg/h}$$

$$Q_{net buhar} = 5000 - 460 = 4540 \text{ kg/h}$$

5.2.1.3. Degazör Kaybı Enerji FMEA Çalışması

Buhar üretimi prosesinde degazör kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.23'te gösterilmiştir. Degazör kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır. Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip riskler “degazörde taze buhar kullanılması” ve “degazörde buhar kaybı”dır. Bu riskler hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.23. Degazör Kaybı Enerji FMEA Çalışması

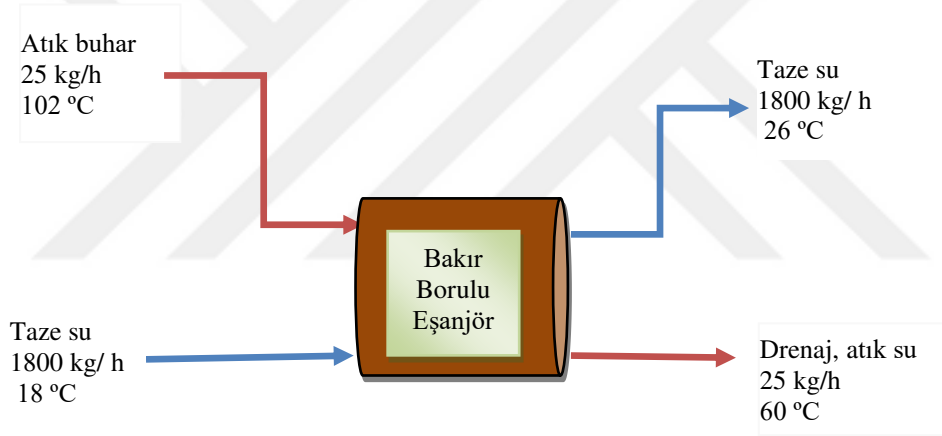
HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/ İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Önlem, Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar üretimi	Degazörde buhar kaybı	Besi suyundan ayrıştırılan korozyif gazlarla birlikte buhar kaybedilmesi	Kazan verimi düşer.		6	4	5	120
	Degazörde taze buhar kullanımı	Gazları besi suyundan ayırtırmak için sistemde üretilen taze buharın kullanılması			7	6	5	210

5.2.1.4. Degazör Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

Degazör gaz atma ağzından dışarı atılan korozif gaz ve buharın taşıdığı enerjiyi geri kazanmak üzere sisteme oksijen korozyonundan etkilenemeyecek bakır borulu eşanjör eklenebilir. Bu şekilde ekstrakte edilen gazlardan ısı geri kazanımı sağlanabilir (Durukafa, 2010: 99).

5.2.1.5. Degazör Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

Degazör gaz tahliye hattına bağlanan bakır borulu eşanjör sayesinde bu noktadan kaybedilen 25 kg/h buhar yoğunlaştırularak 60 °C sıcaklıkta su olarak kanala atılırken 18 °C sıcaklıktaki taze besi suyu bu eşanjörden geçirilebilir. Eşanjöre ait kütle ve enerji denge şeması Şekil 5.33'te verilmiştir. Taze besi suyu yaklaşık 26 °C'ye ısıtıldıktan sonra degazöre gönderilmiş olur. Bu durumda dışarı atılan ısı miktarı (5.26) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 1,8 kW olarak bulunmuştur.



Şekil 5.33. Bakır borulu eşanjörde kütle ve enerji dengesi

Enerji dengesi

$$\sum Q_{giren} = \sum Q_{çıkan}$$

$$\dot{m}_{atık\ buhar} \times h_{b102\ ^\circ C} + \dot{m}_{taze\ su} \times h_{s18\ ^\circ C} = \dot{m}_{taze\ su} \times h_{taze\ su} + \dot{m}_{atık\ su} \times h_{s60\ ^\circ C}$$

$$25 \times 2683 + 1800 \times 75,7 = 1800 \times h_{taze\ su} + 25 \times 251,4$$

$$h_{taze\ su} = 109,4\ (26\ ^\circ C)$$

$$Q_{atık\ ısı} = \dot{m}_{atık\ su} \times h_{s60\ ^\circ C} \quad (5.26)$$

$$Q_{atık\ ısı} = 25 \times 251,4 = 6\ 285\ kJ/h = 1,8\ kW$$

Degazör çıkışına bakır borulu eşanjör eklenmesi durumunda degazör kaybı 18,6 kW'den 1,8 kW'ye düşerek saatlik 16,8 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 17.351 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.24'te gösterilmiştir. Eşanjör yatırımının kendini 5,5 ay gibi bir sürede geri ödeyeceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.24. Degazör çıkışına eşanjör ilave edilmesi durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	16,8	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	96.768	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	17.351	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	16	ton/yıl
Yatırım Maliyeti	8.000	TL
Geri ödeme süresi	5,5	ay

5.2.2. Kondens Kaybı

Buharlaştırma ısısını prosese aktaran buhar aynı basınçta kondens (su) fazına geçer (Kaya ve Öztürk, 2014: 301). Sahip olduğu basınca bağlı olarak doymuş su entalpisi ve sıcaklığına sahip kondens kazan dairesine geri döndürülür ve kazan dairesinde bulunan kondens tankında biriktirilir (Ünlü, 2009:71). Birçok durumda kondens sisteminden kazana geri döndürülen kondens, besleme suyunun büyük kısmını oluşturur (Öztürk, 2012: 26). Tank hacmi genellikle 1 saatte oluşan kondensi depolayabilecek kapasitededir. Tankta biriken kondens pompa vasıtasıyla degazöre gönderilir. Prosesten dönen kondens hem yüksek miktarda ısı içermektedir hem de buhar sistemindeki en temiz sudur (Durukafa, 2010: 44). Kondensin önemli miktarda ekonomik değer taşımasının nedenleri şu şekilde sıralanabilir (YEGM, 2017: 63):

- Kondens önemli bir ısı enerjisiye sahiptir.
- Kondensin herhangi bir kimyasal su arıtma işlemine ihtiyacı yoktur.
- Kondens toplandığında atık şebekesine gönderilmesine gerek yoktur.
- Kanalizasyon çıkışında herhangi bir ısı sınırlama nedeniyle soğutulması gerekmez.

Sistemde oluşan kondensin mümkün olan en düşük kayıpla besi suyu sistemine geri dönmesi gereklidir. Bu sayede gerek ısı gerekse kimyasal besi suyu ıslah maliyetleri düşürülür (Durukafa, 2010: 44). Bir endüstriyel tesisin nasıl bir performans sergilediğini belirlemek için temel yöntem mevcut kondensin ne kadarının kazan tesisine geri döndürüldüğünü belirlemektir. Kondens geri kazanımı %80'i aştığında, iyi olarak kabul edilir (YEGM, 2017: 64).

Oluşan kondensin sisteme geri çevrilmesi kadar kondensle birlikte buharın tahliye edilmesini önlemek de çok önemlidir. Çünkü buharın enerjisini prosese aktarmadan sistemden tahliyesi işletme maliyetlerini çok büyük ölçüde arttırmaktadır. Kondensi tahliye etmek için buhar kapanları veya diğer adıyla kondenstoplar kullanılmaktadır (Durukafa, 2010: 62). Buhar hatlarında bulunan kondenstopların başlıca üç işlevi şunlardır (Özer, 2004: 11; Kaya ve Öztürk, 2014: 298):

- Buhar hatlarındaki kondensi uzaklaştırmak
- Buhar hatlarında bulunan hava ve çözünemeyen gazları uzaklaştırmak
- Buhar kayıplarının minimum olmasını sağlamak

Tesisin verimli ve emniyetli çalışabilmesi için kondensin hızlı bir şekilde tahliye edilmesi gerekmektedir. Çeşitli nedenlerden dolayı kondenstoplarda sorunlar olabilir. Kondenstopun buhar kaçırmaması ya da yeterince tahliye yapamaması ile oluşacak ısı enerjisi kayıplarının da oranı yüksektir (Ünlü, 2009: 71). Buhar sistemlerinde enerji tasarrufu yapılacak en önemli noktalardan biri kondenstoplardır (Ocaktan, 2017).

Kondensin, kazan dairesindeki atmosfere açık kondens tankına boşaldığı noktada, üzerindeki basıncın kalkmasıyla açığa çıkan enerji ile bir kısmı buharlaşır. Bu buhara flaş buhar denilir ve atmosfere atılır (Ünlü, 2009: 71). Ayrıca; kondens, buhar kapanından basınç kaybıyla çıkar ve bu basınç düşüşü yüksek sıcaklıklı kondensin bir kısmının flaş buhara dönüşmesine sebep olur (Durukafa, 2010: 66). Flaş buharın sıcaklığı kazan tarafından üretilen buharın sıcaklığından düşük olmasına rağmen taşıdığı ısı düşük değildir ve gizli ısı içerdiğinden önemlidir. Bu sebeple flaş buharın kondensten ayrıştırılarak kullanılması, aynı miktardaki buharın kazanda daha az üretilmesi diğer bir ifadeyle enerji tasarrufu demektir (Kaya ve Öztürk, 2014: 301).

Flaş buhar kondens tankının havalık borusundan kaçarak dışarıya gider. Bu kayıp kondens olan suyun %5-15'i arasında değişir. Buna birde kondenstop kaçakları ilave olunca bu değer daha da yükselir (Bilgiç, 2004: 4; Özer, 2004: 35). Kondens toplama hatlarında ve atmosfere açık kondens tanklarından atılan flaş buhar ile birlikte oluşacak kayıplar tipik bir işletmede buhar miktarının %20'sine kadar ulaşabilmektedir (Ünlü, 2009: 71; Çomoğlu, 2019: 125).

5.2.2.1. Kondens Kaybı Hesaplama Yöntemi

Basınç düşüşünden sonra flaş buhara dönüşen kondensi ve flaş buharla kaybedilen ısı miktarını bulmak için sırasıyla (5.27) ve (5.28) nolu eşitlikler kullanılabilir (Durukafa, 2010: 72; Özer, 2004: 16):

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = \frac{h_s (\text{yüksek basınç}) - h_s (\text{düşük basınç})}{h_{sb} (\text{düşük basınç})} \times \dot{m}_{\text{kondens}} \quad (5.27)$$

$$Q_{\text{flaş buhar}} = \dot{m}_{\text{flaş buhar}} \times h_{sb} (\text{düşük basınç}) \quad (5.28)$$

h_s (yüksek basınç) : Kondens entalpisi (yüksek basınç) (kJ/kg)

h_s (düşük basınç) : Kondens entalpisi (düşük basınç) (kJ/kg)

h_{sb} (düşük basınç) : Buharlaştırma entalpisi (düşük basınç) (kJ/kg)

$\dot{m}_{\text{kondens}}$: Kondens debisi (kg/h)

$\dot{m}_{\text{flaş buhar}}$: Flaş buhar debisi (kg /h)

$Q_{\text{flaş buhar}}$: Flaş buhar ile kaybedilen ısı (kJ/h)

5.2.2.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Kondens Kaybı

Sistemden dönen kondensin atmosferik basınca açılmadan önceki basıncı 5 bar'dır. 5 bar'da doymuş su olan kondensin kondens tankına açılması halinde bir miktar kondens flaş buhar olarak sistemi terk etmektedir. (5.27) nolu eşitlik kullanılarak kondensin %11,16'sının flaş buhara dönüştüğü hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = \frac{h_{s5\text{bar}} - h_{s1\text{atm}}}{h_{sb1\text{atm}}} \times \dot{m}_{\text{kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = \frac{670-418}{2258} \times \dot{m}_{\text{kondens}} = 0,1116 \dot{m}_{\text{kondens}} = \%11,16 \dot{m}_{\text{kondens}}$$

Degazör kayıpları bölümünde degazöre gönderilen net kondens miktarı 3463 kg/h olarak bulunmuştu. Prosesten dönen kondensin bir kısmı flaş buhara dönüştüğünden elde edilen bu değer net kondens miktarı olup prosesten dönen toplam kondens miktarı bulunmalıdır. Bu durumda prosesten dönen toplam kondens debisi (5.29) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 3898 kg/h bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{net kondens}} = \dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}} - \dot{m}_{\text{flaş buhara dönüşen kondens}} \quad (5.29)$$

$$3463 = \dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}} - (0,116 \times \dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}})$$

$$\dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}} = 3898 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}} : \text{Prosesten dönen toplam kondens debisi (kg/h)}$$

Toplam dönen kondens içerisinde flaş buhara dönüşen kondens miktarı 435 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = 0,1116 \times \dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = 0,1116 \times 3898 = 435 \text{ kg/h}$$

Bu durumda kondens tankından flaş buhar çıkışı ile kaybedilen ısı miktarı (5.30) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 323 kW olarak bulunmuştur.

$$Q_{\text{flaş buhar}} = \dot{m}_{\text{flaş buhar}} \times h_{b1atm} \quad (5.30)$$

$$Q_{\text{flaş buhar}} = 435 \times 2675 = 1163842 \text{ kJ /h} = 323 \text{ kW}$$

5.2.2.3. Kondens kaybı Enerji FMEA çalışması

Buhar üretimi prosesinde kondens kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.25'te gösterilmiştir. Kondens kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır. Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip risk “Kondens tankından flaş buhar kaybı” dır. Bu risk hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.25. Kondens kaybı Enerji FMEA çalışması

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/ İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Önem, Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar üretimi	Yetersiz kondens tahliyesi	Kondenstopun yeterince tahliye yapamaması	Koç darbeleri oluşur, ısı iletimi düşer, contalarda kaçaklara ve kontrol vanalarında aşınmalara neden olur.	Arıza	4	3	5	60
	Kondens tankından flaş buhar kaybı	Kondensin tanka boşaltıldığı noktada üzerindeki basıncın kalkmasıyla flaş buhar oluşur	Flaş buhar kondens tankının havalık borusundan kaçarak dışarı gider. Kondensin %5-15'i kaybedilir.	Gözle görülür	4	5	6	120
	Kondenstoplarda flaş buhar kaybı	Kondensin buhar kapanından basınç kaybıyla çıkması nedeniyle flaş buhar oluşur	Kondensin bir kısmı kaybedilir.		3	3	6	54
	Kondensin soğuması	Kondens dönüş hattının uzun olması	Kazana geri dönen kondensin sıcaklığı düşer, degazörde gereken enerji artar.		3	4	3	36
	Kondens dönüş oranının düşük olması	Kondensin basınç düşmesi nedeniyle flaş buhara dönüşmesi ve kondenstop kaçakları	Takviye su ihtiyacı artar, su artıma için kullanılan kimyasal miktarı ve degazörde gereken enerji artar.		4	3	5	60
	Kondenstopun buhar kaçırması	Kondenstopun arızalanması	Buhar ve enerji kaybına neden olur.	Arıza	4	4	5	80
	Kondenstopun kapalı durumda kalması	Kondenstopun arızalanması	Buhar çekişi azalır, kondens boşaltılamaz, koç darbesi oluşabilir, ısı iletimi düşer.		4	4	5	80

5.2.2.4. Kondens Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

Kondens kaybını azaltmak için çeşitli iyileştirme fırsatları bulunmaktadır. Bunlar:

1. Kondenssten flaş buhar eldesi
2. Isı değiştirici kullanılarak kondens sıcaklığının düşürülmesi
3. Kondensin mümkün olan en yüksek oranda ve ısıl enerjide geri kazanılması
4. Etkin bir buhar kapanı yönetimi ve bakım programı oluşturulması

1. Kondenzen flaş buhar eldesi

Sistemden dönen yüksek sıcaklıktaki kondensin ısını geri kazanmanın ilk yolu kondens tankına girmeden önce basıncının bir flaş buhar tankı içinde düşürülerek oluşan flaş buharın kontrollü olarak kullanım noktasına gönderilmesidir. Oluşan flaş buhar genellikle degazörün ihtiyaç duyduğu düşük basınçlı buharı sağlamak amacıyla kullanılmakla birlikte diğer buhar ihtiyacı olan yerlerde, ısıtma cihazlarında, proseste, eşanjörlerde de kullanılabilir (Durukafa, 2010: 82).

2. Isı değıştirici kullanılarak kondens sıcaklığının düşürülmesi

Prosesten dönen yüksek sıcaklıktaki kondens ısı eşanjörü yardımıyla soğutulur atmosferik basınçta doyma sıcaklığının (100 °C) altına düşürülürse flaş buhar oluşumunun önüne geçilmiş olur. Elde edilen ısı degazöre gönderilen suyun sıcaklığının artırılmasında veya herhangi bir proses ön ısıtmasında kullanılabilir (Öztürk, 2012: 44; Durukafa, 2010: 82).

3. Kondensin mümkün olan en yüksek oranda ve ısı enerjide geri kazanılması

Sistem ve prosesin verimli ve emniyetli çalışabilmesi için oluşan kondensin mümkün olduğu kadar çabuk ve doğru şekilde prosesten alınıp kayıp olmaksızın kondens toplama noktası olan kondens tankına iletilmesi gerekmektedir (Ocaktan, 2017). Geri kazanılan her birim kondens daha az miktarda takviye su gerektiği anlamına gelir. Aynı zamanda degazörde ihtiyaç duyulan enerji ve yapılması gereken blöf miktarı azalır (YEGM, 2017: 70). Kondens olarak geri kazanılan buharın oranı geri kazanım sisteminin verimliliğinin ölçüsüdür. Ancak en iyi kondens geri kazanım sistemlerinde bile %85'ten fazla verime ulaşmak pek mümkün değildir (Öztürk, 2012: 44).

4. Etkin bir buhar kapanı yönetimi ve bakım programı oluşturulması

Endüstriyel tesislerde etkin bir buhar kapanı yönetimi ve bakım programı oluşturulması çok önemlidir. Arıza nedeniyle buhar kaçıran bir kondenstop çok büyük enerji kaybına neden olur. Kondenstopdan kaçan buhar bir önlem alınmazsa açık kondens hattıyla doğrudan dışarı atılır (Özer, 2004: 15). Çok iyi korunan bir buhar sistemi de olsa genellikle her yıl %10'luk bir kapan arızası görülür. Eğer kontrol edilmezse, bu durum önemli ekonomik kayıplara ve sistemde sorunlara yol açabilir. Tesisteki her buhar kapanını kontrol etmek ve en azından yılda bir kez nasıl performans gösterdiğini belirlemek gereklidir. Buhar kapanının çalışması, ultrasonik sensörler ve termometreler gibi uygun ölçüm cihazları kullanılarak değerlendirilebilir (YEGM, 2017: 69).

5.2.2.5. Kondens Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

Prosesten dönmeyen kondens yerine sürekli olarak sisteme 18 °C sıcaklığında taze su ilave edilmektedir. Prosesten dönen kondensin basıncının düşmesi sonucu açığa çıkan flaş buharın degazöre beslenerek geri kazanılması için sisteme flaş buhar cihazı eklenebilir.

Kondens dönüşüne eklenen flaş buhar cihazı vasıtasıyla 5 bar'dan 0,2 bar'a genişleyen 3898 kg/h debili kondensin bir kısmı flaş buhar olarak kazanılabilir. Ayrıca kondens dönüşüne monte edilen flaş buhar cihazı buhar kapanlarından kaçan buharın da geri kazanılmasını sağlayacaktır. Bu durumda (5.27) nolu eşitlik kullanılarak kondensin %10,29'unun flaş buhara dönüştüğü hesaplanmıştır. Prosesten dönen kondens debisi 3898 kg/h olduğundan oluşan flaş buhar miktarı 401 kg/h olacaktır.

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = \frac{h_{s5\text{bar}} - h_{s0,2\text{bar}}}{h_{sb0,2\text{bar}}} \times \dot{m}_{\text{kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = \frac{670 - 439}{2244} \times \dot{m}_{\text{kondens}} = 0,1029 \dot{m}_{\text{kondens}} = \%10,29 \dot{m}_{\text{kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = 0,1029 \times 3898 = 401 \text{ kg/h}$$

Kondensten elde edilen flaş buhar debisi 401 kg/h olup degazörün 460 kg/h olarak hesaplanan taze buhar ihtiyacını büyük ölçüde karşılayabilir. Geriye kalan ve degazöre aktarılan net kondens miktarı ise (5.29) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 3497 kg/h bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{net kondens}} = \dot{m}_{\text{dönen kondens}} - \dot{m}_{\text{flaş buhara dönüşen kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{net kondens}} = 3898 - 401$$

$$\dot{m}_{\text{net kondens}} = 3497 \text{ kg/h}$$

Bu durumda flaş buhar cihazından 0,2 bar'da doymuş su olarak çıkan ve kondens tankında atmosfere açılan kondensin çok küçük bir kısmı buharlaşarak sistemi terk edecektir. (5.27) nolu eşitlik kullanılarak kondensin %0,97'sinin flaş buhara dönüşüp sistemi terk edeceği hesap edilmiştir ve sistemi terk eden buhar miktarı 37,8 kg/h olarak bulunmuştur.

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar terk}} = \frac{h_{s0,2\text{bar}} - h_{s1\text{atm}}}{h_{sb1\text{atm}}} \times \dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar terk}} = \frac{439 - 418}{2258} \times \dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar terk}} = 0,0097 \times \dot{m}_{\text{toplam dönen kondens}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar terk}} = 0,0097 \times 3898 = 37,8 \text{ kg/h}$$

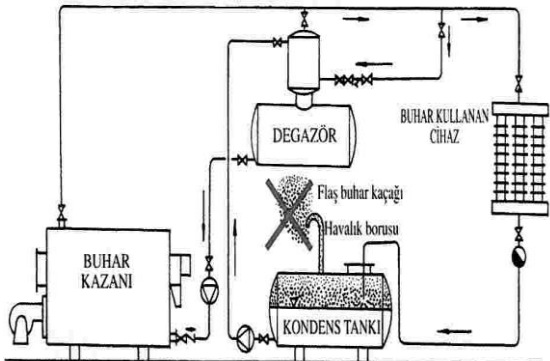
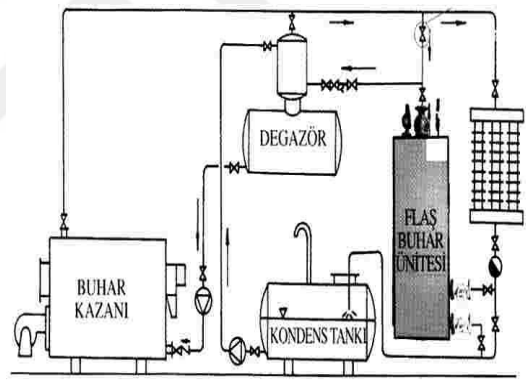
Bu durumda kondens tankından sistemi terk eden flaş buhar ile kaybedilen ısı miktarı (5.30) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 28 kW olarak bulunmuştur.

$$Q_{\text{flaş buhar terk}} = \dot{m}_{\text{flaş buhar terk}} \times h_{b1\text{atm}} = 37,8 \times 2675,5 = 101\,162 \text{ kJ/h} = 28 \text{ kW}$$

Daha önce atmosfer basıncında flaş buhara dönüşerek sistemden uzaklaşan kondens, flaş buhar cihazı ile geri kazanıldığı için sisteme eklenen taze besi suyunda azalma gerçekleşecektir. Yeni taze besi suyu debisinin yaklaşık 1400 m³/h (1800- 401) olarak gerçekleşmesi öngörülmektedir.

Flaş buhar tankı uygulaması öncesi ve sonrasında oluşan kondens kayıplarının kıyaslanması Tablo 5.26'da verilmiştir.

Tablo 5.26. Flaş buhar tankı uygulaması Önce - Sonra Kaizen çalışması

KAIZEN ÖNCESİ DURUM	KAIZEN SONRASI DURUM
	
<i>Kondens tankı havalık borusundan flaş buhar kaçağı (Bilgiç 2004: 8)</i>	<i>Flaş buharın degazöre gönderilmesi (Bilgiç 2004: 8)</i>
Kötü Durumun Açıklaması, Kayıplar	Gelinen İyi Durumun Açıklaması
Firmada kondenssten oluşan flaş kaybı miktarı 435 kg/h olarak hesaplanmıştır. Kondens tankından flaş buhar çıkış ile kaybedilen ısı ise 323 kW bulunmuştur.	Flaş buhar ünitesi ilavesinden sonra flaş kaybı miktarı sadece 37,8 kg/h olarak gerçekleşecektir. Kondens tankından flaş buhar çıkış ile kaybedilen ısı ise 28 kW 'ya düşmüştür.

Mevcut durumda flaş buhar oluşumu nedeniyle meydana gelen kondens kaybı 323 kW'dan 28 kW'ya düşerek saatlik 295 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 304.667 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.27'de gösterilmiştir. Flaş buhar cihazı yatırımının kendini 1,3 ay gibi bir sürede geri ödeyeceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.27. Flaş buhar tankı ilavesi durumunda enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	295	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	1.699.200	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	304.667	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	287	ton/yıl
Yatırım Maliyeti	32.000	TL
Geri ödeme süresi	1,3	ay

5.3. Dağıtım Kayıpları

Kazanda üretilen buharı prosese taşıyan sisteme buhar dağıtım sistemi denir. Buhar dağıtım sistemi buhar kolektörü, ana dağıtım boruları, tâli dağıtım boruları ve hat üzerindeki armatürlerin toplamından oluşur. Buhar kolektörü, buhar dağıtım hattının başlangıç noktasıdır. Kazanların buhar çıkış ağları boru hatları ile kolektöre bağlanır ve kolektör üzerindeki flanşlardan zonlara dağıtılır (Durukafa, 2010: 49). Buharın kolektörlere dağıtılması için kompresör, pompa, vb. gibi herhangi bir mekanik cihaza ihtiyaç yoktur çünkü buhar basıncı buharı dağıtmak için itici güç işlevi görmektedir (YEGM, 2017: 47).

Buhar, doğal olarak kazandan ayrılır ayrılmaz hemen ısısını dışarı vermek isteyecektir. Bu nedenle buharın sahip olduğu ısıнын kullanmak istediğimiz noktaya ulaşmadan önce mümkün olduğu kadar az miktarda kayıpla taşınmasını sağlamamız gerekmektedir. Buharın istenen basınç, kalite ve miktarda buhar kullanan cihazlara taşınarak yüksek verimli bir sistem elde edilmesi ancak tekniğe uygun tasarlanıp kurulmuş ve iyi işletilen bir buhar dağıtım sistemi ile mümkündür (Durukafa, 2010: 49).

Kazan haricinde üretim tesisinde bulunan degazör, kondens tankı, flaş buhar tankı, blöf tankı, vanalar ve tesisattaki boru hatlarında yüksek sıcaklığa bağlı olarak büyük miktarda yüzeyden ısı kayıpları oluşmaktadır (Sarı, 2019: 188). Tipik bir işletmede dağıtım hattı kayıplarının oranı yaklaşık %5-7 mertebesinde (Ünlü, 2009: 71). Verimli bir sistemde bu ekipmanların tamamına iyi bir izolasyon uygulanması gerekmektedir (Sarı, 2019: 188).

Kondens dönüş borularının ve kondens tankının yalıtılması, kondensin minimum ısı kaybıyla toplanıp bünyesindeki ısıнын korunmasını sağlar (EİEİ, 1999: 1110).

Bakımlar esnasında sökülmesi gereken flanş ve benzeri boru bağlantı elemanlarının civatalarına kolay erişim sağlanabilmesi amacıyla bu elemanlar genellikle yalıtımsız bırakılmaktadır. Aynı şekilde birçok tesiste yalıtılmamış vana ve diğer tesisat elemanlarına rastlamak mümkündür. Günümüzde vana, flanşlı bağlantı vb. bakım gerektirebilecek elemanların yalıtımı için kolay sökülüp takılabilen prefabrik izolasyon malzemeleri bulunmaktadır (Durukafa, 2010: 51). Bu ürünlerden biri de vana ceketi olup bağlantı elemanı olarak boğazında ip, kenarlarında da kopça veya cırt bant bulunmaktadır. Gerekğinde kolayca açılıp bakımlarının yapılabilmesine imkân tanıyan yalıtım tekniklerinin geliştirilmiş olması, bu elemanların yalıtımsız bırakılmalarını anlamsız hale getirmektedir. (Uylukçuoğlu, 2009: 46; Mumlu, 2008: 43; EİEİ, 1999: 1213). Eksik veya hasarlı yalıtımın en yaygın bulunduğu alanlar şunlardır (YEGM, 2017: 51):

- Buhar dağıtım kollektörleri
- Vanalar
- Muayene bölgeleri
- Depolama tankları
- Kondens geri dönüş hatları

Dağıtım hatları boyunca yüzeylerin izolasyon durumuna bağlı olarak ısı kaybı oluşmaktadır. Dağıtım kayıplarının azaltılması için emniyet ventilleri hariç olmak üzere dağıtım hattı üzerinde bulunan boru, flanş ve vanalar gibi tüm sıcak yüzeylerin yalıtılması önemlidir (Durukafa, 2010: 50). İyi şekilde yalıtılmış bir boruda olan kayıplar aynı boyuttaki yalıtımsız bir boruda olan kayıpların %15-20'si kadardır (Öztürk, 2012: 38). Yalıtımsız bir vana veya benzeri bir armatürün enerji kaybı, kendisi ile aynı çaptaki borunun kaybettiği enerjiden ortalama 3 ila 5 kat daha fazladır (Akdaş ve Ömür, 2017: 2181). Dolayısıyla yalıtımsız vanaların yaratmış olduğu enerji kaybı azımsanamayacak boyutlardadır. Bu sebeple boru sistemlerindeki vana ve flanşların da mutlaka uygun şekilde yalıtılmaları gerekmektedir.

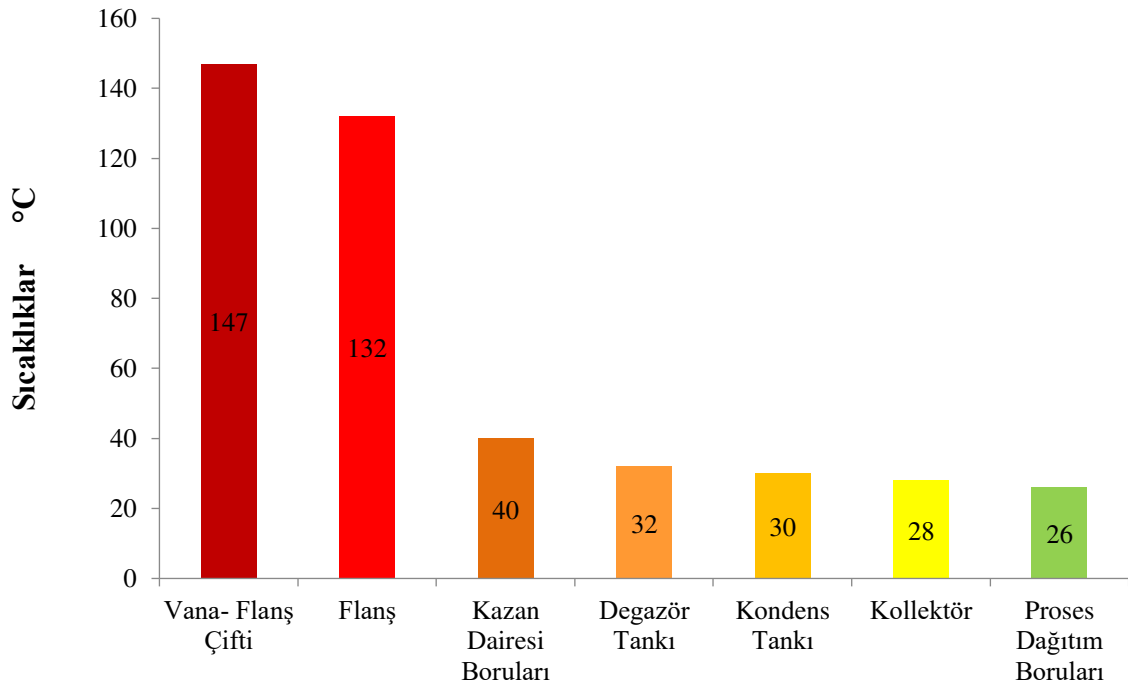
5.3.1. Dağıtım Kayıpları Hesaplama Yöntemi

Dağıtım hattının elemanları olan proses dağıtım boruları, kollektörler, degazör, kondens tankı gibi yüzeylerden gerçekleşen kayıplar ısınım ve taşınım yoluyla kaybedilen ısılar toplanarak bulunabilir. Vana ve flanşlardan olan ısı kayıpları ise; pratik olarak, aynı çapta

eşdeğer bir borudan gerçekleşen ısı kaybı dikkate alınarak bulunabilir (Öztürk, 2012: 42). Buna göre izole edilmeyen her flanş çiftinin dış cidar kaybı, aynı nominal çaptaki 0,5 m çıplak borunun dış cidar kaybına eşittir (Durukafa, 2010: 83).

5.3.2. Mevcut Durumda Kazan Sisteminde Dağıtım Kayıpları

Tesisteki tüm buhar dağıtım sistemi termal kamera ile taranarak buhar dağıtım sistemini oluşturan elemanların yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Elde edilen sıcaklıklar kullanılarak Pareto diyagramı hazırlanmış ve Şekil 5.34'te gösterilmiştir. Bu diyagram incelendiğinde vana ve flanş çiftlerinin sıcaklıklarının 147 °C olduğu görülmektedir. Bu yüksek sıcaklığın nedeni; bakımlarının kolay yapılabilmesi amacıyla tesiste bulunan vana ve flanş çiftlerinin izolasyonsuz bırakılmasıdır. Flanş sıcaklıkları 132 °C olarak ölçülmüş olup bu flanşlar prosesteki bazı değişiklikler sonucu artık buhar hattında kullanılmamaktadır ancak halâ yerinde tutulması nedeniyle taze buhar içermeye devam etmektedirler.



Şekil 5.34. Buhar dağıtım elemanlarının dış yüzey sıcaklıkları Pareto diyagramı

Buhar dağıtım elemanlarından gerçekleşen ısı kaybını bulmak için öncelikle buhar dağıtım hattında bulunan vana ve flanş çiftlerinin sayıları tespit edilmiştir. Daha sonra, bu elemanlardan izolasyonsuz durumda gerçekleşen ısı kayıpları teker teker hesaplanarak Tablo 5.28'de gösterilmiştir.

Tablo 5.28. Vana - Flanş çifti sayıları ve toplam ısı kaybı

Çap (DN, Nominal Çap)	Vana- Flanş Çifti Sayısı	İzolasyonsuz Birim Isı Kaybı (kW)	İzolasyonsuz Toplam Isı Kaybı (kW)
15	1	0,191	0,191
20	4	0,239	0,956
25	7	0,290	2,030
32	4	0,366	1,464
40	3	0,455	1,365
50	2	0,579	1,158
65	4	0,815	3,260
80	2	1,008	2,016
100	2	1,256	2,512
125	7	1,637	11,459
Toplam	36		26,411

Kaynak: (Durukafa, 2010: 90)

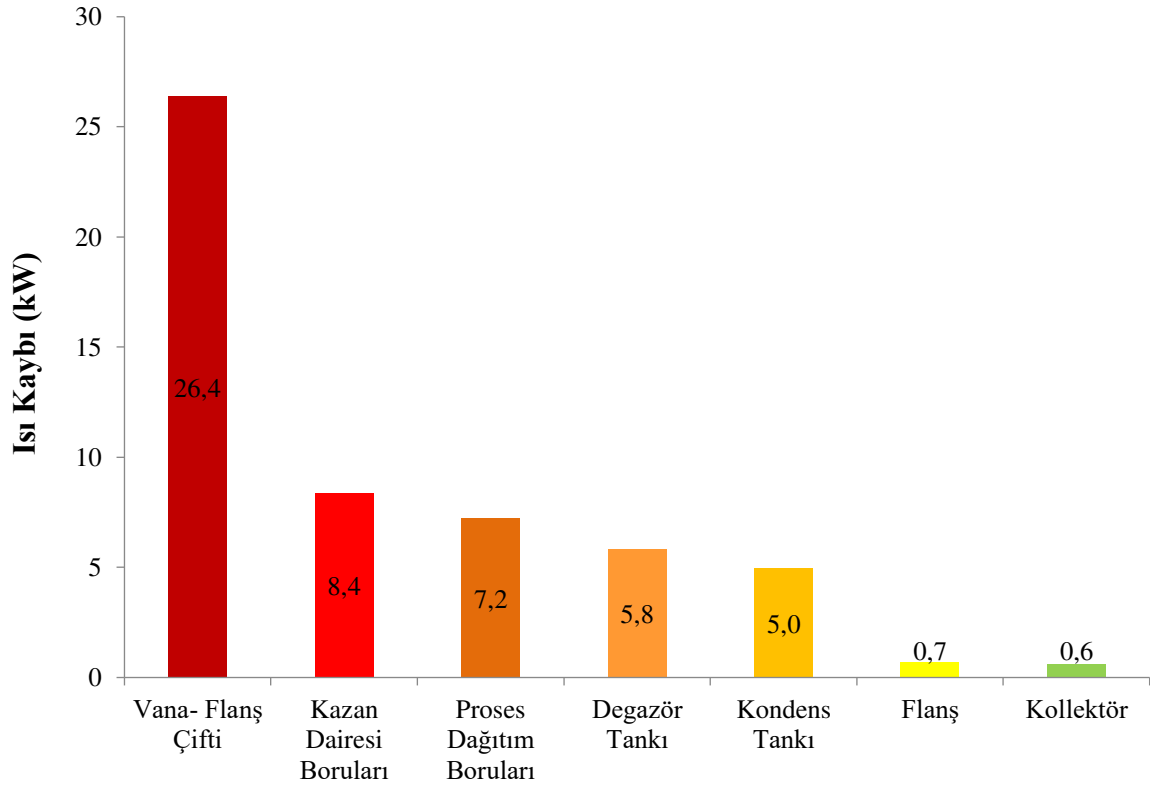
İnceleme yapılan tesiste buhar sistemini oluşturan elemanların yüzeyinden ısı kayıpları yaşanmaktadır. Çalışmalar esnasında kazan dairesi sıcaklığı 18 °C ve dış ortam sıcaklığı 8 °C olarak ölçülmüştür. Buhar sistemindeki tüm dağıtım elemanlarının yüzey sıcaklıkları ayrı ayrı ölçülüp yüzey alanları tespit edilerek yüzeylerden gerçekleşen ısı kayıpları hesaplanmış ve 62,8 kW olarak bulunmuştur. Elde edilen veriler Tablo 5.29’da gösterilmiştir.

Tablo 5.29. Buhar kazanı dağıtım kayıpları

Yüzey	Kondens Tankı	Degazör Tankı	Kollektör	Kazan Dairesi Boruları	Proses Dağıtım Boruları	Vana-Flanş Çifti	Flanş	
Ortalama sıcaklık (°C)	30	32	28	40	26	147	132	
Alan (m ²)	30	30	4,3	27	66			
Taşıyım ile ısı kaybı (kW)	2,930	3,419	0,350	4,835	9,670			
Işınım ile ısı kaybı (kW)	2,033	2,396	0,240	3,530	6,249			
Toplam Kayıp (kW)	4,963	5,815	0,590	8,365	15,919	26,411	0,700	62,8 kW
Kayıp %	7,9	9,3	0,9	13,3	25,4	42,1	1,1	

Toplam ısı kayıp değerleri kullanılarak hazırlanan Pareto diyagramı Şekil 5.35’te verilmiştir. Bu diyagramı incelediğimizde toplam dağıtım kayıplarının büyük kısmını (%42,1) vana-flanş çiftlerinin oluşturduğu görülmektedir. Flanşlarda gerçekleşen ısı kaybı ise çok düşük

miktardadır. Bu durumda dağıtım kayıpları azaltma çalışmasında öncelikli alan; vana- flanş çiftlerindeki kayıplardır.



Şekil 5.35. Buhar dağıtım elemanlarının ısı kaybı Pareto diyagramı

5.3.3. Dağıtım Kaybı Enerji FMEA Çalışması

Buhar üretimi prosesinde dağıtım kaybını düşürmek amacıyla Enerji FMEA hazırlanarak Tablo 5.30’da gösterilmiştir. Dağıtım kaybının sebepleri, etkileri ve tespit edilme yöntemi FMEA tablosunda açıklanmıştır. Bu tabloya göre en yüksek RÖS puanına sahip risk “Vana ve flanşlarda ısı kaybı” dır. Bu risk hakkında gerekli tedbirler alınarak RÖS puanları düşürülmelidir.

Tablo 5.30. Dağıtım kaybı Enerji FMEA çalışması

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)								
Proses	Riskler/ İyileştirmeye açık alanlar	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Önlem, Tespit	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS
Buhar üretimi	Borularda ısı kaybı	Boruların yalıtımlarının yetersiz, eksik veya eskimiş olması, tamir-bakımlar sırasında izolasyonlarının zarar görmüş olması	Isı kayıpları oluşur, prosese gönderilen buharın sıcaklığı azalır, verim düşer.	Elle sıcaklık kontrolü	6	2	2	24
	Vana ve flanşlarda ısı kaybı	Bakımlarının kolayca yapılabilmesi ve kaçakların önlenebilmesi amacıyla vanaların yalıtımsız bırakılması			6	6	4	144
	Kullanılmayan buhar hatlarından ısı kaybı	Endüstriyel prosesler sonucu buhar ihtiyacının değişmesi veya tamamen ortadan kalkması fakat buhar hatlarının halâ yerinde tutulması nedeniyle hala taze buhar içermesi			5	3	4	60
	Kondens ve Degazör tankı ısı kaybı	Yalıtımın eksik veya yetersiz olması			5	2	3	30
	Pislik tutucu, çek vana, basınç düşürücü vb. ekipmanlarda ve armatürlerin bağlantı noktalarında ısı kaybı	Yalıtımın eksik veya yetersiz olması			4	2	4	32

5.3.4. Dağıtım Kaybını Azaltmak İçin Yapılabilecek Uygulamalar

FMEA ve Pareto çalışmaları doğrultusunda vana ve flanşların yalıtılması gerekliliği sonucuna varılmıştır. Diğer dağıtım hatlarında yüzey sıcaklıkları düşük olup yalıtımla ilgili bir eksiklik olmadığı görülmüştür. Bu durumda sistemde bulunan tüm yalıtımsız vana ve flanş çiftleri prefabrik izolasyon malzemesiyle yalıtılarak buhar dağıtım hatlarındaki ısı kayıpları azaltılabilir.

5.3.5. Dağıtım Kaybını Azaltmak İçin Seçilen Uygulama

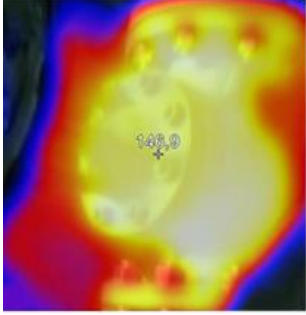
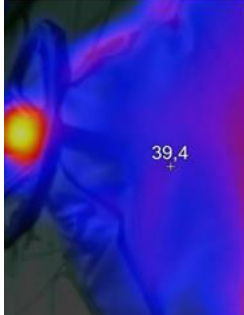
Buhar ve kondens hatlarında bulunan ana tesisattaki değişik çaplardaki toplam 36 adet vanaya izolasyon ceketleri uygulanmıştır. Tesisteki bazı vana ceketleri uygulama örnekleri Şekil 5.36’da verilmiştir.



Şekil 5.36. Dağıtım hatlarında vana ceketleri uygulaması

Önce - Sonra Kaizen çalışması gerçekleştirilerek vana ceketleri uygulaması öncesi ve sonrasındaki termal kamera görüntüleri karşılaştırılmıştır. Hazırlanan Önce - Sonra Kaizen çalışması Tablo 5.31’de verilmiştir.

Tablo 5.31. Vana ceketi uygulaması Önce- Sonra Kaizen çalışması

KAIZEN ÖNCESİ DURUM	KAIZEN SONRASI DURUM
 	 
<i>Yalıtımsız vanalar</i>	<i>Vana ceketi giydirilen vanalar</i>
Kötü Durumun Açıklaması, Kayıplar	Gelinen İyi Durumun Açıklaması
Mevcut durumda izolasyonsuz vana yüzeyleri için ölçümler yapılmış, vana yüzeyindeki sıcaklık ortalama 147 °C olarak ölçülmüştür. Yetersiz derecede yalıtılmış vanalarda sürekli olarak ısı kaybı yaşanmaktadır.	Dağıtım hattında bulunan vanalara vana ceketi giydirilmiştir. Uygulamadan sonra yüzeydeki sıcaklık ortalama 39 °C olarak ölçülmüştür. Yani yüzey sıcaklığında ortalama 108 °C'lık bir azalma sağlanmıştır.

Dağıtım hatlarındaki vana ve flanş çiftlerinde izolasyonlu durumdaki ısı kayıpları Tablo 5.32’de verilmiştir. Toplam ısı kaybı izolasyonsuz durumda 26,4 kW iken izolasyonlu durumda 2,1 kW olarak gerçekleşmektedir. Yalıtım uygulamasıyla 24,3 kW enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Tablo 5.32. İzolasyonlu durumda vana kayıpları

ÇAP (DN)	Vana Sayısı	İzolasyonlu Isı Kaybı (kW)	İzolasyonlu Toplam Isı Kaybı (kW)
15	1	0,019	0,019
20	4	0,018	0,072
25	7	0,022	0,154
32	4	0,027	0,108
40	3	0,034	0,102
50	2	0,045	0,090
65	4	0,065	0,260
80	2	0,082	0,164
100	2	0,105	0,210
125	7	0,138	0,966
TOPLAM	36		2,145

Kaynak: (Durukafa, 2010: 106)

Yalıtım ile temin edilecek tasarruf miktarının belirlenmesi için mevcut durumda ve yalıtım sonrasında sıcak yüzeylerden gerçekleşen ısı kayıpları hesaplanmıştır. Vana ve flanş çiftleri için vana ceketi uygulaması gerçekleştirilmiş ve yüzey sıcaklıkları 39 °C'ye getirilmiştir. Bu durumda toplam ısı kaybı 62,8 kW'den 38,5 kW'ya düşecektir. Vana ceketi uygulaması sonrası oluşacak toplam ısı kaybı Tablo 5.33'te gösterilmiştir.

Tablo 5.33. Vana ceketi uygulaması sonrası buhar kazanı dağıtım kayıpları

Yüzey	Kondens Tankı	Degazör Tankı	Kollektör	Kazan Dairesi Boruları	Proses Dağıtım Boruları	Vana-Flanş Çifti	Flanş	
Ortalama sıcaklık (°C)	30	32	28	40	26	39	172	
Alan (m ²)	30	30	4,3	27	66			
Taşıyım ısı kaybı (kW)	2,930	3,419	0,350	4,835	9,670			
Işınım ısı kaybı (kW)	2,033	2,396	0,240	3,530	6,249			
Toplam Kayıp (kW)	4,963	5,815	0,590	8,365	15,919	2,145	0,700	38,5 kW
Kayıp %	12,9	15,1	1,5	21,7	41,4	5,6	1,8	

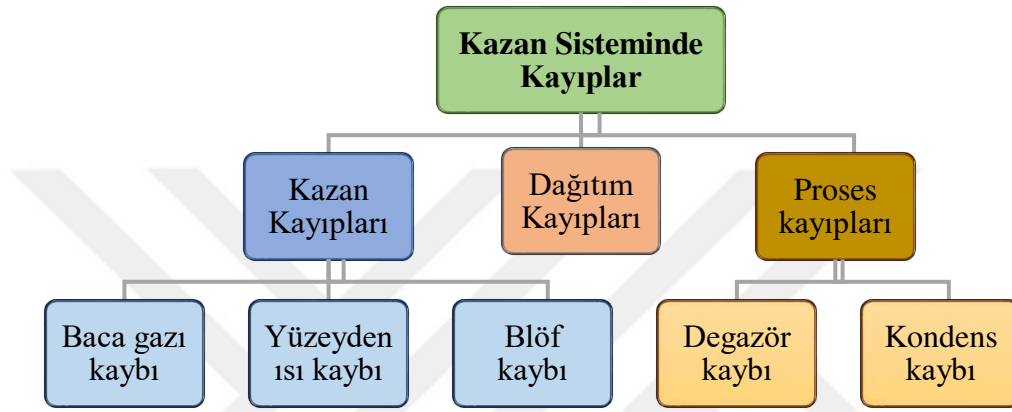
Vana- Flanş çiftlerine vana ceketi uygulanması durumunda saatlik 24,3 kW tasarruf elde edilerek toplamda yıllık 25.096 TL tasarruf sağlanacağı hesaplanmış ve Tablo 5.34'te gösterilmiştir. Dağıtım hatlarında vana ceketi uygulaması yatırımının kendini 5,9 ay gibi bir sürede geri ödeyeceği ortaya konmuştur.

Tablo 5.34. Vana ceketi uygulaması sonrasında enerji tasarrufu

Kazanın Yıllık Çalışma Saati	5760	h/ yıl
Doğal Gazın Birim Fiyatı (Aksa Doğalgaz Dağıtım, Nisan 2021)	0,1793	TL/kWh
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Saatlik)	24,3	kW/saat
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu (Yıllık)	139.968	kW/yıl
Kazanın Doğal Gaz Tüketimi Tasarrufu	25.096	TL/yıl
CO ₂ Emisyonunda Azalma	23	ton/yıl
Yatırım Maliyeti	12.420	TL
Geri ödeme süresi	5,9	ay

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kazan sisteminde kayıplar Şekil 6.1’de gösterildiği gibi 3 ana kısımda incelenebilir. Bunlar; buharın üretilmesi sırasında oluşan kazan kayıpları, buharın prosese taşınması sırasında yaşanan dağıtım kayıpları ve buharın proseste kullanıldıktan sonra kazana tekrar gönderilmesi esnasında meydana gelen proses kayıplarıdır. Kazan kayıpları kendi arasında baca gazı kaybı, yüzeyden ısı kaybı ve blöf kaybı olarak 3 kısma ayrılmaktadır. Proses kayıpları ise degazör kaybı ve kondens kaybı olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 6.1. Kazan sisteminde kayıplar

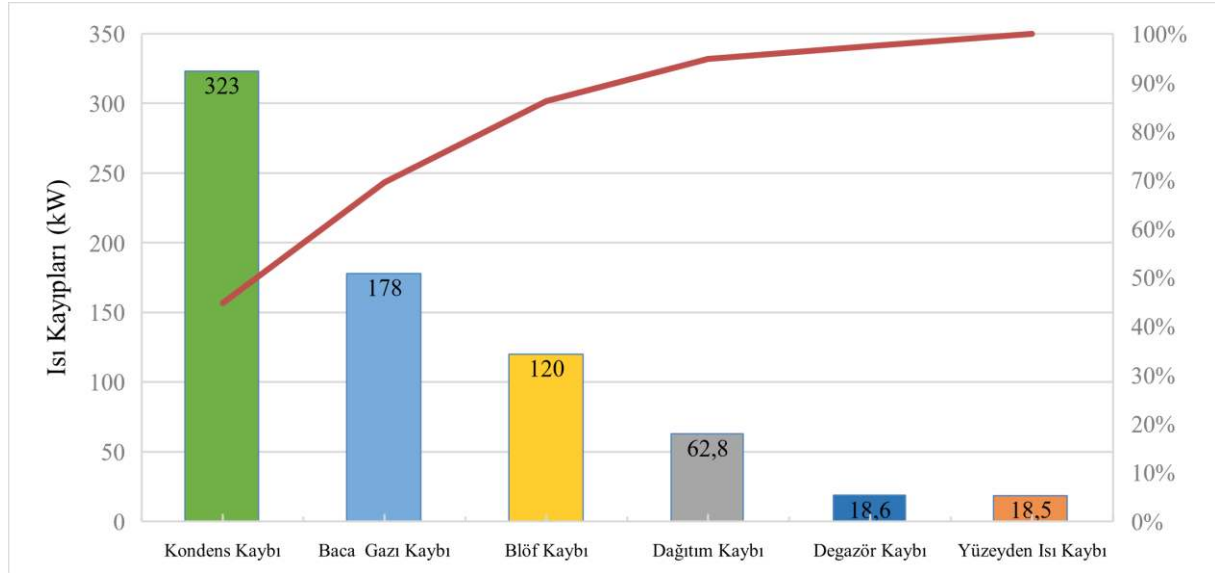
6.1. İyileştirmeler Öncesi Kazan Sisteminde Kayıplar

Mevcut kazan sistemindeki her bir kayıp türü için ısı kayıpları daha önceki bölümlerde ayrı ayrı hesaplanmış ve bulunan değerler Tablo 6.1’de özet olarak verilmiştir. Sistemdeki toplam ısı kaybı 721 kW olarak bulunmuştur.

Tablo 6.1. Mevcut kazan sisteminde meydana gelen ısı kayıpları

KAZAN SİSTEMİNDE KAYIPLAR		Isı Kaybı (kW)
Kazan kayıpları	Baca gazı kaybı	178
	Yüzeyden ısı kaybı	18,5
	Blöf kaybı	120
Proses kayıpları	Degazör kaybı	18,6
	Kondens kaybı	323
Dağıtım kayıpları	Dağıtım kaybı	62,8
TOPLAM KAYIP		721

Şekil 6.2’de Pareto diyagramı çizilerek ısı kayıp miktarlarının kayıp türlerine göre dağılımı gösterilmiştir. Bu grafiğe göre sistemdeki en büyük kayıp kondens kaybıdır.



Şekil 6.2. Mevcut buhar kazan sistemi ısı kayıpları Pareto diyagramı

Tablo 6.1’de verilen değerler ve (6.1) nolu eşitlik kullanılarak kazanın toplam sistemi verimi hesaplanmış ve %80 olarak bulunmuştur.

$$\dot{V}_{dg} = \text{doğalgaz debisi (Nm}^3/\text{h)}$$

$$\dot{V}_{dg} = 375 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$H_u = \text{doğalgaz alt ısı değeri (kWh/Nm}^3\text{)}$$

$$H_u = 9,59 \text{ kWh/Nm}^3$$

$$\text{Sistem verimi (\%)} = \frac{\dot{V}_{dg} \times H_u - \sum \text{Toplam kayıplar}}{\dot{V}_{dg} \times H_u} \times 100 \quad (6.1)$$

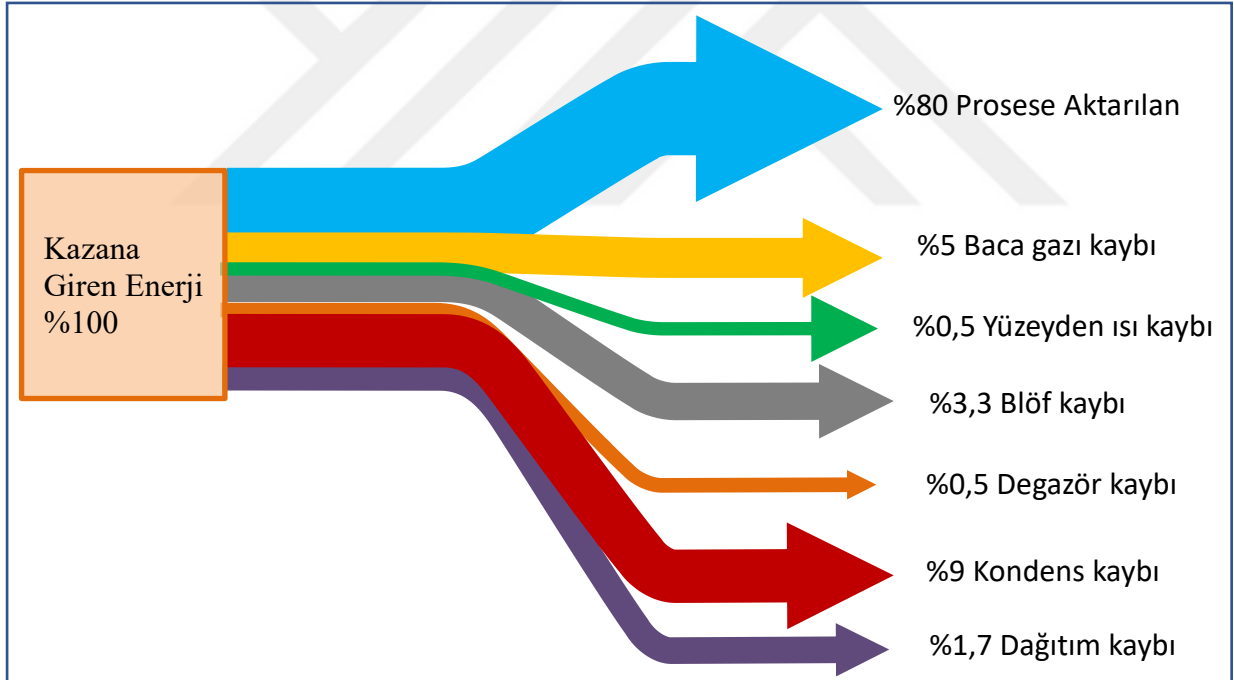
$$\text{Sistem verimi (\%)} = \frac{375 \times 9,59 - \sum (178+18,5+120+18,6+323+62,8)}{375 \times 9,59} \times 100 = \%80$$

Kazan sistemindeki her bir kayıp türünün toplam kayıplar içerisindeki payı (%) bulunarak Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Mevcut kazan sisteminde meydana gelen ısı kayıpları (%)

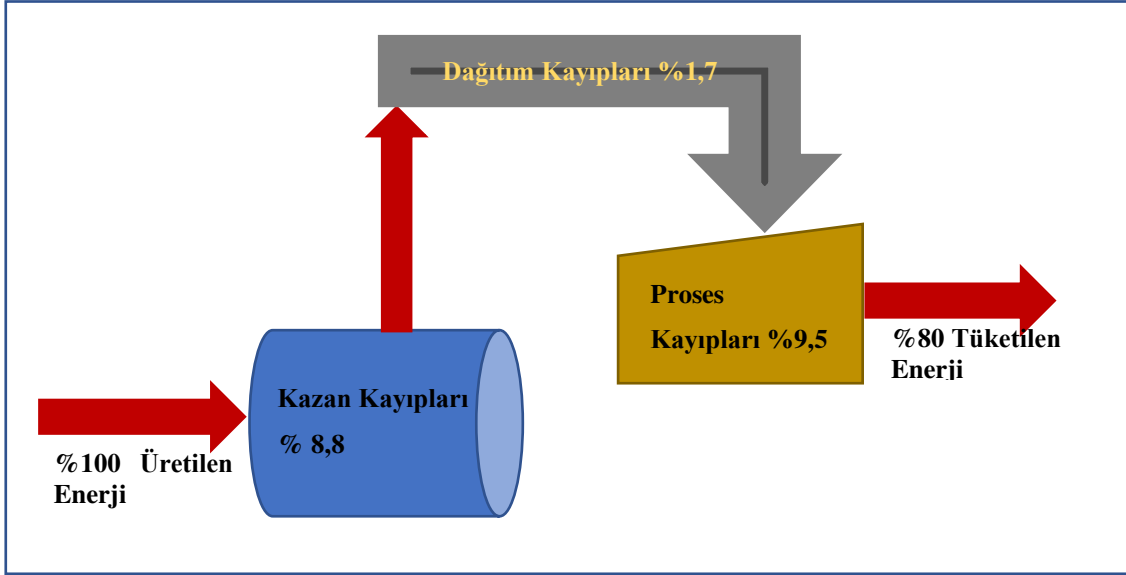
KAZAN SİSTEMİNDE KAYIPLAR		Verim Kaybı
Kazan kayıpları	Baca gazı kaybı	%5
	Yüzeyden ısı kaybı	%0,5
	Blöf kaybı	%3,3
Proses kayıpları	Degazör kaybı	%0,5
	Kondens kaybı	%9
Dağıtım kayıpları	Dağıtım kaybı	%1,7
TOPLAM KAYIP		%20

Kazan sistemindeki kayıplara ait Sankey diyagramı çizilerek Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Mevcut buhar kazan sistemi ısı kayıpları Sankey diyagramı

Mevcut kazan sisteminde buharın üretilmesi, dağıtılması ve prosesten geri döndürülmesi sırasında Şekil 6.4'te görüldüğü gibi kayıplar meydana gelmekte ve sistem verimi %80 olarak gerçekleşmektedir. Bu durumda prosesin 1 birimlik enerji ihtiyacını karşılamak için 1,25 birim enerji üretilmesi gerekmektedir.



Şekil 6.4. Mevcut kazan sistemine ait kayıp diyagramı

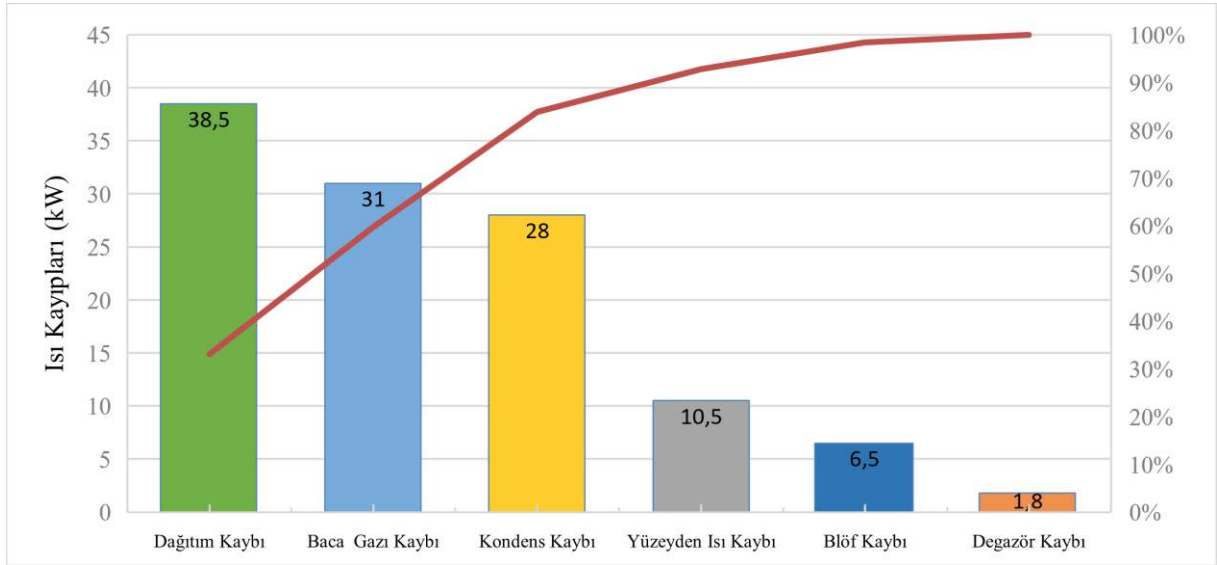
6.2. İyileştirmeler Sonrası Kazan Sisteminde Kayıplar

Önceki bölümlerde kazan sistemindeki enerji kayıplarını azaltacak çözüm önerileri sunulmuştu. Seçilen iyileştirme önerilerinin uygulanması durumunda ısı kayıplarının 721 kW değerinden 116 kW değerine düşürülebileceği hesaplanarak Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Önerilen iyileştirmeler öncesi ve sonrası kazan sistemindeki ısı kayıpları

Kazan Sisteminde Kayıplar		İyileştirmeler Öncesi Isı Kaybı (kW)	İyileştirmeler Sonrası Isı Kaybı (kW)
Kazan kayıpları	Baca gazı kaybı	178	31
	Yüzeyden ısı kaybı	18,5	10,5
	Blöf kaybı	120	6,5
Proses kayıpları	Degazör kaybı	18,6	1,8
	Kondens kaybı	323	28
Dağıtım kayıpları	Dağıtım kaybı	62,8	38,5
Toplam Kayıp		721	116

İyileştirmelerin uygulanmasından sonra oluşacak ısı kayıpları Pareto diyagramı Şekil 6.5'te verilmiştir. Pareto diyagramında kayıp miktarlarının kayıp türlerine göre dağılımı gösterilmiştir. Bu grafiğe göre iyileştirmeler sonrası sistemdeki en büyük kayıp dağıtım kaybı olacaktır.



Şekil 6.5. İyileştirme sonrası kazan sistemi ısı kayıpları Pareto diyagramı

İyileştirmelerin uygulanmasından sonra yakıt tüketimi yaklaşık 312 Nm³/h olarak alınmış ve (6.1) nolu eşitlik kullanılarak kazan sistem verimi %96 olarak hesaplanmıştır.

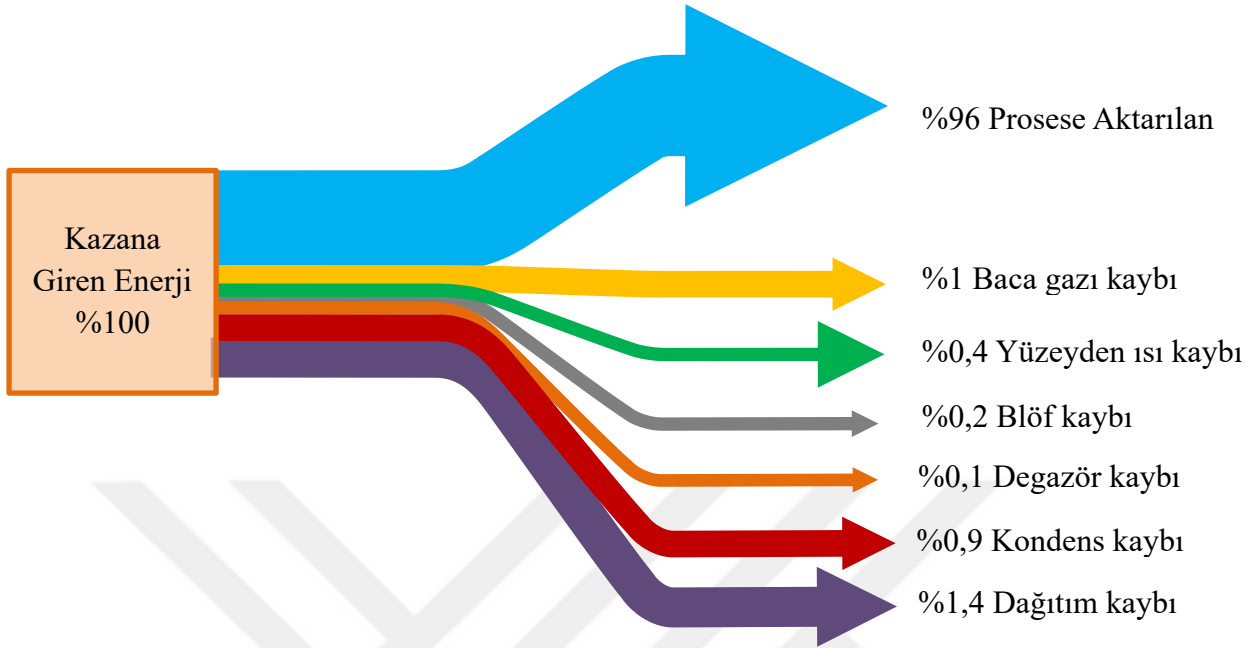
$$\text{Sistem verimi (\%)} = \frac{312 \times 9,59 - \sum (31 + 10,5 + 6,5 + 1,8 + 28 + 38,5)}{312 \times 9,59} \times 100 = \%96$$

Kazan sistemindeki kayıp yüzdeleri ayrı ayrı hesaplanarak Tablo 6.4'te gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Önerilen iyileştirmeler sonrası kazan sistemi ısı kayıpları

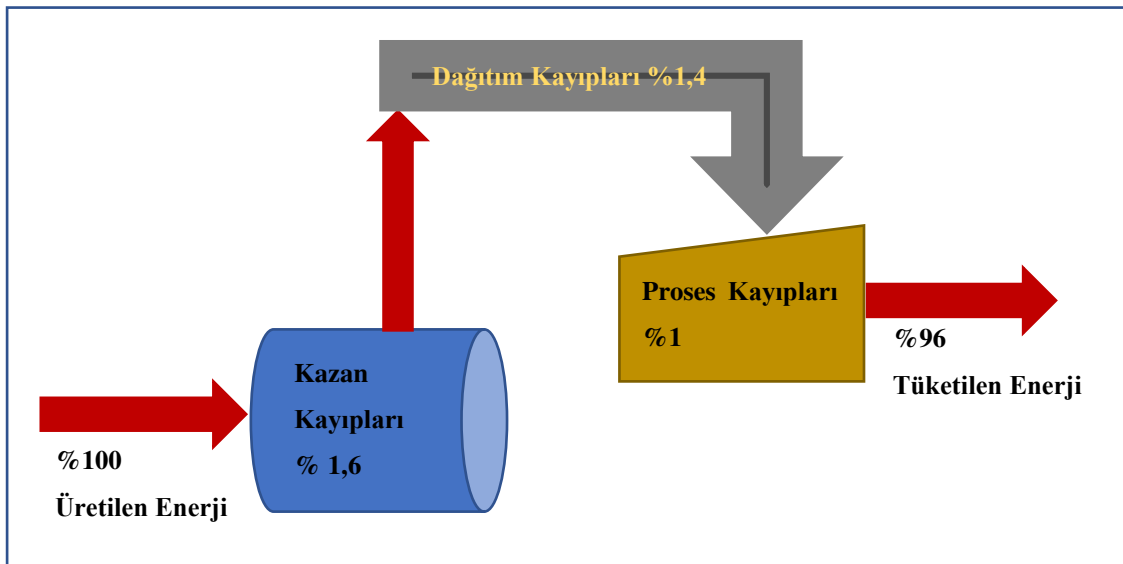
KAZAN SİSTEMİNDE KAYIPLAR	Verim Kaybı
Baca Gazı Kaybı	%1
Yüzeyden Isı Kaybı	%0,4
Blöf Kaybı	%0,2
Degazör Kaybı	%0,1
Kondens Kaybı	%0,9
Dağıtım Kaybı	%1,4
TOPLAM KAYIP	4%

Seçilen iyileştirmelerin uygulanmasından sonra kazan sistemindeki kayıplara ait Sankey diyagramı çizilerek Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Önerilen iyileştirmeler sonrası kazan sistemi ısı kayıpları Sankey diyagramı

Önerilen iyileştirmelerin uygulanması durumunda buharın üretilmesi, dağıtılması ve prosesten geri döndürülmesi sırasında oluşabilecek kayıplar Şekil 6.7’de verilmiştir. İyileştirmeler sonrası sistem verimi %96’ya yükselmiştir. Yeni durumda prosesin 1 birimlik enerji ihtiyacını karşılamak için 1,04 birim enerji üretilmesi gerekmektedir.



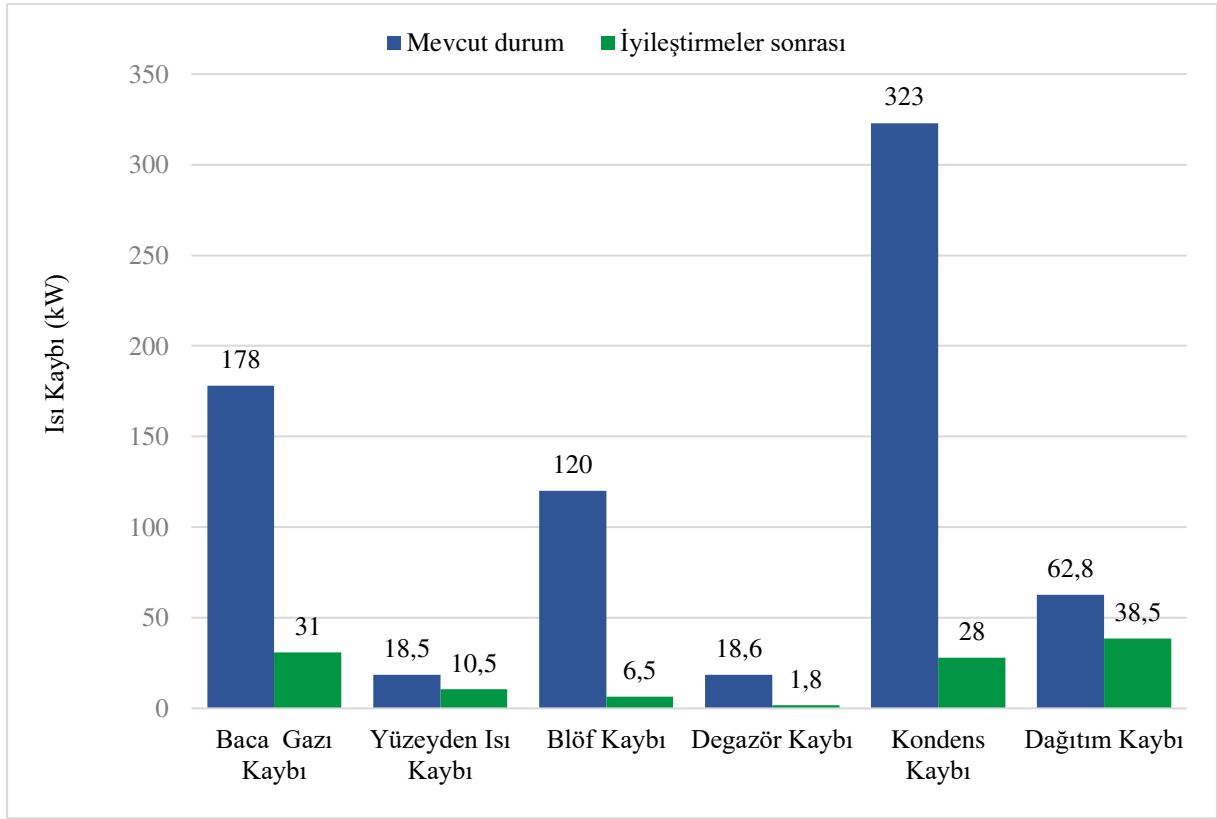
Şekil 6.7. Önerilen iyileştirmeler sonrası kazan sistemine ait kayıp diyagramı

Kaizen çalışması gerçekleştirilerek iyileştirmeler öncesi ve sonrasındaki sistem verimi karşılaştırılmıştır. Hazırlanan Önce- Sonra Kaizen çalışması Tablo 6.5’te verilmiştir.

Tablo 6.5. Kazan sistem kayıpları Kaizen çalışması

KAIZEN ÖNCESİ DURUM	KAIZEN SONRASI DURUM
Diagram illustrating the boiler system before Kaizen. The process starts with 100% produced energy. The boiler has 8.8% losses. The output goes to a process with 9.5% losses. The final output is 80% consumed energy. Distribution losses are 1.7%.	Diagram illustrating the boiler system after Kaizen. The process starts with 100% produced energy. The boiler has 1.6% losses. The output goes to a process with 1% losses. The final output is 96% consumed energy. Distribution losses are 1.4%.
<i>Mevcut kazan sisteminde ısı kaybı</i>	<i>İyileştirmeler sonrasında ısı kaybı</i>
Kötü Durumun Açıklaması Kayıplar	Gelinen İyi Durumun Açıklaması
Mevcut durumda sistem toplam %20 kayıpla çalışmaktadır. Prosesin 1 birimlik enerji ihtiyacını karşılamak için 1,25 birim enerji üretilmesi gerekmektedir. Sistem verimi %80 dir. Net buhar üretimi 4540 kg/h tir.	İyileştirmelerin uygulanması durumunda sistem %4 kayıpla çalışacaktır. Prosesin 1 birimlik enerji ihtiyacını karşılamak için sadece 1,04 birim enerji üretilmesi gerekecektir. Net buhar üretimi 5000 kg/h olacaktır.

Mevcut kazan sistemi ve önerilen iyileştirmelerin uygulanması sonrası ısı kayıpları Şekil 6.8’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Kondens kaybındaki düşüş dikkat çekmektedir. Yeni durumda en büyük kayıp dağıtım kaybı olacaktır.



Şekil 6.8. Mevcut durum ve iyileştirmeler sonrası kazan sistemi ısı kayıpları kıyaslaması

6.3. İyileştirmeler Sonrası Enerji FMEA Çalışması

İyileştirmelerden önce hazırlamış olduğumuz FMEA tablolarında 100'ün üzerinde RÖS puanına sahip riskler ele alınarak bu risklerin her biri için iyileştirme önerileri geliştirilmiştir. Önerilen iyileştirmelerin uygulanması sonrasında yeni RÖS puanları hesaplanarak Tablo 6.6'da verilmiştir. Bu sayede kırmızı risk grubunda hiçbir risk kalmamıştır.

Tablo 6.6. İyileştirmeler sonrası kazan sistemi Enerji FMEA çalışması

HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (FMEA)													
Proses	Riskler	Hata Nedenleri	Hatanın Etkileri	Tespit, Önlem	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS	İyileştirme Önerisi	Şiddet	Olasılık	Saptanabilirlik	RÖS (İyileştirmeler Sonrası)
Buhar Üretimi	Yüksek baca gazı sıcaklığı	Aşırı fazla hava	Hava fazlalık katsayısı artar.	Göstergelerle sıcaklık kontrolü ve 6 ayda bir yaptırılan baca gazı analizleri	8	4	4	128	Yakıt/hava oran kontrollü CO-O ₂ Trim kontrol sistemi kurulmalı	8	2	1	16
		Kazanı aşırı yükleme	Bacadan atmosfere fazla enerji atılır.										
	Eksik fazla hava, λ<1	Uygun olmayan O ₂ /yakıt oranı	Üretilen enerji düşer.	6 ayda bir baca gazı analizi	7	3	6	126	Yakıt/hava oran kontrollü CO-O ₂ Trim kontrol sistemi kurulmalı, yoğunlaşmalı ekonomizör sisteme eklenmeli	7	2	1	14
		Baca çekişinin düşük olması											
	Aşırı fazla hava, λ>1	Uygun olmayan O ₂ /yakıt oranı	Yanmaya iştirak etmeyen hava ocakta ısıtılarak bacadan atılır.		7	4	6	168		7	2	1	14
		Yetersiz yakıt temini											
		Aşırı baca çekişi											
	Baca gazında su buharı oluşması	Yanma sonucu su buharı açığa çıkması	Kazandaki faydalı enerjinin bir kısmının su buharı şeklinde bacadan atılmasına neden olur.		-	8	5	4	160	Yoğuşmalı ekonomizör sisteme eklenmeli	8	1	4
	Yüzey ısı kaybı	Sıcaklık farkı	Akışkana aktarılan ısı miktarı ve kazan verimi düşer.	Kazan dış yüzey sıcaklığındaki artış, yüzeyin sıcak olması	6	5	4	120	Yalıtım ceket, Termal kamera ile takip	6	2	2	24
	Fazla blöf yapmak	Besi suyu iletkenliğinin yüksek olması	Kazana ilave edilen su için fazla enerji harcanır.	Otomatik blöf yapılıyor, ısı geri kazanımı yapılıyor	8	5	4	160	Ters Ozmoz, Flaş buhar ile ısı geri kazanımı	8	1	4	32
	Degazör buhar kaybı	Besi suyundan ayrıştırılan korozif gazlarla birlikte buhar kaybedilmesi	Kazan verimi düşer.	-	6	4	5	120	Isı değiştirici ile ısı geri kazanımı	6	1	5	30
	Degazörde taze buhar kullanımı	Gazları ayırtırmak için sistemde üretilen taze buharın kullanılması	Kazan verimi düşer	-	7	6	5	210	Blöften veya kondesten gelen flaş buhar kullanımı	7	1	5	35
	Kondens tankından flaş buhar kaybı	Kondensin tanka boşaltıldığı noktada üzerindeki basıncın kalkmasıyla flaş buhar oluşur.	Flaş buhar kondens tankının havalık borusundan kaçarak dışarı gider.	Gözle görülür	4	5	6	120	Flaş buhar ünitesi kullanımı	1	5	6	30
	Vana ve Flaşlarda ısı kaybı	Vanaların yalıtımsız bırakılması	Isı kayıpları oluşur.	-	6	6	4	144	Vana ceket, Termal kamera uygulaması	6	2	3	36

6.4. İyileştirmeler Sonrası Kazan Sistemi Görünümü

Firmada uygulanması için seçilen iyileştirme önerileri şu şekilde sıralanmıştır:

- 1. Baca gazı kaybı:** Yoğuşmalı ekonomizör ve O₂/CO Trim kontrol sistemi birlikte kazana dahil edilecektir.
- 2. Yüzeyden ısı kaybı:** Yalıtım ceketleri ve yastıkları kullanılarak kazan yüzeyleri yalıtılacaktır.
- 3. Blöf kaybı:** Ters Ozmoz ve flaş buhar tankı üniteleri sisteme dahil edilecektir.
- 4. Degazör kaybı:** Degazör çıkışına bakır borulu eşanjör eklenecektir.
- 5. Kondens kaybı:** Kondens dönüşüne flaş buhar cihazı eklenecektir.
- 6. Dağıtım kayıpları:** Dağıtım hatlarında vana ceketleri uygulanmıştır.

Tüm seçilen önerilerin uygulanmasında sonra sistemin yeni görünümü oluşturulabilir. 5 numaralı bölümde Şekil 5.18’de gösterildiği gibi blöf çıkışına yerleştirilen flaş buhar sistemi ve ısı değiştirici kullanılarak taze besi suyu sıcaklığı öncelikle 18 °C’den 20 °C’ye çıkartılabilir. Yoğuşmalı ekonomizörün sisteme dahil edilmesi durumunda 146 kW ısıının geri kazanılabileceği Tablo 5.10’da hesaplanmıştır. Bu ısı kullanılarak taze besi suyunun ikinci kademe ısıtması gerçekleştirilip besi suyu sıcaklığının 20 °C’den 90 °C’ye yükseltilebileceği (6.2) ve (6.3) nolu eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Q_{\text{geri kazanılan ısı}} = \dot{m}_{\text{taze besi suyu}} \times h_s \quad (6.2)$$

$$146 \text{ kW} = 1800 \times h_s$$

$$525 \text{ 600 kJ} = 1800 \times h_s$$

$$h_s = 292 \text{ kJ/kg (70 °C)}$$

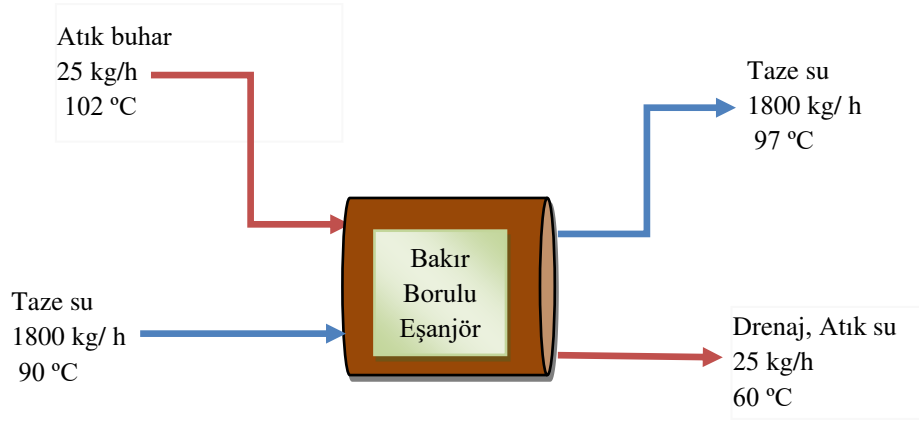
$$\Delta T = 70 \text{ °C}$$

$$\Delta T = T_{\text{taze su çıkış sıcaklığı}} - T_{\text{taze su giriş sıcaklığı}} \quad (6.3)$$

$$70 = T_{\text{taze su çıkış sıcaklığı}} - 20$$

$$T_{\text{taze su çıkış sıcaklığı}} = 90 \text{ °C}$$

Diğer bir iyileştirme önerisi olan degazör çıkışına bakır borulu eşanjör yerleştirilerek sisteme giren taze besi suyunun üçüncü kademe ısıtması gerçekleştirilebilir. Eşanjöre ait kütle ve enerji denge şeması Şekil 6.9’da verilmiştir. Enerji dengesine göre taze suyun sıcaklığı 90 °C’den 97 °C’ye kadar çıkarılabilecektir.



Şekil 6.9. İyileştirmelerden sonra bakır borulu eşanjörde kütle ve enerji dengesi

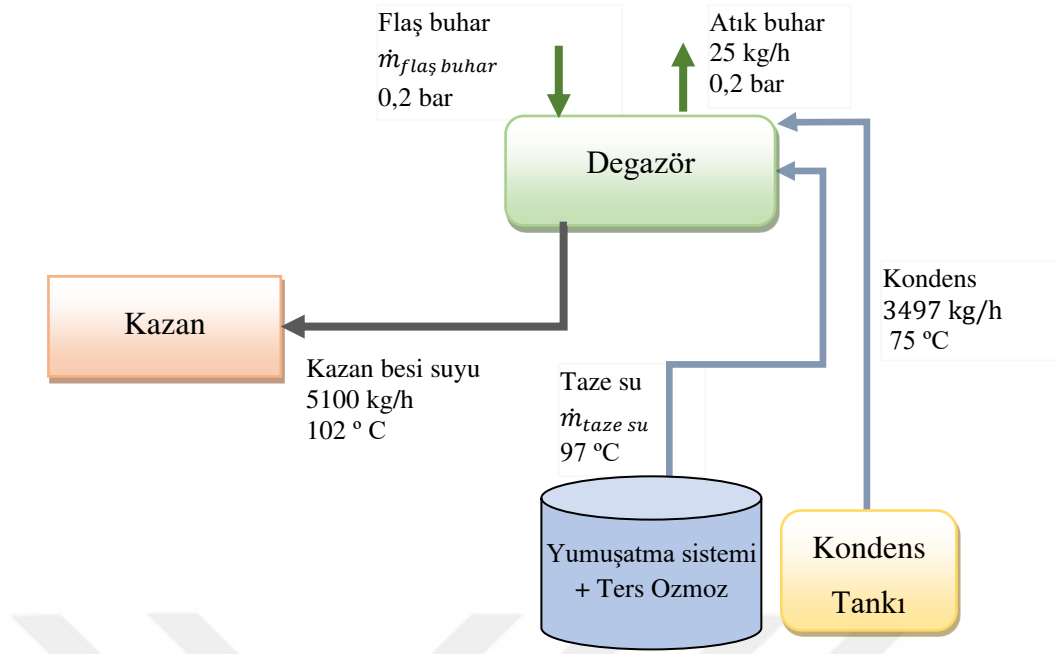
$$\sum Q_{\text{giren}} = \sum Q_{\text{çıkan}}$$

$$\dot{m}_{\text{atık buhar}} \times h_{b102\text{ °C}} + \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{s90\text{ °C}} = \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{\text{taze su}} + \dot{m}_{\text{atık su}} \times h_{s60\text{ °C}}$$

$$25 \times 2683 + 1800 \times 378 = 1800 \times h_{\text{taze su}} + 25 \times 251,4$$

$$h_{\text{taze su}} = 411,7 \text{ (97 °C)}$$

İyileştirmeler sonrasında Ters Ozmoz sistemin uygulanması sayesinde yeni kazan besisi suyu debisi 5697 kg/h yerine 5100 kg/h olarak gerçekleşir. Kondensin flaş buharından yararlanıldığı için yeni durumda degazöre gönderilmesi gereken buhar, taze buhar yerine flaş buhar ile karşılanacaktır. Seçilen iyileştirmelerin uygulanması durumunda degazördeki enerji ve kütle dengesinin Şekil 6.10'daki gibi olması beklenmektedir. Kütle ve enerji denklilikleri kullanılarak degazöre gönderilmesi gereken buhar miktarı 210 kg/h olarak hesaplanmıştır. Daha önceki bölümde (Bölüm: 5.2.2.5) kondensin elde edilen flaş buhar miktarı 401 kg/h olarak hesaplanmıştır. Bu durumda degazörün ihtiyaç duyduğu buharın tamamı bu flaş buharından sağlanabilir. Blöften elde edilen flaş buhar 15,2 kg/h olup başka bir amaçla kullanılabilir. Net buhar üretimi önceki durumda 4540 kg/h iken yeni durumda 5000 kg/h olacaktır. Ayrıca taze besi suyu ihtiyacı 1800 kg/h'ten 1418 kg/h'e düşürülerek 382 kg/h su tasarrufu sağlanabilecektir.



Şekil 6.10. İyileştirmelerden sonra degazör kütle ve enerji dengesi

Kütle dengesi:

$$\sum \dot{m}_{\text{giren}} = \sum \dot{m}_{\text{çıkan}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} + \dot{m}_{\text{taze su}} + \dot{m}_{\text{kondens}} = \dot{m}_{\text{besi suyu}} + \dot{m}_{\text{atık buhar}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} + \dot{m}_{\text{taze su}} + 3497 = 5100 + 25$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} + \dot{m}_{\text{taze su}} = 1628$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = 1628 - \dot{m}_{\text{taze su}}$$

Enerji dengesi

$$\sum Q_{\text{giren}} = \sum Q_{\text{çıkan}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} \times h_{b0,2\text{bar}} + \dot{m}_{\text{taze su}} \times h_{s97^{\circ}\text{C}} + \dot{m}_{\text{kondens}} \times h_{s75^{\circ}\text{C}} = \dot{m}_{\text{besi suyu}} \times h_{s102^{\circ}\text{C}} + \dot{m}_{\text{atık buhar}} \times h_{b0,2\text{bar}}$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} \times 2683 + (1628 - \dot{m}_{\text{flaş buhar}}) \times 411,7 + 3497 \times 314 = 5100 \times 427 + 25 \times 2683$$

$$\dot{m}_{\text{flaş buhar}} = 210 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{\text{taze su}} = 1628 - 210 = 1418 \text{ kg/h}$$

6.5. İyileştirme Yatırımlarının Ekonomik Analizi

Önceki bölümlerde mevcut kazan sistemindeki tüm kayıplar için enerji kaybını azaltacak çözüm önerileri sunulmuştu. Seçilen iyileştirme önerilerinin uygulanması durumunda sağlanabilecek ısı tasarruf miktarları ve gerekli yatırımların geri ödeme süreleri Tablo 6.7’de gösterilmiştir. Buna göre seçilen tüm önerilerin uygulanması durumunda ısı kayıpları 721 kW değerinden 116 kW değerine düşürülerek 605 kW ısı tasarrufu sağlanabilecektir. Geri ödeme süreleri ortalama 12 ay olarak hesaplanmış ve bu süreden sonraki her yıl 636.920 TL tasarruf sağlanabileceği öngörülmüştür. Doğalgaz fiyatlarındaki artışa bağlı olarak bu tasarruf daha da artacaktır.

Tablo 6.7. İyileştirme öncesi ve sonrası kazan sistemi ısı kayıpları ve geri ödeme süreleri

	Önce (kW)	Sonra (kW)	Tasarruf (kW)	CO ₂ Emisyonunda Azalma (ton/yıl)	Tasarruf Yıllık (TL)	Yatırım Tutarı (TL)	Geri Ödeme Süresi (ay)
Baca gazı kaybı	178	31	147	143	159.909	380.000	28,5
Yüzeyden ısı kaybı	18,5	10,5	8	8	8.262	2.900	4,2
Blöf kaybı	120	6,5	113,5	110	117.219	201.600	20,6
Degazör kaybı	18,6	1,8	16,8	16	17.351	8.000	5,5
Kondens kaybı	323	28	295	287	304.667	32.000	1,3
Dağıtım kaybı	62,8	38,5	24,3	23	25.096	12.420	5,9
Kayıplar Toplamı	721	116	605	587	632.504	636.920	12

Tablo 6.7’de gösterilen yatırımların tümünün uygulanması durumunda toplam 605 kW ısı tasarrufu sağlanabilecektir. Bu durumda elde edilecek doğalgaz tasarrufu (6.4) nolu eşitlik kullanılarak hesaplanmış ve 63 Nm³ olarak bulunmuştur.

$$Q_{\text{tasarruf}} = B \times H_u \quad (6.4)$$

Q_{tasarruf} : Tasarruf edilen ısı miktarı (kW)

B : Yakıt debisi (Nm³/h)

H_u : doğalgaz alt ısı değeri (kWh/Nm³)

$$605 = B \times 9,59$$

$$B = 63 \text{ Nm}^3$$

$$H_u : 9,59$$

1 Nm³ doğalgaz yakılması sonucunda 45,991 mol CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Önerilen iyileştirmeler neticesinde mevcut durumda 375 Nm³/h olan doğalgaz tüketiminin 63 Nm³/h azalarak yeni durumda 312 Nm³/h olacağı hesaplanmıştır. Yılda 5760 saat, ortalama %80 kapasiteyle çalışan buhar kazanı için yıllık CO₂ salınımında sağlanacak azalma miktarı (6.5) nolu eşitlik kullanılarak 13 351 kmol olarak hesaplanmıştır. Karbondioksitin mol kütlesi 44 kg/kmol olduğuna göre yılda 587 ton karbondioksitin atmosfere atılması önlenebilecektir. Bir sera gazı olarak küresel iklim değişiminin önemli sebeplerinden biri olan karbondioksit salınımının düşürülmesi aynı zamanda fabrikanın doğa dostu bir tesis haline getirilmesine katkı sağlayacaktır.

$$\text{CO}_2 \text{ salınımındaki azalma miktarı} = \text{Yakıt tasarrufu (Nm}^3\text{)} \times \text{CO}_2 \text{ miktarı (mol/Nm}^3\text{)} \times \text{çalışma süresi(saat/yıl)} \times \text{kazan çalışma kapasitesi (\%)} \quad (6.5)$$

$$\text{CO}_2 \text{ salınımındaki azalma miktarı} = 63 \times 45,991 \times 5760 \times 0,8 = 13\,351 \text{ kmol /yıl}$$

$$\text{CO}_2 \text{ salınımındaki azalma miktarı} = 44 \text{ kg/kmol} \times 13\,351 \text{ kmol} = 587 \text{ ton /yıl}$$

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Enerji yönetimi kavramının yaygınlaştırılarak uygulamada daha çok hayat bulması, ülkemiz ve insanlarımızın geleceği açısından büyük önem taşımaktadır. Endüstriyel kuruluşlarda ürün başına tüketilen enerjiyi azaltan, kayıpların önüne geçerek faturaları düşüren, firmalara çevreye daha duyarlı üretim yapma imkânı veren enerji iyileştirme uygulamaları üzerine yürütülen çalışmalar oldukça değerlidir. Bu tür çalışmaların gerçekleştirildiği tesislerde hem ekonomik hem de çevresel anlamda çeşitli kazançların elde edilmesi endüstriyel enerji kullanıcıları arasında enerjinin daha verimli kullanılmasına yönelik farkındalığı artırmaktadır.

Dünya enerji tüketiminin önemli bir kısmı kazanlarda kullanılmaktadır. Kazan verimliliğindeki küçük bir iyileştirme, büyük miktarda fosil yakıt tasarrufuna ve CO₂ emisyonunun azaltılmasına yardımcı olacaktır. Bu çalışmada bir tekstil fabrikasındaki buhar sistemi enerji verim artış potansiyeli incelenmiştir. Kazanlarda meydana gelen kayıplar, atık ısı geri kazanım yolları ve kazan veriminin artırılmasında kullanılabilecek günümüz son teknolojileri araştırılmıştır. Enerjinin verimsiz kullanılmasına neden olabilecek durumların ve bunlara ait çözüm önerilerinin belirlenmesinde kalite iyileştirme araçlarından faydalanılmıştır. Bu doğrultuda FMEA ve diğer kalite araçları bir arada kullanılarak enerji veriminde iyileşme olanakları araştırılmıştır. Her bir potansiyel tasarruf yöntemi için tasarruf edilen enerji miktarı, enerjinin mali değeri, gerekli yatırım tutarı ve geri ödeme süreleri hesap edilmiştir. Bu sistemlerde yapılacak küçük iyileştirmelerle, enerji tüketimi ve enerji maliyetlerinde ciddi azalmalar sağlanarak işletmenin genel giderlerinin önemli oranda düşürülebileceği ortaya konmuştur. Bu çalışma; endüstriyel kazanda enerji verimi üzerine yapılabilecek araştırma-geliştirme çalışmaları ve enerji projeleri için bir kılavuz niteliği taşımakta olup mühendisler, endüstriyel enerji kullanıcıları ve bilim adamları için faydalı olacağı söylenebilir. Yürütülen bu tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Firmanın buhar sisteminde önerilen iyileştirmeler uygulandığında toplam sistem veriminin %80'den %96'ya çıkarak yaklaşık olarak %16 oranında artacağı öngörülmektedir.
- Önerilen sistemler uygulandığında doğalgaz kullanımında yaklaşık 63 Nm³ (%16,8) civarında enerji tasarrufu gerçekleşeceği öngörülmektedir.
- Önerilen sistemler uygulandığında 382 kg/h (%21) civarında su tasarrufu gerçekleşeceği öngörülmektedir.

- Önerilen sistemler uygulandığında prosese gönderilen net buhar üretim kapasitesinin 460 kg/h (%9,2) artacağı öngörülmektedir.
- Sağlanan yakıt tasarrufu ile birlikte yılda 587 ton CO₂ salınımının önüne geçilecektir. Bir sera gazı olarak küresel iklim değişiminin önemli sebeplerinden biri olarak gösterilen CO₂ emisyonunun düşürülmesi, fabrikanın doğa dostu bir tesis haline getirilmesine katkı sağlayacaktır.
- Isı enerjisi geri kazanımı için tasarlanan sistemlerin ve prosesteki mevcut ısı enerjisinin verimli kullanılması için yapılacak yatırımların kısa sürede (ortalama 12 ay) kendini amorti ettiği ve bundan sonraki yıllarda yatırımların firmaya kazanç olarak geri dönebileceği görülmüştür.
- Cazip ödeme sürelerinin sanayiciyi yatırıma teşvik edeceği umulmaktadır. Böylece sanayici aynı ürünü daha düşük maliyetle elde ederek ulusal ve uluslararası alanda rekabet gücünü arttıracaktır.
- Önerilen iyileştirme uygulama ve metotları ürün odaklı olmayıp enerji odaklı olduğu için enerji kullanan tüm sanayi kuruluşlarına rahatlıkla uygulanabilir olacaktır. Bu çalışma bu anlamda yapılabilecek diğer çalışmalara da örnek teşkil edecektir.
- Enerji yönetimi çalışmalarında daha bilimsel, görsel ve disipline edilmiş bir yaklaşım literatüre kazandırılmış olacaktır.
- Enerji iyileştirme çalışmaları yürütülürken kalite geliştirme araçlardan yararlanılarak çalışmaların etkinliği artırılmıştır.
- Önleyici süreç iyileştirme çalışmaları kapsamında bir risk analizi ve hata önleme metodu olarak kullanılan FMEA tekniğinin kazan enerji veriminin artırılmasında da rahatlıkla kullanılabileceği ortaya konmuştur.

FMEA hiç bitmeyen bir çalışmadır ve mevcut teknolojiler ve olanaklar ilerledikçe bunlar sisteme dahil edilmeli ve FMEA çalışması buna göre güncellenmelidir. Firmada ileride yapılacak çalışmalarda firmadaki diğer enerji kayıpları da FMEA tekniği ile araştırılabilir. Ayrıca, burada açıklanan araştırma yöntemi diğer enerji kullanan süreçlere ve ekipmanlara uygulanabilir. Günümüzde enerji kaynaklarının sınırlı olması ve temininde karşılaşılan zorluklar sadece tekstil sektöründe değil tüm endüstri kuruluşlarında enerjinin kullanıldığı her noktada bu çalışmaların yürütülmesini teşvik edecektir.

KAYNAKÇA

- Abdi, D., Bekele, A., Venkatachalam, C., & Parthiban, M.** (2021). Energy Performance Analysis of Pasta and Macaroni Factory-A Case Study. *AIMS Energy*, 9(2), 238-256.
- Afey, I.H.** (2010). Reliability-centered Maintenance Methodology and Application: A Case Study. *Engineering*, 2, 863–873.
- Ahmed, S., & Gu, X. C.** (2020). Accident-based FMECA Study of Marine Boiler for Risk Prioritization using Fuzzy Expert System. *Results in Engineering*, 6, 100123.
- Akbaş, B., Kaya, D., & Eyidoğan, M.** (2018). Bir Otomobil Montaj Fabrikasının Enerji Tüketim Analizi ve Enerji Tasarrufu Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makine*. 59(691), 85-100.
- Akdaş, M. & Ömür B.** (2017). Vana ve Armatürlerde Enerji Verimliliği. *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 19- 22 Nisan, İzmir.
- Anagün, A.S. & Soy, E.** (1999). Toplam Verimli Bakıma Geçişte İlişki Diyagramının Kullanımı. *IV. Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu*, 14-16 Mayıs, 435-447.
- Arunkumar, S., Prakash, R., Jeeva, N., Muthu, M., & Nivas, B.** (2014). Boiler Blow Down Heat Recovery. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE)*, 11, 83-85.
- Azami, S., Taheri, M., Pourali, O., & Torabi, F.** (2018). Energy and Exergy Analyses of a Mass-Fired Boiler for a Proposed Waste-To-Energy Power Plant in Tehran. *Applied Thermal Engineering*, 140, 520-530.
- Bahadori, A., & Vuthaluru, H. B.** (2010). A Method for Estimation of Recoverable Heat from Blowdown Systems During Steam Generation. *Energy*, 35(8), 3501-3507.
- 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.
- Baysal, M. E., Canıylmaz, E., & Eren, T.** (2002). Otomotiv Yan Sanayiinde Hata Türü ve Etkileri Analizi. *Teknoloji*, 5(1-2), 83-90.
- Behbahania, A., Ramezani, S., & Hejrandoost, M. L.** (2017). A Loss Method for Exergy Auditing of Steam Boilers. *Energy*, 140, 253-260.

- Bilgiç, M.** (2004). Endüstri Kazan Dairelerinde Enerjinin Etkin Kullanılması İçin; Yakıttan Baca Gazına Kadar Dikkate Alınması Gereken Hususlar. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi, Dergi Eki* 31(8).
- Bilgin, A.** (2007). Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyonlar. *VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 25-28 Ekim, İzmir, 59-65.
- Bujak, J.** (2008). Energy Savings and Heat Efficiency in the Paper Industry: A Case Study of a Corrugated Board Machine. *Energy*, 33(11), 1597-1608.
- Bulgurcu, H., İlten, N., Caner, İ., & Kon, C.** (2014). Bir Endüstriyel PVC Kalıp Soğutma Sisteminin Enerji Analizi ve İyileştirilmesi. *Tesisat Mühendisliği*, 142, 23- 31.
- Büyüktuna, O.** (2012). *Hata Türü ve Etkileri Analizi ve Makine Sanayinde Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Sayısal Yöntemler Bilim Dalı, Denizli.
- Büyüktür, A. R.** (1985). *Termodinamik Uygulama Esasları Cilt 2*, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa, 695.
- Büyüktür, A. R.** (1995). *Termodinamik Termodinamiğin Temel Yasaları Cilt 1*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 289.
- Charde, M. S. V., Bhoyar, M. S. G., & Bisen, H.** (2017). Case Study on Efficiency of Boiler and Factors Affecting It. *International Journal on Research & Modern Trends in Engineering & Management*, 12(1).
- Chao, L., Ke, L., Yongzhen, W., Zhitong, M., & Yulie, G.** (2017). The Effect Analysis of Thermal Efficiency and Optimal Design for Boiler System. *Energy Procedia*, 105, 3045-3050.
- Chen, W., Shi, W., Wang, B., Shang, S., & Li, X.** (2017). A Deep Heat Recovery Device Between Flue Gas and Supply Air of Gas-Fired Boiler by Using Non-Contact Total Heat Exchanger. *Energy Procedia*, 105, 4976-4982.
- Cortes-Rodríguez, E. F., Nebra, S. A., & Sosa-Arno, J. H.** (2017). Experimental Efficiency Analysis of Sugarcane Bagasse Boilers Based on the First Law of Thermodynamics. *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(3), 1033-1044.
- Çanka Kılıç, F.** (2017). Endüstriyel Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyon Azalımı Fırsatları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 147-158.

Çarkacı, E. (2014). *EÜAŞ Ambarlı Fuel Oil ve Doğalgaz Kombine Çevrim Santralinde Kalite Yönetim Sisteminin Uygulanması ve Enerji Verimliliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Çınar T. (2008). *Tekstil Sanayisinde Enerji Yönetimi ve Enerji Verimlilik Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

Çözüm Var Danışmanlık (ÇVD). (2009). *Kalite Çemberleri El Kitabı*, [Erişim: 24.08.2019, <https://www.scribd.com/document/23260871/Kalite-Cemberleri-El-Kitabi>]

DCD Baltur. (2010). *Yeni Teknolojiler*, Eğitim Kitabı 4, [Erişim: 20.06.2019, <https://www.dcdbaltur.com.tr/madmin/lib/images/dosyalar/603-servis-egitim-dokumani.pdf>]

Demiral, O. T. (2019). *Otomotiv Sektöründe FMEA Analizi Üzerine Bir Araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Isparta.

Deste, M. & Berber, G. (2018). Süreç İyileştirme Uygulamaları Üzerine Bir Literatür Araştırması, *Uluslararası Ekonomi, İşletme ve Politika Dergisi*, 2 (2), 213-230.

Dhanre, G. T., Dhanre, U. T., Mudafale, K., & Mtech Scholar, K. I. T. S. (2014). Review Paper on Energy Audit of a Boiler in Thermal Power Plant. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2 (6), 283-288.

Dieter, G.E., & Schmidt, L. C. (2013). *Engineering Design*. 5th ed. Mc Graw-Hill International Edition, New York.

Djayanti, S. (2019). Energy Efficiency Improvement Strategies for Boilers: A Case Study in Pharmacy Industry. *E3S Web of Conferences*, 12002.

Dumantepe, H. (2017). *Bir Sağlık Kuruluşunda Süreç İyileştirme Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Ticaret Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.

Durukafa, D. (2010). *Buhar Üretim Merkezlerinde, Enerji Verimliliğinin Artırılması ve Bir Endüstriyel Tesisin Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ FBE Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Isı Proses Programı, İstanbul.

Durukafa, D. (2014). Buhar Üretim Tesislerinde Enerji Verimliliğinin Arttırılmasına Yönelik Önlemler. *TTMD*, 24-32.

Durukafa, D. (2019). Buhar Üretim Sistemlerinde Enerji Verimliliği Arttırıcı Çalışmalar İçin Bir Uygulama Örneği: Almanya Bitterfeld’de Bir Kimya Fabrikasında Yapılan İyileştirme Çalışmaları, *V. Enerji Verimliliği Kongresi*, 18-19 Ekim, Kocaeli, 467-478.

Duru Kan, M. (1997). Yanma Gaz Analizleri ve Doğalgaz Uygulamalarındaki Önemi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 18.

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİEİ) (1999). *Sanayide Enerji Yönetimi Esasları*, Cilt III, Ankara.

Energy Solution Center (ESC) (2019). *Turbulators*. [Erişim: 05.7.2019, <http://cleanboiler.org/learn-about/boiler-efficiency-improvement/efficiency-index/turbulators/>]

Environmental Protection Agency (EPA) (2010). *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Industrial, Commercial and Institutional Boilers*. [Erişim: 05.07.2019, <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/iciboilers.pdf>]

Eren, E. R., & Pamuk, O. (2020). Hata Türü ve Etkileri Analizi Yönteminin Konfeksiyon Sektöründe Uygulanması. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 25(3), 1533-1546.

ETS. (2019). *Kazan Yüzey yalıtım ceketleri*. [Erişim: 20.12.2019, <http://www.etsendustriyel.com.tr/kazan-yuzey-yalitim-ceketleri>]

Gök E. (2019), Baca Sistemlerinde Sekonder Klapelerin Verim Yönünden İncelenmesi. *14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 17-20 Nisan, İzmir, 1596- 1608.

Gupta, R. D., Ghai, S., & Jain, A. (2011). Energy Efficiency Improvement Strategies for Industrial Boilers: A Case Study. *Journal of Engineering and Technology*, 1(1), 52.

Güven, B. (2019). *Tekstil Terbiye Sektöründe Enerji Verimliliği Uygulama Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim dalı, Kırklareli.

Hızıroğlu S. (2007), Yakma Yönetim ve Brülör Kontrol Sistemleri. *8. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, Doğal Gaz Semineri*, 26-27 Ekim, İzmir, 145-150.

- Huang, X., Luo, X., Yang, Z., Chen, J., Wang, C., & Chen, Y.** (2017). Modelling and Optimization of a Utility System Considering Different Water Desalination Technologies. *Energy Procedia*, 142, 1375-1381.
- Ibrahim, R. I., Humod, A. T., & Essa, N. A.** (2020). Design and Implementation of AN Automatic Control System to Avoid Fouling in Pipes with Blow Down Heat Recovery in Steam Boilers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, March, 012007.
- Igboanugo, A. C., Asalor, J. O., & Egbiremon, V. I.** (2013). Assessment of Some Performance Characteristics of Refuse Boiler Before and After Overhaul Using Failure Mode Effect and Fault Tree Analyses. *Nigerian Journal of Technology*, 32(2), 333-349.
- İdealkoç** (2021). *Puko- Pukö Döngüsü Nedir? Neden Gereklidir?* [Erişim: 23.05.2021, <https://idealkoc.com/sik-sorulan-sorular/puko-cevrimi-nedir-neden-gereklidir/>]
- Jamil, S. R., Wang, L., & Che, D.** (2020). Techno-economic Analysis of a Novel Hybrid Heat Pump System to Recover Waste Heat and Condensate from the Low-Temperature Boiler Exhaust Gas. *International Journal of Energy Research*, 44(5), 3821-3838.
- Kadric, D., Delalic, N., Delalic-Gurda, B., Kotur, M., & Skulj, A.** (2021). Reduction of Energy Use in Industrial Facility. *Journal of Thermal Engineering*, 7(1), 54-65.
- Kanoğlu, M.** (2010). *Enerji Verimliliği Örnek Projeleri*. Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü. [Erişim: 24.04.2019, http://www.tskb.com.tr/i/content/486_1_mehmet-kanoglu-enerji-verimliliği-ornek-projeleri.pdf].
- Karaçizmeli, İ. H. & Kaya, S.** (2018). Tekstil Terbiye İşletmelerinde Pamuklu Kumaş Üretim Kalitesinin Artırılması. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 251-257.
- Karakurt, M. D.** (2006). *Deri Endüstrisinde Enerji Tasarrufu Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli FBE, Makine Eğitimi, Kocaeli.
- Karataev, O. R., & Karataeva, E. S.** (2019). Research of Efficiency of Work of Heat-Mechanical Equipment by the Thermography Method. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, July, 012036.
- Karyeyen, S., Aksoy M. H., Özgören M., & Koçak S.** (2012). *Konya Sanayisinde Enerji Verimliliği*. Mevlâna Kalkınma Ajansı Bölgesel Araştırma raporları Serisi, No:5.
- Kaya, D., & Güngör, C.** (2002). Sanayide Enerji Tasarruf Potansiyeli-II, *Mühendis ve Makina*, 43(515), 36- 44.

- Kaya, D. & Öztürk, H.H.** (2014). *Sanayide Enerji Yönetimi ve Enerji Verimliliği, Uygulamalı Örneklerle*. Umuttepe Yayınları, Kocaeli, 524.
- Kızıltan, G.** (2008). *Flaş Buhardan Enerji Geri Kazanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kocabaş, C. & Savaş, A.F.** (2019a). Sanayide Enerji Maliyetlerinin Azaltılması. *International Congress of Energy, Economy and Security*, İstanbul, 351-360.
- Kocabaş, C. & Savaş, A.F.** (2019b). Tek Nokta Ders Tekniğinin Sanayide Enerji Verimliliği İyileştirme Çalışmasında Uygulanması. *V. Enerji Verimliliği Kongresi*, Kocaeli, 439-447.
- Kocabaş, C. & Savaş, A.F.** (2019c). Endüstriyel Kazanlardaki Baca Kaybının Kalite Geliştirme Araçları Kullanılarak Azaltılması. *Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi*, Bolu.
- Kocabaş, C. & Savaş, A.F.** (2021). Reducing Energy Losses of Steam Boilers Caused by Blowdown with Using the FMEA Method. *Smart Science*, 9(2), 70-79.
- Kumar, M., Kumar, A., & Sharma, V.** (2014) Risk Analysis of Water Tubes in Boiler Using FMEA. *International Journal of Engineering Sciences Paradigms and Researches*, 12 (1), 1-7.
- Maddah, H., Sadeghzadeh, M., Ahmadi, M. H., Kumar, R., & Shamshirband, S.** (2019). Modeling and Efficiency Optimization of Steam Boilers by Employing Neural Networks and Response-Surface Method (RSM). *Mathematics*, 7(7), 629.
- Madejski, P., & Żymelka, P.** (2020). Calculation Methods of Steam Boiler Operation Factors under Varying Operating Conditions with the Use of Computational Thermodynamic Modeling. *Energy*, 197, 117221.
- Mariajayaprakash, A., & Senthilvelan, T.** (2013). Failure Detection and Optimization of Sugar Mill Boiler Using FMEA and Taguchi Method. *Engineering Failure Analysis*, 30, 17-26.
- Mashal, A. A.** (2015). *Failure Mode Effect Analysis (FMEA) on Heat Recovery Steam Generator (HRSG): Water Tube Boiler*. Mühendislik Lisans Tezi, Universiti Teknologi Petronas, Makine Mühendisliği, Perak, Malezya.
- Mekanik Sistemler (Meksis)** (2019). *Kazan Türbülatorü*. [Erişim Tarihi: 20.20.2019, <https://www.meksis.com.tr/assets/files/pdf/kazan-turbulatorleri-1b197.pdf>]

- Morales, A., Valencia, G. E., & Cardenas, Y. D.** (2018). Identification of energy saving potential in steam boiler through an ISO 50001 standard. *Journal of Physics: Conference Series*, November, 1126.
- Mumlu, G.** (2008). *Enerji Yönetim Sistemi ve Bir Sanayi Tesisinde Enerji Yönetimi Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Nagar, V., Soni, Dr. V. K., & Khara Dr. V. K.** (2013). Boiler Efficiency Improvement through Analysis of Losses. *International Journal for Scientific Research & Development*, 1(3), 801- 805.
- Nguyen, M. D., Bang, J. W., Kim, Y. H., Bin, A. S., Hwang, K. H., Pham, V. H., & Kwon, W. T.** (2018). Anti-Fouling Ceramic Coating for Improving the Energy Efficiency of Steel Boiler Systems. *Coatings*, 8(10), 353.
- Nikula, R. P., Ruusunen, M., & Leiviskä, K.** (2016). Data-driven Framework for Boiler Performance Monitoring. *Applied Energy*, 183, 1374-1388.
- Ocaktan S.** (2017). *Kondenstop Kontrolü ve Buhar Kaçakları ile Oluşan Maliyet*. [Erişim: 20.12.2019, <https://www.thesisatmarket.com/teknik/kondenstop-kontrolu-ve-buhar-kacaklari-ile-olusan-maliyet>]
- Oskaloğlu, E.** (2019). *Üretim İşletmelerinde Süreç İyileştirme Tekniklerinin Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Ostrowski, P., Szelejewski, F., & Zymelka, P.** (2020). Assessment of Improvement in the Energy and Exergy Efficiency of the Gas Heat Plant after the Exhaust Gas Cooled Down Below the Dew Point and the Use of Recovered Heat. *Energy*, 190, 116179.
- Özbakır, P.** (2006). *Enerji Yönetimi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özer, S.** (2004). *Buhar Sistemlerinde Kondensstop, Flaş Buhar ve Kazan Blöf Sistemi ile Enerji Geri Kazanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Çorlu.
- Öztürk, E.** (2012). *Tekstil Sektöründe Enerji Tasarrufu Olanaklarının Araştırılması ve Uygulanması*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Patro, B. (2016). Efficiency Studies of Combination Tube Boilers. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 193-202.

Pınarbaşı A. (2008). *Bölüm 15: Kimyasal Tepkimeler*. [Erişim tarihi: 25.04.2021, <https://avesis.yildiz.edu.tr/resume/downloadfile/atayil?key=7ac9b831-e0e4-440a-b3b8-3cbacce819b8>]

Pusat, Ş. (2019). Alev-Duman Borulu Buhar Kazanlarında Enerji Verimliliği için Performans Takibinin Önemi, *V. Enerji Verimliliği Kongresi*, 18-19 Ekim, Kocaeli, 167-171.

Putra, G. P., & Purba, H. H. (2018). Failure Mode and Effect Analysis Power Plant Boiler. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 11(2), 1–5.

Ranaraja, C. D., Devasurendra, J. W., Maduwantha, M. I. P., Madhuwantha, G. A. L., & Hansa, R. Y. D. (2020). Optimization of an Industrial Boiler Operation, *Journal of Research Technology and Engineering*, 1(3), 126-134.

Sabzpooshani, M., Azadehfar, E., & Sardarian, S. (2019). Exergy Evaluation and Optimization of a New Steam Power Plant Configuration in order to Use the Boiler Blowdown Water. *Journal of Energy Management and Technology*, 3(1), 30-39.

Saha, S., Sayem, N. A., Khan, M. M. A., & Biswas, P. K. (2021). Overall Performance of Steam System Used in Garment Industries in Bangladesh: A Case Study–Based Approach. *Energy Efficiency*, 14(2), 1-18.

Saidur, R., Ahamed, J. U., & Masjuki, H. H. (2010). Energy, Exergy and Economic Analysis of Industrial Boilers. *Energy Policy*, 38(5), 2188-2197.

Sarı, M. (2019). Buhar Üreten Endüstriyel Tesislerde Toplam Sistem Verimliliği, *V. Enerji Verimliliği Kongresi*, 18-19 Ekim, Kocaeli, 183-193.

Savaş, A.F. & Kocabaş, C. (2019). Endüstriyel Kazanlarda Yanma Veriminin Süreç Geliştirme Teknikleri Kullanılarak İyileştirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 357-368.

Sevinç, A. (2014). Problem Çözme Teknikleri. Harmancı, F. M. Gözübenli, M. & Alaç, A.E. (Ed.), *Güvenlik Sektöründe İnsan İlişkileri*, 111-129, Nobel Yayınevi.

Sezgin İzolasyon (2019). *Kazan Kapağı Ceket*. [Erişim: 20.12.2019, <https://www.sezginizolasyon.com/kazan-kapagi-ceketi/>]

- Sönmez, Y., & Ünğan, M. C.** (2017). Hata Türü Etkileri Analizi ve Otomotiv Parçaları Üretiminde Bir Uygulama. *İşletme Bilimi Dergisi*, 5(2), 217-245.
- Söyü Eren, N.** (2017). *Süreç İyileştirme Yöntemleri ve Altı Sigma Uygulamaları Bir İşletme Örneği*. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Sunudas, T., & Prince, M. G.** (2013). Optimization of boiler blow down and blow down heat recovery in textile sector. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(5), 35-38.
- Suresh, R., Sathyanathan, M., Visagavel, K., & Kumar, M. R.** (2014). Risk Assessment for Blast Furnace Using FMEA. *International Journal of Research Engineering and Technology*, 3(11):27–31.
- Tanasić, N., Jankes, G., Stamenić, M., Trninić, M., Simonović, T., & Adžić, V.** (2016). Experimental Study on the Efficiency of Pulverized Coal-Fired Steam Boiler. *International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications*, September, 1-3.
- Terhan, M., & Comakli, K.** (2017). Energy and Exergy Analyses of Natural Gas-Fired Boilers in a District Heating System. *Applied Thermal Engineering*, 121, 380-387.
- Tok Ünlü, E.** (2019). *Risk Değerlendirmesinde FMEA Yöntemine Bulanık Mantık Yaklaşımı: Deney ve Kalibrasyon Laboratuvarları Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Türkan, T., & Görener, A.** (2017). Süreç İyileştirme: Vasıflı Çelik Üretim Sektöründe Bir Uygulama. *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 4(2), 23-40.
- Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ).** (2017). *Kömür (Linyit) Sektör Raporu*, 94.
- Uylukçuoğlu, Ö. E.** (2009). *Otomotiv Sanayinde Enerji Verimliliği ve Enerji Tasarruf Olanaklarının Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Ünlü, O.** (2009). Sanayide Enerji Tasarrufu Çalışmalarının Önemi ve Buhar Sistemleri İle İlgili Uygulama Örnekleri. *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 6-9 Mayıs, İzmir, 67-80.
- Vakkilainen, E. K., & Ahtila, P.** (2011). Modern Method to Determine Recovery Boiler Efficiency. *O Papel*, 72(12), 58-65.

Vandani, A. M. K., Bidi, M., & Ahmadi, F. (2015). Exergy Analysis and Evolutionary Optimization of Boiler Blowdown Heat Recovery in Steam Power Plants. *Energy Conversion and Management*, 106, 1-9.

Wikiwand (2021). *Yedi Kalite Aracı*. [Erişim: 21.05.2021, https://www.wikiwand.com/tr/Yedi_kalite_arac%C4%B1]

Yalçın, K. (2007). *LAMTEC Karbonmonoksit Denetimli Oksijen (CO/02) Trimli Yakma Yönetim Sistemi*, [Erişim: 19.06.2019, <https://docplayer.biz.tr/4397141-L-bms-o2-co-lamtec-karbonmonoksit-denetimdmd-oksdjen-co-o2-trdmli-yakma-yonetdm-sdstemd-hazirlayan-kubilay-yalcin-makina-muhendisi-ankara-2007.html>]

Yalçın, E. & Akdemir, Ö. (2015). İskenderun Demir Çelik Fabrikası Enerji Tesisi Saf Su Hazırlama Ünitesinin İncelenmesi, *12. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 8-11 Nisan, İzmir, 2667- 2679.

Yang, D., Xu, H., Chen, H., & Jia, R. (2009). Analysis of the Exergy Efficiency and Influencing Factor of CFB Boiler. *International Conference on Energy and Environment Technology*, Ekim, 522-525.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM). (2017). *Endüstriyel Sistemlerde Optimizasyon Buhar Sistemleri*, Nisan, 154. [Erişim: 30.05.2020, <http://www.yegm.gov.tr/verimlilik/document/Buhar%20Sistemleri.pdf>.]

Yücer, C. T. (2017). Bir buharlı ısıtma sisteminin Enerji Yönetimi Sistemi Kullanılarak Analiz Edilmesi, *13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 19-22 Nisan, İzmir.

Zhao, X., Fu, L., Sun, T., Wang, J. Y., & Wang, X. Y. (2017). The Recovery of Waste Heat of Flue Gas from Gas Boilers. *Science and Technology for the Built Environment*, 23(3), 490-499.

4e Mühendislik (2019). *Yakıt Tasarruf Türbülatorleri*. [Erişim: 05.07.2019, <http://www.4emuhendislik.com.tr/?pnum=19&pt=YAKIT+TASARRUF+TÜRBÜLATÖRLE Rİ>]