



**BAYBURT İLİ KATI ATIK TESİSİNİN ATIK ISISINI
KULLANARAK BÖLGESEL ISITMA MODELİ
TASARIMI VE ANALİZİ**

Yasin ÇAMKERTEN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Alperen TOZLU

2024

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

BAYBURT İLİ KATI ATIK TESİSİNİN ATIK ISISINI KULLANARAK
BÖLGESEL ISITMA MODELİ TASARIMI VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin ÇAMKERTEN

Danışman: Doç. Dr. Alperen TOZLU

BAYBURT - 2024

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Alperen TOZLU danışmanlığında, Yasin ÇAMKERTEN tarafından hazırlanan “Bayburt İli Katı Atık Tesisinin Atık Isısını Kullanarak Bölgesel Isıtma Modeli Tasarımı ve Analizi” başlıklı bu çalışma, 30.12.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Emrah ÖZAHİ

Üye : Doç. Dr. Alperen TOZLU

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Erman Kadir ÖZTEKİN

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Murat KUL
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Alperen TOZLU danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bayburt İli Katı Atık Tesisinin Atık Isısını Kullanarak Bölgesel Isıtma Modeli Tasarımı ve Analizi” başlıklı program seçin tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

30.12.2024

Yasin ÇAMKERTEN



ÖN SÖZ

Bugüne kadar beni büyütüp yetiştiren aileme ve çalışmalarımda sürekli yanımda olup desteğini eksik etmeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Alperen TOZLU 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yasin ÇAMKERTEN



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAYBURT İLİ KATI ATIK TESİSİNİN ATIK ISISINI KULLANARAK BÖLGESEL ISITMA MODELİ TASARIMI VE ANALİZİ

Yasin ÇAMKERTEN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Alperen TOZLU

Bayburt-2024, Sayfa: 60

Bu çalışmada, Bayburt'ta bulunan Bayburt-Gümüşhane İlleri Yerel Yönetimleri Katı Atık Tesisleri Yapma ve İşletme Birliği (BAY-GÜ-KAB) bünyesinde kurulan Biyogaz Enerji Santralinin termoekonomik ve termodinamik analizleri yapılacaktır. Santralde çevre belediyelerden gelen katı atıklardan üretilen çöp gazı (LFG), gaz motorunda yakılarak elektrik enerjisi üretimi yapılmaktadır. Çöp gazının yakıldığı gaz motorunun ürettiği atık ısı kullanılarak, en yakın TOKİ konutlarının ısınma ve sıcak su ihtiyacını karşılayacak bir bölgesel ısıtma modeli tasarlanmış ve mevcut sisteme entegre edilerek toplam sistemin veriminin artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, tasarlanan bölgesel ısıtma modelinin termodinamik ve termoekonomik hesaplaması yapılacaktır. Santrale gelen katı atıklardan başlayarak, son nokta olan elektrik üretimine kadar olan iş akış diyagramları, şekiller ve görseller yardımıyla anlatılmıştır. Tesise gelen atık miktarı ve tesis üretim kapasitesi göz önünde bulundurularak, atık ısının kullanımıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Tesisteki sisteme giren ve çıkan değerler, gerçek tesis verileri alınarak kullanılmış ve yapılan bütün hesaplamalar bu gerçek veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Santrale eklenmesi planlanan bölgesel ısıtma modeli tasarımı için, gerçek işletme verileri kullanılarak termodinamik ve termoekonomik analizler yapılmış, santralin mevcut veri bilgileri kullanılarak sürdürülebilir bir model tasarımı sunulmuştur. Tesisin elektrik üretim kısmındaki gaz motorunun atık ısını kullanan bu tasarım, santrale en yakın toplu konutun ısınma ve sıcak su ihtiyacını karşılamak üzere modellenmiştir. Daha sonra tasarlanan modelin maksimum ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılayacağı konut sayısı belirlenmiştir.

BAY-GÜ-KAB santralinin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %42,71 ve %59,29 olarak bulunmuştur. Tasarlanan bölgesel ısıtma modelinin ise enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %42,51 ve %38,17 olarak belirlenmiştir. Ayrıca ısıtılacak konut sayısı 529 olarak tespit edilmiştir. BAY-GÜ-KAB santraline tasarlanan bölgesel ısıtma modelinin eklenmesiyle, sistemin ekserji ve enerji verimleri sırasıyla %64,76 ve %62,32 olarak hesaplanmış ve bu değerlerde iyileşme sağlandığı görülmüştür. Tasarımı yapılan bölgesel ısıtma sistemine yapılacak yatırımın 2,65 yıl içinde kendini amorti edeceği sonucuna ulaşılmıştır. Tasarlanan bölgesel ısıtma sistemi, sürdürülebilir enerji kaynağı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Atık ısı, ekserji analizi, bölgesel ısıtma, enerji verimliliği, termoekonomik analiz, katı atıklar.



ABSTRACT

M. SC. THESIS

DESIGN AND ANALYSIS OF THE DISTRICT HEATING MODEL BY USING THE WASTE HEAT OF BAYBURT PROVINCIAL SOLID WASTE FACILITY

Yasin ÇAMKERTEN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Alperen TOZLU

Bayburt-2024, Pages: 60

This study aims to conduct thermoeconomic and thermodynamic analyses of the Biogas Power Plant established under the Bayburt-Gümüşhane Provincial Municipalities Solid Waste Management Union (BAY-GÜ-KAB) in Bayburt. The plant generates electricity by combusting landfill gas (LFG) obtained from municipal solid waste collected from surrounding municipalities in a gas engine. The waste heat produced by the gas engine is utilized to design a district heating model to meet the heating and hot water needs of the nearby TOKİ residential buildings. This model is intended to be integrated into the existing system, thereby improving the overall efficiency of the plant. Furthermore, the thermodynamic and thermoeconomic evaluations of the proposed district heating model will also be performed. The workflow of the plant, from the initial processing of solid waste to the final electricity production stage, is detailed using diagrams, illustrations, and visual aids. The incoming waste quantities and the plant's production capacity were considered to analyze the utilization of waste heat. Actual operational data from the facility were utilized to evaluate system inputs and outputs, and all calculations were based on these real-world values. For the design of the proposed district heating model, thermodynamic and thermoeconomic analyses were conducted using real operating data, and a sustainable model was presented based on the plant's current operational parameters. This design, which leverages the waste heat of the gas engine used in electricity production, was modeled to meet the heating and hot water demands of the nearest residential complexes. Additionally, the maximum number of residential units that could be heated and supplied with hot water by the system was determined.

The energy and exergy efficiencies of the BAY-GÜ-KAB plant were calculated as 42.71% and 59.29%, respectively. For the proposed district heating model, energy and exergy efficiencies were determined to be 42.51% and 38.17%, respectively. Moreover, the system was found capable of heating 529 residential units. With the incorporation of the regional heating model designed for the BAY-GÜ-KAB power plant, the exergy and energy efficiencies of the system were calculated as 64.76% and 62.32%, respectively, demonstrating improvements in these metrics. It was concluded that the investment in the designed regional heating system would

pay for itself within 2.65 years. The proposed regional heating system has been presented as a sustainable energy source.

Keywords: Waste heat, exergy analysis, district heating, energy efficiency, thermoeconomic analysis, solid wastes.



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME.....	III
ÖN SÖZ.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	IX
TABLOLAR.....	XI
ŞEKİLLER.....	XII
KISALTMALAR.....	XIII
SİMGELER.....	XIII
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi	3
Araştırmanın Amacı	3
Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi	3
Araştırmanın Sınırlılıkları	3
BİRİNCİ BÖLÜM.....	4
1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
İKİNCİ BÖLÜM	9
2. KURAMSAL ÇERÇEVE.....	9
2.1. KATI ATIK NEDİR.....	9
2.1.1. Katı Atık Yönetimi	10
2.1.2. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri	11
2.1.2.1. Düzenli depolama	12
2.1.2.2. Yakma yöntemi.....	12
2.1.2.3. Kompostlama	13
2.2. ATIK ISI NEDİR	13
2.2.1. Atık Isı Değerlendirme Yöntemleri	13
2.3. BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ NEDİR	14
2.3.1. Atık Isı ile Bölgesel Isıtma Sistemi	15
2.4. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ.....	16
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	17
3. YÖNTEM	17
3.1. TERMODİNAMİK ANALİZ	17
3.1.1. Kütle Korunum Denklemi	17
3.1.2. Enerji Denklemi	17
3.1.3. Entropi Denklemi.....	19
3.1.4. Ekseji Denklemi.....	20
3.1.5. Türbin için İzentropik Verim	22
3.1.6. Kompresör veya Pompa için İzentropik Verim	22
3.2. TERMOEKONOMİK ANALİZ.....	23
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	27
4. SİSTEM TANITIMI.....	27
4.1. BAYBURT’TA ELEKTRİK ÜRETİM KAPASİTESİ.....	27

4.2. BAYBURT BİYOGAZ ENERJİ SANTRALİ OPERASYONEL SÜRECİ.....	27
4.2.1. Tesiste Çöp Ayrıştırma	30
4.2.2. Tesiste Çöp Depolama ve Depo Gazı Üretimi.....	31
4.2.3. Tesiste Depo Gazı Ayrıştırma ve Güç Üretimi.....	31
4.3. GAZ MOTORUNUN TEKNİK ÖZELLİKLERİ	34
BEŞİNCİ BÖLÜM.....	35
5. BULGULAR.....	35
5.1. BAY-GÜ-KAB TESİSİN TERMODİNAMİK ANALİZİ	35
5.2. BAY-GÜ-KAB TESİSİNİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ.....	40
5.3. BAY-GÜ-KAB BİYOGAZ ENERJİ SANTRALİNİN ATIK ISISI İLE TASARLANAN BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ	44
5.3.1. Bölgesel Isıtma Modeli Termodinamik Analizi	46
5.3.2. Bölgesel Isıtma Modeli Termoeconomik Analizi	48
5.4. BÖLGESEL ISITMA MODELİ KULLANILARAK ISITILACAK KONUT SAYISI BELİRLEME.....	51
5.5. BÖLGESEL ISITMA MODELİNİN EKONOMİK DEĞERLENDİRMESİ.....	52
SONUÇ VE ÖNERİLER	54
Sonuç	54
Öneriler.....	55
KAYNAKÇA.....	56
ÖZ GEÇMİŞ	60

TABLÖLAR

Tablo 1: Katı Atık Yönetimindeki Prensipler.....	10
Tablo 2: Katı Atık Bertaraf Yöntemleri.....	11
Tablo 3: Toplanan Katı Atıkların Bertaraf Yöntemleri	12
Tablo 4: Atık Isıyı Değerlendirme Yöntemleri	14
Tablo 5: Ekonomik Sabitler.....	26
Tablo 6: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Bulunan Gaz Motorunun Anlık Takip Verileri	33
Tablo 7: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Termodinamik Analizi İçin Bağlıntılar	37
Tablo 8: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Termodinamik Özellikleri ve Ekserjileri	37
Tablo 9: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Gerçekleştirilen Termodinamik Analizde Kullanılan Enerji ve Ekserji Denklemleri	38
Tablo 10: Alt Ekipmanların Ekserji ve Enerji Analizi	40
Tablo 11: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Termoeconomik Analizinde Her Bir Alt Bileşen için Kullanılan Ekserji Maliyet Oranı Dengesi ve İlgili Yardımcı Denklemler.....	41
Tablo 12: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Satın Alınan Ekipman Maliyeti (PEC), İlk Sermaye Yatırımı (CI) ve İşletme Bakım Maliyeti (OM)	42
Tablo 13: BAY-GÜ-KAB Tesisindeki Her Akışın Ekserji Akış Hızları, Maliyet Akış Hızları ve Birim Ekserji Maliyetleri.....	43
Tablo 14: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modeline Ait Termodinamik Denklemler	47
Tablo 15: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modelindeki Akışkanların Termodinamik Özellikleri ve Ekserji Değerleri.....	47
Tablo 16: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modelindeki Alt Bileşenlerin Enerji ve Ekserji Değerleri.....	48
Tablo 17: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modeli için Termodinamik Bağlıntılar ve Yardımcı Denklemler	49
Tablo 18: Bölgesel Isıtma Sisteminin Alt Bileşenlerinin PEC Değerleri.....	50
Tablo 19: Bölgesel Isıtma Sisteminin Maliyet Akış Hızları, Birim Ekserji Maliyetleri ve Ekserji Akış Hızları	50
Tablo 20: Bölgesel Isıtma Sistemi Maliyet Verileri	53

ŞEKİLLER

Şekil 1: Katı Atık Türleri Sınıflandırılması	10
Şekil 2: Bölgesel Isıtma Sistemi Yöntemleri	15
Şekil 3: 2024 Bayburt İli Elektrik Üretimi (MW) Dağılımı	27
Şekil 4: Bayburt Düzenli Katı Atık Depolama Tesisİ	28
Şekil 5: Bayburt Düzenli Katı Atık Depolama Tesisinin Şematik Görünümü	29
Şekil 6: BAY-GÜ-KAB Tesisinin 2021 ve 2022 Yılı Aylık Elektrik Üretimi (MW).....	30
Şekil 7: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Katı Atık Ayrıştırma Bölümü	30
Şekil 8: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Katı Atık Depolama Sahası ve Kullanılan Borular.....	31
Şekil 9: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Bulunan Booster ve Gaz Oran Ölçümü.....	32
Şekil 10: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Ayrıştırılan LFG Gazının İçeriği.....	32
Şekil 11: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Bulunan Gaz Depolama Tankı	33
Şekil 12: CAT CG170-16 Tip Motorunun Şematik Görünümü ve Teknik Özellikleri	34
Şekil 13: Motor Odasının Şematik Gösterimi.....	35
Şekil 14: Bölgesel Isıtma Sistemi Şablonu.....	45
Şekil 15: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modeli Şematik Görünümü	46
Şekil 16: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Sistemi Boru Hattı Yol Haritası	51
Şekil 17: 2020 Yılı İl Bazlı Hane Başı Gaz Tüketim Haritası (<i>m3</i>)	52

KISALTMALAR

ATY	: Atıktan Türetilmiş Yakıt
BAY-GÜ-KAB	: Bayburt-Gümüşhane İlleri Yerel Yönetimleri Katı Atık Tesisleri Yapma ve İşletme Birliği
CEPCI	: Kimya Mühendisliği Tesis Maliyet Endeksi
CI	: İlk sermaye yatırımı
CRF	: Sermayenin geri dönüş süresi
DG	: Doğal gaz
DPT	: Devlet Planlama Teşkilatı
EES	: Engineering Equation Solver
LFG	: Çöp gazı
OM	: İşletme bakım maliyeti
ORC	: Organik Rankine Çevrimi
PEC	: Satın alma maliyeti
SPECO	: Özgül ekserji maliyetlendirme
TOKİ	: Toplu Konut İdaresi
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
WHR	: Atık ısı geri kazanımı

SİMGELER

<i>A</i>	: Isı transfer alanı, m ²
<i>c</i>	: Ekserji birimi başına maliyet, \$/GJ
<i>Ĉ</i>	: Maliyet oranı, \$/h
<i>Đ</i>	: Ekserji yıkımının maliyet oranı, \$/h
<i>Ėx</i>	: Ekserji oranı, kW
<i>f</i>	: Eksergoekonomik faktör
<i>H</i>	: Özgül entalpi, kJ/kg
<i>i</i>	: Faiz oranı, %
<i>m</i>	: Kütle akış hızı, kg/s
<i>n</i>	: Toplam çalışma süresi
<i>N</i>	: Yıllık çalışma süresi
<i>P</i>	: Basınç, bar
<i>Q̇</i>	: Net ısı transferi, kW
<i>s</i>	: Özgül entropi, kJ/kg-K
<i>T</i>	: Sıcaklık, °C
<i>U</i>	: Isı transfer katsayısı, W/m ² K
<i>Ẇ</i>	: Net iş transferi, kW
<i>Ż</i>	: Toplam maliyeti oranı, \$/h
<i>ε</i>	: Ekserji verimi
<i>η</i>	: Enerji verimi

ϕ	: Bakım faktörü
ψ	: Özgül akış ekserjisi, kJ/kg
0	: Ölü hal
ϕ	: Çıkış
D	: Yıkım
DG	: Doğal gaz
F	: Yakıt
g	: Giriş
k	: Bileşen
LHV	: Alt ısı değer
P	: Ürün
PI	: Boru hattı izolatörü
PL	: Boru hattı
s	: İzantropik



GİRİŞ

Fosil yakıt kaynaklarının sürekli azaldığı dünyada üretim rekabetinin sürekli arttığı ortamda enerji, endüstriyel tesislerin en büyük problemidir. Bu problemi çözmek için yeni enerji kaynakları aranmakta ve birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda en önemli olanlardan biri teknoloji eşliğinde enerjiyi en verimli halde kullanarak nasıl üretim yapılacağıdır. Enerji verimliliğini artırmak fosil yakıt tüketiminin azaltılmasında önemli derecede rol oynamaktadır. Enerji verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve en az girdiyle en çok çıktıyı yakalamak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biride üretim yapan tesislerdeki atık ısıнын değerlendirilerek sistemin verimliliğini arttırmak ve ekonomik olarak kazanç sağlamaktır. Atık ısı birçok tesiste ve makinada verimi düşüren, enerji sarfiyatına sebep olan önemli bir etkindir (Abusoglu vd., 2021).

Günümüzde, çok hızlı bir şekilde artan insan nüfusu ve özellikle endüstriyel çalışmaların beraberinde getirdiği atık sorunları, çöp depolama alanlarını çevresel ve enerji yönünden önemli bir konuma getirmektedir. Çöp depolama alanları, sadece atıkların biriktirildiği yerler olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir enerji üretimi için potansiyel kaynaklar barındıran alanlar olarak da öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, çöp depolama alanlarında kurulan biyogaz enerji santralleri, atıklardan enerji üretimi kapsamında önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır (Tozlu vd., 2021).

Bu tez, Bayburt'ta bulunan katı atık yani çöp depolama alanının faaliyet gösteren biyogaz enerji santrallinde kullanılan biyogaz motorunun atık egzoz gazı ısısının bölgesel ısıtma sistemlerinde nasıl değerlendirilebileceğini incelemektedir. Aynı zamanda Bayburt'ta bulunan biyogaz enerji santralinin termodinamik analizleri yapılmaktadır. Yakılan metan gazıyla oluşan atık egzoz gazı ısısının potansiyel enerjisi hesaplanmıştır. Atık ısı ve bölgesel ısınma modelleri irdelenmiş çeşitli geliştirme önerileri sunulmuştur. Bayburt biyogaz enerji santralinin modellemesi yapılarak her bir ekipmanın ekserji hesabı yapılmıştır. Tesisin işleyişindeki enerji akışları ve işlem adımları detaylı bir şekilde ele alınarak, enerjinin etkin bir şekilde kullanılması için önerilerde bulunulmuştur. Termodinamik analizler, tesisin enerji dönüşüm verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu verimliliğin artırılması, çevresel etkilerin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. Bir bölgesel ısıtma modeli tasarlanmış ve ekserji analizleri yapılmıştır. Ekonomik açıdan tasarlanan modelin analizleri de yapılmıştır. Ayrıca, geri dönüşüm enerjisinin önemi, çöp depolama alanlarının çevresel etkileri ve bölgesel ısıtma sistemlerinin sürdürülebilir enerji politikalarındaki rolü üzerine odaklanmaktadır.

Modellenen bölgesel ısıtma sistemi başta Bayburt biyogaz enerji santrali yakınlarında bulunan yapımına 2022 yılında başlanmış 393 konutlu TOKİ projesi ve yakınındaki konutlar için tasarlanmıştır. Oluşan atık ısının kapasitesine göre modelleme içerisine gerekli ekipmanlar yerleştirilmiştir. TOKİ projesinde bulunan tesis yakınındaki konutların, Bayburt koşullarında ısıtma için esasen yıllık ne kadar miktarda enerji ihtiyacı hesaplanmıştır. Bu hesaplar doğrultusunda sistemin ne kadar konutu ısıtacağının sonucuna varılmış ve aynı zamanda tasarlanan bu modelin ne kadar bir ısıtma maliyetini ortadan kaldıracağı göz önüne koyulmuştur. Tasarlanan bölgesel ısıtma modelinin çevresel farkındalık açısından da ne kadar büyük öneme sahip olduğu vurgusu yapılmaktadır.

Önerilen bölgesel ısıtma sistemleri güçlü akademik çalışmalar yardımıyla geliştirilmiştir ve önceki bilimsel çalışmalardan elde edilen bilgilerle desteklenmektedir. Hesaplamalar, katı atık depolama alanlarından elde edilen enerjinin para tasarrufu sağladığını ancak aynı zamanda çevresel etkiyi azaltma potansiyeline sahip olduğunu bize göstermektedir. Bu tez, atık yönetimi alanında sürdürülebilir enerji uygulamalarının önemini vurgulamakta ve depolama alanlarından elde edilen enerjinin verimli kullanımı için bölgesel ısıtma sistemlerinin olanaklarını ortaya çıkarmaktadır.

Bu yapılan tez çalışması özünde üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama olarak Bayburt ilinde bulunan biyogaz enerji tesisi yerinde incelemeler yapılmış, gelen katı atıkların ayrıştırılması, katı atıkların düzenli olarak depolanması, katı atıklardan çöp gazı elde edilmesi, bu çöp gazının elektrik enerjisine dönüştürülmesi, tesisteki iş akış diyagramları çıkarılarak ortaya konulmuştur. Tesisin hedef ilerleyişi, depolama kapasitesi ve katı atık miktarları dikkate alınarak tesisteki enerji verimliliği atık ısı kullanımı ile arttırılmak için ilgili çalışmalar yapılmıştır.

İkinci aşama olarak tesis şeması ortaya çıkarılarak başlamıştır. Şematik görünüm, termodinamik ve termoekonomik olarak analizler yapılan sistemler için oldukça önem arz ettiğinden bu aşamada çıkarılmıştır. Tesisteki sistem üzerinden her bir şema elemanının giriş ve çıkış değerleri gerçek veriler kullanılarak ortaya koyulmuştur. Bu gerçek işletme verileri ışığında tesisin termodinamik ve termoekonomik analizleri yapılmıştır. Bu yapılan çalışma tesise eklenebilecek yeni sistemler açısından oldukça önem arz etmektedir.

Üçüncü aşama yani son aşamada ise tesisin gerçek çıktılarına bağlı olarak tasarlanan sürdürülebilir bir model geliştirilmiştir. Tesis içerisinde bulunan gaz motorunun yüksek egzoz gazı atık ısısı kullanımıyla tasarlanan bir bölgesel ısıtma modeli geliştirilmiştir. Tesisin yakınında bulunan TOKİ konutlarının ısıtma ve sıcak su ihtiyacının karşılanması planlanmıştır.

Yapılan bu bölgesel ısıtma modelinin termodinamik ve termoekonomik analizleri gerçekleştirilerek modelin kendini amorti etme süresi hesaplanmıştır.

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Bu tez, Bayburt'ta bulunan BAY-GÜ-KAB tesisinin incelenmesini konu almaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle BAY-GÜ-KAB tesisi detaylı bir şekilde tanıtılacak, ardından termodinamik ve termoekonomik analizler gerçekleştirilecektir. Elde edilen analiz sonuçlarına dayanarak, tesis için yeni bir bölgesel ısıtma sistemi tasarlanacak ve bu sistem tesise entegre edilecektir. Tasarlanan bölgesel ısıtma sistemine ilişkin termodinamik ve termoekonomik hesaplamalar yapılacak ve sonuçlar ayrıntılı olarak sunulacaktır. Bölgesel ısıtma modeli eklenmesiyle birlikte BAY-GÜ-KAB tesisinin enerji ve ekserji verimliliğinde meydana gelen değişimler değerlendirilecektir. Ayrıca, önerilen model için bir maliyet analizi yapılacak ve sistemin kendini amorti etme süresi hesaplanacaktır.

Araştırmanın Amacı

Bu tez, Bayburt'ta bulunan BAY-GÜ-KAB tesisinin enerji ve ekserji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmaları ele almayı amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmak ve tesise ek güç üretimi sağlamak amacıyla, atık ısı kullanılarak bir bölgesel ısıtma modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan bu modelin, tesise ekonomik fayda sağlamasının yanı sıra çevresel etkilerin azaltılmasına da katkıda bulunması hedeflenmiştir. Bölgesel ısıtma modeli ile toprağa, havaya, suya ve dolayısıyla genel anlamda çevreye verilen zararların en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

Araştırmanın Önemi ve Gerekçesi

Bu çalışma, katı atık yönetimi ve atık ısı kullanımına ilişkin önemli katkılar sunmaktadır. Aynı zamanda enerji üretim tesislerinin enerji ve ekserji verimliliğini artırma konusunda yol gösterici bir rehber niteliği taşımaktadır. Bununla birlikte, bölgesel ısıtma sistemlerini ayrıntılı bir şekilde ele alarak bu sistemlerin önemine dikkat çekmektedir. Bu tez, giderek artan enerji ihtiyaçlarına çevresel zararları azaltarak ve ekonomik faydalar sağlayarak çözüm sunmayı hedefleyen bir kaynak olarak değerlendirilebilir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Bu çalışmada, BAY-GÜ-KAP tesisinin atık ısısı kullanılarak bir bölgesel ısıtma modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan modelin ekipman, işletme ve borulama maliyetleri dikkate alındığında, ilk yatırım maliyeti 368.949 \$ olarak hesaplanmıştır. İlk yatırım maliyetinin büyüklüğü, çalışmanın hayata geçirilmesini zorlaştıran bir etken olarak değerlendirilmektedir

BİRİNCİ BÖLÜM

1. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde biyogaz enerji santralleri ile endüstriyel santrallerde atık ısının geri kazanımı ve bölgesel ısıtma ile alakalı literatürde bulunan benzer çalışmalar irdelenmiş ve özeti detaylandırılarak aşağıda verilmiştir.

Eyriboyun (2011), yaptığı çalışmada Zonguldak ilinde bulunan elektrik santralinin iyileştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır. Zonguldak'taki 1360 MW'lık elektrik santralleri deniz suyu soğutmalı olduğu ve sadece elektrik ürettiği bilgisi verilmiştir. Fazlaca bir şekilde çevre kirliliğine yol açtığı vurgusu yapılmıştır. Bu çalışmasında termik santrallerin atık ısını kullanarak bölgesel ısınma sistemi tasarlanmış atmosfere atılan sera gazının azalacağı gösterilmiştir. 40 dairelik bir model ele alınarak eski ısınma sistemi ve bölgesel ısınma sistemi karşılaştırılmıştır. Bir sezon sonunda 117620 kg kömür kar edildiği ve çevreye daha az zararlı gaz salındığı görülmüştür.

Tozlu vd. (2018), yaptıkları çalışmada Gaziantep katı atık tesisinin atık ısını değerlendirip termodinamik ve termoekonomik analizler yapılmıştır. Gaziantep katı atık tesisinin kurulu gücü 5,66 MW tır ve 5 adet gaz motoru bulunmaktadır. Bu tesisin atık ısını kullanarak sistem geliştirilip normal koşullar altında hesaplamalar yapılmıştır. Termodinamik hesaplamalar sonucunda net güç çıkışı 1095 KW bulunmuştur ve sisteme %19,33 oranında ek güç üreteceği görülmüştür.

Rahim ve Gündüz (2013), yaptıkları çalışmada tasarruf etmek isteyen endüstriyel oluşumlar için termodinamik analizler yapmışlardır. Tasarlamış oldukları bir sistemde 20 MW'lık bir buhar tribünü ve 38 MW'lık bir gaz tribünü bulunmaktadır. Çalışma koşullarındaki değerler eşliğinde hesaplamalar yapılmıştır. Sistem mevcut enerjinin Ortalama %30-40 elektriğe çevirirken basit bir çevrimle atık ısının kullanılabilir hale getirilebileceğini ve sistem veriminin artabileceğini ortaya koymuşlardır.

Çiçek vd. (2003), yaptıkları çalışmada firma tarafından kurulması düşünülen birleşik ısı-güç santralinde termodinamik ve maliyet analizleri yapmışlardır. Kurulu gücü 5 MW olan bir santral düşünülmüştür. Hesaplamalar normal koşullar altındaki değerler üzerinden yapılmıştır. Elektrik üretimi için verimin %30 civarında olduğu ve atık ısıdan elde edilen buhar enerjisinin veriminin %45-%55 arasında olduğu hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada %27 oranında yatırımın karlı olduğu ve firmanın yıllık enerji ihtiyacının bu santralden karşılanabileceği görülmüştür.

Güngör vd. (2007), yaptıkları çalışmada termik santrallerdeki atık ısının değerlendirme analizi ve dünyadaki çeşitli örnekleri incelenmiştir. Termik santrallerin teknik bilgileri verilmiş daha sonra bölgesel ısıtma sistemine ısı sağlayan santraller incelenmiştir. Atık ısıları bölgesel ısınmada kullanılan santrallerin yararlarını incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda termik santrallerdeki atık ısının kullanımı santrallerin verimini %80-%90 seviyelerine kadar arttırdığı görülmüştür. Bu verim artışının maliyetleri düşürdüğü görülmüştür. Termik santrallerdeki atık ısının bölgesel ısınmada kullanımı enerji anlamında dışa bağımlılığı azaltacağı vurgulanmıştır.

Paksoy (2019), yaptığı çalışmada gaz motorlu bir ısı gücü üretim santralinde atık ısının geri kazanımı analizi yapılmıştır. 2 farklı deneysel sonuç hesaplanmıştır. Birincisinde TCG 2020 V20 motoruyla verimi %90,78 hesaplanmıştır ve sistemin kendi kendine amorti etmesi 2,44 yıl olarak hesaplanmıştır. İkincisinde TCG 2020 V16 motoruyla verimi %90,74 hesaplanmıştır ve sistemin kendi kendine amorti etmesi 2,73 yıl olarak hesaplanmıştır. Yapılan bu hesaplamalar atık ısının kullanılarak verimin artırılabilirliğini ve maliyetin düşeceğini göstermektedir.

Johari vd. (2012), yapmış oldukları çalışmada Malezya'da bulunan katı atık tesislerindeki tonaj ve metan gazı hakkında önemli bilgiler vermişlerdir. Yaptıkları veri hesapları neticesinde yıllık ortalama %2,14 lük artış oranıyla 2020 yılında 9.820.000 ton katı atık olacağı tahmin ediliyor. Bu atık tonuyla beraber 2020 yılında en az 370 tonluk metan gazı emisyonu oluşumu beklenmektedir. Oluşmakta olan ve oluşacak ciddi miktardaki bu değerlerin çevreye olan zararı oldukça fazla olduğunu göstermektedir. Yapılan analizler neticesinde oluşan metan gazı elektrik üretiminde kullanılırsa bu üretim 1,9 milyar kWh' ye kadar çıkabilir. Bu veriler ışığında yapılan çalışma Malezya'da ekonomik ve çevresel faydalar sağlanacağını bize gösteriyor.

Kumar ve Samadder (2017), yazmış oldukları makalede belediye katı atık depolama alanının nasıl etkin bir biçimde kullanılabilir olduğunu irdemişlerdir. Enerji geri kazanımı için gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için kullanılan yöntemler belirtilmiştir. Bu yöntemler beş ana başlık altında toplanmıştır. Yakma, piroliz, gazlaştırma, anaerobik sindirim ve gaz geri kazanımıyla atık depolama şeklinde başlıklara ayrılmıştır. Makale sonucunda yapılan ve uygulanan yöntemlerin önemli ölçüde sera gazı emisyonuna karbon emisyonuna katkı sağladığı görülmüştür. Önemli ölçüde bir enerji kaynağı olarak da ekonomik olarak faydalarından bahsedilmiştir. Çöp gazı üretimi ve depolanması hakkında modellemeler gösterilmiş başlıca ülkelerin katı atık yönetimi verileri paylaşılmıştır. Atık enerji dönüşümü, katı atıkların hem

çevresel hem de ekonomik açıdan daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine yardımcı olabilir.

Fitó, Ramousse vd. (2020), yazdıkları makalede Grenoble'da (Fransa) endüstriyel atık ısı geri kazanımı hakkında farklı tasarım ve yöntemlerle maksimum geri kazanım için denemeler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar atık ısının bölgesel ısıta üzerinde kullanılması üzerine yapılmıştır. Enerji, ekserji ve maliyet açısından değerlendirmeler yapılmıştır. Bölgesel ısıtma sistemine ilk giriş sıcaklıkları ve ısı depolama kapasiteleri değiştirilerek analizler devam etmiştir. Sırasıyla 35 °C, 50 °C ve 85 °C dereceleri ile 0 MWh, 10 MWh, 20 MWh, 30 MWh ve 40 MWh kapasitesi üzerinde araştırmalar ve çalışmalar yapılmıştır. Optimizasyon tabloları çıkarılmış, 35 °C ve 30 MWh değerlerinin en iyi değerler olduğu saptanmıştır. Bu değerler ve modellemeyle endüstriyel atık ısının %41 geri kazanılmakta ve ev ihtiyaçlarının %48 temin edilmektedir. Maliyet olarak tahmini geliri ise 11,7 milyon Euro olduğu hesaplanmıştır.

Fitó, Hodencq vd. (2020), yapmış oldukları makalede Grenoble'da (Fransa) bulunan bölgesel ısıtma sisteminin geliştirilmesi ve tekrar modellemesini ortaya koymuşlardır. Var olan bölgesel ısıtma sistemine çevrede bulunan Fransız Ulusal Yoğun Manyetik Alan Laboratuvarı'nda bulunan atık ısının 85 °C'de sisteme entegre edilmesini hedeflemiştir. Yapılan analizler sonucunda 85 °C'nin 40 MWh kapasite ile sisteme entegre edilmesi olağan görüşmüştür. Bölgesel ısıtmaya dahil edilen atık ısının maliyet açısından katkısı olacağı belirtilmiştir.

Liao vd. (2020), yazmış oldukları makalede kömürle çalışan tesislerinde oluşan atık ısının geri kazanılması için tasarımlar yapmışlardır. Organik Rankine Çevrimi (ORC) teknolojisi kullanılmıştır. Enerji ve ekserji analizine bağlı olarak baca gazından çıkan ısının değerlendirmesi yapılmıştır. Baca gazını 250 °C ile sisteme sokup 90 °C ile çıkarmışlardır. Yapmış oldukları sistem 300 MW'lık olmuştur. İdeal koşullar altında maksimum ısı verim %16,37 ve maksimum ekserji verimi %45,54 olduğu görülmüştür. Ortalama olarak ekserji kaybının %25,65 önlenebileceği görülmüştür. Sonuç olarak, bu makale, atık gazın sıcaklığına dayalı ORC teknolojisi kullanarak atık ısının geri kazanılması için tasarım seçeneklerini ve gelişmiş ekserji analizi ile bu seçeneklerin nasıl optimize edilebileceğini inceleyen önemli bir çalışmayı özetlemektedir. Bu analizler, enerji verimliliğini artırmak ve atık ısının sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını desteklemek isteyen mühendisler ve enerji uzmanları için değerli bilgiler sunmaktadır.

Ryan (2011), yaptığı çalışmada çöp sahası gazının enerji kullanımını incelemekte ve bu gazın topluluk elektriği ve bölgesel ısıtma sistemlerine olan katkısını değerlendirmektedir. Araştırma, yıllık olarak 1,5 milyon metreküp çöp sahası gazının üretildiği bir senaryoyu ele

almaktadır. Bu gazın yakıt olarak kullanılması sonucunda, 3.2 MW elektrik üretimi ve 2.8 MW ısı üretimi sağlandığı tespit edilmiştir. Ayrıca, çöp sahası gazının enerji dönüşüm verimliliği %65 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, çöp sahası gazının sürdürülebilir enerji kaynaklarına dönüştürülmesinin hem yerel enerji ihtiyacını karşılayabileceğini hem de çevresel açıdan olumlu sonuçlar doğurabileceğini vurgulamaktadır. Bu çalışma, çöp sahası gazının enerji potansiyelini değerlendiren önemli bir kaynaktır ve sürdürülebilir enerji üretimi konusunda yeni perspektifler sunmaktadır.

Park ve Shin (2001), yaptıkları çalışmada katı atık depolama alanlarından kaynaklanan depolama gazının yüzey emisyonunu ele almaktadır. Depolama gazı, organik malzemenin doğal ayrışması sonucunda oluşan bir yan ürün olup yaklaşık olarak yüzde 50 metan, yüzde 50 karbondioksit ve az miktarda metan dışı organik bileşiklerden oluşmaktadır. Bu çalışmanın amacı, bir hava akış odası kullanarak katı atık depolama alanlarından kaynaklanan depolama gazının salım miktarını tahmin edilmektedir. Çöp gazının bileşimi, depolama alanındaki atık türüne ve alanın yaşına bağlı olarak değişebilmektedir. Oksijen seviyeleri, nem oranı ve sıcaklık gibi faktörler, çöp gazı üretimini etkileyen önemli etkenler arasında yer almaktadır. Sıcaklığa bağlı olarak yaz aylarında kış aylarına göre daha fazla çöp gazı çıktığı gösterilmektedir. Bu çalışma, çöp gazının emisyonlarıyla ilişkilendirilen çeşitli çevresel riskleri tartışılmaktadır, bunlar arasında kokular, potansiyel patlama tehlikeleri, yer seviyesinde ozon oluşumu ve küresel ısınma gibi çevresel sorunlar yer almaktadır. Eğer çöp gazı kullanılırsa %80 oranında yüzey emisyonun azalacağı tespit edilmiştir. Bu nedenle, katı atık depolama alanlarından kaynaklanan depolama gazının yönetimi ve kontrolü, çevre koruma açısından büyük bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır.

Yapılan literatür taraması, çoğunlukla atık ısıların elektrik enerjisi üretiminde geri dönüştürülmesi, atık ısının geri kazanımının çevresel ve ekonomik faydaları, bölgesel ısıtma sistemlerinin avantajları ve katı atık depolama alanlarından elde edilen elektrik enerjisi üzerine odaklanan sınırlı sayıda çalışmanın olduğunu göstermektedir. Ancak, Türkiye'deki katı atık depolama alanları ve bölgesel ısıtma sistemleri üzerindeki araştırmaların yetersiz olduğu ve termodinamik ile termoeconomik açıdan incelenmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, Türkiye'de düzenli katı atık depolama ve atıktan biyogaz enerjisi üretimi tesislerinin bazı illerde yeni yeni kurulmaya başladığı ancak kurulan bu tesislerin termodinamik analizlerinin yetersiz olduğu gözlemlenmektedir. Son zamanlarda Türkiye'de atık ısı ve bölgesel ısıtma sistemleri üzerine yapılan araştırmaların oldukça azaldığı görülmektedir. Sonuç olarak biyogaz enerji santrallerinde bulunan, metan gazı yakan motorların atık ısıdan bölgesel ısıtma sistemleri

tasarımı ve optimizasyonu alanında çok az sayıda çalışmanın bulunması bu tezi ortaya çıkarmaktadır.



İKİNCİ BÖLÜM

2. KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. KATI ATIK NEDİR

Ev, hastane, iş yeri ve fabrika gibi alanlarda kullanılmış artık bir iş görmeyen ve çevreye zararlı olan her maddeye atık denir. İnsanların yaşam faaliyetleri sonunda ortaya çıkan atıklar, çoğu zaman doğada zor çözünen ve çevre kirliliğine neden olan maddelerdir. Dünya nüfusunun artması, sanayileşme ve kentleşmenin hızlanmasıyla birlikte katı atık miktarı da hızla artmaktadır. Bu atıkların doğru yönetilmemesi ve kontrolsüz bir şekilde bertaraf edilmesi, toprak, su ve hava kirliliği gibi çevresel sorunlara yol açmaktadır (Bayram, 2017).

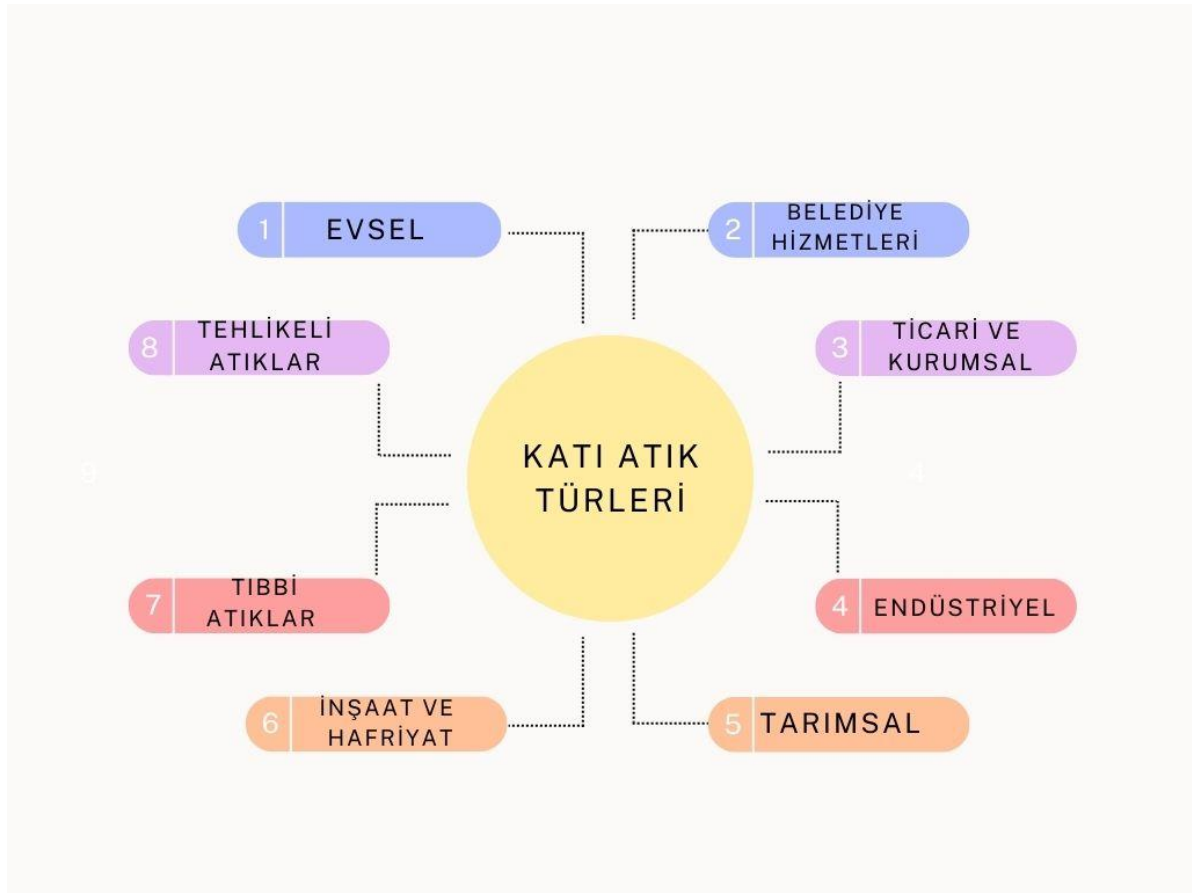
Atıkların doğaya bırakılması veya uygun olmayan yöntemlerle bertaraf edilmesi sonucunda çevrede ciddi tahribatlar meydana gelebilir. Toprak kirliliği, tarım alanlarının verimsizleşmesine ve yeraltı su kaynaklarının kirlenmesine sebep olabilir. Su kirliliği ise içme suyu kaynaklarını tehdit ederek insan sağlığını olumsuz etkiler. Ayrıca, havaya salınan atık gazlar ve partiküller, hava kirliliğine ve iklim değişikliğine katkıda bulunabilir. Atıkların çevreye saçtıkları koku da çevreyi oldukça rahatsız eder. Aynı zamanda atıkların içerisinde oluşan bazı gazların yanıcı olması, kendi içerisinde olası patlama tehditleri de oluşturmaktadır. Atıkların çokça bulunduğu ortamlarda git gide artan haşereler, kuş ve birçok sinek türü bulaşıcı hastalıkları taşıyarak salgın risklerini arttırmaktadır (İşıldar, 2018).

Atık yönetimi, atıkların kaynağında azaltılması, geri dönüşüm ve yeniden kullanım gibi sürdürülebilir stratejilerle mümkündür. Geri dönüşüm, atıkların ekonomiye kazandırılmasını sağlayarak doğal kaynakların korunmasına yardımcı olurken, atık miktarını da azaltabilir. Ayrıca, atıkların tehlikelerinin bilinçli bir şekilde yönetilmesi için güvenli depolama ve bertaraf yöntemleri geliştirilmelidir (Solak & Pekküçükşen, 2018).

Bu bağlamda, atıkların yönetimi ve bertarafı, çevre sağlığı ve doğal kaynakların sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Politika yapıcılar, sanayiciler ve bireyler arasında iş birliği ve farkındalık artırıcı tedbirlerle, atık sorununun etkin bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Böylece, gelecek nesillere temiz ve sağlıklı bir çevre bırakmak için atık yönetimi alanında sürekli olarak ilerleme kaydedilebilir (Büyükköklik, 2008).

Sanayileşmenin gelişmesiyle birlikte üretim çeşitliliği artmıştır. Bu artışla birlikte katı atık çeşitliliği de artmıştır. İş yerlerinde, evlerde ve diğer yaşam alanlarında ortaya çıkan atıklar ile endüstriyel ortamlarda oluşan atıkların farklı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu atıkların tehlikeli ve zararlı olanları ayrıştırılmalıdır. Bu nedenle, katı atıklar

türlerine göre isimlendirilir ve sınıflandırılır (Bilgili, 2020). Bu sınıflandırma Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1: Katı Atık Türleri Sınıflandırılması

2.1.1. Katı Atık Yönetimi

Katı atık yönetimi, başarılı yönetilen bir toplumun gerekesimi olarak kabul edilir. Ayrıca, çevre yönetiminin de başında gelmektedir. Dünyamızda git gide artan enerji ihtiyacı, sanayinin ve tüketicinin çevreye olan zararı, gün geçtikçe artan ham madde ihtiyacı gibi problemleri içerisine almaktadır. Bunların yanı sıra ekonomik ve sosyal yönden de önemli bir faaliyet dalı olarak kabul edilir (DPT, 2000).

Teknolojinin gelişmesiyle beraber özellikle gelişmiş ülkelerde yapılan önemli çalışmalar sonucunda katı atıkların yönetim prensipleri oluşmuştur. Atık yönetimi çevreci uygulamaları dikkate almaktadır ve atık yönetimindeki prensipler Tablo 1’de sıralanmıştır (Güler, 2008).

Tablo 1: Katı Atık Yönetimindeki Prensip

Sıra	Katı atık yönetimindeki prensipler
1	Atık azaltma (Reduction)

2	Yeniden kullanım olanağı (Reuse)
3	Geri dönüşüm olanağı (Recycle)
4	Atıkların iyileştirilerek yeniden kullanıma yönetilmesi (Recover)
5	Bertaraf (Residual disposal)
6	Atıklarla kirlenmiş bölgelerin iyileştirilmesi, kurtarılması (Remediation)

2.1.2. Katı Atık Bertaraf Yöntemleri

Katı atıkların bertarafı günümüz toplumlarında çevresel ve toplum sağlığı yönünden önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Sanayinin, iş yerlerinin, evlerin ve endüstriyel tesislerin artışıyla beraber katı atıklarda fazlaca artmıştır. Sürekli artan bu katı atıkların çok etkili bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir. Aksi taktirde başta çevre kirliliği olmakla beraber su ve toprak kaynaklarının tahrip olması ardından insan sağlığının olumsuz etkilenmesi gibi çok büyük sorunlar oluşturabilir (Saltabaş, 2009).

Katı atıkların bertarafı, atıkların toplanmasından başlayıp ardından taşınması, işlenmesi ve sonucunda zararsız hale getirilmesi veya geri dönüştürülmesini içerisine almaktadır. Bu akışın iyi bir şekilde yönetilmesi, doğadaki kaynakların korunması ve atıkların çevreye verdikleri zararın en aza indirilmesini amaçlamaktadır. Katı atık bertaraf yöntemleri Tablo 2’de sırlanmaktadır (Işıldar, 2018).

Tablo 2: Katı Atık Bertaraf Yöntemleri

Sıra	Katı Atık Bertaraf Yöntemleri
1	Düzensiz (Vahşi) Depolama
2	Düzenli Depolama
3	Kompostlama
4	Yakma Yöntemi
5	Biyometanizasyon Yöntemi
6	Gazifikasyon Yöntemi
7	Plazma Yöntemi
8	Piroliz Yöntemi
9	Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY) Yöntemi

Araştırmalarına göre Türkiye belediyelerinde katı atık bertarafı yöntemlerinden en çok kullanılan yöntem %93,3 oranı ile depolama yöntemidir. Ardından sırasıyla %3,3 %1,7 ve %1,7 olarak yakma, kompostlama ve geri kazanım yöntemleri listede yer almaktadır. Bazı Avrupa birliğinde ise bu oranlar depolama %57, yakma %16, kompostlama %7 ve geri kazanım %13

şeklindedir. Ayrıca toplanan katı atıkların bertaraf yöntemleri Tablo 3’de verilmiştir (Akdoğan & Güleç, 2007).

Tablo 3: Toplanan Katı Atıkların Bertaraf Yöntemleri (Akdoğan & Güleç, 2007)

Atık Bertaraf	1		2		3		4	
Yöntemleri	<i>f</i>	(%)	<i>f</i>	(%)	<i>f</i>	(%)	<i>f</i>	(%)
Depolama	56	(93,3)	2	(14,3)	-	-	-	-
Yakma	2	(3,3)	2	(14,3)	1	(33,3)	1	(50,0)
Kompostlama	1	(1,7)	2	(14,3)	1	(33,3)	-	-
Geri Kazanım	1	(1,7)	8	(57,1)	1	(33,3)	1	(50,0)
Toplam	60	(100)	14	(100)	3	(100)	2	(100)

2.1.2.1. Düzenli depolama

Belirli bir saha içerisinde atıkların düzenli olarak toprak üstünde veya altında depolandığı, atıkların geri kazanılması veya bertarafa gönderilmek üzere tutulduğu tesislerdir. Katı atık düzenli depolama sistemi dünyanın neredeyse tüm ülkelerinde katı atıkların bertarafı için kullanılmaktadır. Katı atık düzenli depolama tesislerinde biyobozunur atıkların kendiliğinden oluşturduğu çevreye aşırı zararlı depo gazı ve çöp suyu bulunmaktadır. Bu çevreye zararlı depo gazının ve çöp suyunun kontrol altına alınması gerekmektedir. Özellikle depo gazının yenilenebilir enerji olarak kullanılması gerekir bu sayede çevre zararı azaltılmış olacaktır (Akar, 2019).

Bu kapsamda Bayburt’ta bulunan BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santrallide bir düzenli depolama alanıdır. Bu tesiste çevreye zararlı olabilecek çöp suyu kontrol altına alınmıştır ve oluşan çöp gazı enerji üretimi için kullanılmaktadır. Tesis genel olarak bakıldığında çevreye olan faydası ve Bayburt’un enerji ihtiyacının bir kısmını karşılaması, ekonomik ve sosyal yönden ne kadar önemli bir tesis olduğunu bize göstermektedir.

2.1.2.2. Yakma yöntemi

Katı atık bertaraf yöntemlerinden biri olan yakma yöntemi yanma tepkimesine girebilen atıklar için geçerlidir. Yanma işlemi için yeteri kadar ısı ve oksijen gerekmektedir. Yakma yönteminin temel amacı atıkların önemli ölçüde hacim kaybetmesini sağlamak ve yakma işlemi sırasında oluşacak ısı enerjiden faydalanmaktır. Atığın kalorifik değeri ve ortamdaki oksijen yeterliyse yakma işlemi için ekstra bir yakıt gerekmez (Aynur, 2011). Burada özellikle dikkat edilmesi gereken husus yakılan atığın ısı değeridir ve çevreye vereceği zararda dikkate alınmalıdır.

2.1.2.3. Kompostlama

Özellikle gıda ve bitki gibi organik katı atıkların bertarafı için kullanılan bir yöntemdir. Organik atıkların toprağın veriminin artması için besleyici bir gübre olarak kazandırılmasını hedef almaktadır. Topraktaki karbon ile azot miktarının yükselmesini ve doğanın bir parçası olan organik atıkların geri kazanılmasında önemli rol oynamaktadır. Kompostlaştırma işlemi yapılırken en önemli şey organik maddelerin oksijenle temasının kesilmemesidir. Kompostlaştırmanın diğer bir özelliği ise bu işlevlerin enzim yardımıyla gerçekleşmesidir (Nazilli, 2018).

2.2. ATIK ISI NEDİR

Atık ısı, çalışan mekanizmalarda enerji dönüşümü yapan sistemlerde genel olarak istenilmeyerek sürtünmeler ve yanmalar gibi olaylar sonucunda ortaya çıkan enerjidir. Neredeyse tüm sistemlerde yan ürün olarak çıkmaktadır. Bu atık ısı termodinamiğin temel kanunlarına göre enerji kaynağından daha düşük bir enerjiye sahiptir. Atık ısı gerekli çevrimler ve koşullar sağlanırsa sistemin verimliliğini artırarak tekrar sisteme dahil olabilir veya sistem dışı bir üretim yapılabilir (Karabakal, 2023).

Atık ısı geri kazanımı, literatürde "Waste Heat Recovery (WHR)" olarak sıkça karşımıza çıkan bir konudur. WHR sistemleri, Japonya'da 1970'lerde başlamış ve Çin'in 1990'larında devlet desteğiyle önemli bir gelişme göstermiştir. Özellikle çimento ve demir-çelik fabrikaları gibi yüksek ısı gereksinimi olan üretim tesislerinde, üretilen ısının önemli bir kısmı boşa harcanmaktadır. Bu atık ısı genellikle bacalar aracılığıyla atmosfere verilmektedir. WHR sistemleri ise bu atık ısıyı, sıcak su üretimi, elektrik enerjisi veya soğutma amaçları için değerlendirebilir. Atmosfere yayılan bu atık ısının kullanımıyla, çevre ve ekonomiye önemli katkılar sağlanmaktadır. Atık ısıyı geri kazanarak, enerjiyi verimli bir şekilde değerlendirirken çevresel etkiyi azaltmak mümkün olmaktadır. Ülkemizde özellikle çimento sektöründe, atık ısıyı değerlendirme projeleri ve yatırımları önemli ölçüde artmıştır. Bu projeler hem enerji tasarrufu sağlayarak hem de sera gazı salınımını azaltarak sürdürülebilir bir endüstriyel gelişmeyi teşvik etmektedir (Kılınç, 2016).

2.2.1. Atık Isı Değerlendirme Yöntemleri

Enerji verimliliğinin önemli bir parçası olan atık ısı geri kazanımı, işletme maliyetlerinin düşmesi ve karbondioksit emisyonunun azalmasının çok önemli bir parçasıdır. Atık ısı, yapılan çoğu üretim işleminden sonra geriye kalan ısı enerjisidir. Bu enerji genel olarak bir soğutma suyuna veya atmosfere direk olarak atılmaktadır. Bu atık ısı birden fazla kaynaktan üretilip geniş bir sıcaklık değeri arasında olabilir. Endüstriyel tesislerde bu atık ısıdan

faaydalanmak için birçok gelişmiş teknolojiler bulunmaktadır. Atık ısıyı genel olarak elektrik gücü, soğutma ve ısıtma olmak üzere faydalı enerji türlerine çevrilmektedir. rnek olarak elektrik enerjisi üretimi için ORC (Organik Rankine evrimleri), soğutma ve ısıtma için ısı eşanjörleri gibi sistemler kullanılmaktadır. Sonuç olarak değerlendirilen atık ısı hem karbondioksit salımın azaltılmasıyla çevreye fayda sağlamaktadır hem de geri kazanılan enerji tesise ekonomik fayda sağlamaktadır. Atık ısının sıcaklık değerinin ne kadar yüksek olursa geri dönüştürülmesi o kadar önemli olmaktadır (Oluleye vd., 2015).

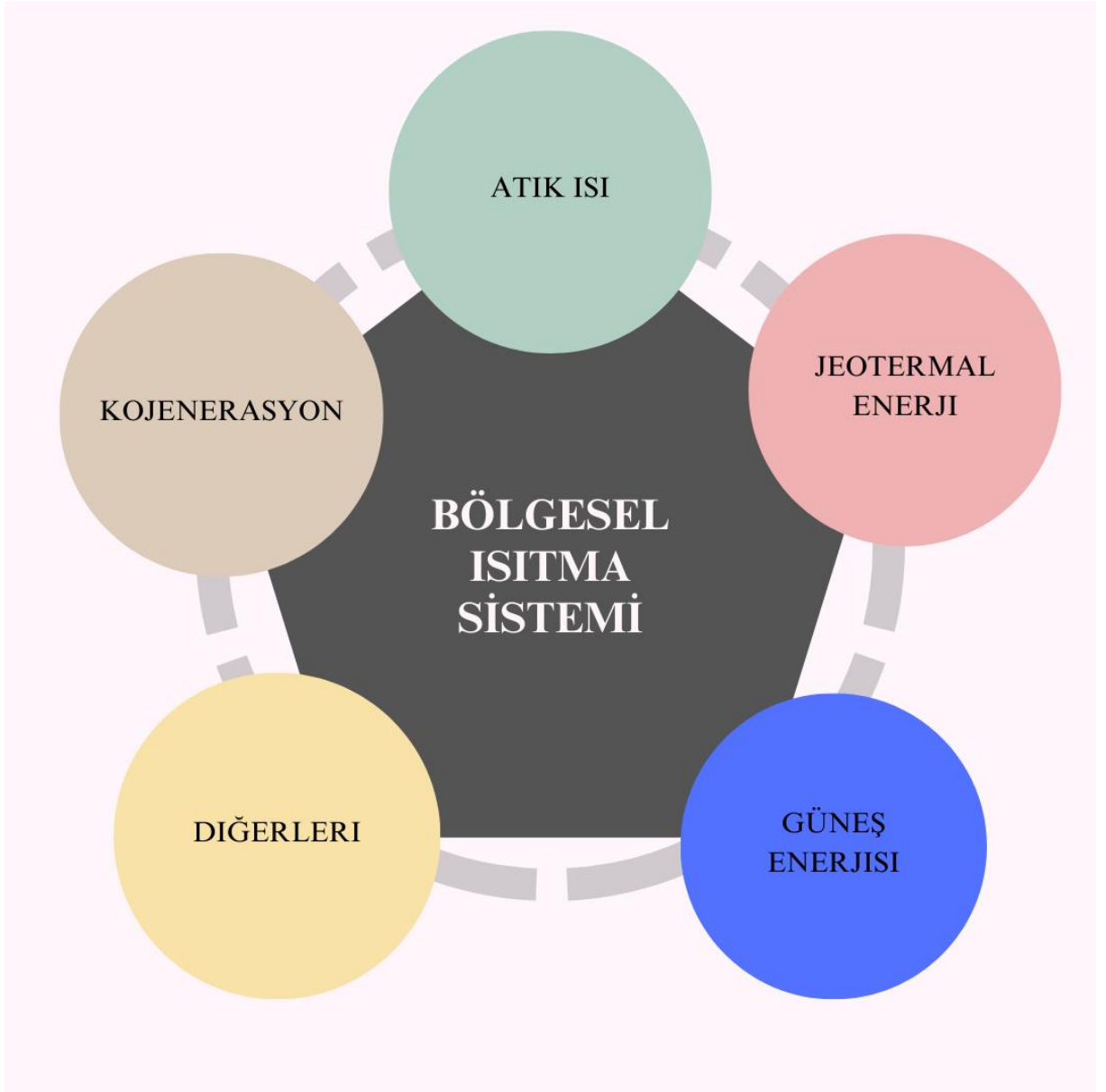
Motor, kazan ve fırın gibi çeşitli makinaların çalışması sonucunda oluşan atık ısıyı geri kazanmak aynı zamanda maliyetleri düşürmek için çeşitli yöntemler vardır. Atık ısıyı değerlendirme yöntemlerinin birkaçı Tablo 4’de verilmektedir.

Tablo 4: Atık Isıyı Değerlendirme Yöntemleri

Sıra	Atık Isıyı Değerlendirme Yöntemleri
1	Atık ısıdan elektrik retimi
2	Tekstil boya makineleri için ön ısıtma
3	Kurutma fırınları ve n kurutma sistemleri
4	Sera gibi çeşitli mekn ısıtmaları
5	Banyo suyu ısıtması
6	Bölgesel ısıtma sistemleri

2.3. BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ NEDİR

Bölgesel ısıtma sistemi, enerji kaynağı veya kaynakları tarafından üretilen ısının yalıtımlı malzemeler kullanılarak büyük ölçekli konut veya benzeri yapıların ısıtılması ve sıcak su ihtiyaının karşılanmasıdır. Bölgesel ısıtma sisteminin yöntemleri şekil 2’de gösterilmektedir. Bölgesel ısıtma sistemi genellikle kojenerasyon ve çöp yakma tesisleri veya endüstriyel tesislerin atık ısıları kullanılarak yapılmaktadır. Bunun yanı sıra güneş enerji ve jeotermal enerji kullanılarak da yapılmaktadır. Bölgesel ısıtma sistemi diğer ısıtma sistemlerine kıyasen daha az maliyetli, daha çok güvenilir ve daha çok evre dostu bir sistemdir (Pusat, 2010).



Şekil 2: Bölgesel Isıtma Sistemi Yöntemleri

2.3.1. Atık Isı ile Bölgesel Isıtma Sistemi

Bölgesel ısınma, herhangi bir yerleşkenin bir veya birkaç sistemle ısıtılmasıdır. Bu yerleşke bir apartman sitesi olabileceği gibi bir sokak veya şehirde olabilir. Üretim yapan tesislerde çıkan atık ısı ile gerekli sistem kurularak bölgesel bir ısıtma yapılabilir. Bu sayede tesislerin enerji verimliliği artacaktır. Doğaya salınan karbondioksit gibi zararlı maddeler azalacaktır. Yapılan bu sistemle ısınma maliyeti düşecek ekonomik olarak katkı sağlayacaktır (Çoban, 2011).

2.4. DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ

İlk olarak tarihte jeotermal sıcak sularla evlerin, seraların ve hamamların Roma döneminde ısıtıldığı bilinmektedir. Bölgesel ısıtmayı ilk ticari olarak kullanan 1877 de New York’ta Birdsill Holly olmuştur. Bunun yanında ilk çöp yakma tesisi 1903 de Danimarka’da kurulmuştur ve çöp yakma tesisinden elde edilen ısı bölgesel ısıtmada kullanılmıştır. Günümüzde Danimarka’nın %62’sini ısıtan gelişmiş bölgesel ısıtma sisteminin temeli olmuştur. Bölgesel ısıtma hakkında Türkiye’de ise ilk çalışmalar 1983 yılında Ege Üniversitesinde jeotermal kaynaklar üzerinden başlamıştır. Yapılan çalışmalarla beraber ilk jeotermal bölgesel ısıtma sistemi 1996 yılında İzmir’in Balçova ilçesinde kurulmuştur. Dünyada ve Türkiye’de bölgesel ısıtma sistemi kendini geliştirerek devam etmektedir (Kocamaz, 2020).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. YÖNTEM

Bu bölümde, ilk olarak termodinamik ve termoekonomik analizlerin temel kavramları hakkında bilgiler sunulmuştur. Ardından, enerji üreten tesisin gerçek verileri kullanılarak tesis şeması üzerinden termodinamik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, tesis üzerine bölgesel ısıtma sistemi entegre edilip, termodinamik ve termoekonomik analizler gerçekleştirilmiştir.

3.1. TERMODİNAMİK ANALİZ

Termodinamik analiz, enerji dönüşüm sistemlerinde sistemleri değerlendirmek için en önemli kıyaslama yöntemi olarak kabul görmektedir. Birinci ve ikinci yasa, bu tür analizlerin içinde özellikle dikkate alınması gereken ve sonuç elde etmekte önemli bir rol oynayan unsurdur. Bu iki yasanın sonuçları, değerlendirme kriterleri içerisinde enerji ve ekserji verimlilikleri ile ifade edilir. Termodinamik analiz gerçekleştirebilmek için gereken unsurlar sırasıyla kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri değerlendirilir (Çengel & Boles, 2000).

3.1.1. Kütle Korunum Denklemi

Bir sistemin kütle dengesini belirlerken öncelikle sistemin sınırlarını tanımlamak gerekmektedir. Eğer sistemde sınırlar sabitse, sistemin hacmi de belirlenmiş olur. Sistem içerisine giren ve sistemden çıkan bütün kütle miktarlarıyla sistem üzerinde etkili olan diğer faktörler (örneğin kimyasal reaksiyonlar) ve bu faktörlerin değişim oranları birbiriyle aynı olmalıdır. Bu şartların altında, herhangi bir zaman içerisinde bir sistemin genel kütle denge denklemi Denklem 1'deki gibi ifade edilebilir (Çengel & Boles, 2000):

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\varsigma + \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (1)$$

3.1.2. Enerji Denklemi

Termodinamikte, toplam enerji E olarak tanımlanır ve genişleyebilir özeliğindedir. Potansiyel enerji (PE), kinetik enerji (KE) ve iç enerji (U) olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. İç enerji, moleküllerin atomik yapılarına ve içsel hareketlerine bağlı bir enerji türüdür. Bu doğrultuda bir sistemdeki toplam enerji en basit hali ile Denklem 2'deki gibi ifade edilir (Çengel & Boles, 2000).

$$E = U + PE + KE \quad (2)$$

Bu denkleme bakarak sistemdeki enerji değişimini Denklem 3'deki gibi ifade edebiliriz (Çengel & Boles, 2000).

$$\Delta E_{sistem} = \dot{m} \Delta e_{sistem} = \dot{m} \left[\left(h_{\dot{c}} + \frac{1}{2} v_{\dot{c}}^2 + g z_{\dot{c}} \right) \right] - \dot{m} \left[\left(h_g + \frac{1}{2} v_g^2 + g z_g \right) \right] \quad (3)$$

Denklem 3'de yer alan e sistemin toplam özgül enerjini temsil etmektedir ve Denklem 4'deki gibi ifade edilmektedir (Çengel & Boles, 2000).

$$e = h + \frac{1}{2} v^2 + g z \quad (4)$$

Açık sistemlerde yani kütle giriş ve çıkışlarının olduğu sistemlerde ise enerji denklemi Denklem 5'deki gibi ifade edilmektedir (Çengel & Boles, 2000).

$$E_{açık sistem} : \sum_g \dot{m} \theta + \sum \dot{Q}_g + \sum \dot{W}_g = \sum_{\dot{c}} \dot{m} \theta + \sum \dot{Q}_{\dot{c}} + \sum \dot{W}_{\dot{c}} + \left[\frac{d(me)}{dt} \right] \quad (5)$$

Denklem 5'de bulunan $\left[\frac{d(me)}{dt} \right]$ ifadesi zamana bağlı olarak sistemin enerji değişim miktarını göstermektedir. Denklemdeki θ ifadesi ise iç enerji, potansiyel enerji, kinetik enerji ve akış işi gibi madenin toplam enerjisini temsil etmektedir ve Denklem 6'daki gibi açılabilir (Çengel & Boles, 2000).

$$\theta = u + P v + \left(\frac{1}{2} \right) v^2 + g z = h + \left(\frac{1}{2} \right) v^2 + g z \quad (6)$$

Entalpi (h) açık sistemlerde iç enerji ve akış işi toplamı olarak kullanılır. Sistemdeki akışkanın giriş ve çıkışındaki değişim aynı zamanda sistemdeki yükseklik farkı ihmal edilebilir düzeyde olduğunda açık sistemler için enerji denkliği Denklem 7'deki gibi ifade edilir (Çengel & Boles, 2000).

$$E_{açık sistem} : \dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} h = \dot{Q}_{\dot{c}} + \dot{W}_g + \sum_{\dot{c}} \dot{m} h + \left[\frac{d(me)}{dt} \right]_{sistem} \quad (7)$$

Sürekli akışa sahip sistemler için enerji korunumu denklemi, farklı bir formda yeniden düzenlenerek ifade edilebilir. Kararlı akış koşullarında, sistem sınırları içinde kütle birikimi veya kaybı meydana gelmez. Ayrıca, sürekli akışlı sistemlerde zamana bağlı olarak sistem üzerinde yapılan iş değişimi sıfır kabul edilir. Bu nedenle, enerji korunumu denklemi Denklem 8'de gösterildiği şekilde yazılabilir (Çengel & Boles, 2000).

$$E_{Sürekli akışlı sistem} : \dot{Q}_g + \dot{W}_g + \sum_g \dot{m} h = \dot{Q}_{\dot{c}} + \dot{W}_{\dot{c}} + \sum_{\dot{c}} \dot{m} h \quad (8)$$

3.1.3. Entropi Denklemi

Termodinamik bir sistemde entropi dengesi, sisteme giren entropi ile sistem içinde üretilen entropinin, sistemden çıkan entropi ve sistemdeki entropi değişimi toplamına eşit olduğu şeklinde tanımlanabilir ve bu eşitlik Denklem 9'daki gibi ifade edilir (Çengel & Boles, 2000).

$$\sum S_g + S_{\text{ürt}} = \sum S_{\text{ç}} + \Delta S_{\text{sistem}} \quad (9)$$

Entropi, bir sistem sınırından enerji transferi sırasında yalnızca madde akışı ve ısı transferi yoluyla taşınabilir, ancak iş transferi ile taşınması mümkün değildir. Denklem 9'da verilen sistemdeki entropi değişimi ise Denklem 10'daki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta S_{\text{sistem}} = S_1 - S_2 \quad (10)$$

$$dQ = TS \quad (11)$$

$$S_{1-2} = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (12)$$

Kütle giriş ve çıkışının olmadığı kapalı sistemlerde, entropi sadece ısı transferiyle iletilebilir bu sebeple entropi denklemi özel bir hal alır ve Denklem 13'deki gibi ifade edilir.

$$\sum_g \left(\int \frac{d\dot{Q}}{T} \right) + \dot{S}_{\text{ürt}} = d\dot{S}_{\text{sistem}}/dt + \sum_{\text{ç}} \left(\int \frac{d\dot{Q}}{T} \right) \quad (13)$$

Entropi hem kapalı hemde adyabatik sistemlerde ise transfer olmaz ve entropi denklemi şu şekilde ifade edilir.

$$\dot{S}_{\text{ürt}} = \frac{dS_{\text{sistem}}}{dt} \quad (14)$$

Bir sistemdeki entropi değişimi özgül entropiye bağlı olarak Denklem 15'deki gibi gösterilir. Entropi denklemi sistemin kütlesi sabit kaldığında ise Denklem 16'daki gibi ifade edilir. Buna bağlı olarak ise açık sistemdeki entropi denklemi ise Denklem 17'deki gibi ifade edilebilir.

$$dS_{\text{sistem}} = d(ms) \quad (15)$$

$$\Delta S_{\text{sistem}} = m_2 s_2 - m_1 s_1 \quad (16)$$

$$\sum_g \dot{m}s + \sum_g \int \frac{d\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{\text{ürt}} = \sum_{\text{ç}} \dot{m}s + \sum_{\text{ç}} \int \frac{d\dot{Q}}{T} + \left[\frac{dS}{dt} \right]_{CV} \quad (17)$$

Denklem 17'de alt indis olarak kullanılan CV , kontrol hacmini temsil etmektedir. Bu denklem, akış sabit olduğunda, kontrol hacmindeki özgül entropinin ve kütlenin zamanla değişmediğini göstermektedir. Bu nedenle, $S_{CV} = m_{CV} s_{CV}$ sabit bir değer alır ve sabit akış koşulları altında denklem yeniden ifade edilebilir:

$$\sum_g \int \frac{d\dot{Q}}{T} + \sum_g \dot{m}s + \dot{S}_{\text{ürt}} = \sum_{\text{ç}} \dot{m}s + \sum_{\text{ç}} \int \frac{d\dot{Q}}{T} \quad (18)$$

Denklem 18’de tek giriş ve çıkışlı bir kontrol hacmi için kütle dengesi oluşmaktadır ve $\dot{m}_g = \dot{m}_{\text{ç}} = \dot{m}$ şeklinde ifade edilirse Denklem 19’daki gibi sadeleştirilebilir.

$$\sum_g \int \frac{d\dot{Q}}{T} + \dot{m}(s_g - s_{\text{ç}}) + \dot{S}_{\text{ürt}} = \sum_{\text{ç}} \int \frac{d\dot{Q}}{T} \quad (19)$$

Yukarıda belirtilen koşullara birde sistemin adyabatik oluşu eklendiğinde, sistem sınırları boyunca ısı transferi gerçekleşmeyecek ve Denklem 20’deki gibi ifade edilebilecektir (Çengel & Boles, 2000).

$$\dot{m}s_g + \dot{S}_{\text{ürt}} = \dot{m}s_{\text{ç}} \quad (20)$$

3.1.4. Ekserji Denklemi

Ekserji denklemi, bir sistemin termodinamik açıdan enerji dönüşüm süreçlerini ve verimliliğini değerlendirmek için kullanılır. Enerjinin kullanılabilir kısmı ekserji olarak ifade edilir ve ekserji denklemi sistemdeki geri enerji akışlarını ele alarak geri döndürülebilirlikleri ve kayıpları belirler (Çengel & Boles, 2000).

$$\dot{E}x_D = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (21)$$

Alt indis 0 olduğunda çoğunlukla çevre şartlarını referans durumu olarak ifade eder. Ekserji tam olarak kullanılabilecek bir enerji veya kullanıma uygun bir iş potansiyeli olarak tanımlayabiliriz. Ekserji denklemi, sistemdeki tersinmezlikler yüzünden geri kazanılamayan en yüksek iş potansiyelini gösterip ve kaybolan ekserji terimini ifade eder. Tersinir bir sistemde, hiçbir ekserji kaybı oluşmaz aynı zamanda sistemin ürettiği tüm iş faydalı olabilir. Ekserji kaybı, entropi üretimi ve ölü hal sıcaklığı arasında direk bir ilişki bulunur. Bu ilişkide, $S_{gen} \geq 0$ koşulu için üç olası durum vardır. İlk durumda $\dot{E}x_d > 0$ için tersinmez sistemdir. İkinci durumda $\dot{E}x_d < 0$ için imkânsız sistemdir. Üçüncü durumda $\dot{E}x_d = 0$ için tersinir sistem olarak ifade edilir. Termodinamik bir sistemde, sisteme giren ekserji miktarı; sistemden çıkan toplam ekserji, sistemin ekserji içeriğindeki değişim ve ekserji kaybı ile dengede olmalıdır (Çengel & Boles, 2000).

Ekserji; kimyasal, fiziksel, potansiyel ve kinetik ekserjilerin toplamı oluşturmaktadır. Özgül akış ekserjisi ve ekserji akışı ile ilgili ilişkiler ise şu şekilde gösterilir:

$$\dot{E}x = \dot{E}x_F + \dot{E}x_{kN} + \dot{E}x_P + \dot{E}x_k \quad (22)$$

$$\psi = \psi_F + \psi_{kN} + \psi_P + \psi_K \quad (23)$$

Yukarıdaki denklemde F, K, P ve KN alt indisleri sırasıyla fiziksel, kimyasal, potansiyel ve kinetik ekserjiye karşılık gelmektedir. Sabit bir sistemde potansiyel ve kinetik enerjiler, yani ilişkili ekserjiler, sıfır olur. Ekserjinin tüm alt bileşenlerine dair tanımlar şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{E}x_F = \dot{m}\psi_F \quad (24)$$

$$\dot{E}x_P = \dot{m}g(Z_2 - Z_1) \quad (25)$$

$$\dot{E}x_K = \dot{m}\psi_K \quad (26)$$

$$\dot{E}x_{KN} = \frac{1}{2}\dot{m}(V_2^2 - V_1^2) \quad (27)$$

Kimyasal ve fiziksel ekserjiler aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$\psi_F = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (28)$$

$$\psi_K = \sum_i y_i \psi_i^{KN} + \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (29)$$

Denklem 29 ve 28’de h entalpiyi, s entropiyi, y mol kesrini ve $\bar{R}$ evrensel gaz sabitini temsil etmektedir. Genel olarak, bir sistemin verimliliği, sisteme sağlanan her birim girdi karşılığında elde edilen istenen çıktı miktarı olarak tanımlanabilir. Enerjetik verimlilik, termodinamiğin birinci yasasıyla bağlantılıdır. Bu sebeble, enerjetik verimlilik şu şekilde tanımlanabilir (Çengel & Boles, 2000):

$$\eta = \left(\frac{\text{yapılan iş}}{\text{toplam enerji}} \right) \quad (30)$$

$$\eta = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{LFG} q_{LHV}} \quad (31)$$

Ekserji verimliliği, kaynağı termodinamiğin ikinci yasasına dayandığı için, ikinci yasa verimliliği olarak da bilinir. Ekserji verimliliği sistemin cinsine göre değişik şekillerde ifade edilebilir, fakat genel olarak şu şekilde tanımlanabilir (Çengel & Boles, 2000):

$$\varepsilon = \left(\frac{\text{yararlanılan ekserji}}{\text{tüm ekserji}} \right) \quad (32)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\dot{W}_{net}}{\psi_g - \psi_c} \right) \quad (33)$$

Sistemin genel ekserji ve enerji verimliliğinin yanı sıra, ilgili sistemdeki tüm alt bileşenlerin cihaz verimlilikleri de önemli bir rol oynar. Bu cihaz verimliliklerinden en yaygın kullanılan türlerden biri, gerçek çalışma koşulunun adyabatik bir süreç olarak modellendiği ve ideal varsayımsal çalışma koşulunun ise tersinir adyabatik süreç (yani, izentropik süreç) olarak

kabul edildiği izentropik verimliliklerdir. Bir türbinin ve kompresör/pompanın izentropik verimlilikleri şu şekilde ifade edilebilir:

3.1.5. Türbin için İzentropik Verim

Burada izentropik verim, türbinin ürettiği gerçek işin izentropik süreçte üretebileceği işe oranı:

$$\eta_{\text{türbin}} = \frac{\omega_{\text{gerçek}}}{\omega_{\text{izentropik}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad (34)$$

Denklem 34’de h_1 türbin girişindeki entalpiyi, h_2 türbin çıkışındaki gerçek entalpiyi ve h_{2s} türbin çıkışındaki izentropik entalpi temsil etmektedir.

3.1.6. Kompresör veya Pompa için İzentropik Verim

Kompresör veya pompa için izentropik verim ($\eta_{k/p}$), şu şekilde ifade edilebilmektedir: gerçek süreçte harcanan işin, izentropik (adyabatik ve tersinir) süreçte harcanması gereken işe oranının tersidir. Kompresör veya pompa için izentropik verim aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\eta_{\text{kompresör/pompa}} = \left(\frac{\text{izentropik iş}}{\text{gerçek iş}} \right) \quad (35)$$

$$\eta_{\text{kompresör/pompa}} = \frac{\omega_{\text{izentropik}}}{\omega_{\text{gerçek}}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (36)$$

Burada izentropik iş ($h_{2s} - h_1$), izentropik süreçteki işi temsil etmektedir; gerçek iş ($h_2 - h_1$), gerçek süreçteki işi temsil etmektedir. Bu formül kompresör veya pompada kaybı olmayan (ideal) bir süreçte ne kadar verimle çalıştığını göstermektedir. Bu formüller termodinamik analizi yapılırken kullanılmaktadır. Tipik bir türbin, kompresör ve pompa için ekserji verimi ise şu şekilde ifade edilir:

$$\varepsilon_{\text{türbin}} = \frac{\omega_{\text{gerçek}}}{\omega_{\text{tersinir}}} = \frac{h_g - h_c}{h_g - h_c - T_0(s_g - s_c)} \quad (37)$$

$$\varepsilon_{\text{kompresör/pompa}} = \frac{\omega_{\text{tersinir}}}{\omega_{\text{gerçek}}} = \frac{h_g - h_c - T_0(s_g - s_c)}{h_g - h_c} \quad (38)$$

Burada ω_{tersinir} tersinir işi yani bir sistemin tersinir bir süreçte yaptığı maksimum veya minimum iş miktarını ifade etmektedir. Bununla beraber herhangi bir güç santralinde var olan bir ısı değiştiricisinin ekserji verimliliği, soğuk akışkan içerisindeki ekserji artışının, sıcak akışkan içerisindeki ekserji azalışına oranı ile ifade edilebilir:

$$\varepsilon_{\text{ısı değiştirici}} = \frac{(\dot{E}x_c - \dot{E}x_g)_{\text{soğuk}}}{(\dot{E}x_g - \dot{E}x_c)_{\text{sıcak}}} = \frac{\dot{m}_{\text{soğuk}}[h_c - h_g - T_0(s_c - s_g)]}{\dot{m}_{\text{sıcak}}[h_g - h_c - T_0(s_g - s_c)]} \quad (39)$$

Isı değiştiricinin ekserji verimi bulunurken burada $\dot{m}_{soğuk}$ ve $\dot{m}_{sıcak}$ sırasıyla soğuk ve sıcak akışkanın kütlesel debisini ifade etmektedir.

3.2. TERMOEKONOMİK ANALİZ

Mühendislikte ilgili herhangi bir sistemin konusunun başka bir sistemle karşılaştırılması, bilimsel verilere ve teknik açılardan ekonomik verilere dayalı kıyaslamalar yapılması, sürdürülebilirlik açısından günümüzde son derece kritik bir yere sahiptir ve çokça fayda sağlamaktadır. Bu bağlamda, tüm enerji üretim tesislerinde olduğu gibi, Bayburt ilinde yer alan ve bu tez çalışmasının konusu olan enerji üretim tesisinde ortaya çıkan atık ısının verimli bir şekilde kullanılması ve aynı zamanda ekonomik bir kazanç sağlanması, yapılan bu çalışmanın değerini artıracaktır. Bu sebeple, her bir sistem için termodinamik analiz yapmak yeterli olmaz. Her bir termodinamik sistemin termodinamik analizinin yanında ayrıca termoekonomik analizinin de yapılması gereklidir. Mühendislik ekonomisinin temel konusu, bütün sistemlerin maliyet analizlerini gerçekleştirmek ve bu analizler sonucunda elde edilen sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi olarak karşımıza çıkar (Güngör vd., 2024).

Herhangi bir projede, projenin toplam maliyeti için hesap yaparken sadece belirli bir zaman aralığını hesaba katmak veya sistemdeki giriş ve çıkışları doğrudan alıp toplamak, hiçbir proje maliyeti hesabı için yeterli olmayacaktır. Bu yüzden gerçekçi bir maliyet analizi için, sistemin kurulum aşaması, paranın bugüne karşılık olan değeri, işletmeye alındıktan sonra ne kadar süre çalışma sağlayacağı, yıllık onarıma ve bakıma ayrılan süreleri, sistemin kurulduğu bölgenin ekonomik parametreleri (faiz oranı, enflasyon vb.) göz önünde bulundurularak daha gerçekçi bir analiz yapılabilir (Özahi vd., 2018).

$$F = P(1 + i)^n \quad (40)$$

$$U = P \left[\frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \right] \quad (41)$$

$$F = U \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad (42)$$

Denklem 40, 41 ve 42’de paranın şu an ki değerine P , paranın gelecekteki değerine F , faiz oranına i , faiz oranının uygulanacağı dönem sayısını n ve dönem miktarını U olacak şeklinde ifade edilmektedir.

Bu eşitlik, termoekonomik analizler ve ikinci yasa temelinde yapılan ekserji analizinden elde edilen bilgileri geleneksel ekonomik değerlerle birleştirerek, ekserji ile doğrudan bağlantılı maliyet analizleri yapmamızı sağlar. Bu denklem hem ekonomik hem de enerji ile alakalı kriterleri dikkate alarak gerçekçi bir maliyet analizi yapmada çok etkili ve yaygın olarak

kullanılan bir yaklaşımdır. Gerçeklere dayanan bir maliyet analizi yapıldığı zaman, işletme sahipleri üretimde bulunan ürününün hammadde halinden son aşamasına kadar tesisin maliyet yapısına hâkim olabilir. Buna bağlı olarak üretim sistemindeki finansal parametreleri değerlendirerek önlemlerini alır ve rekabet içindeki pazarda yer bulabilir.

Herhangi bir tesisin termoekonomik analizi temelinde termodinamiğin ikinci yasasına dayanmaktadır. Bu makalede biyogaz enerji santrali termoekonomik analizi için özgül ekserji maliyetlendirme (SPECO) yöntemi uygun görülmüş ve uygulanmıştır. Özgül ekserji maliyetlendirme yani SPECO metodu, enerji santrallerinde veya herhangi bir termodinamik sürecin verimlilik oranlarını değerlendirmek için kullanılan metottur. SPECO metodu ekserji analizi yardımıyla enerji ve maliyet analizlerini birleştirmektedir. Mühendislikte, endüstriyel süreçlerde ve enerji üretim tesislerinde çokça kullanılan bir yöntemdir. SPECO yönteminde sistemde bulunan bütün enerji ve ekserji akışları belirlenir ve her alt bir elemanda bulunan ekserji etkileşimleri dikkate alınır. Herhangi bir alt elemana giren tüm ekserjiler ve çıkan tüm ekserjiler, sırasıyla yakıt (F) ve ürün (P) olarak isimlendirilir (Abusoglu & Kanoglu, 2009). Bununla beraber her bir alt bileşen için termoekonomik analiz yardımcı denklemleri şu şekilde ifade edilir:

$$\dot{C}_g = c_g \dot{E}_g = c_g (\dot{m}_g \psi_g) \quad (43)$$

$$\dot{C}_\varphi = c_\varphi \dot{E}_\varphi = c_\varphi (\dot{m}_\varphi \psi_\varphi) \quad (44)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (45)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}_q \quad (46)$$

$$\sum_\varphi (c_\varphi \dot{E}_\varphi)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}_{q,k} + \sum_g (c_g \dot{E}_g)_k + \dot{Z}_k \quad (47)$$

Burada c birim ekserji maliyetini ifade ederken, $\dot{C}$ ise ekserjiye bağlı maliyet oranını temsil etmektedir. Bu eşitlikler bize, herhangi bir sistemden çıkan toplam akımların mali değeri, o sistemi giren toplam ekserji akımlarının, işletme, bakım ve yatırım maliyetlerinin tamamına eşittir.

Toplam maliyet $\dot{Z}$ şeklinde gösterilir ve şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{Z} = \frac{(PEC * CRF * \varphi)}{(3600 * N)} \quad (48)$$

Denklem 48’de PEC, N, φ ve CRF sırasıyla satın alınan ekipman maliyeti, yıllık çalışma saatlerini, bakım katsayısı ve sermaye geri kazanım faktörünü ifade eder. PEC değerleri gerçek

ekonomik veriler ve farklı yaklaşımlar esas alınarak hesaplanır. Genellikle PEC değeri hesabı yapılırken, bir tesisin toplam sermaye maliyetini tahmin etmek için kritik bir gösterge olan Kimya Mühendisliği Tesis Maliyet Endeksi (CEPCI) kullanılır (Ozcan & Dinçer, 2017).

CRF (sermaye geri kazanım faktörü), faiz oranına (i) ve toplam ömrüne (n) bağlı olarak hesaplanır ve Denklem 49'daki gibi ifade edilir:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (49)$$

Genel maliyet oranı ise Denklem 50'deki gibi ifade edilir:

$$\dot{C}_p = \dot{C}_f + \dot{Z} \quad (50)$$

Denklem 50'de f ve p alt indisleri sırasıyla yakıtı ve ürünü temsil etmektedir. Bu sebeple SPECO yöntemi kullanılarak her alt bileşenin performansı hesaplanabilir. Ekserji kaybına bağlı olarak bir alt bileşenin maliyet akış oranı, tesisin geçmiş maliyet verileri kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplama, Denklem 51'deki gibi tanımlanan eksergoekonomik faktörün belirlenmesiyle gerçekleştirilir (Abusoglu & Kanoglu, 2009).

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{\dot{Z}_k + c_{f,k} \cdot \dot{E}x_{D,k}} \quad (51)$$

Denklem 51'de $c_{f,k}$ ve $\dot{E}x_{D,k}$ sırasıyla k bileşeni için yakıtın birim ekserji maliyetini ve k bileşeni için ekserji yıkım oranını temsil etmektedir. Görelî maliyet farkı r_k , termoekonomik analizde kullanılan diğer bir parametredir. Bu parametre bir bileşenin yakıt ile ömrü arasında bulunan birim ekserji başına ortalama maliyetteki görelî artışı göstermektedir (Büyükmurat, 2018). Görelî maliyet farkı r_k Denklem 52'deki gibi ifade edilir.

$$r_k = \frac{c_{p,k} - c_{f,k}}{c_{f,k}} \quad (52)$$

Denklem 52'de $c_{p,k}$, k alt bileşenine ait ürünün birim ekserji maliyetini göstermektedir. Sistem bileşenlerinin analizinde kullanılan önemli bir başka parametrede görelî maliyet farkıdır. Ekserji yıkımı maliyet oranı ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{D}_{D,k} = c_{f,k} * \dot{E}x_{D,k} \quad (53)$$

Literatürdeki tüm teorik ve uygulamalı termoekonomik çalışmalar, bakım faktörünün genellikle 1,06 olarak kabul edildiğini göstermektedir (Tozlu vd., 2016). Belirlenen ekonomik sabitler Tablo 5'de sunulmuştur.

Tablo 5: Ekonomik Sabitler

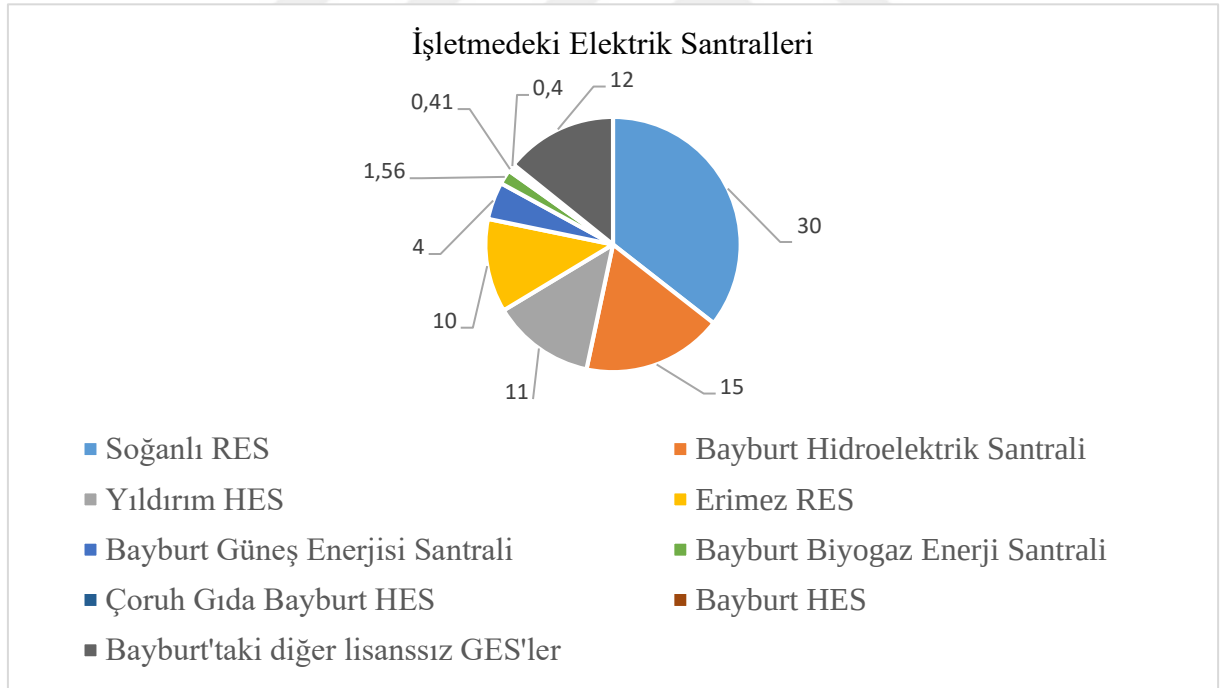
Yıllık çalışma süresi (N)	8040 saat
Toplam ömür (n)	30 yıl
Faiz oranı (i)	%15
Bakım faktörü (φ)	1,06
Sermayenin geri dönüş süresi (CRF)	$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. SİSTEM TANITIMI

4.1. BAYBURT'TA ELEKTRİK ÜRETİM KAPASİTESİ

Bayburt, Türkiye'nin Doğu Karadeniz bölgesinde yer alan yaklaşık 86.000 nüfusa ve 2.705 km² yüz ölçümüne sahip bir şehridir. Bu şehirde kişi başına yıllık elektrik tüketimi Türkiye istatistik kurumu (TÜİK) tarafından 1286 kWh olarak tespit edilmiştir (TÜİK, 2021). Son yıllarda Türkiye genelinde yapılan enerji yatırımları Bayburt'ta da önemli bir ivme kazanmıştır. Bayburt, geri dönüşüm tesisleri ve yenilenebilir enerji projeleriyle son dönemde öne çıkan şehirlerden biri olma yolundadır. Bayburt'taki bazı özel firmalar enerji üretimi amacıyla güneş enerjisi santralleri, rüzgâr enerjisi santralleri, hidroelektrik ve biyokütle kaynaklarından yararlanmaktadır. Şekil 3'de, bu enerji üretim tesislerinin kurulu güç kapasitelerinin dağılımı verilmiştir (Enerji Atlası, 2024). Görüldüğü üzere, Bayburt Biyogaz Enerji Üretim Tesisi 1,56 MW kurulu gücü ile Bayburt'un toplam kurulu gücünün %1,85'ini oluşturmaktadır.



Şekil 3: 2024 Bayburt İli Elektrik Üretimi (MW) Dağılımı

4.2. BAYBURT BİYOGAZ ENERJİ SANTRALİ OPERASYONEL SÜRECİ

Bu aşamada, Bayburt Biyogaz Enerji Santrali'ne çevre belediyelerden ve Bayburt Belediyesi'nden gelen atıkların geri dönüşüm ve enerji üretim süreçleri ayrıntılı olarak ele alınacaktır. 31.000 metrekare açık alan ve 500 metrekare kapalı alana inşa edilen bu tesisin açık

alanının %70'i atıklarla doldurulmuştur. Söz konusu tesis, Bayburt'ta ortalama 5.000 hanenin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Tesis 24 saat kesintisiz çalışmakta olup, arıza durumlarına karşı vardiya sistemi uygulanmaktadır. Devlet denetiminde bir taşeron firma tarafından işletilen tesiste, iş sağlığı ve güvenliği kapsamında metan, hidrojen sülfür gibi yanıcı ve patlayıcı gazlara karşı acil tahliye ve yangın söndürme sistemleri bulunmaktadır. Tesisin temel amacı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırarak hava kirliliğini azaltmak, gelecek nesillere daha temiz ve yaşanabilir bir çevre bırakmak; ayrıca ülkemizin enerji ihtiyacını azaltarak atık miktarını düşürmek ve ekonomik fayda sağlamaktır.

Bayburt-Gümüşhane İlleri Yerel Yönetimleri Katı Atık Tesisleri Yapma ve İşletme Birliği (BAY-GÜ-KAB) bünyesinde 2019 yılında yapımına başlanmış, 2020 yılında kurulmuştur. Bayburt düzenli katı atık depolama tesisinin dış görünüşü Şekil 4'de verilmiştir.



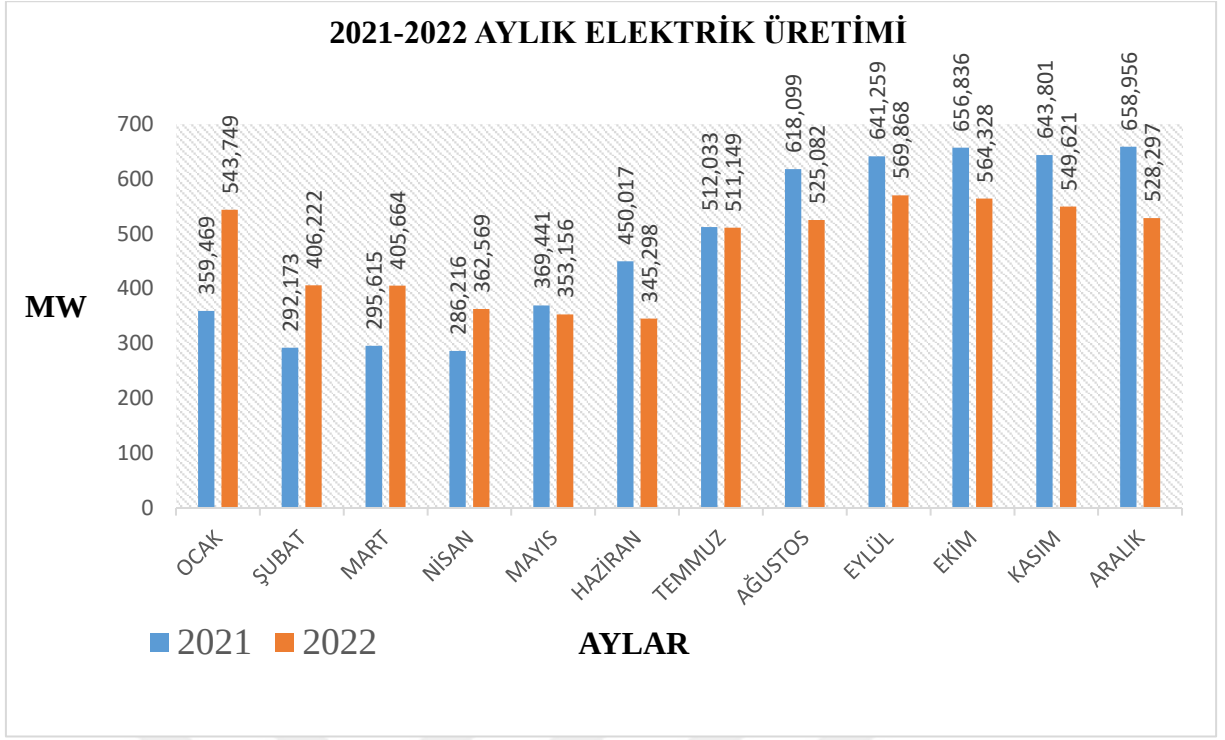
Şekil 4: Bayburt Düzenli Katı Atık Depolama Tesis

Tesis kuruluşunda depolama alanı altına membran serilmiştir. Bu membran sayesinde çöpün çevreye olan zararı azaltılmıştır ve üretilmek istenilen depo gazı verimliliği artırılmıştır. Her çöp katmanından önce yatayda borulama yapılmaktadır. Bu borular özel olarak hazırlanmaktadır ve boru üzerlerinde gazı çekmek için çok fazla delikler mevcuttur. Yatay borulamadan sonra filtre görevi için çakıllarla boru üzeri kapatılmaktadır. Her katman çöp ile doldurulduktan sonra killi toprakla izolasyon yapılmaktadır. Her yatay borulama ucunda iki vana bulunmaktadır. İlk olan vana depo gazı oranı ölçümü için bulunmaktadır. İkincisi ölçülen orana göre açılmaktadır ve bu sayede sisteme gaz çekilmektedir. Sisteme çekilen depo gazı 5000 metre küplük tank içinde depolanmaktadır. Bu tank içinden depo gazı düzenli olarak çekilip yakmadan önce ayrıştırılmaktadır. Ayrıştırılan depo gazı 1,56 MW gücünde 16 silindirli motorda yakılmaktadır. Motorda üretilen güç 2 MW'lık trafoya oradan da şehir hattına verilmektedir.

Bu tesiste depolanan çöpten yılda ortalama 2.000.000 metre küp depo gazı çıkmaktadır. Bu sayede yıllık ortalama 5000 MW elektrik üretimi yapılmaktadır. Bayburt'ta yaklaşık 5.000

hanenin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Bayburt düzenli katı atık tesisinin şematik görünümü Şekil 5'deki gibidir.

Şekil 5: Bayburt Düzenli Katı Atık Depolama Tesisinin Şematik Görünümü



Şekil 6: BAY-GÜ-KAB Tesisinin 2021 ve 2022 Yılı Aylık Elektrik Üretimi (MW)

4.2.1. Tesiste Çöp Ayrıştırma

Bayburt düzenli katı atık tesisine düzenli olarak günlük ortalama 21 anlaşımlı olduğu belediyeden 100-150 ton arası çöp gelmektedir. Gelen çöpler ilk işlem yeri olan ayrıştırma alanında ayrıştırılmaktadır. Tesise gelen çöplerin yaklaşık %7'lik kısmı geri dönüştürülebilir atık olarak ayrıştırılmaktadır. Bu geri dönüştürülebilir atık kısmını kâğıt, cam, plastik, pet ve metal gibi atıklar oluşturmaktadır. Geriye kalan organik atıklar, tekstil atıkları, çocuk bezi, porselen ve kimyasal atıklar gibi atıklarda sahada düzenli olarak depolanmaktadır. Tesisin katı atık ayrıştırma bölümü Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Katı Atık Ayrıştırma Bölümü

4.2.2. Tesiste Çöp Depolama ve Depo Gazı Üretimi

Ayrıştırmadan gelen geri dönüştürülemeyen çöpler düzenli bir şekilde gömülmektedir. Çöp tesisin gömme sahası altında özel membran bulunmaktadır. Çöp gömme alanı etrafında çöp suyunun toprağa karışmaması için kanallar bulunmaktadır. Gömme işlemi yapılmadan önce yatayda %1-2 derecelik eğimle, 200 milimetre çapında çöp suyuna dayanıklı polietilen borular yerleştirilmektedir. Bu polietilen boru üzerinde sahadan gazı çekebilmek için 1 santimetre çapında matkap ile delikler açılmaktadır. Borular yerleştirildikten sonra çakıllar ile üzeri kapatılmaktadır. Çöplerde yerleştirildikten sonra killi toprak ile saha üzeri kapatılmaktadır. Killi toprak izolasyonu aynı zamanda saha içerisine oksijen girmemesini sağlamaktadır. Şu anda tesiste toplamda 44 adet yatayda boru bulunmaktadır ve saate ortalama 250 metreküp depo gazı sahadan çekilmektedir. Katı atık depolama sahası ve sahada kullanılan polietilen boru Şekil 8’de verilmiştir.



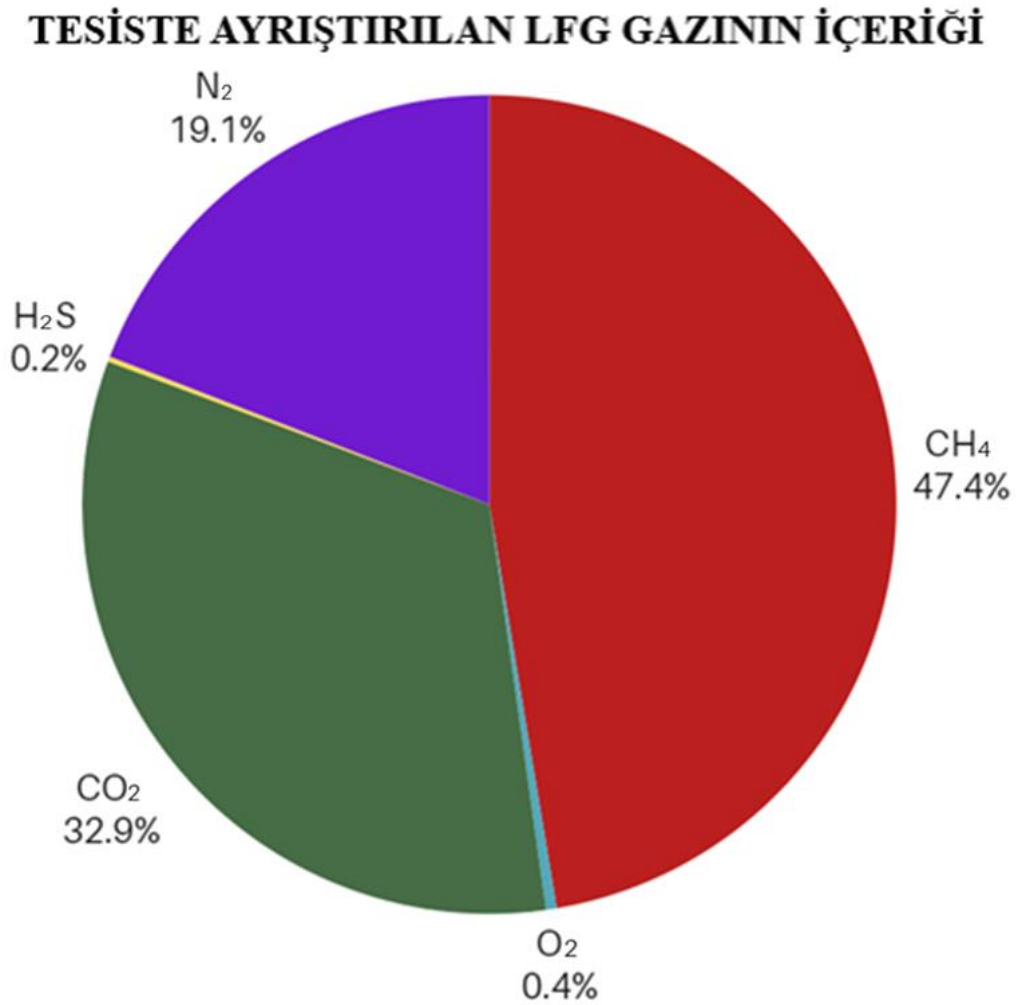
Şekil 8: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Katı Atık Depolama Sahası ve Kullanılan Borular

4.2.3. Tesiste Depo Gazı Ayrıştırma ve Güç Üretimi

Depo gazı içerisinde yaklaşık olarak %50-60 metan, %35-40 karbondioksit, %3-10 azot ve %1 oksijen gibi diğer gazlar vardır. Saha üzerinde bulunan 44 adet yataydaki delikli 200 milimetre çapındaki polietilen borular içerisindeki metan oranı saatlik ölçülmektedir. Metan gazı yeterli seviyelere geldiğinde vanaları oranına göre açılmaktadır. Açılan vanalardan 250 milimetre çapındaki polietilen boru sayesinde çift motorlu booster sahadan gazı balon şeklindeki tanka çekmektedir. Bu depolama sırasında gaz oranları sürekli olarak ölçülmektedir. Booster ve gaz oran ölçümü Şekil 9’da verilmiştir. Tesis içerisindeki sahadan çıkan ortalama gaz değerleri ise Şekil 10’daki grafikte verilmiştir.



Şekil 9: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Bulunan Booster ve Gaz Oran Ölçümü



Şekil 10: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Ayrıştırılan LFG Gazının İçeriği

Çekilen gaz ilk olarak çift katmanlı balon şeklinde olan tankta tutulmaktadır. Bu tankın kapasitesi 5.000 metreküptür. Tankın yoğunlaşma gideri vardır ve tankın dış katmanına

gerektiğinde kompresör yardımıyla hava basılmaktadır. Tankın görünümü Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Bulunan Gaz Depolama Tankı

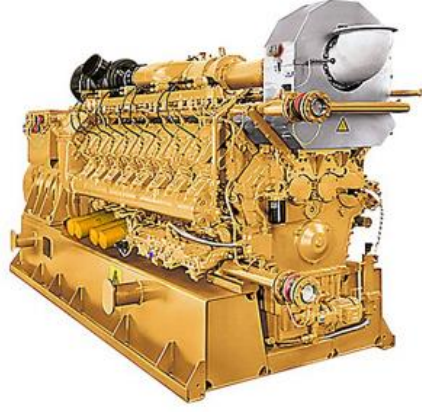
Tank içinde depolanan gaz motora gitmeden önce kurutma sistemine girmektedir. Burada yoğunlaştırma işlemi yapılır. Hidrojen sülfür gibi istenilmeden oluşan zehirli gazlar ayrıştırılır. Ardından 4 zamanlı 16 silindirli 1,56 MW gücünde gaz motoru tarafından yakılır. Gaz motorunun 431 santigrat derece sıcaklıkta egzoz gazı bulunmaktadır. Gaz motoru yaz aylarında neredeyse 24 saat kış aylarında ise günün yaklaşık 12 saati çalışmaktadır. Motor verileri anlık olarak takip edilmektedir ve Tablo 6’de örnek olarak verilmiştir. Motor tarafından üretilen güç trafoya sonrasında da şehir elektrik şebekesine verilmektedir.

Tablo 6: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Bulunan Gaz Motorunun Anlık Takip Verileri

Yanma Odası	A Tarafı	B Tarafı
Silindir 1	379 °C	373 °C
Silindir 2	380 °C	374 °C
Silindir 3	370 °C	384 °C
Silindir 4	369 °C	297 °C
Silindir 5	381 °C	372 °C
Silindir 6	373 °C	320 °C
Silindir 7	383 °C	388 °C
Silindir 8	425 °C	407 °C
Karşılaştırma yeri	52,1 °C	46,9 °C
Ortalama değer	376 °C	-
Karbüratör	-631 steps	-
Emiş havası	24,3 °C	-
Alıcı	63,5 °C	-

4.3. GAZ MOTORUNUN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Bayburt biyogaz enerji santralinde elde edilen metan gazı yakıt olarak kullanılmaktadır bu sayede enerji üretimi sağlanmaktadır. Metan gazını yakarak tesiste elektrik üretimi yapan CAT CG170-16 tip motoru, 4 zamanlı, v tipi, tersinmez, ara soğutmalı bir gaz motorudur. Şekil 12’de CAT CG170-16 tip motorunun şematik görünümü ve teknik özellikleri verilmiştir.



Motor Hızı	1500	<i>rpm</i>
Silindir çapı	170	<i>mm</i>
Silindir yüksekliği	195	<i>mm</i>
Motor hacim	71	<i>dm³</i>
Sıkıştırma oranı	14	-
Silindir	V-tipi	-
Silindir sayısı	16	-
Dönme yönü	Saat	-
Ortalama piston	9,8	<i>m/s</i>
Ortalama yağ	0,15	

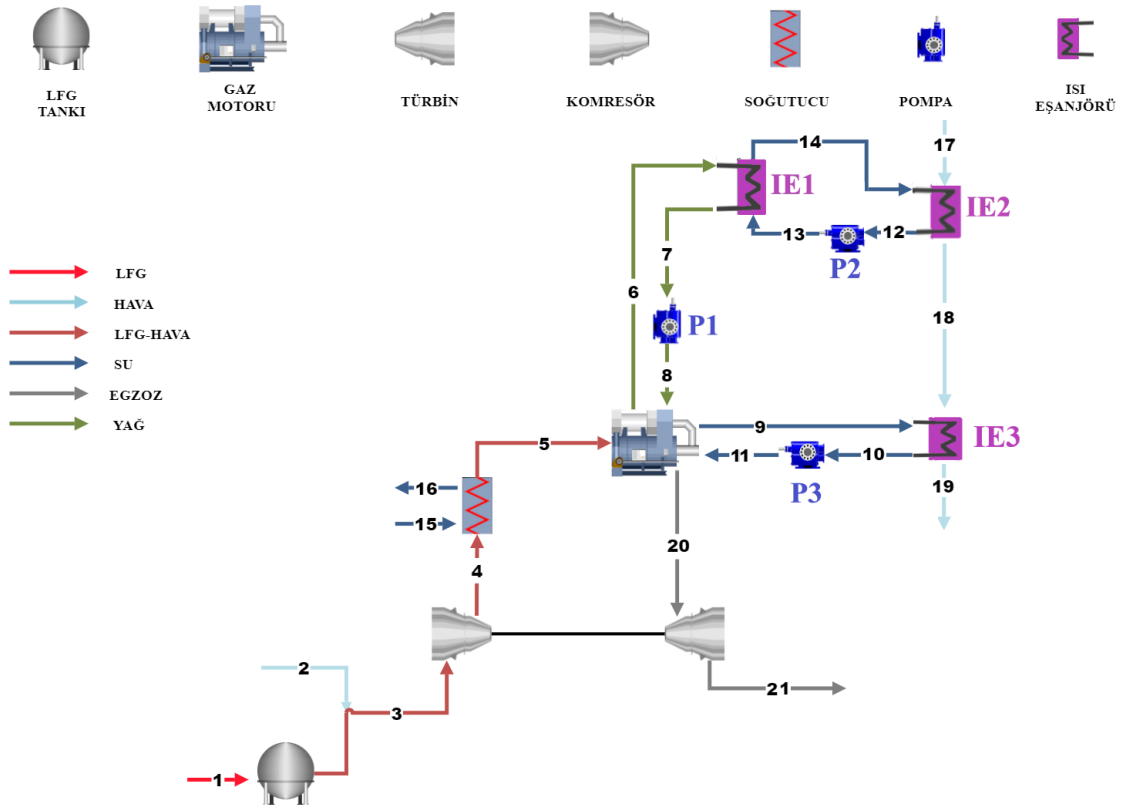
Şekil 12: CAT CG170-16 Tip Motorunun Şematik Görünümü ve Teknik Özellikleri

BEŞİNCİ BÖLÜM

5. BULGULAR

5.1. BAY-GÜ-KAB TESİSİN TERMODİNAMİK ANALİZİ

BAY-GÜ-KAB bünyesinde elektrik üretiminde kullanılan CAT CG170-16 tipi motorun motor odasının şematik gösterimi, gerçek veriler temel alınarak hazırlanmış ve Şekil 13'de sunulmuştur. Bu şematik gösterim oluşturulurken, bire bir gerçek verilere dayanılmış ve termodinamik analiz Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor odası tank (1 adet), kompresör (1 adet), soğutucu (1 adet), CAT CG170-16 gaz motoru (1 adet), ısı eşanjörü (3 adet; IE 1-3), pompa (3 adet; P 1-3) ve türbinden (1 adet) oluşmaktadır. Burada, kompresör ve türbin turboşarj ünitesinin bir parçası olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple hava ve egzoz gazları tüm analiz durumlarında ideal gaz olarak kabul edilmiştir.



Şekil 13: Motor Odasının Şematik Gösterimi

Ölü durumda, yani referans koşullarda, su, hava, yağ ve LFG için sıcaklık 20 °C ve basınç 1 bar olarak alınmıştır. Sistem içerisindeki tüm alt birimler kararlı durum koşullarında çalışmaktadır. Ayrıca potansiyel ve kinetik enerji değişimleri sıfır kabul edilmiştir. Termodinamik sonuçlara geçmeden önce, aşağıda motor odasının çalışma prensibi kısaca açıklanacaktır.

40 °C sıcaklıkta depolanan LFG gazı (1 durumu), 20 °C sıcaklıkta bulunan hava (2 durumu) ile birleştirilerek 2,181 kg/s debiye, 25 °C sıcaklık ve 1 bar basınca sahip yeni bir LFG karışımı oluşturmaktadır (3 durumu). Ardından, 25 °C sıcaklık ve 1 bar basınç koşullarında kompresöre giren LFG gazının kompresör çıkışında basıncı 1,101 bar, sıcaklığı ise 70 °C'ye yükselir (3-4 durumu). Kompresörden çıkan LFG gazı, motorun yanma odasına ulaşmadan önce, su soğutmalı bir ara soğutucudan geçerek sıcaklığı tekrar 25 °C'ye düşürülmektedir (5 durumu). Soğutucu içerisinde daimî akışta 1,5 bar basınca sahip 20 °C sıcaklıkta giren su, 46 °C sıcaklıkta soğutucu içerisinden çıkmaktadır (15-16 durumu). LFG gazının yanma odasına girmeden önce soğutulmasının amacı, sıcaklık artışı ile meydana gelebilecek yoğunluk azalmasını en aza indirerek motora giren oksijen ve yakıt oranını artırmak ve böylece motorun verimliliğini yükseltmektir.

Gaz motorunda sürtünmeyi azaltmak ve motorun ideal çalışma koşullarını sağlamak amacıyla, 4,84 bar basınç ve 70-100 °C sıcaklıkta yağ sirkülasyonu sağlanmaktadır (6-8 durumu). Bu yağlama sirkülasyonunu gerçekleştiren 2,626 kW gücünde pompa (P1) çalışmaktadır. Motor içerisinde bulunan 900 litre yağ, motor içinde ortalama 100 °C sıcaklığa ulaştıktan sonra ısı eşanjörü (IE1) aracılığıyla soğutulmakta ve sıcaklığı yaklaşık 70 °C'ye düşürülmektedir (6-7 durumu). Yağın soğutulmasının iki temel amacı vardır: ilki, yağın kimyasal özelliklerini kaybetmeden uygun sıcaklık aralığında kalmasını sağlamak, ikincisi ise motorun çalışma sıcaklığını dengede tutmaktır.

Isı eşanjörü (IE1) içerisine giren yağ, sabit 1,3 bar basınç ve 49,7 °C sıcaklıkla giren ve 55,3 °C sıcaklıkla çıkan su tarafından soğutulmaktadır (13-14 durumu). Bu eşanjördeki soğutma suyu, başka bir ısı eşanjörü (IE2) yardımıyla, 55,3 °C sıcaklıktan tekrar soğutularak 49,3 °C'ye düşürülmektedir (14-12 durumu). Bu soğutma işlemi, 12,61 kW gücündeki sirkülasyon pompası (P2) aracılığıyla gerçekleştirilir.

Gaz motorunun iç sıcaklığını dengelemek ve motoru belirli çalışma sıcaklık aralıklarında tutmak amacıyla, 2,05 bar basınçta ve 85-100 °C sıcaklık aralığında soğutma suyu, 7,581 kW gücünde bir pompa (P3) ile sirküle edilmektedir (10-11 durumu). Motor içerisine 89,9 °C sıcaklıkta giren soğutma suyu, motor içinde ısındıktan sonra 96,7 °C sıcaklıkta çıkış yapmaktadır (11-9 durumu). Isınmış su, bir başka ısı eşanjörüne (IE3) 96,7 °C sıcaklıkta girerek soğutulur ve sıcaklığı 89,78 °C'ye düşürülür (9-10 durumu).

Isı eşanjörüne (IE2) giren yağ soğutma suyu ile ısı eşanjörüne (IE3) giren motor soğutma suları sırayla atmosferik hava ile soğutulmaktadır. 20 °C sıcaklıkta ısı eşanjörüne (IE2) giren hava, 31,5 °C sıcaklıkta çıkarak diğer ısı eşanjörüne (IE3) girer ve en son 45 °C sıcaklıkla atmosfere bırakılır (17-18-19 durumu).

Son olarak, motor içinde yakıtın yanması sonucunda turboşarj bölümünde bulunan türbinde 1450 kW güç üretilmektedir. Türbine giren, yanma sonucu oluşmuş 483 °C sıcaklığındaki gaz (20 durumu), 431 °C sıcaklığa düşerek egzoz gazı olarak atmosfere atılmaktadır (21 durumu).

Tablo 7’de BAY-GÜ-KAB tesisinin termodinamik analizinde kullanılan tüm bağlantılar sunulmuştur. Tablo 8’de ise, Tablo 7’de belirtilen bağlantılar kullanılarak Şekil 13’de gösterilen motor odasındaki tüm durumların termodinamik özellikleri sıralanmıştır.

Tablo 7: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Termodinamik Analizi İçin Bağlantılar

$\Sigma \dot{m}_g = \Sigma \dot{m}_\zeta$	$\dot{m}$; kütleli debi	$\dot{E}x_{net}$; net ekserji miktarı
$\dot{Q} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_\zeta h_\zeta - \Sigma \dot{m}_g h_g$	g ; giriş, ζ ; çıkış	ψ ; özgül akış ekserji
$\dot{E}x_{net} - \dot{W} = \Sigma \dot{m}_\zeta \psi_\zeta - \Sigma \dot{m}_g \psi_g + \dot{E}x_D$	$\dot{E}x$; ekserji oranı	s ; entropi
$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$	$\dot{Q}$; net ısı transferi miktarı	T ; sıcaklık
$\dot{E}x = \dot{m}\psi$	$\dot{W}$; net iş	0 ; ölü hal
$\dot{W}_{net} = \dot{m}_{wf} [(h_{t,g} - h_{t,\zeta}) - (h_{p,\zeta} - h_{p,g})]$	$\dot{W}_{net}$; net güç	h ; entalpi
$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{wf} (h_g - h_\zeta)$	$\dot{Q}_{in}$; iş akışkanına giren net ısı miktarı	
$\eta = \left(\frac{\text{yararlı iş}}{\text{sağlanan enerji}} \right) = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}}$	η ; enerji verimi	

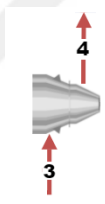
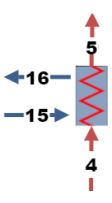
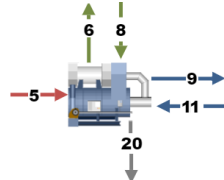
Tablo 8: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Termodinamik Özellikleri ve Ekserjileri

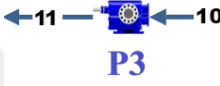
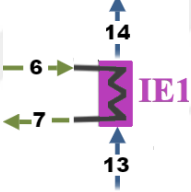
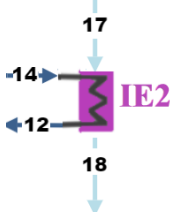
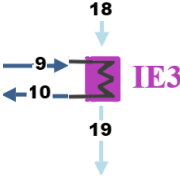
Hal	Akışkan	T (°C)	P (bar)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	ψ (kJ/kg)	$\dot{E}x$ (kW)
0	Hava	20	1	-	293,5	5,682	-	-
0'	Su	20	1	-	83,93	0,2962	-	-
0''	Yağ	20	1	-	83,07	0,3091	-	-
0'''	LFG	20	1	-	-142,7	5,901	-	-
1	LFG	40	1,085	0,175	-5113	8,487	26204	4586
2	Hava	20	1	2,006	293,5	5,682	0	0
3	LFG	25	1	2,181	-137,5	5,919	32,72	71,37
4	LFG	70	1,101	2,181	-90,17	6,039	44,95	98,04
5	LFG	25	1,101	2,181	-133,6	5,903	41,33	90,14
6	Yağ	100	4,84	6,445	243,4	0,7906	19,14	123,4
7	Yağ	69,8	4,74	6,445	179,3	0,6117	7,481	48,21
8	Yağ	70	4,84	6,445	179,7	0,6129	7,537	48,57
9	Su	96,7	2,05	15	405,2	1,269	36,02	540,3
10	Su	89,78	2,038	15	376,1	1,19	30,2	452,9
11	Su	89,9	2,05	15	376,6	1,191	30,29	454,4

12	Su	49,5	1,3	15	207,3	0,6972	5,85	87,75
13	Su	49,7	1,35	15	208,2	0,6998	5,932	88,98
14	Su	55,3	1,35	15	231,6	0,7717	8,268	124
15	Su	20	1,5	0,74	83,97	0,2962	0,05009	0,03706
16	Su	46	1,5	0,74	192,7	0,6516	4,605	3,407
17	Hava	20	1	26,77	293,5	5,682	0	0
18	Hava	31,5	1	26,77	305,1	5,721	0,2124	5,684
19	Hava	45	1	26,77	318,7	5,765	0,9869	26,42
20	Egzoz gazı	483	1	2,181	774,3	6,659	194,3	423,8
21	Egzoz gazı	431	1	2,181	718	6,582	160,6	350,4

Şekil 13'de gösterilen BAY-GÜ-KAB tesisinin motor odası şemasında yer alan tüm alt bileşenlerin kütle, enerji ve ekserji dengelerine ait termodinamik formüller Tablo 9'da sunulmaktadır.

Tablo 9: BAY-GÜ-KAB Tesisinde Gerçekleştirilen Termodinamik Analizde Kullanılan Enerji ve Ekserji Denklemleri

Ekipman	Şematik gösterimi	Termodinamik bağıntılar
Kompresör		$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{LFG}$ $\dot{W}_{kompresör,a} = \dot{m}_3(h_4 - h_3)$ $\dot{W}_{kompresör,s} = \dot{m}_3(\psi_4 - \psi_3)$ $\dot{E}x_{D,kompresör} = \dot{W}_{kompresör,a} - \dot{W}_{kompresör,s}$ $\varepsilon_{kompresör} = \frac{\dot{W}_{kompresör,s}}{\dot{W}_{kompresör,a}}$
Soğutucu		$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_{LFG}$ $\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} = \dot{m}_{su}$ $\dot{m}_4(h_4 - h_5) = \dot{m}_{15}(h_{16} - h_{15})$ $\dot{E}x_{D,soğutucu} = \dot{m}_4(\psi_4 - \psi_5) - \dot{m}_{15}(\psi_{16} - \psi_{15})$ $\varepsilon_{soğutucu} = \frac{\dot{m}_4(\psi_4 - \psi_5)}{\dot{m}_{15}(\psi_{16} - \psi_{15})}$
Gaz motoru		$\dot{m}_5 = \dot{m}_{20}$ $\dot{E}x_{F,Gaz\ motoru} = 1450\ kW$ $\dot{E}x_{p,Gaz\ motoru} = \dot{E}x_{20} - \dot{E}x_5$ $\dot{E}x_{D,Gaz\ motoru} = \dot{E}x_{F,Gaz\ motoru} - \dot{E}x_{p,Gaz\ motoru}$ $\varepsilon_{Gaz\ motoru} = \frac{\dot{E}x_{F,Gaz\ motoru}}{\dot{E}x_{p,Gaz\ motoru}}$

Pompa (Yağ)		$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_{yağ}$ $\dot{W}_{pompa(1),a} = \dot{m}_7(h_8 - h_7)$ $\dot{W}_{pompa(1),s} = \dot{m}_7(\psi_8 - \psi_7)$ $\dot{E}x_{D,pompa(1)} = \dot{W}_{pompa,a} - \dot{W}_{pompa,s}$ $\varepsilon_{pompa(1)} = \frac{\dot{W}_{pompa,s}}{\dot{W}_{pompa,a}}$
Pompa (Su)		$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_{su}$ $\dot{W}_{pompa(2),a} = \dot{m}_{12}(h_{13} - h_{12})$ $\dot{W}_{pompa(2),s} = \dot{m}_{12}(\psi_{13} - \psi_{12})$ $\dot{E}x_{D,pompa(2)} = \dot{W}_{pompa,a} - \dot{W}_{pompa,s}$ $\varepsilon_{pompa(2)} = \frac{\dot{W}_{pompa,s}}{\dot{W}_{pompa,a}}$
Pompa (Su)		$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{su}$ $\dot{W}_{pompa(3),a} = \dot{m}_{10}(h_{11} - h_{10})$ $\dot{W}_{pompa(3),s} = \dot{m}_{10}(\psi_{11} - \psi_{10})$ $\dot{E}x_{D,pompa(3)} = \dot{W}_{pompa,a} - \dot{W}_{pompa,s}$ $\varepsilon_{pompa(3)} = \frac{\dot{W}_{pompa,s}}{\dot{W}_{pompa,a}}$
Isı eşanjörü (Yağ-Su)		$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14} = \dot{m}_{su} ; \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_{yağ}$ $\dot{m}_{13}(h_{14} - h_{13}) = \dot{m}_6(h_6 - h_7)$ $\dot{E}x_{D,ısı eşanjörü(IE1)} = \dot{m}_6(\psi_6 - \psi_7) - \dot{m}_{13}(\psi_{14} - \psi_{13})$ $\varepsilon_{ısı eşanjörü(IE1)} = \frac{\dot{m}_{13}(\psi_{14} - \psi_{13})}{\dot{m}_6(\psi_6 - \psi_7)}$
Isı eşanjörü (Su-Hava)		$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} = \dot{m}_{hava} ; \dot{m}_{14} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{su}$ $\dot{m}_{17}(h_{18} - h_{17}) = \dot{m}_{12}(h_{14} - h_{12})$ $\dot{E}x_{D,ısı eşanjörü(IE2)} = \dot{m}_{12}(\psi_{14} - \psi_{12}) - \dot{m}_{17}(\psi_{18} - \psi_{17})$ $\varepsilon_{ısı eşanjörü(IE2)} = \frac{\dot{m}_{17}(\psi_{18} - \psi_{17})}{\dot{m}_{12}(\psi_{14} - \psi_{12})}$
Isı eşanjörü (Su-Hava)		$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19} = \dot{m}_{hava} ; \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{su}$ $\dot{m}_{18}(h_{19} - h_{18}) = \dot{m}_9(h_9 - h_{10})$ $\dot{E}x_{D,ısı eşanjörü(IE3)} = \dot{m}_9(\psi_9 - \psi_{10}) - \dot{m}_{18}(\psi_{19} - \psi_{18})$ $\varepsilon_{ısı eşanjörü(IE3)} = \frac{\dot{m}_{18}(\psi_{19} - \psi_{18})}{\dot{m}_9(\psi_9 - \psi_{10})}$

Türbin



$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21} = \dot{m}_{egzoz}$$

$$\dot{W}_{türbin,a} = \dot{m}_{20}(h_{20} - h_{21})$$

$$\dot{W}_{türbin,s} = \dot{m}_{20}(\psi_{20} - \psi_{21})$$

$$\dot{E}x_{D,türbin} = \dot{W}_{türbin,s} - \dot{W}_{türbin,a}$$

$$\varepsilon_{türbin} = \frac{\dot{W}_{türbin,a}}{\dot{W}_{türbin,s}}$$

Alt ekipmanların tümüne ait ekserji ve enerji sonuçları Tablo 10’da sunulmuştur. Turboşarj sistemine ait ekipmanlardan kompresör ve türbinin ekserji verimleri sırasıyla %25,84 ve %59,82 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, sistemde önemli ölçüde ekserji kayıpları olduğunu göstermektedir. Ayrıca, tesisin genel ekserji ve enerji verimleri sırasıyla %59,29 ve %42,71 olarak bulunmuştur. Tablodan görüldüğü üzere, sistemde en yüksek ekserji verimine sahip alt ekipman türbin, en düşük ekserji verimine sahip alt ekipman ise pompa (P2) olarak belirlenmiştir. Gaz motoru ve soğutucu ekserji verimleri ise sırasıyla %23,01 ve %42,66 olarak bulunmuştur.

Tablo 10: Alt Ekipmanların Ekserji ve Enerji Analizi

Ekipman	$\dot{Q}(kW)$	$\dot{W}(kW)$	$\dot{E}x_F(kW)$	$\dot{E}x_P(kW)$	$\dot{E}x_D(kW)$	$\varepsilon(\%)$
Kompresör	-	103,24	103,24	26,68	76,56	25,84
Soğutucu	94,67	-	7,9	3,37	4,53	42,66
Gaz motoru	-	1450	1450	333,6	1116	23,01
Pompa 1	-	2,625	2,625	0,358	2,267	13,65
Pompa 2	-	12,6	12,6	1,225	11,38	9,718
Pompa 3	-	7,58	7,58	1,474	6,107	19,44
Isı eşanjörü 1	413,2	-	75,13	35,04	40,09	46,64
Isı eşanjörü 2	363,9	-	36,27	5,684	30,59	15,67
Isı eşanjörü 3	436,8	-	87,32	20,73	66,59	23,74
Türbin	-	73,4	122,7	73,4	49,3	59,82
Tesisin enerji verimi						42,71
Tesisin ekserji verimi						59,29

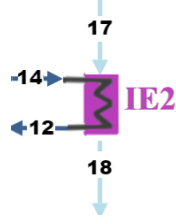
5.2. BAY-GÜ-KAB TESİSİNİN TERMOEKONOMİK ANALİZİ

Kapsamlı termoeconomik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için, BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santralinin alt bileşenlerine ait ekonomik veriler ile işletme bilgileri santralden temin edilmiştir. Santraldeki tüm alt bileşenlerin ekserji maliyet oranı dengesi ve kullanılan ilgili yardımcı denklemler Tablo 11’de sunulmuştur. Her bir alt bileşen için yardımcı denklemler, yakıt ve ürün prensipleri esas alınarak oluşturulmuştur.

Tablo 11: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Termoekonomik Analizinde Her Bir Alt Bileşen için Kullanılan Ekserji Maliyet Oranı Dengesi ve İlgili Yardımcı Denklemler

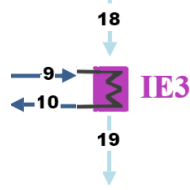
Ekipman	Şematik gösterimi	Termoekonomik bağıntılar	Yardımcı denklemler
Kompresör		$c_{ec}\dot{W}_{kompresör} + \dot{Z}_{kompresör}$ $= c_4\dot{E}x_4 - c_3\dot{E}x_3$	$c_3 = c_4$
Soğutucu		$c_4\dot{E}x_4 + c_{15}\dot{E}x_{15} + \dot{Z}_{soğutucu}$ $= c_5\dot{E}x_5 + c_{16}\dot{E}x_{16}$	$c_4 = c_5$ $c_{15} = c_{16}$
Gaz motoru		$c_5\dot{E}x_5 + c_8\dot{E}x_8 + c_{11}\dot{E}x_{11} + \dot{Z}_{Gaz\ motoru}$ $= c_{20}\dot{E}x_{20} + c_9\dot{E}x_9 + c_6\dot{E}x_6$	$c_6 = c_8$ $c_9 = c_{11}$
Pompa (Yağ)		$c_e\dot{W}_{pompa\ 1} + \dot{Z}_{pompa\ 1} = c_8\dot{E}x_8 - c_7\dot{E}x_7$	—
Pompa (Su)		$c_e\dot{W}_{pompa\ 2} + \dot{Z}_{pompa\ 2}$ $= c_{13}\dot{E}x_{13} - c_{12}\dot{E}x_{12}$	—
Pompa (Su)		$c_e\dot{W}_{pompa\ 3} + \dot{Z}_{pompa\ 3}$ $= c_{11}\dot{E}x_{11} - c_{10}\dot{E}x_{10}$	$c_{10} = c_{11}$
Isı eşanjörü (Yağ-Su)		$c_{13}\dot{E}x_{13} + c_6\dot{E}x_6 + \dot{Z}_{ısı\ eşanjörü\ 1}$ $= c_{14}\dot{E}x_{14} + c_7\dot{E}x_7$	$c_6 = c_7$ $c_{13} = c_{14}$

Isı eşanjörü (Su-Hava)



$$c_{14}\dot{E}x_{14} + c_{17}\dot{E}x_{17} + \dot{Z}_{\text{ısı eşanjörü 2}} = c_{12}\dot{E}x_{12} + c_{18}\dot{E}x_{18} \quad c_{17} = 0$$

Isı eşanjörü (Su-Hava)



$$c_{18}\dot{E}x_{18} + c_9\dot{E}x_9 + \dot{Z}_{\text{ısı eşanjörü 3}} = c_{19}\dot{E}x_{19} + c_{10}\dot{E}x_{10} \quad c_9 = c_{10}$$

Türbin



$$c_{20}\dot{E}x_{20} + \dot{Z}_{\text{türbin}} = c_e\dot{W}_{\text{türbin}} + c_{21}\dot{E}x_{21} \quad -$$

Tesiste görevli mühendisler tarafından gerçek ekonomik veriler toplanmıştır. Bu veriler arasında yer alan satın alma maliyeti (PEC), tesisin toplam maliyetini belirlemede kritik bir öneme sahiptir. Tesisteki her bir alt ekipmanın PEC değerleri, Tablo 12'de sunulmuştur. PEC değerleri, tesisin inşasında kullanılan ekipmanların gerçek maliyetlerini yansıtmaktadır. Ayrıca sistem tam yükte çalıştırıldığında 1 aylık bakım zamanı çıkarıldığında yaklaşık olarak yılda 8040 saat ve 30 yıl süreyle çalıştırılacağı ön görülmektedir. Bu veriler ışığında satın alınan ekipman maliyeti (PEC), ilk sermaye yatırımı (CI) ve işletme bakım maliyeti (OM) arasında ki bağlantı işletme süresi göze alınarak hesaplanıp Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12: BAY-GÜ-KAB Tesisinin Satın Alınan Ekipman Maliyeti (PEC), İlk Sermaye Yatırımı (CI) ve İşletme Bakım Maliyeti (OM)

Ekipman	PEC ($\times 10^3$ \$)	z_k^{CI} (\$/h)	z_k^{OM} (\$/h)	z_k^T (\$/h)
Booster	190	23,63	4,73	28,36
Sülfür tutucu	16	1,99	0,40	2,39
LFG tankı	48	5,97	1,19	7,16
Kompresör	44,77	5,57	1,11	6,68
Soğutucu	54	6,72	1,34	8,06
Gaz motoru	236,51	29,42	5,88	35,3
Pompa 1	12,09	1,50	0,3	1,8
Pompa 2	12,09	1,50	0,3	1,8
Pompa 3	12,09	1,50	0,3	1,8

Isı eşanjörü 1	20,27	2,52	0,5	3,03
Isı eşanjörü 2	20,27	2,52	0,5	3,03
Isı eşanjörü 3	20,27	2,52	0,5	3,03
Türbin	44,77	5,57	1,11	6,68
Diğer tesis ekipmanları	221,14	27,5	5,5	33,01
Toplam Satın Alma Ekipman Maliyeti (PEC)	952,27	118,44	23,69	142,13

Şekil 13'te gösterilen BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santralinin durumu, numaralandırılmış akış noktalarına göre değerlendirilmiştir. Santraldeki her akışın ekserji akış hızları ($\dot{E}x$), maliyet akış hızları ($\dot{C}$) ve birim ekserji maliyetleri (c) Tablo 13'de sunulmuştur.

Tablo 13: BAY-GÜ-KAB Tesisindeki Her Akışın Ekserji Akış Hızları, Maliyet Akış Hızları ve Birim Ekserji Maliyetleri

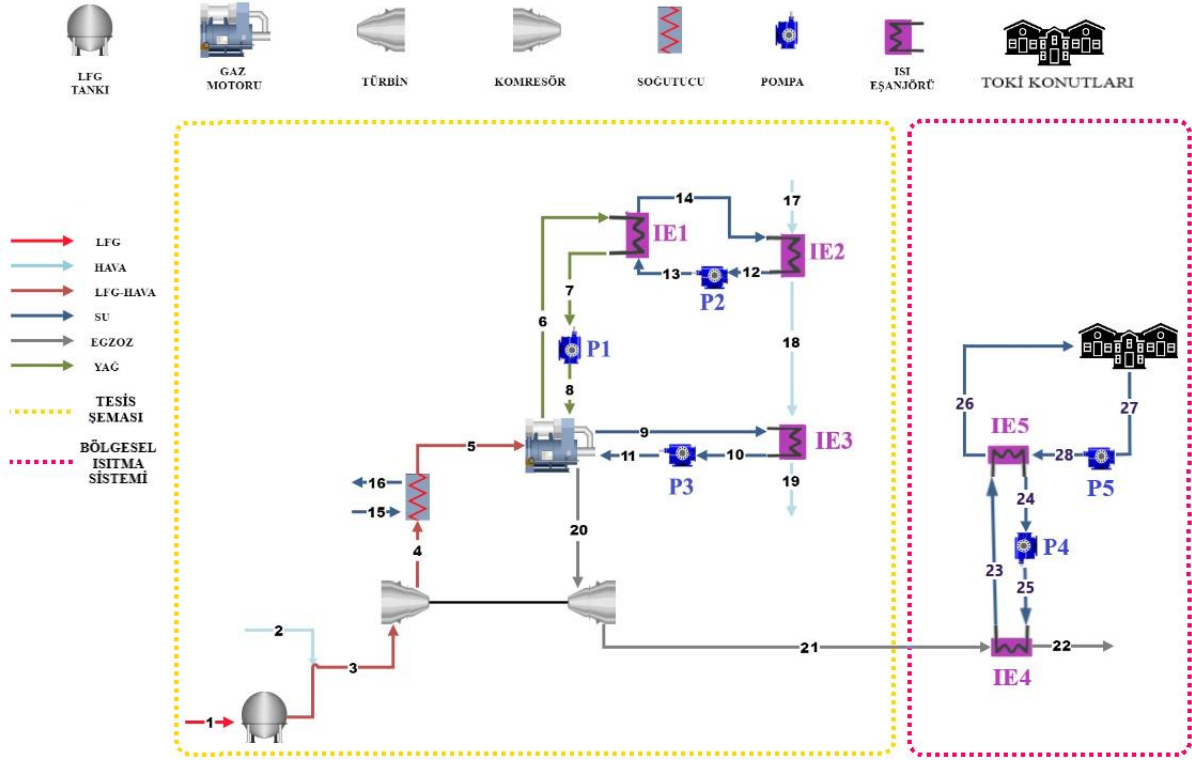
Hal	Akışkan	$\dot{E}x$ (kW)	$\dot{C}$ (\$/h)	c (\$/Gj)
1	LFG	4586	41,12	2,491
2	Hava	0	0	0
3	LFG	71,37	42,09	163,8
4	LFG	98,04	57,82	163,8
5	LFG	90,14	53,16	163,8
6	Yağ	123,4	88,86	200,1
7	Yağ	48,21	34,73	200,1
8	Yağ	48,57	34,99	200,1
9	Su	540,3	1,043	0,5364
10	Su	452,9	0,8746	0,5364
11	Su	454,4	0,8774	0,5364
12	Su	87,75	138,1	437,3
13	Su	88,98	138,5	432,2
14	Su	124	193	432,2
15	Su	0,03706	0,06316	473,3
16	Su	3,407	5,806	473,3
17	Hava	0	0	0
18	Hava	5,684	55,26	2700
19	Hava	26,42	55,83	587,1

20	Egzoz gazı	423,8	3,871	2,538
21	Egzoz gazı	350,4	4,049	3,21

BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santralinin ekserji akış hızları, maliyet akış hızları ve birim ekserji maliyetlerinin belirlenmesinin ardından, tesisin atık ısını kullanacak şekilde planlanan bölgesel ısıtma sistemi için termodinamik ve termoeconomik analizler başlatılmıştır. Bu analizlerin ve yapılan tüm tasarımların, tesisin mevcut gerçek verileri temel alınarak gerçekleştirildiği ifade edilmiştir.

5.3. BAY-GÜ-KAB BİYOGAZ ENERJİ SANTRALİNİN ATIK ISISI İLE TASARLANAN BÖLGESEL ISITMA SİSTEMİ

Bu bölümde, tasarımı yapılan bölgesel ısıtma sistemine ait termodinamik ve termoeconomik analizler ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Sistemin giriş verileri, tesisin gerçek çalışma koşullarından ve ölçümlerinden elde edilen veriler kullanılarak hazırlanmıştır. Bu durum, analiz sonuçlarının ve tasarımın doğruluğunun ve uygulanabilirliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santralinin atık egzoz gazının yeniden değerlendirilmesiyle geliştirilen bölgesel ısıtma sistemi, enerji verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliği artırmayı hedefleyen bir yaklaşım sunmaktadır. Bölgesel ısıtma sistemi şablonu, sistemin bileşenlerinin ve işleyişinin daha iyi anlaşılması amacıyla Şekil 14'de sunulmuştur. Bölgesel ısıtma sisteminin tasarımı hem enerji tasarrufu sağlamak hem de çevresel etkileri en aza indirmek için önemli bir adım olarak değerlendirilir. Termodinamik ve termoeconomik analizler, sistemin verimliliği, maliyet etkinliği ve işletme performansı hakkında detaylı bilgiler sağlamaktadır.



Şekil 15: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modeli Şematik Görünümü

5.3.1. Bölgesel Isıtma Modeli Termodinamik Analizi

Bu bölümde, bölgesel ısıtma modelinin termodinamik analizi gerçekleştirilecektir. İlk olarak, tasarlanan modelin kısa bir açıklaması yapılacaktır. Daha önceki bölümlerde Şekil 13'de gösterilen tesis şemasının çıkışındaki egzoz gazına, ek olarak bir bölgesel ısıtma modeli eklenmiştir. Bu modele giren, 431°C sıcaklıktaki egzoz gazı, ilk olarak ısı eşanjörü (IE4) içerisine girmektedir (durum 21). Egzoz gazı, 6 bar basınçtaki ısıtma suyunu $63,02^{\circ}\text{C}$ 'den 126°C 'ye yükselttikten (durum 25-23) sonra, 85°C sıcaklıkla atmosfere atılmaktadır (durum 22).

Isı eşanjöründe (IE4) ki su, sirkülasyon pompası (P4) yardımıyla diğer ısı eşanjörü (IE5) arasında dolaşım yapmaktadır (durum 24-25). Bu aşamada, 3,5 bar basınç ve $58,02^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki soğuk su, ısı eşanjöründen (IE5) geçerek 70°C sıcaklığa kadar ısınmaktadır (durum 28-26). 70°C dereceye kadar ısıtılan su, 3,5 bar basınç altında, TOKİ konutları içerisinde sirkülasyon pompası (P5) aracılığıyla dolaştırılmaktadır. Böylece, BAY-GÜ-KAB tesisindeki atık ısının kullanımıyla bir bölgesel ısıtma modeli oluşturulmuştur. Bu bölgesel ısıtma sistemine ait termodinamik denklemler Tablo 14'de sunulmuştur.

Tablo 14: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modeline Ait Termodinamik Denklemler

Ekipman	Şematik gösterim	Termodinamik eşitlikler
Isı eşanjörü 4		$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22} = \dot{m}_{egzoz} ; \dot{m}_{23} = \dot{m}_{25} = \dot{m}_{su}$ $\dot{m}_{21}(h_{21} - h_{22}) = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{25})$ $\dot{E}x_{D,(IE4)} = \dot{m}_{21}(\psi_{21} - \psi_{22}) - \dot{m}_{23}(\psi_{23} - \psi_{25})$ $\varepsilon_{(IE4)} = \frac{\dot{m}_{23}(\psi_{23} - \psi_{25})}{\dot{m}_{21}(\psi_{21} - \psi_{22})}$
Pompa 4		$\dot{m}_{24} = \dot{m}_{25} = \dot{m}_{su}$ $\dot{W}_{pompa(4),a} = \dot{m}_{24}(h_{25} - h_{24})$ $\dot{W}_{pompa(4),s} = \dot{m}_{24}(\psi_{25} - \psi_{24})$ $\dot{E}x_{D,pompa(4)} = \dot{W}_{pompa,a} - \dot{W}_{pompa,s}$ $\varepsilon_{pompa(4)} = \frac{\dot{W}_{pompa,s}}{\dot{W}_{pompa,a}}$
Isı eşanjörü 5		$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{26} = \dot{m}_{su} ; \dot{m}_{23} = \dot{m}_{24} = \dot{m}_{su}$ $\dot{m}_{28}(h_{26} - h_{28}) = \dot{m}_{23}(h_{23} - h_{24})$ $\dot{E}x_{D,(IE5)} = \dot{m}_{23}(\psi_{23} - \psi_{24}) - \dot{m}_{28}(\psi_{26} - \psi_{28})$ $\varepsilon_{(IE5)} = \frac{\dot{m}_{28}(\psi_{26} - \psi_{28})}{\dot{m}_{23}(\psi_{23} - \psi_{24})}$
Pompa 5		$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{28} = \dot{m}_{su}$ $\dot{W}_{pompa(5),a} = \dot{m}_{27}(h_{28} - h_{27})$ $\dot{W}_{pompa(5),s} = \dot{m}_{27}(\psi_{28} - \psi_{27})$ $\dot{E}x_{D,pompa(5)} = \dot{W}_{pompa,a} - \dot{W}_{pompa,s}$ $\varepsilon_{pompa(5)} = \frac{\dot{W}_{pompa,s}}{\dot{W}_{pompa,a}}$

BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santralinden çıkan egzoz gazı, bölgesel ısıtma sistemine entegre edilmiştir. Bu entegre sistemin tüm alt bileşenleri için enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sırasında, Engineering Equation Solver (EES) yazılımı kullanılmıştır ve modeldeki tüm alt bileşenlerin enerji ve ekserji sonuçları Tablo 16'da sunulmuştur. Ayrıca, sistemdeki akışkanların termodinamik özellikleri ve ekserji değerleri Tablo 15'te detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu kapsamlı analizler, sistemin performans değerlendirmesini ve enerji verimliliğini ortaya koymak için yapılmıştır.

Tablo 15: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modelindeki Akışkanların Termodinamik Özellikleri ve Ekserji Değerleri

Hal	Akışkan	$T (^{\circ}C)$	$P (bar)$	$\dot{m} (kg/s)$	$h (kJ/kg)$	$s (kJ/kg.K)$	$\psi (kJ/kg)$	$\dot{E}x (kW)$
0	Hava	20	1	-	293,5	5,682	-	-
0'	Su	20	1	-	83,93	0,2962	-	-
21	Egzoz gazı	431	1	2,181	718	6,582	160,6	350,4
22	Egzoz gazı	85	1,5	2,181	359	5,767	40,42	88,15

23	Su	126	6	2,509	529,6	1,592	65,84	165,2
24	Su	63	3	2,509	263,9	0,8685	12,23	30,67
25	Su	63,02	6	2,509	264,3	0,8686	12,53	31,45
26	Su	70	3,5	11,3	293,3	0,9547	16,28	184,1
27	Su	58	1,5	11,3	242,9	0,8059	9,538	107,8
28	Su	58,02	3,5	11,3	243,2	0,8061	9,747	110,2

Tablo 16: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modelindeki Alt Bileşenlerin Enerji ve Ekserji Değerleri

Ekipman	$\dot{Q}(kW)$	$\dot{W}(kW)$	$\dot{E}x_F(kW)$	$\dot{E}x_P(kW)$	$\dot{E}x_D(kW)$	$\varepsilon(\%)$
Isı eşanjörü 4	783,2	-	262,3	133,8	128,5	51,01
Pompa 4	-	0,844	0,844	0,782	0,062	92,65
Isı eşanjörü 5	666,6	-	134,53	73,91	60,62	54,94
Pompa 5	-	2,856	2,856	2,362	0,494	82,7

Bölgesel ısıtma sisteminin ekserji ve enerji verimleri ise sırasıyla Denklem 54 ve 55 kullanılarak %38,17 ve %42,51 olarak hesap edilmiştir.

$$\eta_{bölgesel\ ısıtma\ sistemi} = \frac{\dot{m}_{23}(h_{23}-h_{25})}{\dot{m}_{21}h_{21}} \quad (54)$$

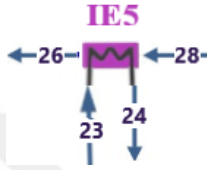
$$\varepsilon_{bölgesel\ ısıtma\ sistemi} = \frac{\dot{m}_{23}(\psi_{23}-\psi_{25})}{\dot{m}_{21}\psi_{21}} \quad (55)$$

Modellemesi yapılan bölgesel ısıtma sistemi, BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santraline entegre edildiğinde, tesisin enerji verimliliği %42,71'den %62,32'ye, ekserji verimliliği ise %59,29'dan %64,76'ya yükseldiği, EES (Engineering Equation Solver) programı kullanılarak hesaplanmıştır. Enerji ve ekserji verimliliklerindeki bu artış, santral için büyük bir öneme sahiptir, çünkü daha yüksek verimlilik hem enerji tüketiminin azalmasına hem de çevresel etkilerin en aza indirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu iyileşme, tesisin sürdürülebilirliğini artırarak, enerji üretim süreçlerinin daha verimli ve çevre dostu hale gelmesini sağlamaktadır.

5.3.2. Bölgesel Isıtma Modeli Termoekonomik Analizi

Bir sistemin termoekonomik analizinin yapılabilmesi için, sistemdeki her alt bileşen için termoekonomik denklemlerin ve ilgili yardımcı eşitliklerin tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle, herhangi bir sistemin termoekonomik analizine başlamadan önce, tüm alt bileşenler için bu denklemlerin ve yardımcı eşitliklerin belirlenmesi önem taşımaktadır (Özahi vd., 2021). Tasarlanan bölgesel ısıtma modeline ilişkin gerekli eşitlikler, Tablo 17'da sunulmuştur. Bu denklemler, sistemin performansını ve ekonomik verimliliğini değerlendirmede temel teşkil eder.

Tablo 17: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Modeli için Termodinamik Bağlantılar ve Yardımcı Denklemler

Ekipman	Şematik gösterimi	Termoekonomik bağlantılar	Yardımcı denklemler
Isı eşanjörü 4		$c_{21}\dot{E}x_{21} + c_{25}\dot{E}x_{25} + \dot{Z}_{\text{ısı eşanjörü 4}}$ $= c_{22}\dot{E}x_{22} + c_{23}\dot{E}x_{23}$	$c_{21} = c_{22}$
Pompa 4		$c_{e2}\dot{W}_{pompa\ 4} + \dot{Z}_{pompa\ 4} = c_{25}\dot{E}x_{25} - c_{24}\dot{E}x_{24}$	—
Isı eşanjörü 5		$c_{23}\dot{E}x_{23} + c_{28}\dot{E}x_{28} + \dot{Z}_{\text{ısı eşanjörü 5}}$ $= c_{24}\dot{E}x_{24} + c_{26}\dot{E}x_{26}$	$c_{28} = c_{26}$ $c_{23} = c_{24}$
Pompa 5		$c_{e2}\dot{W}_{pompa\ 5} + \dot{Z}_{pompa\ 5} = c_{28}\dot{E}x_{28} - c_{27}\dot{E}x_{27}$	$c_{27} = c_{28}$

Her bir alt bileşenin satın alma maliyeti (PEC), sistemin toplam maliyetinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için kritik bir öneme sahiptir. PEC değerleri, sistemin ekonomik analizinde ve yatırım maliyetlerinin hesaplanmasında temel bir bileşen olarak kullanılır. Daha önce, Tablo 15'de tesisten elde edilen veriler doğrultusunda gerçek PEC değerleri sunulmuştur. Bu değerler, mevcut sistemin maliyet yapısını anlamak ve ekonomik fizibiliteyi değerlendirmek açısından önemlidir. Tasarlanan bölgesel ısıtma modeline ait PEC değerleri ise Tablo 18'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bölgesel ısıtma sistemine ilişkin PEC değerleri, literatürde yer alan korelasyonlara dayanılarak hesaplanmıştır (Özahi & Tozlu, 2020). Bu hesaplama yöntemi, modelin maliyet tahminlerinin güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmak için seçilmiştir. Kullanılan korelasyonlar, benzer sistemlerden elde edilen verilerle doğrulanmış ve uygulamada test edilmiş yöntemlerdir. Bu sayede, tasarlanan ısıtma modelinin yatırım maliyetleri ile birlikte işletme maliyetlerinin daha doğru bir şekilde öngörülmesi ve ekonomik analizlerin daha kapsamlı yapılabilmesi sağlanmıştır.

Isı değiştiriciler içerisinde akan iki akışkan, farklı sıcaklık derecelerine sahiptir. İki akışkan arasında ısı transferi gerçekleşirken, sistem boyunca sıcaklık farkı sabit değildir. Bu farkı doğru bir şekilde hesaplamak için ısı transferinde logaritmik ortalama sıcaklık farkı (LMTD) kullanılmaktadır (Çengel vd., 2011). LMTD, ısı eşanjörü içerisinde bulunan sıcaklık farkının anlamlı bir ortalamasını bize sunar ve Denklem 56'daki gibi ifade edilir.

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (56)$$

Denklem 56'dan faydalanarak tasarlanan modeldeki ısı eşanjörlerinin ısı transfer alanlarını (A), Denklem 57 yardımıyla bulabiliriz. Denklem 57'de kullanılan ısı transfer katsayısı (U), literatürdeki benzer çalışmalara bakılarak $U = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınmıştır (Zare vd., 2013).

$$A = \frac{Q}{U.LMTD} \quad (57)$$

Tablo 18: Bölgesel Isıtma Sisteminin Alt Bileşenlerinin PEC Değerleri

Ekipman	PEC eşitliği (\$)
Isı eşanjörü 4	$PEC_{Isı \text{ eşanjörü } 4} = 2681(A_{IE \ 4})^{0.59}$
Pompa 4	$PEC_{Pompa \ 4} = 1120(\dot{W}_{P \ 4})^{0.8}$
Isı eşanjörü 5	$PEC_{Isı \text{ eşanjörü } 5} = 2681(A_{IE \ 5})^{0.59}$
Pompa 5	$PEC_{Pompa \ 5} = 1120(\dot{W}_{P \ 5})^{0.8}$
Borulama Sistemi	$PEC_{PL} = 1.67(L_{PL})$
Borulama Yalıtımı	$PEC_{PI} = L_{PL}(0.435)^{-1}$

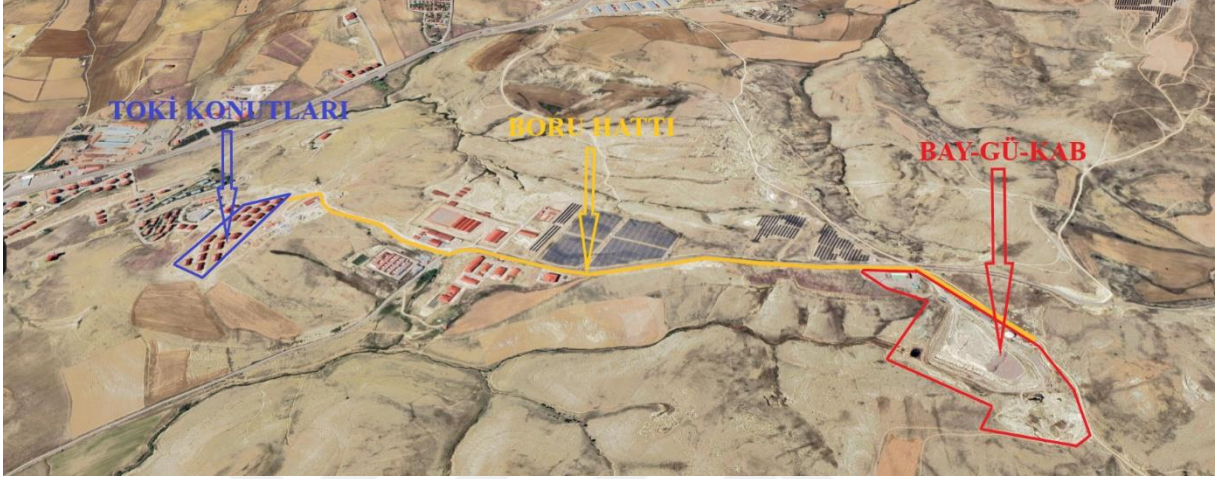
Şekil 15'de gösterilen durum noktalarına bağlı olarak, bölgesel ısıtma sistemi senaryosunun maliyet akış hızları, birim ekserji maliyetleri ve ekserji akış hızları Tablo 19'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 19: Bölgesel Isıtma Sisteminin Maliyet Akış Hızları, Birim Ekserji Maliyetleri ve Ekserji Akış Hızları

Hal	Ėx	c (\$/Gj)	Ĉ(\$/h)
21	350,4	3,21	4,049
22	88,15	3,21	1,019
23	165,2	6,825	4,059
24	30,67	6,825	0,7536
25	31,45	7,052	0,7985
26	184,1	14,58	9,662
27	107,8	14,58	5,659
28	110,2	14,58	5,783

Egzoz gazı kullanılarak tasarlanan bölgesel ısıtma modeli senaryosunda, sistemin maliyet akış hızı, egzoz gazının ekserji değerine bağlı olarak hesaplanmış ve 4,049 \$/h olarak belirlenmiştir.

BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santrali ile ısıtılması hedeflenen TOKİ konutları arasındaki mesafe, Google Earth (Google Earth 2024) mesafe ölçüm aracı kullanılarak gidiş ve dönüş toplam $L=4.300$ m olarak belirlenmiştir. Bu ölçüm sonucunda, boru hattı sisteminin satın alma ekipman maliyeti ve yalıtım maliyeti sırasıyla $PEC_{PL}=7.181$ \$, $PEC_{PI}= 9.885$ \$ olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan bölgesel ısınma sistemine ait boru hattının görünümü Şekil 16'da sunulmuştur.



Şekil 16: BAY-GÜ-KAB Bölgesel Isıtma Sistemi Boru Hattı Yol Haritası

5.4. BÖLGESEL ISITMA MODELİ KULLANILARAK ISITILACAK KONUT SAYISI BELİRLEME

Bayburt ilindeki doğal gaz tüketim verileri, bölgenin enerji tüketim profili ve kış mevsimindeki ısınma ihtiyaçlarını yansıtan önemli göstergelerdendir. Toplam 35.639 hanenin doğal gazı ısınma amaçlı kullanması, kentin enerji arz ve talep dengesinde önemli bir yer tutmaktadır (GAZBİR, 2024). Türkiye genelinde yapılan analizler doğrultusunda, Şekil 17'de Bayburt ili için hane başına düşen ortalama doğal gaz tüketimi ($DG_{yıllık\ tüketim}$) 1.066 m^3 olarak verilmiştir ve bu miktar, Bayburt'un iklim şartlarına ve kışın yaşanan soğuk hava dalgalarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir (GAZBİR, 2020). Ayrıca, Bayburt'ta tüketilen doğal gazın yoğunluğunun (ρ_{DG}) $0,7\text{ kg/m}^3$ 'tür. Yıllık toplam hane başına doğal gaz tüketimi, doğal gazın yoğunluğu ile yıllık ortalama kullanım miktarının çarpılması yoluyla hesaplanmıştır. Denklem 58'de gösterildiği üzere bu hesaplama sonucunda yıllık toplam hane başına doğal gaz tüketim miktarı ($m_{DG,konut}$) $746,2\text{ kg}$ olarak elde edilmiştir.

$$m_{DG,konut} = DG_{yıllık\ tüketim} \cdot \rho_{DG} \quad (58)$$



Şekil 17: 2020 Yılı İl Bazlı Hane Başı Gaz Tüketim Haritası (m^3) (GAZBİR, 2020)

Doğal gazın kütleli debisi ($\dot{m}_{DG,konut}$) $\dot{m}_{DG,konut}=0,0000218$ kg/s olarak belirlenmiştir. Bayburt ilinde tüketilen doğal gazın alt ısı değeri (LHV) 8250 kcal/m³ olarak esas alınmıştır (AKSA, 2024). Bu değer, yoğunluk ile ilişkili olarak hesaplandığında 49292.18 kJ/kg (DG_{LHV}) şeklinde bir sonuca karşılık gelmektedir. Bir konutun anlık enerji ihtiyacı, yani konut başına düşen ısı yükü, belirtilen Denklem 59 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{konut} = \dot{m}_{DG,konut} \cdot DG_{LHV} \quad (59)$$

Yukarıdaki denkleme kütleli debi ve doğal gazın alt ısı değerini yerine koyduğumuzda, bir konutun anlık ısı yükü ($\dot{Q}_{konut}$) 1,075 kW olarak hesaplanmaktadır. Tasarlanan bölgesel ısıtma modelindeki tüm borular yalıtımlı olduğu için ısı kayıpları göz ardı edilmiştir. Isıtılacak konut sayısının belirlenmesinde ise, modelde kullanılan ısı eşanjörü 5'in sağladığı ısı gücü ($\dot{Q}_{Bölgesel\ ısıtma}$) Engineering Equation Solver (EES) programı yardımıyla Denklem 60 kullanılarak 569,4 kW olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucunda elde edilen değerler, verilen Denklem 61'de yerine konularak ısıtılması planlanan konut sayısı 529 olarak tespit edilmiştir.

$$\dot{Q}_{Bölgesel\ ısıtma} = \dot{m}_{26}(h_{26} - h_{27}) \quad (60)$$

$$Konut\ sayısı = \frac{\dot{Q}_{Bölgesel\ ısıtma}}{\dot{Q}_{konut}} \quad (61)$$

5.5. BÖLGESEL ISITMA MODELİNİN EKONOMİK DEĞERLENDİRMESİ

Isıtılması planlanan 529 konut için, ısıtma ve sıcak su kullanım maliyetleri, bölgedeki güncel doğal gaz fiyatları esas alınarak Tablo 20'de detaylandırılmıştır. Ayrıca, tasarlanan

bölgesel ısıtma modeline ilişkin borulama sistemi, borulama yalıtımı ve ekipman maliyetleri de tablo 20’de sunulmuştur.

Tasarlanan modelin ısıtma sıcak suyu maliyeti, Denklem 62’de verilen hesaplama yöntemine göre belirlenmiştir. Tablo 20’de yer alan veriler ışığında, önerilen ısıtma modelinin toplam maliyetleri 529 konutun doğal gazla ısınma maliyetleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, tasarlanan bölgesel ısıtma modelinin ilk yatırım maliyeti 368.949 \$ ve kendini amorti etme süresinin 2,65 yıl olduğu hesaplanmıştır.

$$Isıtma sıcak suyu maliyeti (\$) = 8040(h) * \dot{C}_{26}(\$/h) \quad (62)$$

Tablo 20: Bölgesel Isıtma Sistemi Maliyet Verileri

Kompanent	Maliyet (\$)
529 konutun yıllık doğal gaz bedeli	140.978
Bölgesel ısıtma borulama bedeli	7.181
Bölgesel ısıtma boru yalıtım bedeli	9.885
Bölgesel ısıtma yıllık sıcak su üretim bedeli	77.682
Bölgesel ısıtma tesis toplam bedeli	274.201

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç

BAY-GÜ-KAB santrali, katı atıkların işlenmesi ve enerji üretimi süreçlerini dört ana aşamada gerçekleştirmektedir: katı atık ayrıştırma, depolama, LFG (Landfill Gas) gazı üretimi ve elektrik üretimi. 31.500 m² alana kurulu olan tesis, günlük ortalama 150 ton katı atığı işlemektedir.

Santralde, yılda yaklaşık 2.000.000 m³ LFG üretilmekte ve bu gaz kullanılarak yıllık ortalama 5.000 MW elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen bu elektrik, yaklaşık 5.000 hanenin yıllık elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. BAY-GÜ-KAB santrali, 1,56 MW kurulu güce sahip olup, gaz motoru tarafından üretilen enerji 2 MW kapasiteli bir trafo aracılığıyla şehir şebekesine aktarılmaktadır.

Tesis için gerçekleştirilen termodinamik analizler, ekserji ve enerji verimliliklerinin sırasıyla %59,29 ve %42,71 olduğunu göstermiştir. Bu analizler, tesisin enerji üretim süreçlerinin etkinliğini ortaya koymaktadır. Tesisin atık ısı 431°C derece olarak hesap edilmiş ve bir bölgesel ısıtma modeli tasarlanmıştır.

Modelleme çalışmaları sonucunda, bölgesel ısıtma sisteminin ekserji ve enerji verimlilikleri sırasıyla %38,17 ve %42,51 olarak bulunmuştur. Modellemesi yapılan bölgesel ısıtma sistemi, BAY-GÜ-KAB biyogaz enerji santraline entegre edildiğinde, tesisin enerji verimliliği %42,71'den %62,32'ye, ekserji verimliliği ise %59,29'dan %64,76'ya yükseleceği hesaplanmıştır.

Tasarımı yapılan bölgesel ısıtma sisteminin potansiyel ısıtma kapasitesi, 529 konut olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, katı atıkların yalnızca elektrik üretiminde değil, aynı zamanda sürdürülebilir ısıtma çözümlerinde de önemli bir kaynak olabileceğini göstermektedir.

Bölgesel ısıtma modeline entegre edilen atık ısı yönetiminin maliyet analizleri de gerçekleştirilmiştir. Atık ısı giriş maliyeti, 4,049 \$/h olarak hesaplanmıştır. Bu veri üzerinden yapılan termoekonomik analizler, bölgesel ısıtma modelinin maliyet ve verimlilik açısından değerlendirilmesini sağlamıştır.

Önerilen bölgesel ısıtma sisteminin ekonomik fizibilitesi incelenmiş ilk yatırım maliyeti 368.949 \$ ve kendini amorti etme süresi 2,65 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu süre, sektörde kabul edilen standartlar doğrultusunda makul bir değer olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışma, BAY-GÜ-KAB tesisinin enerji üretimi ve bölgesel ısıtma kapasitesinin hem çevresel hem de ekonomik boyutlarını değerlendirmiş, katı atıkların yenilenebilir enerji üretiminde oynayabileceği kilit rolü bir kez daha vurgulamıştır.

Öneriler

BAY-GÜ-KAB santrali gibi, yerel yönetimlerde katı atık bertaraf yöntemleri kullanılarak sürdürülebilir enerjiyi destekleyen çevreye faydalı tesislerin artırılması ve desteklenmesi gerekmektedir.

BAY-GÜ-KAB gibi tesislerin optimize edilmesi ve halkın geri dönüşüm konusunda bilinçlendirilmesi sağlanmalıdır.

Katı atık tesislerine teknolojik yatırımlar yapılarak enerji ve ekserji verimlerinin artırılması önerilmektedir. Teknolojik yenilikler, enerji üretimini artırırken karbon emisyonlarını azaltabilir.

Bölgesel ısıtma modelleri yaygınlaştırılarak enerji tasarrufu sağlanmalıdır. Bölgesel ısıtma sistemleri için yeni enerji geri kazanım yöntemleri geliştirilmelidir.

Yapılan araştırmaların ve eğitim programlarının desteklenmesi önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abusoglu, A., & Kanoglu, M. (2009). Exergetic and thermoeconomic analyses of diesel engine powered cogeneration: Part 1–Formulations. *Applied Thermal Engineering*, 29(2-3), 234-241. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.02.025>
- Abusoglu, A., Tozlu, A., & Anvari-Moghaddam, A. (2021). District heating and electricity production based on biogas produced from municipal WWTPs in Turkey: A comprehensive case study. *Energy*, 223, 119904. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119904>
- Akar, İ. (2019). *Afyonkarahisar katı atık düzenli depolama tesisinde oluşan depo gazının matematiksel modeller kullanılarak belirlenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 574259)
- Akdoğan, A., & Güleç, S. (2007). Sürdürülebilir katı atık yönetimi ve belediyelerde yöneticilerin katı atık yönetimiyle ilgili tutum ve düşüncelerinin analizine yönelik bir araştırma. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 39-69.
- AKSA. (2024, 3 Kasım). Doğal gaz tüketici rehberi. <https://www.aksadogalgaz.com.tr/adresinden edinilmiştir>.
- Aynur, E. (2011). *İstanbul'da oluşan kentsel katı atıklar için yakma ve gazlaştırma sistemlerinin karşılaştırmalı analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 350481)
- Bilgili, M. Y. (2020). Katı atık yönteminde kullanılan bazı kavramlar ve açıklamaları. *Avrasya Terim Dergisi*, 8(2), 88-97. doi: 10.31451/ejatd.773288
- Büyükkeklik, A. E. A. (2008). Sürdürülebilir kalkınmanın ekonomik çevre boyutları açısından atık yönetimi ve e-atıklar. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1(2), 19.
- Büyükmurat, Y. T. (2028) *Thermodynamic and economic analyses and assessment of a power plant* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 519023)
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2000). *Thermodynamics: An engineering approach*. Boston: McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., Tanyıldızı, V., & Dağtekin, İ. (2011). *Isı ve kütle transferi*. İzmir: Güven Kitabevi.
- Çiçek, Çiçek, A., Ekmekçi, İ., & Güven, H. (2003). Bir sanayi tesisinde kojenerasyon ve atık ısı geri kazanımının incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 7(2), 1-8. doi:10.16984/saufbed.84460
- Çoban, A. (2011). *Yatağan termik santralinde bölgesel ısıtmada santral içi dönüşüm sistemlerinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 284184)
- Dpt, (2000). Sekizinci beş yıllık kalkınma planı içme suyu, kanalizasyon, arıtma sistemleri ve katı atık denetimi özel ihtisas komisyon raporu. Ankara, Dpt. <https://www.sbb.gov.tr/adresinden edinilmiştir>.
- Enerji atlası, (2024, 1 Kasım). Bayburt elektrik santralleri. <https://www.enerjiatlasi.com/adresinden edinilmiştir>.

- Eyriboyun, M. (2011). Zonguldak'ta termik elektrik santrallerinin atık ısısından yararlanma ile bölgesel ısıtma ve bunun sera gazı galınımı üzerine etkisi. *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Mayıs/Haziran 2011, ss 21-31.
- Fitó, J., Hodencq, S., Ramousse, J., Wurtz, F., Stutz, B., Debray, F., & Vincent, B. (2020). Energy-and exergy-based optimal designs of a low-temperature industrial waste heat recovery system in district heating. *Energy Conversion and Management*, 211, 112753. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112753>
- Fitó, J., Ramousse, J., Hodencq, S., & Wurtz, F. (2020). Energy, exergy, economic and exergoeconomic (4E) multicriteria analysis of an industrial waste heat valorization system through district heating. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 42, 100894. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100894>
- GAZBİR, (2020). İl bazlı hane başı gaz tüketimi. <https://www.gazbir.org.tr/> adresinden edinilmiştir
- GAZBİR, (2024, 1 Kasım). Bayburt konut abone sayısı. <https://www.gazbir.org.tr/> adresinden edinilmiştir.
- Google Earth, (2024, 2 Kasım). Bayburt uydu görünümü. <https://www.google.com.tr/intl/tr/earth/> adresinden edinilmiştir.
- Güler, N. (2008). *Kentleşme sürecinde katı atık yönetimi ve Kocaeli örneği* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 231026)
- Güngör, C., Kaya, D., & Üresin, E. (2007). Termik santrallerin atık ısılarının değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 575, 19-26.
- Güngör, O., Tozlu, A., Arslantürk, C., & Özahi, E. (2024). District heating based on exhaust gas produced from end-of-life tires in Erzincan: Thermoeconomic analysis and optimization. *Energy*, 294, 130755. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130755>
- Işıldar, A. (2018). *Çok kriterli karar verme yöntemleriyle katı atık bertaraf yöntemi seçimi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 504278)
- Johari, A., Ahmed, S. I., Hashim, H., Alkali, H., & Ramli, M. (2012). Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2907-2912. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.005>
- Karabakal, E. (2023). *Isı merkezlerinde açığa çıkan atık ısı enerjisinin absorpsiyonlu soğutma çevrimi ile geri kazanımı* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 789746)
- Kılınç, H. (2017). *Endüstriyel tav fırını bacalarından atık ısının geri kazanımı* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 453391)
- Kocamaz, M. İ. (2020). *İnönü üniversitesi merkezi ısıtma sisteminin enerji ve ekserji analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 666590)
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407-422. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Liao, G., Jiaqiang, E., Zhang, F., Chen, J., & Leng, E. (2020). Advanced exergy analysis for organic rankine cycle-based layout to recover waste heat of flue gas. *Applied Energy*, 266, 114891. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114891>

- Nazilli, E. (2018). Organik katı atıkların aerobik şartlarda biyoteknolojik yöntemlerle kompostlaştırılması. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 11(2), 47-50.
- Oluleye, G., Jobson, M., & Smith, R. (2015). A hierarchical approach for evaluating and selecting waste heat utilization opportunities. *Energy*, 90, 5-23. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.086>
- Ozahi, E., Abusoglu, A., & Tozlu, A. (2021). A comparative thermoeconomic analysis and optimization of two different combined cycles by utilizing waste heat source of an MSWPP. *Energy Conversion and Management*, 228, 113583. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113583>
- Ozcan, H., & Dincer, I. (2017). Exergoeconomic optimization of a new four-step magnesium–chlorine cycle. *International journal of hydrogen energy*, 42(4), 2435-2445. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.098>
- Özahi, E., & Tozlu, A. (2020). Optimization of an adapted Kalina cycle to an actual municipal solid waste power plant by using NSGA-II method. *Renewable Energy*, 149, 1146-1156. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.102>
- Özahi, E., Tozlu, A., & Abuşoğlu, A. (2018). Organik rankine çevrimi entegre edilmiş S-CO₂ kullanılan bir gaz türbin çevriminin termodinamik ve termoekonomik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(3), 917-928. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416394>
- Paksoy, A. K. (2019). *Gaz motorlu bir ısı güç çevrim santralinin atık ısı geri kazanımının termoekonomik analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 568405)
- Park, J. W., & Shin, H. C. (2001). Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. *Atmospheric Environment*, 35(20), 3445-3451. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00118-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00118-2)
- Pusat, Ş. (2010). *Bir bölgenin ısıtma amaçlı enerji talebinin belirlenmesi ve bölge ısıtma sistemi için uygunluğunun analizi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 296927)
- Rahim, M., & Gündüz, D. (2013). Gaz türbinli bir ısı-güç (kojenerasyon) çevrim santralinin enerji ve ekserji analizi: Ankara şartlarında uygulama. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 6(2), 19-27.
- Ryan, I. (2011). An investigation into the utilisation of energy in landfill gas to supply a community electricity and district heating scheme (Master's thesis, Atlantic Technological University). <https://core.ac.uk/reader/51065330>
- Saltabaş, F., Soysal, Y., Yıldız, Ş., & Balahorli, V. (2009). Evsel katı atık termal bertaraf yöntemleri ve İstanbul'a uygulanabilirliği. *Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu'nda sunulan bildiri, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye*, 15-17.
- Solak, S. G., & Pekküçükşen, S. (2018). Türkiye'de kentsel katı atık yönetimi: Karşılaştırmalı bir analiz. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(3).
- Tozlu, A., Abusoglu, A., Ozahi, E., & Anvari-Moghaddam, A. (2021). Belediye katı atık bazlı bölgesel ısıtma ve elektrik üretimi: Bir vaka çalışması. *Temiz Üretim Dergisi*, 297, 126495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126495>
- Tozlu, A., Abuşoğlu, A., & Özahi, E. (2018). Thermoeconomic analysis and optimization of a Re-compression supercritical CO₂ cycle using waste heat of Gaziantep municipal solid waste power plant. *Energy*, 143, 168-180. doi: 10.1016/j.energy.2017.10.120.

- Tozlu, A., Özahi, E., & Abuşoğlu, A. (2016). Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 809-815. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.097>
- TÜİK, (2021). Kişi başına yıllık elektrik tüketimi. <https://cip.tuik.gov.tr/> adresinden edinilmiştir.
- Zare, V., Mahmoudi, S. M. S., & Yari, M. (2013). An exergoeconomic investigation of waste heat recovery from the gas turbine-modular helium reactor (GT-MHR) employing an ammonia–water power/cooling cycle. *Energy*, 61, 397-409. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.038>



ÖZ GEÇMİŞ

Yasin ÇAMKERTEN, ██████████ doğmuştur. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Bayburt'ta tamamlamıştır. 2017-2021 yılları arasında Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenim görerek bu programdan başarıyla mezun olmuştur. 2022 yılında Makine Mühendisleri Odası'na katılmıştır. Çalışma hayatına enerji sektöründe başlamış, ısıtma ve soğutma sistemleri üzerine halk eğitim merkezinde çeşitli dersler vermiştir.

Eğitim ve meslek hayatı boyunca MATLAB, SolidWorks, AutoCAD, ZetaCAD ve EES gibi teknik yazılımları etkin bir şekilde kullanmayı başarmıştır. Takım çalışmasına yatkınlığı, problem çözme yeteneği ve güçlü iletişim becerileri sayesinde hem akademik hem de profesyonel çevrelerde etkin bir şekilde çalışmaktadır.

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Lisansüstü eğitiminde enerji ve ekserji analizleri alanında yoğunlaşmıştır. Yüksek lisans tez çalışmasını, Doç. Dr. Alperen TOZLU'nun danışmanlığında sürdürmektedir. Araştırmaya olan ilgisi ve disiplinli çalışma anlayışıyla akademik ve profesyonel hedefleri doğrultusunda çalışmalarını kararlılıkla sürdürmektedir.