

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR BİYOGAZ TESİSİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ
YÖNTEMİ İLE VERİMLİLİĞİNİN HESAPLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OZAN BOZKIR

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. İkrām ORAK

BİNGÖL-2024

**BİR BİYOGAZ TESİSİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ YÖNTEMİ İLE
VERİMLİLİĞİNİN HESAPLANMASI**

Doç. Dr. İkrâm ORAK danışmanlığında, Ozan BOZKIR tarafından hazırlanan bu çalışma 16/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Yasin GÖKASLAN	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. İkrâm ORAK	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Ahmet GÜNER	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun 09/ 08/ 2024 tarih ve 2024/37/18 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

İnsan nüfusunun artması ve enerji kaynaklarının ihtiyacı karşılaması için Dünya genelinde ciddi çalışmalar yapılmakta, son yıllarda kaynak sorunu yaşamamak adına hızla yayılan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması ve bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, insan hayatını kolaylaştırmak adına büyük önem arz etmektedir. Biyogaz tesisleri ise yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak atıkların bertarafı ile hem çevre dostu hem karbon salımının önüne geçilmesi hem de farklı türlerde enerji türleri üretmek adına oldukça önemli bir yere sahiptir.

Bu çalışmada bir biyogaz santralinin biyogaz üretim prosesinden enerji üretim ünitelerine kadar termodinamiğin birinci ve ikinci yasa verimleri hesaplanmış, santralin ünitelerindeki kayıplar tespit edilmiştir. Ayrıca işletmesel olarak dikkat edilmesi gereken noktalara farklı bir bakış açısı kazandırmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmalarım esnasında gerekli destek, yardım ve yönlendirmelerini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. İkrâm ORAK'a, tüm bu tez sürecinde gerekli çalışma ortamında her türlü konforu ve desteği sağlayan değerli eşime ve aileme, santralde çalışma süresince verilerin ve kayıtların alınmasında yardımcı olan değerli Enfaş Enerji Elektrik Üretim A.Ş. Biyogaz Tesisi işletme ve bakım personeli mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ozan BOZKIR

Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. BİYOGAZ ENERJİSİ	8
3.1. Biyogaz Oluşumu	9
3.2. Biyogaz Oluşumuna Etki Eden Faktörler	11
3.2.1. Sıcaklık	12
3.2.2. PH Etkisi	13
3.2.3. Karıştırma Etkisi	14
3.2.4. Bekleme Süresi	14
3.2.5. Yükleme Oranı	15
3.2.6. C/N Oranı	15
4. BİYOGAZ TESİSLERİ	17
5. TERMODİNAMİK KAVRAMLAR	26
5.1. Birinci Yasa	26
5.2. İkinci Yasa	29
5.3. Enerji	30
5.4. Ekserji	34
6. MATERYAL VE YÖNTEM	39
6.1. Materyal	39
6.1.1. Akışkan Verilerinin Tespiti	40
6.1.1.1. Sıcaklık Verisi Tespiti	40

6.1.1.2. Basınç Verisi Tespiti	41
6.1.1.3. Debi Verisi Tespiti	42
6.1.2. Proses Akış Diyagramı Oluşturma.....	43
6.1.3. Ekipmanların Belirlenmesi.....	45
6.1.4. Atık Hammadesi Analizi.....	56
6.1.5. Termodinamik Verilerin Toplanması.....	58
6.1.5.1. Entalpi	58
6.1.5.2. Entropi.....	59
6.1.5.3. Yoğunluk ve Özgül Hacim.....	60
6.1.5.4. Kullanılan Denklemler	61
6.2. Yöntem.....	66
6.2.1. Atık Hammaddesi ve Çürütücü İçeriği	68
6.2.2. Biyogaz Eldesi ve Özellikleri.....	75
6.2.3. Biyogaz Tesisi	77
6.2.3.1. Atık Hammadde Kabul Birimi	78
6.2.3.2. Anaerobik Çürütme Birimi	84
6.2.3.3. Susuzlaştırma Birimi	99
6.2.3.4. Kojenerasyon ve Enerji Üretim Birimi	104
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	163
KAYNAKLAR	169
EKLER.....	173
EK-1 Kojenerasyon Sistemi Antifrizli Su Devresine Ait EES Programı Çıktıları	173
EK-2 Kojenerasyon Sistemi Sıcak Su Devresine Ait EES Programı Çıktıları	176
EK-3 Anaerobik Çürütme Sistemi Su Devresine Ait EES Programı Çıktıları	179
EK-4 Yüksek Seviyede Atmosfer Özellikleri Tablo A-16	181
EK-5 Havanın İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-17.....	182
EK-6 Azotun İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-18	183
EK-7 Oksijenin İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-19	184
EK-8 Karbondioksitin İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-20	185
EK-9 Su Buharının İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-23.....	186
EK-10 Hidrokarbon Yakıtların Özellikleri Tablo A-27	187
EK-11 Bilinen Bazı Gazların Mükemmel-Gaz Özgül Isıları Tablo A-2	188
EK-12 Metan Gazının Özellikleri Tablo B-7-2	189

EK-13 Metan Gazının 0-1 bar Özellikleri Tablo B-3	190
EK-13 Metan Gazının 0-1 bar Özellikleri Tablo B-3	191
EK-14 Metan Gazının 1-3 bar Özellikleri Tablo B-3	192



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

E	: Enerji (Joule)
C/N	: Karbon azot oranı
FOS/TAC	: Uçucu yağ asidi/Toplam alkalinite
E _g	: Giren enerji (kJ/s)
E _ç	: Çıkan enerji (kJ/s)
PE	: Potansiyel enerji (Joule)
KE	: Kinetik enerji (Joule)
MEK	: Mekanik enerji (Joule)
P	: Güç (Watt)
V	: Gerilim (Volt)
I	: Akım (Amper)
η	: Verim (%)
HHV	: Üst ısı değeri (kJ/kg)
LHV	: Alt ısı değeri (kJ/kg)
$\dot{m}$	: Kütleli debi (kg/s)
É _x	: Ekserji (kW)
ψ	: Ekserji akışı (kJ/kg)
β	: Kimyasal ekserji katsayısı
T ₀	: İlk sıcaklık (K)
P ₀	: İlk basınç (kPa)
%KM	: Katı madde oranı (%)
%OKM	: Organik katı madde oranı (%)
BGP	: Biyogaz potansiyeli (Lbiyogaz/kg.OKM)
h	: Entalpi (kJ/kg)
s	: Entropi (kJ/kg.K)
c _p	: Özgöl ısı (kJ/kg.K)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
v	: Özgöl hacim (m ³ / kg)

$\dot{Q}$	: Isı enerjisi (kJ/s)
ΔT	: Sıcaklık farkı (K)
W_g	: Gerçek güç (kJ/s)
W_i	: İzantropik güç (kJ/s)
ABS	: Mutlak basınç (kPa)
Y_{biyogaz}	: Biyogaz üretimi (m ³ /h)
ÇBS	: Çürütücü besleme pompası
AP	: Aktarma pompası
SBP	: Seperatör besleme pompası
STP	: Sıvı fermente transfer pompası
Ç-1	: Birinci çürütücü
Ç-2	: İkinci çürütücü
Ç-3	: Üçüncü çürütücü
P-Ç	: Post çürütücü
HT	: High temperature
LT	: Low temperature
AD	: Anaerobik çürütücü
PD	: Post çürütücü
PHT	: High temperature primer devresi sirkülasyon pompası
PPHT	: High temperature sekonder devresi sirkülasyon pompası
PLT	: Low temperature primer devresi sirkülasyon pompası
PPLT	: Low temperature sekonder devresi sirkülasyon pompası
PY	: Motor yağ pompası
PÇD	: Çürütücü ısıtma pompası
PAIK	: Atık ısı kazanı sirkülasyon pompası
PC	: Ceket devresi sirkülasyon pompası

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Biyogaz oluşum aşamaları	11
Şekil 3.2.	Anaerobik fermantasyon prosesleri için sıcaklık aralıkları.	13
Şekil 4.1.	Katı atık besleme ünitesi	18
Şekil 4.2.	Katı atık parçalayıcı	18
Şekil 4.3.	Anaerobik reaktör	20
Şekil 4.4.	Biyogaz yakıtlı brülör	22
Şekil 4.5.	Elektrik üretim türbinleri	23
Şekil 4.6.	Biyogaz motoru.....	24
Şekil 4.7.	Elektrik ve ısı enerjisi ortak kojenerasyon sistem.....	24
Şekil 4.8.	Elektrik ve ısı enerjisi ayrı üretimi.....	25
Şekil 5.1.	Kütle ve enerji korunumu	27
Şekil 5.2.	Sistemdeki enerji değişimi	28
Şekil 5.3.	Kapalı ve açık sistemler	28
Şekil 5.4.	Hal değişimi ile entropi değişimi	30
Şekil 5.5.	Motorlarda enerji kayıpları	33
Şekil 5.6.	Tersinir ve tersinmez hal değişimleri.....	34
Şekil 6.1.	Biyogaz tesisi	40
Şekil 6.2.	Termometre ve kızılötesi termometre	41
Şekil 6.3.	Basınç transmitteri ve manometre	42
Şekil 6.4.	Akış ölçer debimetreler.....	43
Şekil 6.5.	Örnek bir akım diyagramı	44
Şekil 6.6.	Dalgıç motorlu ve paletli karıştırıcılar	46
Şekil 6.7.	Mono pompa ve loblu pompa	47
Şekil 6.8.	Katı atık parçalayıcılar	48
Şekil 6.9.	Plakalı ve borulu ısı değiştiriciler	49
Şekil 6.10.	Biyogaz motoru.....	50
Şekil 6.11.	Atık ısı kazanı	51
Şekil 6.12.	Jeneratörler.....	53

Şekil 6.13.	Kompresörler	54
Şekil 6.14.	Biyogaz bloweri	54
Şekil 6.15.	Seperatörler	55
Şekil 6.16.	Etüv ve kül fırını	57
Şekil 6.17.	Hassas terazi.....	57
Şekil 6.18.	Termodinamik tablo yardımıyla entalpinin bulunması	59
Şekil 6.19.	Engineering Equation Solver (EES) programı ile entalpinin bulunması	59
Şekil 6.20.	Termodinamik tablo yardımıyla entropinin bulunması	60
Şekil 6.21.	Termodinamik tablo yardımıyla yoğunluk ve özgül hacmini bulunması	61
Şekil 6.22.	KM-OKM test numuneleri soldan sağa	69
Şekil 6.23.	Etüv ve kül fırınında numunelerin hazırlanma	69
Şekil 6.24.	Atık hammadde kütle denkliği	70
Şekil 6.25.	Gübrenin yoğunluk ve katı madde oranı arasındaki ilişki	71
Şekil 6.26.	Elektrikli manyetik ısıtıcı ile gübre özgül ısı tayini düzeneği	73
Şekil 6.27.	MRU Optima7 gaz ölçüm cihazı ile biyogaz ölçümü.....	77
Şekil 6.28.	Atık hammadde kabul birimi	79
Şekil 6.29.	Sığır gübresinin atık kabul biriminde ölçülen sıcaklığı	81
Şekil 6.30.	Atık besleme mono pompası.....	82
Şekil 6.31.	Çürütücü besleme pompası giren akım ve çıkan akım	83
Şekil 6.32.	Biyogaz tesisi kütle denkliği	85
Şekil 6.33.	Anaerobik çürütme sistemi	87
Şekil 6.34.	Çürütücü-1, Çürütücü-2, Çürütücü-3 ve Post Çürütücü ısıtma sistemi debi akışkanları.....	92
Şekil 6.35.	Aktarma pompası giren akım ve çıkan akım	93
Şekil 6.36.	Susuzlaştırma sistemi.....	99
Şekil 6.37.	Seperatör besleme pompası giren akım ve çıkan akım	101
Şekil 6.38.	Sıvı transfer pompası giren akım ve çıkan akım.....	102
Şekil 6.39.	Kojenerasyon sistemi	105
Şekil 6.40.	Atmosferin 1080 rakımında özellikleri Tablo A-16	110
Şekil 6.41.	Türkiye ortalama nem dağılımı.....	111
Şekil 6.42.	Taze hava fanları ve kaset filtre basınç göstergesi.....	116
Şekil 6.43.	Yakıtın motora giriş sıcaklığı ve turboşarj çıkış sıcaklığı	117

Şekil 6.44.	HT devresi motor giriş sıcaklığı, yağ ve ceket soğutma çıkış sıcaklığı ve motor çıkış sıcaklığı	124
Şekil 6.45.	LT devresi İntercooler giriş ve çıkış sıcaklığı.....	125
Şekil 6.46.	Ceket suyu motor çıkışı ve motor dönüş sıcaklığı	125
Şekil 6.47.	Yağ devresinin motor çıkış sıcaklığı ve soğutma eşanjörü çıkış sıcaklığı.	125
Şekil 6.48.	Chiller su devresi gidiş ve dönüş sıcaklığı.....	130
Şekil 6.49.	Biyogazın gaz soğutma eşanjörüne giriş ve çıkış basıncı	130
Şekil 6.50.	Biyogaz eşanjör çıkışı ve girişi sıcaklıkları	131
Şekil 6.51.	Gaz soğutma eşanjörü giren akım ve çıkan akımlar	131
Şekil 6.52.	Biyogaz debisi ve blower sonrası basıncı	132
Şekil 6.53.	Biyogaz bloweri giren akım ve çıkan akım	133
Şekil 6.54.	Yakma havas ve biyogazın sıcaklık ve basınç özellikleri.....	135
Şekil 6.55.	Motor ekran alıntısı.....	136
Şekil 6.56.	Isı değiştirici akış şeması	137
Şekil 6.57.	Ceket suyu soğutma eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar	138
Şekil 6.58.	Yağ soğutma eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar.....	139
Şekil 6.59.	HT eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar.....	140
Şekil 6.60.	LT eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar	141
Şekil 6.61.	İntercooler giren akımlar ve çıkan akımlar	142
Şekil 6.62.	HT sirkülasyon pompası öncesi ve sonrası basınç değerleri	144
Şekil 6.63.	HT sirkülasyon pompası giren ve çıkan akım.....	144
Şekil 6.64.	Yağ pompası giren ve çıkan akım.....	146
Şekil 6.65.	HT sekonder devresi sirkülasyon pompası giriş ve çıkış basınç değerleri	147
Şekil 6.66.	HT sekonder devre sirkülasyon pompası giren akım ve çıkan akım	147
Şekil 6.67.	LT sirkülasyon pompası giriş ve çıkış basınç değerleri.....	148
Şekil 6.68.	LT primer devre sirkülasyon pompası giren akım ve çıkan akım	149
Şekil 6.69.	LT sekonder devresi sirkülasyon pompası giriş ve çıkış basınç değerleri	150
Şekil 6.70.	LT sekonder devre sirkülasyon pompası giren akım ve çıkan akım.....	151
Şekil 6.71.	Çürütücü ısıtma pompası giren akım ve çıkan akım.....	152
Şekil 6.72.	Biyogaz motoru akış diyagramı	153
Şekil 6.73.	Turboşarj akış diyagramı	158
Şekil 6.74.	Atık ısı kazanı otomasyon verileri	159
Şekil 6.75.	Atık ısı kazanı akış diyagramı.....	160

Şekil 6.76. Atık ısı kazanı besleme suyu pompa öncesi ve sonrası basınçlar.....	161
Şekil 6.77. Atık ısı kazanı besleme suyu pompası giren akım ve çıkan akım	161



TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Biyogazın içeriği.....	8
Tablo 3.2.	Biyogaz enerji eşdeğeri.....	10
Tablo 3.3.	Bazı atıkların C/N oranları.....	16
Tablo 5.1.	Bazı gazların kimyasal ekserjileri	37
Tablo 6.1.	Jenbacher JMS320 Biyogaz motoru teknik özellikleri	50
Tablo 6.2.	Buhar üretimli atık ısı kazanı teknik özellikleri.....	52
Tablo 6.3.	Biyogaz bloweri teknik özellikleri.....	55
Tablo 6.4.	Sıvı süt sığırı gübresi katı madde ve organik katı madde analizi	69
Tablo 6.5.	Süt sığırı gübresi özgül ısı deneyi.....	73
Tablo 6.6.	Çürütücü atığı, post çürütücü atığı ve sıvı fermentenin katı madde analizi ve organik katı madde analizi.....	75
Tablo 6.7.	Çürütücü atığı, post çürütücü atığı ve sıvı fermentenin termodinamik özellikleri	75
Tablo 6.8.	Portatif biyogaz analizörünün teknik özellikleri.....	76
Tablo 6.9.	Biyogaz tesisi atık yüklemesi	79
Tablo 6.10.	Atık hammaddesi termodinamik özellikleri	80
Tablo 6.11.	Mono pompa etiket bilgileri	81
Tablo 6.12.	Çürütücü besleme pompası birinci ve ikinci yasa verimi	83
Tablo 6.13.	Anaerobik çürütücü yükleme miktarı	85
Tablo 6.14.	Çürütücü paletli karıştırıcılarının elektrik enerjisi tüketimi	89
Tablo 6.15.	Aktarma pompası birinci ve ikinci yasa verimi	94
Tablo 6.16.	Biyogaz tesisi genel atık yükleme verileri.....	95
Tablo 6.17.	Anaerobik çürütme sistemine ait akış özellikler.....	96
Tablo 6.17.	(Devamı) Anaerobik çürütme sistemine ait akış özellikler	97
Tablo 6.18.	Çürütücülerin enerji dengesi.....	98
Tablo 6.19.	Seperatör besleme pompası birinci ve ikinci yasa verimi.....	101
Tablo 6.20.	Sıvı fermente transfer pompası birinci ve ikinci yasa verimi	103
Tablo 6.21.	Biyogazın analizörle bileşiminin tespiti	104

Tablo 6.22. Biyogazın element içeriğinin tespit edilmesi.....	106
Tablo 6.23. Alt ısıtıl değer hesaplama.....	106
Tablo 6.24. Biyogazın alt ısıtıl değeri hesabı.....	107
Tablo 6.25. Biyogazın termodinamik özellikleri	110
Tablo 6.26. Havanın bağıl nem oranına göre bileşimleri.....	111
Tablo 6.27. Yakma havasının özellikleri	111
Tablo 6.28. %60 bağıl nemli havanın termodinamik özellikleri.....	114
Tablo 6.29. Yakıt hava karışımının termodinamik özellikleri	115
Tablo 6.30. Biyogaz yanma tepkimesine ait mol denkliği katsayıları	118
Tablo 6.31. Biyogazın bileşenleri ve mol ağırlıklar.....	118
Tablo 6.32. Havanın bileşenleri ve mol ağırlıklar.....	119
Tablo 6.33. Egzoz gazının bileşenleri ve mol ağırlıklar	119
Tablo 6.34. Egzoz gazının termodinamik özellikleri	121
Tablo 6.35. Mobil Pegasus 610 motor yağının özellikleri	122
Tablo 6.36. Motor yağının özgül ısı ve yoğunluğu.....	122
Tablo 6.37. Antifrizin özellikleri	123
Tablo 6.38. Kojenerasyon sistemine ait akışkanlar ve özellikleri.....	127
Tablo 6.38. (Devamı) Kojenerasyon sistemine ait akışkanlar ve özellikleri	128
Tablo 6.38. (Devamı) Kojenerasyon sistemine ait akışkanlar ve özellikleri	129
Tablo 6.39. Gaz soğutma eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi	132
Tablo 6.40. Biyogaz bloweri birinci ve ikinci yasa verimi	134
Tablo 6.41. Biyogaz ve hava karışımı yakıtın ‘k’ sabitinin tespiti	135
Tablo 6.42. Biyogaz motoru yük dağılımına göre güç üretim değerleri	137
Tablo 6.43. Ceket soğutma eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi	138
Tablo 6.44. Yağ soğutma eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi.....	139
Tablo 6.45. HT eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi.....	140
Tablo 6.46. LT eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi	141
Tablo 6.47. İntercooler birinci ve ikinci yasa verimi	143
Tablo 6.48. HT sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi	145
Tablo 6.49. Yağ pompası birinci ve ikinci yasa verimi	146
Tablo 6.50. HT sekonder devre sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi	148
Tablo 6.51. LT primer devre sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi	149
Tablo 6.52. LT sekonder devre sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi	151

Tablo 6.53. Çürütücü ısıtma pompası birinci ve ikinci yasa verimi	152
Tablo 6.54. Biyogaz motoru akışkan dengesi tablosu.....	154
Tablo 6.55. Biyogaz motoru enerji dengesi ve birinci yasa verimi	155
Tablo 6.56. Biyogaz motoru ekserji giriş ve çıkışları	156
Tablo 6.57. Biyogaz motoru ikinci yasa verimi	156
Tablo 6.58. Motor katalog değerleri ile ölçülen değerlerin kıyaslanması.....	157
Tablo 6.59. Turboşarj birinci ve ikinci yasa verimi	158
Tablo 6.60. Atık ısı kazanı birinci ve ikinci yasa verimi	160
Tablo 6.61. Atık ısı kazanı besleme suyu pompası birinci ve ikinci yasa verimi	162
Tablo 7.1. Biyogaz tesisine ait ekipmanların ve ünitelerin termodinamik birinci ve ikinci yasa verimleri	168

BİR BİYOGAZ TESİSİNİN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ YÖNTEMİ İLE VERİMLİLİĞİNİN HESAPLANMASI

ÖZET

Bu çalışmada Bingöl ilinde bulunan bir biyogaz tesisinin gerçek zamanlı verileri kullanılarak enerji ve ekserji analizi yöntemleri ile termodinamiğin birinci ve ikinci yasa verimleri incelenmiştir. Biyogaz tesisi 650 m³/gün sıvı süt sığırı gübresi işleyerek mezofili şartlarda biyogaz üretmektedir, elde edilen biyogazdan da elektrik, sıcak su ve buhar enerjileri üretilmektedir. Tesis süt sığırı gübresinin yanı sıra başka hayvansal kaynaklı ve bitkisel kaynaklı atıkları da işlemektedir ancak bu atıklar değişken dönemlerde değişken miktarlarda geldiği için, yükleme planında kütlege en fazla miktara sahip ana hammaddesi olan ve her gün düzenli yüklenen süt sığırı gübresi üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Biyogaz tesisi dört bölümde incelenmiş bu bölümlerin her birinde bulunan tüm ekipmanların birinci ve ikinci yasa verimleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tesiste 1067 kW elektrik üretim gücüne sahip dört adet biyogaz motoru ve 7000 m³ hacime sahip üç adet ana çürütücü bir adet son çürütücü reaktörü bulunmaktadır. Biyogaz tesisinin anaerobik çürütme sistemlerinde enerji dengesinde verimlerinin %90-98 arası değiştiği, biyogaz motorlu kojenerasyon sisteminin enerji dengesinde birinci yasa veriminin %70,2 olduğu ve ikinci yasa veriminin de %48,8 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Biyogaz motorunun ürettiği güç, sıcak su enerjisi ve egzoz gazı kazanım güçleri katalog değerleri ile kıyaslanmış, gerçekleşen değerlerin katalog verileri ile %96,1 oranında benzerlik gösterdiği sonucu elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kojenerasyon Ünitesi, Anaerobik Çürütücüler, Birinci Yasa Verimi, İkinci Yasa Verimi.

CALCULATING THE EFFICIENCY OF A BIOGAS PLANT BY THE ENERGY AND EXERGY ANALYSIS METHOD

ABSTRACT

In this study, energy and exergy analysis methods and the first and second law efficiencies of thermodynamics were examined using real-time data of a biogas facility in Bingöl province. The biogas facility produces biogas under mesophilic conditions by processing 650 m³/day of liquid dairy cow manure, and electricity, hot water and steam energy are produced from the biogas obtained. In addition to dairy cow manure, the facility also processes other animal and plant-based wastes, but since these wastes come in variable quantities at variable periods, calculations were made on dairy cow manure, which is the main raw material with the highest amount by mass in the loading plan and is loaded regularly every day. The biogas facility was examined in four sections, and the first and second law efficiencies of all equipment in each of these sections were calculated separately. The facility has four biogas engines with 1067 kW electricity production power, three main digesters and one final digester reactor with a volume of 7000 m³. It has been concluded that the energy balance efficiency of the biogas plant in anaerobic digestion systems varies between 90-98%, the first law efficiency in the energy balance of the biogas engine cogeneration system is 70,2% and the second law efficiency is 48,8%. The power produced by the biogas engine, hot water energy and exhaust gas recovery powers were compared with the catalog values, and it was concluded that the realized values were 96,1% similar to the catalog data.

Keywords: Cogeneration Unit, Anaerobic Digesters, First Law Efficiency, Second Law Efficiency.

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan teknoloji ve rezerv kaygısı olan fosil kaynaklı yakıtlar, insanları daha sürdürülebilir ve tükenmeyen kaynaklar bulmaya zorunlu kılmıştır. Dünyanın fosil kaynaklar açısından gidişatı, insan ihtiyacının karşılanması için hızlı tüketim ve artan tüketimlerden dolayı kötüye gitmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara alternatif olabilir, daha temiz ve çevre dostu olmasından kaynaklı da giderek artan enerji maliyetlerini de azaltıcı yönden faydalar sağlayabilir. Dünya nüfusu her geçen yıl daha da artmakta ve enerji arzının da artışına sebebiyet vermektedir. Elektrik, doğalgaz, ısıtma vb. temel ihtiyaçların git gide arttığı günümüzde teknolojinin de gelişim hızıyla daha az kaynak kullanarak daha fazla enerji üretilmesi hedeflenmiş, bu konuda mühendislik çalışmaları büyük önem kazanmıştır. Ayrıca yeni enerji kaynağı bulmanın da yanı sıra mevcut enerjinin de verimli kullanılması büyük önem teşkil etmektedir. Kaynakları verimli kullanmak eldeki enerjinin daha uzun ömürlü ve rezerv kaygılarının daha uzun vadeli süreçlerde baş göstermesine de fayda sağlayacaktır. Enerjinin doğru kullanımı, gereksiz israf kullanımların tespiti için sistemler detaylı incelenmeli ve veri kayıtları düzenli tutulmalıdır. Farkındalık oluşturmak adına yanlış ve fazla enerji kullanımının doğuracağı sonuçların insan yaşamında ve gelecekte ne gibi etkilerinin olacağını bilmek gerekir.

Yenilenebilir enerji türlerinden biri olan biyokütle enerjisi son zamanlarda yaygınlaşmaya başlamış, çevre dostu enerji türü olarak fosil olmayan tüm organik maddelerin enerji arzı için kullanılmasına olanak sağlamıştır. Biyokütle olarak hayvansal atıklar, suda ve karada yaşayan bitkiler, orman atıkları ve endüstri atıklar kullanılabilir. Biyokütle atıklarının en büyük özelliklerinden biri tükenmeyen bir döngü ile sürekli olarak üretimi söz konusu olup, hem bu atıkların bertarafı hem de enerji üretimine olanak sağlamasıdır. Biyokütle enerjisi termokimyasal, biyokimyasal ve fizikokimyasal olmak üzere çeşitli yöntemlerle enerji dönüşümünde kullanılabilir. Bu dönüşümler ile atıklar fermentasyon, direk yakma veya gazlaştırma prosesleri ile arza karşılık verebilirler. İncelenen biyogaz enerji üretim tesisi atık hammaddesi olarak süt sığırları gübresi kullanan atık fermentasyon tesisidir. Süt sığırları çiftliklerinden gelen sıvı formundaki sıvı gübre anaerobik fermentasyon

yöntemiyle biyogaz enerjisine, elde edilen biyogaz enerjisi de diğer enerji formlarına dönüşmektedir. Biyogaz %40-70 metan (CH_4), %30-60 karbondioksit (CO_2) ve eser miktarda diğer gazları içeren [hidrojensülfür (H_2S), azot (N_2), oksijen (O_2)] bir gaz türüdür. Biyogaz havadan daha az yoğun ve kokusuz bir gazdır (Gülen ve Çeşmeli, 2012). Biyogazın yakıt olarak kullanılması mümkündür ve ısı değerini veren metan gazıdır. Metan gazı ideal gaz gibi davranır ve kritik şartlarda sıvılaştırılabilir. Atıkların fermantasyonu ile biyogaz elde edilir ve bu biyogaz çeşitli prosesler ile farklı enerji türlerine dönüştürülebilir. Bu dönüşümler elektrik enerjisi, termal enerji veya mekanik enerji olabilir. Anaerobik bakteriler yaşam formu olarak dünyanın varoluşundan beri varlık göstermişlerdir ve doğal yaşam döngüsünde aktif olarak rol almaktadırlar. Uygun proses tasarımları ile hayvansal, bitkisel, ormansal veya endüstriyel atıklar fermantasyon işleminden geçirilip biyogaz üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Bunun neticesinde diğer enerji kaynaklarına alternatif çevre dostu enerji elde edilmiş olur. Ayrıca atıkların sera gazı etkisinin de belirli oranda önüne geçilmesi söz konusudur.

Enerji verimliliği çalışmalarında sistemlerin tanımlanması ve işleyiş mekanizmasının etkilerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Çalışan sistemin kaç saat çalıştığı, akış bilgileri, ölçüm noktaları vb. bilgilerinin elde edilmesi, enerji verimliliği çalışmalarında öncesi ve sonrası kıyası yapmak konusunda çalışmayı yapacak kişiye büyük kolaylık sağlayacaktır. Enerji verimliliği çalışmasının önemli bir basamağı yaşam konfor alanını kısıtlamamaktır. Yani yapılacak çalışmada insan yaşam alanı ise mevcut standardı çok düşürmeden ihtiyaçları karşılayacak konfor alanı bozulmamalı, eğer çalışma bir sanayi kuruluşu ise çalışma düzeni ve üretim devamlılığı bozulmamalıdır. Bu konuda çalışmayı yapabilmek için en önemli etken sistemin tanımlanması ve buna uygun basamakların doğru şekilde belirlenmesidir.

Termodinamiğin birinci yasası enerji korunumuna dayanır ve enerjinin var veya yok edilemeyeceğini vurgular. Enerji analizi sistemin bütünü hakkında bilgi verir, enerjinin niceliğiyle ilgilenir, sistem içerisindeki tersinmezliklerden (entropi üretimi) meydana gelen kayıpları göz önüne almaz. Termodinamiğin ikinci yasası, bir hal değişimi sırasında enerjinin niteliğinin azalması, entropi üretimi ve iş yapabilme olanağının değerlendirilmesini analiz eder. Tersinir sistemlerin haricinde kullanılabilirlik (ekserji) enerji gibi korunmaz. Ekserjinin bir bölümü sistem içerisindeki tersinmezliklerden dolayı

yok olur, bir bölümü ise sistem sınırlarından çevreye atılır (ekserji kaybı). Ekserji analizi; ekserji kayıplarının yerini, tipini ve miktarını doğru bir şekilde belirleyebildiği için sistemlerin tasarlanmasında ve geliştirilmesinde kullanışlı bir metot olarak son zamanlarda yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Ekserji verimi, bir sistemin veya prosesin ideal şartlara ne kadar yaklaştığının bir göstergesidir. Ayrıca ekserji analizi yöntemi; bir sistemdeki termodinamik verimsizliklerin düşülerek daha verimli sistem tasarımının nasıl yapılabileceğini ve mevcut şartların doğru tanımlanmasını sağlamaktadır. Böylelikle önce analiz sonra değerlendirme sonrasın da ise iyileştirme çalışmaları yapılarak çalışan sistemin en verimli şekilde kullanımı hedeflenir (Rahim ve Gündüz, 2014).

Bu çalışmada da bir biyogaz tesisinin şeması oluşturularak, yakıt olarak biyogazın kullanımı, yakıt analizi sonrası girdi ve çıktıların belirlenmesi, her kademede çalışan ekipmanların birinci ve ikinci yasa verimleri incelenecektir. Bunun sonucun sistemin boşta enerjisi ve geri kullanıma uygun ya da verimsiz çalışması muhtemel ekipmanların tespiti yapılarak iyileştirme çalışmaları araştırılacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bir dizel motorlu kombine çevrim santralının ekserji analizini yapılmıştır. Bunun için on üç dizel motordan ve bir buhar türbininden oluşan santral temel bileşenlerine indirgenerek, giriş ve çıkış noktalarından sıcaklık, basınç ve debi değerleri kullanılmış. Bu değerler vasıtasıyla termodinamik özellikler, termodinamik özellikler vasıtasıyla da akımlara ait ekserjiler hesaplanmıştır. Hesaplanan ekserjiler, ekserji kayıpları ve dengesi ile kombine çevrim santralının ikinci yasa verimleri hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular ile iki adet öneride bulunulmuş ve atık ısıların değerlendirilmesi gerektiği açıklanmıştır (Güngör, 2013).

Türkiye’de çalışmakta olan bir termik santralin 2. Ünitesinde termoekonomik metodu uygulanarak ünite ekipmanlarının her birinin termoekonomik değerlendirmesi ve analizi yapılmıştır. Önce genel termodinamik kavramlar ve bağlantıları özetlenmiştir. Daha sonra enerji, ekserji, ekserji komponentleri ve termoekonomik hesaplama yöntemi bağlantıları ile verilerek özetlenmiştir. Uygulamada ise 27 düğüm noktasının tüm termodinamik özellikleri ile enerji ve ekserji değerleri hesaplanmıştır, sonrasında her bir ekipman için ayrı ayrı ekserji maliyetleri belirlenmiş, kayıp ve tahrip olan enerji ve ekserjiler bulunmuş, yok olan ekserji oranı belirlenerek eksergoekonomik faktörler çıkarılmıştır. Sonuç olarak ise düzenleme yapılacak ekipmanlar ile ilgili çözüm önerilerinde bulunulmuştur (Ünal, 2009).

Türkiye’de ilk kez kurulumu gerçekleştirilen mesken tipi bir mikro konejerasyon sistemi, 137 konutluk projeye uygulanarak enerji üretimi, ekonomiklik, ekserji analizi ve çevresel etki açısından incelenmiştir. 71 kWt ve 116 kWt kurulu güçlerine sahip mikro kojenlerde aylık ortalama tüketilen doğalgaza karşılık üretilen elektrik miktarı hesaplanmıştır. Bu sayede şebekeden çekilen elektrikte %51 oranında düşüş sağlanmıştır. Sistemin ekserji analizleri ile çalışan ekipmanlardaki ekserji yıkımları ve ikinci yasa veriminin bu yıkımlara bağlı olarak düştüğü görülmüştür. Sistemde iyileşme yapılması gerekli yerler tespit edilmiş, HT eşanjörü sistemi üzerinden ekserji yıkımının hesaplama sonucundan

arttırılması ile toplam sistem veriminin de artacağı tespit edilmiştir. Bununda doğrudan ikinci yasa verimini artırıcı sonucu olduğu görülmüş ve hesaplanmıştır (Kaplan, 2020).

İstanbul'da bulunan EÜAŞ Ambarlı Doğalgaz Kombine Çevrim Santralinin termodinamik çevrimi incelenmiş, enerji ve ekserji hesaplamalarıyla Cycle-Tempo 5.0 bilgisayar yazılımı ile sonuçları incelenmiştir. Ambarlı Kombine Çevrim santralinin veri izleme merkezinden alınan kayıtlarla ve ölçülemeyen değerler ise tasarımından alınan kayıtlarla akış şeması çizilmiş, sonrasında CT programı ile enerji ve ekserji analizi hesaplatılmıştır. Gerçekleştirilen bu enerji ve ekserjiye dayalı termodinamik analiz sonucunda santrali oluşturan ekipmanlarda oluşan tersinmezlikler ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir. Bu sayede santrali oluşturan ekipmanlarda iyileştirmelere uygun olanlar üzerinde yorumlamalar getirilmiştir (Çiloğlu, 2019).

Biyogaz yakıtlı içten yanma motorlu bir kojenerasyon tesisinin enerji ekserji analizi yapılmış, hesaplaması yapılan tesis Varna Atıksu Arıtma tesisidir. Atıksu arıtımı yan ürünü olarak elde edilen biyogaz kojenerasyon sistemde değerlendirilmiştir. İlk olarak termodinamik çözümleme yapabilmek için sistemin akış diyagramı oluşturulmuş ve akım noktaları belirlenmiştir. Sonrasında her akım noktası için enerji ve ekserji denklemleri oluşturulmuş. Daha sonra sistemdeki ekserji yıkım oranı ve ekserji dengesi hesaplanmıştır. Atıksu arıtma tesisinde yapılan bu çalışma ile kojenerasyon sistem komponentlerinin ekserjitik performansları bulunmuş, biyogaz yakıtlı motorların tesisteki ekserji yıkım oranı en yüksek üniteler olduğu tespit edilmiştir. Motor çalışma parametrelerindeki küçük iyileştirmeler ile termodinamik performansta da artışlar sağlanacağı öngörülmüştür (Doseva and Chakirova, 2015).

Gerçek bir doğalgaz içten yanmalı motorla çalışan araştırma hastanesi kampüsünde kullanılan trijenerasyon sistemin elektrik, ısıtma ve soğutma güçleri tasarlanmıştır. İlk olarak bu sistemin süreç akış diyagramı temel çalışma prensiplerini açıklamak için oluşturulmuş, daha sonra sistemin tüm alt basamakları için enerji ve ekserji analizleri hesaplanmıştır. Termodinamik analizde sistemin gerçek işletme verileri kullanılmış, termal verimliliğin %49,3 elektrik veriminin %43,6 ve ekserji veriminin %47,97 olarak hesaplandığı görülmüştür. İlk yatırım maliyetleri de göz önüne alındığında bu verim hesapları ile sistemin geri ödemesinin 1,57 yıl olduğu hesalanmıştır (Özgözaşı, 2019).

Atık su arıtma tesisinde üretilen biyogazın elektrik ve hidrojen üretiminde kullanımının termodinamik ve termoekonomik analizi ve optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Geliştirilen prosedür ve formüller Gaziantep'te bulunan gerçek bir kentsel atık su arıtma tesisine ve biyogaz tahrikli gerçek bir kojenerasyon sistemine uygulanmıştır. 220000 m³ atık suyu arıtan GASKİ arıtma tesisinde günde ortalama 10000-18000 m³ arası biyogaz üretilmekte, üretilen biyogazdan yıllık ortalama 8760 GWh elektrik üretilmektedir. Yapılan enerji ve ekserji analizlerine biyogaz tahrikli Kojenerasyon motorunun toplam ekserji verimi %46,2 olarak bulunmuştur. Yapılan termoekonomik analizlerle de arıtılmış atık suyun ve üretilen elektriğin birim ekserji maliyetleri sırasıyla 3,804 \$/m³ ve 25 \$/GJ olarak hesaplanmıştır. 7 ayrı hidrojen üretim modeli geliştirilmiş ve bu modellerin termodinamik ve ekonomik analizleri gerçek işletme ve maliyet değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Demir, 2012).

Biyogaz yakma ve geri kazanım süreçlerinin termodinamik olarak analiz edilmesi üzerine yapılan bir çalışmada, sisteme termoekonomik ve ekserjetik bir bakış açısı ile yaklaşılmıştır. Sonuçlar elde edildiğinde kazanın tersinmezlik ve ekserji yıkımının ana kaynağı olduğu görülmüştür. Ayrıca yanma odasından çıkan egzoz gazının geri kazanımının ekserji ve enerji döngüsünde önemli bir yere sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışma ile sisteme entegre stirling motoru entegre edilmesinin uygulanabilirliği üzerine çalışılmıştır. Atıksu arıtma tesisinde sistemin sürdürülebilir olması ile mikro-kojenerasyon sisteminin, enerji tasarrufuna katkı sağlayabileceği tespit edilmiştir (Colmenar-Santos, Zarzuelo-Puch and Borge-Diez, 2015).

Gaziantep Belediyesine bağlı hayvansal atık kaynaklı Oğuzeli Biyogaz Enerji Üretim Santarlinde gerçek veriler kullanılarak biyogaz tesisi ekserji analizi yapılmıştır. Tesiste günlük 150 ton hayvansal atık bertaraf edilmekte ve 14400 m³/gün biyogaz enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir. Kojenerasyon sistemi ile yılda 7200 MWh/yıl elektrik enerjisi üretilmektedir. Yapılan analizlerle Kojenerasyon sisteminin ikinci yasa verimi %22,53 olarak hesaplanmıştır. Anaerobik çürütme sisteminin ekserji verimliliği incelendiğinde ise atık hammaddesinin miktarına ve çeşidine bağlı olarak kimyasal ekserjisi değişkenlik göstereceğinden ekserji verimliliğinin hesaplanması makul görülmemiştir. Ekserji analizi ile tesisin ekonomik analizleri hesaplanmış olup yatırım geri dönüş süresinin 3,7 yıl olduğu hesaplanmıştır (Mavigök, 2022).

Tahran'da belediyeye ait bir atık su arıtma tesisinin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel analizi yapılmış, yapılan bu çalışmada anaerobik çürütücüler ve kombine ısı ve güç üniteleri incelenmiştir. Bu çalışmada asıl amaç atık su arıtma tesisinin enerji ve ekserji verimini, yıllık karlılığını ve geri dönüş sürelerini tahmin etmek ayrıca çalışma koşullarındaki değişiklikler incelenmiştir. Tesis 3100 m³/gün primer ve sekonder çamur karışımı (%4,5 katı madde, %81,2 organik katı madde) ile 4,6 MWh elektrik üretimi ve 2,1 MWh termal güç üretildiği görülmüştür. Sankey ve Grassman diyagramları ile tesisin genel ekserji verimi %17,3 olarak gösterilmiş. Ayrıca CO₂ emisyonlarında da geleneksel enerji tesislerine göre %64 oranında azaltımın olduğu tespit edilmiştir. Ekonomik analizlerde üretilen elektriğin 0,125 \$/kWh fiyattan şebekeye satıldığı, satın alınan elektriğin ise 0,081 \$/kWh olarak teşvik kapsamında alındığı görülmüştür. Bu durumda ekonomik analizlerle geri ödeme süresinin 2,4 yıl olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca seviyelendirilmiş elektrik fiyatı hesabı yapılmış ve 0,127 \$/kWh olarak hesaplanan bu değerin Uluslar Arası Enerji Ajansının raporları ile benzerlik gösterdiği de görülmüştür (Sanaye and Yazdani, 2022).

Biyogaz, çeşitli kombine enerji santralleri için cazip bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak pratikte kullanılmaktadır. Modife edilmiş organik rankin çevriminin fizibilite çalışması yapılmış, ısı kaynağı olarak %60 CH₄ + %40CO₂ içeren biyogaz yakıt olarak kullanılmıştır. Sistemin performansını ve maliyetini analiz etmek için termodinamik ve termoekonomik analizler kullanılmış. Tüm komponentlerin ikinci yasa analizleri ve ekserji yıkımı incelenmiş en fazla yıkım olan bölümün yanma odası olduğu görülmüştür, sonrasında ise ısı geri kazanım sisteminin yıkımının fazla olduğu tespit edilmiştir. Sistemden 1368 kW net elektrik güç üretimi, bunun sonucunda sırasıyla termal verim, ekserji verimi ve ürün maliyetlerinin, %41,83, %38,91 ve 17,2 \$/GJ olduğu hesaplanmıştır (Golizadeh, Vajdi and Mohamadkhani, 2019).

3. BİYOGAZ ENERJİSİ

Biyokütlenin oksijensiz ortamda uygun bakteriler yardımı ile çürütülmesi sonucu açığa çıkan renksiz, havadan daha az yoğun olan, yanıcı olan gaz biyogazdır. Biyogaz içerisinde %40-70 CH₄ (metan), %30 - 60 CO₂ (karbondioksit), %1-2 N₂ (azot), %1-2 O₂ (oksijen) ve eser miktarda H₂S gazları içeren bir gaz türüdür. Biyogaz enerji üretim kaynağı olarak hayvansal atıklar, bitkisel atıklar, orman atıkları, endüstri atıkları kullanılabilir. Biyogazın içerisindeki metan oranına göre ısıl gücünde değişiklik görülür, metan arttıkça ısıl gücü de artar. Biyogazın yoğunluğu ortalama 1,22 kg/m³, ısıl değeri ise değişken metan oranına göre (%50 CH₄, %40 CO₂) 21 MJ/kg'dır. (Kıran, Stamatelatos, Antonopoulou and Lyberatos, 2016).

Bileşen	Oran
Metan (CH ₄)	%45-65
Karbondioksit (CO ₂)	%30-40
Hidrojen sülfür (H ₂ S)	%1<
Oksijen (O ₂)	%0-2
Azot (N ₂)	%0-5
Hidrojen (H ₂)	%0-1

Tablo 3.1. Biyogazın içeriği (Günel, 2017)

Biyogazın enerji kaynağı olarak kullanılması için çeşitli enerji dönüşüm araçları kullanılmaktadır. İnsan arz ve ihtiyacına göre mekanik enerji, elektrik enerjisi, termal enerji ve kinetik enerji dönüşümleri gerçekleştirilebilir. Biyogaz yanıcı bir gazdır ve bu özelliği ile içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanımı oldukça yaygındır. Motorlu taşıtlarda ve evlerde kullanımı için biyogazın saflaştırılması gereklidir. Biyogazın zenginleştirilmesi yani metan oranının artırılıp karbondioksit oranının düşürülmesi ile yüksek kalorifik değerli yakıtlar elde edilebilir. Bu sayede biyogaz yüksek metan içeriği ile doğalgazın kullanım alanlarında doğalgaza alternatif yakıt türü olarak da kullanılma imkânı sunar.

3.1. Biyogaz Oluşumu

Biyogazın oluşum prosesi çok sayıda aşamada gerçekleşmektedir. Şekil 3.1’de bu aşamalar belirtilmiştir. Bu esnada prosesin bütününe bir olumsuzluğa meydan vermeyecek şekilde gelişmesi için tek tek bozunma aşamalarının birbirleri ile çok uyumlu olması gerekir. Bunların ilki olan hidroliz aşamasında karbonhidratlar, proteinler ve yağlar, fakültatif bakteriler ve hidroliz bakterileri tarafından daha basit moleküller olan alkol, aminoasit, şeker ve uzun zincirli yağ asitlerine dönüştürülürler. Substratın hidrolizi süresince farklı türde bakteriler, hücre dışında etkili enzimler üreterek rol alırlar. Karbonhidratların hidrolizi için, selülaz, hemiselüloz, ksilenaz ve amilaz enzimleri *Clostridium*, *Acetivibrio* ve *Staphylococcus* bakterilerini kapsayan bakteriler tarafından üretilir. Proteinlerin yıkımı için proteaz enzimi, *Clostridium*, *Vibrio*, *Peptococcus*, *Bacillus*, *Proteus*, and *Bacteroides* gibi bakteriler tarafından üretilmektedir. Ayrıca yağların parçalanması için ise lipaz ve fosfolipaz enzimleri, *Clostridium*, *Micrococcus* ve *Staphylococcus* bakterileri tarafından üretilmektedir (Çakmak, 2019).

Asit oluşum aşamasında, hidroliz aşamasında oluşan daha basit yapılı küçük moleküller, bütirik asit, asetik asit ve propiyonik asit olarak uçucu yağ asitlerine dönüştürülürler. Uçucu yağ asitleri yanı sıra asetat ve alkollerde bu aşamada meydana gelmektedir. Asit oluşum aşamasında görev yapan bakterilere *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfuromonas* ve *Streptococcus* bakterileri örnek olarak verilebilir. Uçucu yağ asitleri, asit oluşum aşamasında *Syntrophobacter* ve *Syntrophomonas* gibi bakteriler yardımıyla asetat ve hidrojene dönüştürülür. Asit oluşturan bakteriler kısmi hidrojen basıncına karşı duyarlıdır. Düşük kısmi hidrojen basıncı koşullarında H_2 ve CO_2 meydana getirirlerken, yüksek kısmi hidrojen basıncı koşullarında bütirik, karbonik, propiyonik, valerik asit ve etanol üretebilirler. Ancak metan oluşturan bakteriler, yüksek kısmi hidrojen basıncı koşulunda yaşayabilir ve sadece asetat, H_2 ve CO_2 ’i kullanabilirler. Asit oluşturan bakteriler ile metan oluşturan bakteriler arasında sintrofi ismi verilen bir birlikte yaşam birlikteliği bulunur. Asit oluşum evresi, metan oluşturan bakterilerin yaklaşık %70’i bu evrede asetatın azalmasıyla oluştuğundan önemlidir (Çakmak, 2019).

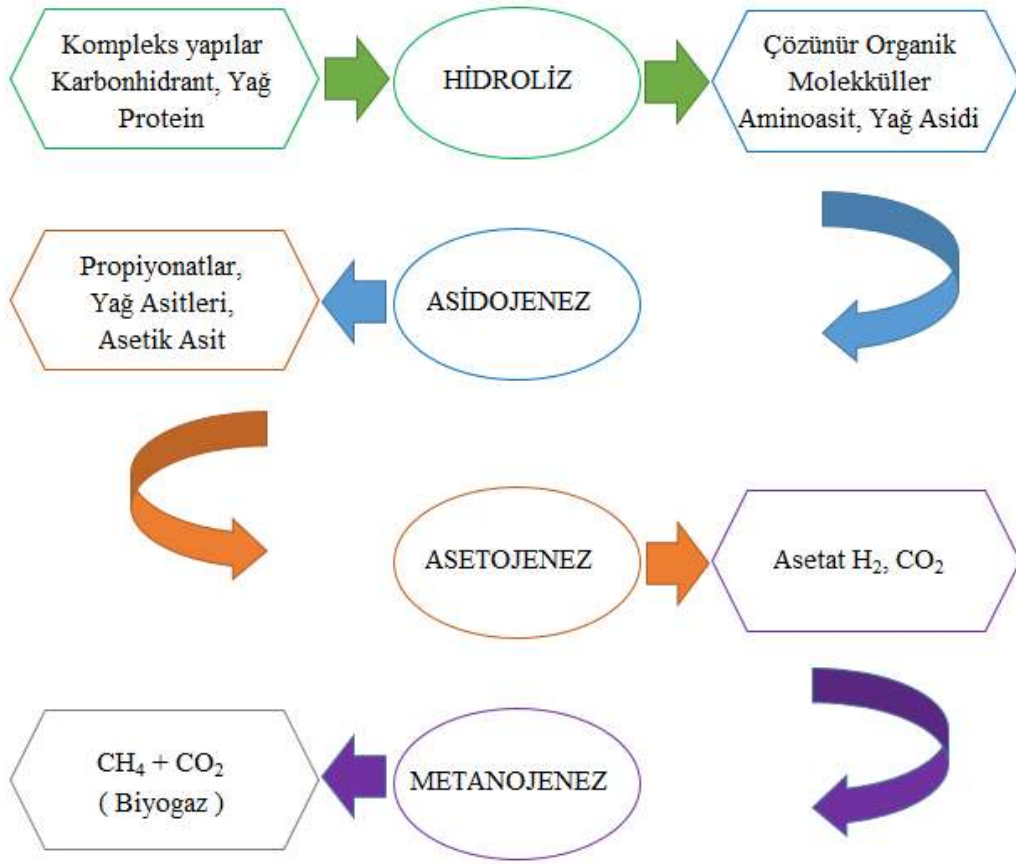
Metan oluşum aşamasında, asit oluşumuyla ortaya çıkan asetik asit, H_2 ve CO_2 ara ürünleri, CH_4 ve CO_2 ’e dönüştürülür. Ara ürünleri metana dönüştürme işleminde *Methanotrix*,

Methanosarcina, Methanospirillum, ve Methanosaeta gibi asetoklastik metanojen bakterileri görev almaktadır. Bu metanojen bakterileri tek hücreli ve prokaryotik canlılardır. Metan üretiminin yaklaşık %70'inden sorumludurlar. Hidrojenotropik metanojenler ise H_2 ve CO_2 ara ürünlerinden oluşan CH_4 'ün meydana gelmesinde görev alırlar ve metan üretiminin yaklaşık %30'undan sorumludurlar (Çakmak, 2019).

Biyogazın ham maddelerinin içeriğindeki organik bileşenlerden karbon en önemli kaynaktır. Biyogazın metan içeriği %40-80 arası değişkenlik gösterebilir. Metan oranının artışı ile biyogazın kalorifik değeri de artmaktadır. Biyogazın içeriğindeki sülfür ise istenmeyen bileşiktir. Sülfür korozif özelliği ile temas ettiği yüzeylerde aşındırma etkisi gösterir. Bu nedenle biyogaz içerisindeki sülfür oranının uzaklaştırılması daha temiz biyogaz eldesi için önemlidir. Biyogaz içindeki oksijen ise %2 altında bir hacimde olması istenmektedir. Çünkü %6 ve üzeri değerlerde oksijen biyogaz içerisindeki diğer bileşen olan metan ile tepkimeye girerek patlayıcı etkiye neden olabilir. Biyogaz bir yakıt türü olarak kullanılabilmektedir, içerisindeki metan sayesinde kalorifik değeri hesaplanabilir ve diğer yakıt türleri ile kıyaslanabilir. Biyogazın enerji değerini veren en önemli bileşeni olan metan oranına göre kalorifik değeri farklılaşabilir, metan oranı ne kadar yüksek karbondioksit oranı ne kadar düşükse o kadar enerji değeri yüksek yakıt elde edilir. Ayrıca biyogaz yakma işlemi sonrası farklı enerji türlerine dönüşebilir, bunların başlıcaları elektrik, buhar ve araç yakıtıdır. Biyogazın eşdeğer enerji değerleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Biyogaz	Eşdeğeri
Propan	0,25 m ³
Benzin	0,75 litre
Motorin	0,66 litre
Tezek	12,3 kg
Odun	3,47 kg
Gaz Yağı	0,62 litre
Elektrik	4,70 kW

Tablo 3.2. Biyogaz enerji eşdeğeri (Bilgin, 2003)



Şekil 3.1. Biyogaz oluşum aşamaları (Öztürk, 2008)

3.2. Biyogaz Oluşumuna Etki Eden Faktörler

Biyogaz oluşumu için gerekli koşulların sağlanması gerekir. Anaerobik ortamda oluşacak olan biyogaz, sistemin kesikli veya sürekli olarak yüklenmesi, bunun sonucunda da uygun pH değeri, sıcaklık ve çevre şartlarına sahip olarak üretilir. Biyogaz oluşum süreci kademelidir ve tüm parametrelerin eksiksiz koşul şartlarda gerçekleşmesi oldukça önemlidir, oluşum aşamalarında meydana gelecek sorunlar diğer aşamalara geçişte, proseste ve mikroorganizmaların yaşamsal döngülerinde olumsuz etkiler meydana getirebilir. Biyogaz oluşumuna etki eden parametreler sırasıyla;

- Sıcaklık
- PH değeri
- Karıştırma etkisi

- Bekleme süresi
- Yükleme oranı
- C/N oranı

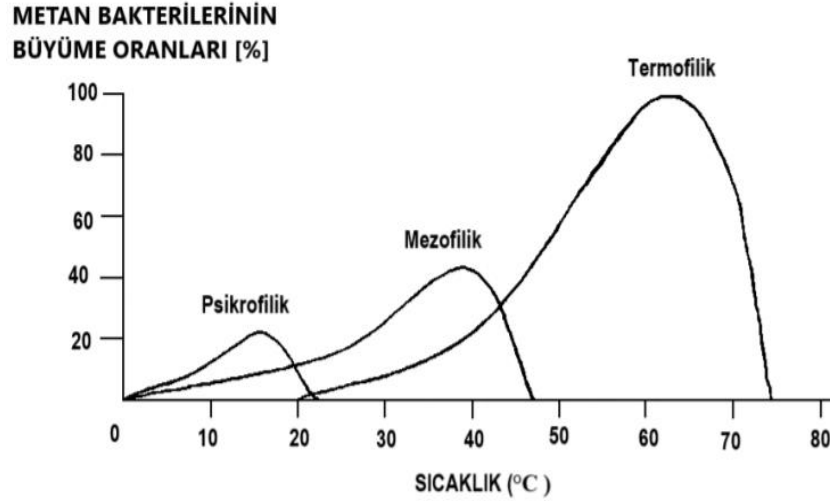
3.2.1. Sıcaklık

Sıcaklık etkisi olarak bakıldığında, mikroorganizmalar ve enzimler sıcaklığa göre faaliyet gösterir ve uygun olmayan sıcaklıklarda bozulmalara uğrarlar. Sıcaklık doğrudan substrat parçalanmasına ve yaşamsal faaliyetlere etki eder. Sıcaklığın artması ve azalması doğrudan metan oluşum hızına ve miktarına etki eder. Bu nedenle proseslerde sıcaklık kontrolü sıkça kontrol edilmeli ve keskin düşüşlerin önceden tespit edilerek önlemlerin alınması gereklidir. Bakterilerin uygun olmayan sıcaklık bölgelerinde faaliyet göstermesi bir süre sonra inhibasyona neden olmakta ve biyogaz üretimi yavaşlayarak durma noktasına gelir. Düşük sıcaklıklarda ayrıca asitleşme gerçekleşir ve bu asitleşme metan fazına geçişte sorunlara neden olmaktadır. Biyogaz oluşumu için 3 farklı çalışma koşulu söz konusudur. Bunlar psikrofilik, mezofilik ve termofilik çalışmadır.

1. Psikrofilik Fermantasyon: Bu çalışma şartlarında psikrofilik bakteriler 3-20 °C arasında aktivasyon gösteriyor olup çürütme hızı oldukça düşüktür. Bu çürütme hızı 100-300 gün arası değişkenlik gösterir.

2. Mezofilik Fermantasyon: Bu çalışma şartlarında mezofilik bakteriler 20-40 °C arasında aktivasyon gösterir. Çürütme hızı 20-40 gün arasında değişkenlik gösterir. En çok uygulanan çalışma koşuludur çünkü hem çürütme hızı idealdir hem de ısıtma ihtiyacı için gerekli termal enerji sağlanabilir düzeydedir. Optimum biyogaz verimi için 35-40 °C arasında çalışılması önerilir.

3. Termofilik Fermantasyon: Bu çalışma koşulunda termofilik bakteriler 40-70 °C’de aktif çalışırlar. Çürütme hızı oldukça yüksektir ve 5-15 gün arasında değişkenlik gösterir. Ancak istenen sıcaklık düzeyine ulaşmak için oldukça fazla termal enerjiye gerek duyulduğundan ve enerji maliyetleri göz önüne alındığında uygulaması mezofilik çalışmaya göre daha azdır. Ayrıca termofilik çalışmada atıkların bekleme süresi daha düşük olduğundan sistemin kontrolünü çok sık yapmak gereklidir.



Şekil 3.2. Anaerobik fermentasyon prosesleri için sıcaklık aralıkları (Batstone and Angelidaki, 2011).

3.2.2. PH Etkisi

PH etkisi olarak bakıldığında, biyogazın oluşum hızına pH doğrudan etkilidir. pH ortamdaki çözünmüş hidrojen iyonunu ifade eder ve bakteri aktivasyonu için oldukça önemlidir. Biyogaz oluşumunda farklı bakteri popülasyonları simbiyotik yaşam tarzında birlikte yaşarlar ve her birinin kendine uygun pH aralığı vardır. Asidojeniz aşamasında pH düşer ve ortamda artan asit miktarını tamponlamak için sisteme daha yüksek pH değerinde atık verilmelidir. Asidojeniz bakterileri 5,2-6,3 pH aralığında aktif olurken, metanojeniz bakterileri 6,5-8,0 pH aralığında aktif olurlar. Bu nedenle sistemde pH aralıkları iyi takip edilmeli ve buna göre reçeteler hazırlanmalıdır. Bir prosesin tek veya çok aşamalı olmasından bağımsız olarak, sistemin içindeki pH değeri anaerob bozunma esnasında oluşan alkali ve asitli metabolizma ürünleri tarafından otomatik olarak ayarlanır. Bu dengenin ne kadar hassas olduğunu ise aşağıdaki zincirleme reaksiyon ortaya koymaktadır. Örneğin prosese çok kısa bir sürede çok fazla organik malzeme eklendiğinde ya da metan oluşumu başka bir nedenden ötürü engellendiği takdirde, fermentasyonun asitli metabolizma ürünleri zenginleşir. Normal şartlarda pH değeri nötral alandaki karbonat ve amonyak tarafından ayarlanır. Sistemin tamponlama kapasitesi dolduğunda, yani çok fazla organik asit oluştuğunda, sistemin pH değeri düşer (Koçar vd., 2010).

3.2.3. Karıştırma Etkisi

Karıştırma etkisi olarak prosesler bakterilerin en etkin şekilde çalışması için uygun oranda karıştırarak çökmelerin azaltılması, materyallerin bakterilere temasının en yaygın şekilde yapılabilmesi ve köpük oluşumunun engellenmesi oldukça önemlidir. Bakterilerin yaşamsal fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için ne çok hızlı ne de çok yavaş karıştırmak etkili olmaz, bu nedenle uygun oranda hız belirlenir ve materyal tüm sisteme olabilecek en homojen şekilde yayılarak ölü bölge kalmayacak şekilde karıştırılır. İyi ve uygun miktarda karıştırma biyogaz oluşumu %50 oranında arttırılabilir (Koçar vd., 2010). Fermantörlerde karıştırma için gerekli hesaplar, tankın hacmi, içeri yüklenen materyalin miktarı ve toplam katı madde miktarı ile ilişkilidir. Yoğun katı madde içeriğine sahip viskozitesi yüksek atıklar etkin karıştırmak için güçlü motor tahrikli karıştırıcılar, daha düşük katı maddeli atıklar için ise daha düşük motor gücüne sahip karıştırıcılar tercih edilir. Bu enerji sarfıyatı konusunda da oldukça önemlidir, netice itibari ile fermantör içerisinde katı madde oranının %10 civarlarında tutulması hem daha homojen karıştırma etkinliği sağlar hem de biyogaz veriminde artış gerçekleştirir.

3.2.4. Bekleme Süresi

Anaerobik sistemlerde bekleme süresi biyogaz oluşum miktarına doğrudan etkilidir. Bekleme süresi metonjenez fazında bakterilerin maksimum miktarda metan üretmesi için gerekli besin maddesinin hazırlanması için geçen süredir, materyal fermantör içerisinde ne kadar uzun süre beklerse metan gazı oluşumu o kadar fazla gerçekleşir, ancak bu süre sıcaklığa bağlı olarak bir süre sonra metan üretiminin organik parçalanmanın son bulması ile değişmez. Bekleme süresinin uzun tutulmasının dezavantajları da vardır, bunlardan ilki sisteme eklenen materyal miktarında azalma ve fermantör boyutlarının da hacim olarak artması gerekliliğidir. Bekleme süresi doğrudan fermantör hacmi ve bu hacmin günlük eklenen materyal miktarına bölünmesi ile ifade edilir.

$$\text{Bekleme süresi} = \frac{\text{Reaktör hacmi}}{\text{Günlük debi}} \text{ (gün)} \quad (3.1)$$

Bu nedenle maksimum metan üretimi için sistemin doğru tasarlanması gerekir, aksi halde hızlı yükleme ve düşük bekleme süresi atıkların tam çürümeden ve metan gazının tam alınmaması ile verimsiz çalışması ile sonuçlanır.

3.2.5. Yükleme Oranı

Yükleme oranı birim metreküp çalışma hacmine bir zaman dilimi için kaç kilogram organik kuru madde beslemesi yapılması gerektiğini belirler (Koçar vd. 2010). Sisteme yüklenecek atıkların katı madde oranı ve organik içeriği yükleme oranını doğrudan etkiler. Çünkü sistemler tasarlanırken, kuru fermentör, yarı yaş fermentör ve yaş fermentör olarak tank içerisindeki materyalin katı madde oranı ile ilişkili olarak tasarlanır. Yaş fermentörlerde yükleme oranı daha fazla iken sistem kuru fermentöre yaklaştıkça yükleme oranı da düşecektir. Çünkü fazla yükleme sistemde çökmeye sebebiyet verecek sonuçlar doğurabilir. Bunların başında aşırı asit oluşumu, pH düşmesi, bakteri yetersizliği sonucu metanojenez fazına geçişin mümkün olmaması gibi etkenler gelir. Bu nedenle uygun fermentör hacmine maksimum metan eldesi verimi için uygun miktarda atık yüklemek en doğru olanıdır. Bu oranın doğruluğu yapılacak olan FOS/TAC analizleri ile belirli sürelerde takip edilebilir. FOS/TAC analizleri sistemdeki organik yükün ve uçucu yağ asidi oluşumunun, biyogaz içerisindeki metan miktarı verisi ile prosesin uygun oranda yüklenilip yüklenilmediğini gösterir.

$$\text{Yükleme oranı} = \frac{\text{Günlük debi} \times \text{Organik Madde Oranı}}{\text{Reaktör hacmi}} \text{ (kg/m}^3\text{.gün)} \quad (3.2)$$

3.2.6. C/N Oranı

Karbon biyogaz üretiminin en önemli kaynağıdır. Organik atıkların enerji muhtevasını gösteren temel yapı taşıdır. Azot ise bakteri üremesi ve büyümesi için gerekli elementtir. Mikroorganizmaların ihtiyaç duyduğu azot miktarı bakterilerin vücut ağırlıklarının %11'i kadardır. C/N oranı 23/1 den büyük ve 10/1 den küçük olmamalıdır. Bakteriler için C/N oranının dar olması uygun ortam oluşturacağından bakterilerin ayrıştırma hızını arttırıcı etki yapacaktır. C/N oranının 23/1 den fazla olması çürümeyi olumsuz etkileyeceğinden ve 10/1 den düşük olması da bakterileri üzerinde engelleyici etki yapacağından C/N oranının

bu aralıkta tutulması gerekmektedir (Anonim, 2021). Tablo 3.3'te bazı hayvansal ve bitkisel kaynaklı atıkların C, N, C/N oranı verilmiştir.

Atıklar	C/N oranı	%N kuru	%C kuru
İdrar	1	15	15
Kan	3	12	36
Kesimhane Atığı	8	8	64
Balık Atığı	8	7	56
Çiftlik Gübresi	14	3	42
Kümes Hayvanı Gübresi	14	6,5	87,5
At Gübresi	15	2,3	33,4
Sığır Gübresi	18	1,66	30
Domuz Gübresi	20	3,8	76
Koyun Gübresi	22	3,8	83,6
Güvercin Gübresi	25	2	50
Yer Fıstığı Kabuğu	20	2	40
Ağaç Yaprağı	50	1,5	75
Pirinç Samanı	60	0,3	18
Yulaf Samanı	120	1,05	50,4

Tablo 3.3. Bazı atıkların C/N oranları (Öztürk, 2008)

4. BİYOGAZ TESİSLERİ

Biyogaz üretimi için tasarlanmış, çeşitli parametreler ile en uygun biyogaz üretimi, reaktör hacmi, bekleme süresi ve yükleme hızlarının hesaplandığı, bunun neticesinde kurulmuş tesislerdir. Bu tesisler atığın ilk sisteme yüklendiği ve biyogazın enerji kaynağı olarak kullanılması sonucu elektrik ve ısı enerjisinin üretildiği tesislerdir. Biyogaz tesislerinin temelini oluşturan ana bölümler ve bu ana bölümlerin doğru çalışmasını sağlayan çeşitli ekipmanlar bulunmaktadır. Bunlar;

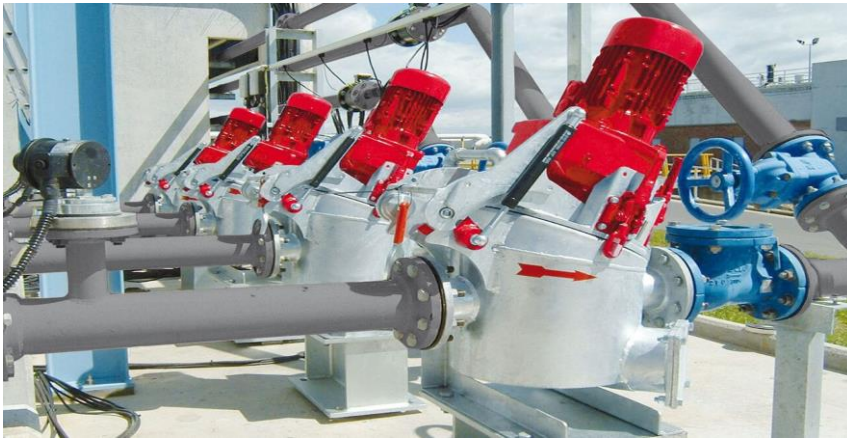
- Ön ayrıştırma ve hazırlama üniteleri
- Anaerobik reaktörler
- Biyogaz depolama sistemleri
- Enerji dönüşüm makineleri

Ön ayrıştırma ve hazırlama üniteleri: Biyogaz tesislerinde ham maddelerin ilk olarak sisteme giriş yaptığı, içerisindeki inorganik materyallerin arındırıldığı ünitelerdir. Bu aşamada atık ham maddeleri karıştırma, öğürtme, parçalama, kimyasal dozajlaması gibi işlemlerden geçerek anaerobik reaktöre yüklenir. Bakterilerin uygun substrat kullanımı için atık ham maddelerinin küçük parça boyutunda olması biyogaz üretim sürecini hızlandırmaktadır, bu nedenle özellikle bitkisel kökenli lignoselülozik yapıllı atıklar parçalanmalı ve öğütülmelidir. Parça boyutunun 2-6 cm olması fermantasyon işleminde büyük kolaylık sağlamaktadır (Koçar vd., 2010). Bu aynı zamanda atıkların hidrolik bekleme süresini de kısaltır çünkü daha düşük yüzey alanına sahip atık ham maddesi bakteriler için daha hızlı parçalama olanağı sağlar. Bu ön işlemler fiziksel olarak helezonlu, bıçaklı veya silindir yapıllı parçalama ve öğütme ekipmanlarıyla, kimyasal olarak asit, alkalin veya solvent gibi dışardan kimyasal desteği ile hemiseliloz ve lignin bağlarının koparılmasını hızlandırmasıyla gerçekleştirilir. Atıkların uygun parça büyüklüklerine getirilmesinin ardından diğer bir önemli işlem etkin karıştırma ve atığı homojen forma getirmektir. Bir biri ile karışım olarak hazırlanan atık yükleme çalışmalarında etkin bir şekilde atıkların homojen karışması biyogaz üretim hızını arttırmaktadır. Aynı zamanda

homojen hale gelmiş ilk atık ham maddesi anaerobik reaktörlere beslenirken pompa gibi akışkan transferi sağlayan ekipmanların çalışması için uygun katı madde oranına getirilmelidir. Bu sayede uygun viskozite sağlanır ve pompa ile akışkan transferi gerçekleştirilir. Atık transferi öncesinde proste fermentasyon hızını arttırmak için atıklar hidrolize uğrar ve ön parçalama gerçekleşir. Böylece atıkların içeriğindeki karbonhidrat, yağ ve proteinler temel yapıtaşlarına ayrılır. Hidroliz işlemini hızlandırmak için ön hazırlama havuzlarında ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Ayrıca atık ham maddelerini uygun pH değerine getirilmesi için kimyasal takviyesi işlemleri de ön atık hazırlama ünitelerinde gerçekleşir. Atıkların asidik veya bazik formda olması neticesinde tampon kimyasallarla (asit, kostik) kimyasal takviyesi yapılarak anaerobik ayrışma yapan bakterilerin yaşam koşullarını sürdüreceği pH aralığına getirilmesi sağlanır. Ön ayrıştırma ve hazırlama üniteleri bir sonraki safhada ki proseslerde biyogaz üretim işlemini oldukça hızlandırabilir.



Şekil 4.1. Katı atık besleme ünitesi (Hochreiter)



Şekil 4.2. Katı atık parçalayıcı (Vogelsang)

Anaerobik reaktörler atık ham maddelerinin oksijensiz ortamda uygun pH değerinde ve sıcaklıkta bekletildiği tanklardır. Bu tanklarda atıklar çürütülerek biyogaz üretimi sağlanır. Ancak biyogaz üretimi için gerekli şartların eksiksiz yerine getirilmesi gereklidir. Bu şartların başında simbiyotik yaşayan bakterilerin yaşamsal faaliyetleri için uygun pH değerinin sağlanması gelir. Ön hazırlama ünitelerinde sağlanan bu şart ayrıca anaerobik reaktör içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonrasında da değişebileceği için kontrolü ve takibi gerekir. Çünkü asidojenez fazında ortamda asit oluşumu görülür ve buda pH değerini aşağı değere çekebilir. Ayrıca amonyak etkisiyle pH değerinde yükselme görülür ve bunu aşağı değere çekmek gerekebilir. Reaktörlerde sürekli kimyasal reaksiyonlar gerçekleşmesi, bakterilerin ve enzimlerin yapısını bozmayacak şekilde aktif çalışmasını olumsuz etkileyebilir. Bakteri popülasyonunun devamlılığını sağlaması için yapısının bozulmaması gerekir. Bunun için anaerobik reaktörlerin uygun sıcaklık değerinde tutulması da önemli bir konudur. Psikrofilik, mezofilik veya termofilik çalışacak şekilde kurgulanmış reaktörlerde çalışma sıcaklıklarının sağlanması için ısı enerjisine ihtiyaç duyulur. Bu ısı enerjisi bir kaynaktan alınarak, eşanjör veya tank içerisine yerleştirilmiş serpantin borulama sistemi ile tank içerisine verilir ve karıştırıcılar yardımıyla homojen şekilde yayılır. Bu sıcaklıklar sınır değerleri aşmadan optimum şekilde sağlanmalı, sınır değer altına veya üstüne çıkması durumunda enerji girişi kesilmelidir. Unutulmamalıdır ki tank içerisinde kimyasal reaksiyonların, bağların kopması sonucunda da ısı enerjisi oluşur ve anaerobik reaktörün içerisinde sıcaklık artışlarına sebep olur. Anaerobik reaktörlerin hacminin belirlenmesinde en önemli unsur yüklenecek atık materyalin cinsi ve parçalanması için gerekli hidrolik bekleme süresinin sağlanması için günlük yüklenecek atık ham madde miktarının belirlenmesidir. Anaerobik reaktörlere atık yüklemesi kesikli besleme ve sürekli besleme olarak iki çeşittir. Kesikli besleme de atık ham maddesi reaktöre belirli aralıklarla ve araya zaman girerek yüklenir, içerde çürüyen atıktan biyogaz tamamıyla alındıktan sonra çürüyen atık dışarı alınarak yeni atık ham maddesi beslemesi yapılır, bu nedenle biyogaz üretim rejimi düzenli değildir. Sürekli akışlı sistemlerde ise günlük belirlenen miktarda atık sisteme sürekli yüklenir ve sistemden çıkış aynı ölçüde düzenli olarak yapılır, bunun neticesinde daha düzenli biyogaz üretimi sağlanır. Biyogaz üretim reaktörleri kesikli veya sürekli besleme rejimi belirlendikten sonra günlük beslenecek miktar belirlenir ve reaktör hacmi hesabı yapılır. Hidrolik bekleme süresi en etkin biçimde belirlenirse biyogaz üretim miktarı o derece verimli gerçekleşir, bu nedenle doğru reaktör hacmi belirlemek oldukça önemlidir.

$$\text{Reaktör hacmi} = \text{Günlük beslenen atık} \times \text{Bekleme süresi} \quad (4.1)$$

Reaktör hacmi belirlendikten sonra tasarım biçimi belirlenir. Anaerobik reaktörler tasarlanırken betonarme veya çelik silolar şeklinde tasarlanabilir.



Şekil 4.3. Anaerobik reaktör

Önemli nokta biyogaz ile temas eden yüzeylerin oksitlenmesine karşı koruma önlemleri almak ve uzun ömürlü reaktörler tasarlamaktır. Bu nedenle reaktör tankları içeriden uygun önleyici kaplamalarla kaplanır. Ayrıca ısı kaybını önlemek için reaktörün dış yüzeyi ısı yalıtım malzemeleri ile kaplanır, bu sayede ısı kaybı azaltılmış olur. Reaktörlerde bir diğer unsur etkin karıştırma ihtiyacıdır büyük hacimli reaktörlerde karıştırmayı etkin yapmak yüksek miktarda atık ham maddesi yüklenmesi durumunda reaktör içerisinde ölü nokta bırakmadan homojen karışımı sağlamak ve bakteriler için substrat parçalama hızını hızlandırmak, bir diğer faydası da içerideki ısıtmanın tüm reaktör boyunca dağılımının daha doğru yapmak amaçlıdır.

Anaerobik reaktörlerde üretilen biyogaz anlık olarak değişken değerleri görebilir, pik yaptığı üretim zamanlarında biyogazın bir miktar depolanması proses yönetimi konusunda önemlidir. Bu aynı zamanda biyogazın başka bir enerji türüne dönüşümü konusunda esneklik sağlar ve daha planlı hareket edilmesine olanak sağlar. Gaz depolama sistemleri

anaerobik reaktöre entegre olabildiği gibi harici bir şekilde de kullanılabilir. Depolama sistemi bir membran, çelik ya da betonarme yapıdan imal edilir. Önemli olan biyogaz basınç değeridir ve bu basınca göre depolama sistemi belirlenir. Düşük basınçlarda depolama kauçuk, vinil ya da plastik yapılı membranlar ile sağlanır. Bu membranlar kar yükü, rüzgâr hızı ve dış etkenlere karşı dirençli yapıda olmalıdır ve ani basınç yükselmeleri ya da vakum durumlarında emniyet ventili yardımıyla korunmalıdır. Daha yüksek basınçlarda depolama sistemi betonarme ve çelik yapıda imal edilir. Bunların dayanım mukavemeti membran teknolojisine göre daha fazladır. Gaz depolama sistemleri hacimleri literatürde farklı ölçütler dikkate alınarak belirlenir, bunların bazıları günlük üretilen biyogaz miktarının %40-60'ı kadarını depo edebilecek kadar, bazılarında ise üretimin 1/3'ü kadar gazı depolaması hedefine göre belirlenir (Koçar vd., 2010). En yaygın kullanımı ise günlük biyogaz üretim miktarının yarısını depolayacak sistemlerdir. Bu hacimler kullanıcının tüketimine göre değişkenlik gösterecektir, çünkü tüketici sürekli kullanım ile mi yoksa günün belirli zamanlarında depolayıp tüketecek şekilde mi planlayacağını kendi belirler. Depolanan gazın basıncını ve hacmini gösterecek çeşitli düzenekler mevcuttur, bunların en yaygını basın ve seviye transmitterleridir. Bunlar elektronik olarak ultrasonik veya elektromekanik çalışma prensibine dayanarak gaz deposunun içerisindeki basıncı ve gaz seviyesini kullanıcıya anlık olarak gösterebilir. Bu sayede depolama sistemlerindeki güvenlik önlemleri sağlanır. Çünkü biyogaz üretimi her zaman stabil bir çizgide gerçekleşmez, hızlı reaksiyon gösteren çabuk parçalanabilir materyaller hızlı biyogaz oluşumu gerçekleştirir ve eğer üretilen bu biyogaz anlık kullanılamazsa yüksek basınç ve hacimde gaz depolama tanklarının patlamasına veya deformasyona uğramasına sebebiyet verebilir. Depolanan gazın kullanım noktasına transferi için ise biyogaz borulama hatları kullanılır. Bu hatlar yeraltı ve yer üstü olmak üzere taşınmasının belirlenmesi ile boru için seçilecek malzemenin tayini gerçekleşir. Biyogazın çelik malzeme ile taşınması oksijen ile temas anında oksitlenmeye sebebiyet vereceğinden paslanmaz çelik kullanılması önemlidir. Yer altı hatlarında ise pvc yapılı malzemeler ile biyogaz taşınabilir.

Enerji dönüşüm makineleri, üretilen biyogazın kullanılarak ısıtma, elektrik üretimi ve mekanik güç üretimi gibi enerji türlerine çevrilmesi için kullanılan makinelerdir. Biyogaz yanıcı bir gazdır ve uygun miktarda oksijen ile tepkimeye girerek gerekli ateşleme sıcaklığından yanar. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılan biyogaz, içeriğindeki metan oranına göre enerji üretir. Biyogaz tesislerinde enerji dönüşüm cihazları olarak

biyogaz motorları, gaz türbinleri ve biyogaz yakıtlı brülörlü kazanlar kullanılır. Bunlar tüketicinin ihtiyacı doğrultusunda seçilir. Biyogaz doğalgaza alternatif olarak kullanılabilir. Evlerde, endüstride ve sanayide geniş kullanım alanlarına sahiptir. Isı kazanlarında yakıt olarak biyogaz kullanılır ve yakılan biyogazdan sıcak su, buhar vb. enerji taşıyıcı akışkanlar üretilir. Biyogaz yakıtlı brülörler hava/yakıt oranına göre uygun ateşleme ile gazın yanması prensibine dayanır.



Şekil 4.4. Biyogaz yakıtlı brülör

Bir diğer enerji dönüşüm makinesi gaz türbinleridir. Gaz türbinleri dünya çapında oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Çalışma prensibi havanın çevreden uygun miktarda ve basınçta çekilmesi ile kompresöre aktarılması ile basıncının artırılarak yanma odasına girmesi, daha sonra yanma odasına hava/yakıt oranına uygun miktarda biyogaz eklenerek yanma tepkimesi gerçekleşir. Yanma sonucunda açığa çıkan yüksek sıcaklıklı egzoz gazı türbine girer ve kompresörün gücünden fazla bir güç meydana getirir. Fazla olan bu güç bir mil yardımıyla jeneratöre bağlanır ve elektrik enerjisi üretimi için gerekli mekanik güç sağlanmış olur. Türbinler ağır korumalı malzemeden üretilmiş olup yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklıdır. Biyogazın yanma odasında etkin yanması için metan oranının yüksek olması önemlidir. Aksi takdirde eksik hava ile düşük verimli yanma gerçekleşecektir. Biyogaz motorlarına göre dezavantajı düşük elektrik verimleridir. Çünkü türbinler ortalama %30-35 elektrik verimi ile çalışırlar. Ancak türbinlerin kullanım ömrü biyogaz motorlarına göre daha uzundur. Bakım maliyeti yönünden de avantajları vardır.



Şekil 4.5. Elektrik üretim türbinleri (GE)

Biyogazın enerji dönüşümü konusunda en yaygın makine kullanımı biyogaz motorlarıdır. Biyogaz motorları çok silindirli içten yanmalı motor mantığı ile çalışırlar ve yakıt olarak biyogazı kullanırlar. Biyogaz uygun hava miktarı ile karışarak karbüratörden turboşarj ünitesine daha sonra sıcaklığı ve basıncı artırılarak silindir bloklarına girerler. Ateşleme bujisi ile ateşleme yapılır ve dört zamanlı motor hareketi ile krank miline mekanik güç tahriki verir. Bu mekanik güç motor miline bağlı jeneratör rotoruna aktarılır ve sabit manyetik alan içerisinde hareket eden rotor elektrik enerjisi üretir. Biyogaz motorları aynı zamanda gömlek suyu ve gaz soğutma suyunu müşteriye ısı gücü olarak verir. Bu gömlek suyu 50 °C ve 90 °C suyu olarak ısıtma ihtiyacında kullanılır. Biyogaz motorları elektrik verimi ortalama %35-40 arası, termal verimi ise %25-45 arasındır. Ayrıca yanma sonucu açığa çıkan egzoz gazı da atık ısı olarak değerlendirilebilir. Yaklaşık 550 °C çıkan egzoz gazı bir kazan veya eşanjör yardımı ile karşı beslemeli akışı ısıtarak sıcak su, buhar ve ihtiyaca göre başka enerji taşıyıcıları ısıtabilmektedir. Biyogaz motorları hem elektrik üretimi hem termal enerji üretimi ile %60-65 verimlerde çalışabilirken, egzoz gazının geri kazanımı ile bu verim %80-85 mertebelerine kadar artabilir.



Şekil 4.6. Biyogaz motoru (Jenbacher)

Kojenerasyon sistemlerde giren enerjinin bir kısmı elektrik enerjisine, bir kısmı ısı enerjisine geri kalan kısmı ise atık ısı ve kaybolan ısı olarak çıkar. Atık ısının değerlendirilmesi ile toplam verim %65'lerden %80-85 civarlarına ulaşabilmektedir. Kojenerasyon sistemlerin kullanımı oldukça yaygın olup hastanelerde, otellerde, büyük alışveriş merkezlerinde, sanayide, elektrik üretim merkezlerinde kullanılabilir. Kojenerasyon sistemlerinin en büyük avantajı ayrı ayrı üretimlerde meydana gelen verim kaybını arttırmaktır. Örneğin elektrik ve ısının ayrı üretildiği sistemlerde toplam verim %55-65 arasında iken kojenerasyon sisteminde aynı anda üretim ile toplam verim % 80'e kadar arttırılabilmektedir, bu sayede daha yüksek verimli çalışma sağlanır.



Şekil 4.7. Elektrik ve ısı enerjisi ortak kojenerasyon sistem



Şekil 4.8. Elektrik ve ısı enerjisi ayrı üretimi

Kojenerasyon sistemlerin en büyük faydası birleşik sistemler olduğu için ayrı ekipman kurulumu gibi maliyetlerden de kar elde edilmesidir. Enerji arzının bu denli önemli olduğu günümüzde birleşik enerji türlerinin tek kaynaktan sağlanması endüstride oldukça faydalıdır. Yakıtın sisteme girmesi ile dönüşüme uğramasının oranı, sistemde kullanılmayan boşa enerji miktarını da belirtir. Bu sayede boştaki enerjinin de dönüştürülebileceği yeni enerji türleri üzerine araştırma olanağı sağlar.

5. TERMODİNAMİK KAVRAMLAR

5.1. Birinci Yasa

Termodinamik ısı, iş, sıcaklık ve enerji gibi alanlarla ilgilenen bilim dalıdır. Bu kavramlar insan hayatının her yerinde yer alır ve oldukça önemlidir. Günlük yaşantı alışkanlarında ve gereksinimlerinde kullandığımız bu kavramların bilimsel olarak açıklanması ve ihtiyaçlar için gerekli çalışmaların yapılması için termodinamik bilimini iyice kavramak gerekir. Dünyada bulunan hemen her şeyin belirli bir enerjisi vardır. Bu enerji başka bir enerji türüne dönüşünce iş yapmış olur ve bunun sonucunda insan hayatı devam eder. Cismin durmasından kaynaklı potansiyel enerjisi, hareketinden dolayı kinetik enerjisi devreye girer, bu enerji dönüşümleri sanayide yaygın şekilde insan hayatını kolaylaştıracak ekipmanların üretilmesinde kullanılabilir. Elektrik ihtiyacı için mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşmesi, ısınma ihtiyacı için kimyasal enerjinin termal enerjiye dönüşümü bunlara örnek olarak verilebilir. Ancak önemli husus şudur ki dönüşen enerjiden maksimum fayda sağlamak için dönüşme miktarını ve kayıpları bilmek gerekir. Bu enerji kaynağını daha doğru kullanma ve elde edilecek enerji türünden en verimli şekilde yararlanma olanağı sağlar. Doğanın en temel ilkelerinden biri enerjinin korunumu ilkesidir. Bu ilke ile enerjinin asla yok olmayacağı bir türden başka bir türe dönüşebileceği açıklanır. Bu dönüşüm esnasında toplam miktar değişmez. Birinci yasa enerjinin niceliğinin önemini vurgulayan yasadır. Enerjinin korunumuna örnek olarak bir taşın yüksekten aşağı düşerken enerjisinin değiştiğini ama toplam enerjinin değişmediği gösterilebilir. Potansiyel enerjinin bir bölümü kinetik enerjiye döner ve mevcut konumunun değişmesi bir iş yaptığını gösterir. Önemli noktalardan biri de toplam enerji kavramıdır. Bir sistemin belirlenen bir referans hale göre yaptığı iş, sistemin enerji değişimine, sistemin toplam enerjisi de o an yaptığı net işe eşit olur.

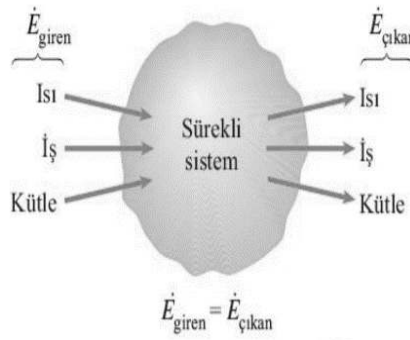
Enerji dönüşümleri insan ihtiyacı için oldukça önemlidir, doğalgazın yanması ile açığa çıkan enerji suyun ısıtılmasında kullanılır, bu kimyasal enerjinin termal enerjiye dönüşümü ile mümkün olur. Benzer şekilde arabalardaki yakıtın yanması ile ısı enerjisi üretilir ve bu

enerji pistonları hareket ettirerek mekanik enerji elde edilmesi sağlanır. Ama şu unutulmamalıdır ki toplam enerji değişmez, sadece kullanılabilirlik söz konusudur. Enerjinin kullanılmayan kısmı çevreye iletilir. Yakıtların tam yanması sonucu enerji değerinin bir kısmı mekanik enerjiye çevrilirken geriye kalan ısı enerjisi çevreye iletilir. Böylece sistemin toplam enerjisi değişmez ve bu enerjinin korunumu yasasıdır. Enerji dönüşümünde en önemli konu enerjinin olabildiğince yüksek verimde ve en az kayıpla dönüşüme uğramasıdır. Bu nedenle sisteme giren enerji ve çıkan enerji ölçülerek sistemdeki enerji değişimi bulunur ve çıkan enerjinin fazla değerinde tutularak bir enerji kaynağından en iyi verimle faydalanılmak istenilir.

Enerji dengesi şu şekilde ifade edilebilir;

(Sisteme giren toplam enerji) – (Sistemden çıkan toplam enerji) = Sistemdeki enerji değişimi

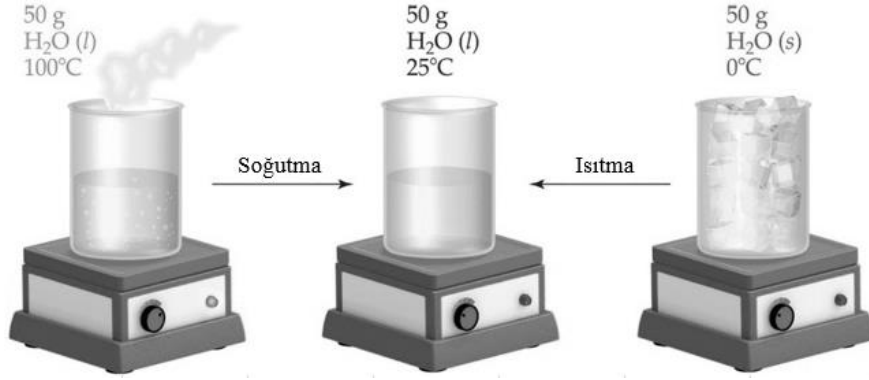
$$E_g - E_{\dot{c}} = \Delta E_{\text{sistem}} \quad (5.1)$$



Şekil 5.1. Kütle ve enerji korunumu (Çengel ve Boles, 2008)

Sistemlerde enerji değişimi son hal ve ilk hal arasındaki enerjilerin farkının alınması ile hesaplanır.

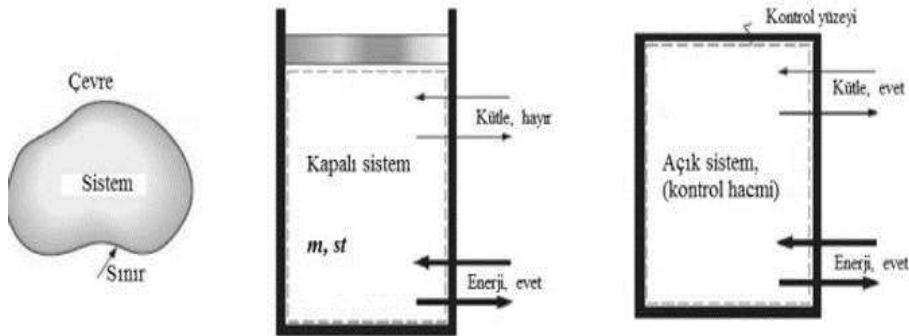
$$\Delta E_{\text{sistem}} = E_{\text{son}} - E_{\text{ilk}} \quad (5.2)$$



Şekil 5.2. Sistemdeki enerji değişimi (İşgör, 2020)

Enerji geçişleri farklı yollarla gerçekleşmektedir. Bunların başlıcaları ısı geçişi, iş geçişi, kütle akışıdır. Isı geçişi ile sisteme enerji geçişi oluyorsa sistemin moleküllerinin enerjisi artar ve böylece sistemin iç enerjisinde artış olur. Eğer sistemden ısı kaybı oluyorsa enerji dışı doğru aktarıldığından sistemin iç enerjisinde azalma görülür. İş geçişinde ise bir sisteme iş geçişi varsa sistemin enerjisi artar. Eğer iş sistemin mevcut enerjisi ile gerçekleşiyorsa sistemin enerjisi azalır. Bir pistonun hareket etmesi, milin dönmesi, elektriğin direnç gücünü aşarak taşınması sistemin iş yaptığını gösteren örnekler olarak gösterilebilir. Kütle akışı ise sisteme giren ve çıkan kütlenin toplam sistemin enerjisini değiştirdiğini gösterir. Giren ve çıkan her kütle beraberinde enerji taşıdığı için sistemin enerjisini de değiştirir (Çengel ve Boles, 2008).

Termodinamik sistem, içerisinde ısı ve enerji depolanabilen sistemler olarak tanımlanır. Bu sistemler kapalı sistem ve açık sistem olarak ikiye ayrılır, kapalı sistemlerde herhangi bir kütle akışı söz konusu olmayıp ısı ve iş geçişi mümkün olabilen sistemlerdir. Açık sistemlerde ise enerji ve işin yanı sıra kütle akışı da gerçekleşen sistemlerdir.



Şekil 5.3. Kapalı ve açık sistemler (Çengel ve Boles, 2008)

5.2. İkinci Yasa

Termodinamiğin ilk yasası enerjinin niceliğini vurgularken, ikinci yasa ise niceliğin yanında enerjinin niteliğinin (miktarının) da önemli olduğunu vurgular. Bu sistemde kullanılan enerjinin kullanılabilirliğinin de bir ölçüdür, sisteme giren enerjinin ne kadar faydalı işe çevrilmiş ne kadarı ise boşta hesaplamalarının yapılması kaynak kullanımında ve enerjinin en verimli şekilde kullanılmasında oldukça önemlidir. İkinci yasa Kelvin-Plank ifadesinne göre bir sistemin %100 verimle çalışması olanaksızdır ve sadece bir kaynaktan alınan enerji ile net iş üretmesi olanaksızdır (Çelik, 2015). Enerjinin dönüşümünde %100 verim elde edilmemesine örnek olarak yakıtların yanması sonucu açığa çıkan egzoz gazı verilebilir. Yakıtın yanması ile enerjinin bir bölümü mekanik enerjiye çevrilirken kullanılamayan kısmı egzoz gazı olarak yüksek ısıda çevreye iletilir. İkinci yasa hesaplamaları ile egzoz gazında çevreye atılan kullanılmayan ısının niteliği belirlenebilir, mekanik enerjiye dönüşen miktarın verimi hesaplanır ve sistemde kullanılması mümkün olan başka alternatifler geliştirilebilir. Aynı zamanda ikinci yasa enerjinin dönüşü yönün tayininde de önemlidir. Enerji transferi belirli bir yönde gerçekleşir ve sistemin düzensizliğine değişim olur.

Entropi kavramı sistemdeki moleküllerin düzensizliğinin bir ölçütüdür. ‘S’ ile ifade edilir. Bir sistemin entropi değişimi o sistemdeki düzensizliğin belirlenmesi ile ikinci yasa veriminin hesaplanmasını sağlar. Entropi değişimi sıfırdan küçük, sıfıra eşit veya sıfırdan büyük olabilir.

Entropi üretimi;

$$S_{\text{üretim}} = \dot{m}(s_{\text{ç}} - s_{\text{g}}) + \frac{\dot{Q}_{\text{çevre}}}{T_{\text{çevre}}} \text{ [kJ/kg.K]} \quad (5.3)$$

Yukardaki denklemde, $T_{\text{çevre}}$ referans çevre sıcaklığını, $\dot{Q}_{\text{çevre}}$ çevre ısını, $\dot{m}$ kütledebili, $s_{\text{ç}}$ ve s_{g} ise sırasıyla sistemden çıkan ve giren entropileri ifade etmektedir.

Entropi değişimi;

$$\Delta S = s_2 - s_1 \quad [\text{kJ/kg.K}] \quad (5.4)$$

Entropi korunumu söz konusu olan bir davranış değildir. Entropi sadece ideal durum olan tersinir hal değişimi sırasında korunur. Ayrıca entropi hal değişimi sırasında görülen tersinmezliklerin ölçüsüdür. Tersinmezlik artınca entropi de artar. Entropi üretimi ise hal değişimi sırasında düzensizliğin artması ilkesine dayanır (Çengel ve Boles, 2008).

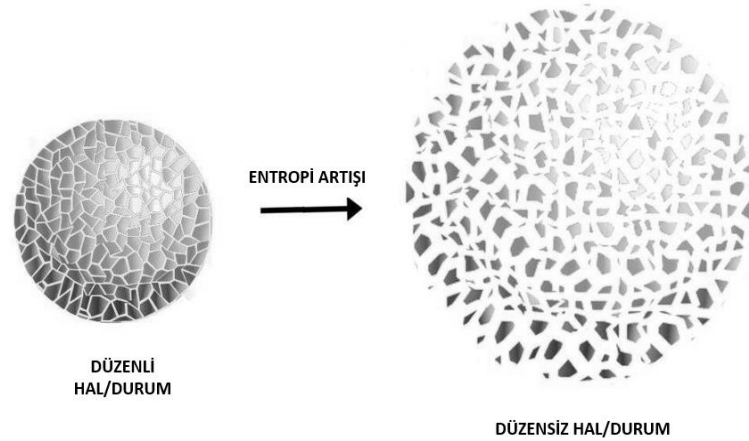
Bu nedenle entropi üretimi;

$\Delta S_{\text{üretim}} > 0$ Tersinmez hal değişimi

$\Delta S_{\text{üretim}} = 0$ Tersinmez hal değişimi

$\Delta S_{\text{üretim}} < 0$ Gerçekleşmesi olanaksız hal değişimi

Entropi hal değişiminin katıdan gazı doğru geçişi doğrultusunda artmaktadır. Bunun temel nedeni moleküllerin aralarındaki boşluğun rastgeleliğinin artmasıdır. Çünkü moleküller gaz fazı geçerken daha kararsız bir hale dönüşürler.



Şekil 5.4. Hal değişimi ile entropi değişimi (Çengel ve Boles, 2008)

5.3. Enerji

Enerji temel olarak bir sistemin iş yapabilme yeteneğidir. Vardan yok, yoktan var edilemez ancak şekil değiştirir. Enerji ısı, elektrik, mekanik, kinetik, potansiyel, kimyasal enerji gibi çeşitli şekiller alabilir. Bunların hepsi madde varoluşundan gelen ve bir birine dönüşebilen

kavramlardır. Bir maddenin sahip olduğu tüm bu enerji kendisinin toplam enerjisini oluşturur. Literatürde enerji birim kütle referans alınarak hesaplanır. Örneğin bir sistemin hareketinden kaynaklı enerjisi onun kinetik enerjisini, yanması sonucu açığa çıkan enerji ısı enerjisini, hareketli bir aksamaya tahrik olarak aktarılması mekanik enerjisini gösterir. Ayrıca her maddenin birde iç enerjisi vardır, iç enerji sistemin mikroskobik enerjilerinin tümüdür. Bir nevi moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Doğada her maddenin bir iç enerjisi vardır ve 'U' ile gösterilir.

Bir sistemin yüksekliğinden veya konumundan dolayı sahip olduğu enerji potansiyel enerjidir.

$$PE = m \times g \times h \text{ [kJ/s]} \quad (5.5)$$

Formülü ile gösterilir. Burada; m: kütle (kg), g: yer çekimi ivmesi (m/s^2) ve h: yükseklik (m) olarak ifade edilir. Birimi 'joule'dur .

Kinetik enerji bir sistemin hareketinden dolayı kazandığı enerjidir. Maddenin potansiyel enerjisinin hareketi ile kinetik enerjiye dönüşümü söz konusudur.

$$KE = m \frac{V^2}{2} \text{ [kJ/s]} \quad (5.6)$$

Formülü ile gösterilir. Burada; m: kütle (kg), V: hız (m/s) olarak ifade edilir. Birimi 'joule'dur .

Mekanik enerji, mekanik bir cihazla, doğrudan ve tamamen mekanik işe dönüşebilen enerji biçimi olarak tanımlanır. Kinetik ve mekanik enerjinin benzer biçimidir. Mekanik enerji akışkanlar için de iş yeteneği olarak tanımlanabilir. Akış enerjisi ile mekanik enerji benzer terimler olarak da kullanılabilir. (Çengel ve Boles, 2008).

$$MEK = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + g \times h \text{ [kJ/s]} \quad (5.7)$$

Formülü ile gösterilir. Burada; P/p : akış enerjisi, $V^2/2$: kinetik enerji, $g \times h$: ise akışkanın potansiyel enerjisini belirtmektedir.

Elektrik enerjisi birim zamanda geçen elektron miktarını belirtir. Birimi Watt'tır. Elektrik enerjisi elde etmek için sabit ya da hareketli bir manyetik alan içerisinde iletken bir telin hareket etmesi gereklidir. Bu hareket enerjisini bir mekanik enerji dönüşümü ile elde etmek mümkündür. Elektrik enerjisi;

$$P = V \times I \text{ [Watt]} \quad (5.8)$$

Formülü ile gösterilir. Burada V : gerilim (Volt), I : akım (Amper) olarak ifade edilir.

Enerji insan ihtiyacının her alanında olan bir kavramdır. İhtiyaca göre çeşitli dönüşümler halinde kullanılabilir. Enerjinin birimi joule'dir. Ancak dönüşümleri ile çeşitli şekillerde farklı birimler alabilir. Örneğin elektrik enerjisinin birimi Watt, ısı enerjisinin birimi kaloridir. Enerji verimi kavramı ise elde edilmek istenen enerjiyi sağlamak için harcanması gereken değere oranı ile belirlenir.

$$\text{Enerji verimi} = \frac{\text{Elde edilmek istenen enerji}}{\text{Harcanan toplam enerji}} [\%] \quad (5.9)$$

Bu değer çeşitli enerji türlerinde dönüşümler için de oldukça önemlidir. Bir yakıtın yanması ile elde edilecek ısı enerjisi o sistemin yanma verimini gösterir. Bu değer yakıtın oda sıcaklığına birim miktar için yanması ile çevreye verilen ısı ve yanma sonrası oluşan ürünlerin oda sıcaklığına tekrar soğutulması ile hesaplanır.

$$\eta_{\text{yanma}} = \frac{\dot{Q}}{HV} = \frac{\text{Yanma boyunca verilen ısı}}{\text{Yakıtın ısı değeri}} [\%] \quad (5.10)$$

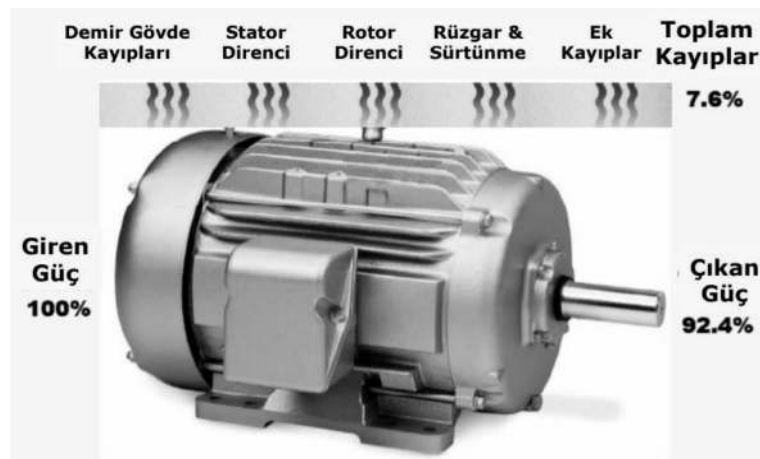
Enerji verimi aynı zamanda çalışan makinelerin de çalışma verimleri üzerinde hesaplama yapma imkânı sunar. Bir güç santralinde yakıtın yanması ile elde edilen enerji değerinin elektrik gücü miktarına oranı ile sistemde elektrik üreten jeneratörün yüzde kaç verimle çalıştığını gösterir. Aynı zamanda mekanik güçten elektrik gücüne dönüşümde de ne

kadarlık verim kaybı olduğu hesaplanabilir. Günlük kullarımdaki cihazların büyük çoğunluğunda enerji verimi belirtilmektedir. Bu verim cihaza verilen birim enerjinin ne kadarının kullanım için dönüştüğünün ölçütüdür. Verimi yüksek ekipmanlar kullanmak enerji kaynaklarını daha tasarruflu kullanma imkânı sunar. Bu aynı zamanda çevreye duyarlı olma ve maliyetlerin düşürülmesi açısından da büyük öneme sahiptir.

Mekanik cihazlarda enerji verimi alınan enerjinin verilen enerjiye oranı ile hesaplanır;

$$\eta_{\text{mekanik}} = \frac{\text{Alınan mekanik enerji}}{\text{Verilen mekanik enerji}} [\%] \quad (5.11)$$

Alınan enerji verilenden her zaman düşük olmak zorundadır, çünkü enerjinin ikinci yasa veriminde hiçbir cihazın %100 verimle çalışamayacağı belirtilmiştir. Aradaki kayıplar sürtünme, ısı kayıplar vb. kayıplar olarak tanımlanabilir. Verim farklı iki enerji türünün bir birine oranı ile de belirlenebilir. Örneğin bir elektrikli soğutma fanında giren elektrik enerjisinin çıkan havanın kinetik enerjisi ile oranlanması, verilen enerjinin ne kadarının kinetik enerjiye dönüştüğünü ve fanın yüzde kaç verimle çalıştığının hesaplanmasını sağlar. Enerjinin hemen her alanında verim hesapları kullanılmakta ve verimin artırılması için çalışmalar yapılarak daha az kaynakla daha fazla enerji elde etme yöntemleri geliştirilmektedir.



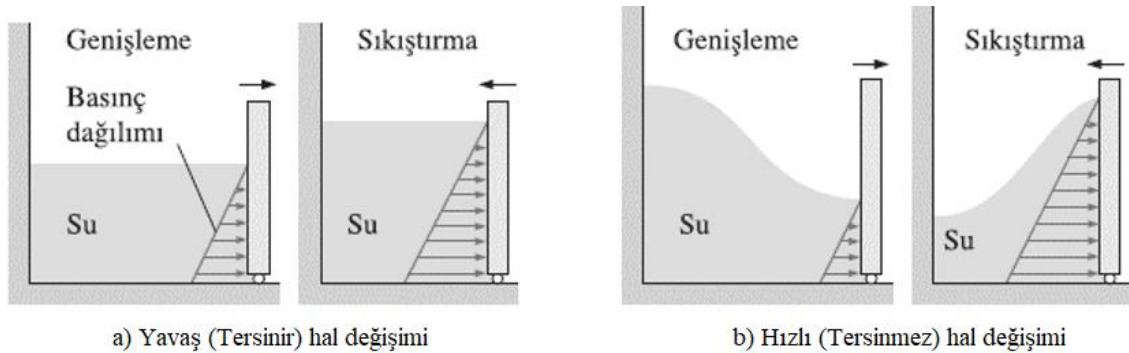
Şekil 5.5. Motorlarda enerji kayıpları (Enerji Verimliği Raporu, 2012)

5.4. Ekserji

Ekserji kavramı bir enerjinin kullanılabilirliğini ifade eder. Enerjinin ne kadarının faydalı işe çevrileceğinin hesabını yapmak için ekserjiden yararlanılır. Enerjinin kullanılmayan kısmı enerji olarak adlandırılır ve atık ısı olarak çevreye verilir. Enerjinin iş potansiyeli sistemden elde edilebilecek maksimum yararlı iş olarak bilinir. Bu iş potansiyelinin belirlenmesi için önce maddenin hal değişimi yaparken referans bir duruma göre durumunun belirlenmesi gerekir. Bu referans hal ölü hal bir diğer adıyla çevre koşulu olarak adlandırılır. Hesaplamalarda sistemin ölü hale göre konumu ne kadar faydalı iş yapabileceğini gösterir. Aksi belirtilmedikçe ölü hal 25 °C sıcaklık 1 atm basınç olarak tanımlanır ve sistemin diğer tüm özellikleri sıfır kabul edilir. Sistemin ölü halden ne kadar uzak veya yakın olduğuna göre yapabileceği iş tanımlanabilir. Ölü haldeki sistemler iş yapmazlar. Bir sistem belirli başlangıç halinden, çevresinin haline, yani ölü hale geçtiği bir tersinir hal değişimi geçirdiğinde, o sistem yapabileceği en fazla işi elde etmiş olur (Çengel ve Boles 2008). Ekserji de önemli kavramlardan ikisi de tersinir ve tersinmez iş kavramlarıdır. Bu kavramlar sistemin en ideal çalışması için tanımlanmıştır. Tersinir iş bir sistemin başlangıç halinden son haline geçişi süresince yapabileceği en fazla işi tanımlarken, tersinmezlik ise tersinir işten yararlı işin çıkarılması ile elde edilen bir diğer değişle ekserji yok oluşuna eşit kavram demektir.

$$\text{Tersinmezlik} = \text{Tersinir İş} - \text{Yararlı İş}$$

$$I = W_{tr} - W_{yr} \quad (5.12)$$



Şekil 5.6. Tersinir ve tersinmez hal değişimleri (Yılmaz, 2018)

İkinci yasa verimi hesaplamalarında ekserji kullanılmaktadır. Birinci yasa veriminde enerjinin dönüşüm verimi hesaplanırken, ikinci yasa veriminde enerjinin etkinliği hesaplanır. Gerçek ısı verimin, aynı koşullarda referans haline göre yapabileceği en fazla ısı verime oranı şeklinde de tanımlanabilir. Yani bir makinenin ya da sistemin yaptığı işin yapabileceği işe oranıdır. Bu nedenle sadece birinci yasa verimi ile hesaplanan enerji veriminin yetersiz kaldığı, aslında enerji kaynağının daha fazla kullanılabilirliğinin irdelenmesi için gerekli verim hesabı kanunudur. İkinci yasa verimi değeri %100'ü aşamaz, çünkü bir sistem tam verimli şekilde kullanılamaz, muhakkak bir takım kayıplara uğrayacaktır. Ekserji verimi olarakta anılan ikinci yasa verimi;

$$\eta_{\text{ikinci yasa}} = 1 - \frac{\text{Ekserji yok oluşu}}{\text{Sağlanan ekserji}} [\%] \quad (5.13)$$

Ekserji tüketiminin yani yok oluşunun fazla olması sistemin daha verimli çalışması anlamına gelir, bu nedenle sistemler tasarlanırken verimin en fazla olması için ekserji yok oluşunun arttırılmasına yönelik çalışmalar geliştirmek gereklidir. Bu birim enerji kaynağından en fazla kullanılabilir iş elde etmek demektir. Bir ısı değiştiricisi düşünüldüğünde bir biri ile karışmayan iki adet akışkanın biri ısınırken diğeri ısınıp verdiğini için soğumaktadır. Ancak burada ekserji akışı sıcak akışkanın ekserjisindeki azalma kadar, aynı zamanda soğuk akışkanın ekserjisinin de artması kadar ekserji sağlanır. Bu sayede hem soğuk hem de sıcak akış için toplam ekserji kaybı göz önüne alınarak ısı değiştiricisinin ikinci yasa verimi hesaplanır (Çengel ve Boles, 2008).

$$\eta_{\text{ısı değiştiricisi}} = \frac{\dot{m} \times \text{soğuk (U)}}{\dot{m} \times \text{sıcak (U)}} [\%] \quad (5.14)$$

Ekserji farklı çeşitlere ayrılmaktadır. Bunların başlıcaları fiziksel ekserji, kimyasal ekserji, kinetik ekserji ve potansiyel ekserjidir.

Bir sistemin toplam ekserjisi fiziksel ekserji ($\dot{E}_{x_{fiz}}$), potansiyel ekserji ($\dot{E}_{x_{pot}}$), kinetik ekserji ($\dot{E}_{x_{kin}}$), kimyasal ekserji ($\dot{E}_{x_{kim}}$) olmak üzere dört farklı ekserji bileşenin toplamından oluşur.

$$\dot{E}_x = \dot{E}_{x_{fiz}} + \dot{E}_{x_{kim}} + \dot{E}_{x_{pot}} + \dot{E}_{x_{kin}} \quad (5.15)$$

Fiziksel ekserji, sistemin sıcaklığı T ve basıncı P ilk durumundan T_0 , P_0 halindeki çevre şartları ile termodinamik denge haline getirildiğinde sistemden elde edilecek maksimum iş fiziksel ekserji olarak tanımlanır (Çomaklı vd., 2004).

Aşağıdaki bağlantı ile gösterilir;

$$\psi_{fiz} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \text{ [kJ/kg]} \quad (5.16)$$

$$\dot{E}x_{fiz} = \dot{m} \times \psi_{fiz} \text{ [kJ/s]} \quad (5.17)$$

h = entalpi

h_0 = ölü hal entalpisi

T_0 = çevre sıcaklığı

s = entropi

s_0 = ölü hal entropisi

Ölü hal, sistemin çevre diye belirtilen referans koşul şartıdır, ölü halde sistem termodinamik denge halindedir, bu yüzden ölü halde bir sistemin iş yapabilmesi mümkün değildir. Ayrıca tüm sistemler en çok işi elde edebilmek için ölü hal konumuna ulaşmaya çalışır. Ölü hal aksi belirtilmedikçe sıcaklık olarak 25 °C ve basınç olarak 101 kPa değerindedir.

Kimyasal ekserji, bir maddenin çevresiyle kimyasal denge haline geldiğinde ısı transferi ve madde alışverişinden kaynaklanan maksimum iş olarak tanımlanır. Standart bir çevre koşulu belirlenir ve sonrasında sistemin çevre koşulu ile denge durumuna gelmesi halinde üreteceği iş potansiyeli saptanır. Sistemin ölü halde olması denge halinde olması anlamına geldiğinden sistemin iş yapabilmesine imkân yoktur. Kimyasal ekserji, sınırlı ölü durumundaki bir maddeyi ölü durumdan ayırmak için gerekli en az iş olarakta adlandırılabilir. Başka bir deyişle, kimyasal ekserji, bir bileşeni sınırlı ölü durumuna getirirken elde edilebilecek maksimum iştir (Uysal, 2020).

İdeal gazlar için kimyasal ekserji aşağıdaki şekilde ifade edilir (Çomaklı vd., 2004).

$$\psi_{kim} = \sum x_i \psi_{kim} + RT_0 \sum x_i \ln(x_i) \text{ [kJ/kg]} \quad (5.18)$$

R = evrensel gaz sabiti

T₀ = çevre sıcaklığı

x_i = gazın mol oranı

Ayrıca bazı gazların kimyasal ekserji değerleri literatür verilerinden de alınabilir. Bilinen bazı gazların ideal çevre koşulunda (25 °C ve 1 atm) kimyasal ekserjileri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Madde	Formül	Hal	Model I*	Model II**
Azot	N ₂	gaz	639	720
Oksijen	O ₂	gaz	3951	3970
Karbondioksit	CO ₂	gaz	14176	19870
Su	H ₂ O	sıvı	8636	9500
Su	H ₂ O	gaz	45	900
Karbon	C	sıvı	404589	410260
Hidrojen	H ₂	gaz	232249	236100
Sülfür	S	sıvı	598158	609600
Karbon monoksit	CO	gaz	269412	275100
Sülfürdioksit	SO ₂	gaz	301936	313400
Azotdioksit	NO ₂	gaz	55565	55600
Hidrojen Sülfür	H ₂ S	gaz	799890	812000
Amonyak	NH ₃	gaz	336684	337900
Metan	CH ₄	gaz	824348	831650
Etan	C ₂ H ₆	gaz	1482033	1495840

Tablo 5.1. Bazı gazların kimyasal ekserjileri (* Aherndt, 1980 P=1 atm, ** Szargut et.al. 1988)

Hidrokarbon yakıtlarda kimyasal ekserjiyi hesaplamak için yakıt içerisindeki hidrojen, karbon, azot ve oksijen gibi elementlerin miktarını bilmek gerekir. Element tespiti için yakıtların katı bazda laboratuvar ortamında elemental analizlerle ya da literatürde kabul görmüş yaklaşımlarla sonuçlar alınabilir. Bu miktarların tespiti sonrası hidrokarbon yakıtın alt ısı değeri ile β katsayısı çarpılarak kimyasal ekserji bulunabilir. β katsayısı katı, sıvı ve gaz formundaki hidrokarbonlar için farklı denklemler ile hesaplanır (Tekel, 2006).

Katı hidrokarbonlar için;

$$\beta = \frac{1,044 + \frac{0,0160H}{C} - \frac{0,3493O}{C} \left[1 + \frac{0,053H}{C} \right] + 0,0493N/C}{1 - 0,41240/C} \quad (5.19)$$

Sıvı hidrokarbonlar için;

$$\beta = 1,0374 + \frac{0,0159H}{C} + \frac{0,0567O}{C} \quad (5.20)$$

Gaz hidrokarbonlar için;

$$\beta = 1,0334 + \frac{0,0183H}{C} + \frac{0,0694}{Nc} \quad (5.21)$$

Kinetik ekserji tamamen işe dönüştürülebildiğinden çevresel sıcaklık ve basınç değişkenlerinden bağımsız olarak kinetik enerjiye eşittir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\dot{E}_{kin} = \frac{V^2}{2} [kJ/kg] \quad (5.22)$$

Potansiyel ekserji tıpkı kinetik ekserji tamamen işe dönüştürülebildiğinden çevresel sıcaklık ve basınç değişkenlerinden bağımsız olarak potansiyel enerjiye eşittir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\dot{E}_{pot} = g \times h [kJ/kg] \quad (5.23)$$

Ekserji analizlerinde sistemdeki bileşenlere ait toplam ekserjiler göz önüne alınırken potansiyel ve kinetik ekserjiler göreceli olarak fiziksel ve kimyasal ekserjilere göre daha küçük değerde olması nedeniyle ve sürekli akışlı sistemlerde devamlı kütle akışı olduğundan ihmal edilirler. Bu çalışmada akışkanlara ait bileşenlerin fiziksel ve kimyasal ekserjileri üzerinden hesaplamalar yapılacaktır.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Materyal

Bu çalışmada bir biyogaz tesisinden alınan işletme ve ölçüm verileri ile elde edilen notlar, biyogaz tesisinin iş akış diyagramı göz önüne alınarak hazırlanmış, akış diyagramı oluşturularak hesaplamalar yapılmıştır. Tüm akışkanların sıcaklık, basınç, kütleli debi değerleri tespit edilmiş, ölçüm alınamayan değerlerde ise tasarım parametresi ve formüller yardımı ile hesaplanarak elde edilmiştir. Değerlerin toplanması aşamasında üretim motorları tam yükte çalıştırılmış ve sürekli rejim değerleri gözlemlenerek farklılık olup olmadığı teyit edilmiştir. Elde edilen değerler bir tablo oluşturularak uygun akışkanların karşılığı satır ve sütunlara işlenmiş, daha sonra termodinamik açıdan değerlendirilmek için uygun enerji ve ekserji formüllerinde yerlerine konularak hesaplanmıştır. Akışkanlara ait tüm özellikler termodinamik tablolardan ve EES programından yararlanılarak elde edilmiştir. Bu veriler yardımıyla sistemde elde edilen birinci ve ikinci yasa verimlerinin yanı sıra ekserji yıkımlarının bulunması hedeflenmiş, elde edilen bulgularla sistemde iyileştirilmesi muhtemel ekipmanlar için araştırmalar yapılması öngörülmüştür.

Akış şeması atığın ilk beslendiği atık kabul biriminden fermantörlerde biyogaz üretimine, elde edilen biyogazın elektrik, sıcak su ve buhar enerjilerine dönüşümünü sağlayan kojenerasyon sistemine kadar oluşturulmuştur. Tesiste dört anaerobik çürütme ünitesi ve dört biyogaz enerji dönüşüm motoru bulunmaktadır. Anaerobik reaktörlerin hepsi için enerji dengesi hesabı yapılmışken biyogaz motorlarının sadece bir tanesi üzerinden hesap yapılmıştır. Bunun temel sebebi motorların hepsi aynı güç değerlerine ve çalışma koşullarına sahipken, anaerobik çürütme sisteminde üç adet çürütücü ana besleme çürütücüleri bir adet çürütücü ise post yani son aktarma çürütücüsü olarak görev görmektedir ve anaerobik çürütücülerin çalışma koşulları farklılık göstermesidir.



Şekil 6.1. Biyogaz tesisi

6.1.1. Akışkan Verilerinin Tespiti

6.1.1.1. Sıcaklık Verisi Tespiti

Sistemdeki akışkanların sıcaklık verilerinin eldesi için mevcut otomasyon verileri ve otomasyonda yer almayan veriler için ise Bosch marka GIS1000C model infrared termometre kullanılmıştır. Bu termometre ölçümleri kalibrasyonlu bir cihazla yapıldığı için otomasyonda bilgi alınan PT100'ler içinde doğruluk teyidi yapılması sağlanmıştır. Sıcaklık ölçümleri zamanla dalgalanmalar ile farklı sonuçlar verebilmektedir çünkü işletme olarak anlık değişimler görülmektedir. Bu nedenle alınan veriler için sistem tam yükte çalıştırılmış ve değerlerin sabit bir değerde olması beklenerek birkaç farklı ölçüm aralığı ile en uygun anda değerlerin alınması hedeflenmiştir.

Termometrelerden alınan verilerin doğruluğu kızılötesi termometre ile kıyaslanarak teyit edilmiş, arızalı olabileceğinden şüpheli termometreler yenileri ile değiştirilerek en doğru sonucu almak adına kontrol edilmiştir. Ayrıca prosese bağlı değişkenlik gösteren noktalarda işletmesel olarak en yaygın gerçekleşen durumlar işletme verileri incelenerek tespit edilmiştir.



Şekil 6.2. Termometre ve kızılötesi termometre

6.1.1.2. Basınç Verisi Tespiti

Sistemdeki akışkanların basınçlarının ölçülmesi için proses hatlarına konulmuş basınç transmitterleri ve analog manometreler kullanılmıştır. Bu enstrümanlar işletme takibi açısından oldukça önemlidir. Transmitterler yardımı ile elde edilen bilgi otomasyon ekranına aktarılır, daha sonra bu bilgi işletme personeli tarafından müdahale ve iş takip anlamında kullanılmaktadır. Basıncın ölçülmesinin mümkün olmadığı ve ulaşılması zor akış noktalarında ise termodinamik biliminde kabul görmüş formüller yardımı ile akışkanların basınçları hesaplanarak sonuçlar elde edilmiştir. Basınç verilerinde göstergeli manometrelerdeki değerler atmosfer basıncını referans alarak ölçüm yaptığı için alınan değerlere atmosfer basıncı eklenmiştir. Otomasyon üzerinde mutlak basınç ölçen transmitterlerin değerleri ise içerisinde atmosfer basıncı da olduğundan doğrudan alınmıştır.

Basıncı tıpkı sıcaklık gibi anlık değişkenlik gösterebilir. Özellikle fermantörlerde gaz blower sisteminin çektiği biyogaz, güce göre farklılık gösterir. Bu nedenle sistemin tam yükteki halinde ve basınç değerinin stabil olduğu zaman diliminde alınan veriler işleme alınmıştır. Bu farklı zamanlarda farklı anlarda da sistemin tam yükündeki ortalama bir değere eşdeğer olduğu için hesaplamalarda daha net sonuçlar alınması açısından kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 6.3. Basınç transmitteri ve manometre

6.1.1.3. Debi Verisi Tespiti

Sistemdeki akışkanlar hızlarına göre belirli debide hareket ederler. Bu akışkanlar gaz ve sıvı formunda olduğu için kendi akışkan özelliklerine göre seçilmiş, akışkan hatlarına bağlantısı yapılan debimetreler yardımı ile ölçülerek veriler elde edilir. Elde edilen veriler otomasyon ekranından veya direkt olarak debimetre ekranından görülebilmektedir. Debimetreler hacim bazlı akış değeri ölçerler ve birimi m^3/h olarak görülür. Ancak akışkanların mevcut sıcaklık ve basınç bilgilerine göre yoğunluklarından yola çıkarak termodinamik formüller yardımı ile birim kg/s olarak çevrilebilir.

Debimetre ölçümlerinde doğru sonuç almak için önemli şartlar, doğru montaj şekli, akışkan yoğunluğu ve veri aktarım hızı bilgisi gibi parametre ayarlarının doğru girilmesi ve uygun akışkan tipine göre uygun debimetre tipi seçmektir. Aksi takdirde doğru ve stabil değerler alınamadığından işletme olarak yanlış sonular elde edilebilir. Hacimden kütle değerine birim çevrilmesinin nedeni ise enerji ve ekserji dengesi hesaplarında kullanılan değerlerin kütleli debi olmasıdır. Sıvı akışkanlarda akışkanın sıcaklığına, gaz akışkanlarında ise sistemin basıncına ve sıcaklığına bağlı olarak debimetrenin hacim ölçüsü o anki yoğunluğu ile çarpılarak kütle birimine çevrilecektir.



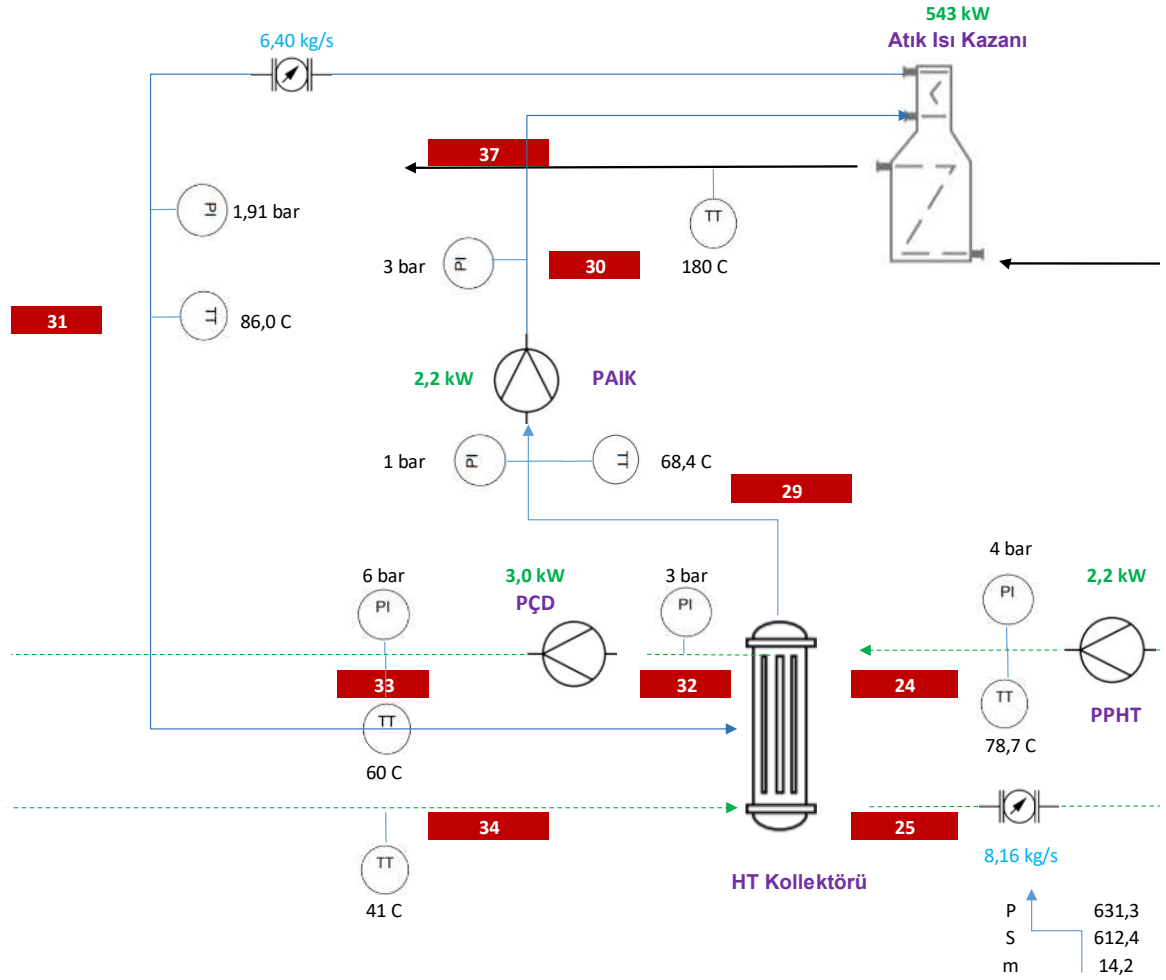
Şekil 6.4. Akış ölçer debimetreler

6.1.2. Proses Akış Diyagramı Oluşturma

Akışkan verileri elde edildikten sonra sistemin proses akış diyagramının hazırlanması gereklidir. Akış diyagramında akım noktaları ve ekipmanların doğru konumlandırılarak, akışların sıralaması ve yönü belirlenir. Bu diyagram bilgisayar programları ile oluşturulabileceği gibi excel gibi dosyalar şeklinde de hazırlanabilir. Önemli nokta her akışkanın doğru noktada ve doğru yöne doğru akmasıdır. Akış diyagramlarında bulunan ekipmanlar P&ID sembolleri ile ya da uygun görsellerle gösterilebilir. Akış diyagramının bir diğer önemli noktası ölçüm yapan ekipman ve enstrümanların da akış diyagramında uygun akım hatlarında konumlarına yerleştirilmesidir. Bu alınan sıcaklık, basınç ve debi değerlerinin hangi noktalarda alındığının tespit edilmesinde kolaylık sağlayacaktır. Ekipman isimlerinin yazılması için ise kısaltmalar kullanılabilir, örneğin bir ısı değiştiricisi için ismi uzun yazman yerine 'ID' şeklinde kısaltmalar kullanılması, göz yorulması ve karmaşıklığın basite indirgenmesi açısından fayda sağlayacaktır. Aynı kısaltma işlemi akışkanlar içinde yapılabilir.

Proses akış diyagramlarında kolay çözümleme için akım numaraları verilir ve her akım numarasının karşılığı termodinamik özellikler yazılarak enerji ve ekserji hesapları yapılır. Bu sistemdeki ekipmanların hangi güçte ve verimde çalıştığını gösterecek sonuçlar elde etme imkânı sunar. Proses diyagramı oluşturulduktan sonra akım tablosu hazırlanır. Akım

noktalarının sıralamasına göre akım tablosuna önce akışkanların sıcaklık, basınç ve debi değerleri yazılır, daha sonra hesaplanması istenen termodinamik özelliklerin hesaplanması yapılır. Termodinamik hesaplar için akışkanların entalpi, entropi gibi bilinmeyen özellikleri termodinamik tablolarından, eğer tablodan bulunamıyorsa uygun formüller yardımıyla veya EES gibi paket programlar aracılığı ile bulunur ve akım tablosuna yazılır. Bu değerler ile sistemdeki birinci ve ikinci yasa verimleri, özgül enerji, özgül ekserji, ekserji yıkımı, entropi üretimi gibi prosesin işleyişi hakkında yorum yapabilmek ve iyileştirilmesi gerekli ekipmanlar için çalışma imkânı sunar. Akım tablolarındaki dikkat edilmesi gereken noktalardan biri ise birimlerin doğru ve aynı yazılmasıdır.



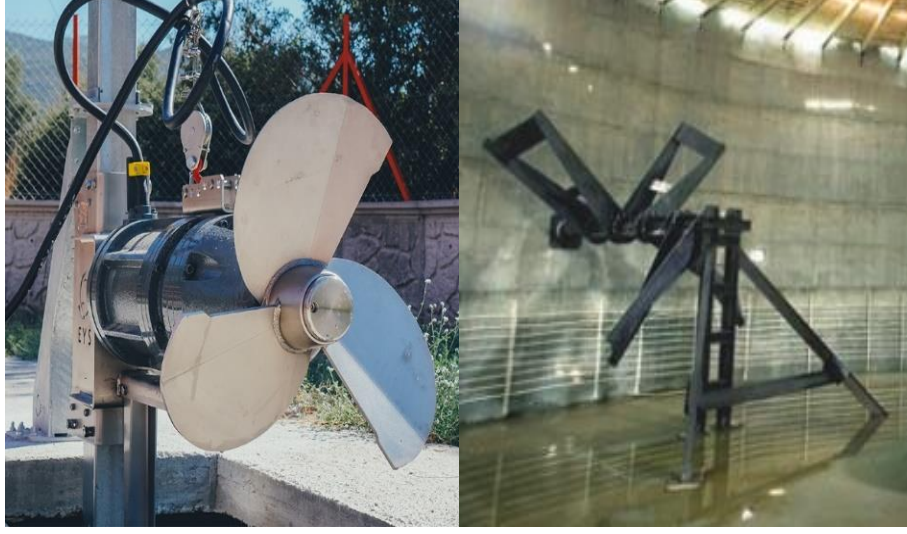
Şekil 6.5. Örnek bir akım diyagramı

6.1.3. Ekipmanların Belirlenmesi

Enerji ve ekserji çalışması yapılacak tesisin proses ekipmanlarının belirlenmesi gereklidir. Bu ekipmanların çalışma koşulları, yeterliliği ve verimleri konusunda bilgi edinmek, gereksiz çalışmaların, fazla tüketimlerin ve iyileştirme fırsatlarının tespiti açısından da önemlidir. Biyogaz tesislerinde çalışan temel ekipmanlar şu şekildedir;

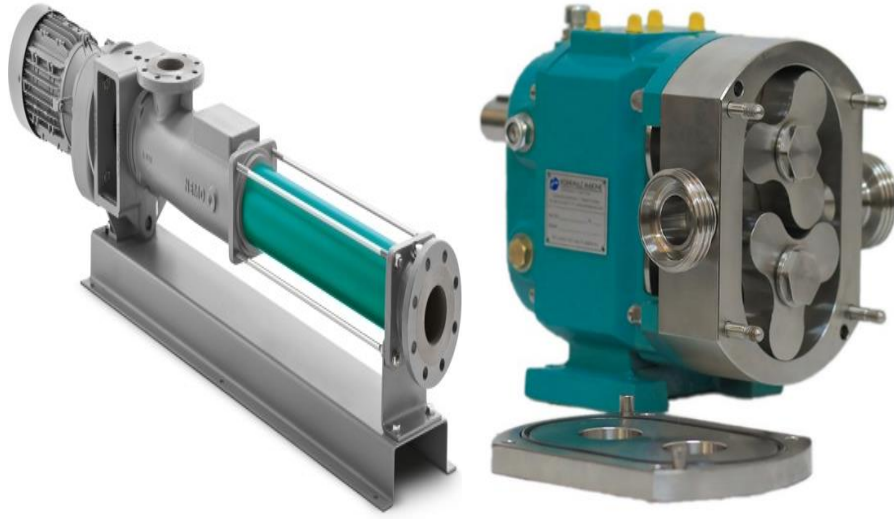
- Karıştırıcılar
- Pompalar
- Parçalayıcılar ve öğütücüler
- Plakalı eşanjörler, borulu ısı değiştiriciler
- Biyogaz motorları
- Atık ısı kazanları
- Jeneratör
- Kompresörler
- Blowerler
- Seperatörler

Karıştırıcılar, sistemde atıkların yüklenmesi ile homojen şekilde dağılım için kullanılan ekipmanlardır. Bu ekipmanlar uygun karıştırma sağlamak, ölü noktaların oluşmasının engellenmesi, etkin temasın sağlanması, ısının hacme düzenli dağılımı ve köpük etkisinin önlenmesi için kullanılır. Karıştırıcılar farklı çeşitlerde olabilir bunların başlıcaları; dalgıç motorlu karıştırıcılar, uzun akslı karıştırıcılar ve kanatlı karıştırıcılardır (Anonim, 2010).



Şekil 6.6. Dalgıç motorlu ve paletli karıştırıcılar

Pompalar biyogaz tesislerinde atık ham madde materyallerinin uygun katı madde oranına getirilmesinden sonra transferini sağlayan ekipmanlardır. Aynı zamanda su, hava ve gaz transferleri de akışkan türüne uygun pompalar ile sağlanır. Pompalar çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Bunların başlıcaları; dairesel pompalar, alternatif hareketli pompalar, eksantrik helezonlu pompalar ve döner pistonlu pompalardır (Anonim, 2010). Pompa seçiminde önemli unsurlardan bazıları; transferi sağlanacak akışkanın türü, pompa öncesi basınç değerine göre çıkışında istenen basınç değeri ve akışkanın taşınacağı mesafedir. Biyogaz tesislerinde genelde ön atık hazırlama ünitelerinde atığın % katı madde oranının düşük olduğu yaş fermantörlerde uygun malzeme gövdesine sahip pompalar kullanılarak atık ham maddesi transferi gerçekleşir. Önemli bir diğer nokta ise taşınan akışkanın pH aralığına göre pompa transfer malzemelerinin uygun seçilmesidir, aksi halde kısa sürede yüksek bakım ve değişim masraflarına sebebiyet verecek sonuçlar ile karşılaşılır. Pompalarda akışkanın doğru şekilde aktarılması ve aktarılan miktarın takibi de oldukça önemlidir. Bu nedenle genelde basınç şartları ile otomasyon yardımıyla çalıştırılırlar bu sayede uygun basınç aralıklarında seçilmiş pompalar en verimli şekilde çalıştırılmış olur.



Şekil 6.7. Mono pompa ve loblu pompa (Netzsch)

Parçalayıcı ve öğütücüler ise atık ham maddesinin anaerobik bakterilerin susbstrat olarak en etkin kullanılması için tane boyutunun küçültüldüğü ekipmanlardır. Bu ekipmanlar iri tane boyutlarını küçülterek atıkların yüzey alanını küçülterek fermantasyon hızını artırır ve biyogaz oluşum süresini aşağı çeker. Böylece daha etkin ve verimli sonuçlar elde edilir. Bu ekipmanların parçalama ve öğütme özellikleri işlenen atık türüne göre değişkenlik gösterir. Kullanılacak atık bitkisel kaynaklı ise döner bıçaklı veya helezonlu parçalayıcılar, daha küçük parçacıklı atıklar ise döner bıçaklı devir sayısı yüksek ekipmanlar kullanılır (Anonim, 2010). Tane boyutlarında küçültme işlemi yapılması ile atıkların anaerobik reaktörlerde hidrolik bekleme süresinin aşağılara çekilmesini sağlayarak reaktör veriminin de artmasına katkı sağlar.



Şekil 6.8. Katı atık parçalayıcılar (Vogelsang)

Plakalı eşanjörler ve borulu ısı değiştiriciler, proste en yaygın ısıtma ekipmanlarıdır. Biyogaz tesisi çalışma sıcaklık aralığına göre anaerobik bakterilerin uygun sıcaklık değerinde aktif çalışmalarını sağlamak için sistemin ısıtılması oldukça önemlidir. Ayrıca biyogazın bağıl nem oranının alınması için gaz soğutma ünitelerinde, biyogaz motoru sıcak su devrelerinde de ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Akışkan türüne göre bir birine temas etmeyen iki akışkan arasında sağlanan ısı transferi mantığı ile çalışan ısı değiştiriciler endüstrinin çoğu alanında yaygın kullanıma sahiptir. Isı değiştiriciler ısı transferini olabildiğince az kayıpla gerçekleştirerek oldukça yüksek verimlerde çalışırlar. Isı değiştiriciler farklı yoğunluk ve viskozitedeki farklı akışkanlar arasındaki ısı transferini de sağlayabilmektedir, tasarım ve seçim aşamasında her iki akışkanın da termodinamik özellikleri bilindikten sonra plakaların ısı geçirgenlik katsayıları yardımıyla uygun plaka sayısı ve ısıtma yüzeyi hesaplanarak soğutulması gerekli sıcak akışkan ile ısıtılması gerekli soğuk akışkan arasında olabildiğince yüksek verimlilikte ısı transferi sağlanır. Genel olarak katalog değerleri referansı ile verimlilikleri bilinse de teze konu olan tesiste eşanjör verimleri %97 verimlilikle ısıyı ilettiği kabulü ile hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 6.9. Plakalı ve borulu ısı değıştirciler

Biyogaz motorları, içten yanmalı motor çalışma prensibine göre çalışmaktadır. Biyogazın motora iletimi sonrası fakir yakıt zengin hava karışımı bu makinelerde hava ve yakıt motorun karbüratöründe karışarak motor silindir bloğuna iletilir. Yanma işlemi silindir bloğunda gerçekleşir. Ateşleme sistemi buji ile gerçekleşir ve krank miline tahrik gücü sağlanır. Biyogazın bu motorlarda yanması için kuru gaz olması gereklidir. Çünkü biyogazın nemli olması bloklarda su damlacığı oluşmasına ve silindir bloklarında kavitasyona sebebiyet vermektedir. Bu nedenle fermentörden çıkan ortalama 40 °C biyogaz, soğutma sistemleri kurularak kuru gaz şekline getirilir. Biyogazın içerisindeki nem hatlar üzerine konulan kondenspitlerden de alınabilmektedir. Biyogaz motorları Turboşarjer ile kombine şekilde çalışmaktadır. Turboşarjer motor verimini artırır ve gazın silindir bloğuna yüksek basınçta iletilmesini sağlar. Gaz motor silindir bloğuna ulaşmadan önce gaz keleşi adındaki valf yardımı ile oranı ayarlanır ve ateşleme için uygun miktarda alınır. Biyogazın temel yanıcı maddesi metandır. Bu nedenle motorun çalışması için minimum metan oranı %40 olmalıdır. Biyogaz ölçümleri seyyar gaz ölçüm cihazı ile ölçülerek gözlemlenir. Bu cihaz biyogazın içerisindeki CH₄, CO₂, H₂S ve O₂ miktarını belirten parametrelere sahiptir. Anaerobik reaktör üzerinde gaz ölçümü için uygun çıkışlar bırakılır ve gaz bu noktalardan gerekli güvenlik önlemleri alınarak ölçülür. Biyogazın içerisindeki oksijen oranının düşük olması istenir. Bu oranın düşük olmasının sebebi oksijenin motor bloğunda erken ya da geç tutuşmaya sebebiyet vermesidir.



Şekil 6.10. Biyogaz motoru

BİYOGAZ MOTORU TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Yakıt LHV = 4,5 kW/nm ³	Birim	100%	75%	50%
Güç girişi	kW	2736	2108	1480
Gaz debisi	nm ³ /h	608	468	329
Mekanik güç	kW	1095	821	548
Elektrik gücü	kWe	1067	798	529
Kullanılabilir termal enerji (%37 Glikol)				
İntercooler 1. devre	kW	179	82	13
Mobil yağ	kW	130	110	98
Ceket suyu	kW	360	354	311
Total kullanılabilir termal enerji	kW	669	546	422
Total çıkış gücü	kW _{total}	1736	1344	951
Kaybolan ısı (%37 Glikol)				
İntercooler 2. devre	kW	113	83	56
Yüzey kaybı	kW	94	--	--
Spesifik yakıt tüketimi	kWh/kWmh	2,50	2,57	2,70
Spesifik yağ tüketimi	kg/h	0,3	0,3	0,3
Elektrik verimi	%	39,0%	37,9%	35,7%
Termal verim	%	24,5%	25,9%	28,5%
Total verim	%	63,4%	63,7%	64,2%

Tablo 6.1. Jenbacher JMS320 Biyogaz motoru teknik özellikleri

Biyogaz motorlarında egzoz evresi sonrası açığa çıkan 450-600 °C arası egzoz gazı baca yardımıyla motorun egzoz manifoldundan dışarı atılır. Bacadaki bu egzoz gazı geri kazanım ile atık ısı kazanında buhar ve sıcak su elde edilmesi için gerekli termal enerjiyi sağlayabilir. Atık ısı kazanları ısı değiştiricisi mantığı ile çalışır bunlar su borulu ve duman borulu olarak farklı iki çeşittir, iki akışkan arasında temas olmadan ısı alışverişi olur ve yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı düşük sıcaklıktaki soğuk akışkan olan suyu kaynatarak buhara dönüştürür. Bu evrede egzoz gazı da soğuyarak dışarı daha stabil şekilde verilmiş olur (ortalama 180 °C). Bu işlem boştaki egzoz gazı enerjisinin değerlendirilmesi ve elde edilen buhar enerjisi fabrikada ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır. Atık ısının değerlendirilmesi hem birinci yasa hem de ikinci yasa verimlerinde toplam tesis verimini arttırmakta, boştaki enerjinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Üretilen buhar enerjisi 9-11 bar arası basınçta ortalama 175-188 °C arası sıcaklığa sahiptir, buhar enerjisi elde etmek için kazan besleme suyu içerisindeki çözünmüş oksijenin alınması için ön ısıtmaya tabii tutularak ekonomizere, daha sonra ekonomizerde ikinci ısıtma ile kazana girer. Bu sayede kazan verimi artırılmış olunur. Egzoz gazında her 20 °C azalış kazan veriminde %1 artış sağlar.



Şekil 6.11. Atık ısı kazanı

ATIK ISI KAZANI TEKNİK ÖZELLİKLERİ		
	Birim	Değer
Egzoz gazı kütleli debi	kg/h	5652
Egzoz gazı hacimsel debi	nm ³ /h	4669
Egzoz gazı giriş sıcaklığı	°C	487
Egzoz gazı çıkış sıcaklığı	°C	180
Egzoz gazı geri tepme basıncı	mbar	6
Kazan termal gücü	kW	499
Su kütleli debi	kg/h	750-100
Operasyon Sıcaklığı	°C	102/195
Akışkan hacmi	litre	2414,1
Buhar basıncı	bar	9-12
İşletme basıncı	bar	14
Su basınç kaybı	bar	0,3

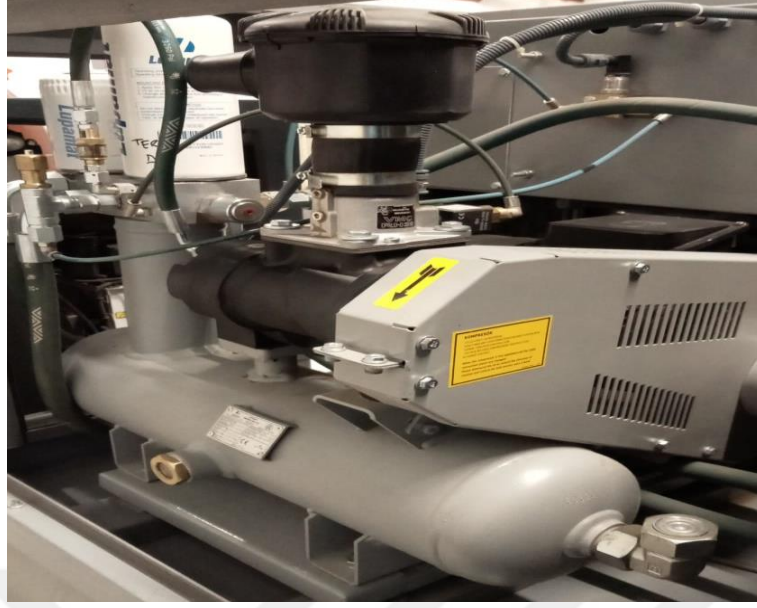
Tablo 6.2. Buhar üretimli atık ısı kazanı teknik özellikleri

Jeneratörler döner manyetik alan içerisinde iletkenin hareketi ile akım indüklenmesi mantığı ile çalışırlar. Temel bileşenleri sargılı stator, rotor, diyotlar, demir çerçeveden oluşurlar. Bir iletkenin döner manyetik alan içerisinde akım oluşturması, bu akımın bir yol izlemesi ile elektrik enerjisi elde edilir. Önemli olan manyetik alanı oluşturabilmektedir. Manyetik alan oluşmasında statik ve dinamik ikazlama sistemleri kullanılır. Bu ikazlama fırçalar yardımı ile ya da harici ikaz jeneratörleri ile verilir. Jeneratörlerin çalışması için gerekli mekanik enerji bir milin hareketi ile sağlanır. Temelde bu milin hareketi kazandıran su, rüzgar, harici motor, dalga vb. kaynaklar olabilmektedir ve buna göre elektrik üretim tesisleri tasarlanır. Alternatörler alternatif akım üretirler. Bu akımlar kablolar yardımı ile taşınarak tüketim noktasına veya iletim hatlarına aktarılır. Alternatörün ürettiği elektriği şebekeye verebilmesi için senkronizasyon şartını sağlaması gerekmektedir. Senkron şartı bulunduğu bölgenin şebeke değerleri referansına göre sağlanmaktadır. 3 fazlı çalışan bu sistemde faz gerilimi frekans, faz açısı ve faz sırası şartı sağlanırsa üretilen elektrik şebekeye verilebilir.



Şekil 6.12. Jeneratörler

Kompresörler endüstride en yaygın kullanılan ekipmanların başında gelmektedirler. Basınçlı hava ve gaz ihtiyacının karşılanması amaçlı kullanılan kompresörler, havayı ve gazı atmosfer basıncının üstüne bir değere çıkararak sıkıştırmak prensibiyle çalışır. Kompresörler aynı zamanda vakum gerektiren yerlerde de kullanılır. Basınçlı hava pnömatik çalışan tüm sistemler için vazgeçilmez ekipmanlardır. Kullanım alanlarına göre farklı çeşitlere ayrılır, bunların başında vidalı kompresör, pistonlu kompresör, jet kompresör, hidrolik kompresör ve eksenel akımlı kompresörler gelir. Kompresör seçimlerinde en önemli unsurlar, gerekli hava miktarı, işletme basıncı ve güç tüketiminin tespit edilmesidir. Tez çalışmasına konu olan tesiste kompresör pnömatik çalışan otomatik açma-kapama yapan vanalarda ve baca gazı geri kazanım sistemleri için damperlerin klepelerinde hava basıncı sağlamak için kullanılır. Bu otomatik vana ve klepeler otomasyon ile kontrol edilmekte ve yazılım ile belirlenmiş çalışma şartlarına göre devreye girip çıkmaktadır.



Şekil 6.13. Kompresörler

Blower adı verilen biyogazın basınçlandırılarak aktarımını sağlayan üniteler bir nevi pompa görevi görmektedir. Düşük basınçlı gazı içerisinde bulunan yüksek devirli döner pervane ile sabit hacimde sıkıştırarak basınçlandıran bu üniteler patlayıcı koruma özelliğine sahip exproof özellikte ekipmanlardır. İncelenen biyogaz tesisinde Meindinger marka blower kullanılmıştır.



Şekil 6.14. Biyogaz bloweri

Blowere ait teknik özellikle Tablo 6.3'te belirtilmiştir.

Blower	Birim	Değer
Gaz Hacmi	m ³ /h	576
Basınç	Pa	13479/12303
Devir	l/min	5080
Üretim Yılı	yıl	2020
rho	kg/m ³	1,2/1,1
Sıcaklık	° C	20
Maksimum Sıcaklık	° C	60
Pv	kW	3,27/3,07
Elektik Motor Gücü	kW	4

Tablo 6.3. Biyogaz bloweri teknik özellikleri

Seperatörler, çürütme işlemine uğramış atıkların biyogaz tesisi çıktısı olarak fermente olmuş gübre olarak kullanılması için kullanılmasını sağlayan, döner bir helezon ve ince aralıklı elekler yardımıyla sıkıştırma işlemi sağlayan ekipmanlardır. Bu ekipmanlar gübre çıktısının istenen katı madde oranına göre basınç plakaları yardımıyla kullanılırlar. Seperatörlerin ayrıştırma işlemi uyguladığı gübre katı ve sıvı fazlarda uygulamaya hazır hale gelir. Seperatör ünitelerinde helezon hareketi için asenkron motorlar ile redüktör grubu kullanılır. Bu sayede daha yavaş hızda helezon hareketi sağlanarak etkin sıkıştırma gerçekleştirilir.



Şekil 6.15. Seperatörler

6.1.4. Atık Hammadesi Analizi

Atık hammaddesinin özelliklerini öğrenebilmek için laboratuvar ortamında çeşitli analizler yapılmalıdır. Atıklardan biyogaz eldesi için en yaygın analizlerin başında katı madde analizi, organik katı madde analizi ve biyogaz metan potansiteli analizleri gelmektedir. Katı madde analizi için etüv veya nem tayin cihazları kullanılmaktadır. Bu cihazlarda temel mantık yakma ile nem ve organik içeriğin uçturularak geriye kalan kütlelerden sonuçlar elde etmektir. Deneyin yapılışında önce krozenin boş darası hassas terazide alınır, daha sonra yaklaşık 5 gr yaş numune konulur ve ikinci tartım alınır, daha sonra 105 °C 2 saat kadar etüvde bekletilerek nemi alınmış numuneden üçüncü tartım alınır ve yüzde katı madde hesaplanır.

Tartımlar;

Boş dara: c_1

Numune ağırlığı: 1. Tartım: c_2

Numunenin Etüvde 2 saat bekletildikten sonraki tartımı: 2. Tartım : c_3

Katı madde analizi;

$$\%KM = \frac{c_3 - c_1}{c_2 - c_1}$$

Organik katı madde analizi yapılırken etüvde 2 saat bekletilmiş nemi alınmış numune tartımı alındıktan sonra desikatörde oda sıcaklığına getirilinceye kadar bekletilir, daha sonra 550 °C ayarlanmış kül fırınına atılarak yaklaşık 1 saat kadar bekletilir. Daha sonra tekrar desikatörde oda sıcaklığına getirilene kadar bekletilir ve tartımı alınır. Elde edilen tartım sonuçlarına göre %OKM hesabı formülle yapılır, geriye kalan miktar ise küldür;

Numunenin Fırında 1 saat bekletildikten sonraki tartımı: 3. Tartım : c_4

$$\%OKM = \frac{(c_3 - c_1) - (c_4 - c_1)}{(c_3 - c_1)}$$

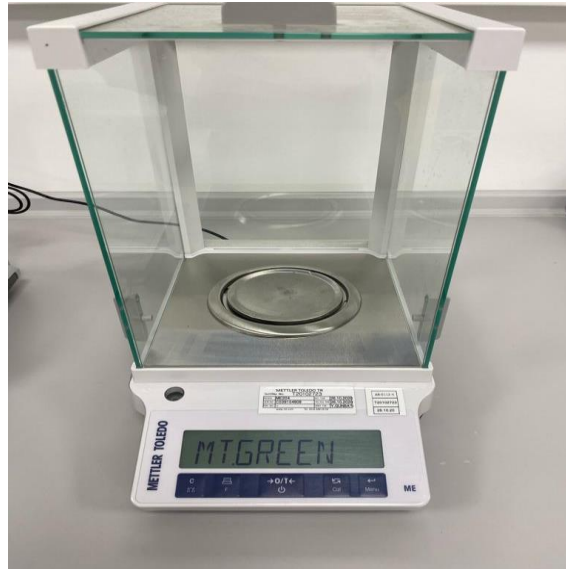
Kül miktarı;

$$\%K\ddot{u}l = 1 - \%OKM$$

K\ddot{u}l, organik içeriği olmayan taş, çakıl, kum vb. malzemelerden oluşan artık kısımdır ancak içeriği hakkında net bir bilgi elde etmek oldukça zordur.



şekil 6.16. Et\ddot{u}v ve k\ddot{u}l fırını



şekil 6.17. Hassas Terazı

6.1.5. Termodinamik Verilerin Toplanması

Biyogaz tesisi akış diyagramı oluşturulduktan sonraki aşama verilerin toplanmasıdır, bunun için ilk olarak ekipmanların belirlenir daha sonra ekipmanların içerisinde hareket eden akışkanların verileri ilgili enstrümanlardan alınır, eğer veri alınamıyorsa ulaşılmak istenen veriler hesaplanarak belirlenir, akım noktaların bir tablo halinde yerlerine yazılır ve sonrası termofiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerçekleştirilir. Bu işlem için termodinamik tablosu ya da Engineering Equation Solver (EES) gibi paket programlardan faydalanılabilir. Akışkanların sıcaklık, basınç değerleri kritik nokta özellikleri dışında o akışkanın entalpi, entropi, yoğunluk gibi özelliklerini vermektedir, bu da akışkanların enerji ve ekserji değerlerinin hesaplanmasına, aynı zamanda ekipmanların birinci ve ikinci yasa verilerinin bulunmasını sağlamaktadır. Bu verilerin tespit edilmesi endüstrilerde ekipmanlar üzerinde iyileştirme çalışmaları fırsatı, aynı zamanda iyileştirmeler sonrası ciddi maddi kazançlar elde edilmesine olanak tanır. Önemli nokta doğru akışkan türlerini ve termodinamik özelliklerini bulmaktır.

6.1.5.1. Entalpi

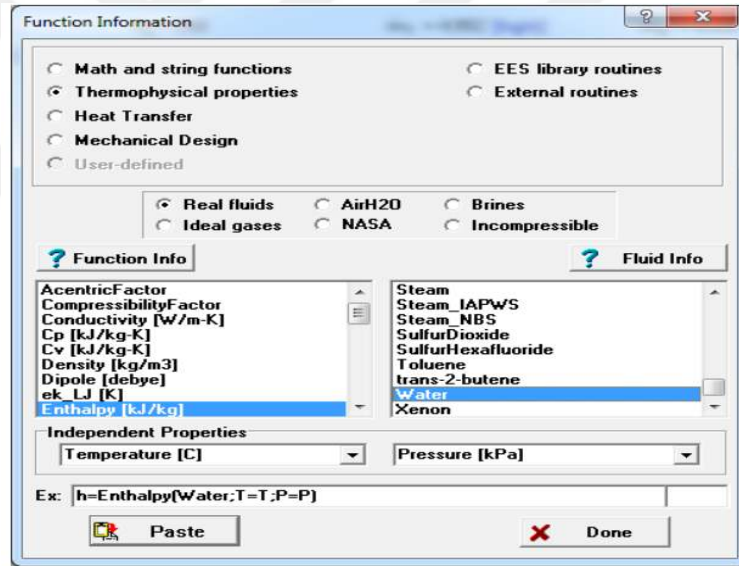
Entalpi bir maddenin bünyesinde topladığı enerjilerin toplamıdır. Enerji verimliliği hesaplamalarındaki en önemli unsurlardan biridir. Her madde kendi içerisinde bir enerjiye sahiptir ve bu enerji bulunduğu sıcaklık ve basınç değerine göre farklılık gösterir. Entalpinin hesaplanması çok zordur bu nedenle bazı kabuller üzerinden yaklaşık değerler elde edilir bunun için de termodinamik tabloları veya EES gibi termodinamik denklem çözme programları kullanılır. Maddenin iç enerjisinin o anki hacim ve basıncının özellikleri ile entalpisi değişmektedir. Bu nedenle önce akışkan maddenin sıcaklığı ve basıncı ölçülür, daha sonra ölçülen bu değerlerden entalpi değeri bulunur. Dikkat edilmesi gereken nokta akışkanın faz değişimi şartlarıdır. Maddelerin faz değişimleri için gerekli sıcaklıklar ve basınçlar bu noktada önemli olduğundan entalpi doğrudan bu değerlerle ilişkilidir. Akışkanların oluşum entalpileri ihmal edilmiştir, çünkü tüm akışkanlarda göz önüne alınması halinde yapılan hesaplamalarda sonucu değiştirmeyecek, işlem kalabalığına sebep olacaktır.

TABLO A-4

Doymuş su — Sıcaklık tablosu

Sıcaklık, T °C	Doymuş sıvı, $P_{\text{doymuş}}$ kPa	Özgül hacim, m^3/kg		İç enerji, kJ/kg			Entalpi, kJ/kg			Entropi, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$		
		Doymuş sıvı, v_f	Doymuş buhar, v_g	Doymuş sıvı, u_f	Doymuş Buhar., u_{fg}	Doymuş buhar, u_g	Doymuş sıvı, h_f	Doymuş Buhar., h_{fg}	Doymuş buhar, h_g	Doymuş sıvı, s_f	Doymuş Buhar., s_{fg}	Doymuş buhar, s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556

Şekil 6.18. Termodinamik tablo yardımıyla entalpinin bulunması (Tablo A-4)



Şekil 6.19. Engineering Equation Solver (EES) programı ile entalpinin bulunması

6.1.5.2. Entropi

Entropi kavramı sistemdeki moleküllerin düzensizliğinin bir ölçütüdür. ‘s’ ile sembolize edilir. Bir sistemin entropi değişimi o sistemdeki düzensizliğin belirlenmesi ile ikinci yasa veriminin hesaplanmasını sağlar. Entropi değişimi sıfırdan küçük, sıfıra eşit veya sıfırdan büyük olabilir. Entropi korunumu söz konusu olan bir davranış değildir. Entropi sadece ideal durum olan tersinir hal değişimi sırasında korunur. Ayrıca entropi hal değişimi

sırasında görülen tersinmezliklerin ölçüsüdür. Tersinmezlik artınca entropi de artar. Entropi üretimi ise hal değişimi sırasında düzensizliğin artması ilkesine dayanır.

TABLO A-6

Kızgın su buharı

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)}^*$				
Doymuş†	14.670	2437.2	2583.9	8.1488
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827

Şekil 6.20. Termodinamik tablo yardımıyla entropinin bulunması

6.1.5.3. Yoğunluk ve Özgül Hacim

Maddeler bulundukları ortam koşullarında farklı yoğunluklarda olabilirler. Bu maddenin sıcaklığına ve basıncına bağlıdır. Örneğin su eksi derecelerde buz haline, yüksek sıcaklıklarda su buharına dönüşürken her fazda farklı yoğunluk değerine sahip olur. Bu yoğunluk farklılıkları, birim kütle başına maddenin sahip olduğu hacim değeri anlamına gelen özgül hacmini de değiştirmektedir. Özgül hacim olarak maddenin katı, sıvı ve gaz fazlarında şu şekilde farklılık gösterir; katı fazla özgül hacim en fazla iken gaz fazında özgül hacim değeri en düşüktür. Özgül hacim değerinin bilinmesi pompa gücü hesaplarında, kompresör seçiminde, ısı değiştirici hesaplarında oldukça önemlidir. Bu değerlere yine benzer şekilde termodinamik tablodan veya EES programından ulaşılabilir.

Özgül hacim (v) ile yoğunluk (ρ) arasındaki ilişki;

$$v = \frac{1}{\rho} \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

TABLO A-13					TABLO A-3		
Kızgın soğutucu akışkan-134a					Bilinen bazı sıvı, katı ve yiyeceklerin özellikleri		
T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg.K)	(a) Sıvılar		
	$P = 0.06 \text{ MPa } (T_{\text{doy}} = -36.95^\circ\text{C})$				Sıvı özellikleri		
Doymuş	0.31121	209.12	227.79	0.9644	Madde	Sıcaklık, °C	Yoğunluk ρ , kg/m ³
-20	0.33608	220.60	240.76	1.0174	Karbon dioksit	0	298
-10	0.35048	227.55	248.58	1.0477	Etanol	25	783
0	0.36476	234.66	256.54	1.0774	Etil alkol	20	789
10	0.37893	241.92	264.66	1.1066	Etilen glikol	20	1109
20	0.39302	249.35	272.94	1.1353	Gliserin	20	1261
30	0.40705	256.95	281.37	1.1636			
40	0.42102	264.71	289.97	1.1915			

Şekil 6.21. Termodinamik tablo yardımıyla yoğunluk ve özgül hacmini bulunması

6.1.5.4. Kullanılan Denklemler

Biyogaz tesisinde, proses için atık yüklemesi ile üretilen biyogaz miktarının hesaplarında kullanılan denklemler ile akışkanlara ait termodinamik özellikler tespit edildikten sonra enerji ve ekserji verimliliği hesapları için çeşitli denklemler kullanılacaktır. Bunların başlıcaları şunlardır;

Çürütücü reaktörlere yüklenen organik atık miktarı;

$$\dot{m}_{\text{organikyükleme}} = V_{\text{atık}} \times \rho \times \% \text{KM} \times \% \text{OKM} \text{ [kg/gün]} \quad (6.1)$$

Biyogaz üretim miktarı;

$$Y_{\text{biogaz}} = \% \text{KM} \times \% \text{OKM} \times \text{BGP} \text{ [m}^3\text{/ton.atık]} \quad (6.2)$$

Çürütücü reaktörlere organik yükleme miktarı;

$$\text{Organik yükleme oranı} = \frac{\dot{m} \times c}{V_R \times 100} \text{ [m}^3\text{/ton.OKM]} \quad (6.3)$$

Atıkların hidrolik bekleme süresi;

$$\text{Hidrolik bekleme süresi} = \frac{V_R}{\dot{m}} \text{ [gün]} \quad (6.4)$$

Yakma havası ve hava yakıt oranı hesaplarında kullanılacak denklemler;

Biyogazın yanması için gerekli minimum oksijen miktarı;

$$O_{2\min} = 1,87C + 5,6(H - \frac{O}{8}) + 0,7S \text{ [nm}^3 \text{ O}_2 \text{ /kg yakıt]} \quad (6.5)$$

Oksijen miktarı hacimsel olarak belirlendikten sonra hava miktarı belirlenir.

$$V_{\text{hava}} = O_{2\min} / 0,21 \text{ [nm}^3 \text{ hava /kg yakıt]} \quad (6.6)$$

Gerçek hava miktarı;

$$V_{\text{hava gerçek}} = V_{\text{hava}} \times \lambda \text{ [nm}^3 \text{ hava /kg yakıt]} \quad (6.7)$$

Termodinamik hesaplar için kullanılacak denklemler;

Kütle dengesi;

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_c \text{ [kg/s]} \quad (6.8)$$

Enerji dengesi;

$$E_{\text{giren}} - E_{\text{çıkan}} = \Delta E_{\text{sistem}} \quad (6.9)$$

$$\Delta E_{\text{sistem}} = \dot{m} (h_2 - h_1) \text{ [kj/s]} \quad (6.10)$$

$$\sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g = \dot{Q} + W_{\text{net}} \quad (6.11)$$

Enerji verimi;

$$\eta_{I \text{ birinci yasa}} = \frac{E_{\text{çıkan}}}{E_{\text{giren}}} [\%] \quad (6.12)$$

Biyogazın enerji değeri;

$$\dot{O}_{\text{biyogaz}} = \text{LHV}_{\text{biyogaz}} \times \dot{m}_{\text{biyogaz}} [\text{kJ/s}] \quad (6.13)$$

Entropi dengesi ve değişimi;

$$S_{\text{giren}} - S_{\text{çıkan}} = \Delta S_{\text{sistem}}$$

$$\Delta S_{\text{sistem}} = \dot{m} (s_2 - s_1) [\text{kJ/kg.K}] \quad (6.14)$$

Sıvı ve katılar için entropi değişimi;

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c(T) \frac{dT}{T} = c_{\text{port}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) [\text{kJ/kg.K}] \quad (6.15)$$

İdeal gazlar için entropi değişimi;

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = c_{\text{port}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln \frac{P_2}{P_1} [\text{kJ/kg.K}] \quad (6.16)$$

Enerji = Ekserji + Anerji

$$\dot{E}_X = \dot{E}_{X_{\text{fiz}}} + \dot{E}_{X_{\text{kim}}} + \dot{E}_{X_{\text{pot}}} + \dot{E}_{X_{\text{kin}}}$$

$$\dot{E}_{X_{\text{pot}}} = g \times h [\text{kW}] \quad (6.17)$$

$$\dot{E}_{X_{\text{kin}}} = \frac{1}{2} V^2 [\text{kW}] \quad (6.18)$$

Sıvı ve katılar için fiziksel ekserji akışı;

$$\psi_{fiz} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \text{ [kJ/kg]} \quad (6.19)$$

İdeal gazlar için fiziksel ekserji akışı;

$$\psi_{kim} = c_p(T - T_0 - T_0 \ln(\frac{T_2}{T_1})) + RT_0 \ln(\frac{P_2}{P_1}) \text{ [kJ/kg]} \quad (6.20)$$

Sıvı akışkanlara ait kimyasal ekserji hesabında termodinamik tablolar kullanılmıştır.

İdeal gazlar için kimyasal ekserji;

$$\psi_{kim} = \sum x_i \dot{E}_{kim} + RT_0 \sum x_i \ln(x_i) \text{ [kJ/kg]} \quad (6.21)$$

Kütle ile ekserji geçişi;

$$\dot{E}_{xfiz} = \dot{m} \times \psi_{fiz} \text{ [kW]} \quad (6.22)$$

$$\dot{E}_{xkim} = \dot{m} \times \psi_{kim} \text{ [kW]} \quad (6.23)$$

Ekserji yıkımı;

$$E_{xgiren} - E_{xçıkan} - E_{xyıkım} = 0 \quad (6.24)$$

İkinci yasa verimi;

$$\eta_{II \text{ ikinci yasa}} = 1 - \frac{E_{xyıkım}}{E_{xgiren}} \text{ [\%]} \quad (6.25)$$

İzantropik çıkış sıcaklığı;

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \text{ [K]} \quad (6.26)$$

Akışkanlar için termal güç hesabı;

$$\dot{Q}_t = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \text{ [kW]} \quad (6.27)$$

Pompalar için güç, enerji ve ekserji verimi hesabı;

$$W_i = \dot{m} \times v \times (P_2 - P_1) \text{ [kW]} \quad (6.28)$$

$$W_g = \frac{W_i}{h_i} \text{ [kW]} \quad (6.29)$$

$$\eta_{Ipompa} = \frac{W_g}{W_m \times h_i} \text{ [%]} \quad (6.30)$$

$$\eta_{IIpompa} = \frac{E_{çıkan} - E_{giren}}{W_g} \text{ [%]} \quad (6.31)$$

Isı değiştiriciler için enerji ve ekserji verimi hesabı;

$$\dot{Q}_{Isıdeğiştirici} = \dot{m}(h_{çıkan} - h_{giren}) \text{ [kW]} \quad (6.32)$$

$$\eta_{II,ısıdeğiştiricisi} = \frac{\dot{m}_{soğuk}(\psi_{çıkan} - \psi_{giren})}{\dot{m}_{sıcak}(\psi_{giren} - \psi_{çıkan})} \text{ [%]} \quad (6.33)$$

Türbin ve kompresör için güç ve ekserji verimi hesabı;

$$W_{türbin/kompresör} = \dot{m}(h_{çıkan} - h_{giren}) \text{ [kW]} \quad (6.34)$$

$$W_{kompresör} = \dot{m}(h_{çıkan} - h_{giren}) \text{ [kW]} \quad (6.35)$$

$$\eta_{II,türbin/kompresör} = \frac{h_{çıkan} - h_{giren}}{\psi_{çıkan} - \psi_{giren}} \text{ [%]} \quad (6.36)$$

Buhar üretimli atık ısı kazanı için enerji ve ekserji verimi;

$$\dot{Q}_{\text{kazan}} = \dot{m}(h_{\text{buhar}} - h_{\text{su}}) \text{ [kW]} \quad (6.37)$$

$$\eta_{\text{Ikazan}} = \frac{\dot{m}(h_{\text{buhar}} - h_{\text{su}})}{\dot{Q}_{\text{egzoz}}} \text{ [%]} \quad (6.38)$$

$$\eta_{\text{IIkazan}} = \frac{\dot{m}_{\text{su}}(\psi_{\text{çıkan}} - \psi_{\text{giren}})}{\dot{m}_{\text{buhar}}(\psi_{\text{giren}} - \psi_{\text{çıkan}})} \text{ [%]} \quad (6.39)$$

Biyogaz motoru ve kojenerasyon ünitesi enerji ve ekserji verimi hesabı;

$$\eta_{\text{Ibiyogaz motoru}} = \frac{W_{\text{net}}}{\dot{m}_{\text{biyogaz}} \times \text{LHV}_{\text{biyogaz}}} \text{ [%]} \quad (6.40)$$

$$\eta_{\text{Ikojen}} = \frac{W_{\text{net}} + \dot{Q}_{\text{ısı}}}{\dot{m}_{\text{biyogaz}} \times \text{LHV}_{\text{biyogaz}}} \text{ [%]} \quad (6.41)$$

$$\eta_{\text{IIkojen}} = 1 - \sum \frac{\dot{E}_{\text{Xyıkım}}}{\dot{E}_{\text{Xgiren}}} \text{ [%]} \quad (6.42)$$

Tüm bu denklemler ile tesis boyunca akım numaralarına göre ve akışkan türlerine göre termodinamik denklemler kullanılarak enerji, entropi ve ekserji değişimleri ve denklikleri hesaplanır.

6.2. Yöntem

Biyogaz tesisinde enerji ve ekserji analizi yapabilmek için sistemin sınırlarının belirlenmesi gereklidir. Sistemde kütle sürekli akış halindedir ve kütle korunumu söz konusudur, sisteme giren kütle ile çıkan kütle eşit kabul edilir. Bu nedenle teze konu olan biyogaz enerji üretim santralinde de sürekli akış sürekli açık olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada temel kabuller şunlardır;

- Çevre şartları 25 °C sıcaklık 89 kPa basınç olarak referans alınmıştır. Bunun temel sebebi tesisin bulunduğu konumun rakımının 1080 metre olması ve bu yükseklikte atmosfer basıncının 89 kPa olmasıdır.
- Biyogaz ve egzoz gazı ideal gaz yasasına göre hesaplarda kullanılmıştır.
- Yanma işlemi tam yanma olarak gerçekleşmiştir.
- Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilmiştir.
- Biyogaz içerik ölçümü seyyar gaz ölçüm cihazı ile ölçülmüş, kalorifik değeri hem cihaz hem de formülasyon ile ayrı ayrı hesaplanmış ve kıyaslanmıştır
- Atık hammaddesi kalorifik değeri formülle hesaplanmış, 1 m³ biyogaz için eşdeğer atık hammaddesi hesabı yapılmıştır.
- Atık hammaddesi %KM ve %OKM değerleri laboratuvar ortamında ölçülmüştür.
- Atık hammaddesi biyogaz potansiyeli verisi değeri literatürde kabul görmüş değerlerden alınmıştır.
- Yakma havası içeriği %60 bağıl nem içeren Bingöl atmosfer koşulları ve tesisten alınan ölçümlerin referansı ile alınmıştır.
- Yanma reaksiyonu kimyasal denkliği yazıldıktan sonra biyogaz motoru verilerinden alınan lambda(λ) değeri ile gerçek yanma katsayısı belirlenmiştir.
- Egzoz gazı içeriği yanma reaksiyonu kimyasal denkliği ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların motor egzoz emisyon ölçüm raporu ile doğruluğu yapılmıştır.
- Akış diyagramı çizilirken tesisteki tüm ekipman ve enstrümanlar konumlarına göre şekillendirilmiştir.
- Biyogaz motoru gömlek suyunda etilen + glikol (antifriz) içeriği dikkate alınmıştır. Bu değer Bingöl donma noktası -37 °C referansı ile tesisin gerçek verileri kullanılarak kabul edilmiştir. Karışım oranı %50 su %50 antifrizdir.
- Proseste soğutma ve ısıtma amaçlı kullanılan etilen + glikol için kimyasal bir değişim söz konusu olmadığından kimyasal ekserjisi suyun kimyasal ekserjisi ile eşit kabul edilmiştir. Çünkü kimyasal ekserjileri sonuçlara etki etmeyecektir.
- Debimetre üzerinden ölçümü olmayan noktalarda kütle değeri formülü ile hesaplanmıştır. Hacimsel debiler akışkan yoğunluğu ile çarpılarak kütleli debiye çevrilmiştir.
- Ölçüm noktası olmayan sıcaklık ve basınç değerleri termodinamik formüllerinden bulunmuştur. (Sistemler adyabatik ve entropi geçişsiz kabul edilmiştir)

- Manometrik basınçlarda referans basınç 89 kPa olarak alınmış, göstergeli manometre üzerinde ölçülen değerler atmosfer basıncı eklenerek hesaplarda kullanılmıştır. Bu hesaplamalarda sonucu değiştirmeyecektir.
- ABS (mutlak basınç) basınç değerleri direkt olarak alınmıştır.
- Pompaların mekanik verimleri etiket bilgileri ve kataloglarında yazan değerlerden alınmıştır. Her pompa için izantropik güçler hesaplanmıştır.
- Gübrelere ait özgül ısılar laboratuvar ortamında ve formülle hesaplanmış, kıyas yapılarak formüllerin doğruluğu teyit edilmiştir.
- Anaerobik çürütme sisteminde enerji analizi yapılırken çürütücü reaktöre giren gübre ve çıkan çürütülmüş atığın kütle, sıcaklık, basınç gibi değerleri işletme verilerinden ve ölçümlerden alınmıştır. Giren ve çıkan ısılar ve aynı şekilde giren ve çıkan iş ayrı ayrı hesaplanmıştır.
- Anaerobik çürütücülerin tesiste faaliyet gösterdiği gibi üç adet besleme reaktörü, bir tanesi son çürütme reaktörü olarak kabul edilmiş, son çürütme reaktöründe biyogaz üretimi yok sayılmıştır, bunun temel nedeni bu reaktöre herhangi bir taze atık hammaddeyi yüklemesi yapılmamasıdır.

6.2.1. Atık Hammaddesi ve Çürütücü İçeriği

Biyogaz tesislerinde hayvansal kaynaklı, bitkisel kaynaklı, belediye ve arıtma tesisi kaynaklı çeşitli atık hammaddeleri enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bunların enerjiye dönüşen bölümü atıkların organik içeriğidir. Bu içeriğe göre ne kadar enerji üretileceği hesaplanabilir. Bu çalışmada hayvansal kaynaklı bir biyogaz tesisi incelenmiş, atık hammadde olarak sıvı süt ineği gübresi seçilmiştir. Gübrenin miktarı işletme verilerinden hat üzerindeki debimetre değerinin ortalaması olan $650 \text{ m}^3/\text{gün}$ alınmıştır. Süt ineği gübresine ait özellikleri belirlemek için öncelikle gübreden homojen şekilde numune alınmış, alınan numunenin önce katı madde testi, daha sonra organik katı madde testi laboratuvar ortamında yapılmıştır.

Testlerin yapılışında kroze kaplar kullanılmış 5 gram numune ölçüt olarak alınarak etüv ve kül fırınında ilgili deneylere tabi tutulmuştur. Etüvde 2 saat bekletilen numune, etüvden çıkarıldıktan sonra desikatörde oda sıcaklığına getirilmek için yarım saat bekletilmiştir. Daha sonra kabın içindeki numune ile birlikte tartımı alınmıştır. Daha sonra tartımı yapılan

numune kül fırınında 40 dakika kadar bekletilmiş, kül fırınından çıkan organik içeriği uçmuş kül içerikli numune tekrar desikatörde oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Oda sıcaklığındaki son numunenin de hassas terazide tartımı alınarak ham madde analizinde belirtilen denklemler kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Testlerin sonuçları Tablo 6.4’te gösterilmiştir.



Şekil 6.22. KM-OKM test numuneleri soldan sağa (sıvı süt sığırı gübresi, çürütücü atığı, post çürütücü atığı, seperatör sonrası sıvı)



Şekil 6.23. Etüv ve kül fırınında numunelerin hazırlanma

Katı madde ve Organik katı madde deneyi							
Numune adı	%KM	%OKM	%Kül	Kabın Darası	1.Tartım	2.Tartım	3.Tartım
Süt Sığırı Gübresi	8,39%	73,17%	26,83%	20,7578	32,5340	21,7462	21,0230

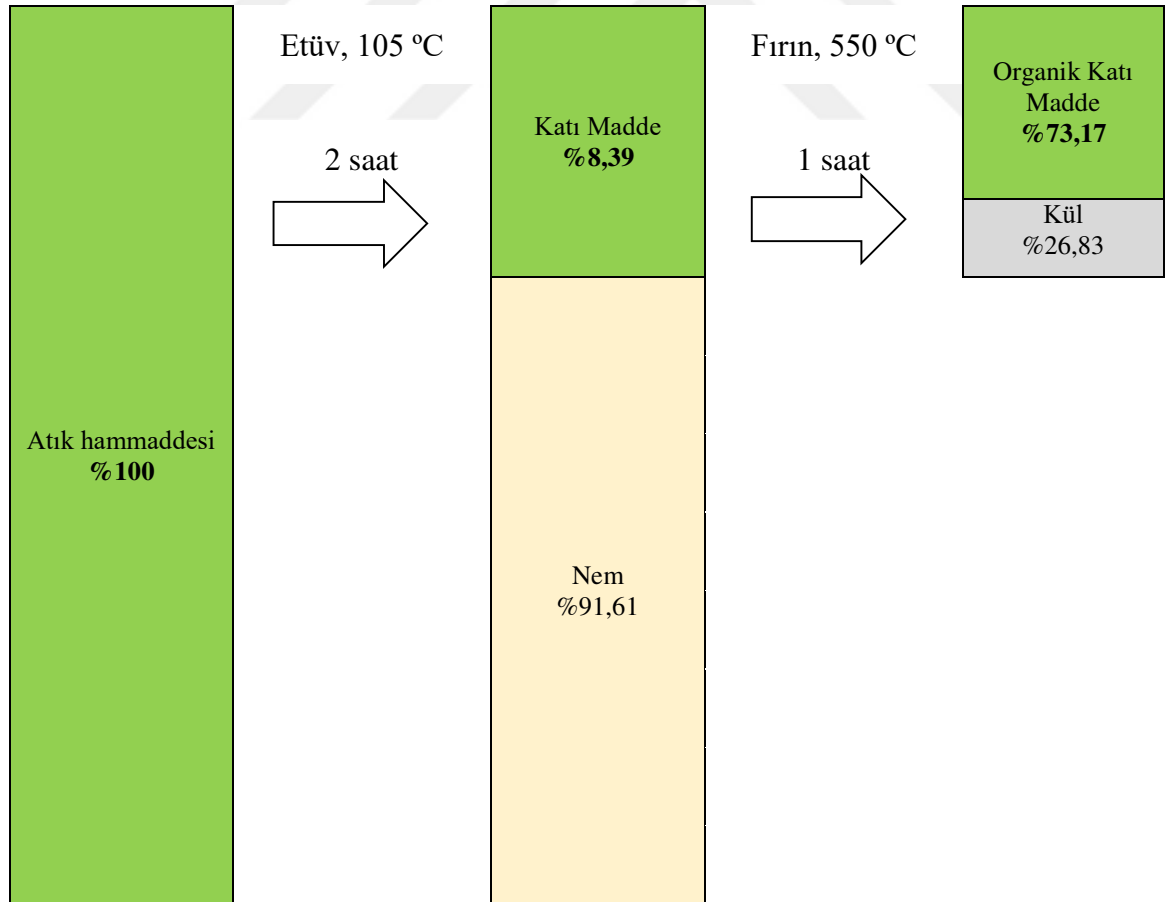
Tablo 6.4. Sıvı süt sığırı gübresi katı madde ve organik katı madde analizi

Elde edilen bu sonuçlar yorumlanacak olunursa, gelen yaş gübre miktarının enerjiye dönüştürülecek kısmı katı madde testi sonucu çıkan %8,39 değeridir. Geriye kalan % 91,61'lik kısım nemdir ve enerji değeri yoktur. Elde edilen kuru baz gübrenin ise organik katı madde tayini sonrası elde edilen %73,17 değeri organik içerik olup enerjiye dönüşen miktarı temsil eder. Kül miktarı ise inorganik içerik olup herhangi bir enerji değeri yoktur. Biyogaz tesisine günlük gelen 650 m³/gün sıvı gübrenin biyogaza dönüşen denklem (6.1)'e göre hesaplanmıştır.

$$\dot{m}_{\text{organikyükleme}} = 650 \text{ m}^3/\text{gün} \times 1031 \text{ kg/m}^3 \times \%8,39 \times \% 73,17$$

$$\dot{m}_{\text{organikyükleme}} = 41,14 \text{ ton/gün}$$

Bu çürütücülere yüklenen biyogaza dönüşebilen günlük organik atık miktarıdır. Toplam yüklenen atığın geri kalan kısmı fermentasyona uğrayamayacağından enerji değeri yoktur.



Şekil 6.24. Atık hammadde kütle dengliği

Bir süt sğırı gübresine ait toplam kütlesinin enerjiye dönüşen kütle denkliğini hesaplayacak olursak 100 birim kütlenin 6,138 birimi enerji için ham madde, geriye kalanı ise enerjiye dönüştürülemeyen nem ve küldür. Organik atıklar etüvde 105 °C ortalama 2 saat bekletilirse nemi alınır, 550 °C’de bir saat bekletilirse atığın organik içerikleri yanarak geriye sadece kl kalır. Uçucu bu miktar atığın enerjiye dönüşen bölümüdür.

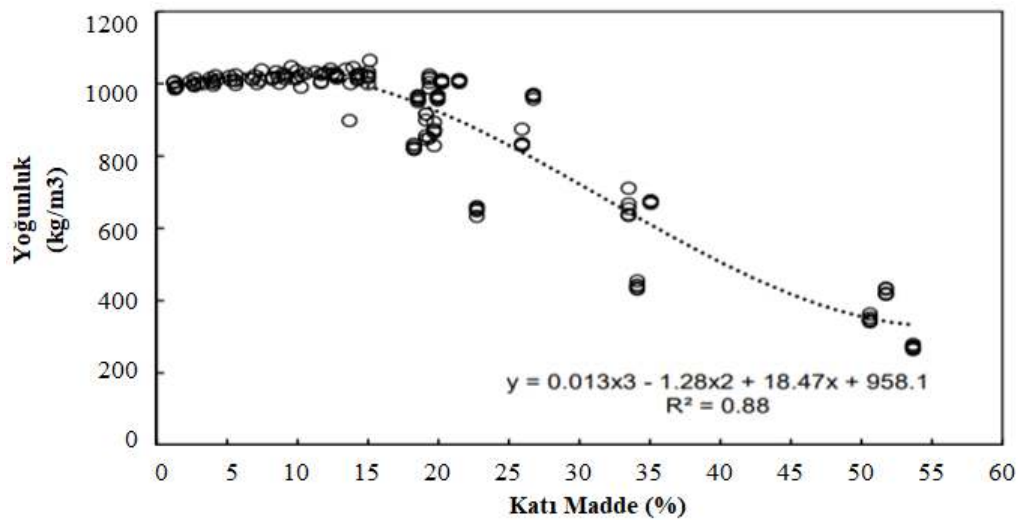
Süt ineği gübresinden bir ton için elde edilebilecek biyogaz miktarını bulabilmek için denklem (6.2) kullanılmıştır;

$$Y_{\text{biyogaz}} = \% \text{ KM} \times \% \text{ OKM} \times \text{BGP}$$

$$Y_{\text{biyogaz}} = \%8,39 \times \%73,17 \times 300 \text{ Lbiyogaz/kg.OKM}$$

$$Y_{\text{biyogaz}} = 18,41 \text{ m}^3/\text{ton.atık}$$

Süt ineği gübresinin termodinamik özelliklerini tespit edebilmek için yoğunluk ve özgül ısı değerini bulmak gereklidir. Gbreye ait yoğunluk değerini bulabilmek için “Wang H., Horacio A., Larson R. et al. Alkan A.” tarafından 7 ayrı çiftlikten alınan süt sğırı gübresi örnekleriyle yoğunluğun katı madde oranı ilişkisini test ettikleri ve bunu bir regresyon formülü ile hesapladıkları çalışmadan referans alınmıştır.



şekil 6.25. Gübrenin yoğunluk ve katı madde oranı arasındaki ilişki (Wang H., Horacio A., Larson R. et al. Alkan A.)

Referans yaklaşımına göre yoğunluk tespiti için gübrenin katı madde oranı ile sonuç elde edilebilir.

$$\rho = 0,013 \times \%KM^3 - 1,28 \times \%KM^2 + 18,47 \times \%KM + 958,1$$

$$\rho = 0,013 \times \%8,39^3 - 1,28 \times \%8,39^2 + 18,47 \times \%8,39 + 958,1$$

$$\rho = 1031 \text{ kg/m}^3$$

Özgül ısı hesabı içinde “A. G. Hashimoto, Y. R. Chen et al. V. H. Varel” çalışmasından referans alınmıştır.

$$c_p = 4,17 \times [1 - 0,00812 \times \% KM]$$

$$c_p = 4,17 \times [1 - 0,00812 \times \% 8,39]$$

$$c_p = 3,896 \text{ kJ/kg. K}$$

Özgül ısı hesabı için kullanılacak formülün teyiti için ayrıca ısıtma deneyi yapılmıştır. Bu deneye göre 500 ml cam behere ayrı ayrı su ve gübre konularak laboravutarda bulunan manyetik ısıtıcı kullanılmıştır. Bu deneyde aynı anda çevre şartlarının eşit olduğu ortamda su ve süt sığırı gübresi iki ayrı cam behere konularak ilk sıcaklık değerleri ve kütleleri kayıt altına alınmış, daha sonra manyetik ısıtıcı 10 dk süreyle iki akışkanı ısıtarak 18.023 joule ısı enerjisi vererek su ve gübreyi ısıtmıştır. Bu enerji değerinin hesaplanması için suyun ısınma ısısı kullanılmıştır. 24 °C sıcaklıktaki su 74 °C’e, 28 °C’deki inek gübresi ise 28 °C sıcaklıktan 73 °C’e ısınmıştır. Gübre özgül ısı değerinin hesaplanması için denklem (6.27) kullanılmıştır.

$$Q = m \times c_p \times \Delta T$$

$$18023 \text{ joule} = 102,89 \times c_p \times 45$$

$$c_p = 3,9 \text{ kJ/kg. K}$$



Şekil 6.26. Elektrikli manyetik ısıtıcı ile gübre özgül ısı tayini düzeneği

GÜBRE ÖZGÜL ISISI			
10 dk boyunca aynı plaka üzerinden ısıtılmıştır			
Su		Süt sığırı gübresi	
Boş Dara	103,25	Boş Dara	107,41
Dolu Dara	189,35	Dolu Dara	210,3
Su Kütlesi	86,1	Gübre Kütlesi	102,89
T1	24	T1	28
T2	74	T2	73
Sıcaklık Farkı	50	Sıcaklık Farkı	45
Özgül ısı: 4,187		Özgül ısı: 3,893	
Verilen Enerji	18023 joule	Verilen Enerji	18023 joule

Tablo 6.5. Süt sığırı gübresi özgül ısı deneyi

Elde edilen sonuçlara bakılınca formülün kabul görür sonuçlar verebileceği görülmüş, gübre içerikli diğer akışkanlarda da kullanılabileceği saptanmıştır. Atık hammaddesi çürütücülere yüklendikten sonra içerde fermentasyon gerçekleşir ve bir miktar atık biyogaza dönüşür. Bu oranı belirlemek için kütle kaybı hesabı yapılır.

Atık hammaddesi kütlesi;

$$\dot{m}_{\text{atık}} = 650 \text{ m}^3/\text{gün} \times 1031 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{\text{atık}} = 670150 \text{ kg/gün}$$

Yüklenen bu atığa karşılık elde edilecek biyogaz miktarı hesabı yapılacak olunursa;

$$\dot{m}_{\text{biyogaz}} = \dot{m}_{\text{atık}} \times \%KM \times \%OKM \times BGP$$

$$\dot{m}_{\text{biyogaz}} = 650 \text{ m}^3/\text{gün} \times \%8,39 \times \%73,17 \times 300$$

$$\dot{m}_{\text{biyogaz}} = 11971 \text{ m}^3/\text{gün} \times 1,265 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m}_{\text{biyogaz}} = 15143 \text{ kg/gün}$$

Kütle kaybı ise toplam yüklenen atıktan üretilen biyogaz miktarının çıkarılması ile geriye kalan kısımdan hesaplanabilir.

$$\dot{m}_{\text{fermente}} = 670150 - 15143 = 655007 \text{ kg/gün}$$

Giren kütlenin biyogaza dönüşen miktarını çıkarıldığında beslenen atığın %2,2 kadarının biyogaza dönüştüğünü görülmektedir.

Geriye kalan kütle çürütülmüş gazı alınmış fermentedir. Çürütücü içerisine alınmış gazı alınan atık, çürütücü atığı olarak isimlendirilecektir. Çürütücü de çürümüş atık daha sonra post çürütücüde iyice gazı alındıktan sonra çürütücü tankından tahliye edilir ve seperatörlere katı ve sıvı faza ayrılmak üzere gönderilir. Post çürütücüde biyogaz üretilmediği kabul edilerek işlemler yapılmıştır.

Laboratuvar ortamında çürütücüden, post çürütücüden ve seperatörden geçirilen sıvı fermente gübrelerden birer numune alınıp katı madde ve organik katı madde analizlerine bakılmıştır. Bu analizlerde numunelerin homojen alınmasına özen gösterilmiş, deneyde

kullanılan numune miktarları 5 gr alınmıştır. Numuneler oda sıcaklığına desikatör yardımıyla getirilmiş ve tartımlar yazılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.6’da belirtilmiştir.

Katı madde ve Organik katı madde deneyi							
Numune adı	%KM	%OKM	%Kül	Kabın Darası	1.Tartım	2.Tartım	3.Tartım
Çürütücü atığı	6,29%	63,57%	36,43%	19,9478	25,0177	20,2665	20,0639
Post çürütücü atığı	5,92%	64,81%	35,19%	20,4210	26,3360	20,7711	20,5442
Seperatör çıkış sıvısı	5,16%	64,76%	35,24%	18,9205	23,4325	19,1532	19,0025

Tablo 6.6. Çürütücü atığı, post çürütücü atığı ve sıvı fermentenin katı madde ve organik katı madde analiz sonuçları

Atık hammadde dönüşümü çürütücüde çürütme ve biyogaz eldesi, daha sonra post çürütücüde son gazın alınması ile digestat eldesi sonrası seperatör ünitelerine aktarım ile katı ve sıvı fermente gübre şeklindedir. Ancak bu dönüşümlere ait termodinamik özellikler değişkenlik gösterecektir. Bu numunelere ait yoğunluk ve özgül ısı analizleri hesaplanıp sonuçlar Tablo 6.7’de gösterilmiştir.

Numuneler	Katı Madde	Yoğunluk	Özgül ısı
Çürütücü atığı	6,29	1027 kg/m ³	3,957
Post çürütücü atığı	5,92	1025 kg/m ³	3,970
Seperatör çıkış sıvısı	5,16	1021 kg/m ³	3,995

Tablo 6.7. Çürütücü atığı, post çürütücü atığı ve sıvı fermentenin termodinamik özellikleri

6.2.2. Biyogaz Eldesi ve Özellikleri

Atık hammaddesinin çürütücü içerisine aktarılmasından sonraki aşama artık atığın fermentasyona uğraması ve biyogaza dönüşmesidir. Bu aşama 4 kademede gerçekleşir ve içerik olarak metan ve karbondioksit ağırlıklı biyogaz bunun son evresidir. Çürütücü 6,9-8,2 pH aralığında ve 35-42 °C sıcaklık aralığında mezofili çalışma şartlarında fermentasyon gerçekleştirir. Bu sırada asetogenez ve metanogenez bakterileri simbiyotik bir yaşam döngüsüyle asitleşme ve metan oluşum evrelerini gerçekleştirir. Çürütücü tanklarının işletmesel olarak günlük, haftalık ve aylık takip verileri ile takip edilmesi oldukça

önemlidir. Günlük testlerde sıcaklık, pH, katı madde içeriği, doluluk oranı gibi parametreler kontrol edilirken, haftalık testlerde FOS/TAC oranı, organik yükleme, karıştırma etkinliği kontrol edilir, aylık kontrollerde ise ekipman kontrolleri ve gaz üretim verimleri incelenir. Canlı mikroorganizmanın sürekliliği için tüm parametreler dikkatli takip edilmeli ve erken müdahale alanı yaratılmalıdır.

Biyogaz içeriği saptanması için çeşitli ölçüm metodları mevcuttur. Bunların bazıları sürekli ölçümler alırken bazıları ise anlık ölçümler ile sonuç vermektedir. Sürekli ölçüm özelliğine sahip cihazlar biyogaz toplama kollektörüne veya hattına bağlı gaz dedektörlerinden bilgi alarak biyogazın içeriği hakkında sonuç verirken, anlık ölçüm özelliğın sahip taşınabilir portatif biyogaz analizörleri kullanıcı kullanımı ile prob yardımıyla biyogaz ölçümü yapılabilir. Ancak en yaygın ölçüm yöntemi portatif gaz ölçüm cihazlarıdır. Bu cihazlar anlık ölçüm alabilmektedirler. Bu çalışmada kullanılan gaz analizörü portatif tipli anlık ölçüm yapabilen cihazdır. Kullanılan biyogaz analizörüne ait teknik bilgiler Tablo 6.8’de belirtilmiştir.

Marka - Model	Teknik Özellikler
MRU OPTİMA 7	3,5" Renkli ekran
	Parametreler: O ₂ , CO ₂ , CH ₄ , H ₂ S
	H ₂ S: 0-2000 ppm
	CH ₄ :0-100%
	CO ₂ :0-100%
	O ₂ :0-21%
	Batarya : 2-8 Saat devamlı ölçüm
	Fiberglas korumalı, mıknatıslı yüzey
	110X225X52 (EXBXY)

Tablo 6.8. Portatif biyogaz analizörünün teknik özellikleri

Tesise beslemesi yapılan sıvı süt sığırı gübresinin fermentasyonu sonrası elde edilen biyogaz bir toplama kollektöründe toplanarak gaz soğutma cihazında soğutulur ve içerisindeki bağıl nem arındırılmış olunur. Ortalama 10 °C sıcaklığa getirilerek kurutulan biyogaz daha sonra biyogaz motoruna gönderilmek üzere blower adı verilen basınçlandırma ünitelerine iletilir. Tesis işletme kayıtları da incelendiğinde yıl boyu ortalama metan oranı %54-56 arası değişkenlik gösteren değerlerdedir. Bu nedenle %55

metan değeri gerçek veriler elde etmede doğru bir referans olacaktır. Biyogaz kollektöründen alınan biyogaz analiz sonucu Şekil 6.27’de gösterilmiştir.



Şekil 6.27. MRU Optima7 gaz ölçüm cihazı ile biyogaz ölçümü

6.2.3. Biyogaz Tesisi

Biyogaz tesisinde enerji ve ekserji analizi yapabilmek için önce proses akış şemasının belirlenmesi gereklidir. Bir biyogaz tesisinde iş akışı özetle şu şekildedir, önce atık hammaddesi ön çöktürme/dengeleme havuzu adı verilen bir havuzda toplanır. Burada atıklar karıştırıcılar ile etkin bir şekilde karıştırılarak homojen hale getirilir. Burada asıl amaç atıkların çürütücülere aktarılması için mekanik pompaların basabileceği uygun katı madde oranına getirilerek hazırlanmasıdır. Sürekli beslemeli tez için incelenen bu biyogaz tesisinde bu değer %7-9 katı madde arasındır. Bu akışkan forma getirilen atık hammaddesi mono pompalar yardımıyla çürütücülere aktarılır. Aktarım hattı üzerinde debi ölçen elektronik bir sayaç bulunur ve belirli parametreler gözetilerek yüklenir. Tesiste bulunan her bir çürütücüye otomasyondan belirlenen besleme miktarı değerine göre eşit şekilde dağıtılması sağlanarak her bir çürütücü reaktörden olabildiğince dengeli biyogaz üretimi istenmektedir. Çürütücülere atık hammaddesi yüklenmesindeki en temel prensip atık yükleme miktarı atıkların organik yükü ve hidrolik bekleme süresidir. Atıkların optimum

biyogaz üretmesi için belirli oranda çürütücü içerisinde bekletilmesi gereklidir. Bu süre atık hammadde türüne göre değişkenlik gösterir. Süt sığırı gübresi için ideal bekleme süresi 20-40 gün arasındır. Hidrolik bekleme süresinin fazla olması atıkların çürütücü reaktörde tamamen çürütülmesi ve organik içeriğin biyogaza dönüşmesinin sağlanmasını sağlamaktadır.

Tesiste kütleli akışlar debimetrelerden alınan değerlerden, sıcaklıklar PT100 veya termometrelerden, basınç değerleri basınç transmitterleri veya manometrelerden, seviye bilgileri seviye transmitterlerinden alınmaktadır. Bu bilgiler günlük işletme verileri ve otomasyon verileri değerleridir ve değerler uzun süre gözlemlenmiş ve ortalama değer alınmıştır.

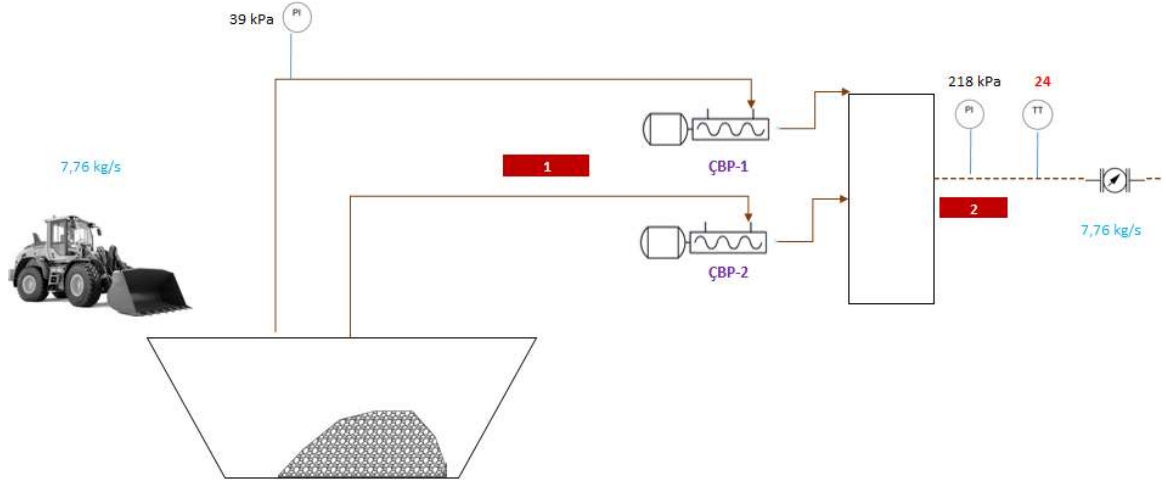
Biyogaz tesisi akış şeması dört ayrı şemada incelenecektir. Bunlar;

- Atık hammadde kabul birimi
- Anaerobik fermentasyon birimi
- Susuzlaştırma birimi
- Kojenerasyon ve enerji üretim birimi

6.2.3.1. Atık Hammadde Kabul Birimi

Atık hammadde kabul biriminde saatlik yüklenen atık ve çürütücüye aktarımı yapılan atıkların hazırlandığı giriş birimidir. Burada atıklar belirli bir proses işletme planına göre yüklenir ve çürütmeye gönderilir. Atıkların ön kabul birimine alınma sebebi çürütücülere inorganik atık girişini minimuma indirmek, daha homojen karışım elde etmek ve bazı tesislerde ısıtma yaparak çürütücülerde ısıyı muhafaza etmektir. Süt sığırı gübresi dengeleme havuzuna alınır ve karıştırıcılar ile karıştırılır ve seviye transmitteri yardımı ve plc alt yapısı ile pompalara girilen seviye şartı sağlanarak çürütücülere aktarımı yapılır. Süt sığırı gübresinin içerisinde gelen taş, toprak, kum vb. inorganik atıklar çökeltilir. Atık hammadde ön kabul havuzunda iyice karıştırılıp homojen hale getirildikten sonra gübre transfer pompaları ile çürütücü tanklarına gönderilir. Bu işlem otomasyon ile sağlanır günlük hedef atık hammadde yükleme miktarı seçildikten sonra yükleme oranı ayarı ile toplam besleme 24 saate bölünerek pompanın çalışma şartları belirlenerek otomatik olarak

çürütücü tanklarına atık yüklemesi yapılır. Bu aynı zamanda ön kabul havuzu ve çürütme tanklarının da seviye şartlarını sağlayarak yapılır.



Şekil 6.28. Atık hammadde kabul birimi

Sıvı sığır gübresi günlük yükleme miktarı ortalama $650 \text{ m}^3/\text{gün}$ 'dür. Bu atık dengeleme havuzuna alınır ve etkin şekilde karıştırılır. Daha sonra ise mono pompalar yardımıyla çürütücüye aktarılır. Bu aktarım miktarı debimetre üzerinden alınan veri ile ölçülür. Tesiste bulunan otomasyon sisteminde günlük yüklenmesi gereken atık miktarı belirlenerek 24 saatlik süreye bölünerek yükleme ayarı saati ile çürütücülere aktarma yapılır. Otomasyon sorumlusu günlük beslenen $650 \text{ m}^3/\text{gün}$ atık miktarı her bir çürütücüye eşit miktarda yüklenme şartı ile yüklenir. Biyogaz tesisinde süt sığırı dışkısının sisteme yüklenmesi ile üretilecek biyogaz miktarı hesaplanmıştır.

Biyogaz Tesisi Atık Yükleme	Birim	Miktar
Süt sığırı gübresi yükleme miktarı	$\text{m}^3/\text{gün}$	650
Üretilen biyogaz miktarı	$\text{m}^3/\text{gün}$	11971
Metan İçeriği	%	55

Tablo 6.9. Biyogaz tesisi atık yüklemesi

Özgül ısı, yoğunluk gibi termofiziksel özellikleri tespit edilen atık hammaddesi için entalpi ve entropi değerleri hesaplanır. Atık hammaddesi sıvı formunda olduğu için sıvı

akışkanların ekserji hesapları yapılırken kullanılan formüller kullanılır. Atık hammaddesi için entalpi hesabı yapılırken denklem (6.10) kullanılmıştır entropi değişimi için de denklem (6.15) kullanılmıştır.

Bölüm 6.2.1’de süt sığırı gübresi, çürütücü atığı, post çürütücü atığı ve sıvı fermente için hesaplanan özgül ısı değeri ile tesisin akış diyagramında her akım numarası için bulunduğu ana ait sıcaklık ve basınç değerlerine göre entalpi ve entropi değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Benzer şekilde her akım numarasına ait akışkanlara ait yoğunlukta hesaplanarak ilgili tabloda yerlerine yazılmıştır.

Akım No	Akışkan	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Kütle (kg/s)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (kJ/kg.K)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg.K)
0'	Süt sığırı gübresi	298	89	0,00	1031	3,89	97,1	0,34
1	Süt sığırı gübresi	297	39	7,76	1031	3,89	93,3	0,33
2	Atık hammaddesi	297	218	2,59	1031	3,89	93,3	0,33
3	Ç-1 besleme	297	218	2,59	1031	3,89	93,3	0,33
4	Ç-2 besleme	297	218	2,59	1031	3,89	93,3	0,33
5	Ç-3 besleme	297	129	2,59	1031	3,89	93,3	0,33

Tablo 6.10. Atık hammaddesi termodinamik özellikleri

Atık kabul biriminde sığır gübresi olarak adlandırılan hammadde, havuzda etkin karıştırıldıktan sonra atık hammaddesi olarak nitelendirilmiştir. Havuzdaki sıcaklığı 24 °C olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm farklı zaman aralıklarında ayrı ayrı ölçülmüş, ölçülen sıcaklıkların ortalaması olarak da kabul edilmiştir. Sığır gübresi tesise bir havuzdan yer altı hattıyla pompa yardımıyla gönderilmektedir. Hacimsel akışı debimetre üzerinden ölçülmektedir. Gübrenin sıcaklığı ise mevsimlere göre değişkenlik gösterebilir. Bu mevsimsel değişiklikler göz önüne alınarak işletme tarafından günlük ölçülen sıcaklık değerlerinin tutulduğu kayıtlardan da ortalama olarak kıyaslanarak 24 °C atık sıcaklığı kabul görür bir değerdir. Ölçüm kalibrasyonlu el termometresi ile yapılmıştır.



Şekil 6.29. Sığır gübresinin atık kabul biriminde ölçülen sıcaklığı

Entalpi ve entropi değerlerini hesaplamak için atık hammaddesinin sıcaklık ve basınç bilgileri ile özgül ısı ve yoğunluk bilgileri kullanılmaktadır. Ancak biyogaz tesisinde ham atık ve diğer fermente ürünlerin kimyasal analizini yapmak için elemental analiz yapmak gerekir. Ayrıca anaerobik çürütücüler içerisinde biyogaz oluşumu aşamalarında farklı kimyasal reaksiyonlar olduğundan net bir kimyasal ekserji hesabı yapmak mümkün olmayacaktır bunun yanı sıra kimyasal ekserji bu reaksiyonlar sırasında sürekli değişkenlik gösterebilir. Bu çalışmada sadece fiziksel ekserjileri üzerinden hesaplama yapılacaktır.

Bu sistemde enerji ve ekserji analizi yapılacak ekipmanlar çürütücüye atık aktarımı yapan mono pompalardır. Bu pompalar gübre transferi için özel üretilmiş katı madde transfer aralığı %0-13 katı madde olan eksantrik helezon yapılı pompalardır. Akışkan transferini doğru şekilde sağlamak için emiş hattında basınç oluşturularak transfer sağlanır. Bir adet asıl bir adet yedekli olarak kurulan ancak aynı anda da çalışabilen bu pompalara ait teknik özellikler Tablo 6.11’de gösterilmiştir.

Çürütücü Besleme Pompası	
Akış Miktarı	40 m ³ /h
Basınç Aralığı	4,5 bar
Devir	138 rpm
Çalışma Sıcaklığı	30-40 °C
Güç	5 kW

Tablo 6.11. Mono pompa etiket bilgileri



Şekil 6.30. Atık besleme mono pompası

Sistemde iş yapan çürütücü besleme pompalarına ait ekserji analizi yapmak için giren ve çıkan akımların belirlenmesi gerekir. Pompa öncesi 1 numaralı akım ve akışkana ait değerler, pompa sonrası 2 numaralı akım ve akışkana ait değerler göz önüne alındığında çürütücü besleme pompalarının enerji ve ekserji verimi şu şekildedir;

$$W_i = \dot{m} \times v \times (P_2 - P_1)$$

$$W_g = \frac{W_i}{h_i}$$

$$h_2 = (h_1 + \frac{W_g}{\dot{m}})$$

$$\eta_{\text{pompa}} = \frac{\dot{E}_{x2} - \dot{E}_{x1}}{W_g}$$

Otomasyon verileri ile uzun süreli gözlemler ve işletme kayıtları da incelendiğinde bir pompanın saatlik akış transfer debisinin ortalama 36 m³/h olduğu, pompanın emiş tarafında vakum olduğu, giriş basıncının ortalama 0,4 bar ve pompa basma basıncının 1,3 bar olduğu görülmüştür.

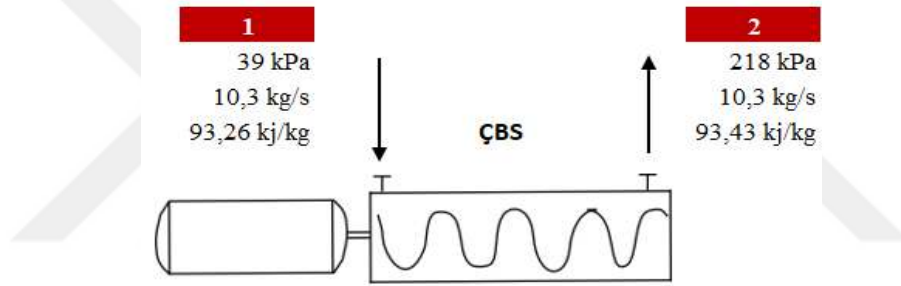
Kütlesel debi 10,13 kg/s, özgül hacim 0,000970 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 218 kPa ve 39 kPa, h_1 ve h_2 ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{\text{ÇBP(i)}} = 10,13 \times 0,000970 \times (218 - 39) = 1,79 \text{ kJ/s}$$

$$W_{\text{ÇBP(g)}} = \frac{1,79}{0,73} = 2,45 \text{ kJ/s}$$

$$h_2 = (93,26 + 1,79/10,13) = 93,43 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{ÇBP(IIyasa)}} = \frac{1,86 - 0,07}{2,45} = \%73$$



Şekil 6.31. Çürütücü besleme pompası giren akım ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basınç (kPa)	Giriş Basınç (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
1-2	ÇBP	10,13	0,000970	218,0	39,0	2,45	5,0	73%	67%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
0,07	1,86	1,79	73%

Tablo 6.12. Çürütücü besleme pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Pompaya ait enerji verimi hesabında mekanik güç olarak pompa kataloğu incelenmiş, 138rpm/dk ve 40 m³/h çalışma eğrisinde gücünün 5kW olduğu, mekanik verimi ise etiket bilgisinde yazan %73 olduğu görülmüştür. Hesaplamalarla pompanın gerçek gücünün 2,45 kW bulunup birinci yasa verimi %67 çıkmıştır. Ekserji giriş ve çıkışları ile yıkıma uğrayan ekserji 1,79 kJ/kg.K olup ikinci yasa verimi %73 çıkmıştır. Proses incelendiğinde pompanın öncesinde bulunan hat tipi parçalayıcının giriş basıncını arttırdığı, bu sebeple pompanın da verimine etki ettiği saptanmıştır. Ancak parçalayıcı atığın içerisindeki iri taneli atıkları parçaladığı için pompaların ekonomik ömrünü uzatmada önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle pompa her zaman hat tipi parçalayıcı ile eş zamanlı çalışmaktadır.

6.2.3.2. Anaerobik Çürütme Birimi

Anaerobik çürütme birimi temel olarak fermantasyonun gerçekleştiği atık besleme ve çürütme tankları, atığın transferini sağlayan pompalar, tankların karıştırma işlemini sağlayan karıştırıcılar ve hava blowerlerinden oluşur. Atık hammaddesi ön kabul biriminde hazırlandıktan ve pompalanabilir katı madde oranına getirildikten sonra çürütme tanklarına beslenir. Atıkların günlük olarak hangi miktarda beslenmesi gerektiği çeşitli parametrelere bağlıdır. Çünkü anaerobik çürütme işlemini gerçekleştiren bakterilerin yaşamsal faaliyetlerini devam ettirmek için ne fazla ne de az miktarda atık beslenmesi gerekir. Bunun için her bir reaktöre kaç ton beslenmesi gerektiği beslenecek atığın özelliğine göre ve reaktörlerin hacimlerine göre organik yük hesabı yapılarak beslenmelidir.

Organik yük için hesap yapılacak olunursa, günlük beslenen atık miktarı, atığın katı madde oranı ve organik içeriği bilinmelidir. Teze konu olan tesiste süt sığır gübresi ile yapılacak hesaplama sonuçları Tablo 6.13'te belirtilmiştir.

$$\text{Organik yükleme oranı} = \frac{\dot{m} \times c}{V_R \times 100} \text{ (m}^3\text{/ton.OKM)}$$

$\dot{m}$ = günlük yüklenen atık hammaddesi miktarı (m³/gün)

c = Organik atık konsantrasyonu (%OKM.ton)

V_R = Reaktör hacmi (m³)

$$\text{Organik yükleme oranı} = \frac{650 \times 1000 \times \%8,39 \times \%73,17}{21000}$$

$$\text{Organik yükleme oranı} = 2 \text{ m}^3/\text{ton.OKM}$$

$$\text{Hidrolik bekleme süresi} = \frac{V_R}{\dot{m}} \text{ (gün)}$$

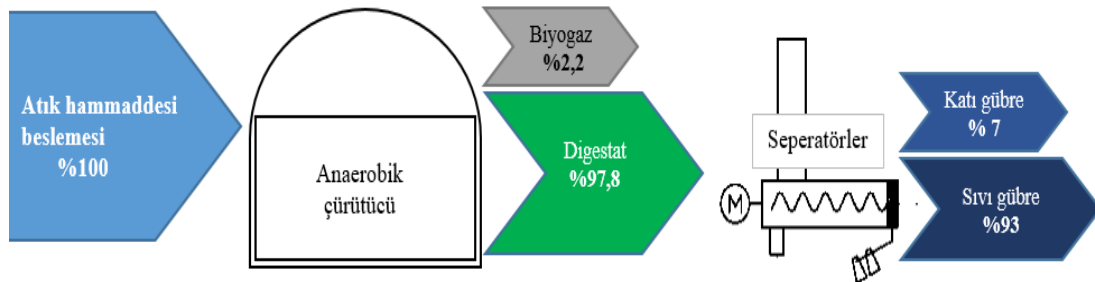
$$\text{Hidrolik bekleme süresi} = \frac{21000}{650}$$

$$\text{Hidrolik bekleme süresi} = 32 \text{ gün}$$

Biyogaz Tesisi Atık Yüklemesi	Birim	Miktar
Süt sığırı gübresi yükleme miktarı	m ³ /gün	650
Hidrolik bekleme süresi	gün	32
Organik Yükleme	m ³ /ton OKM	2

Tablo 6.13. Anaerobik çürütücü yükleme miktarı

Çürütücülere beslenen atıktan biyogaz üretildikten sonra %2,2 kadar kütle kaybı olup çürüme sonrası fermente olmuş atık post çürütücüden seperatörlere iletilir. İşletme verilerinden elde edilen bilgiler ile seperatöre giren kütlenin %7 kadarı katı fermente gübreye dönüşüp geriye kalan miktar ise sıvı fermente gübre olarak çıktığı sonucu elde edilmiştir. Şekil 6.32’de biyogaz tesisine ait kütle denklığı gösterilmiştir.



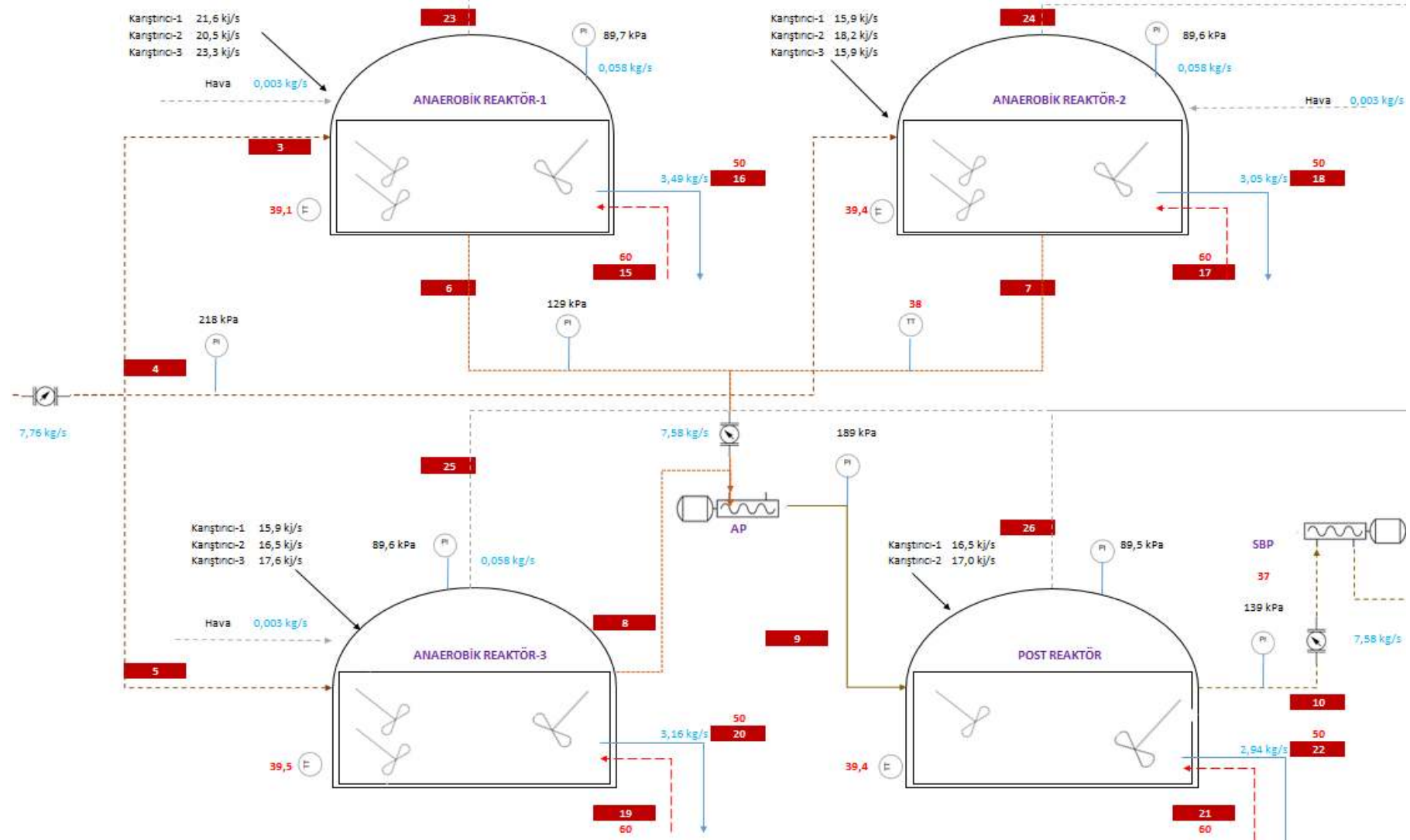
Şekil 6.32. Biyogaz tesisi kütle denklığı

Anaerobik çürütücülerde ısı ve iş giriş çıkışları incelenecek ve diyagramda her bir akışkanın numaralandırılması ile açık sistemde enerjinin korunumu yasası ile sistemin net ısı geçişi hesaplanacaktır. Şekil 6.33'te gösterilen şemada sisteme giren ve çıkan akım numaraları ve ilgili akım numaralarına göre akışkanların sıcaklık, basınç ve kütleli debi özellikleri tespit edilerek akışkanların termodinamik özellikler hesaplandıktan sonra çürütücü reaktörlere ait enerji dengesi denklem (6.11) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\dot{O}_g + W_g + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{O}_ç + W_ç + \sum \dot{m}_ç h_ç$$

$$\dot{O}_{net} = \sum \dot{m}_ç h_ç - \sum \dot{m}_g h_g + W_g$$

Sürekli açık sürekli akışlı sistemlerde enerji dengesi hesapları yapılırken kütle birikmesi durumu olmadığından sisteme giren toplam enerji çıkan toplam enerjiye eşit olmalıdır. Arada fark olması sistemde ya çevreye doğru bir iş yapıldığı ya da ısı açığa çıkması söz konusu olduğunu gösterir. Bunun net tespit edilebilmesi için giren ve çıkan tüm akışanlar ve iş yapan ekipmanların güçleri doğru şekilde tespit edilmeli ve sistemin denge hesabı sonrası açığa çıkan ısı gücünün işaretine bakılmalıdır. Negatif değerli bir sonuç elde edilmesi sistemin dışarıya ısı verdiğini, pozitif değerli olması ise sisteme doğru ısı alan bir denge olduğunu ifade eder. Eğer denge sonrası sonuçta iş üretiliyorsa bu sonuç negatif işaretli olup sistemin çevre üzerinde iş yapması anlamına gelmektedir. Bu bilgiler ışında anaerobik çürütücülerin enerji dengesi sonuçları yorumlanacaktır.



Şekil 6.33. Anaerobik çürütme sistemi

Anaerobik çürütücülere ait akış diyagramı Şekil 6.33'te gösterilmiştir. Her bir çürütücü için sıcaklık, gaz basıncı, sıcak su giriş ve çıkış sıcaklık ve debileri, hava girişi, karıştırıcı güçleri ve pompa işleri uzun süren gözlemler ve işletme verilerinden elde edilmiştir. Çürütücülerde enerji dengesinin hesaplanması için sırasıyla şu işlemler yapılmıştır;

- Her bir çürütücüye ait karıştırıcı gücü tespiti
- Çürütücülere giren hava miktarının hesaplanması
- Çürütücüleri ısıtmak için sıcak su enerjisinin hesaplanması
- Çürütücü besleme ve aktarma pompa işlerinin güç hesabı
- Gübre giriş ve çıkışının enerji değerinin tespiti
- Çürütücülerin ürettiği biyogaz miktarının hesaplanması

İşlemleri her bir çürütücü için ayrı ayrı hesaplanarak veriler elde edilmiştir. Ancak anaerobik reaktörler kimyasal işlemlerin gerçekleştiği sistemler olduğu için beslenen atığın giriş debisinin sürekli değişken olması, fermentasyon sırasında asetojenez ve metanogenez aşamalarında tespit edilemeyen kimyasal reaksiyonların ve reaksiyon sırasında açığa çıkan enerji miktarı gibi veriler nedeniyle anaerobik çürütücülerin giren ve çıkan akışkanların fiziksel özellikleri üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Reaktör üzerinde mekanik ekipmanların yaptığı iş ise ortalama değerleri temsil etmektedir.

İlk olarak her bir besleme çürütücülerine üçer adet paletli karıştırıcı, post çürütücüde ise iki adet paletli karıştırıcı bulunmaktadır. Bu karıştırıcılar etkin karıştırma sağlamakta enerji tasarrufu için ise frekans sürücü yardımıyla 28 Hz frekansta çalıştırılmaktadır. Sürücü üzerinden tüm çürütücülere ait karıştırıcıların çektikleri akım, şebeke voltajı ve frekans verileri alınarak elektrik panosu analizöründen de $\cos\phi$ değeri kayıtları alınarak karıştırıcıların tükettiği güçler hesaplanmıştır. Karıştırıcı gücü hesabı için elektrik devresi trifaze güç hesabı formülü kullanılmıştır.

$$W_{\text{karıştırıcı}} = A \times V \times \cos\phi \times \sqrt{3}$$

A = çekilen akım

V = şebeke gerilimi

$\cos\phi$ = güç faktörü

Anaerobik Çürütücü -1 Karıştırıcı Güçleri								
Tsunami-A	Birim	Değerler	Tsunami-B	Birim	Değerler	Tsunami-C	Birim	Değerler
Etiket Güç	kW	22	Etiket Güç	kW	22	Etiket Güç	kW	22
Voltaj	V	400	Voltaj	V	400	Voltaj	V	400
Akım	A	38	Akım	A	36	Akım	A	41
Cosfi	-	0,82	Cosfi	-	0,82	Cosfi	-	0,82
Frekans	Hz	28	Frekans	Hz	28	Frekans	Hz	28
Verim sınıfı	IE2	0,91	Verim sınıfı	IE2	0,91	Verim sınıfı	IE2	0,91
Güç	kWe	21,6 kWh	Güç	kWe	20,5 kWh	Güç	kWe	23,3 kWh

Anaerobik Çürütücü -2 Karıştırıcı Güçleri								
Tsunami-A	Birim	Değerler	Tsunami-B	Birim	Değerler	Tsunami-C	Birim	Değerler
Etiket Güç	kW	22	Etiket Güç	kW	22	Etiket Güç	kW	22
Voltaj	V	400	Voltaj	V	400	Voltaj	V	400
Akım	A	28	Akım	A	32	Akım	A	28
Cosfi	-	0,82	Cosfi	-	0,82	Cosfi	-	0,82
Frekans	Hz	28	Frekans	Hz	28	Frekans	Hz	28
Verim sınıfı	IE2	0,91	Verim sınıfı	IE2	0,91	Verim sınıfı	IE2	0,91
Güç	kWe	15,9 kWh	Güç	kWe	18,2 kWh	Güç	kWe	15,9 kWh

Anaerobik Çürütücü -3 Karıştırıcı Güçleri								
Tsunami-A	Birim	Değerler	Tsunami-B	Birim	Değerler	Tsunami-C	Birim	Değerler
Etiket Güç	kW	22	Etiket Güç	kW	22	Etiket Güç	kW	22
Voltaj	V	400	Voltaj	V	400	Voltaj	V	400
Akım	A	28	Akım	A	29	Akım	A	31
Cosfi	-	0,82	Cosfi	-	0,82	Cosfi	-	0,82
Frekans	Hz	28	Frekans	Hz	28	Frekans	Hz	28
Verim sınıfı	IE2	0,91	Verim sınıfı	IE2	0,91	Verim sınıfı	IE2	0,91
Güç	kWe	15,9 kWh	Güç	kWe	16,5 kWh	Güç	kWe	17,6 kWh

Post Çürütücü Karıştırıcı Güçleri					
Tsunami-A	Birim	Değerler	Tsunami-B	Birim	Değerler
Etiket Güç	kW	22	Etiket Güç	kW	22
Voltaj	V	400	Voltaj	V	400
Akım	A	29	Akım	A	30
Cosfi	-	0,82	Cosfi	-	0,82
Frekans	Hz	28	Frekans	Hz	28
Verim sınıfı	IE2	0,91	Verim sınıfı	IE2	0,91
Güç	kWe	16,5 kWh	Güç	kWe	17,0 kWh

Tablo 6.14. Çürütücü paletli karıştırıcılarının elektrik enerjisi tüketimi

Çürütücülerde H₂S absorpsiyonu için desülfürizasyon sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem ile çürütücü içerisinde hava verilerek bakteri aktivasyonu sağlanır ve H₂S biyogazdan

arındırılır. Bu blowerlerin hava ayarı değeri $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ 'tir. Bu değeri çürütücülerdeki depolanan biyogazın toplam hacmine göre belirlenir. Her çürütücüde iki adet desülfizasyon bloweri bulunmaktadır. Enerji denkliğine bakılacak olunursa;

$$W_{df} = 7,5 / 3600 \times 1,103 \times 295 \times 2 = 1,36 \text{ kJ/s}$$

Çürütücü besleme pompaları ile atık ham maddesi çürütücülere aktarıldığı için pompanın yaptığı için enerji girişi olacaktır. Atık kabul birimi bölümünde hesabı yapılmış olan çürütücü besleme pompa gücü değeri aşağıdadır;

$$W_{\text{çbp}} = 2,45 \text{ kJ/s}$$

Çürütücü sistemine ısıtma sağlamak için sıcak su enerjisi sağlanır, bu sayede mezofili çalışma şartı olan $35\text{-}42 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklarda optimum biyogaz üretimi gerçekleştirilir. Bu çalışmaya konu olan biyogaz tesisinde çürütücü sıcaklık değeri ortalama $39\text{-}40 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındadır. Bu nedenle giriş ve çıkış akımlarında sıcak su enerjisi de yer almaktadır. Sıcak suya ait termodinamik özelliklerin tespiti için EES programı kullanılmıştır. Isıtma için gerekli termal enerji için herhangi bir dış kaynağa ihtiyaç duyulamadan motor gömlek suyu kullanılmaktadır, bu su plakalı eşanjör yardımıyla karşı beslemeli su devresini ısıtarak HT ısı dağıtım kollektörüne, oradan da çürütücü ısıtma serpantinlerine sıcak su santrifüj pompaları ile gönderilerek dolaşımı sağlar. Serpantin borularından dolaştırılan sıcak su ısı enerjisinin bir miktarını çürütücü içerisindeki atığa aktararak ısıtma sağlar. Bu sırada kendi ısıısının bir miktarı kaybolur ve tekrar HT ısı dağıtım kollektörüne döner. Çürütücü ısıtmasında en önemli konu mezofili bakteri aktivasyonudur. Yüksek sıcaklıkta gönderilen sıcak su mezofili bakterilerin zarar görmesine neden olabilir bu nedenle pompa öncesinde sıcaklık ayarı yapabilen üç yollu vana sayesinde set edilen sıcaklık değerinde çürütücü serpantinine sıcak su gönderilir. Bu değeri $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir. $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta çürütücüye gönderilen sıcak su ısı kaybı ile geriye dönmektedir, üç yollu vananın kısıklık ve açıklık değerine göre çürütücülere gönderilecek su miktarı ayarlanır.

Hat üzerinde bulunan debimetre ile suyun akış debisi ölçülür. Çürütücü için atık hammaddesinin giriş sıcaklığı oldukça önemlidir, atık sıcaklığının düşük olduğu kış aylarında istenen $40 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa ısıtmak için daha fazla termal enerji vermek gerekir.

Yüklenen atığın düzenli olarak sıcaklıkları işletme tarafından ölçüldüğünden ölçüm ortalaması ile çalışmada ölçümü alınan değerin eşdeğer olduğu görülmüştür. Post çürütücüde ısıtma ihtiyacı ana çürütücülere göre daha düşüktür. Çünkü post çürütücüye atık hammaddesi yüklemesi yoktur, ana çürütücülerden beslenen atık miktarı kadar kütle çürütücülerden post çürütücüye aktarılır. Bu yüzden çürütücü içindeki sıcak atık hammaddesi çürüdükten sonra post çürütücüye geçer. Aktarma sırasında ortalama 37-38 °C sıcaklıktaki atık 39-40 °C yükseltilir. Bu nedenle termal enerji ihtiyacı ana çürütücülere oranla daha düşüktür. Sıcaklık hesapları için otomasyon sistemi mevcuttur, otomasyon üzerinden çürütücü içerisinde istenen sıcaklık set değerleri girilerek sıcak su sirkülasyon pompalarına çalışma bilgisi aktarılır ve sıcak su sirkülasyonu otomatik olarak gerçekleştirilir. Çürütücü için set değeri çalışmaya başlama sıcaklığı 38 durma sıcaklığı 40 °C'dir. Bu aralıkta 38 °C ısıнын düşmesi ile ısıtma pompaları aktif olur ve 40 °C sıcaklıkta otomatik durur.

Sıcaklık ölçümleri işletmenin kayıtlarındaki değerler takip edilerek atık hammaddesinin 24 °C olduğu zamanda dış ortam sıcaklığının da 22 °C olduğu anda otomasyon üzerinden alınan kayıtlar ile elde edilen veriler kullanılmıştır. Isıtma sisteminde her çürütücü için ikişer adet olmak üzere dört çürütücü için toplamda 8 adet sıcak su sirkülasyon pompası bulunmaktadır. Bu pompalar biri yedek biri asıl olmak üzere eş yaşlandırma ile çalıştırılmaktadır. Sıcak su dağıtım kollektörü üzerinde üç yollu vanalar bulunmaktadır ve buradaki set değeri 60 °C'dir. Uzun süre gözlemler ile 24 °C atık sıcaklığının çürütücülere beslendiği anda sıcak su hattı üzerindeki sayaçtan debi değerleri verisi alınmıştır. Bu değerler sırasıyla;

Çürütücü -1 sıcak su sirkülasyon debisi = 12,7 m³/h

Çürütücü -2 sıcak su sirkülasyon debisi = 11,1 m³/h

Çürütücü -3 sıcak su sirkülasyon debisi = 11,5 m³/h

Post çürütücü sıcak su sirkülasyon debisi = 10,7 m³/h



Şekil 6.34. Çürütücü-1, Çürütücü-2, Çürütücü-3 ve Post Çürütücü ısıtma sistemi debi akışkanları

Otomasyondan alınan gidiş ve dönüş sıcaklığı verisi ise suyun gidiş sıcaklığı için 60 °C dönüşü için ise 50 °C'dir. Bu bilgiler ile sıcak su devresine ait akım noktalarının da termodinamik özellikleri hesaplanmıştır.

Sistemde iş yapan post çürütücüye aktarma işini yapan aktarma pompasına ait enerji ve ekserji analizi yapmak için giren ve çıkan akımların belirlenmesi gerekir. Pompa öncesi 6-7-8 numaralı akım ve akışkana ait değerler, pompa sonrası 9 numaralı akım ve akışkana ait değerler göz önüne alındığında aktarma pompasına ait enerji ve ekserji verimi şu şekildedir;

$$W_i = \dot{m} \times v \times (P_9 - P_8)$$

$$W_{eg} = \frac{W_i}{h_i}$$

$$h_9 = (h_8 + \frac{W_g}{\dot{m}})$$

$$\eta_{\text{IIpompa}} = \frac{\dot{E}_{X9} - \dot{E}_{X8}}{W_g}$$

Otomasyon verileri ile uzun süreli gözlemler ve işletme kayıtları da incelendiğinde bir pompanın saatlik akış transfer debisinin ortalama 47,5 m³/h olduğu, pompanın emiş tarafında giriş basıncının ortalama 1,29 bar ve pompa basma basıncının 1,89 bar olduğu görülmüştür.

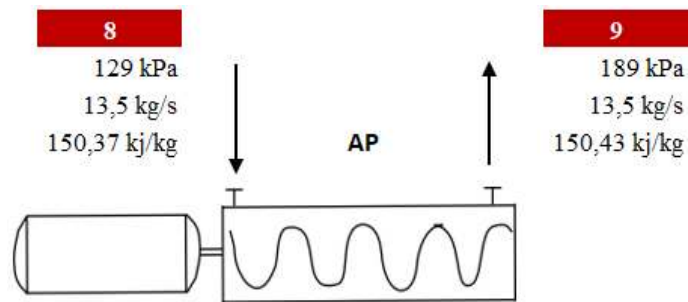
Bu denklemlerde kütleli debi 13,5 kg/s, özgül hacim 0,000974 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 189 kPa ve 129 kPa, h_8 ve h_9 ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{AP(i)} = 13,5 \times 0,000974 \times (189 - 129) = 0,79 \text{ kJ/s}$$

$$W_{AP(g)} = \frac{0,79}{0,73} = 1,1 \text{ kJ/s}$$

$$h_9 = (150,37 + 0,79/13,5) = 150,43 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{AP(\text{IIyasa})} = \frac{13,4 - 12,6}{1,1} = \%73$$



Şekil 6.35. Aktarma pompası giren akım ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basıncı (kPa)	Giriş Basıncı (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
8-9	AP	13,5	0,000974	189,0	129,0	1,1	5,0	73%	30%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
12,6	13,4	0,81	73%

Tablo 6.15. Aktarma pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Pompaya ait enerji verimi hesabında mekanik güç olarak pompa kataloğu incelenmiş, 158 rpm/dk ve 50 m³/h çalışma eğrisinde gücünün 5 kW olduğu, mekanik verimi ise etiket bilgisinde yazan %73 olduğu görülmüştür. Hesaplamalarla pompa birinci yasa verimi %30 çıkmıştır. Ekserji giriş ve çıkışları ile yıkıma uğrayan ekserji 0,81 kJ/kg.K olup ikinci yasa verimi %51 çıkmıştır. Pompanın enerji veriminin bu derece düşük çıkmasının nedeni pompanın emiş hattının çürütücülere bağlı olması ve çürütücülerin içerisindeki basıncın ve yüksekliğin fazla olması nedeniyle akışkanın potansiyel farktan dolayı akış hızı kazanması, ayrıca basma mesafesinin de kısa olması kaynaklı akışkanı aktarırken fazla basınç farkı oluşturmada transferi sağlayabilmesidir. Deklem (6.28)'de belirtilen üzere bileşenlerin basınç farkının fazla olması güç artışı ile doğru orantılıdır ve diğer çarpan olan debi değerinin de olması gerekenden bir miktar düşük olması güç hesabında elde edilen sonucun daha düşük çıkmasına neden olmuştur. Bu değerler neticesinde aynı işi daha düşük güçte bir pompa seçilerek yapmak daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Çürütücüler için enerji dengesini yapabilmek için son olarak çürütücü içerisindeki fermantasyon atığı olarak adlandırılan çürütücü atığının termodinamik özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bunun için çürütücüden alınan numunenin katı madde tayini yapılır, katı maddesi tespit edildikten sonra özgül ısı, entalpi ve entropi değerleri ayrı ayrı hesaplanır. Çürütücü atığının sıcaklık değeri çürütücülerden sürekli sıcaklık ölçümü yapan transmitterler yardımıyla tespit edilmiştir. İş akış diyagramına göre önce atık hammaddesi ön kabul biriminde hazırlandıktan sonra besleme pompaları ile çürütücülere gönderilir. Burada ortalama 30-40 gün hidrolik bekleme süresinde bekledikten sonra biyogaz üretimi gerçekleştirilir, daha sonra çürümüş çürütücü atığı post çürütücüye aktarma pompası

yardımıyla aktarılır. Bu aktarma işlemi sonrası son çürütme işlemi için post çürütücüde iyice gazı alınmış atık susuzlaştırma birimine organik gübre üretimi için transfer edilir. Çürütücülerde kütle dengliği de dikkate alınarak atığın beslenmesi sonrası biyogaz üretimi, biyogaz üretimi sonrası da geriye kalan atığın dışarı alınması yani aktarılması ile çürütücü enerji dengliği için en önemli parametrelerden olan kütle korunumu yasası ile enerji dengliği kurulmuştur.

Biyogaz tesisi çürütücü performansları						
İşlemler	Birim	Toplam/Ortalama	Ç-1	Ç-2	Ç-3	P-Ç
Atığın yükleme dağılımı	%	100%	33%	33%	33%	
Günlük atık beslemesi	m ³ /gün	650	217	217	217	
Çürütücü Hacmi	m ³	21000	7000	7000	7000	
Atığın katı maddesi	%	8,39	8,39	8,39	8,39	
Atığın organik katı maddesi	%	73,17	73,17	73,17	73,17	
Atığın biyogaz potansiyeli	m ³ /ton.OKM	300	300	300	300	Atık
Biyogaz üretimi	m ³ /gün	11975	3992	3992	3992	yüklemesi
CH ₄	%	55	55	55	55	yoktur
Hidrolik bekleme süresi	gün	32	32	32	32	
Organik Yükleme	kg/m ³	2	2	2	2	
Aktarma yapılan miktar	ton/gün	655	218	218	218	
Seperator sonrası miktar	ton/gün	609	203	203	203	
Sıcak su debisi	m ³ /gün	1104	305	266	276	257
Sıcak su girişi	°C	60	60	60	60	60
Sıcak su dönüşü	°C	50	50	50	50	50
Hava girişi	m ³ /gün	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Atık giriş sıcaklığı	°C	27,5	24,0	24,0	24,0	38,0
Çürütücü sıcaklığı	°C	39,4	39,1	39,4	39,5	39,4
Atık ısıtma ihtiyacı	kWt.gün	12063	3635	3708	3732	988
Sıcak su sirkülasyonu	kWtgün	12562	3468	3031	3141	2922

Tablo 6.16. Biyogaz tesisi genel atık yükleme verileri

Tüm bu bilgiler ışında anaerobik çürütme sistemine ait akım numaralarına göre akışkan bilgileri tablosu oluşturulmuştur. Bu tabloda atık hammaddesi ve çürütücü atığı gibi kimyasal içerikli akışkanların kimyasal ekserjileri hesaplanmamıştır.

Akım No	Akışkan	Sıcaklık (K)	Basınç (kPa)	Kütle (kg/s)	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Isı (kJ/kg.K)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg.K)	Fiziksel Eks. (kW)	Kimyasal Eks. (kW)	Ekserji (kW)
0'	Süt sığırı gübresi	298	89	0,00	1031	3,89	97,1	0,34	-	-	-
0''	Çürütücü atığı	298	89	0,00	1027	3,96	98,9	0,35	-	-	-
0'''	Post çürütücü atığı	298	89	0,00	1025	3,97	99,2	0,35	-	-	-
0'''	Seperatör çıkış sıvısı	298	89	0,00	1021	4,00	99,9	0,35	-	-	-
0''''	Su	298	89	0,00	997	4,18	104,5	0,37	-	50,0	-
0'''''	Biyogaz	298	89	0,00	1,25	1,28	343,0	6,99	-	16.601	-
1	Süt sığırı gübresi	297	39	7,76	1031	3,89	93,3	0,33	0,01	-	0,05
2	Atık hammaddesi	297	218	2,59	1031	3,89	93,3	0,33	0,01	-	0,02
3	Ç-1 besleme	297	218	2,59	1031	3,89	93,3	0,33	0,01	-	0,02
4	Ç-2 besleme	297	218	2,59	1031	3,89	93,3	0,33	0,01	-	0,02
5	Ç-3 besleme	297	129	2,59	1031	3,89	93,3	0,33	0,09	-	0,22
6	Ç-1 aktarma	311	129	2,53	1027	3,96	150,4	0,52	1,09	-	2,76
7	Ç-2 aktarma	311	129	2,53	1027	3,96	150,4	0,52	1,09	-	2,76
8	Ç-3 aktarma	311	129	2,53	1027	3,96	150,4	0,52	1,09	-	2,76
9	P-Ç besleme	311	189	7,58	1027	3,96	150,4	0,52	1,09	-	8,27
10	SBP öncesi	310	139	7,58	1025	3,97	146,9	0,50	0,93	-	7,08
11	SBP sonrası	310	289	7,58	1025	3,97	147,0	0,50	1,08	-	8,19
12	SPRT girişi	305	289	7,58	1025	3,97	127,0	0,44	0,31	-	2,33

Tablo 6.17. Anaerobik çürütme sistemine ait akış özellikler

13	SPRT sonrası	305	119	7,05	1021	4,00	127,9	0,44	0,32	-	2,28
14	STP sonrası	305	279	7,05	1021	4,00	128,0	0,44	0,48	-	3,39
15	Ç-1 sıcak su gidiş	333	489	3,49	983	4,18	250,9	0,83	7,98	50,0	202,52
16	Ç-1 sıcak su dönüş	323	339	3,49	990	4,18	209,0	0,70	4,15	50,0	189,17
17	Ç-2 sıcak su gidiş	333	489	3,05	983	4,18	250,9	0,83	7,98	50,0	177,01
18	Ç-2 sıcak su dönüş	323	339	3,05	990	4,18	209,0	0,70	4,15	50,0	165,34
19	Ç-3 sıcak su giriş	333	489	3,16	983	4,18	250,9	0,83	7,98	50,0	183,38
20	Ç-3 sıcak su dönüş	323	339	3,16	990	4,18	209,0	0,70	4,15	50,0	171,30
21	P-Ç sıcak su giriş	333	489	2,94	983	4,18	250,9	0,83	7,98	50,0	170,63
22	P-Ç sıcak su dönüş	323	339	2,94	990	4,18	209,0	0,70	4,15	50,0	159,38
23	Ç-1 biyogaz	312	89,7	0,058	1,196	1,30	322,2	6,89	0,42	16.601	970,29
24	Ç-2 biyogaz	312	89,6	0,058	1,196	1,30	322,2	6,89	0,50	16.601	970,29
25	Ç-3 biyogaz	313	89,6	0,058	1,196	1,30	322,2	6,89	0,51	16.601	970,29
26	P-Ç biyogaz	312	89,5	-	1,196	1,30	322,2	6,89	0,50	16.601	0,00

Tablo 6.17. (Devamı) Anaerobik çürütme sistemine ait akış özellikler

Çürütücülerde enerji analizi yapmak için girdi ve çıktı akım özellikleri belirlendikten sonra enerji dengesi formülü kullanılır. Çürütücüye girdi olarak atık hammadde, sıcak su enerjisi, desülfizasyon havası, karıştırıcıların ve besleme pompasının mekanik işleri yazılırken, çıktı olarak aktarma atığı, ısısının bir kısmını bırakmış sıcak su ve üretilen biyogaz yazılmıştır. Bu sayede giren ve çıkan akışkan ve işler toplanarak çürütücüdeki fark enerji ve enerji verimi hesaplanmış olunacaktır.

Çürütücü Enerji Dengesi									
	Tanım	Giren Akım	Çıkan Akım	$\dot{O}_g$	$\dot{O}_ç$	W_g	$W_ç$	Fark Enerji	% Verim
Ç-1	Anaerobik Çürütücü	3-15	6-16-23	1119	1131	67,1	0,8	-12	95%
	Gübre hattı	3	6	241	380			139	
	Isıtma Sistemi	15	16	877	730			-147	
	Hava girişi	-	-	1,4				-1	
	Karıştırıcı işi	-	-			65		-65	
	Pompa işi	-	-			2,45	1,1	-1	
	Biyogaz çıkışı	-	23		21			21	
Ç-2	Anaerobik Çürütücü	4-17	7-18-24	1009	1039	51,8	0,8	-30	98%
	Gübre hattı	4	7	241	380			139	
	Isıtma Sistemi	17	18	766	638			-128	
	Hava girişi	-	-	1,4				-1	
	Karıştırıcı işi	-	-			50		-50	
	Pompa işi	-	-			2,45	1,1	-1	
	Biyogaz çıkışı	-	24		21			21	
Ç-3	Post Çürütücü	5-19	8-20-25	1036	1062	51,8	0,8	-26	98%
	Gübre hattı	5	8	241	380			139	
	Isıtma Sistemi	19	20	794	661			-133	
	Hava girişi	-	-	1,4				-1	
	Karıştırıcı işi	-	-			50		-50	
	Pompa işi	-	-			2,45	1,1	-1	
	Biyogaz çıkışı	-	25		21			21	
PÇ	Post Çürütücü	9-21	10-22-26	1880	1728	34,3	1,9	151	90%
	Gübre hattı	9	10	1140	1113			-27	
	Isıtma Sistemi	21	22	738	615			-124	
	Hava girişi	-	-	1,4				-1	
	Karıştırıcı işi	-	-			34		-34	
	Pompa işi	-	-			1,1	1,88	1	
	Biyogaz çıkışı	-	26						

Tablo 6.18. Çürütücülerin enerji dengesi

uzun süre çalışma koşulu ile ortalama değer alınarak hesaplanmıştır. Seperatör besleme pompasına ait giriş akımı 10 numaralı akış, çıkış ise 11 numaralı akıştır, bu durumda seperatör besleme pompasına ait enerji ve ekserji dengesi hesaplanacak olunursa;

$$W_i = \dot{m} \times v \times (P_{11} - P_{10})$$

$$W_g = \frac{W_i}{h_i}$$

$$h_{11} = (h_{10} + \frac{W_g}{\dot{m}})$$

$$\eta_{IIpompa} = \frac{\dot{E}_{X11} - \dot{E}_{X10}}{W_g}$$

Otomasyon verileri ile uzun süreli gözlemler ve işletme kayıtları da incelendiğinde bir pompanın saatlik akış transfer debisinin ortalama 45 m³/h olduğu, ayrıca bu debinin sürücü ile ayarlanabilir olduğu, pompanın emiş tarafında giriş basıncının ortalama 1,39 bar, pompa basma basıncının 2,89 bar olduğu görülmüştür. Bu veriler ile pompaya ait enerji ve ekserji analizi yapılacak olunursa;

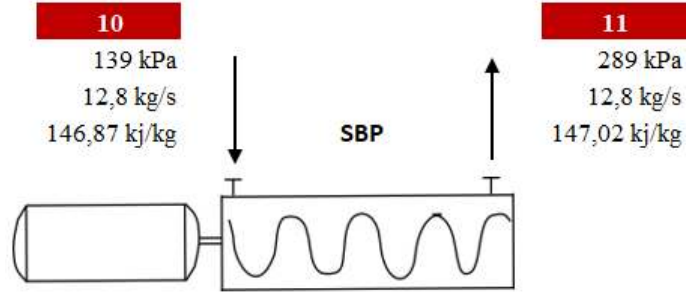
Bu denklemlerde kütleli debi 12,82 kg/s, özgül hacim 0,000975 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 289 kPa ve 139 kPa, h₁₀ ve h₁₁ ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{SBP(i)} = 12,82 \times 0,000975 \times (289 - 139) = 1,88 \text{ kJ/s}$$

$$W_{SBP(g)} = \frac{1,88}{0,73} = 2,57 \text{ kJ/s}$$

$$h_{11} = (146,9 + 2,57/12,82) = 148,36 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{SBP(IIyasa)} = \frac{13,8 - 11,9}{2,57} = \%74$$



Şekil 6.37. Seperatör besleme pompası giren akım ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basınç (kPa)	Giriş Basınç (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
10-11	SBP	12,82	0,000975	289,0	139,0	2,57	5,0	73%	70%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
11,9	13,8	1,92	74%

Tablo 6.19. Seperatör besleme pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Pompaya ait enerji verimi hesabında mekanik güç olarak pompa kataloğu incelenmiş, 158 rpm/dk ve 50 m³/h çalışma eğrisinde gücünün 5 kW olduğu, mekanik verimi ise etiket bilgisinde yazan %73 olduğu görülmüştür. Hesaplamalarla pompa birinci yasa verimi %70 çıkmıştır. Ekserji giriş ve çıkışları ile yıkıma uğrayan ekserji 1,92 kJ/kg.K olup ikinci yasa verimi %74 çıkmıştır.

Seperatör sonrası sıvı formuna ayrılan sıvı fermente gübre bir pompa yardımıyla lagüne gönderilmektedir. Bu pompanın emişinde basınç olup mono tip bir pompadır. Hat üzerine bağlı manometrelerden alınan basınç değerleri ve akış ölçer debimetre üzerinden alınan debi değeri ile akım numaraları olarak giriş akımı 13, çıkış akımı 14 olacak durumda, sıvı transfer pompasının enerji ve ekserji dengesi hesaplanacak olunursa;

$$W_i = \dot{m} \times v \times (P_{14} - P_{13})$$

$$W_g = \frac{W_i}{h_i}$$

$$h_{14} = (h_{13} + \frac{W_g}{\dot{m}})$$

$$\eta_{\text{IIpompa}} = \frac{\dot{E}x_{14} - \dot{E}x_{13}}{W_g}$$

Otomasyon verileri ile uzun süreli gözlemler ve işletme kayıtları da incelendiğinde bir pompanın saatlik akış transfer debisinin ortalama 45,4 m³/h olduğu, pompanın emiş tarafında giriş basıncının ortalama 1,19 bar, pompa basma basıncının 2,79 bar olduğu görülmüştür.

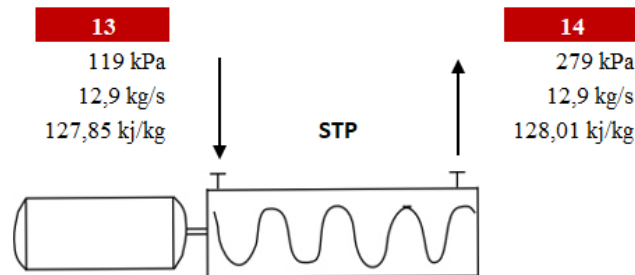
Bu denklemlerde kütleli debi 12,88 kg/s, özgül hacim 0,000979 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 279 kPa ve 119 kPa, h_{13} ve h_{14} ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{\text{STP(i)}} = 12,88 \times 0,000979 \times (279 - 119) = 2,02 \text{ kJ/s}$$

$$W_{\text{STP(g)}} = \frac{2,02}{0,73} = 2,77 \text{ kJ/s}$$

$$h_{14} = (127,85 + 2,02/12,88) = 128,01 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{SBP(IIyasa)}} = \frac{6,2-4,1}{2,77} = \%74$$



Şekil 6.38. Sıvı transfer pompası giren akım ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basınç (kPa)	Giriş Basınç (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
13-14	STP	12,88	0,000979	279,0	119,0	2,77	5,0	73	76%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	Ekserji Verimi
4,1	6,2	2,06	74%

Tablo 6.20. Sıvı fermente transfer pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Pompaya ait enerji verimi hesabında mekanik güç olarak pompa kataloğu incelenmiş, 158rpm/dk ve 50 m³/h çalışma eğrisinde gücünün 5 kW olduğu, mekanik verimi ise etiket bilgisinde yazan %73 olduğu görülmüştür. Bu şekilde pompa birinci yasa verimi %76 çıkmıştır. Ekserji giriş ve çıkışları ile yıkıma uğrayan ekserji 2,02 kJ/kg.K olup ikinci yasa verimi %51 çıkmıştır.

Tüm bu bilgiler yardımıyla biyogaz tesisi proses ünitelerinin enerji ve ekserji analizi yöntemiyle birinci ve ikinci yasa verimlerine bakıldığında, sistem üzerinde iş yapan mono tip pompalar için giriş ve çıkış basınçlarının ve akışkan debisinin oldukça önemli olduğu görülmüştür. Pompa basma basıncının artması pompa işinin artmasına ve daha fazla enerji harcamasına sebebiyet vermektedir. Gübre transferinin daha kolay gerçekleşmesi için tesis tasarımında tüm mono tip pompalarının emişinde basınç olması için pompalar kot farkı düşük konumlara yerleştirilmiştir. Bu sayede daha az güç harcayarak gübrenin transferini gerçekleştirmektedir. Yapılan analizlerde verimlerinin düşük çıkmasının temel nedeni pompa güçlerinin tesisin tam kapasite gücüne göre seçilmesidir, mevcutta tesis tam kapasite atık işlemediğinden pompalar daha düşük güçlerde çalışmaktadır. Çürütücü reaktörlerde karıştırma işini yapan karıştırıcıların her bir çürütücü için harcadıkları güçler, çürütücülerin içerisinde biriken inorganik çökeltiye ve katı madde oranına göre değişkenlik gösterebilir. Ayrıca çürütücü reaktörlerde ise giren atığın sıcaklığının bilinmesi ve mezofili şartların sağlanması için gerekli sıcaklığa ısıtılması için sürekli olarak çürütücülere sıcak su enerjisi transferi sağlanması önemlidir. Bu sayede çürütücülere giren ısı enerjisinin mümkün olduğunda ihtiyaç enerjisi karşılamasının takibi yapılmaktadır.

6.2.3.4. Kojenerasyon ve Enerji Üretim Birimi

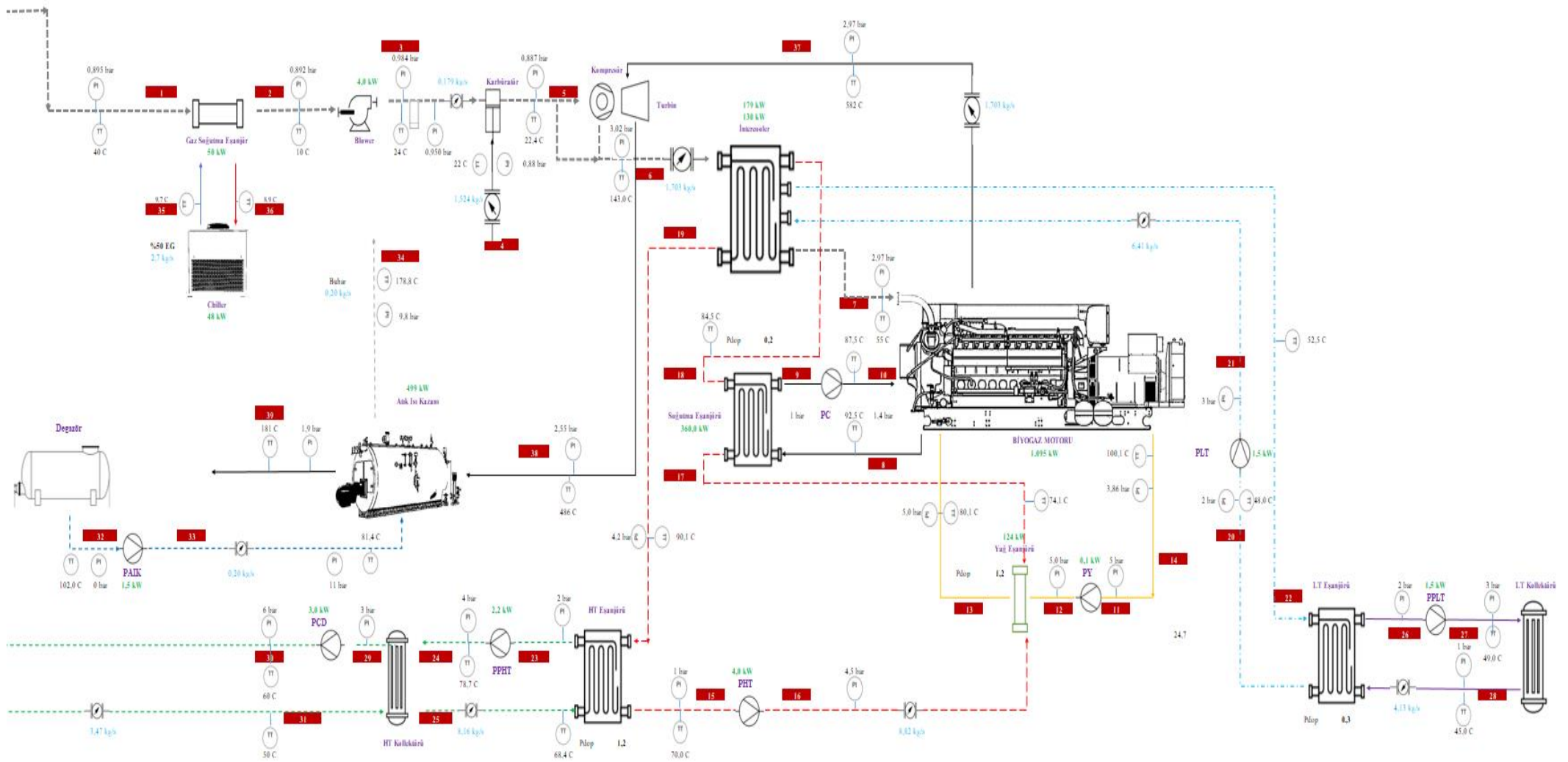
Kojenerasyon tesisinde enerji ve ekserji analizi yapmak için akış diyagramı oluşturulmuştur. Biyogaz anaerobik çürütme sisteminde elde edildikten sonra enerji çevrimi için içten yanmalı biyogaz motoruna gönderilir. Ancak öncesinde biyogaz içerisindeki bağıl nemin alınması için gaz soğutma ünitesinden geçirilerek ortalama 10°C sıcaklıkta kuru biyogaz blower ile basınçlandırılarak motora iletilmelidir. Bu aşamalardan sonra biyogaz uygun miktarda hava ile yakılarak mekanik güç elde edilir. Bu sırada motor gömlek suyundan elde edilen sıcak su termal enerji olarak kullanıma, egzoz gazı ise geri kazanım sistemleri kurularak buhar veya sıcak suya çevrilmektedir. Bu çalışmada incelenen biyogaz tesisinde motor ceket suyu biyogaz tesisi çürütücü ısıtmasında kullanılmakta, egzoz gazı geri kazanımı ile elde edilen sıcak su ise entegre arıtma tesisi ısıtmasında kullanılmaktadır. Bu nedenle motor katalog değerinde belirtilen %63,5 verim egzoz geri kazanımı ile %84 değerine yükselmektedir. Kojenerasyon tesisi akım şeması Şekil 6.39'da gösterilmiştir.

Biyogazın santral boyunca termodinamik özelliklerini saptamak için biyogazın molekül içeriğinin bilinmesi gerekir, teze konu olan tesiste portatif gaz analizörü bulunmaktadır. Biyogaz tesisinde üretilen biyogaz çürütücüden çıktıktan sonra gaz kollektörüne gelmektedir. Burada portatif gaz analizörü ile biyogazın içeriği tespit edilir. Gaz analizöründen elde edilen gazın içeriği Tablo 6.21'de belirtilmiştir.

CH ₄	55,17%
H ₂ S	76 ppm
CO ₂	43,17%
O ₂	0,62%
Net. Cal. Value MJ/kg	15,7 MJ/kg
Net. Cal. Value MJ/m ³	22,0 MJ/m ³

Tablo 6.21. Biyogazın analizörle bileşiminin tespiti

Elde edilen biyogazın alt ısı değerini doğru hesaplamak için öncelikle biyogaz içerisindeki karbon, hidrojen, oksijen, sülfür ve azot elementlerinin kütle oranlarının tespit edilmesi gerekir. Bileşen ölçümü alınan biyogazın element içeriği Tablo 6.22'de gösterilmiştir.



Şekil 6.39. Kojenerasyon sistemi

Biyogaz	Hacim	Mol Kütlesi	Kütle	Yoğunluk	Kütle Oranı
CH ₄	55,17%	16,04 gr/mol	8,85 gr	0,714 kg/m ³	31,6%
O ₂	0,62%	32,00 gr/mol	0,20 gr	1,424 kg/m ³	0,7%
H ₂ S	0,0007%	34,02 gr/mol	0,01 gr	1,517 kg/m ³	0,0%
CO ₂	43,17%	44,01 gr/mol	19,00 gr	1,958 kg/m ³	67,7%
			28,23 gr	1,264 kg/m³	

Elementler	CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S	N ₂	Biyogaz	Kütle Oranı
Karbon	6,63 gr	5,23 gr				11,86 gr	42,1%
Oksijen		13,94 gr	0,22 gr			14,16 gr	50,1%
Kükürt				0 gr		0,00 gr	0,00%
Azot					0 gr	0,00 gr	0,00%
Hidrojen	2,22 gr			0 gr		2,22 gr	7,93%
						28,23 gr	

Tablo 6.22. Biyogazın element içeriğinin tespit edilmesi

Biyogazın kalorifik değerinin hesaplanması için literatürde kabul görmüş çeşitli formüller bulunmaktadır. Bu çalışmada en yaygın kullanılan 6 formül irdelenmiş gaz analizörünün ölçtüğü değere en yakın formül referans alınmıştır (Hosokai, Matsuoka, Kuramoto, and Suzuki, 2016).

	Alt ısı değer (LHV)
Dulong LHV	$33800C + 122300(H - O/8) + 9400S$
Strache-Lant LHV	$34100C + 121400H - 15300O + 10500S$
Ayhan Demirbaş LHV	$33400C + 117700H - 15600O$
Schuster LHV	$(106400 + 14900)(C/3 + H - (O - S)/8) - 22000H$
Modifed Dulong LHV	$38200C + 84900(H - O/8)$
Grumell and Davies LHV	$(1520H + 98800)(C/3 + H - (O - S)/8) - 22000H$

Tablo 6.23. Alt ısı değer hesaplama (Hosokai, Matsuoka, Kuramoto and Suzuki, 2016)

Yapılan hesaplamalarda Ayhan Demirbaş'a ait alt ısı değer enerji formülü referans alınmıştır (Demirbaş, 1997). Gaz analizörü ile kıyaslandığında değerlerin yaklaşık fark oranı %1 kadar değişkenlik göstermektedir. İşletme kayıtlarında farklı günlerde alınan

ölçümlerin formülle karşılaştırılmasında da benzer oranda farklar görüldüğünden referans yaklaşımının tez çalışmasında kabul görürlüğü teyit edilmiştir.

Alt ısı değeri (LHV)		
	kJ/kg	kJ/m³
Dulong LHV	16279	18808
Strache-Lant LHV	16327	18864
Ayhan Demirbaş LHV	15589	19726
Schuster LHV	15087	17431
Modifed Dulong LHV	17505	20226
Grumell and Davies	13795	15938

Tablo 6.24. Biyogazın alt ısı değeri hesabı

Bu sonuca göre biyogazın element içeriğinin de tespiti ile tesis kollektöründen ölçümü alınan biyogazın diğer enerji birimlerindeki enerji karşılığı;

Biyogazın ısı değeri;

Kilojoule olarak = 15589 kJ

Kilokalori olarak = 4712 kcal

Kilowatt olarak = 5,48 kW

Biyogazın kimyasal ekserjisinin hesabı için gaz karışımlarının ideal gazların kimyasal ekserji analizi denklemi kullanılır.

$$\psi_{kim} = \sum x_i \psi_{kim} + RT_0 \sum x_i \ln(x_i)$$

BİYOGAZ KİMYASAL EKSERJİSİ					
	x_i (mol)	ex^{kim} (kJ/kmol)	$x_i ex_{ch}$	$\ln(x_i)$	$x_i \ln(x_i)$
CH ₄	55%	831650	458821	-0,6	-812,9509557
CO ₂	43%	19870	8655	-0,8	-898,463767
O ₂	0,62%	3970	25	-5,1	-78,08285471
H ₂ S	0	0	0	0	0

Biyogazın kimyasal ekserjisi = 465696 kJ/kmol

Biyogazın kimyasal ekserjisi = 16601 kJ/kg

Biyogaza ait termodinamik özelliklerinin hesaplanması için termodinamik tablolar kullanılmış, tablolardan ulaşılması mümkün olmayan veriler için ise EES programı kullanılmıştır. Biyogaz bileşenleri kütleli oranda belirlendikten sonra her bir moleküle ait mükemmel gaz özellikleri ile gaz karışımı formülü yardımıyla entalpi, entropi, özgül ısı ve yoğunluk hesapları yapılmıştır. Bu özellikler santral akış diyagramının her akım noktası için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Gaz karışımlarına ait özelliklerin hesaplanması;

$$h_{biyogaz} = m_f CH_4 \times h_{CH_4} + m_f CO_2 \times h_{CO_2} + m_f O_2 \times h_{O_2} + m_f H_2S \times h_{H_2S}$$

$$S_{biyogaz} = m_f CH_4 \times s_{CH_4} + m_f CO_2 \times s_{CO_2} + m_f O_2 \times s_{O_2} + m_f H_2S \times s_{H_2S}$$

$$c_{pbiyogaz} = m_f CH_4 \times c_{pCH_4} + m_f CO_2 \times c_{pCO_2} + m_f O_2 \times c_{pO_2} + m_f H_2S \times c_{pH_2S}$$

$$\rho_{biyogaz} = m_f CH_4 \times \rho_{CH_4} + m_f CO_2 \times \rho_{CO_2} + m_f O_2 \times \rho_{O_2} + m_f H_2S \times \rho_{H_2S}$$

Entalpi hesabı için metanın gaz özellikleri tablosu olan Tablo B.7.2 ile Tablo B-3 ve diğer gaz moleküllerinden azot için A-18, oksijen için A-19, karbondioksit için A-20, su buharı için A-23 mükemmel gaz özellikleri tabloları kullanılmıştır. Entropi, özgül ısı ve yoğunluk hesaplarında da EES programı ile akım numaralarına göre sıcaklık ve basınç değerleri girilerek sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar biyogazı oluşturan metan ve karbondioksite ait olup biyogazı oluşturan kütle oranlarına göre biyogaza ait termodinamik özellikleri hesaplanmıştır. EES programı çıktıları ekler bölümünde paylaşılmıştır. Entalpi verilerinde 'h' ile gösterilen veriler mol bazında kJ/kmol olarak, 'h' ile gösterilen veriler ise kütleli olarak birim kütle için kJ/kg olarak belirtilmiştir. Akışkanlara ait debiler kütleli olarak hesaplandığından enerji hesaplarında entalpiler 'h' olarak yani kütleli olarak, benzer şekilde entropi, özgül ısı verileri de kütleli olarak kullanılmıştır.

BİYOGAZ										
Ölü Hal	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{298}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
CH ₄	55,17%	16	8,83	31,5%	10012	3152	197	11,7	2,23	0,643
H ₂ S	0,01%	34	0,00	0,0%	-	-	-	-	-	-
CO ₂	43,17%	44	18,99	67,7%	9364	6343	144	4,88	0,84	1,581
O ₂	0,62%	32	0,20	0,7%	9904	70	2			
Biyogaz							343	7,0	1,27	1,273
Akım No 1	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{313}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
CH ₄	55,17%	16	8,83	31,5%	10538	3317	207	11,7	2,28	0,552
H ₂ S	0,01%	34	0,00	0,0%	-	-	-	-	-	-
CO ₂	43,17%	44	18,99	67,7%	9920	6720	153	4,89	0,86	1,514
O ₂	0,62%	32	0,20	0,7%	9118	65	2			
Biyogaz							362	7,0	1,30	1,199
Akım No 2	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{283}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
CH ₄	55,17%	16	8,83	31,5%	9463	2979	186	11,5	2,17	0,608
H ₂ S	0,01%	34	0,00	0,0%	-	-	-	-	-	-
CO ₂	43,17%	44	18,99	67,7%	8807	5966	136	4,81	0,83	1,668
O ₂	0,62%	32	0,20	0,7%	8237	58	2			
Biyogaz							324	6,9	1,25	1,321
Akım No 3	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{297,4}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
CH ₄	55,17%	16	8,83	31,5%	9213	2900	181	11,6	2,22	0,635
H ₂ S	0,01%	34	0,00	0,0%	-	-	-	-	-	-
CO ₂	43,17%	44	18,99	67,7%	9175	6215	141	4,80	0,84	1,741
O ₂	0,62%	32	0,20	0,7%	8682	61	2			
Biyogaz							324	6,9	1,27	1,379
Akım No 5	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{295,4}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
CH ₄	55,17%	16	8,83	31,5%	9895	3115	195	11,6	2,22	0,590
H ₂ S	0,01%	34	0,00	0,0%	-	-	-	-	-	-
CO ₂	43,17%	44	18,99	67,7%	9290	6293	143	4,80	0,84	1,618
O ₂	0,62%	32	0,20	0,7%	8596	61	2			
Biyogaz							340	6,9	1,27	1,282
Akım No 6	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{416}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
CH ₄	55,17%	16	8,83	31,5%	14520	4571	286	12,4	2,63	1,4
H ₂ S	0,01%	34	0,00	0,0%	-	-	-	-	-	-
CO ₂	43,17%	44	18,99	67,7%	14038	9509	216	5,15	0,9	3,8
O ₂	0,62%	32	0,20	0,7%	12193	86	3			
Biyogaz							504	7,4	1,47	3,0

Akım No 7	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{328}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
CH ₄	55,17%	16	8,83	31,5%	11063	3482	218	11,8	2,33	1,7
H ₂ S	0,01%	34	0,00	0,0%	-	-	-	-	-	-
CO ₂	43,17%	44	18,99	67,7%	10454	7081	161	4,94	0,9	4,8
O ₂	0,62%	32	0,20	0,7%	9620	68	2			
Biyogaz							381	7,1	1,32	3,8

Tablo 6.25. Biyogazın termodinamik özellikleri

Biyogazın yanması için yeterli miktarda hava gereklidir. Bu hava atmosferden alınmakta olup, hava besleme fanları ile motora iletilmektedir. Motor önünde yer alan kaset filtreler ile havanın içerisindeki partiküller yakalanarak temiz hava motora iletilir. Bu havanın içeriğini saptamak için ilgili bölgenin iklim koşulları ve hava özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada incelenen biyogaz tesisi Bingöl ilinde olup, 1080 metre rakımındadır. Bu rakımdaki havanın termodinamik özellikleri termodinamik A-16 tablosundan yararlanılarak hesaplanmıştır. Sonuç interpolasyon yöntemi ile 1000 -1200 metre rakımları kullanılarak bulunmuştur.

$$\text{Yükseklik farkı} = 1200 - 1000 = 200 \text{ metre}$$

$$\text{Atmosfer basıncı farkı} = 89,88 - 87,72 = 2,16 \text{ kPa}$$

$$1080 \text{ metre} = 88,89 \text{ kPa} \sim 89 \text{ kPa}$$

TABLO A-16

Yüksek seviyede atmosferin özellikleri

Yükseklik, m	Sıcaklık, °C	Basıncı, kPa	Yer Çekimi g, m/s ²	Ses hızı, m/s	Yoğunluk, kg/m ³	viskozite, μ , kg/(m.s)	Isıl İletkenlik, W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244

Şekil 6.40. Atmosferin 1080 rakımında özellikleri Tablo A-16 (Çengel ve Boles, 2008)

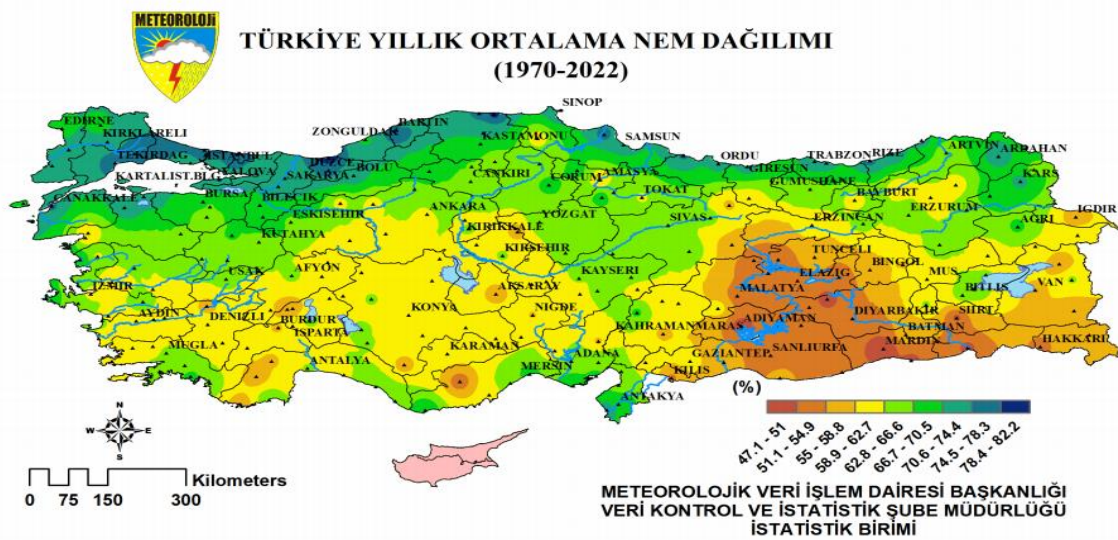
Bingöl ilinin yıl ortalaması bağıl nem değeri %58-60 değerlerindedir (MGM). Bu nem oranında havanın içerik bileşimi Tablo 6.26’da belirtilmiştir.

Bileşen	Kuru	%60 nem	%70 nem	%80 nem	%90 nem	%100 nem
N ₂	78,08%	76,64%	76,41%	76,17%	75,94%	75,71%
O ₂	20,95%	20,56%	20,50%	20,44%	20,38%	20,31%
CO ₂	0,0004%	0,0004%	0,0004%	0,0004%	0,0004%	0,0004%
H ₂ O	0,0000%	0,1880%	0,0219%	0,0252%	0,0281%	0,0310%
Ar ve Diğer	0,0093%	0,0091%	0,0091%	0,0091%	0,0091%	0,0091%

Tablo 6.26. Havanın bağıl nem oranına göre bileşimleri (Uysal, 2020)

Havanın Özellikleri	
Hava Sıcaklığı	22,2 C°
Bağıl Nem	60%
Dış Ortam basıncı	89 kPa
Tesis Rakımı	1080 metre
Lambda (ortalama)	1,55
Hava yoğunluğu (1 nm ³)	1,29 kg/m ³
Hava İçeriği	%60 Bağıl Nem

Tablo 6.27. Yakma havasının özellikleri



Şekil 6.41. Türkiye ortalama nem dağılımı (MGM)

Yakıtlardaki karbon, hidrojen ve kükürt yanabilen elementler olduğundan bunların yanabilmesi için gerekli oksijen miktarı, daha sonra oksijenin hava içerisindeki hacminden gerekli hava miktarı hesaplanabilir. Bunun için Enerji Verimliliği Eğitim Kitabından alınan denklemler kullanılmıştır 1 kg yakıtın yanması için gerekli oksijen miktarı:

$$O_{2min} = 1,87C + 5,6(H - \frac{O}{8}) + 0,7S \text{ [nm}^3 \text{ O}_2 \text{ /kg yakıt]}$$

Oksijen miktarı hacimsel olarak belirlendikten sonra hava miktarı belirlenir.

$$V_{hava} = O_{2min} / 0,21 \text{ [nm}^3 \text{ hava /kg yakıt]}$$

Gerçek yanma işleminde teorik havadan daha fazla hava gerekebilir. Bunun için fazla hava katsayısı kullanılır. Bu değer lambda (λ) ile ifade edilir (Vitázek, Klúčik, Uhrinová, , Mikulová, and Mojžiš, 2016). Biyogaz motoru lambda değerini kendisi hava sıcaklığı, nem ve yakıt miktarına göre otomatik ayarlar. Motor verilerinden λ değeri 1,55 olarak gözlemlenmiş ve hesaplarda kullanılmıştır.

$$V_{hava \text{ gerçek}} = V_{hava} \times \lambda$$

Biyogazın içeriği belirlendikten sonra element içeriği tespit edilmiştir. Bu içerik tespiti sonrası yanması için gerekli hava miktarı hesaplanmıştır.

$$O_{2min} = 1,87C + 5,6(H - \frac{O}{8}) + 0,7S \text{ [nm}^3 \text{ O}_2 \text{ /kg yakıt]}$$

$$O_{2min} = 1,87\%42,1 + 5,6(\%7,93 - \frac{\%50,1}{8}) + 0,7\%0 \text{ [nm}^3 \text{ O}_2 \text{ /kg yakıt]}$$

$$O_{2min} = 0,881 \text{ nm}^3 \text{ O}_2 \text{ /kg yakıt}$$

$$V_{hava} = O_{2min} / 0,21 \text{ [nm}^3 \text{ hava /kg yakıt]}$$

$$V_{hava} = 0,876 / 0,2056 \text{ [nm}^3 \text{ hava / kg yakıt]}$$

$$V_{\text{hava}} = 4,29 \text{ nm}^3_{\text{hava}} / \text{kg}_{\text{yakıt}}$$

$$V_{\text{hava gerçek}} = V_{\text{hava}} \times \lambda$$

$$V_{\text{hava gerçek}} = 4,26 \times 1,55$$

$$V_{\text{hava gerçek}} = 6,61 \text{ nm}^3_{\text{hava}} / \text{kg}_{\text{yakıt}}$$

$$M_{\text{hava gerçek}} = 6,66 \times \rho_{\text{hava}}$$

$$M_{\text{hava gerçek}} = 6,61 \times 1,292$$

$$M_{\text{hava gerçek}} = 8,6 \text{ kg}_{\text{hava}} / \text{kg}_{\text{yakıt}}$$

Biyogazın yanması için gerekli hava kütlesi bulunduğundan sonra yanma tepkimesi yazılır ve reaktantlar ile ürünlerin mol sayıları denkleştirilerek egzoz gazı içeriğı tespit edilir. Biyogazın ve havanın molekül içeriğı bilindikten sonra stokiyometri katsayısı ile hava miktarı çarpılarak ürün miktarı bulunur. 8,6 değeri stokiyometri katsayısı için kullanılacaktır. Havanın %60 bağıl nem oranına göre molekül içeriğine bakılacak olunursa %76,64 N₂, %20,54 O₂, %0,0004 CO₂, %0,00188 H₂O bulunmaktadır. Dikkat edillirse azot ve oksijen dışındaki moleküller oldukça düşük hacimlerde olduğundan ve hesaplarda sonuca etki edecek değerde olmadığından göz ardı edilecektir. Havanın kimyasal ekserji hesabını yapmak için gaz karışımlarının kimyasal ekserji formülü kullanılmıştır.

HAVANIN KİMYASAL EKSERJİSİ					
	x_i (mol)	$e_{x_{ch}}$ (kJ/kmol)	$x_i \cdot e_{x_{ch}}$	$\ln(x_i)$	$x_i \cdot \ln(x_i)$
N ₂	76,64%	720	551,808	-0,3	-505,180713
CO ₂	0,00%	19870	0,07948	0	0
O ₂	20,56%	3970	816,232	-1,6	-805,762795
H ₂ O	0,02%	9500	1,786	0	0

$$\text{Havanın kimyasal ekserjisi} = 59 \text{ kJ/kmol}$$

$$\text{Havanın kimyasal ekserjisi} = 2,1 \text{ kJ/kg}$$

Yakma havasının termodinamik özellikleri her akım numarası için hesaplanmıştır.

HAVA %60 BAĞIL NEM								
Ölü Hal	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{25}$	$\bar{h}$	h	s
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K
N ₂	76,64%	28	21,46	76,5%	8669	6634	237	6,8
O ₂	20,56%	32	6,58	23,5%	8682	2037	64	6,4
CO ₂	0,00%	44	0,00	0,0%	9364	-2	0	4,9
H ₂ O	0,02%	18	0,00	0,0%	9904	-28	-2	10,4
Hava							298	6,7
Akım No 4	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{295,2}$	$\bar{h}$	h	s
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K
N ₂	76,64%	28	21,46	76,5%	8580	6566	234	6,8
O ₂	20,56%	32	6,58	23,5%	8592	2016	63	6,4
CO ₂	0,00%	44	0,00	0,0%	9251	-2	0	4,9
H ₂ O	0,02%	18	0,00	0,0%	9801	-28	-2	10,5
Hava							295	6,7
Akım No 5	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{295,4}$	$\bar{h}$	h	s
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K
N ₂	76,64%	28	21,46	76,5%	8582	6567	235	6,8
O ₂	20,56%	32	6,58	23,5%	8596	2017	63	6,4
CO ₂	0,00%	44	0,00	0,0%	9253	-2	0	4,9
H ₂ O	0,02%	18	0,00	0,0%	9805	-28	-2	10,5
Hava							296	6,7
Akım No 6	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{416}$	$\bar{h}$	h	s
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K
N ₂	76,64%	28	21,46	76,5%	12107,8	9266	331	7,2
O ₂	20,56%	32	6,58	23,5%	12193	2861	89	6,7
CO ₂	0,00%	44	0,00	0,0%	14038	-2	0	5,2
H ₂ O	0,02%	18	0,00	0,0%	13905	-28	-2	11,1
Hava							416	7,1
Akım No 7	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{328}$	$\bar{h}$	h	s
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K
N ₂	76,64%	28	21,46	76,5%	9539	7300	261	6,9
O ₂	20,56%	32	6,58	23,5%	9561	2243	70	6,5
CO ₂	0,00%	44	0,00	0,0%	10493	-2	0	4,9
H ₂ O	0,02%	18	0,00	0,0%	10908	-28	-2	10,7
Hava							328	6,8

Tablo 6.28. %60 bağıl nemli havanın termodinamik özellikleri

Biyogaz yeterli miktarda hava ile karışınca yanma işlemi gerçekleşebilir. Yapılan hesaplara göre 1 kg biyogazın yanması için 8,6 kg hava gereklidir. Bu miktarlara göre yakıt hava karışımının termodinamik özellikleri biyogaz ve havanın kütleli karışım oranlarına göre santral boyunca ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yakıt hava karışımı sıcaklık ve basınç değerleri motor ekranından alınan veriler ile tespit edilmiş, ağırlıklı ortalama ile entalpi, entropi, özgül ısı ve yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. İlgili sonuçlar Tablo 6.29’da verilmiştir.

$$h_{\text{yakıt}} = m_f \text{Biyogaz} \times h_{\text{Biyogaz}} + m_f \text{Hava} \times h_{\text{Hava}}$$

$$s_{\text{yakıt}} = m_f \text{Biyogaz} \times s_{\text{Biyogaz}} + m_f \text{Hava} \times s_{\text{Hava}}$$

$$c_{\text{yakıt}} = m_f \text{Biyogaz} \times c_{\text{pBiyogaz}} + m_f \text{Hava} \times c_{\text{pHava}}$$

$$\rho_{\text{yakıt}} = m_f \text{Biyogaz} \times \rho_{\text{Biyogaz}} + m_f \text{Hava} \times \rho_{\text{Hava}}$$

YAKIT					
Akım No 0	Kütleli	h ₂₉₈	s	c _p	ρ
Bileşenler	%	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
Biyogaz	10,4%	343	6,98	1,27	1,264
Hava	89,6%	298	6,70	1,00	1,030
Yakıt		300,1	6,9	1,03	1,05
Akım No 5	Kütleli	h _{295,4}	s	c _p	ρ
Bileşenler	%	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
Biyogaz	10,4%	340	6,99	1,27	1,282
Hava	89,6%	296	6,70	1,01	1,057
Yakıt		300,6	6,87	1,03	1,08
Akım No 6	Kütleli	h ₄₁₆	s	c _p	ρ
Bileşenler	%	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
Biyogaz	10,4%	504	7,40	1,47	2,434
Hava	89,6%	416	7,10	1,02	2,531
Yakıt		425,1	7,01	1,06	2,52
Akım No 7	Kütleli	h ₃₂₈	s	c _p	ρ
Bileşenler	%	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
Biyogaz	10,4%	381	7,10	1,32	3,003
Hava	89,6%	328	6,80	1,01	3,154
Yakıt		333,5	6,83	1,04	3,14

Tablo 6.29. Yakıt hava karışımının termodinamik özellikleri

Yakıtın yanması ile enerji açığa çıkar. Yakıt alev sıcaklığına ulaşınca, bujilerin ateşlemesi vasıtasıyla yanmaya başlar ve yüksek sıcaklık ve basınçta hareket gücü sağlar. Bu enerji motor pistonlarına hareket enerjisi olarak aktarılır ve krank milini hareket ettirir. Krank mili volan yardımıyla motora entegre edilmiş jeneratörün rotoruna bağlıdır ve hareket enerjisi elektrik enerjisine çevrilir.

Yakıt hava karışımı önce tecjet ile gaz dozajlaması sağlanarak motor taze hava fanlarından üflenen hava ile karışır. Taze havanın içinde partikül olmaması için hava kaset filtreden geçirilir ve burada ortalama 1 kpa kadar basınç kaybı olur. Kaset filtrede basınç farkı oluşması çekilen havanın kirli olduğunu gösterir, bu yüzden basınç kaybının 1 kpa'ı geçmemesi istenir. Yakıt hava karışımı daha sonra turboşarj ünitesinde basınçlandırılarak motorun daha verimli çalışması için pistonlara iletilmek üzere uygun sıcaklığa getirilir. Basıncı artan yakıt hava karışımının sabit hacimde ideal gaz denkleminde göre sıcaklığının da artması ile intercooler ünitesinde 55 °C'e kadar soğutulur. Bu soğutma işlemi su ile yapılmaktadır. Son olarak 55 °C sıcaklığa getirilmiş yakıt hava karışımı dört zamanlı içten yanmalı çalışma prensibine uygun olarak hazır hale getirilir.



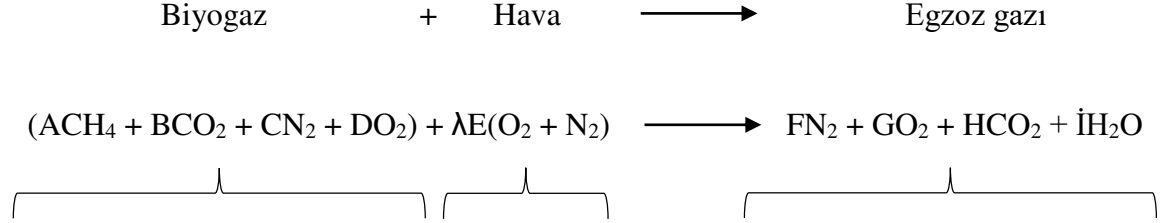
Şekil 6.42. Taze hava fanları ve kaset filtre basınç göstergesi



Şekil 6.43. Yakıtın motora giriş sıcaklığı ve turboşarj çıkış sıcaklığı

Turboşarj ünitesinin egzoz gazı tarafında bir türbin bulunmaktadır. Egzoz gazının bu türbinden geçirilmesi ile miline bağlı diğer ucundaki kompresör fanına hareket enerjisi aktarır. Bu sayede yakıt basınçlandırılır. Bu aynı zamanda motor verimini artırır. Motorun içten yanmalı çalışma prensibi ve aynı zamanda dört zamanlı çevrimi ile önce emme, daha sonra sıkıştırma, ateşleme ve egzoz evrelerini doğru zamanlama ile gerçekleştirmesi gerekir. Ateşlemenin doğru zamanda yapılmaması vuruntu olarak adlandırılır. Motorda vuruntu olmaması ise biyogazın kesintisiz ve doğru basınçla motora iletilmesi gerekir. Biyogaz hattının içinde yoğuşma olması durumunda yoğuşan su biyogazın geçişini kesinti olarak engelleyebilir. Bu nedenle biyogaz hattı üzerinde bulunan kondespitler yardımıyla biyogazın suyu alınır. Ayrıca yakma işlemi öncesi biyogazın bağıl neminin de alınması gerekir. Biyogazın neminin alınması için soğutulması gerekir. Bu soğutma işlemi chiller adı verilen su ve hava soğutmalı üniteler ile gerçekleşir. Chiller fan yardımıyla antifrizli suyu soğutarak biyogaz eşanjörüne soğuk suyu ileterek anaerobik çürütücünden çıkan sıcak biyogazı soğutur ve ortalama 10 °C sıcaklığa kadar düşürür. Daha sonra soğumuş biyogaz blower ünitesine iletilir ve buradan basınçlandırılarak motora iletilir. Yanma tepkimesi için tüm bu adımlar çok önemlidir. Biyogaz istenen sıcaklık ve basınçla getirilip yakma havasının da istenen sıcaklık ve temizlikte olması piston bloklarında yanma işleminin sorunsuz olmasını ve motor üzerinde olabildiğince deformasyona sebep olmadan gerçekleşmesini sağlar.

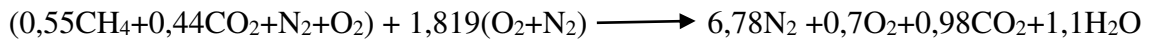
Biyogazın genel yanma denklemi (Colmenar-Santos, Zarzuelo-Puch, Borge-Diez and García-Diéguez, 2016);



Yanma denkleminde elementlere ait mol denkliği yapılarak yanma ürünlerinin molekül ağırlıkları tayin edilir.

Katsayılar	Değerler
A	0,55
B	0,44
C	0
D	0
E	1,819
F	6,78
G	0,7
H	0,9
İ	1,1

Tablo 6.30. Biyogaz yanma tepkimesine ait mol denkliği katsayıları



Biyogaz için içeriğini oluşturan bileşenlerinin hacimsel ve kütesel miktarları tespit edildikten sonra molekül ağırlığı 28,23 gr/mol olarak hesaplanmıştır.

	BİYOGAZ			
Moleküller	CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂
Mol Sayıları	0,55	0,43		
Hacim %	55,2%	43,2%	0,0%	0,62%
Kütle %	31,6%	67,7%	0,0%	0,70%
Mol Kütleleri	16 gr/mol	44 gr/mol	28 gr/mol	32 gr/mol
Molekül Ağırlığı	28,23 gr/mol			
Yanma Mol Sayısı	0,98			

Tablo 6.31. Biyogazın bileşenleri ve mol ağırlıklar

Hava için benzer şekilde havayı oluşturan bileşenlerinin hacimsel ve kütleli miktarları tespit edildikten sonra molekül ağırlığı 28,38 gr/mol olarak hesaplanmıştır.

	HAVA (%60 BAĞIL NEM)			
Moleküller	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
Mol Sayıları	3,73	1		
Hacim %	76,64%	20,56%	0,00040%	0,0118%
Kütle %	75,64%	23,18%	0,00062%	0,00749%
Mol Kütlesi	28 gr/mol	32 gr/mol	44 gr/mol	18 gr/mol
Molekül Ağırlığı	28,38 gr/mol			
Yanma Mol Sayısı	8,60			

Tablo 6.32. Havanın bileşenleri ve mol ağırlıklar

Egzoz gazı içeriği tespit edilten sonra molekül ağırlığı 28,80 gr/mol olarak hesaplanmıştır.

	EGZOZ			
Moleküller	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O _{gaz}
Mol Sayıları	6,78	0,72	0,98	1,10
Hacim %	70,75%	7,47%	10,26%	11,51%
Kütle %	68,81%	8,30%	15,68%	7,20%
Mol Kütlesi	28 gr/mol	32 gr/mol	44 gr/mol	18 gr/mol
Molekül Ağırlığı	28,80 gr/mol			
Yanma Mol Sayısı	9,58			

Tablo 6.33. Egzoz gazının bileşenleri ve mol ağırlıklar

Motor pistonlarında elde edilen güç sonrası egzoz manifolduna gelen egzoz gazı ortalama 587-561 °C sıcaklıklarda pistondan ayrılmaktadır. Daha sonra turboşarj ünitesi türbinine girerek türbin çarkına dönme enerjisi vermede kullanılır. Burada egzoz gazı sıcaklığı 489 °C'e kadar düşer. Bu işlem sırasında egzoz gazı bir miktar basınç kaybına uğrar. Motor devresinden 2970 mbar basınç ile çıkan egzoz gazının turbo sonrası basıncını bulmak için izantropik çıkış sıcaklığı formülü kullanılır. 586 °C motordan çıkan egzoz gazı turbodan sonra 487 °C'e düşmektedir. Motor çıkış basıncı 2970 mbar olan egzoz gazı çıkış basıncı denklem (6.30)'a göre hesaplanırsa;

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

$$P_2 = 2549 \text{ mbar}$$

Egzoz gazı turbodan 485,8 °C’de ayrıldıktan sonra atık ısı kazanına geri kazanım için girmektedir. Buradaki basınç değişimi;

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k}$$

$$P_3 = 1915 \text{ mbar}$$

Egzoz gazının molekül içeriğine bakılacak olunursa %70,7 N₂, %7,4 O₂, %10,4 CO₂, %11,6 H₂O bulunmaktadır. Egzoz gazının kimyasal ekserji hesabını yapmak için gaz karışımlarının kimyasal ekserji formülü kullanılmıştır.

EGZOZ KİMYASAL EKSERJİSİ					
	x_i (mol)	ex_{ch} (kJ/kmol)	$x_i ex_{ch}$	$\ln(x_i)$	$x_i \ln(x_i)$
CO ₂	10,3%	19870	2057,922684	-2,3	-578,875187
N ₂	70,8%	720	508,9070087	-0,3	-606,436782
H ₂ O	11,5%	9500	1099,609884	-2,2	-616,663388
O ₂	7,47%	3970	293,2518565	-2,6	-479,932539

Egzoz gazının kimyasal ekserjisi = 1657 kJ/kmol

Egzoz gazının kimyasal ekserjisi = 57,5 kJ/kg

Egzoz gazının termodinamik özelliklerini hesaplamak için molekül kütleli ağırlıkları tespit edilip entalpi, entropi, özgül ısı ve yoğunluklarının ağırlıklı ortalaması alınır.

EGZOZ GAZI										
Ölü Hal	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{25}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
N ₂	70,76%	28	19,81	68,8%	8669	5966	213	6,87	1,04	1,01
O ₂	7,47%	32	2,39	8,3%	8682	721	23	6,44	0,92	1,15
CO ₂	10,26%	44	4,52	15,7%	9364	1469	33	4,88	0,84	1,58
H ₂ O	11,52%	18	2,07	7,2%	9904	713	40	10,53	1,87	0,65
Egzoz							309	6,8	1,06	1,08

AkımNo 37	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{855}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
N ₂	70,76%	28	19,81	68,8%	25451	17514	626	7,65	1,13	1,16
O ₂	7,47%	32	2,39	8,3%	26627	2210	69	7,17	1,06	1,33
CO ₂	10,26%	44	4,52	15,7%	35401	5553	126	5,73	1,19	1,83
H ₂ O	11,52%	18	2,07	7,2%	30319	2183	121	12,07	2,18	0,75
Egzoz							942	7,6	1,21	1,25

AkımNo 38	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{758,8}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
N ₂	70,76%	28	19,81	68,8%	22423	15431	551	7,59	1,11	1,11
O ₂	7,47%	32	2,39	8,3%	23138	1920	60	7,11	1,05	1,27
CO ₂	10,26%	44	4,52	15,7%	30074	4717	107	5,65	1,16	1,75
H ₂ O	11,52%	18	2,07	7,2%	26312	1894	105	11,94	2,12	0,72
Egzoz							824	7,6	1,19	1,20

AkımNo 39	Hacim	Mol Kütle	Kütle	Kütlesel	$\bar{h}_{454,2}$	$\bar{h}$	h	s	c_p	ρ
Bileşenler	%	kg/kmol	kg/kmol	%	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³
N ₂	70,76%	28	19,81	68,8%	13226	9102	325	7,11	1,06	1,38
O ₂	7,47%	32	2,39	8,3%	13346	1108	35	6,66	0,97	1,58
CO ₂	10,26%	44	4,52	15,7%	15656	2456	56	5,14	0,97	2,18
H ₂ O	11,52%	18	2,07	7,2%	15219	1096	61	11,01	1,94	0,89
Egzoz							476	7,0	1,10	1,49

Tablo 6.34. Egzoz gazının termodinamik özellikleri

Motor yağının termodinamik özellikleri, Motor devresinde Mobil Pegasus 610 marka yağ kullanılmaktadır. Motor yağına ait özgül ısı hesabında aşağıdaki formül kullanılmıştır; (Güngör, 2012)

$$c_p = 4,19 \left[\frac{0,402 + 0,00081 \times T}{\sqrt{d}} \right]$$

Denklemden 'T' yağın sıcaklığını, 'd' yağın 15 °C sıcaklıktaki katalogta yer alan yoğunluğunu (kg/m³) ifade etmektedir. Biyogaz motorunda kullanılan yağ Mobil 610 yağına ait özellikler Tablo 6.35'te belirtilmiştir.

Teknik Özellikler	
Mobil Pegasus 610	
cSt @40 °C	130
cSt @100 °C	13,8
Viskozite indeksi ASTM D 2270	102
Sulfat külü %wt ASTM D 874	1
TBN, mg KOH/g, ASTM D 2896	8,6
Patlama noktası °C, ASTM D 92	264
Yoğunluk @15,6 °C, kg/L	0,89

Tablo 6.35. Mobil Pegasus 610 motor yağının özellikleri

Yağın belirtilen özelliklerine göre özgül ısı hesabı yapılmıştır, sonuçlar Tablo 6.36’da belirtilmiştir.

Akım No	AKIŞKAN	Akışkan Türü	Özgül Isı kJ/kg.K	Yoğunluk kg/m ³
11	Yağ-Pompa öncesi	Mobil Yağ	2,14	890
12	Yağ- Pompa sonrası	Mobil Yağ	2,14	890
13	Yağ- Eşanjör sonrası	Mobil Yağ	2,07	890
14	Yağ- Motor devresi çıkışı	Mobil Yağ	2,14	890

Tablo 6.36. Motor yağının özgül ısı ve yoğunluğu

Mobil yağ sıvı akışkan olduğu için entalpi değişimi denklem (6.21)’e göre hesaplanmıştır.

$$h_{\text{mobil yağ}} = c_p \Delta T \text{ [kJ/kg]}$$

Mobil yağa ait entropi değişimi denklem (6.22)’e göre hesaplanmıştır.

$$s_2 - s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \text{ [kJ/kg.K]}$$

Soğutma suyu devresinin termodinamik özelliklerini belirlemek için sistemdeki akış hareketini bilmek gerekir. Motorda yanma işlemi ile elektrik enerjisinin yanı sıra sıcak su enerjisi de elde edilir. Motor gömlek devresine 70 °C giren sıcak su önce yağ soğutma eşanjörüne girip yağı soğutur ve bu sırada ısınır, daha sonra ceket suyunu soğuturken ikinci ısıtma devresini tamamlar, en son turboda ısınmış gazı soğutmak için kullanılır ve devresini ortalama 90 °C sıcaklığa çıkararak tamamlar. Bu aşamalara high temperature (HT devresi) adı verilir. HT devresinden elde edilen sıcak su çalışmaya konu olan biyogaz tesisinde çürütücü ısıtmasında kullanılmaktadır. Bunun içinde bir plakalı eşanjör mevcut olup sekonder devresi diye adlandırılan karşı beslemeli 65-85 °C devresindeki suyu ısıtır. Buradan elde edilen termal güç çürütücü ısıtması için gerekli üç yollu vana set değerini sağlayacak şekilde ısıtma sağlar.

Motor devresinde kış aylarının olumsuz hava koşulları göz önüne alınarak olası duruşlar hat içerisinde donmaların önüne geçmek için antifriz katkısı sağlanır. Etilen Glikol esaslı antifriz a ait bilgiler Tablo 6.37’de verilmiştir. Bingöl’ün iklimi göz önüne alındığında su ve etilen glikol karışımı -37 °C’i sağlayacak şekilde %50 antifriz katkısı ile hesaplanmıştır. Antifrizli suyun motor primer devresinde hareketi hat üzerindeki santrifüj tip pompalar ile sağlanır. Bu pompalar sürücü ile frekans ayarını otomatik ayarlayarak çalışırlar çünkü motor ısıtma devresinde termal gücün kullanılmadığı durumlarda sıcak suyun soğutulması acil soğutma fanları vasıtasıyla sağlanır.

Fricofin LL Antifriz özellikleri		
Yoğunluk @ 20 °C, kg/L		1113
Renk		Turuncu
Patlama noktası C°, DIN ISO 2592		120
Kaynama noktası C°, ASTM D 1120		160
PH değeri		8,6
Su - Antifriz karışım oranları		
Donma Noktası	Fricofin Miktarı	Su Miktarı
-20	1	2
-27	1	1,5
-40	1	1

Tablo 6.37. Antifrizin özellikleri (Fricofin Fuchs LL)

Ortalama %50 su %50 antifriz karışımı ile motor HT devresindeki termal enerji hesabı yapılmış olup, akışkana ait entalpi, entropi, özgül ısı ve yoğunluk değerleri EES programı kullanılarak hesaplanmıştır. Motor HT devresinin yanı sıra gaz soğutma ikinci devresi olarak geçen low temperature (LT devresi) de kullanıcıya 50-54 °C sıcak su enerjisi kullanma imkânı vermektedir. Ancak incelenen tesiste LT devresi kullanılmamaktadır. Motor sıcak su devresinde dolanan akışkan suyun akım noktalarındaki sıcaklık değerleri hat üzerine bağlı sıcaklık transmitterleri ve termometrelerden, bu enstrümanlar olmayan hatlardan ise kızıl ötesi kalibrasyonlu Bosch GİS1000C model termometre ile alınmıştır. Sekonder hatlarındaki sıcaklık değerleri tesiste bulunan otomasyon ekranından alınmıştır. Bu değerler alınırken motor tam yükte 1067 kWh elektrik üretiminde uzun süre çalıştırılmıştır.



Şekil 6.44. HT devresi motor giriş sıcaklığı, yağ ve ceket soğutma çıkış sıcaklığı ve motor çıkış sıcaklığı



Şekil 6.45. LT devresi İntercooler giriş ve çıkış sıcaklığı



Şekil 6.46. Ceket suyu motor çıkışı ve motor dönüş sıcaklığı



Şekil 6.47. Yağ devresinin motor çıkış sıcaklığı ve soğutma eşanjörü çıkış sıcaklığı

Motor sıcak su devresi sıcaklık değerleri gözlemlenmiş ve elde edilen veriler şu şekildedir; motora giriş sıcaklığı 70 °C olan su önce motor yağını soğutmak için kullanılır, bu aşamada yağ soğutma eşanjörüne yağ 100,8 °C girer 80 °C'e soğutulur. Yağın soğuması ile gerçekleşen ısı transferi borulu tip ısı değiştiricisi ile 70 °C'deki gömlek suyunu 74,1 °C'e yükseltir. Daha sonra 74,1 °C'deki gömlek suyu ceket suyu soğutma eşanjörüne girer. Motor tam yükteyken ceket suyu 92,5 °C sıcaklığa yükselir ve soğutulması için ceket suyu eşanjörüne girer. Burada 87,5 °C'e düşer ve sıcaklık aktarımı plakalı eşanjör ile gömlek suyuna iletilir. Yağ devresi sonrası 74,1 °C sıcaklıktaki su 83 °C'e yükselir. Gömlek suyu 83 °C sıcaklıkla intercooler gaz soğutma devresine girmektedir. Biyogaz hava karışımı turbo sonrası 143 °C sıcaklıktan 55 °C'e düşürülürken ısı aktarımını plakalı özel bir eşanjör ile gömlek suyu devresine iletir. Burada 83 °C sıcaklıktaki gömlek suyu 90 °C sıcaklığa ulaşır ve motor üzerindeki devresini tamamlar. LT devresi kısa bir devredir ve motora 49 °C sıcaklıkta giren su gaz soğutma eşanjörü olan intercooler devresinde 52,5 °C sıcaklığa yükselir. Hem HT devresi hem LT devresi karşı beslemeli hatların ısınması için bir plakalı eşanjöre aktararak sekonder devresini ısıtmakta kullanılır. Motor devrelerinden elde edilen sıcak su enerjisi sekonder devrede 65-85 °C tasarımına sahip sıcak su devresini ısıtmada kullanılır. HT devresinde 68,4 °C giriş sıcaklığına sahip su 78,7 °C sıcaklığa yükseltilir. Bu devrede suya antifriz karıştırılmamıştır, çünkü sürekli akış halinde olduğu donma riski yoktur.

Tesisteki biyogazın enerji dönüşümü için sisteme dahil olduğu andan egzoz gazı olarak geri kazanıma kadar tüm aşamalar numaralandırılmış, gaz, su ve yağ devrelerindeki akışkanlar türlerine göre ayrılarak termodinamik özellikleri tespit edilerek akışkanlar tablosuna işlenmiştir. Ayrıca bu akışkanların özgül hacimleri ve ekserji hesapları da her bir akım numarasına göre hesaplanmıştır. Fiziksel ve kimyasal ekserjiler tek bir tablo olarak akışkanlar tablosu içerisinde gösterilmiştir. Akım numaralarına göre akışkanların akım diyagramındaki konumlarına göre de tesiste bulunan her bir ekipmanın enerji dengesi ve ekserji yıkımları hesaplanarak termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre verim hesaplarının yapılması sağlanmıştır. Akışkanlar tablosu Tablo 6.38'de gösterilmiştir.

			K	kPa	kg/s	kJ/kg	kJ/kg.K	kJ/kg.K	kg/m ³	m ³ /kg	kW	kW	kW
Akım No	AKIŞKAN	Akışkan Hal	Sıcaklık	Basınç	Debi	Entalpi	Entropi	Özgül Isı	Yoğunluk	Özgül Hacim	Fiziksel Ekserji Akışı	Kimyasal Ekserji Akışı	Toplam Ekserji
Ölü Hal	Yakıt	İdeal Gaz	298,0	89,0	1,0	302,7	6,90	1,03	1,06	0,9513	0,0	1749	2979
Ölü Hal	Egzoz Motor Çıkışı	İdeal Gaz	298,0	89,0	1,0	308,4	6,79	1,06	1,1	0,5678	0,0	57,5	98,0
Ölü Hal	Hava %60 Bağlı Nem	İdeal Gaz	298,0	89,0	1,0	298,2	6,90	1,00	1,0	0,9709	0,0	2,1	2,1
Ölü Hal	Biyogaz	İdeal Gaz	298,0	89,0	1,0	343,0	6,99	1,27	1,27	0,7852	0,0	16601	16601
Ölü Hal	Antifrizli Su	Su+Etilen Glikol	298,0	89,0	1,0	42,4	0,29	3,34	1062	0,0009	0,0	50,0	50,0
Ölü Hal	Su	Su	298,0	89,0	1,0	104,5	0,37	4,18	997	0,0010	0,0	50,0	50,0
Ölü Hal	Yağ	Mobil Yağ	298,0	89,0	1,0	46,9	0,16	1,87	890	0,0011	0,0	0,0	0,0
1	Biyogaz çürütücü çıkışı	İdeal Gaz	313,0	89,5	0,179	360,5	7,01	1,30	1,200	1,0193	0,92	16601,5	2976,1
2	Biyogaz soğutma sonrası	İdeal Gaz	283,0	89,2	0,179	322,2	6,89	1,25	1,322	0,9248	0,7	16601,5	2976,1
3	Biyogaz blower sonrası	İdeal Gaz	297,4	98,4	0,179	322,9	6,92	1,27	1,379	0,8861	8,9	16601,5	2977,6
4	Hava %60 bağlı nem	İdeal Gaz	295,2	89,0	1,524	295,4	6,85	1,01	1,07	0,9390	0,0	2,1	3,1
5	Yakıt	İdeal Gaz	295,4	88,7	1,703	300,1	6,87	1,03	1,081	0,9286	-0,2	1749,6	2978,7
6	Yakıt - sıkıştırılmış	İdeal Gaz	416,0	302,0	1,703	425,1	7,01	1,06	2,521	0,3968	124,4	1749,6	3191,0
7	Yakıt- yanmaya hazır	İdeal Gaz	328,0	297,0	1,703	333,4	6,77	1,04	3,141	0,3184	104,7	1749,6	3157,4

Tablo 6.38. Kojenerasyon sistemine ait akışkanlar ve özellikleri

8	Ceket suyu motor çıkışı	Su+Etilen Glikol	365,5	60,0	19,873	278,1	1,03	3,62	1017	0,0010	15,2	50,0	1296,6
9	Ceket suyu pompa sonrası	Su+Etilen Glikol	360,5	60,0	19,873	260,0	0,98	3,61	1021	0,0010	12,9	50,0	1250,5
10	Ceket suyu eşanjör sonrası	Su+Etilen Glikol	360,5	141,0	19,873	260,1	0,98	3,61	1021	0,0010	13,0	50,0	1252,1
11	Yağ	Mobil Yağ	373,1	475,0	2,670	214,3	0,32	2,14	890	0,0011	121,9	0,0	325,6
12	Yağ- pompa sonrası	Mobil Yağ	373,1	496,0	2,670	214,3	0,32	2,14	890	0,0011	122,0	0,0	325,7
13	Yağ- eşanjör sonrası	Mobil Yağ	353,1	496,0	2,670	165,8	0,19	2,07	890	0,0011	112,2	0,0	299,5
14	Yağ- motor devresi çıkışı	Mobil Yağ	373,1	386,0	2,670	214,3	0,32	2,14	890	0,0011	121,9	0,0	325,6
15	Soğutma suyu	Su+Etilen Glikol	343,0	129,0	8,818	197,5	0,79	3,54	1034	0,0010	6,6	50,0	499,0
16	S.S. pompa sonrası *	Su+Etilen Glikol	343,0	449,0	8,818	197,8	0,79	3,54	1034	0,0010	6,9	50,0	501,8
17	S.S. yağ eşanjör sonrası *	Su+Etilen Glikol	347,1	449,0	8,818	212,4	0,84	3,56	1031	0,0010	8,2	50,0	513,4
18	S.S. eşanjör sonrası *	Su+Etilen Glikol	357,5	449,0	8,818	249,6	0,95	3,60	1023	0,0010	12,0	50,0	547,1
19	S.S. intercooler sonrası *	Su+Etilen Glikol	363,1	418,0	8,818	269,7	1,01	3,62	1019	0,0010	14,4	50,0	567,6
20	Antifirizli su	Su+Etilen Glikol	321,0	169,0	6,411	120,6	0,55	3,45	1049	0,0010	1,7	50,0	331,7
21	A.S. pompa sonrası *	Su+Etilen Glikol	321,0	289,0	6,411	120,7	0,55	3,45	1049	0,0010	1,9	50,0	332,4
22	A.S. intercooler sonrası *	Su+Etilen Glikol	325,5	289,0	6,411	136,3	0,60	3,47	1046	0,0010	2,6	50,0	337,2
23	HT Suyu- eşanjör sonrası	Su	351,7	239,0	8,158	330,1	0,99	4,20	973	0,0010	40,5	50,0	738,5
24	HT Suyu -pompa sonrası	Su	351,7	399,0	8,158	330,3	0,99	4,20	973	0,0010	40,7	50,0	739,9
25	HT Suyu- eşanjöre dönüş	Su	341,4	399,0	8,158	286,5	0,86	4,19	979	0,0010	34,3	50,0	687,6

Tablo 6.38. (Devamı) Kojenerasyon sistemine ait akışkanlar ve özellikleri

26	LT Suyu eşanjör sonrası	Su	322,0	169,0	4,127	204,9	0,62	4,18	989	0,0010	25,9	50,0	313,1
27	LT Suyu pompa sonrası	Su	322,0	339,0	4,127	205,0	0,62	4,18	989	0,0010	26,1	50,0	313,9
28	LT Suyu eşanjöre dönüş	Su	318,0	339,0	4,127	188,1	0,56	4,18	990	0,0010	24,7	50,0	308,3
29	Çürütücü ısıtma eşanjör çıkışı	Su	333,0	339,0	5,491	251,0	0,76	4,18	983	0,0010	30,1	50,0	439,8
30	Çürütücü ısıtma pompa sonrası	Su	333,0	579,0	5,491	251,3	0,76	4,18	984	0,0010	30,3	50,0	441,1
31	Çürütücü ısıtma dönüş	Su	323,0	579,0	5,491	209,0	0,63	4,18	988	0,0010	26,2	50,0	418,2
32	Degazör çıkış	Su	354,4	0	0,201	341,6	1,02	4,20	971	0,0010	42,4	50,0	18,6
33	Kazan besı suyu giriş	Su	354,4	1100	0,201	342,3	1,02	4,20	971	0,0010	43,0	50,0	18,7
34	Buhar	Doymuş Buhar	451,8	980,0	0,201	2776,1	6,59	1,87	5,18	0,1930	815,8	50,0	174,4
35	Chiller soğutma suyu gidiş	Su+Etilen Glikol	282,7	150,0	2,672	31,6	0,12	3,26	1070	0,0009	40,3	50,0	241,3
36	Chiller soğutma suyu dönüş	Su+Etilen Glikol	281,9	150,0	2,672	28,9	0,11	3,25	1071	0,0009	40,3	50,0	241,4
37	Egzoz motor çıkışı	İdeal Gaz	855,0	297,0	1,703	941,6	7,63	1,21	1,25	0,7985	398,3	57,5	776,1
38	Egzoz turbo sonrası	İdeal Gaz	758,8	254,9	1,703	823,2	7,56	1,19	1,20	0,8352	307,1	57,5	620,9
39	Egzoz kazan çıkışı	İdeal Gaz	454,2	191,5	1,703	476,1	7,04	1,10	1,49	0,6717	99,7	57,5	267,7

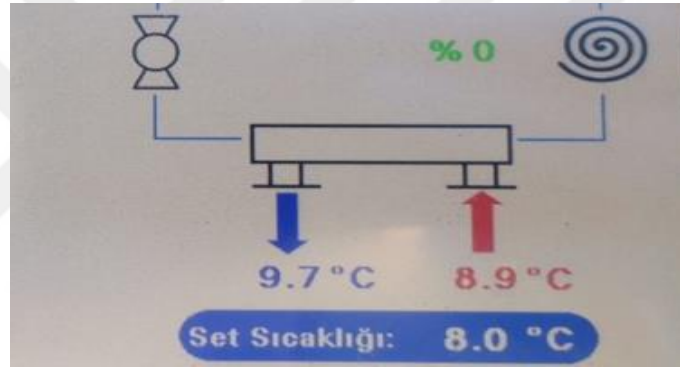
Tablo 6.38. (Devamı) Kojenerasyon sistemine ait akışkanlar ve özellikleri

* işaretlerle gösterilen adlandırılmalarda kısaltma kullanılmıştır. S.S. soğutma suyu, A.S. ise antrifrizli suyun kısaltılmış halidir.

Değerlerin virgülden sonraki değerleri için yuvarlama yapılmıştır. Ancak ekipmanların analizlerinde değerler doğrudan yazılmıştır.

İlk olarak akış diyagramına göre biyogazın soğutulmasını sağlayan gaz soğutma eşanjörü incelenmiştir. Çürütücülerden çıkan ortalama 40 °C sıcaklıktaki biyogaz chiller ünitesi yardımıyla soğuk su ile soğutulur. Chiller içerisinde bulunan fanlar ve R410 soğutucu akışkan sayesinde devresindeki suyu soğutarak gaz soğutma eşanjörüne iletir. Biyogaz çürütücü tanklarından çıktıktan sonra eşanjör girişine ortalama 5 mbar basınç ile giriş 2mbar basınç ile devreden ayrılır. Bu sırada soğutma suyu yardımıyla 40 °C sıcaklıktan 10 °C sıcaklık düzeyine kadar düşer. Bu biyogazın içerisindeki bağıl nemin alınması açısından oldukça önemlidir.

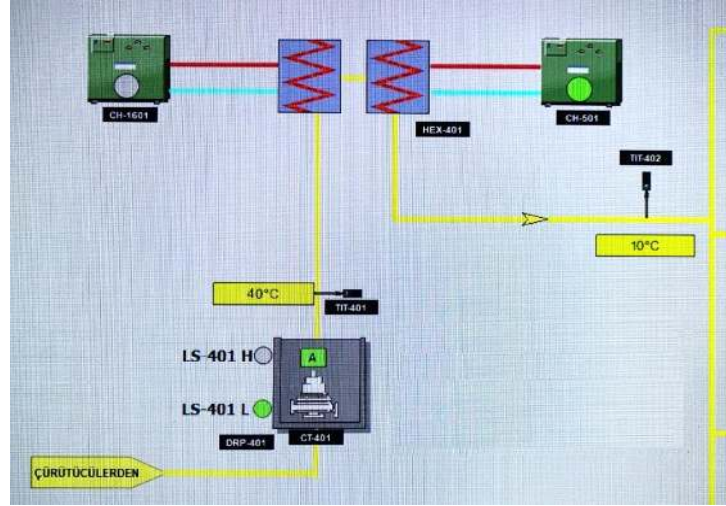
Chiller ünitesi ekranından alınan gidiş ve dönüş suyu sıcaklık değerleri ile otomasyon üzerinden alınan veriler yardımıyla hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 6.48. Chiller su devresi gidiş ve dönüş sıcaklığı



Şekil 6.49. Biyogazın gaz soğutma eşanjörüne giriş ve çıkış basıncı



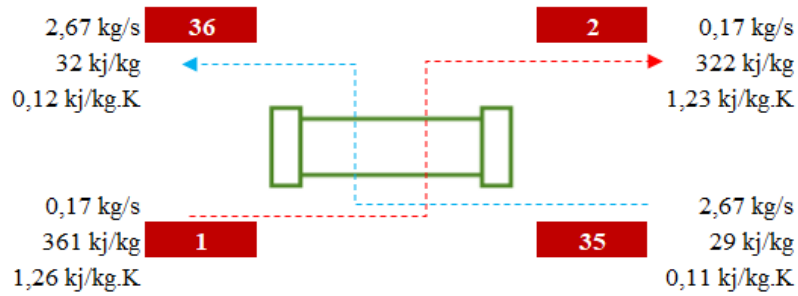
Şekil 6.50. Biyogaz eşanjör çıkışı ve girişi sıcaklıkları

Biyogaz 40 °C sıcaklıkla eşanjöre girmekte ve ortalama 10 °C sıcaklıkta çıkmaktadır. Chiller soğuk su devresi de 8,9 °C girip 9,7 °C sıcaklığa ulaşarak devreden ayrılır. Bu şekilde yapılan hesaplamalarda soğuk su 7,06 kW enerjisi ile 6,47 kW enerji ile biyogazı soğutmaktadır. Bu değerler neticesinde eşanjör %92 verimle iki akışkan arasında ısı transferi sağlamıştır. Gaz soğutma eşanjöründe ekserji verimi %36 olarak bulunmuştur.

$$E_{\text{biyogaz}} = 0,17 \times (322,58 - 360,52) = -6,47 \text{ kJ/s (soğuyan akışkan)}$$

$$E_{\text{chiller}} = 2,67 \times (31,58 - 28,94) = 7,06 \text{ kJ/s (soğutan akışkan)}$$

$$\eta_{\text{II,ısı değıştiricisi}} = \frac{(2976,14 - 2976,1)}{(241,41 - 241,3)} = \%36$$



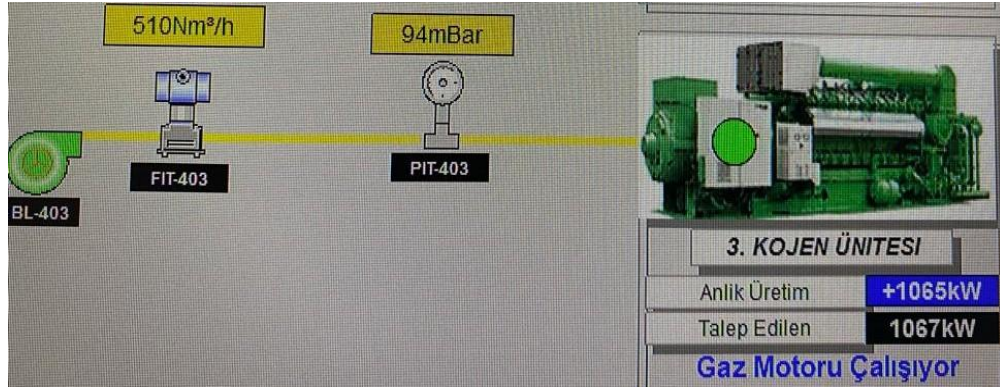
Şekil 6.51. Gaz soğutma eşanjörü giren akım ve çıkan akımlar

Akım No	Gaz Soğutma Eşanjörü	Akışkan Türü	Isı Durumu	Debi (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
1-2	Gaz Soğutma	Biyogaz	Sıcak Akışkan	0,17	360,52	322,18	-6,47		92 %
35-36	Gaz Soğutma	Su+Etilen Glikol	Soğuk Akışkan	2,67	28,94	31,58	7,06		

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
2976,14	2976,10	0,04199	36 %
241,30	241,41	0,11506	

Tablo 6.39. Gaz soğutma eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi

Sonraki aşamada düşük sıcaklık ve basınçtaki biyogaz basınçlandırılarak biyogaz motorlarına iletilir. Blower sonrası gaz basıncı otomasyon üzerinden alınan verilere göre ortalama 94 mbar değerine kadar yükseltilir. İlgili basınç artışı önce kollektör üzerinden manometre değeri gözlemlenmiş sonra ise scada verisinden alınmıştır.



Şekil 6.52. Biyogaz debisi ve blower sonrası basıncı

Biyogazın motora basınçlandırılarak iletilmesini sağlayan pompa görevi gören blower ünitesinin enerji ve ekserji analizi yapılacak olunursa, $510 \text{ nm}^3/\text{h}$ debide $1,265 \text{ kg}/\text{m}^3$ yoğunlukta biyogazın akış debisi;

$$\dot{m}_{\text{biyogaz}} = \frac{510 \text{ nm}^3/\text{h} \times 1,265 \text{ kg}/\text{m}^3}{3600 \text{ s}} = 0,179 \text{ kg/s}$$

Blower ünitesi için denklik yöntemi pompalarda uygulanan yöntemle aynıdır, çünkü blower gazı basınçlandırarak aktarma görevi görür.

$$W_i = \dot{m} \times v \times (P_3 - P_2)$$

$$W_g = \frac{W_i}{h_i}$$

$$h_3 = (h_2 + \frac{W_g}{\dot{m}})$$

$$\eta_{\text{IIpompa}} = \frac{\dot{E}_{X3} - \dot{E}_{X2}}{W_g}$$

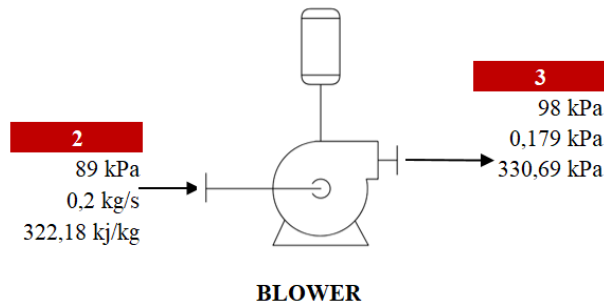
Bu denklemlerde kütleli debi 0,179 kg/s, özgül hacim 0,9248 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 98,4 kPa ve 89,2 kPa, h₂ ve h₃ ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{\text{blower(i)}} = 0,179 \times 0,9248 \times (98,4 - 89,2) = 1,53 \text{ kJ/s}$$

$$W_{\text{blower(g)}} = \frac{1,53}{0,79} = 1,93 \text{ kJ/s}$$

$$h_3 = (322,18 + 1,53/0,179) = 330,69 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{blower(IIyasa)}} = \frac{2978 - 2976}{1,93} = \%79$$



Şekil 6.53. Biyogaz bloweri giren akım ve çıkan akım

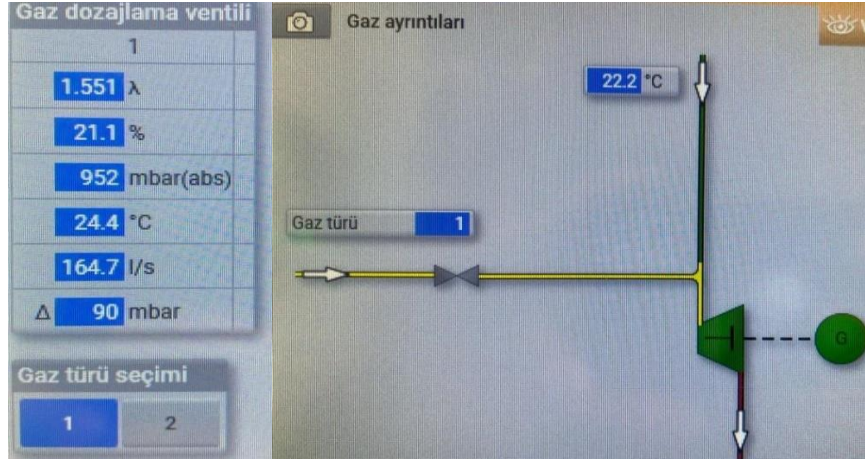
Akım No	Blower	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basıncı (kPa)	Giriş Basıncı (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
2-3	Gaz Bloweri	0,179	0,924846	98,4	89,2	1,93	3,27	79%	75%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
2976	2978	1,53	79%

Tablo 6.40. Biyogaz bloweri birinci ve ikinci yasa verimi

Blowere ait enerji verimi hesabında mekanik güç olarak etiket bilgisindeki güç olan 3,27 kW referans alınmış pompa mekanik verimi ise etiket bilgisinde yazan %79 alınmıştır. Bu şekilde pompa birinci yasa verimi %75 çıkmıştır. Ekserji giriş ve çıkışları ile yıkıma uğrayan ekserji 1,53 kJ/kg.K olup ikinci yasa verimi %79 çıkmıştır. Blowerin kütsel debisi doğrudan verimini etkilemektedir biyogazın içeriğindeki metan ve karbondioksit oranına bağlı olarak yoğunluğu değişeceğinden daha geniş çalışma aralığına sahip olması açısından büyük güçte seçilmiştir.

Daha sonra tecjet ünitesinde biyogaz basıncı atmosfer basıncı değerine indirgenir ve yakıt dozajlaması yapılır. Gaz dozaj ventili ile biyogazın motora girişine ait detaylar Şekil 6.54'te gösterilmiştir. Taze hava dış ortamdan fan yardımıyla biyogaz motoruna yakma işlemi için aktarılır. Bu aynı zamanda motor üzerinde soğutma işlemi için de fayda sağlamaktadır. Yakma havası bilgisi ile gaz dozajlama bilgileri motor üzerinde otomatik algılanarak ayarlanır ve yakma işlemi için pistonlara iletilir. Burada yakma havası sıcaklığının dış ortam sıcaklığına eşit olduğu tespit edilmiştir tek fark motor öncesinde bulunan elyaf ve torba filtreler ile havanın içerisinde bulunan partiküllerin tutularak motora zarar vermesinin sağlanmasıdır.



Şekil 6.54. Yakma havası ve biyogazın sıcaklık ve basınç özellikleri

Biyogaz ve hava gerçek hava/yakıt karışım oranı ayarlanarak turboşarj ünitesine aktarılır. Turboşarj ünitesi egzoz manifoldundan aldığı egzoz gazının enerjisi ile bir mile bağlı türbini çevirerek karşı taraflı kompresör fanını aktif eder ve yakıt hava karışımını basınçlandırarak motorun daha verimli çalışmasını sağlar. Tecjette ortalama 887 mbar değerine getirilen yakıt hava karışımı turboşarj kompresöründe 3020 mbar basınca çıkarılır. Bu basınç artışı sabit hacimde gerçekleştiği için yakıt hava karışımının sıcaklığı da artar. Bu sıcaklık değerini hesaplamak için izantropik çıkış sıcaklığı formülü kullanılmıştır. Bir sistemin izantropik sıkıştırma işleminde sistem adyabatik (ısı geçişi olmayan) kabul edilir ve entropi değişimi yok kabul edilir.

İzantropik çıkış sıcaklığı;

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} [K]$$

Burada T_1 sıcaklığı yakıt hava karışımına ait toplam sıcaklık 22,4 °C basınç ise 88,7 kPa'dır. K sabiti biyogaz ve hava için molekül bileşiklerinin ortalaması alınmış olup $k=1,387$ olarak hesaplanmıştır.

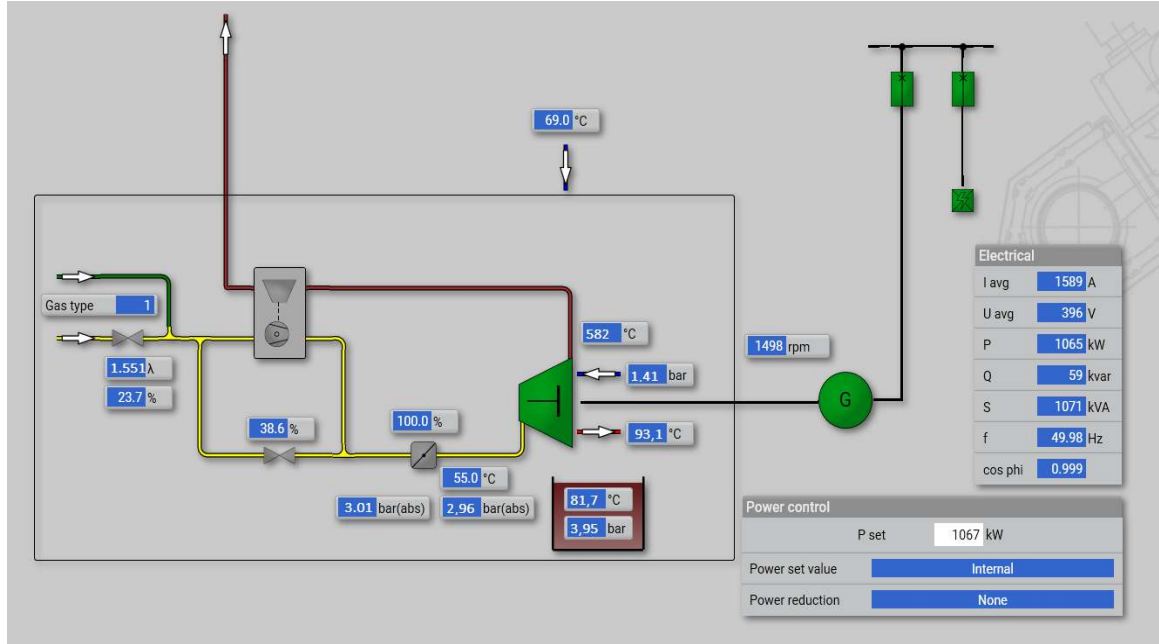
	Kütle (kg/s)	k
Biyogaz	0,177	1,28
Hava	1,525	1,4
Yakıt	1,704	1,387

Tablo 6.41. Biyogaz ve hava karışımı yakıtın 'k' sabitinin tespiti

$$T_2 = 295,4 \times \left(\frac{3020}{88,7} \right)^{(1,387-1)/1,387}$$

$$T_2 = 416 \text{ K}$$

Elde edilen bu sıcaklık değeri kızılötesi termometre ile turbo üzerinden sıcaklık ölçümü alınarak hesaplamalar için kabul görür bir değer olup olmadığı konusunda da teyit edilmiştir. Kızılötesi termometre turbo sıcaklığını Şekil 6.43'te görüleceği üzere 146 °C ölçülmüş hesaplanan 143 °C'nin kabul görür bir sonuç olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



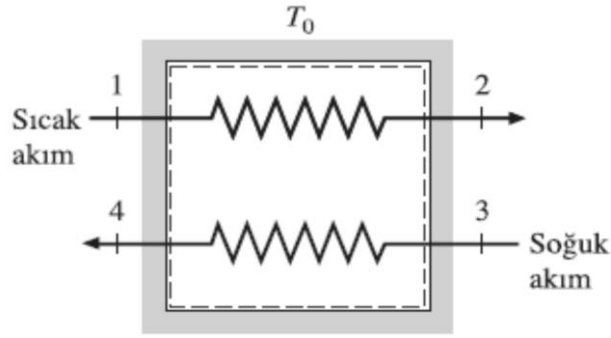
Şekil 6.55. Motor ekran alıntısı

Turboşarj ünitesi sonrası 143 °C sıcaklığa ulaşan yakıt hava karışımı biyogaz motorunda pistonlara ulaştırılmadan önce intercooler soğutma ünitesinde antifrizli su ile soğutulurak 55 °C'e getirilir. Bu aşamada yakıt hava karışımının basıncı da 2960 mbar değerine düşer. Pistonlarda buji ile ateşleme işlemi gerçekleştirilir ve krank miline hareket enerjisi verilerek mekanik güç elde edilir. Motor katalog değeri olan 1095 kW mekanik güç motorun tam kapasite ulaşacağı değerdir. Daha sonra elde edilen mekanik güç motorun krank miline volan yardımıyla bağlı alternatörün rotoruna iletilir. Rotor hareketli iletken olup sabit stator sargısı içerisinde dakikada 1500 devir dönerek sargılarda endüklenme sağlar ve elektrik enerjisi elde edilir. Motor katalog değeri;

MOTOR KATALOG DEĞERLERİ				
		Tam Yük	Parçalı Yük	
Yakıt LHV	kWh/nm ³	4,5	4,5	4,5
		100%	75%	50%
Enerji Girişi	kW	2736	2108	1480
Biyogaz debisi	nm ³ /h	608	468	329
Mekanik güç	kW _{mek}	1095	821	548
Elektrik güç	kW _{el}	1067	798	529

Tablo 6.42. Biyogaz motoru yük dağılımına göre güç üretim değerleri

Motor devresinde ve karşı beslemeli sıcak su devrelerinde kullanılan eşanjörlerin enerji ve ekserji analizi yapılması için eşanjör verim denklemleri kullanılır.



Şekil 6.56. Isı değiştirici akış şeması

Isı değiştiricilerde enerji değeri hesabı ve enerji verimliliği hesabı için denklem (6.30) kullanılmıştır.

$$E_{\text{ısı değiştirici}} = \dot{m}_{\text{sıcak}} (h_2 - h_1) - \dot{m}_{\text{soğuk}} (h_4 - h_3) = 0$$

$$\eta_{\text{I,ısı değiştirici}} = \frac{\text{Enerji çıkışı}}{\text{Giren enerji}} [\%]$$

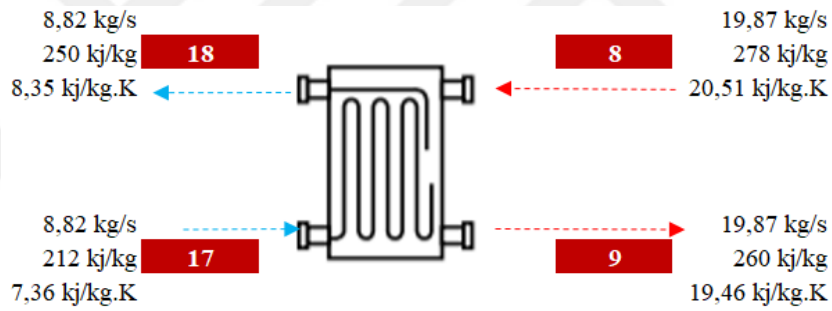
Isı değiştiricilerde ikinci yasa verimi için denklem (6.31) kullanılmıştır.

Ceket suyu eşanjörüne akış diyagramında gösterilen akım numaraları belirlendikten sonra akışkanların giriş ve çıkış entalpileri ve kütleli debileri belirlenir. Ceket suyu eşanjörü için sıcak akım motorun 92,5 °C ceket suyu, soğuk akım devresi ise 74,1 °C’de eşanjöre giren gömlek suyudur. Yapılan analizlerde ceket suyundan 359,7 kW sıcak su enerjisinin 328 kW’lık bölümü gömlek suyuna aktarıldığı görülmüştür. Eşanjörün ikinci yasa verimi %73 olarak bulunmuş geriye kalan kısım yıkıma uğramıştır.

$$E_{\text{ceket}} = 19,87 \times (260-278,1) = -359,7 \text{ kJ/s (ısı veren akışkan)}$$

$$E_{\text{soğutma}} = 8,82 \times (249,2-212) = 328 \text{ kJ/s (ısı alan akışkan)}$$

$$\eta_{\text{II,ısı değıştiricisi}} = \frac{(543,51-509,76)}{(1296,4-1250,28)} = \%73$$



Şekil 6.57. Ceket suyu soğutma eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar

Akım No	Ceket soğutma eşanjörü	Akışkan Türü	Isı Durumu	Debi (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
8-9	Motor Ceket Soğutma	Su	Sıcak Akışkan	19,87	278,10	260,00	359,70	360,00	%91
17-18	Motor Soğutma Suyu	Su	Soğuk Akışkan	8,82	212,00	249,20	328,02	360,00	

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
1296,40	1250,28	46,12	73%
509,76	543,51	33,75	

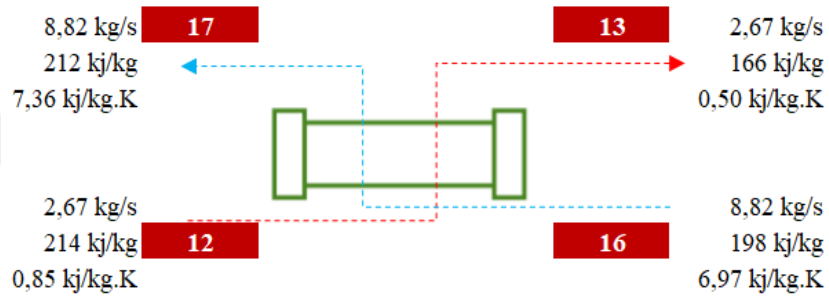
Tablo 6.43. Ceket soğutma eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi

Yağ soğutma eşanjörüne akış diyagramında gösterilen akım numaraları belirlendikten sonra akışkanların giriş ve çıkış entalpileri ve kütleli debileri belirlenir. Yağ soğutma eşanjörü için sıcak akım motordan 100,8 °C çıkan motor yağı, soğuk akım devresi ise 70 °C’de eşanjöre giren gömlek suyudur. Yapılan analizlerde motor yağından 129,5 kW yağın enerjisinin 128,6 kW’lık bölümü gömlek suyuna aktarıldığı görülmüştür. Eşanjörün ekserji verimi %44 olarak bulunmuş geriye kalan kısım yıkıma uğramıştır.

$$E_{\text{yağ}} = 2,67 \times (165,81 - 214,32) = -129,53 \text{ kJ/s (ısı veren akışkan)}$$

$$E_{\text{ısıtma}} = 8,82 \times (212,4 - 197,81) = 128,66 \text{ kJ/s (ısı alan akışkan)}$$

$$\eta_{\text{II,ısı değiştiricisi}} = \frac{(501,75 - 513,37)}{(325,65 - 299,51)} = \%44$$



Şekil 6.58. Yağ soğutma eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar

Akım No	Yağ soğutma eşanjörü	Akışkan Türü	Isı Durumu	Debi (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
12-13	Yağ Eşanjörü yağ soğutma	Mobil Yağ	Sıcak Akışkan	2,67	214,32	165,81	129,53	130,00	%99
16-17	Yağ Eşanjörü Su Isıtma	Su	Soğuk Akışkan	8,82	197,81	212,40	128,66	130,00	

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
325,65	299,51	26,14	44%
501,75	513,37	11,62	

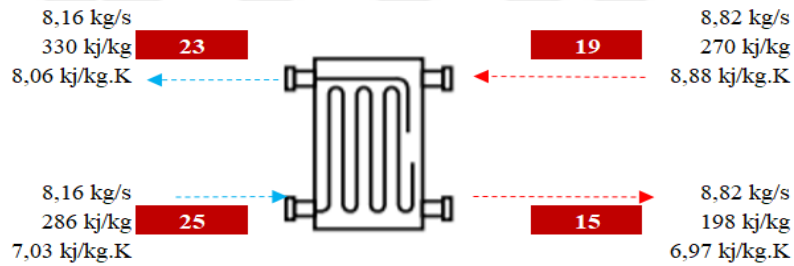
Tablo 6.44. Yağ soğutma eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi

HT devresi eşanjörüne akış diyagramında gösterilen akım numaraları belirlendikten sonra akışkanların giriş ve çıkış entalpileri ve kütleli debileri belirlenir. HT eşanjörü için sıcak akım motordan 90 °C çıkan gömlek suyudur, soğuk akım devresi ise 68,4 °C’de eşanjöre giren sekonder devresi suyudur. Yapılan analizlerde gömlek suyundan 636,6 kW sıcak su enerjisinin 356,4 kW’lık bölümü sekonder devresi suyuna aktarıldığı görülmüştür. Eşanjörün ekserji verimi %74 olarak bulunmuş geriye kalan kısım yıkıma uğramıştır.

$$E_{HTprimer} = 8,82 \times (197,5-269,7) = -636,64 \text{ kJ/s (ısı veren akışkan)}$$

$$E_{HTsekonder} = 8,16 \times (330,15-286,46) = 356,38 \text{ kJ/s (ısı alan akışkan)}$$

$$\eta_{II,ısı \text{ değiştiricisi}} = \frac{(738,54-687,59)}{(562,73-498,94)} = \%74$$



Şekil 6.59. HT eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar

Akım No	HT eşanjörü	Akışkan Türü	Isı Durumu	Debi (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
19-15	HT Eşanjörü Su soğutma- Primer Devre	Su+Etilen Glikol	Sıcak Akışkan	8,82	269,70	197,50	636,64	669,00	%56
25-23	HT Eşanjörü Su Isıtma -Sekonder Devre	Su	Soğuk Akışkan	8,16	286,46	330,15	356,38	669,00	

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
567,59	499,03	68,56	74%
687,59	738,54	50,95	

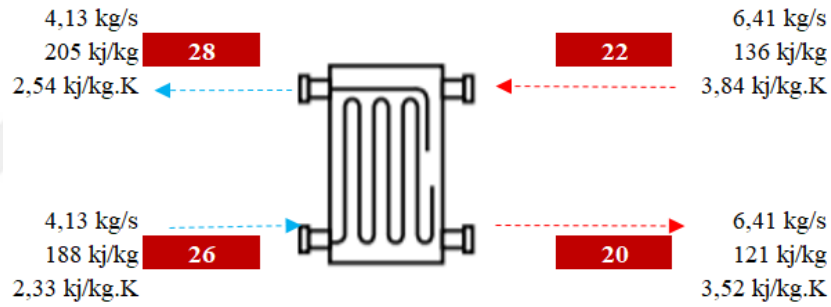
Tablo 6.45. HT eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi

LT devresi eşanjörüne akış diyagramında gösterilen akım numaraları belirlendikten sonra akışkanların giriş ve çıkış entalpileri ve kütleli debileri belirlenir. LT eşanjörü için sıcak akım motordan 52,5 °C çıkan soğutma suyudur, soğuk akım devresi ise 45 °C ‘de eşanjöre giren sekonder suyudur. Yapılan analizlerde LT soğutma suyundan 100 kW sıcak su enerjisinin 69 kW’lık bölümü sekonder devresi suyuna aktarılır. Eşanjörün ekserji verimi %88 olarak bulunmuş geriye kalan kısım yıkıma uğramıştır.

$$E_{LT\text{primer}} = 6,41 \times (120,6 - 136,3) = -100,65 \text{ kJ/s (ısı veren akışkan)}$$

$$E_{LT\text{sekonder}} = 4,13 \times (204,87 - 188,1) = 69,2 \text{ kJ/s (ısı alan akışkan)}$$

$$\eta_{II, ısı \text{ de\u0131\u0131stiricisi}} = \frac{(313,11 - 308,26)}{(337,22 - 331,7)} = \%88$$



Şekil 6.60. LT eşanjörü giren akımlar ve çıkan akımlar

Akım No	LT eşanjörü	Akışkan Türü	Isı Durumu	Debi (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
22-20	LT Eşanjörü Su soğutma- Primer Devre	Su+Etilen Glikol	Sıcak Akışkan	6,41	136,30	120,60	100,65	130,00	%69
28-26	LT Eşanjörü Su Isıtma -Sekonder Devre	Su	Soğuk Akışkan	4,13	188,10	204,87	69,20	130,00	

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
337,22	331,70	5,52	88%
308,26	313,11	4,85	

Tablo 6.46. LT eşanjörü birinci ve ikinci yasa verimi

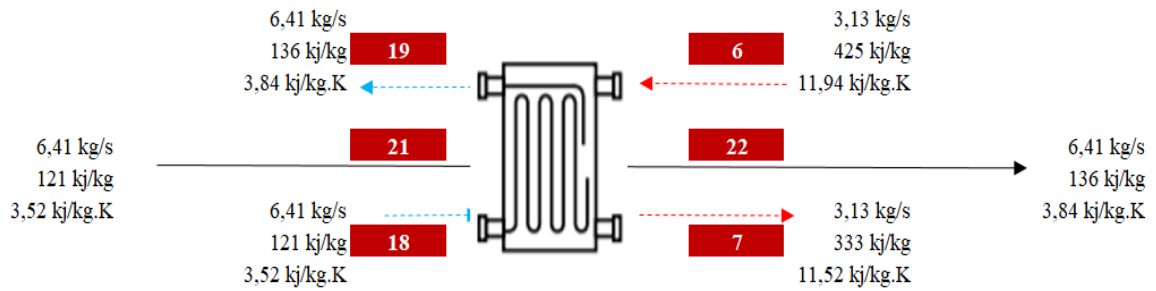
İntercooler devresi akış diyagramında gösterilen akım numaraları belirlendikten sonra akışkanların giriş ve çıkış entalpileri ve kütleli debileri belirlenir. İntercooler 2 kademeli soğutma devresi ile çalışır. Birinci devre gömlek suyu olup intercoolere 83 °C sıcaklıkta girmektedir, ikinci devre ise soğutma suyu olan LT devresi suyudur bu devrede su intercoolere 49 °C’de girer. İki karışımında antifrizli sudur. Turboşarj sonrası 143 °C sıcaklığa ulaşan sıkıştırılmış yakıt hava karışımının yanma öncesi 55 °C’e düşürülmesi için soğutulması gerekir. Yakıt hava karışımının 287,09 kW ısı enerjisi intercooler üzerinden su devresine karışmadan gömlek suyuna 177,24 kW, soğutma suyuna ise 99,91 kW değerlerinde aktararak hem gazı soğutur hem su devresini ısıtır. İntercoolerin ekserji verimi %41 olarak hesaplanmıştır.

$$E_{\text{gaz soğutma}} = 3,13 \times (333,38 - 425,1) = -287,09 \text{ kJ/s (ısı veren akışkan)}$$

$$E_{\text{birinci devre}} = 8,82 \times (269,7 - 249,6) = 177,24 \text{ kJ/s (ısı alan akışkan)}$$

$$E_{\text{ikinci devre}} = 6,41 \times (136,3 - 120,71) = 99,91 \text{ kJ/s (ısı alan akışkan)}$$

$$\eta_{\text{II, ısı değıştiricisi}} = \frac{(562,73 - 543,51) + (336,55 - 331,73)}{(1740,4 - 1722,13)} = \%41$$



Şekil 6.61. İntercooler giren akımlar ve çıkan akımlar

Akım No	İntercooler	Akışkan Türü	Isı Durumu	Debi (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
6-7	İntercooler Gaz Soğutma	Biyogaz	Sıcak Akışkan	3,13	425,1	333,38	287,09	292,00	
18-19	İntercooler HT Sirkülasyon	Su+Etilen Glikol	Soğuk Akışkan	8,82	249,60	269,70	177,24	179,00	%97
21-22	İntercooler LT Sirkülasyon	Su+Etilen Glikol	Soğuk Akışkan	6,41	120,71	136,30	99,91	113,00	

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
1874,01	1854,30	61,69	
547,12	567,59	20,46	41%
332,44	337,22	4,79	

Tablo 6.47. İntercooler birinci ve ikinci yasa verimi

Kojenerasyon sistemine iş yapan pompalara ait enerji ve ekserji analizi yapmak için kullanılacak denklemler;

$$W_i = \dot{m} \times v \times (P_{\text{çıkan}} - P_{\text{giren}})$$

$$W_g = \frac{W_i}{h_i}$$

$$h_{\text{çıkan}} = (h_{\text{giren}} + \frac{W_g}{\dot{m}})$$

$$\eta_{\text{IIpompa}} = \frac{\dot{E}x_{\text{çıkan}} - \dot{E}x_{\text{giren}}}{W_g}$$

Motor gömlek suyu devresinde 70 °C antifrizli suyu hat üzerinde sirkülasyonunu sağlamak için kullanılan pompa santrifüj tip pompa olup PHT olarak adlandırılmıştır. Pompa etiket gücü 4 kW, mekanik güç verimi ise pompa etiketinde yazan %73 değeridir. Pompanın devrede sirküle ettiği suyun debi değeri otomasyon ile hat üzerine bağlı debimetreden

alınan 30,7 m³/h değeridir. Kütlesel debi 8,82 kg/s, özgül hacim 0,000967 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 449 kPa ve 129 kPa, h₁₅ ve h₁₆ ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{PHT(i)} = 8,82 \times 0,000967 \times (449-129) = 2,73 \text{ kJ/s}$$

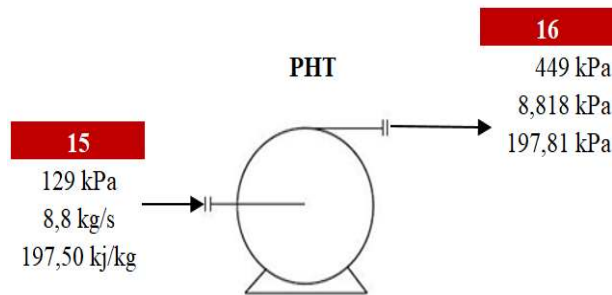
$$W_{PHT(g)} = \frac{2,73}{0,73} = 3,73 \text{ kJ/s}$$

$$h_{16} = (197,5 + 2,73/8,82) = 197,81 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{ÇBP(IIyasa)}} = \frac{502 - 499}{3,73} = \%73$$



Şekil 6.62. HT sirkülasyon pompası öncesi ve sonrası basınç değerleri



Şekil 7.63. HT sirkülasyon pompası giren ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basınç (kPa)	Giriş Basınç (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
15-16	PHT	8,82	0,000967	449,0	129,0	2,73	4,0	73%	94%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
499	502	2,73	73%

Tablo 6.48. HT sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Sonuçlar incelendiğinde pompanın mekanik gücüne göre %94 verimli çalıştığı, ikinci yasa veriminde ise 2,73 kW yıkıma uğrayan ekserji yıkımı ile %73 ikinci yasa verimiyle çalıştığı görülmüştür.

Yağ soğutma devresinde kullanılan pompa santrifüj tip pompa olup PY olarak adlandırılmıştır. Pompa etiket gücü 0,17 kW, mekanik güç verimi ise pompa etiketinde yazan %60 değeridir. Pompanın devrede sirküle ettiği suyun debi değeri katalog bilgileri ile hesaplanmış olup ortalama 2,67 kg/s olarak bulunmuştur.

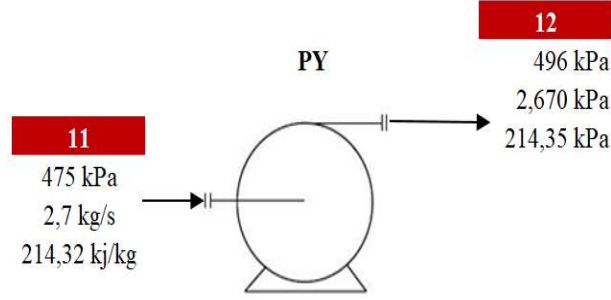
Kütleli debi 2,67 kg/s, özgül hacim 0,001124 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 496 kPa ve 475 kPa, h_{11} ve h_{12} ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{PY(i)} = 2,67 \times 0,001124 \times (496-475) = 0,063 \text{ kJ/s}$$

$$W_{PY(g)} = \frac{0,063}{0,6} = 0,105 \text{ kJ/s}$$

$$h_{12} = (214,32 + 0,06/2,67) = 214,35 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{ÇBP(IIyasa)}} = \frac{325,65 - 325,59}{0,105} = \%60$$



Şekil 6.64. Yağ pompası giren ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basınç (kPa)	Giriş Basınç (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
11-12	PY	2,67	0,001124	496,0	475,0	0,105	0,17	60%	62%

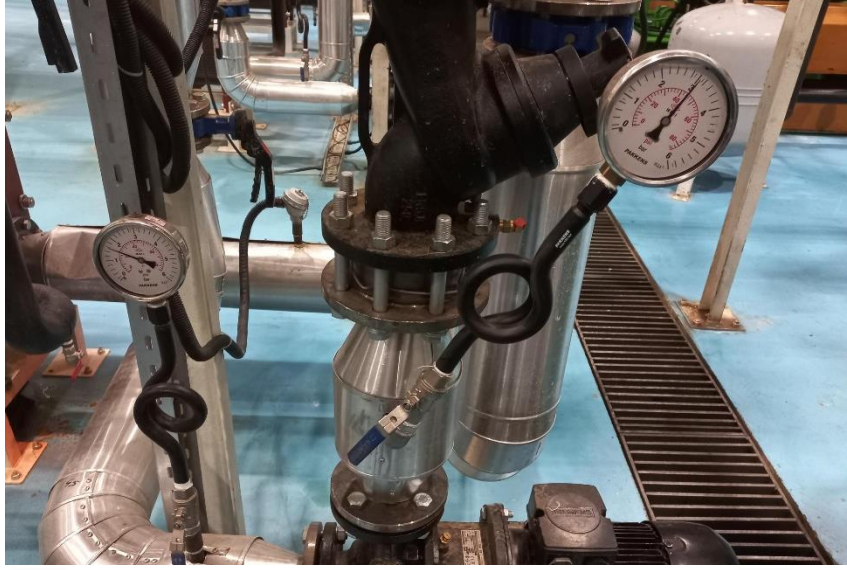
Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
326	326	0,06	60%

Tablo 6.49. Yağ pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Sonuçlar incelendiğinde pompanın mekanik gücüne göre %62 verimli çalıştığı, ikinci yasa veriminde ise 0,063 kW yıkıma uğrayan ekserji yıkımı ile %60 ikinci yasa verimiyle çalıştığı görülmüştür.

Motor sıcak suyu sekonder devresinde 65-85 °C suyu hat üzerinde sirkülasyonunu sağlamak için kullanılan pompa santrifüj tip pompa olup PPHT olarak adlandırılmıştır. Pompa etiket gücü 2,2 kW, mekanik güç verimi ise pompa etiketinde yazan %79 değeridir. Pompanın devrede sirküle ettiği suyun debi değeri otomasyon ile hat üzerine bağlı debimetreden alınan 30 m³/h değeridir.

Kütlesel debi 8,16 kg/s, özgül hacim 0,001028 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 399 kPa ve 239 kPa, h_{23} ve h_{24} ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.



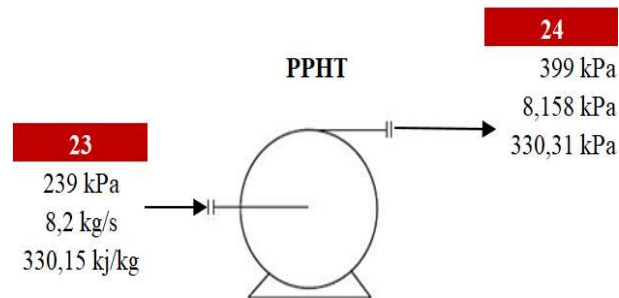
Şekil 6.65. HT sekonder devresi sirkülasyon pompası giriş ve çıkış basınç değerleri

$$W_{PPHT(i)} = 8,16 \times 0,001028 \times (399-239) = 1,34 \text{ kJ/s}$$

$$W_{PPHT(g)} = \frac{1,34}{0,79} = 1,69 \text{ kJ/s}$$

$$h_{24} = (330,15 + 1,34/8,16) = 330,31 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{PPHT(Ilyasa)} = \frac{739,9 - 738,5}{1,69} = \%79$$



Şekil 6.66. HT sekonder devre sirkülasyon pompası giren akım ve çıkan akım

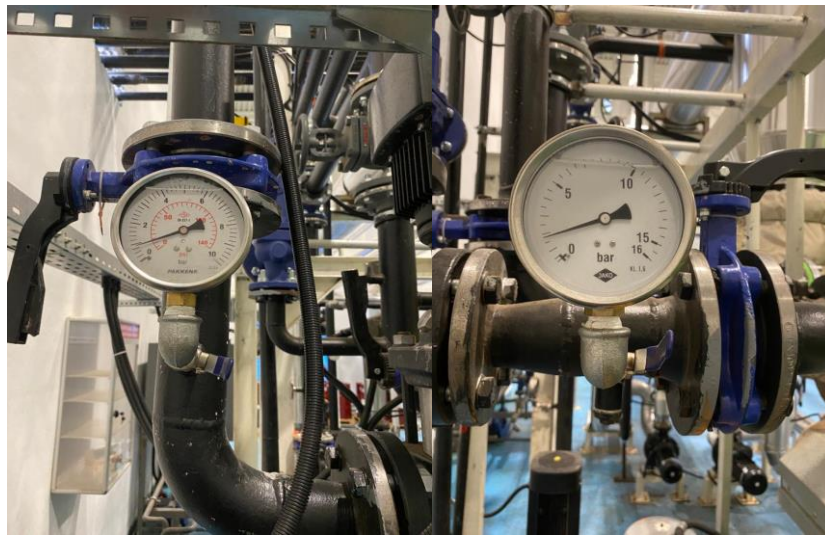
Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basınç (kPa)	Giriş Basınç (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
23-24	PPHT	8,16	0,001028	399,0	239,0	1,69	2,2	79%	97%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
739	740	1,34	79%

Tablo 6.50. HT sekonder devre sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Sonuçlar incelendiğinde pompanın mekanik gücüne göre %97 verimli çalıştığı, ikinci yasa veriminde ise 1,34 kW yıkıma uğrayan ekserji yıkımı ile %79 ikinci yasa verimiyle çalıştığı görülmüştür.

Motor soğutma suyu devresinde 49 °C antifrizli suyu hat üzerinde sirkülasyonunu sağlamak için kullanılan pompa PLT olarak adlandırılmıştır. Pompa etiket gücü 2,2 kW, mekanik güç verimi ise pompa etiketinde yazan %69 değeridir. Pompanın devrede sirküle ettiği suyun debi değeri otomasyon ile hat üzerine bağlı debimetreden alınan 22 m³/h değeridir. Kütleli debi 6,14 kg/s, özgül hacim 0,000953 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 289 kPa ve 169 kPa, h_{20} ve h_{21} ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.



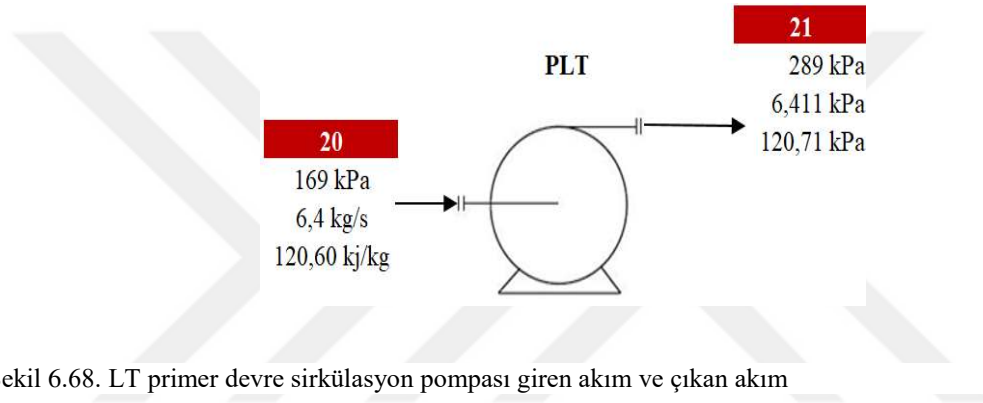
Şekil 6.67. LT sirkülasyon pompası giriş ve çıkış basınç değerleri

$$W_{PLT(i)} = 6,41 \times 0,000953 \times (289 - 169) = 0,73 \text{ kJ/s}$$

$$W_{PLT(g)} = \frac{0,73}{0,69} = 1,05 \text{ kJ/s}$$

$$h_{21} = (120,5 + 0,73 / 6,41) = 120,61 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{PPHT(Ilyasa)} = \frac{332,4 - 331,7}{1,05} = \%79$$



Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m³/kg)	Çıkış Basıncı (kPa)	Giriş Basıncı (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
20-21	PLT	6,41	0,000953	289,0	169,0	1,05	2,2	69%	70%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
331	332	0,73	69%

Tablo 6.51. LT primer devre sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Sonuçlar incelendiğinde pompanın mekanik gücüne göre %70 verimli çalıştığı, ikinci yasa veriminde ise 0,73 kW yıkıma uğrayan ekserji yıkımı ile %79 ikinci yasa verimiyle çalıştığı görülmüştür.

Motor sıcak suyu sekonder devresinde 45-50 °C suyu hat üzerinde sirkülasyonunu sağlamak için kullanılan pompa santrifüj tip pompa olup PPLT olarak adlandırılmıştır. Pompa etiket gücü 1,5 kW, mekanik güç verimi ise pompa etiketinde yazan %76 değeridir. Pompanın devrede sirküle ettiği suyun debi değeri otomasyon ile hat üzerine bağlı debimetreden alınan 15 m³/h değeridir.

Kütleli debi 4,13 kg/s, özgül hacim 0,001012 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 339 kPa ve 169 kPa, h₂₆ ve h₂₇ ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.



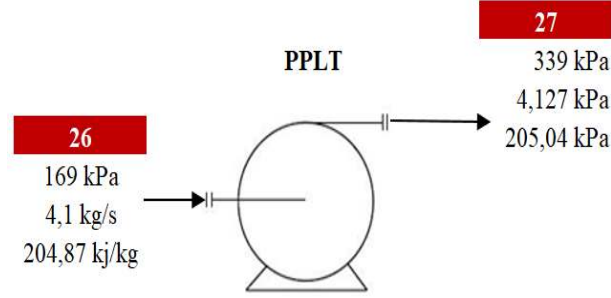
Şekil 6.69. LT sekonder devresi sirkülasyon pompası giriş ve çıkış basınç değerleri

$$W_{PPLT(i)} = 4,13 \times 0,001012 \times (339 - 169) = 0,71 \text{ kJ/s}$$

$$W_{PPLT(g)} = \frac{0,71}{0,76} = 0,93 \text{ kJ/s}$$

$$h_{27} = (204,87 + 0,71 / 4,13) = 205,04 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{PPLT} = \frac{313,9 - 313,1}{0,93} = \%76$$



Şekil 6.70. LT sekonder devre sirkülasyon pompası giren akım ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m³/kg)	Çıkış Basıncı (kPa)	Giriş Basıncı (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
26-27	PPLT	4,13	0,001012	339,0	169,0	0,93	1,5	76%	82%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
313	314	0,70	76%

Tablo 6.52. LT sekonder devre sirkülasyon pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Sonuçlar incelendiğinde pompanın mekanik gücüne göre %82 verimli çalıştığı, ikinci yasa veriminde ise 0,7 kW yıkıma uğrayan ekserji yıkımı ile %76 ikinci yasa verimiyle çalıştığı görülmüştür.

Sekonder devrede elde edilen sıcak su enerjisi anaeroik çürütücü iç ısıtması için kullanılmaktadır. Çürütücülerin içerisinde bulunan serpantin borularından sıcak su dolaştırılarak çürütücüde mezofili çalışma şartı olan 35-42 °C arası sıcaklık sağlanmış olur. Bu sistemde iş yapan pompa PÇD olarak isimlendirilmiştir. Pompa etiket gücü 3 kW, mekanik güç verimi ise pompa etiketinde yazan %61 değeridir. Pompanın devrede sirküle ettiği suyun debi değeri otomasyon ile hat üzerine bağlı debimetreden alınan 12,7 m³/h değeridir, bu değer her çürütücü ısıtma pompası için ayrı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle debi değeri en yüksek çürütücü-1 ısıtma anından alınmıştır. Ayrıca debi değeri hat üzerinde bulunan üç yollu vananın açıklık-kapalılık durumuna göre de değişebilmektedir.

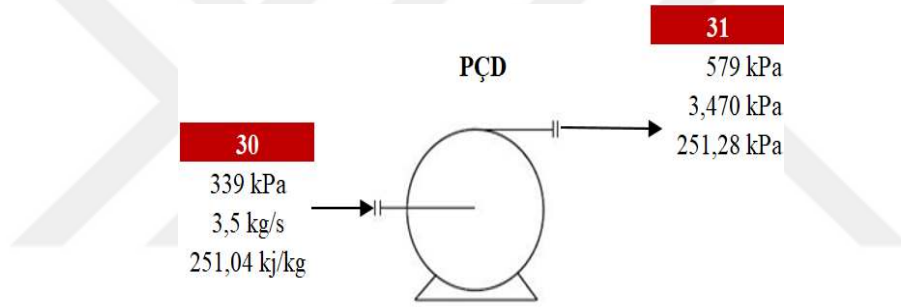
Kütlesel debi 3,47 kg/s, özgül hacim 0,001017 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 579 kPa ve 339 kPa, h_{30} ve h_{31} ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{P\dot{C}D(i)} = 3,47 \times 0,001017 \times (579 - 339) = 0,85 \text{ kJ/s}$$

$$W_{P\dot{C}D(g)} = \frac{0,85}{0,61} = 1,39 \text{ kJ/s}$$

$$h_{31} = (251,04 + 0,85 / 3,47) = 251,28 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{PPHTIIyasa} = \frac{278,7 - 277,9}{1,39} = \%61$$



Şekil 6.71. Çürütücü ısıtma pompası giren akım ve çıkan akım

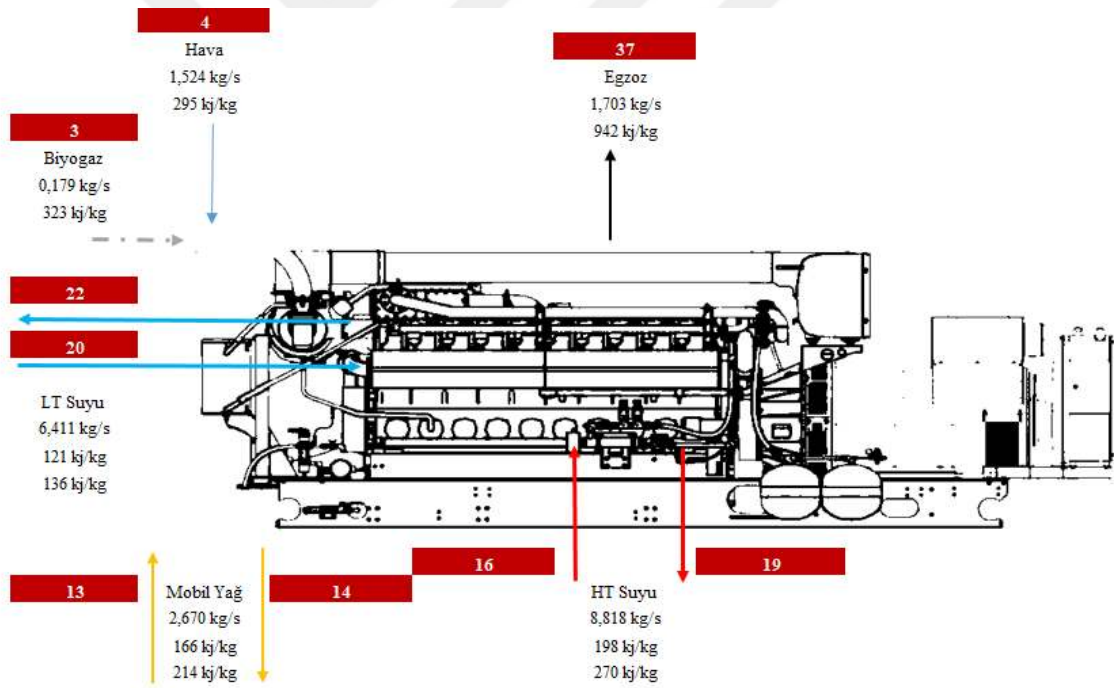
Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basıncı (kPa)	Giriş Basıncı (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Mekanik Verim	Birinci Yasa Verimi
30-31	PÇD	3,47	0,001017	579,0	339,0	1,39	3,0	61%	76%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
278	277	0,85	61%

Tablo 6.53. Çürütücü ısıtma pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Sonuçlar incelendiğinde pompanın mekanik gücüne göre %76 verimli çalıştığı, ikinci yasa veriminde ise 0,85 kW yıkıma uğrayan ekserji yıkımı ile %61 ikinci yasa verimiyle çalıştığı görülmüştür.

Biyogaz motorunun hava yakıt karışımı ve yanma tepkimesi sonrası açığa çıkan enerji motor gömlek suyunu ve soğutma suyu devresini ısıttıktan sonra motor üzerindeki toplam enerji ve ekserji analizi ile termodinamiğin birinci ve ikinci yasa veriminin hesaplanması yapılmıştır. Biyogaz motoru içten yanmalı motor prensibi ile çalışmakta olup, yakıtın yanması emme, sıkıştırma, ateşleme ve egzoz evreleri tamamlandıktan sonra adyabatik alev sıcaklığına ulaşır ve enerji üretimi gerçekleşir. Motorun giriş ve çıkış akımları akış diyagramından tespit edildikten sonra akışkanlara ait entalpi, entropi ve kütleli debi değerleri tespit edildikten sonra hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 6.72. Biyogaz motoru akış diyagramı

Motora giriş akışkanları biyogaz ve hava yakıt olarak, su soğutucu akışkan olarak, yağ pistonlara ve mekanik aksanlara sürtünmeyi önleyici olarak girmektedir. Yakıt içten yanmalı motorun piston bloklarında yanma sonrasında yüksek sıcaklıkta egzoz gazı olarak çıkar, soğutma suyu gerekli soğutma devrelerini dolaştıktan sonra ısınır ve motordan çıkar,

motor yağı da benzer şekilde motor devresinde ısındıktan sonra rezerv yağ tankına gelerek devresini tamamlar. Tüm bu akışkanlar Tablo 6.54'te gösterilmiştir.

BİYOGAZ MOTORU									
Akım No-Giren	Akım No-Çıkan	Akışkanlar	Giriş Kütle	Çıkış kütle	Giriş Entalpi	Çıkış Entalpi	Giren Enerji	Çıkan Enerji	Fark
			(kg/s)	(kg/s)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/s)	(kJ/s)	(kJ/s)
3	-	Biyogaz	0,179	-	322,9	-	57,9	-	57,9
4	-	Hava	1,524	-	295,4	-	450,0	-	450,0
-	35	Egzoz	-	1,703	-	941,6	-	1603,4	-1603,4
13	14	Yağ	2,67	2,67	165,8	214,3	442,7	572,2	-129,5
20	22	L.T Suyu	6,41	6,41	120,6	136,3	773,1	873,8	-100,6
15	19	H.T. Suyu	8,82	8,82	197,5	269,7	1741,5	2378,1	-636,6

Tablo 6.54. Biyogaz motoru akışkan dengesi tablosu

Biyogaz ve hava motora giriş yapan akışkanlardır, yanma tepkimesi sonrası egzoz gazı çıkışı olur. Motor yağı, gömlek suyu ve soğutma suyu devreleri de motora giriş ve çıkış yapan diğer akışkanlardır. Toplamda motora giriş ve çıkış akımları ile termodinamik özellikleri göz önüne alındığında motorun enerji verimi hesabı ;

$$\dot{O} + W_{net} = \sum \dot{m}_c h_c - \sum \dot{m}_g h_g$$

$$\dot{O} + W_{net} = 5427,5 - 3465,2$$

$$\dot{O} + W_{net} = 1962,3 \text{ kJ/s}$$

Motor enerji denkleğinde ısı güçleri;

$$\dot{O}_{HT} = 636,6 \text{ kW}$$

$$\dot{O}_{LT} = 100 \text{ kW}$$

$$\dot{O}_{yağ} = 129,53 \text{ kW}$$

$$\dot{O} + W_{\text{net}} = 1962,3 \text{ kJ/s}$$

$$W_{\text{net}} = 1962,3 - 866,5$$

$$W_{\text{net}} = 1095 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{biyogaz motoru}} = \frac{W_{\text{net}}}{\dot{m}_{\text{biyogaz}} \times \text{LHV}_{\text{biyogaz}}}$$

$$\eta_{\text{kojen}} = \frac{W_{\text{net}} + \dot{O}_{\text{ısı}}}{\dot{m}_{\text{biyogaz}} \times \text{LHV}_{\text{biyogaz}}}$$

Sonuçlara göre biyogaz motoru mekanik gücüne göre verimi %39,2 bulunmuştur. Kojenerasyon sistemi için bakılacak olunursa mekanik gücün yanı sıra motor devresinde bulunan sıcak su ve yağ devrelerinin de ısıll güçleri göz önüne alınır ve kojenerasyon sisteminin verimi %70,2 bulunmuştur.

Biyogaz Motoru Enerji Dengesi		
	Güç	Birinci Yasa Verimi
Motor Şaft Gücü	1095 kWh	39,20%
L. T. Suyu	100,6 kWh	3,6%
H. T. Suyu	636,6 kWh	22,6%
Luboil Enerjisi	129,5 kWh	4,6%
TOPLAM ENERJİ	2794,5 kWh	70,2%

Tablo 6.55. Biyogaz motoru enerji dengesi ve birinci yasa verimi

Motorun ikinci yasa veriminin hesaplanması içinde benzer şekilde giren ve çıkan akımların ekserji denkliği yazılır. Bu verilere göre kojenerasyon sisteminin ekserji dengesi denklem (6.42)'e göre;

$$EX_{\text{ısı}} + W_{\text{net}} = \sum \dot{m}_{\text{ç}} \psi_{\text{ç}} - \sum \dot{m}_{\text{g}} \psi_{\text{g}}$$

$$\eta_{\text{IIyasa}} = 1 - \frac{\dot{EX}_{\text{yıkım}}}{\dot{EX}_{\text{giren}}}$$

Biyogaz Motoru Ekserji Yıkımı					
Akım No Giren	Akım No Çıkan	Akışkanlar	Akışkan Türü	Ekserji Girişi (kW)	Ekserji Çıkışı (kW)
3	-	İdeal Gaz	Biyogaz	2977,6	-
4	-	İdeal Gaz	Hava	3,1	-
-	35	İdeal Gaz	Egzoz	-	776,1
13	14	Yağ	Mobil Yağ	299,5	325,6
20	22	L.T Suyu	Su	331,7	337,2
15	19	H.T. Suyu	Su	499,0	567,6

Tablo 6.56. Biyogaz motoru ekserji giriş ve çıkışları

$$\eta_{IIyasa} = 1 - \sum \frac{2104,5}{4111} = \%48,8$$

Yapılan hesaplamalar ile Kojenerasyon sisteminin toplam ekserji verimi %48,8 olarak bulunmuştur. Giren 4111 kW'lık ekserjinin 2104,5 kW'lık kısmı yıkıma uğramıştır.

Biyogaz Motoru İkinci Yasa Verimi	
	Güç
Ekserji Girişi	4111,0 kW
Ekserji Çıkışı	2006,5 kW
Ekserji Kaybı	2104,5 kW
İkinci Yasa Verimi	48,8%

Tablo 6.57. Biyogaz motoru ikinci yasa verimi

Yakıt ve yanma havasının uygun koşulda yanması ile motordan elde edilen enerji hesapları motor katalog değeri ile kıyaslanmıştır. Motor tam yükte çalıştırılmış, veriler uzun çalışma koşullarında elde edilmiştir. Böylece teknik bilgi kataloğundaki değerler ile gerçek değer arasındaki fark gözlemlenmiştir.

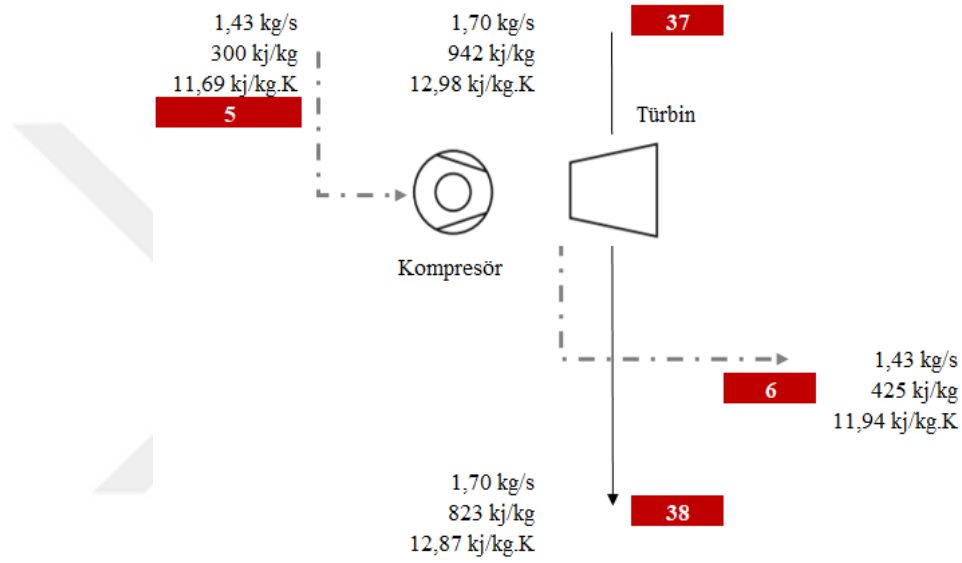
MOTOR KATALOG DEĞERLERİ			HESAPLANAN DEĞERLERİ		
		Tam güç			Tam güç
Biyogaz LHV	kWh/nm ³	5,4	Biyogaz LHV	kWh/nm ³	5,4
Enerji Girişi	kW	2736	Enerji Girişi	kW	2794
Biyogaz debisi	nm ³ /h	505	Biyogaz debisi	nm ³ /h	510
Mekanik güç	kW _{mek}	1095	Mekanik güç	kW _{mek}	1095
Elektrik gücü	kW _{el}	1067	Elektrik gücü	kW _{el}	1068
Kullanılabilir termal ısı gücü (%37 glikol)			Kullanılabilir termal ısı gücü (%50 glikol)		
~ Intercooler 1. devre	kW	179	~ Intercooler 1. devre	kW	175
~ Intercooler 2.devre	kW	113	~ Intercooler 2.devre	kW	100
~ Yağ devresi	kW	130	~ Yağ devresi	kW	125
~ Ceket devresi	kW	360	~ Ceket devresi	kW	328
Total kullanılabilir termal güç	kW	669	Total kullanılabilir termal güç	kW	636
Total çıkış gücü	kW _{total}	1736	Total çıkış gücü	kW _{total}	1704
Spesifik yakıt tüketimi	kWh/kWh	2,50	Spesifik yakıt tüketimi	kWh/kWh	2,55
Elektrik verimi	%	39,0%	Elektrik verimi	%	38,2%
Termal verim	%	24,5%	Termal verim	%	22,8%
Total verim	%	63,5%	Total verim	%	61,0%

Tablo 6.58. Motor katalog değerleri ile ölçülen değerlerin kıyaslanması

Değerler incelendiğinde ilk olarak motora giren toplam enerji farklılığı görülmektedir. Motor üreticisi tarafından motorun enerji verilerinde $\pm 10\%$ farklılık olabileceği belirtilmiş olup gerçekleşen değer 2% daha fazla olduğu görülmektedir. Giren enerjinin fazla olmasının temel sebebinin biyogaz debisi olduğu görülmüştür. $510 \text{ nm}^3/\text{h}$ debide motora iletilen biyogaz yakıt olarak kullanılmıştır. Motorun kullanılabilir ısı gücünde ise katalog değerinden farklı olarak $4,8\%$ düşük güçte olduğu tespit edilmiştir. Bunun temel sebebi devrede kullanılan etilen glikol esaslı antifrizin karışım oranının Bingöl hava koşulları sebebiyle daha fazla olması bunun da kalorifik güç kaybına sebebiyet vermesidir. Hem elektrik hem de termal güce bakıldığında, gerçek ölçümlerin katalog değerinden $2,5\%$ düşük çıktığı görülmüştür. Ayrıca 1095 kW mekanik güç üretmek için motorun harcadığı spesifik yakıt tüketimi katalog değerinden 6% fazla gerçekleşmiştir.

Biyogaz motoru sisteminde motor verimi arttırmak için turboşarj ünitesi bulunur. Turboşarj türbin çarkı, mil ve kompresör çarkından oluşur. Egzoz manifoldundan aldığı egzoz gazı

türbin çarkını harekete geçirerek aynı mile bağlı kompresör çarkını çevirerek hareket enerjisini aktarır ve kompresör ile hava yakıt karışımı basıncı ve sıcaklığının artırılmasını sağlar. Daha yüksek basınçta piston bloklarına iletilen yakıt daha etkin hareket enerjisi üretir. Biyogaz motorunda 586 °C 2940 mbar basınçla çıkan egzoz gazı türbin çarkını harekete geçirir ve elde edilen hareket enerjisi 22,4 °C 887 mbar basınçlı hava yakıt karışımını sıkıştırarak pistonlara iletir. Turboşarj ünitesinin enerji ve ekserji analizi yapılacak olursa;



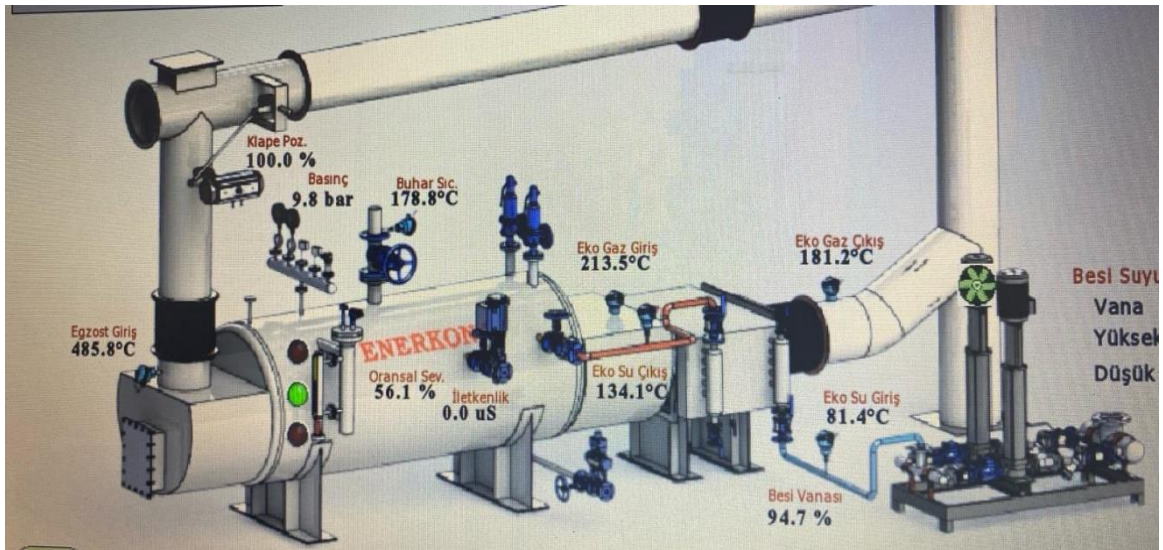
Şekil 6.73. Turboşarj akış diyagramı

Akım No	Turboşarj	Akışkan Türü	Isı Durumu	Kütle (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
5-6	Kompresör	Yakıt	Sıkıştırma	1,43	300,1	425,1	178,6		89%
37-38	Turbin	Egzoz	Basınç	1,70	941,6	823,2	-201,7		

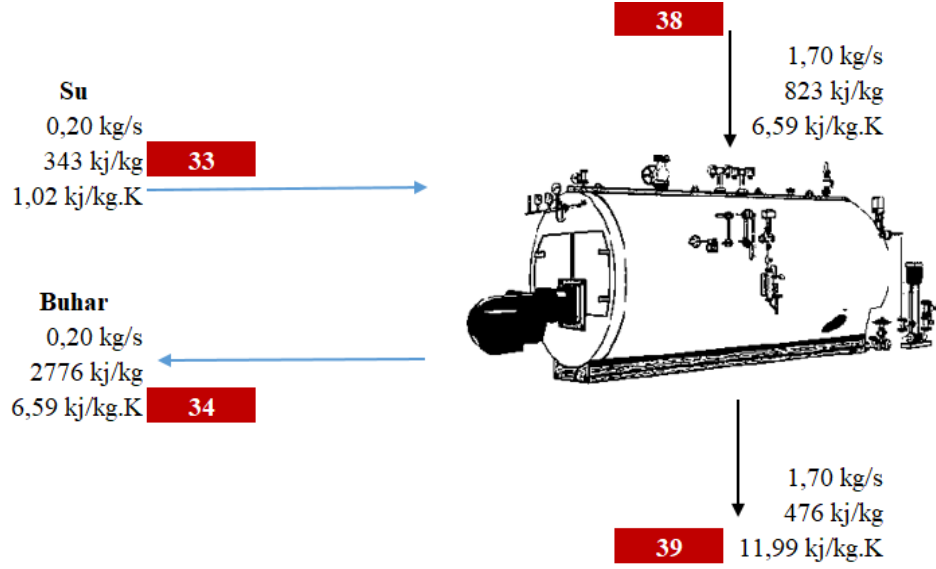
Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
1749	1874	178	99,7%
776	621	155	76,9%

Tablo 6.59. Turboşarj birinci ve ikinci yasa verimi

Motordan 586 °C sıcaklıkta çıkan egzoz gazı turboşarj ünitesinden sonra sıcaklığını bir miktar kaybeder ve 487 °C sıcaklığa düşer. Bu sıcaklık egzoz gazı geri kazanımı için kullanıma uygundur. Endüstriyel tesislerde egzoz gazı geri kazanımı ile çeşitli uygulamalar yapılabilir, bunların en başında buhar enerjisi ve sıcak su üretimi gelmektedir. Bu çalışmada konu olan tesiste egzoz gazı geri kazanımı ile proses buhar enerjisi üretilmektedir. Akış şeması incelendiğinde degazör tankından gelen ortalama 102 °C sıcak su bir hat ile tesisin kazan dairesine iletilir. Bu iletim hattının uzunluğu 809 metre olup havai hattır. Her ne kadar izoleli boru ile su taşınımı gerçekleşse de kazan dairesine ulaşınca kadar bir miktar ısı kaybı olur. Kazan besisi suyu tankına alınan su daha sonra pompa emiş kollektörüne geçer ve buradan oransal kontrol sağlayan besisi suyu vana pozisyonunun ayarlanması ile ekonomizere iletilir. Bu ekonomizerin görevi besisi suyunu ısıtarak kazana iletmek ve kazan verimliliğini arttırmaktır. Ekonomizer girişindeki baca gazından aldığı ısı enerjisi ile besisi suyunu daha yüksek sıcaklıklara ulaştırarak kazana iletilir. Bu sayede ısıtılmış su kazana girer ve duman borularından geçen egzoz gazı ısıtılmış suyu doymuş buhara çevirir. İşletme tasarım parametresine ve gerçek verilere bakılınca 10 bar 180 °C buhar üretilmesi hedeflenmiş ve biyogaz motorunun çalışmasına paralel şekilde saatte ortalama 700-750 kg/h değişkenlik gösteren buhar enerjisi üretilmektedir. Atık ısı kazanına ait tesis ekran görüntüsü Şekil 6.74'te gösterilmiştir. Kullanılan atık ısı kazanı 499 kW termal güce sahiptir. Atık ısı kazanı enerji ve ekserji denkliği hesaplanacak olunursa;



Şekil 6.74. Atık ısı kazanı otomasyon verileri



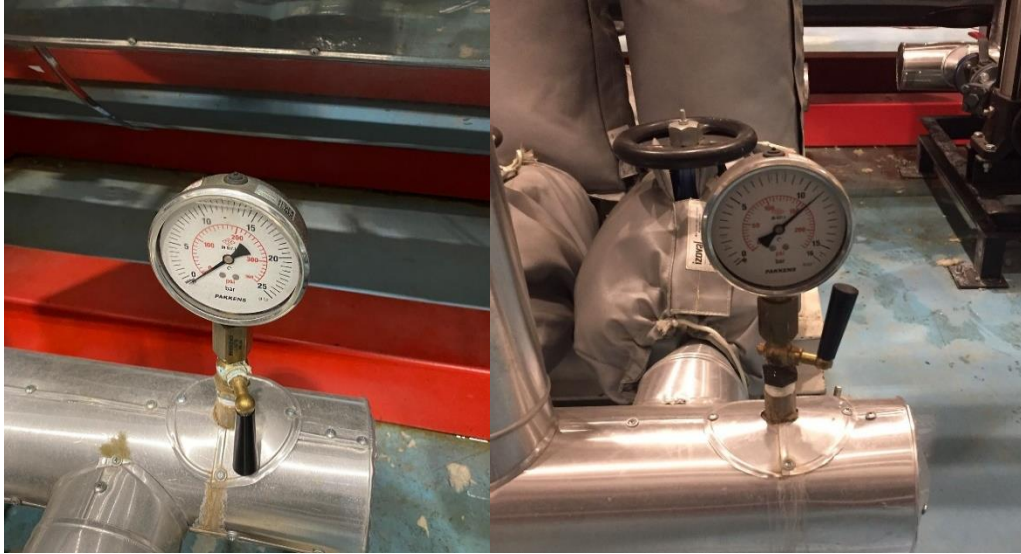
Şekil 6.75. Atık ısı kazanı akış diyagramı

Akım No	Atık ısı kazanı	Akışkan Türü	Isı Durumu	Kütle (kg/s)	Giriş Entalpi (kJ/kg)	Çıkış Entalpi (kJ/kg)	Enerji (kJ/s)	Etiket Isıl Gücü	Birinci Yasa Verimi
38-39	Egzoz	Egzoz	Sıcak Akım	1,70	823,2	476,1	-590,9	-	83%
33-34	Su/Buhar	Su Buharı	Soğuk Akım	0,20	342,9	2776,1	490,0	499	

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
620,9	267,7	353,2	44%
18,9	174,4	155,5	

Tablo 6.60. Atık ısı kazanı birinci ve ikinci yasa verimi

Atık ısı kazanını besleyen pompanın enerji ve ekserji analizi yapılacak olunursa; kazan giriş suyunun kayıplar ihmal edilerek giriş kütlelerinin 750 m³/h olduğu, giriş basıncının vakumda olup 0 bar ve pompa sonrası basıncın ise 11 bar olduğu bilgileri ile pompaya ait analiz yapılmıştır.



Şekil 6.76. Atık ısı kazanı besleme suyu pompa öncesi ve sonrası basınçlar

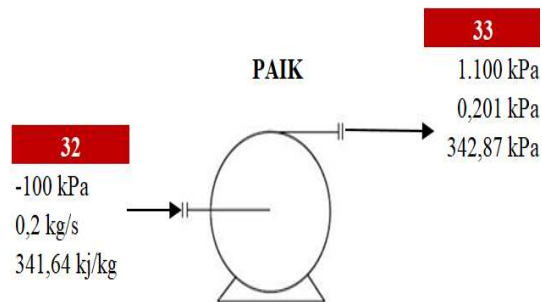
Kütleli debi 0,2 kg/s, özgül hacim 0,001029 m³/kg, çıkış ve giriş basınçları 0 kPa ve 1100 kPa, h_{32} ve h_{33} ise giriş ve çıkış entalpi değerleridir.

$$W_{AIK(i)} = 0,2 \times 0,001029 \times (1100 - 0) = 0,22 \text{ kJ/s}$$

$$W_{AIK(g)} = \frac{0,22}{0,48} = 0,46 \text{ kJ/s}$$

$$h_{33} = (341,6 + 0,22/0,2) = 342,7 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{CBPIIyasa} = \frac{18,9 - 18,6}{0,46} = \%56$$



Şekil 6.77. Atık ısı kazanı besleme suyu pompası giren akım ve çıkan akım

Akım No	Pompa	Kütle (kg/s)	Özgül Hacim (m ³ /kg)	Çıkış Basıncı (kPa)	Giriş Basıncı (kPa)	Güç (kJ/s)	Etiket Gücü (kJ/s)	Hidrolik Verim	Birinci Yasa Verimi
32-33	PAIK	0,20	0,001029	1100,0	0	0,46	1,5	48%	64%

Giren Ekserji	Çıkan Ekserji	Ekserji Yıkımı	İkinci Yasa Verimi
18,6	18,9	0,26	56%

Tablo 6.61. Atık ısı kazanı besleme suyu pompası birinci ve ikinci yasa verimi

Sonuçlar incelendiğinde pompanın mekanik gücüne göre %64 verimli çalıştığı, ikinci yasa veriminde ise 0,26 kW yıkıma uğrayan ekserji yıkımı ile %56 ikinci yasa verimiyle çalıştığı görülmüştür.

Atık ısı kazanı için ise, 590,9 kW enerji gücüne sahip egzoz gazı enerjisinin 490,2 kW'lık kısmı buhar üretimi için kullanılmış ve egzoz gazı çevrim verimi %83 olarak bulunmuştur. Kazanın etiket bilgisinde belirtilen 499 kW ısı geri kazanım gücü verisine karşılık, kazana giren sıcak sudan 725 kg buhar üretilmiş ve kazan 490,2 kW termal güç üreterek %97 oranında etiket değerine yakın güç üretmiştir. Ayrıca kojenerasyon ünitesi olarakta bakıldığı zaman, elektrik verimi %38,2 ve termal verimi %22,8 olan biyogaz motorunun toplam verimi %61 iken, egzoz gazı geri kazanımı ile buhar enerjisi üreterek %17,5 oranında toplam kojenerasyon verimine katkı sağlayarak verimi %78,5 oranlarına çıkarmıştır. Bu sayede motor katalog verilerine göre elde edilebilecek en fazla verime kıyası da yapılmış, katalog verisindeki enerji girişi ve enerji çıkışının oranına bakıldığında bu sistemin %84,1 verime ulaşabileceği tespit edilmiş, mevcut sistemin ise en fazla verime göre %6,6 kayıpla çalıştığı görülmüştür.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında gerçek zamanlı veriler ile biyogaz tesisinin enerji ve ekserji analizleri ile termodinamiğin birinci ve ikinci yasa verimleri hesaplanmıştır. Tesisin sıcaklık, basınç ve debi değerleri proses enstrümanlarından alınarak doğruluklarının da teyidi ile hesaplamalarda kullanılmıştır. Tesis dört bölümde incelenmiştir.

Atık hammadde kabul biriminde iş yapan ekipman çürütücü besleme pompalarıdır. Pompalar katalog verilerine göre gübre katı maddesinin %0-13 arası olduğu durumlarda verimli çalışabilecek özellikte seçilmiştir, atık hammaddesi olan süt sığırı gübresinin katı madde oranının %8,17 olması ile bu katı madde aralığında olduğu görülmüştür. Enerji verimi pompa gücüne göre %72 çıkmıştır ancak bu verimin pompa öncesinde bulunan hat tipi parçalayıcının pompa emiş hattındaki basınca etki etmesinden kaynaklı pompa verimine de doğrudan etki ettiği görülmüştür. Pompanın ekserji verimi ise izotropik verimine eşit %73 çıkmıştır. Bu değer pompalar için ekserji yıkımının pompa gerçek gücüne eşit çıkması beklendiğinden uygun değerdir.

Anerobik çürütme sisteminde anaerobik çürütücülerin her biri için enerji dengesi hesaplanmıştır. Çürütücülerde çalışan karıştırıcıların çalışma güçleri, çürütücülere verilen hava miktarları, besleme ve aktarma pompa güçleri, atık hammaddesinin giriş sıcaklığı ile tüm çürütücülere ait sıcaklık ve basınç veriler toplanarak kurulan enerji dengesinde çürütücü-1 için %95,2 , çürütücü-2 için %97,9, çürütücü-3 için %97,5 ve post çürütücü için 90,4 enerji verimi sonuçları elde edilmiştir. Bu değerler kimyasal reaksiyonlar göz ardı edilerek akışkanların termodinamik özellikleri ile elde edilmiş sonuçtur. Sonuca etki eden en büyük etken atık hammaddesinin 39-40 °C mezofili şartlara ısıtılması için gerekli termal enerjinin sıcak su ile karşılanmasıdır. Çürütücülerin ısıtması motor gömlek suyu devresinin ısıttığı sekonder HT devresi ile sağlanmakta, otomasyon sistemi ile anaerobik bakterilerin zarar görmeyeceği 60 °C set değeri şartı ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle ısıtma sistemi doğru şekilde çalışmakta olup atık hammaddesinin ısıtılması için gerekli ısı gücünü sağladığı görülmüştür. Karıştırıcıların güçleri ise her çürütücü için farklılık gösterdiğinden

enerji dengesine doğrudan etki göstermektedir. Hava enerjisi ve pompa enerjileri çok düşük olduğundan ihmal edilebilir düzeyde kabul edilebilir. Post çürütücüde enerji dengesi sonucu verimin düşük çıkmasının en büyük kaynağı bu çürütücünün biyogaz üretme görevi olmaması sadece diğer çürütücülerin atıklarının gazlarının toplanarak son çürütümeye tabii tutulmasının sağlanmasıdır, ayrıca taze atık beslemesi olmayıp diğer çürütücülerden sıcak fermente olmuş atık aktarıldığı için ısıtılması için fazla enerjiye de ihtiyaç olmadığı görülmüştür. Çürütücüleri ısıtmak için 12.063 kWh/gün ısıl güce ihtiyaç varken, HT devresinde bir motorda 15.264 kWh/gün ısıl güç üretimi olduğu, sistemde fazla ısının dışarı atıldığı görülmüştür. Ancak kış aylarında atık hammaddesinin düşük sıcaklıkta çürütücü tankına girmesi ile ısıtmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç olacağından bu enerji yılın kış aylarında kullanımı karşılamaya anca yeteceği öngörülmektedir.

Susuzlaştırma biriminde enerji ve ekserji analizi yapılmış, sistemde iş yapan seperatör besleme pompası ve seperatör sonrası sıvı fermente gübre transferi yapan pompaların enerji verimleri katalog bilgilerine göre sırasıyla %70 ve %74 olduğu görülmüştür. Bu pompaların seçim kriterlerine göre katı madde aralığı % 0-9 olan malzemenin pompalamasına uygun olduğu, yapılan analizlerde post çürütücü atığının %5,92, seperatör sonrası sıvı fermentenin de %5,16 katı madde değerlerine sahip olması ile pompa için uygun katı madde aralığında olduğu görülmüştür. Pompalara ait ekserji verimleri ise pompanın izantropik verimine eşit değerde %73 olduğu görülmüştür. Bu değer pompaların ekserji yıkımlarının pompanın harcadığı güce eşit olması beklendiğinden uygun değerdir. Seçilen pompalar tesisin ilerde büyüyebileceği düşünülerek büyük güçte seçilmiştir.

Kojenerasyon sistemindeki tüm ekipmanların enerji ve ekserji analizi yapılmıştır.

- İlk olarak sistemde akış yönüne göre biyogaz blowerinin analizi yapılmış, enerji veriminin %75, ekserji veriminin ise %79 olduğu görülmüştür. Enerji verim değerinin blowerin biyogazı sıkıştırma oranı ile doğru orantılı olduğu, ekserji veriminin ise izantropik verimi ile sabit olup değişken olmadığı görülmüştür. Blower için önemli nokta transferini sağladığı gazın kütleli debisidir. Bu debi değeri biyogazın içerisindeki metan ve karbondioksit oranı ile değişkenlik gösterir, daha düşük metan oranında karbondioksitin mol kütleli fazla olmasından dolayı daha fazla hacimde biyogazın ağırlığını, bununla birlikte kütleli debisini de arttıracığından seçimi yapılan blowerin de buna karşılık verebilecek güçte olması

gerekmektedir. Yapılan analizde %55 CH₄, %43 CO₂ oranında %75 verimle çalışan blowerin daha düşük metan oranında da sisteme uygun olarak çalışabileceği öngörülmüştür.

- Turboşaj ünitesinin enerji ve ekserji analizi yapıldığında egzoz manifoldundan çıkan egzoz gazının hareket enerjisi sağladığı türbinin 201,7 kW enerji üreterek mili hareket ettirdiği, biyogaz hava karışımı yakıtın mile bağlı kompresöre 178,6 kW enerji aktararak %89 verimle çalıştığı görülmüştür. Ekserji analizi ile türbinin %76,9, kompresörün %99,7 ikinci yasa verimiyle çalıştığı, kompresörün yapabildiği maksimum işi yaptığı sonucuna ulaşılmıştır. Türbin için ise ekserji yıkımının artmasının egzoz gazının kütleli debisi ile doğru orantılı olarak artabileceği sonucu elde edilmiştir.
- İntercooler gaz soğutma eşanjörü turbo sonrası ısınmış yakıtın soğutulması için iki kademeli soğutma suyu devresi ile soğutulmasını sağlar. Yapılan enerji ve ekserji analizlerinde biyogazın soğutulması için eşanjörün %97 verimle biyogazı soğuttuğu, soğutma işinde ısı transferinin büyük miktarda HT sirkülasyon devresi ile yapıldığı gözlemlenmiştir. Eşanjörün ekserji verimi ise %41 çıkmıştır. Eşanjörün ikinci yasa veriminde artış sağlamanın tek yolunun LT ve HT sirkülasyon devresi sıcaklıklarının artması veya debi artışı ile mümkündür ancak bu proses açısından değiştirilmesi çokta mümkün olmayan durumdur.
- Yağ eşanjörü ise motor üzerinde pistonlardan ve yataklardan ortalama 100 °C sıcaklıkta dolaşımı tamamlayan yağın soğutulması için HT devresi üzerindeki suyu kullanmaktadır. Motorun ilk giriş anında 70 °C giren su yağ eşanjörü üzerinden motor yağın soğutarak 74,1 °C'e ısınır. Bu ısı aktarımı sırasında 129 kW yağ ısı enerjisinin 128 kW kadar kısmı HT devresine iletilir. Bu dönüşüm birinci yasa veriminin %99 verimle, ikinci yasa veriminin ise %44 verimle gerçekleştiğini gösterir.
- Ceket suyu soğutma devresine ait eşanjör incelendiğinde, motor ceket devresinde 92,5 °C sıcaklıktaki suyun soğutulması için HT devresi kullanılır. HT devresi yağ eşanjörü çıkışında ceket soğutma eşanjörüne girer ve burada ikinci kez ısınır. Bu eşanjör üzerinde ceket devresi 359,7 kW ısıyı HT devresindeki suyu ısıtmak için kullanır ve 87,5 °C sıcaklığa soğuyarak motora geri döner. HT devresi suyu buradan 328 kW ısı gücü kazanır. Bu dönüşüm eşanjörün %91 birinci yasa verimi ile ısıyı

ilettiğini, %73 ikinci yasa verimiyle de faydalı enerjinin kullanılabilirliğini göstermiştir.

- Kojenerasyon sistemine ait diğer HT devresi eşanjörü incelenmiş, birinci yasa verimi %56, ikinci yasa verimi ise %74 olarak bulunmuştur. Motor primer devresinde 70 °C giren sıcak su motor üzerinde dolaşımını tamamladıktan sonra 90,1 °C motordan ayrılarak 636,6 kW gücünde termal enerji üretir. Karşı beslemeli devrede ise 68,4 °C giren su 78,7 °C sıcaklığa ısınarak 356,3 kW termal enerji kazanır. Bu dönüşüm ile sıcaklığın %56 oranında karşı beslemeli sekonder devresine aktarıldığı görülmüştür. Ancak bu değerin daha fazla artması sağlanabilir, bunun için sekonder devrede daha fazla debide su dolaştırılması ve çürütücü tanklarının ihtiyacı dışında ısıtma kaynakları bulunması ile bunun mümkün olduğu tespit edilmiştir. İşletme içerisinde sıcak su ihtiyacı noktalar irdelenerek bu devre üzerinden ek olarak 277 kW kadar ısı enerjisi kullanım için alınabilir.
- Kojenerasyon sistemine ait sirkülasyon sağlayan tüm pompaların enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre en verimli çalışan pompa HT primer ve sekonder devre sirkülasyon pompalarıdır. En düşük verim ile çalışan pompa ise yağ devresi pompasıdır. Ortalama 10,8 m³/h debide motor yağını devrede sirküle eder, bu pompanın düşük verimde çalışmasının nedeni giriş ve çıkışında basınç farkının 0,2 bar kadar düşük basınçlarda olmasıdır. Pompa gücü 0,17 kW olup düşük aktarma gücüne sahip özellikte olduğundan akış sağladığı yağ debisindeki en ufak artış veriminde ciddi artmaları sağlayabilir. Tüm pompaların ikinci yasa verimleri izantropik verimlerine eşit çıkmıştır. Bu pompalar için genel olarak eşit çıkması istenen bir değerdir.
- Kojenerasyon sisteminin en önemli ekipmanı olan biyogaz motoru ise giriş akışkanları olarak biyogaz, hava , sıcak su ve mobil yağ iken, çıkan akışkanlar egzoz gazı, sıcak su ve mobil yağdır. Tüm bu akışkanların gerçek zamanlı termodinamik özellikleri ile yapılan hesaplamalarda motorun shaft gücünün 1095 kW, HT devresi suyunun 636,6 kW, LT devresi suyunun 100,6 kW, mobil yağ devresinin de 129,5 kW enerji değerine sahip olduğu hesaplanmıştır. Katalog değerleri ile kıyaslandığında shaft gücünün katalog değerine eşit, HT devresinin %5 kayıpla gerçekleştiği, LT devresinin %23 kayıpla gerçekleştiği, yağ devresinin ise %100 verimle gerçekleştiği sonucu elde edilmiştir. HT devresindeki %5 kayıp

değerinin motor katalogunda antifrizli su içeriğinin %37 glikol olması iken, tesiste Bingöl ilinin soğuk iklim şartları göz önüne alınarak antifriz içeriğinin %50 glikollü olması ile termal güç kaybına sebep olduğu tespit edilmiştir. LT devresinde ise karşı beslemeli herhangi bir sekonder devrede bu suyun kullanılmaması kaynaklı motorun kendi içerisinde suyu acil soğutma fanları ile soğutmaya çalışması kaynaklı ve katalog değerinde 25 m³/h debi gösterilirken işletme verilerinde bu değer 22 m³/h debi olması sonucuna varılmıştır. Kojenerasyon sisteminin katalog verileri ile kıyaslanması ile gerçek verilerin uyuma oranı %96,1 olarak tespit edilmiştir. Kojenerasyon sistemi ikinci yasa veriminin ise motora giren ve çıkan akım noktalarının termodinamik özelliklerine göre fiziksel ve kimyasal ekserjileri göz önüne alınarak giren 4111 kW ekserjinin 2104,5 kW'lık kısmının yıkıma uğradığı bunun sonucunda %48,8 oranında ikinci yasa verimi ile çalıştığı görülmüştür. Sistemin ekserji verimini artırmanın yolu daha yüksek metan içerikli biyogazı yakıt olarak kullanmaktır.

- Biyogaz motorunun egzoz ısısı geri kazanımı ile buhar ürettiği atık ısı kazanı için enerji ve ekserji analizi yapıldığında, motorun egzozunda elde edilen 591 kW güce sahip atık ısıнын degazör tankından 102 °C gelmesi beklenen ancak hat kayıpları ile 81,4 °C'e kadar düşen besleme suyunun önce ekonomizerde ısınması daha sonra kazanda buhara dönüştürülmesi ile 178,8 °C doymuş buhar elde edilmiş, buhar çevriminde 490,2 kW ısı enerjisi elde edilerek egzoz gazının enerjisinin %83'ünün kullanıldığı görülmüştür. Ancak daha yüksek basınçta buhar elde edilmesi halinde daha verimli çalışacağı tespit edilmiştir, çünkü basınç artışı ile buhar sıcaklığı artmakta bu da entalpi yani buharın iç enerjisinin artışına neden olacaktır. Mevcut proseste buharın Süt fabrikasında kullanılmasından kaynaklı basınca müdahale edilememektedir. Kazana ait ikinci yasa verimi ise %44 çıkmıştır ve bu değer doğrudan değişmesine etki edecek en büyük faktör suyun giriş ve çıkış sıcaklığıdır. Degazör sonrası besi suyu tankında suyun ısı kaybı yaşamaması adına izolasyon yapılması önerilmiştir.

Yapılan analizlerle biyogaz tesisinin ne kadar verimli çalıştığı, atık hammaddesinden elde edilen biyogazın yakıt olarak kullanılması ile elde edilen enerji dönüşümleri, bu işlemlerin geçmesi süresince tesiste bulunan tüm ekipmanların birinci ve ikinci yasa analizleri hesaplanmıştır. Yapılan analizler bir tablo halinde Tablo 7.1'de gösterilmiştir.

Biyogaz Tesisi Enerji ve Ekserji Analizi	Akımlar	Ö kW	W kW	ηbirinci yasa %	ηikinci yasa %
Atık Hammadde Kabul Birimi					
Çürütücü besleme pompası	1-2	-	2,45	67	73
Anaerobik Çürütme Birimi					
Çürütücü-1	3-5/6-16-23	-12	-	95,2	-
Çürütücü-2	4-7/7-18-24	-30	-	97,9	-
Çürütücü-3	5-19/8-20-25	-26	-	97,5	-
Post çürütücü	9-21/10-22-26	151	-	90,4	-
Aktarma pompası	8-9	-	1,1	30	73
Susuzlaştırma Birimi					
Seperatör besleme pompası	10-11	-	2,57	70	74
Sıvı fermente transfer pompası	13-14	-	2,77	76	74
Kojenerasyon Birimi					
Gaz soğutma eşanjörü	1-2	-6,47	-	92	36
	35-36	7,06	-		
Blower	2-3	-	1,93	75	79
Ceket suyu soğutma eşanjörü	8-9	-359,7	-	91	73
	17-18	328,02	-		
Yağ soğutma eşanjörü	12-13	-129,5	-	99	44
	16-17	128,66	-		
HT devresi eşanjörü	19-15	-636,6	-	56	74
	25-23	356,38	-		
LT devresi eşanjörü	22-20	-100,7	-	69	88
	28-26	69,2	-		
İntercooler	6-7	-287,1	-	97	41
	18-19	177,24	-		
	21-22	99,91	-		
HT primer devre pompası	15-16	-	2,73	94	73
HT sekonder devre pompası	23-24	-	1,69	97	79
Yağ pompası	11-12	-	0,105	62	60
LT primer devre pompası	20-21	-	1,05	70	69
LT sekonder devre pompası	23-24	-	0,71	82	76
Çürütücü ısıtma pompası	30-31	-	0,86	76	61
Atık ısı kazanı besleme pompası	32-33	-	0,12	64	56
Biyogaz Motoru	3-4-13-20-15/35-14-22-19	867	1095	70,2	48,8
Turboşarj-Kompresörü	5-6	-	178,6	89	99,7
Turboşarj-Türbini	35-36	-	201,7		76,94
Atık ısı kazanı	33-34/38-39	490,2	-	83	44

Tablo 7.1. Biyogaz tesisine ait ekipmanların ve ünitelerin termodinamik birinci ve ikinci yasa verimleri

KAYNAKLAR

Akbulut, A. (2012). Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Çiçekdağı case study. *Energy*, 44(1), 381-390.

Anonymous, (2010). Biyogaz Kılavuzu Üretimden Kullanıma. Fachagentur Nachwachsende. s. 23-24.

Arısoy, A., Güven, A., Doğuş, A., Rüşen, A., Kılış, B., Buyruk, B. H., ... ve Seçkiner, Y. A. (2023). Enerji Verimliliği Eğitim Kitabı. Y.No:49/V01. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, Ankara, s. 182-183.

Barati, M. R., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., Tabatabaei, M., Sharifi, M., Javadirad, G., ... and Soufiyan, M. M. (2017). Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, 151, 753-763.

Colmenar-Santos, A., Zarzuelo-Puch, G., Borge-Diez, D. and García-Diéguez, C. (2016). Thermodynamic and exergoeconomic analysis of energy recovery system of biogas from a wastewater treatment plant and use in a Stirling engine. *Renewable energy*, 88, 171-184.

Coskun, C., Oktay, Z. and Ilten, N. (2009). A new approach for simplifying the calculation of flue gas specific heat and specific exergy value depending on fuel composition. *Energy* 34(11), 1898–1902.

Çakmak, K. E. (2019). Enzimatik Ön Arıtım ile Mikroalglerden Biyogaz Üretiminin Arttırılması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çelik, C. (2015). Termik santrallerde enerji ve ekserji analizi için yazılım geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi.

Çengel, Y. A. ve Boles A. (2008), Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla. İzmir: Güven Bilimsel) (Çev.: Çeviri Editörü Ali Pınarbaşı), s. 392-393.

Çiloğlu, S. (2019). Eüaş Ambarlı Doğalgaz Kombine Çevrim Santralinin Enerji ve Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Çomaklı, K., Karşlı, S., Çomaklı, Ö. ve Yılmaz, M. (2004). Termal sistemlerin ekserjetik analizi. *Termodinamik dergisi*, 11, 94-98.

Demirbaş, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431-434.

Doseva, N. and Chakyrova, D. (2015). Energy and exergy analysis of cogeneration system with biogas engines. *Journal of Thermal Engineering*, 1(3), 391-401.

Ersoz, O. and Kocar, G. (2013). Exergy analysis of solar energy assisted biogas plants for Turkey. *International Journal of Exergy*, 12(2), 162-182.

Friend, D. G., Ely, J. F. and Ingham, H. (1989). Thermophysical properties of methane. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 18(2), 583-638.

Gülen, J. ve Çeşmeli, Ç. (2012). Biyogaz Hakkında Genel Bilgi ve Yan Ürünlerin Kullanım Alanı. *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt-Sayı:5-1, 65-84.

Hashimoto, A. G. (1981). *Anaerobic fermentation of beef cattle manure* (Vol. 98372, No. 1). Solar Energy Research Institute.

Hosseini, S., Barzegaravval, H., Wahid, M., Ganjehkaviri, A. and Sies, M. (2016). Thermodynamic assessment of integrated biogas-based micro-power generation system, *Energy Conversion and Management* 128, 104–119.

Hosokai, S., Matsuoka, K., Kuramoto, M. and Suzuki, Y. (2016). Modification of Dulong's formula to estimate heating value of gas, liquid and solid fuels. *Fuel Processing Technology* 152 (2016), 399–405.

Kaplan, M. (2020). Mesken tipi bir mikro-kojenerasyon tesisinin enerji, ekserji, ekonomik ve çevresel analizi, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi.

Kiran, E. U., Stamatelatos, K., Antonopoulou, G. and Lyberatos, G. (2016). Production of biogas via anaerobic digestion. In *Handbook of biofuels production* (pp. 259-301). Woodhead Publishing.

Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş. ve Durmuş, A. (2010), Biyogaz Teknolojileri Kitabı. Ege Üniversitesi Basımevi, İzmir, 83-84.

Kutlu, Ö. (2009). Bir Biyogaz Üretim Prosesinin Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi.

Kontokostas, G. and Goulos, I. (2017). Techno-economic assessment of gas turbine cogeneration cycles utilizing anaerobic digestion products for biogas fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(1), 011401.

Öztürk, M. (2008). Hayvan gübresinden biyogaz üretimi. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı Müsteşarlığı, Ankara.

Rahim, M. ve Gündüz, D. (2014). Gaz Türbinli Bir Isıl-Güç (Kojenerasyon) Çevrim Santralinin Enerji Ve Ekserji Analizi: Ankara Şartlarında Uygulama. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 6(2), 19-27.

Ruwa, T. L., Abbasoğlu, S. and Akün, E. (2022). Energy and Exergy Analysis of Biogas-Powered Power Plant from Anaerobic Co-Digestion of Food and Animal Waste. *Processes*, 10(5), 871.

Sanaye, S. and Yazdani, M. (2022). Energy, exergy, economic and environmental analysis of a running integrated anaerobic digester-combined heat and power system in a municipal wastewater treatment plant. *Energy Reports*, 8, 9724-9741.

Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Kottner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. and Janssen, R. (2008). Biogas handbook, Teodorita. *Esbjerg, Denmark: by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej*, 910, 279.

Sevinchan, E., Dincer, I. and Lang, H. (2019). Energy and exergy analyses of a biogas driven multigenerational system. *Energy*, 166, 715-723.

Szargut, J. (2005). Exergy method: technical and ecological applications (Vol. 18). WIT press.

Tekel, E. (2006). Termik santrallerin enerji ve ekserji analizi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Terhan, M. (2021). Yoğuşmalı Isı Geri Kazanım Cihazlarının Tasarımına Çiğlenme Noktası Sıcaklıklarının Etkisinin Yakıt Tiplerine Göre Araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 24(1), 31-38.

Uysal, Z. B. ve Zıraman, U.D. (2020), Prosesler için Uygulamalı Ekserji Analizi. Gazi Kitapevi, Ankara, 27.

Ünal, F. (2009). Bir Termik Santralin Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Vitázek, I., Klůčik, J., Uhrinová, D., Mikulová, Z. and Mojžiš, M. (2016). Thermodynamics of combustion gases from biogas.

Wang, H., Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A. and Alkan-Ozkaynak, A. (2019). Physical properties of dairy manure pre-and post-anaerobic digestion. *Applied Sciences*, 9(13), 2703.



EKLER

EK-1 Kojenerasyon Sistemi Antifrizli Su Devresine Ait EES Programı Çıktıları

"Kojenerasyon sistemi antifrizli su devresine ait termodinamik özellikleri"

Ölü hal özellikleri"

C=50

cp_AkimNo_0=cp(EG;T=298;C=C)

h_AkimNo_0=enthalpy(EG;T=298;C=C;P=89)

rho_AkimNo_0=density(EG;T=298;C=C)

"Akim No 8'e ait özellikler"

cp_AkimNo_8=cp(EG;T=365,5;C=C)

h_AkimNo_8=enthalpy(EG;T=365,5;C=C;P=60)

rho_AkimNo_8=density(EG;T=365,5;C=C)

"Akim No 9'a ait özellikler"

cp_AkimNo_9=cp(EG;T=360,5;C=C)

h_AkimNo_9=enthalpy(EG;T=360,5;C=C;P=60)

rho_AkimNo_9=density(EG;T=360,5;C=C)

"Akim No 10'a ait özellikler"

cp_AkimNo_10=cp(EG;T=360,5;C=C)

h_AkimNo_10=enthalpy(EG;T=360,5;C=C;P=141)

rho_AkimNo_10=density(EG;T=360,5;C=C)

"Akim No 15'e ait özellikler"

cp_AkimNo_15=cp(EG;T=343;C=C)

h_AkimNo_15=enthalpy(EG;T=343;C=C;P=129)

rho_AkimNo_15=density(EG;T=343;C=C)

"Akim No 16'a ait özellikler"

cp_AkimNo_16=cp(EG;T=343;C=C)

h_AkimNo_16=enthalpy(EG;T=343;C=C;P=449)

rho_AkimNo_16=density(EG;T=343;C=C)

Akim No 17'e ait özellikler"

$cp_AkimNo_17=cp(EG;T=347,1;C=C)$

$h_AkimNo_17=enthalpy(EG;T=347,1;C=C;P=449)$

$\rho_AkimNo_17=density(EG;T=347,1;C=C)$

"Akim No 18'e ait özellikler"

$cp_AkimNo_18=cp(EG;T=357,5;C=C)$

$h_AkimNo_18=enthalpy(EG;T=357,5;C=C;P=449)$

$\rho_AkimNo_18=density(EG;T=357,5;C=C)$

"Akim No 19'a ait özellikler"

$cp_AkimNo_19=cp(EG;T=363,1;C=C)$

$h_AkimNo_19=enthalpy(EG;T=363,1;C=C;P=418)$

$\rho_AkimNo_19=density(EG;T=363,1;C=C)$

"Akim No 20'e ait özellikler"

$cp_AkimNo_20=cp(EG;T=321;C=C)$

$h_AkimNo_20=enthalpy(EG;T=321;C=C;P=169)$

$\rho_AkimNo_20=density(EG;T=321;C=C)$

"Akim No 21'e ait özellikler"

$cp_AkimNo_21=cp(EG;T=321;C=C)$

$h_AkimNo_21=enthalpy(EG;T=321;C=C;P=289)$

$\rho_AkimNo_21=density(EG;T=321;C=C)$

"Akim No 22'e ait özellikler"

$cp_AkimNo_22=cp(EG;T=325,5;C=C)$

$h_AkimNo_22=enthalpy(EG;T=325,5;C=C;P=289)$

$\rho_AkimNo_22=density(EG;T=325,5;C=C)$

"Akim No 35'e ait özellikler"

$cp_AkimNo_35=cp(EG;T=282,7;C=C)$

$h_AkimNo_35=enthalpy(EG;T=282,7;C=C;P=150)$

$\rho_AkimNo_35=density(EG;T=282,7;C=C)$

"Akim No 36'a ait özellikler"

$cp_AkimNo_36=cp(EG;T=281,9;C=C)$

$h_AkimNo_36=enthalpy(EG;T=281,9;C=C;P=150)$

$\rho_AkimNo_36=density(EG;T=281,9;C=C)$

SOLUTION

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

C = 50	cpAkimNo_0 = 3,337	cpAkimNo_10 = 3,607
cpAkimNo_15 = 3,543	cpAkimNo_16 = 3,543	cpAkimNo_17 = 3,559
cpAkimNo_18 = 3,597	cpAkimNo_19 = 3,616	cpAkimNo_20 = 3,45
cpAkimNo_21 = 3,45	cpAkimNo_22 = 3,47	cpAkimNo_35 = 3,256
cpAkimNo_36 = 3,252	cpAkimNo_8 = 3,623	cpAkimNo_9 = 3,607
hAkimNo_0 = 42,42	hAkimNo_10 = 260,1	hAkimNo_15 = 197,5
hAkimNo_16 = 197,8	hAkimNo_17 = 212,4	hAkimNo_18 = 249,6
hAkimNo_19 = 269,7	hAkimNo_20 = 120,6	hAkimNo_21 = 120,7
hAkimNo_22 = 136,3	hAkimNo_35 = 31,6	hAkimNo_36 = 28,9
hAkimNo_8 = 278,1	hAkimNo_9 = 260	ρAkimNo_0 = 1062
ρAkimNo_10 = 1021	ρAkimNo_15 = 1034	ρAkimNo_16 = 1034
ρAkimNo_17 = 1031	ρAkimNo_18 = 1023	ρAkimNo_19 = 1019
ρAkimNo_20 = 1049	ρAkimNo_21 = 1049	ρAkimNo_22 = 1046
ρAkimNo_35 = 1070	ρAkimNo_36 = 1071	ρAkimNo_8 = 1017
ρAkimNo_9 = 1021		

EK-2 Kojenerasyon Sistemi Sıcak Su Devresine Ait EES Programı Çıktıları

"Kojenerasyon sistemi sıcak su devresine ait termodinamik özellikler"

Ölü hal özellikleri"

```
cp_AkimNo_0=cp(Water;T=298;P=89)
rho_AkimNo_0=density(Water;T=298;P=89)
h_AkimNo_0=enthalpy(Water;T=298;P=89)
s_AkimNo_0=entropy(Water;T=298;P=89)
```

"Akım No 23'e ait özellikler"

```
cp_AkimNo_23=cp(Water;T=351,7;P=239)
rho_AkimNo_23=density(Water;T=351,7;P=239)
h_AkimNo_23=enthalpy(Water;T=351,7;P=239)
s_AkimNo_23=entropy(Water;T=351,7;P=239)
```

"Akım No 24'e ait özellikler"

```
cp_AkimNo_24=cp(Water;T=351,7;P=399)
rho_AkimNo_24=density(Water;T=351,7;P=399)
h_AkimNo_24=enthalpy(Water;T=351,7;P=399)
s_AkimNo_24=entropy(Water;T=351,7;P=399)
```

"Akım No 25'e ait özellikler"

```
cp_AkimNo_25=cp(Water;T=341,4;P=399)
rho_AkimNo_25=density(Water;T=341,4;P=399)
h_AkimNo_25=enthalpy(Water;T=341,4;P=399)
s_AkimNo_25=entropy(Water;T=341,4;P=399)
```

"Akım No 26'a ait özellikler"

```
cp_AkimNo_26=cp(Water;T=322;P=169)
rho_AkimNo_26=density(Water;T=322;P=169)
h_AkimNo_26=enthalpy(Water;T=322;P=169)
s_AkimNo_26=entropy(Water;T=322;P=169)
```

"Akim No 28'e ait özellikler"

cp_AkimNo_28=cp(Water;T=318;P=339)
 rho_AkimNo_28=density(Water;T=318;P=339)
 h_AkimNo_28=enthalpy(Water;T=318;P=339)
 s_AkimNo_28=entropy(Water;T=318;P=339)

"Akim No 29'a ait özellikler"

cp_AkimNo_29=cp(Water;T=333;P=339)
 rho_AkimNo_29=density(Water;T=333;P=339)
 h_AkimNo_29=enthalpy(Water;T=333;P=339)
 s_AkimNo_29=entropy(Water;T=333;P=339)

"Akim No 30'a ait özellikler"

cp_AkimNo_30=cp(Water;T=333;P=579)
 rho_AkimNo_30=density(Water;T=333;P=579)
 h_AkimNo_30=enthalpy(Water;T=333;P=579)
 s_AkimNo_30=entropy(Water;T=333;P=579)

"Akim No 31'e ait özellikler"

cp_AkimNo_31=cp(Water;T=323;P=579)
 rho_AkimNo_31=density(Water;T=323;P=579)
 h_AkimNo_31=enthalpy(Water;T=323;P=579)
 s_AkimNo_31=entropy(Water;T=323;P=579)

"Akim No 32'e ait özellikler"

cp_AkimNo_32=cp(Water;T=354,4;P=400)
 rho_AkimNo_32=density(Water;T=354,4;P=400)
 h_AkimNo_32=enthalpy(Water;T=354,4;P=400)
 s_AkimNo_32=entropy(Water;T=354,4;P=400)

"Akim No 33'e ait özellikler"

cp_AkimNo_33=cp(Water;T=354,4;P=1000)
 rho_AkimNo_33=density(Water;T=354,4;P=1000)
 h_AkimNo_33=enthalpy(Water;T=354,4;P=1000)
 s_AkimNo_33=entropy(Water;T=354,4;P=1000)

"Akim No 34'e ait özellikler"

cp_AkimNo_34=cp(Steam;T=451,8;P=980)

rho_AkimNo_34=density(Steam;T=451,8;P=980)

h_AkimNo_34=enthalpy(Steam;T=451,8;P=980)

s_AkimNo_34=entropy(Steam;T=451,8;P=980)

SOLUTION

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

cpAkimNo_0 = 4,181	cpAkimNo_23 = 4,195	cpAkimNo_24 = 4,195
cpAkimNo_25 = 4,188	cpAkimNo_26 = 4,181	cpAkimNo_28 = 4,18
cpAkimNo_29 = 4,184	cpAkimNo_30 = 4,184	cpAkimNo_31 = 4,18
cpAkimNo_32 = 4,197	cpAkimNo_33 = 4,196	cpAkimNo_34 = 4,4
hAkimNo_0 = 104,3	hAkimNo_23 = 329,1	hAkimNo_24 = 329,2
hAkimNo_25 = 286	hAkimNo_26 = 204,7	hAkimNo_28 = 188,1
hAkimNo_29 = 250,8	hAkimNo_30 = 251	hAkimNo_31 = 209,2
hAkimNo_32 = 340,5	hAkimNo_33 = 341	hAkimNo_34 = 757,1
ρ AkimNo_0 = 997,1	ρ AkimNo_23 = 972,8	ρ AkimNo_24 = 972,8
ρ AkimNo_25 = 978,9	ρ AkimNo_26 = 988,6	ρ AkimNo_28 = 990,4
ρ AkimNo_29 = 983,4	ρ AkimNo_30 = 983,5	ρ AkimNo_31 = 988,3
ρ AkimNo_32 = 971,1	ρ AkimNo_33 = 971,4	ρ AkimNo_34 = 888,4
sAkimNo_0 = 0,3651	sAkimNo_23 = 1,058	sAkimNo_24 = 1,058
sAkimNo_25 = 0,9335	sAkimNo_26 = 0,6888	sAkimNo_28 = 0,6365
sAkimNo_29 = 0,8292	sAkimNo_30 = 0,8291	sAkimNo_31 = 0,7016
sAkimNo_32 = 1,09	sAkimNo_33 = 1,09	sAkimNo_34 = 2,126

EK-3 Anaerobik Çürütme Sistemi Su Devresine Ait EES Programı Çıktıları

"Anaerobik çürütme sistemi sıcak su devresine ait termodinamik özellikler

Ölü hal özellikleri"

```
cp_AkimNo_0=cp(Water;T=298;P=89)
rho_AkimNo_0=density(Water;T=298;P=89)
h_AkimNo_0=enthalpy(Water;T=298;P=89)
s_AkimNo_0=entropy(Water;T=298;P=89)
```

"Akım No 15'e ait özellikler"

```
cp_AkimNo_15=cp(Water;T=333;P=489)
rho_AkimNo_15=density(Water;T=333;P=489)
h_AkimNo_15=enthalpy(Water;T=333;P=489)
s_AkimNo_15=entropy(Water;T=333;P=489)
```

"Akım No 16'a ait özellikler"

```
cp_AkimNo_16=cp(Water;T=321;P=339)
rho_AkimNo_16=density(Water;T=321;P=339)
h_AkimNo_16=enthalpy(Water;T=321;P=339)
s_AkimNo_16=entropy(Water;T=321;P=339)
```

"Akım No 21'e ait özellikler"

```
cp_AkimNo_21=cp(Water;T=332;P=339)
rho_AkimNo_21=density(Water;T=332;P=339)
h_AkimNo_21=enthalpy(Water;T=332;P=339)
s_AkimNo_21=entropy(Water;T=332;P=339)
```

"Akım No 22'e ait özellikler"

```
cp_AkimNo_22=cp(Water;T=323;P=339)
rho_AkimNo_22=density(Water;T=323;P=339)
h_AkimNo_22=enthalpy(Water;T=323;P=339)
s_AkimNo_22=entropy(Water;T=323;P=339)
```

SOLUTION

Unit Settings: SI K kPa kJ mass deg

$cp_{AkimNo,0} = 4,181$	$cp_{AkimNo,15} = 4,184$	$cp_{AkimNo,16} = 4,18$
$cp_{AkimNo,21} = 4,184$	$cp_{AkimNo,22} = 4,181$	$h_{AkimNo,0} = 104,3$
$h_{AkimNo,15} = 250,9$	$h_{AkimNo,16} = 200,6$	$h_{AkimNo,21} = 246,6$
$h_{AkimNo,22} = 209$	$\rho_{AkimNo,0} = 997,1$	$\rho_{AkimNo,15} = 983,4$
$\rho_{AkimNo,16} = 989,1$	$\rho_{AkimNo,21} = 983,9$	$\rho_{AkimNo,22} = 988,2$
$s_{AkimNo,0} = 0,3651$	$s_{AkimNo,15} = 0,8292$	$s_{AkimNo,16} = 0,6758$
$s_{AkimNo,21} = 0,8167$	$s_{AkimNo,22} = 0,7017$	

EK-4 Yüksek Seviyede Atmosfer Özellikleri Tablo A-16

933
APPENDIX 1

TABLE A-16

Properties of the atmosphere at high altitude

Altitude, m	Temperature, °C	Pressure, kPa	Gravity g , m/s ²	Speed of Sound, m/s	Density, kg/m ³	Viscosity μ , kg/m-s	Thermal Conductivity, W/m-K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244
2000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726×10^{-5}	0.0243
2200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720×10^{-5}	0.0242
2400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713×10^{-5}	0.0241
2600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707×10^{-5}	0.0240
2800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700×10^{-5}	0.0239
3000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694×10^{-5}	0.0238
3200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687×10^{-5}	0.0237
3400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681×10^{-5}	0.0236
3600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674×10^{-5}	0.0235
3800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668×10^{-5}	0.0234
4000	-10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661×10^{-5}	0.0233
4200	-12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655×10^{-5}	0.0232
4400	-13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648×10^{-5}	0.0231
4600	-14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642×10^{-5}	0.0230
4800	-16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635×10^{-5}	0.0229
5000	-17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628×10^{-5}	0.0228
5200	-18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622×10^{-5}	0.0227
5400	-20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615×10^{-5}	0.0226
5600	-21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608×10^{-5}	0.0224
5800	-22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602×10^{-5}	0.0223
6000	-24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595×10^{-5}	0.0222
6200	-25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588×10^{-5}	0.0221
6400	-26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582×10^{-5}	0.0220
6600	-27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575×10^{-5}	0.0219
6800	-29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568×10^{-5}	0.0218
7000	-30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561×10^{-5}	0.0217
8000	-36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527×10^{-5}	0.0212
9000	-43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493×10^{-5}	0.0206
10,000	-49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458×10^{-5}	0.0201
12,000	-56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422×10^{-5}	0.0195
14,000	-56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422×10^{-5}	0.0195
16,000	-56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422×10^{-5}	0.0195
18,000	-56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422×10^{-5}	0.0195

Source: U.S. Standard Atmosphere Supplements, U.S. Government Printing Office, 1966. Based on year-round mean conditions at 45° latitude and varies with the time of the year and the weather patterns. The conditions at sea level ($z = 0$) are taken to be $P = 101.325$ kPa, $T = 15^\circ\text{C}$, $\rho = 1.2250$ kg/m³, $g = 9.80665$ m/s².

EK-5 Havanın İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-17

934
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg·K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg·K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

EK-6 Azotun İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-18

936
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-18

Ideal-gas properties of nitrogen, N_2

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol·K	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol·K
0	0	0	0	600	17,563	12,574	212.066
220	6,391	4,562	182.639	610	17,864	12,792	212.564
230	6,683	4,770	183.938	620	18,166	13,011	213.055
240	6,975	4,979	185.180	630	18,468	13,230	213.541
250	7,266	5,188	186.370	640	18,772	13,450	214.018
260	7,558	5,396	187.514	650	19,075	13,671	214.489
270	7,849	5,604	188.614	660	19,380	13,892	214.954
280	8,141	5,813	189.673	670	19,685	14,114	215.413
290	8,432	6,021	190.695	680	19,991	14,337	215.866
298	8,669	6,190	191.502	690	20,297	14,560	216.314
300	8,723	6,229	191.682	700	20,604	14,784	216.756
310	9,014	6,437	192.638	710	20,912	15,008	217.192
320	9,306	6,645	193.562	720	21,220	15,234	217.624
330	9,597	6,853	194.459	730	21,529	15,460	218.059
340	9,888	7,061	195.328	740	21,839	15,686	218.472
350	10,180	7,270	196.173	750	22,149	15,913	218.889
360	10,471	7,478	196.995	760	22,460	16,141	219.301
370	10,763	7,687	197.794	770	22,772	16,370	219.709
380	11,055	7,895	198.572	780	23,085	16,599	220.113
390	11,347	8,104	199.331	790	23,398	16,830	220.512
400	11,640	8,314	200.071	800	23,714	17,061	220.907
410	11,932	8,523	200.794	810	24,027	17,292	221.298
420	12,225	8,733	201.499	820	24,342	17,524	221.684
430	12,518	8,943	202.189	830	24,658	17,757	222.067
440	12,811	9,153	202.863	840	24,974	17,990	222.447
450	13,105	9,363	203.523	850	25,292	18,224	222.822
460	13,399	9,574	204.170	860	25,610	18,459	223.194
470	13,693	9,786	204.803	870	25,928	18,695	223.562
480	13,988	9,997	205.424	880	26,248	18,931	223.927
490	14,285	10,210	206.033	890	26,568	19,168	224.288
500	14,581	10,423	206.630	900	26,890	19,407	224.647
510	14,876	10,635	207.216	910	27,210	19,644	225.002
520	15,172	10,848	207.792	920	27,532	19,883	225.353
530	15,469	11,062	208.358	930	27,854	20,122	225.701
540	15,766	11,277	208.914	940	28,178	20,362	226.047
550	16,064	11,492	209.461	950	28,501	20,603	226.389
560	16,363	11,707	209.999	960	28,826	20,844	226.728
570	16,662	11,923	210.528	970	29,151	21,086	227.064
580	16,962	12,139	211.049	980	29,476	21,328	227.398
590	17,262	12,356	211.562	990	29,803	21,571	227.728

EK-7 Oksijenin İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-19

938
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-19

Ideal-gas properties of oxygen, O_2

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol·K	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^o$ kJ/kmol·K
0	0	0	0	600	17,929	12,940	226.346
220	6,404	4,575	196.171	610	18,250	13,178	226.877
230	6,694	4,782	197.461	620	18,572	13,417	227.400
240	6,984	4,989	198.696	630	18,895	13,657	227.918
250	7,275	5,197	199.885	640	19,219	13,898	228.429
260	7,566	5,405	201.027	650	19,544	14,140	228.932
270	7,858	5,613	202.128	660	19,870	14,383	229.430
280	8,150	5,822	203.191	670	20,197	14,626	229.920
290	8,443	6,032	204.218	680	20,524	14,871	230.405
298	8,682	6,203	205.033	690	20,854	15,116	230.885
300	8,736	6,242	205.213	700	21,184	15,364	231.358
310	9,030	6,453	206.177	710	21,514	15,611	231.827
320	9,325	6,664	207.112	720	21,845	15,859	232.291
330	9,620	6,877	208.020	730	22,177	16,107	232.748
340	9,916	7,090	208.904	740	22,510	16,357	233.201
350	10,213	7,303	209.765	750	22,844	16,607	233.649
360	10,511	7,518	210.604	760	23,178	16,859	234.091
370	10,809	7,733	211.423	770	23,513	17,111	234.528
380	11,109	7,949	212.222	780	23,850	17,364	234.960
390	11,409	8,166	213.002	790	24,186	17,618	235.387
400	11,711	8,384	213.765	800	24,523	17,872	235.810
410	12,012	8,603	214.510	810	24,861	18,126	236.230
420	12,314	8,822	215.241	820	25,199	18,382	236.644
430	12,618	9,043	215.955	830	25,537	18,637	237.055
440	12,923	9,264	216.656	840	25,877	18,893	237.462
450	13,228	9,487	217.342	850	26,218	19,150	237.864
460	13,525	9,710	218.016	860	26,559	19,408	238.264
470	13,842	9,935	218.676	870	26,899	19,666	238.660
480	14,151	10,160	219.326	880	27,242	19,925	239.051
490	14,460	10,386	219.963	890	27,584	20,185	239.439
500	14,770	10,614	220.589	900	27,928	20,445	239.823
510	15,082	10,842	221.206	910	28,272	20,706	240.203
520	15,395	11,071	221.812	920	28,616	20,967	240.580
530	15,708	11,301	222.409	930	28,960	21,228	240.953
540	16,022	11,533	222.997	940	29,306	21,491	241.323
550	16,338	11,765	223.576	950	29,652	21,754	241.689
560	16,654	11,998	224.146	960	29,999	22,017	242.052
570	16,971	12,232	224.708	970	30,345	22,280	242.411
580	17,290	12,467	225.262	980	30,692	22,544	242.768
590	17,609	12,703	225.808	990	31,041	22,809	242.120

EK-8 Karbondioksitin İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-20

940
PROPERTY TABLES AND CHARTS

TABLE A-20

Ideal-gas properties of carbon dioxide, CO₂

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol-K	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol-K
0	0	0	0	600	22,280	17,291	243.199
220	6,601	4,772	202.966	610	22,754	17,683	243.983
230	6,938	5,026	204.464	620	23,231	18,076	244.758
240	7,280	5,285	205.920	630	23,709	18,471	245.524
250	7,627	5,548	207.337	640	24,190	18,869	246.282
260	7,979	5,817	208.717	650	24,674	19,270	247.032
270	8,335	6,091	210.062	660	25,160	19,672	247.773
280	8,697	6,369	211.376	670	25,648	20,078	248.507
290	9,063	6,651	212.660	680	26,138	20,484	249.233
298	9,364	6,885	213.685	690	26,631	20,894	249.952
300	9,431	6,939	213.915	700	27,125	21,305	250.663
310	9,807	7,230	215.146	710	27,622	21,719	251.368
320	10,186	7,526	216.351	720	28,121	22,134	252.065
330	10,570	7,826	217.534	730	28,622	22,522	252.755
340	10,959	8,131	218.694	740	29,124	22,972	253.439
350	11,351	8,439	219.831	750	29,629	23,393	254.117
360	11,748	8,752	220.948	760	30,135	23,817	254.787
370	12,148	9,068	222.044	770	30,644	24,242	255.452
380	12,552	9,392	223.122	780	31,154	24,669	256.110
390	12,960	9,718	224.182	790	31,665	25,097	256.762
400	13,372	10,046	225.225	800	32,179	25,527	257.408
410	13,787	10,378	226.250	810	32,694	25,959	258.048
420	14,206	10,714	227.258	820	33,212	26,394	258.682
430	14,628	11,053	228.252	830	33,730	26,829	259.311
440	15,054	11,393	229.230	840	34,251	27,267	259.934
450	15,483	11,742	230.194	850	34,773	27,706	260.551
460	15,916	12,091	231.144	860	35,296	28,125	261.164
470	16,351	12,444	232.080	870	35,821	28,588	261.770
480	16,791	12,800	233.004	880	36,347	29,031	262.371
490	17,232	13,158	233.916	890	36,876	29,476	262.968
500	17,678	13,521	234.814	900	37,405	29,922	263.559
510	18,126	13,885	235.700	910	37,935	30,369	264.146
520	18,576	14,253	236.575	920	38,467	30,818	264.728
530	19,029	14,622	237.439	930	39,000	31,268	265.304
540	19,485	14,996	238.292	940	39,535	31,719	265.877
550	19,945	15,372	239.135	950	40,070	32,171	266.444
560	20,407	15,751	239.962	960	40,607	32,625	267.007
570	20,870	16,131	240.789	970	41,145	33,081	267.566
580	21,337	16,515	241.602	980	41,685	33,537	268.119
590	21,807	16,902	242.405	990	42,226	33,995	268.670

EK-9 Su Buharının İdeal Gaz Özellikleri Tablo A-23

945
APPENDIX 1

TABLE A-23

Ideal-gas properties of water vapor, H₂O

T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol·K	T K	$\bar{h}$ kJ/kmol	$\bar{u}$ kJ/kmol	$\bar{s}^\circ$ kJ/kmol·K
0	0	0	0	600	20,402	15,413	212.920
220	7,295	5,466	178.576	610	20,765	15,693	213.529
230	7,628	5,715	180.054	620	21,130	15,975	214.122
240	7,961	5,965	181.471	630	21,495	16,257	214.707
250	8,294	6,215	182.831	640	21,862	16,541	215.285
260	8,627	6,466	184.139	650	22,230	16,826	215.856
270	8,961	6,716	185.399	660	22,600	17,112	216.419
280	9,296	6,968	186.616	670	22,970	17,399	216.976
290	9,631	7,219	187.791	680	23,342	17,688	217.527
298	9,904	7,425	188.720	690	23,714	17,978	218.071
300	9,966	7,472	188.928	700	24,088	18,268	218.610
310	10,302	7,725	190.030	710	24,464	18,561	219.142
320	10,639	7,978	191.098	720	24,840	18,854	219.668
330	10,976	8,232	192.136	730	25,218	19,148	220.189
340	11,314	8,487	193.144	740	25,597	19,444	220.707
350	11,652	8,742	194.125	750	25,977	19,741	221.215
360	11,992	8,998	195.081	760	26,358	20,039	221.720
370	12,331	9,255	196.012	770	26,741	20,339	222.221
380	12,672	9,513	196.920	780	27,125	20,639	222.717
390	13,014	9,771	197.807	790	27,510	20,941	223.207
400	13,356	10,030	198.673	800	27,896	21,245	223.693
410	13,699	10,290	199.521	810	28,284	21,549	224.174
420	14,043	10,551	200.350	820	28,672	21,855	224.651
430	14,388	10,813	201.160	830	29,062	22,162	225.123
440	14,734	11,075	201.955	840	29,454	22,470	225.592
450	15,080	11,339	202.734	850	29,846	22,779	226.057
460	15,428	11,603	203.497	860	30,240	23,090	226.517
470	15,777	11,869	204.247	870	30,635	23,402	226.973
480	16,126	12,135	204.982	880	31,032	23,715	227.426
490	16,477	12,403	205.705	890	31,429	24,029	227.875
500	16,828	12,671	206.413	900	31,828	24,345	228.321
510	17,181	12,940	207.112	910	32,228	24,662	228.763
520	17,534	13,211	207.799	920	32,629	24,980	229.202
530	17,889	13,482	208.475	930	33,032	25,300	229.637
540	18,245	13,755	209.139	940	33,436	25,621	230.070
550	18,601	14,028	209.795	950	33,841	25,943	230.499
560	18,959	14,303	210.440	960	34,247	26,265	230.924
570	19,318	14,579	211.075	970	34,653	26,588	231.347
580	19,678	14,856	211.702	980	35,061	26,913	231.767
590	20,039	15,134	212.320	990	35,472	27,240	232.184

EK-10 Hidrokarbon Yakıtların Özellikleri Tablo A-27

949
APPENDIX 1

TABLE A-27

Properties of some common fuels and hydrocarbons

Fuel (phase)	Formula	Molar mass, kg/kmol	Density, ¹ kg/L	Enthalpy of vaporization, ² kJ/kg	Specific heat, ¹ c_p kJ/kg·K	Higher heating value, ³ kJ/kg	Lower heating value, ³ kJ/kg
Carbon (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Hydrogen (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Carbon monoxide (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Methane (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Methanol (ℓ)	CH ₃ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Acetylene (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Ethane (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Ethanol (ℓ)	C ₂ H ₅ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Propane (ℓ)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Butane (ℓ)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
1-Pentene (ℓ)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Isopentane (ℓ)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Benzene (ℓ)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Hexene (ℓ)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexane (ℓ)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Toluene (ℓ)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500
Heptane (ℓ)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Octane (ℓ)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
Decane (ℓ)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Gasoline (ℓ)	C _n H _{1.87n}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Light diesel (ℓ)	C _n H _{1.8n}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Heavy diesel (ℓ)	C _n H _{1.7n}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Natural gas (g)	C _n H _{3.8n} N _{0.1n}	18	—	—	2	50,000	45,000

¹At 1 atm and 20°C.²At 25°C for liquid fuels, and 1 atm and normal boiling temperature for gaseous fuels.³At 25°C. Multiply by molar mass to obtain heating values in kJ/kmol.

EK-11 Bilinen Bazı Gazların Mükemmel-Gaz Özgül Isıları Tablo A-2

909
APPENDIX 1

TABLE A-2

Ideal-gas specific heats of various common gases

(a) At 300 K

Gas	Formula	Gas constant, R kJ/kg·K	c_p kJ/kg·K	c_v kJ/kg·K	k
Air	—	0.2870	1.005	0.718	1.400
Argon	Ar	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Butane	C_4H_{10}	0.1433	1.7164	1.5734	1.091
Carbon dioxide	CO_2	0.1889	0.846	0.657	1.289
Carbon monoxide	CO	0.2968	1.040	0.744	1.400
Ethane	C_2H_6	0.2765	1.7662	1.4897	1.186
Ethylene	C_2H_4	0.2964	1.5482	1.2518	1.237
Helium	He	2.0769	5.1926	3.1156	1.667
Hydrogen	H_2	4.1240	14.307	10.183	1.405
Methane	CH_4	0.5182	2.2537	1.7354	1.299
Neon	Ne	0.4119	1.0299	0.6179	1.667
Nitrogen	N_2	0.2968	1.039	0.743	1.400
Octane	C_8H_{18}	0.0729	1.7113	1.6385	1.044
Oxygen	O_2	0.2598	0.918	0.658	1.395
Propane	C_3H_8	0.1885	1.6794	1.4909	1.126
Steam	H_2O	0.4615	1.8723	1.4108	1.327

Note: The unit kJ/kg·K is equivalent to kJ/kg·°C.

Source: Chemical and Process Thermodynamics 3/E by Kyle, B. G., © 2000. Adapted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

EK-12 Metan Gazının Özellikleri Tablo B-7-2

TABLE B.7.2
Superheated Methane

Temp. (K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
100 kPa (111.50 K)					200 kPa (120.61 K)			
Sat.	0.55665	167.90	223.56	9.5084	0.29422	179.30	238.14	9.2918
125	0.63126	190.21	253.33	9.7606	0.30695	186.80	248.19	9.3736
150	0.76586	230.18	306.77	10.1504	0.37700	227.91	303.31	9.7759
175	0.89840	269.72	359.56	10.4759	0.44486	268.05	357.02	10.1071
200	1.02994	309.20	412.19	10.7570	0.51165	307.88	410.21	10.3912
225	1.16092	348.90	464.99	11.0058	0.57786	347.81	463.38	10.6417
250	1.29154	389.12	518.27	11.2303	0.64370	388.19	516.93	10.8674
275	1.42193	430.17	572.36	11.4365	0.70931	429.36	571.22	11.0743
300	1.55215	472.36	627.58	11.6286	0.77475	471.65	626.60	11.2670
325	1.68225	516.00	684.23	11.8100	0.84008	515.37	683.38	11.4488
350	1.81226	561.34	742.57	11.9829	0.90530	560.77	741.83	11.6220
375	1.94220	608.58	802.80	12.1491	0.97046	608.07	802.16	11.7885
400	2.07209	657.89	865.10	12.3099	1.03557	657.41	864.53	11.9495
425	2.20193	709.36	929.55	12.4661	1.10062	708.92	929.05	12.1059

TABLE B.7.2 (continued)
Superheated Methane

Temp. (K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
400 kPa (131.42 K)					600 kPa (138.72 K)			
Sat.	0.15427	191.01	252.72	9.0754	0.10496	197.54	260.51	8.9458
150	0.18233	223.16	296.09	9.3843	0.11717	218.08	288.38	9.1390
175	0.21799	264.61	351.81	9.7280	0.14227	261.03	346.39	9.4970
200	0.25246	305.19	406.18	10.0185	0.16603	302.44	402.06	9.7944
225	0.28631	345.61	460.13	10.2726	0.18911	343.37	456.84	10.0525
250	0.31978	386.32	514.23	10.5007	0.21180	384.44	511.52	10.2830
275	0.35301	427.74	568.94	10.7092	0.23424	426.11	566.66	10.4931
300	0.38606	470.23	624.65	10.9031	0.25650	468.80	622.69	10.6882
325	0.41899	514.10	681.69	11.0857	0.27863	512.82	680.00	10.8716
350	0.45183	559.63	740.36	11.2595	0.30067	558.48	738.88	11.0461
375	0.48460	607.03	800.87	11.4265	0.32264	605.99	799.57	11.2136
400	0.51731	656.47	863.39	11.5879	0.34456	655.52	862.25	11.3754
425	0.54997	708.05	928.04	11.7446	0.36643	707.18	927.04	11.5324
450	0.58260	761.85	994.89	11.8974	0.38826	761.05	994.00	11.6855
475	0.61520	817.89	1063.97	12.0468	0.41006	817.15	1063.18	11.8351
500	0.64778	876.18	1135.29	12.1931	0.43184	875.48	1134.59	11.9816
525	0.68033	936.67	1208.81	12.3366	0.45360	936.03	1208.18	12.1252

EK-13 Metan Gazının 0-1 bar Özellikleri Tablo B-3

METHANE ISOBAR AT P = 0.100 MPa (continued)									
T	ρ	Z	H	S	C_v	C_p	W	η	λ
K	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$		kJ/mol	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$
135.	0.0909	0.980	4.409	159.24	25.33	34.33	301.6	5.31	14.1
140.	0.0875	0.982	4.580	160.49	25.28	34.20	307.5	5.50	14.7
145.	0.0843	0.984	4.751	161.69	25.24	34.10	313.3	5.69	15.3
150.	0.0814	0.985	4.921	162.84	25.21	34.01	319.0	5.88	15.9
155.	0.0787	0.987	5.091	163.96	25.19	33.95	324.5	6.07	16.5
160.	0.0761	0.988	5.261	165.03	25.18	33.89	330.0	6.26	17.1
165.	0.0737	0.989	5.430	166.08	25.17	33.85	335.3	6.45	17.7
170.	0.0715	0.990	5.599	167.09	25.16	33.81	340.5	6.64	18.2
175.	0.0694	0.991	5.768	168.07	25.17	33.79	345.6	6.83	18.8
180.	0.0674	0.991	5.937	169.02	25.18	33.77	350.7	7.01	19.4
185.	0.0655	0.992	6.106	169.94	25.19	33.77	355.6	7.20	20.0
190.	0.0638	0.993	6.275	170.84	25.21	33.77	360.5	7.39	20.6
195.	0.0621	0.993	6.444	171.72	25.24	33.78	365.3	7.57	21.2
200.	0.0605	0.994	6.613	172.58	25.27	33.80	370.0	7.75	21.8
205.	0.0590	0.994	6.782	173.41	25.31	33.82	374.6	7.93	22.4
210.	0.0576	0.995	6.951	174.23	25.35	33.85	379.1	8.12	23.0
215.	0.0562	0.995	7.120	175.02	25.41	33.90	383.6	8.30	23.5
220.	0.0549	0.995	7.290	175.80	25.47	33.94	388.0	8.48	24.1
225.	0.0537	0.996	7.460	176.57	25.53	34.00	392.3	8.65	24.7
230.	0.0525	0.996	7.630	177.31	25.61	34.07	396.6	8.83	25.3
235.	0.0514	0.996	7.801	178.05	25.69	34.14	400.8	9.01	26.0
240.	0.0503	0.996	7.971	178.77	25.78	34.22	404.9	9.18	26.6
245.	0.0493	0.997	8.143	179.47	25.88	34.32	409.0	9.36	27.2
250.	0.0483	0.997	8.315	180.17	25.98	34.42	413.0	9.53	27.8
255.	0.0473	0.997	8.487	180.85	26.10	34.52	416.9	9.70	28.4
260.	0.0464	0.997	8.660	181.52	26.22	34.64	420.8	9.87	29.1
265.	0.0455	0.997	8.833	182.18	26.35	34.76	424.6	10.04	29.7
270.	0.0447	0.998	9.008	182.83	26.48	34.90	428.3	10.21	30.3
275.	0.0438	0.998	9.182	183.48	26.63	35.04	432.0	10.38	31.0
280.	0.0430	0.998	9.358	184.11	26.78	35.19	435.7	10.54	31.7
285.	0.0423	0.998	9.534	184.73	26.95	35.35	439.3	10.71	32.3
290.	0.0416	0.998	9.711	185.35	27.11	35.51	442.8	10.87	33.0
295.	0.0408	0.998	9.889	185.96	27.29	35.68	446.3	11.03	33.7
300.	0.0402	0.998	10.068	186.56	27.47	35.86	449.7	11.20	34.4
310.	0.0389	0.998	10.429	187.74	27.86	36.25	456.5	11.52	35.8
320.	0.0376	0.999	10.793	188.90	28.28	36.66	463.1	11.84	37.2
330.	0.0365	0.999	11.162	190.03	28.72	37.09	469.5	12.15	38.7
340.	0.0354	0.999	11.535	191.15	29.18	37.55	475.7	12.46	40.2
350.	0.0344	0.999	11.913	192.24	29.66	38.03	481.8	12.76	41.8
360.	0.0334	0.999	12.296	193.32	30.16	38.52	487.8	13.07	43.4

EK-13 Metan Gazının 0-1 bar Özellikleri Tablo B-3

METHANE ISOBAR AT P = 0.100 MPa (continued)

T	ρ	Z	H	S	C_v	C_p	W	η	λ
K	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$		kJ/mol	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$
370.	0.0325	0.999	12.684	194.38	30.68	39.04	493.6	13.37	45.0
380.	0.0317	0.999	13.077	195.43	31.21	39.57	499.4	13.66	46.6
390.	0.0309	0.999	13.475	196.46	31.75	40.11	505.0	13.95	48.3
400.	0.0301	1.000	13.879	197.49	32.31	40.66	510.5	14.24	50.0
410.	0.0293	1.000	14.288	198.50	32.87	41.22	516.0		51.7
420.	0.0286	1.000	14.703	199.50	33.44	41.79	521.4		53.5
430.	0.0280	1.000	15.124	200.49	34.01	42.36	526.7		55.3
440.	0.0273	1.000	15.550	201.47	34.59	42.93	531.9		57.1
450.	0.0267	1.000	15.983	202.44	35.17	43.51	537.1		58.9
460.	0.0262	1.000	16.421	203.40	35.75	44.09	542.2		60.8
470.	0.0256	1.000	16.864	204.36	36.33	44.67	547.2		62.6
480.	0.0251	1.000	17.314	205.30	36.91	45.25	552.2		64.5
490.	0.0245	1.000	17.769	206.24	37.48	45.82	557.1		66.4
500.	0.0241	1.000	18.230	207.17	38.06	46.39	562.0		68.3
520.	0.0231	1.000	19.170	209.02	39.19	47.53	571.7		72.2
540.	0.0223	1.000	20.131	210.83	40.31	48.64	581.2		76.0
560.	0.0215	1.000	21.115	212.62	41.40	49.73	590.5		80.0
580.	0.0207	1.000	22.120	214.38	42.47	50.80	599.7		83.9
600.	0.0200	1.000	23.147	216.12	43.50	51.83	608.8		87.8

METHANE ISOBAR AT P = 0.150 MPa

T	ρ	Z	H	S	C_v	C_p	W	η	λ
K	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$		kJ/mol	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$
95.	27.792	0.007	-5.511	70.26	33.99	53.74	1499.6	179.88	206.2
100.	27.368	0.007	-5.240	73.04	34.08	54.63	1447.2	157.57	199.8
105.	26.934	0.006	-4.966	75.72	33.86	55.27	1397.3	138.75	193.2
110.	26.489	0.006	-4.688	78.31	33.49	55.83	1347.9	122.87	186.3
115.	26.031	0.006	-4.407	80.80	33.07	56.40	1298.0	109.44	179.3
116.645	25.863	0.006	-4.311	81.64	32.92	56.66	1279.0	105.20	176.7
116.645	0.1625	0.952	3.723	150.51	26.74	36.94	274.7	4.62	12.2
120.	0.1573	0.956	3.845	151.54	26.14	36.08	279.8	4.75	12.6
125.	0.1502	0.961	4.023	153.00	25.77	35.46	286.8	4.94	13.1
130.	0.1437	0.966	4.200	154.38	25.61	35.12	293.3	5.13	13.7
135.	0.1379	0.969	4.375	155.70	25.51	34.88	299.7	5.32	14.2
140.	0.1325	0.972	4.549	156.97	25.44	34.68	305.8	5.51	14.8
145.	0.1276	0.975	4.722	158.18	25.38	34.52	311.7	5.70	15.4
150.	0.1230	0.978	4.894	159.35	25.33	34.39	317.5	5.89	16.0
155.	0.1188	0.980	5.066	160.48	25.29	34.28	323.2	6.08	16.5

EK-14 Metan Gazının 1-3 bar Özellikleri Tablo B-3

METHANE ISOBAR AT P = 0.300 MPa (continued)									
T	ρ	Z	H	S	C_v	C_p	W	η	λ
K	$\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$		kJ/mol	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$
235.	0.1554	0.988	7.753	168.77	25.76	34.50	399.2	9.04	26.1
240.	0.1520	0.989	7.925	169.50	25.84	34.56	403.4	9.22	26.7
245.	0.1488	0.990	8.098	170.21	25.94	34.63	407.6	9.39	27.3
250.	0.1457	0.990	8.272	170.91	26.04	34.72	411.6	9.56	28.0
255.	0.1428	0.991	8.445	171.60	26.15	34.81	415.7	9.74	28.6
260.	0.1400	0.992	8.620	172.28	26.27	34.91	419.6	9.91	29.2
265.	0.1372	0.992	8.794	172.95	26.39	35.02	423.5	10.07	29.9
270.	0.1346	0.993	8.970	173.60	26.53	35.14	427.4	10.24	30.5
275.	0.1321	0.993	9.146	174.25	26.67	35.27	431.1	10.41	31.1
280.	0.1297	0.993	9.323	174.88	26.82	35.41	434.8	10.58	31.8
285.	0.1274	0.994	9.500	175.51	26.98	35.56	438.5	10.74	32.5
290.	0.1251	0.994	9.678	176.13	27.15	35.71	442.1	10.90	33.1
295.	0.1230	0.995	9.857	176.74	27.32	35.88	445.6	11.07	33.8
300.	0.1209	0.995	10.037	177.35	27.51	36.05	449.1	11.23	34.5
310.	0.1169	0.995	10.399	178.54	27.89	36.42	456.0	11.55	35.9
320.	0.1132	0.996	10.765	179.70	28.30	36.81	462.6	11.87	37.4
330.	0.1097	0.996	11.136	180.84	28.74	37.24	469.1	12.18	38.8
340.	0.1065	0.997	11.510	181.96	29.20	37.68	475.4	12.49	40.4
350.	0.1034	0.997	11.889	183.05	29.68	38.15	481.6	12.79	41.9
360.	0.1005	0.998	12.273	184.14	30.18	38.64	487.6	13.09	43.5
370.	0.0977	0.998	12.662	185.20	30.70	39.15	493.5	13.39	45.1
380.	0.0951	0.998	13.056	186.25	31.23	39.67	499.3	13.69	46.7
390.	0.0927	0.998	13.456	187.29	31.77	40.20	505.0	13.98	48.4
400.	0.0903	0.999	13.860	188.31	32.32	40.75	510.5	14.27	50.1
410.	0.0881	0.999	14.271	189.33	32.88	41.30	516.0		51.8
420.	0.0860	0.999	14.687	190.33	33.45	41.87	521.4		53.6
430.	0.0840	0.999	15.108	191.32	34.02	42.43	526.8		55.4
440.	0.0821	0.999	15.535	192.30	34.60	43.01	532.0		57.2
450.	0.0802	0.999	15.968	193.28	35.18	43.58	537.2		59.0
460.	0.0785	1.000	16.407	194.24	35.76	44.16	542.3		60.8
470.	0.0768	1.000	16.851	195.20	36.34	44.73	547.4		62.7
480.	0.0752	1.000	17.301	196.14	36.92	45.31	552.4		64.6
490.	0.0736	1.000	17.757	197.08	37.49	45.88	557.4		66.5
500.	0.0722	1.000	18.219	198.02	38.07	46.45	562.3		68.4
520.	0.0694	1.000	19.159	199.86	39.20	47.58	572.0		72.2
540.	0.0668	1.000	20.122	201.68	40.32	48.69	581.5		76.1
560.	0.0644	1.000	21.107	203.47	41.41	49.77	590.8		80.0
580.	0.0622	1.000	22.113	205.23	42.47	50.83	600.1		84.0
600.	0.0601	1.000	23.140	206.97	43.51	51.87	609.1		87.9