

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLİ BİYOKÜTLE ENERJİ
TESİSİNİN TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ

EMRECAN ERCAN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

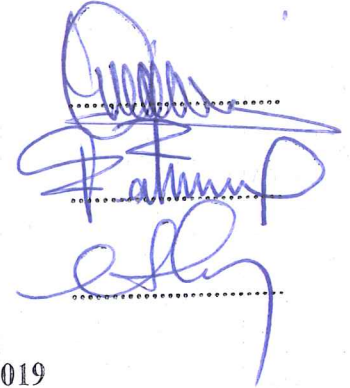
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLİ BİYOKÜTLE ENERJİ
TESİSİNİN TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ

EMRECAN ERCAN

Prof. Dr. Durmuş KAYA
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Fatma ÇANKA KILIÇ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Ethem TOKLU
Jüri Üyesi, Düzce Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 01.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dünyanın insanlara temiz ve sürdürülebilir bir yaşam sunabilmesinin en önemli etmenlerinden birisi enerji kaynaklarının doğru şekilde kullanımıdır. Bu sürdürülebilirliğin gelecek nesillere aktarılmasında temiz ve yenilenebilir enerji kullanımı ilk sıralarda yer almaktadır.

Yaptığım bu çalışmada, temiz ve yenilenebilir bir biyokütle yakıt olan ormansal atıkların, organik rankine çevrimi ile katma değerli bir forma dönüşüp, elektrik ve ısı çıktısı haline gelene kadarki prosesler ve ekipmanlar hakkında bilgi verilmiştir ve bu prosesin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır.

Bu çalışmayı inceleyenlerin ORC'nin tarihçesini, ORC çevrimli bir biyokütle enerji tesisinin başlıca ne tür ekipmanlardan oluştuğu, böyle bir tesisin teknik ve maliyet analizi hakkında bilgi edinmeleri hedeflenmiştir.

Bu kapsamda bana çalışabilme fırsatı sunan değerli hocam Prof. Dr. Durmuş Kaya'ya, tesis ile ilgili her türlü bilgi paylaşımı yapan ve bu süreçte beni destekleyen Starwood A.Ş. ve Turboden S.p.a firmalarının yetkililerine ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca manevi desteğini hep yanımda hissettiğim değerli aileme, özellikle eşime sevgi ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Haziran - 2019

Emreca ERCA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
GİRİŞ	1
1. BİYOKÜTLE NEDİR?	5
1.1. Türkiye’de Biyokütle Enerjisi	8
1.2. Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Yöntemleri	9
1.2.1. Doğrudan yakma.....	9
1.2.2. Anaerobik fermentasyon (Biyogaz).....	13
1.3. Ülkemizdeki Biyokütle Enerjisi Teşvikleri ve Güncel Kurulu Santraller	14
1.4. Organik Rankine Çevrimi	15
1.4.1. ORC tarihçesi.....	17
1.4.2. Dünyadaki ilk ticari ORC tesisleri.....	23
1.4.3. Günümüzdeki ticari ORC türbin üreticileri	28
1.4.4. ORC sistemlerinde kullanılan ekipmanlar	36
1.4.4.1. Isı değiştiricileri.....	37
1.4.4.2. Expander (Genişletici).....	40
1.4.4.3. Pompalar.....	42
1.4.4.4. Jeneratörler, dişli kutuları ve güç elektroniği sistemleri	42
1.4.4.5. Yoğuşmamış gaz ayırma sistemi	42
1.4.4.6. Yardımcı tesisler ve enstrümanlar	44
1.4.5. ORC sistemlerinde kullanılan akışkanlar	44
1.4.6. ORC sistemlerinde kullanılan türbin çeşitleri.....	45
1.5. Organik Rankine Çevrim Uygulamaları.....	47
1.5.1. Jeotermal güç santrallerinde ORC uygulamaları	47
1.5.2. Biyokütle enerji santrallerinde ORC uygulamaları	50
1.5.3. CSP güneş enerji santrallerinde ORC uygulamaları.....	52
1.5.4. Atık ısıdan elektrik üretiminde ORC uygulamaları	53
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	56
3. TESİS HAKKINDA BİLGİ VE TESİSTE KULLANILAN BİYOKÜTLE YAKITLAR VE ORC SİSTEMİ İÇİN KIZGIN YAĞ ÜRETİMİ	60
3.1. Tesis Hakkında Genel Bilgi	60
3.2. Biyokütle Enerji Tesisinde Kullanılan Atık Bilgileri.....	60
3.2.1. Ağaç kabuğu	60
3.2.2. Kereste atıkları	61
3.3. Tesisteki Biyokütle Kazanları ve Yardımcı Ekipmanları.....	61
3.3.1. Yakıt besleme sistemi	61
3.3.2. Yanma ocağı	64

3.3.3. Kızgın yağ kazanı	67
3.3.4. Hareketli ızgaraya yakıt besleme sistemi.....	68
3.3.5. Sistem hidrolik güç modülü	69
3.3.6. İleri itmeli hareketli ızgara.....	69
3.3.7. Ön ocaklı kızgın yağ kazanı.....	71
3.3.8. Kızgın yağ kazanı serpantini.....	71
3.3.9. Gaz alma ünitesi (Degazör)	71
3.3.10. Kızgın yağ kazanı sirkülasyon pompası	72
3.3.11. Kazan ve pompa armatürleri.....	72
3.3.12. Genleşme tankı	72
3.3.13. Elektrostatik toz filtresi.....	73
3.4. ORC Türbin Ekipmanı Özellikleri	73
3.4.1. Ön Isıtıcı	75
3.4.2. Evaporatör.....	76
3.4.3. Rejeneratör.....	77
3.4.4. Kondenser	77
3.4.5. Türbin.....	78
3.4.6. Jeneratör.....	79
3.4.7. Pompa	80
3.4.8. Ölçme ve kontrol parametreleri	80
3.4.9. Türbin yağlama sistemi.....	82
4. ORC TÜRBİNİ ÇIKIŞINDA SICAK SU ÜRETİMİ	83
4.1. ORC Kojenerasyon Sistemi ve Sıcak Su Üretimi	83
4.2. Sıcak Suyun MDF Üretiminde Kullanılması	83
5. MATERYAL VE METOTLAR	84
5.1. Biyokütle Yakıtlı Kızgın Yağ Kazanı	84
5.2. Enerji Analizi	85
5.2.1. Birinci yasa analizi.....	86
5.2.1.1. Kütlelerin korunumu	86
5.2.1.2. Enerjinin korunumu.....	86
5.3. ORC Modülü Birinci Yasa Analizi	87
5.3.1. Evaporatörün birinci yasa analizi	88
5.3.2. Türbin birinci yasa analizi	88
5.3.3. Rejeneratör birinci yasa analizi.....	89
5.3.4. Kondenser birinci yasa analizi	90
5.3.5. Pompa birinci yasa analizi	90
5.4. Ekonomik Analiz.....	91
5.4.1. Tesisin yatırım ve işletme maliyeti	91
5.4.2. Net bugünkü değer yöntemi ile maliyet analizi	92
5.4.3. İç karlılık oranı yöntemi ile maliyet analizi	92
5.4.4. Geri ödeme süresi	93
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	94
6.1. ORC Türbin Enerji Analizi	94
6.2. ORC’li Biyokütle Enerji Santrali Maliyet Analizi ve Fizibilite Çalışması	96
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	100
KAYNAKLAR	102
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	108
ÖZGEÇMİŞ	109

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Yenilenebilir biyokütle için kriterler	6
Şekil 1.2.	Biyokütle hammadde kaynaklarının sınıflandırılması	6
Şekil 1.3.	Bazı biyokütle hammaddeleri	7
Şekil 1.4.	Izgaralı kazan çalışma prensibi	11
Şekil 1.5.	Hareketli ızgara sistemi.....	12
Şekil 1.6.	Biyogazdan elektrik üretim şeması	14
Şekil 1.7.	Uygulamalara göre ORC sıcaklık güç şeması	16
Şekil 1.8.	ORC sıcaklık - entropi diyagramı	17
Şekil 1.9.	3 kW ORC Sistemi (1961).....	19
Şekil 1.10.	Jeneratör ve besleme pompalı radyal türbin, 1984	20
Şekil 1.11.	100 kW komple ORC sistemi	21
Şekil 1.12.	Barber-Nichols 700 kW üniteler, 1985	22
Şekil 1.13.	Kiabukawa 200 kW ORC ünitesi, 1952.....	23
Şekil 1.14.	Ormat 0,6 kW solar pompa	24
Şekil 1.15.	İsrail'in Ölü Deniz'deki 150 kW güneş enerjisi havuzu ve güç ünitesi (Ormat)	25
Şekil 1.16.	McCabe 12,5 MW kademeli ORC, 1979.....	25
Şekil 1.17.	Avustralya'daki güneş kolektörlerinden çalışan 35 kW dört kademeli türbin, 1984 Perth.....	26
Şekil 1.18.	35 kW ORC'ye kızgın yağ sağlayan konsantre güneş kollektörleri, 1984.....	27
Şekil 1.19.	600 kW jeotermal ORC, Wabuska, Nevada	27
Şekil 1.20.	Vana istasyonları enerji beslemesi için kullanılan 2 adet 600 W'lık ORC Alaska 2015	29
Şekil 1.21.	15 MW üç kademeli eksenel türbin montajı, Ormat.....	30
Şekil 1.22.	100 MW ORC jeotermal güç santrali, Yeni Zelanda, 2013.....	31
Şekil 1.23.	Turboden yapımı 4 kademeli 35 kW Türbin, 1984.....	32
Şekil 1.24.	100 kW'lık Turboden Jeotermal Orc Türbinleri, Zambiya 1988.....	32
Şekil 1.25.	Odun kütüğü yakıtlı 3 kW ORC, 1988	33
Şekil 1.26.	300 kW biyokütle ünitesi, Biere – İsviçre, 1998	33
Şekil 1.27.	5,6 MW jeotermal enerji santrali, Durnnhaar - Almanya, 2013.....	34
Şekil 1.28.	6 MW biyokütle ORC ünitesinin kurulum aşamasında görüntüsü, Fraser Lake, Kanada, 2015	34
Şekil 1.29.	3,5 MW Jeotermal Enerji Santrali, Türkiye, 2015.....	35
Şekil 1.30.	Hava soğutmalı ORC sistemi ana ekipmanları	37
Şekil 1.31.	Shell&Tube ısı değiştirici şematik gösterimi.....	38
Şekil 1.32.	Kettle reboiler ısı değiştirici şematik gösterimi	39
Şekil 1.33.	Su soğutmalı kondenser şematik gösterimi.....	39
Şekil 1.34.	Hava soğutmalı kondenser çizimi	40
Şekil 1.35.	Rekuperatörlü expander modelinin şematik gösterimi	41
Şekil 1.36.	Yoğuşmamış gaz ayırma sistemi şematik gösterimi	43

Şekil 1.37.	1970'lerin sonunda tasarlanan Organik Rankine Çevrimi	
	eksenel akış türbinleri	46
Şekil 1.38.	İlk kademeli 1 MW Exergy radyal çıkış türbini	47
Şekil 1.39.	Jeotermal enerji kullanım alanları.....	48
Şekil 1.40.	Jeotermal ORC Binary sistem şematik gösterimi	49
Şekil 1.41.	Jeotermal ORC iki fazlı Binary Çevrimi şematik gösterimi.....	50
Şekil 1.42.	Biyokütle güç santrallerinde ORC kullanımı şematik gösterimi	50
Şekil 1.43.	1 MWe gücünde Turboden ORC ünitesi	51
Şekil 1.44.	ORC sistemli biyokütle enerji santrali animasyonu	52
Şekil 1.45.	CSP güneş enerjisi ORC uygulaması.....	53
Şekil 1.46.	Atık ısıdan ORC sistemi ile enerji üretim tesis animasyonu	54
Şekil 3.1.	Tesiste yakıt olarak kullanılan ağaç kabukları.....	60
Şekil 3.2.	Kereste atıkları	61
Şekil 3.3.	Kayar tabanlı yakıt besleme sistemi	62
Şekil 3.4.	Bantlı konveyör sistemi	63
Şekil 3.5.	Disk elek sistemi	63
Şekil 3.6.	Diskli ayırıcıdan gelen atıkların toplandığı hazne	64
Şekil 3.7.	Yanma odası bakım çalışmaları	65
Şekil 3.8.	Yanma sonrası oluşan kül depolama alanı.....	65
Şekil 3.9.	Yanma odasında bulunan video kamera görüntüsü	66
Şekil 3.10.	Kızgın yağ kazanı radyasyon ve konveksiyon bölmesi	67
Şekil 3.11.	Kızgın yağ hattı sirkülasyon pompa ve vana grubu.....	68
Şekil 3.12.	Izgara yakıt besleme sistemi	69
Şekil 3.13.	İleri itmeli hareketli izgara.....	70
Şekil 3.14.	Degazör tankı	71
Şekil 3.15.	Elektrostatik toz filtresi (ESP)	73
Şekil 3.16.	ORC modülü oda yerleşimi	75
Şekil 3.17.	ORC türbin odası üstten görünüm	75
Şekil 3.18.	ORC preheater ve evaporatör.....	76
Şekil 3.19.	ORC sistemi kondenseri	78
Şekil 3.20.	ORC türbini.....	79
Şekil 3.21.	ORC türbini tahrikli jeneratör	79
Şekil 3.22.	ORC organik akışkan sirkülasyon pompaları	80
Şekil 3.23.	ORC otomasyon ve sistem panoları.....	81
Şekil 3.24.	ORC türbini yağlama sistemi.....	82
Şekil 4.1.	ORC tarafından üretilen sıcak suyun kullanıldığı kurutma sistemi	83
Şekil 5.1.	ORC sistemi prosesi şematik gösterimi	87
Şekil 5.2.	Evaporatör şematik gösterimi	88
Şekil 5.3.	Türbin şematik gösterimi	88
Şekil 5.4.	Rejenaratör şematik gösterimi	89
Şekil 5.5.	Kondenser şematik gösterimi.....	90
Şekil 5.6.	Pompa şematik gösterimi.....	90
Şekil 5.7.	Yatırım maliyetleri dağılım grafiği.....	91
Şekil 6.1.	ORC sistemi proses akış şeması	95
Şekil 6.2.	ORC sistemi T-Q grafiği.....	96
Şekil 6.3.	Net bugünkü değer grafiği	99
Şekil 6.4.	Nakit akış değerlerinin gösterimi.....	99

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Bazı tarımsal ürünlerin ısı değeri	7
Tablo 1.2.	Biyokütle kaynaklarının fiziksel ve kimyasal içeriği	8
Tablo 1.3.	Yenilenebilir enerji teşvik fiyatları	15
Tablo 1.4.	ORC sistemlerinde kullanılan akışkan tipleri	45
Tablo 1.5.	Türkiye’de kurulu ORC’li biyokütle enerji santralleri	52
Tablo 1.6.	Dünya’daki kurulu CSP tesislerinden bazıları.....	53
Tablo 1.7.	Atık ısıların sıcaklıklarına göre sınıflandırılması ve tavsiye edilen enerji kazanım teknolojileri	55
Tablo 3.1.	Tesisteki kazanın ısı güç değeri.....	61
Tablo 3.2.	Yanma odası malzeme özellikleri.....	66
Tablo 3.3.	Kızgın yağ kazanı malzeme özellikleri.....	68
Tablo 3.4.	Kazan ve pompa armatürleri.....	72
Tablo 3.5.	ORC modülü teknik özellikleri.....	74
Tablo 3.6.	Ön ısıtıcı teknik özellikleri	76
Tablo 3.7.	Evaporatör teknik özellikleri	76
Tablo 3.8.	Rejeneratör teknik özellikleri.....	77
Tablo 3.9.	Kondenser teknik özellikleri.....	77
Tablo 5.1.	Hareketli ızgaralı biyokütle kazanı özellikleri.....	84
Tablo 5.2.	Yakıt olarak kullanılan biyokütlenin kimyasal analizi	84
Tablo 5.3.	Biyokütle kazanında kullanılan ısı transfer yağının özellikleri	85
Tablo 5.4.	Tesis yatırım maliyetleri	91
Tablo 6.1.	ORC sistemi için her noktaya ait akışkanların termodinamik özellikleri	94
Tablo 6.2.	Enerji analiz sonuçları	94
Tablo 6.3.	ORC modülü enerji üretim ve iç tüketim değeri	97
Tablo 6.4.	Biyokütle yakıt tüketimi ve verimlilik değeri.....	97
Tablo 6.5.	Elektrik satışı ve ısı kullanımı maliyetleri	97
Tablo 6.6.	Toplam yatırım maliyetleri	97
Tablo 6.7.	Tesis işletme maliyetleri	98
Tablo 6.8.	Tesis öngörülen yıllık işletme saatleri	98
Tablo 6.9.	Fizibilite ekonomik sonuç değeri	98
Tablo 6.10.	Öngörülen yıllık nakit akış değeri	98
Tablo 6.11.	Projenin hesaplanan net bugünkü değeri	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Derece santigrat
CH ₄	: Metan
CO ₂	: Karbondioksit
C _p	: Sabit basınçta özgül ısı
E	: Enerji
H	: Alt ısı değer
H ₂	: Hidrojen
kcal	: Kilokalori
kg	: Kilogram
kJ	: Kilojoule
kPa	: Kilopaskal
kW	: Kilowatt
kWe	: Kilowatt elektrik
m	: Debi
Mpa	: Megapaskal
MW	: Megawatt
NOX	: Azot oksitler
Q	: Isı miktarı
SOX	: Kükürt oksitler
T	: Sıcaklık
T _{kritik}	: Kritik sıcaklık
W	: İş miktarı
η	: Verim

Kısaltmalar

CFC	: Kloroflorokarbonlar
MDF	: Medium Density Fiberboard (Orta Yoğunlukta Lif Levha)
ORC	: Organic Rankine Cycle (Organik Rankine Çevrim)
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kanunu
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kanunu Teşvik Mekanizması

ORGANİK RANKİNE ÇEVİRİMLİ BİYOKÜTLE ENERJİ TESİSİNİN TEKNİK VE EKONOMİK ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, yonga levha ve MDF üreten bir fabrikada ki biyokütle yakıtlı kızgın yağ kazanından termal yağ elde edilmesi ve bu termal yağdan ORC türbini vasıtasıyla elektrik ve sıcak su üretilmesi incelenmiştir. Çevrim sonunda üretilen elektrik ve ısı enerjisinin tesiste kullanım amacı hakkında bilgiler verilmiştir. Sistemin ana bileşenleri olan kazan, türbin ve diğer yardımcı elemanlar incelenmiştir. Sistemin maliyet ve fizibilite analizleri yapılarak, YEKDEM kanunu çerçevesinde projenin geri ödeme süresi ve iç karlılık oranları hesaplanmıştır.

Bu çalışmada ki amaç ORC'nin tarihçesi, ORC çevrimli bir biyokütle enerji tesisinin başlıca hangi tür ekipmanlardan oluştuğu ve böyle bir tesisin yatırımı ve maliyet analizi hakkında okuyucuların bilgi edinmeleri hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, Isı ve Güç Üretimi, Organik Rankine Çevrimi.

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF ORGANIC RANKINE CYCLE BIOMASS ENERGY PLANT

ABSTRACT

In this study, thermal oil obtained from biomass fired hot oil boiler in a chipboard factory and production of electricity and hot water from this thermal oil by ORC turbine were investigated. At the end of the cycle, the information about the purpose of using the electricity and heat energy produced in the plant is given. The main components of the system are boiler, turbine and other auxiliary elements. The cost and feasibility analyzes of the system were made and the repayment period and internal profitability ratios of the project were calculated within the framework of YEKDEM Law.

The aim of this study is to provide information about the history of ORC, what kind of equipment an ORC cycle biomass power plant consists of, the investment and cost analysis of such a plant.

Keywords: Biomass, Heat and Power Production, ORGANIC Rankine Cycle.

GİRİŞ

Ülkelerin sosyal ve ekonomik yönden gelişimi ve ülkede yaşayan insanların yaşamlarının kaliteli bir duruma getirilmesi konusunda ‘‘Enerji’’ büyük bir önem taşır. Enerji sayesinde kaliteli bir yaşam için gerekli olan bütün ihtiyaçlar insanlara sunulmaktadır. Enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün, dünya nüfusunun artmasıyla birlikte, aynı oranda artış göstermektedir. Dünyamızda ihtiyaç duyduğumuz enerjinin çok büyük bir bölümü doğalgaz, kömür, petrol gibi fosil yakıtlarla sağlanmaktadır. Bu fosil enerji kaynaklarının kullanılması sonucunda oluşan sera gazları, iklim değişikliklerinden ve küresel ısınmadan sorumlu tutulmaktadır [1]. Fosil enerji kaynaklarının yenilebilir olmayışından dolayı kaynakları sınırlıdır ve her geçen gün daha da azalmaktadır. Bu fosil kaynakların 20150 yılına kadar tükenebileceği tahmin edilerek raporlanmıştır [2].

Fosil yakıtlar ile mukayese edildiğinde, kullanım yelpazesi en geniş olan yenilenebilir enerji çeşitlerinden bir tanesi de biyokütle enerji kaynaklarıdır. Biyokütle yalnızca yenilenebilir enerji kaynağı olması ile değil, yeryüzündeki pek çok bölgede yetişmesi, sosyo-ekonomik yönden gelişme sağlaması, doğal tabiat dengesinin korunmasına katkıda bulunması ve miktarı bakımından büyük oranlara sahip olması sebebiyle oldukça stratejik bir yenilenebilir enerji kaynağıdır [3]. Avrupa Birliği, Kyoto Protokolü ihtiyaçlarını ve artan enerji gereksinimini karşılayabilmek adına biyokütle yakıtların kullanımı konusunda teşvikler geliştirmektedir. Bu nedenle yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynağı olan biyokütle, ülkemiz içinde önem arz etmektedir. Biyokütle çeşitli proses ve işlemler sonucunda form değiştirerek veya aynı formda katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüşerek daha yüksek ısı değere sahip, taşınabilmesi ve depolanması kolay yakıtlara dönüştürülebilirler. Biyokütle kaynakları hemen hemen her yerde bulunur ve fosil yakıtların yerine güvenilir ve yenilenebilir bir yerel enerji kaynağı olabilir. Biyokütleden üretilen enerji, aşırı yüklenmiş bir elektrik şebekesine bağlılığı azaltabilir ve yerel sanayilerde kullanılan pahalı yakıtların yerini alabilir.

Biyokütle, biyokütlenin yapı taşlarını oluşturan karbonhidratlar üretmek için havadaki su, su ve güneş ışığı arasındaki reaksiyondan, fotosentez yoluyla elde edilen bitki materyalidir. Tipik olarak fotosentez, mevcut güneş ışığının% 1'inden daha azını depolanmış kimyasal enerjiye dönüştürür. Güneş enerjisi kullanan fotosentez, biyokütlenin yapısal bileşenlerinin kimyasal bağlarında depolanır. Biyokütle kimyasal olarak ya da biyolojik olarak, kimyasal bağlarda depolanan enerjiyi ve ardından oksijenle birleştirilen müteakip "enerji" ürününü çıkartarak verimli bir şekilde işlenirse, karbon CO₂ ve su üretmek için oksitlenir. Proses döngüseldir, çünkü CO₂ daha sonra yeni biyokütle üretmek için kullanılabilir [4].

Yakacak odun, odun kömürü, tarım ve orman artıkları ve hayvan pisliği de dahil olmak üzere katı biyokütle, geleneksel olarak gelişmekte olan ülkelerin kırsal alanlarında, açıkta ateş yakarak yemek pişirmek, fırınlar ve küçük ölçekli tarım için geleneksel teknolojiler ile birlikte kullanılmaktadır. Genellikle, geleneksel biyokütle-enerji teknolojilerinin kullanımı yerel topluluklar için faydalı olmuştur, ancak bu yaklaşım yüksek kirlilik seviyelerine, orman bozulmasına ve ormansızlaşmaya yol açmaya devam etmektedir. Mevcut durum ise, yüksek verimli ve düşük emisyonlu dönüşüm sistemlerinde, elektrik, buhar ve ısıya katı, sıvı ve gaz biyokütle yakıtlarının yanmasından kaynaklandığı modern biyokütle-enerji teknolojileriyle ilgilidir. Ayrıca, organik maddenin (tarımsal artıklar, hayvan atıkları ve gıda endüstrisi atıkları gibi) anaerobik sindirim yoluyla biyogaza dönüştürüldüğü biyogazda günümüzde dönüşüm yöntemlerinden bir tanesidir. Ham biyogaz, elektrik, buhar ve ısı üretmek için yakılabilir veya biyo-metan haline dönüştürülebilir ve içten yanmalı motorlarda doğal gaz yerine kullanılabilir.

Biyokütle-enerji, fosil yakıtların yerini almak için ikincil ve üçüncül biyokütle kullanımını varsayarsak atmosfere sera gazı emisyonlarını azaltabilecek sürdürülebilir bir çözümdür. Gelişen veya gelişmekte olan ekonomilerdeki tarım ve orman temelli endüstriler, prensip olarak, enerji üretimi için kullanılacak önemli miktarda biyokütle artığı ve atığı üretir. Bununla birlikte, bir biyokütle projesinin geliştirilmesi karmaşıktır ve dikkatli bir hazırlık gerektirir. Gelişmekte olan birçok ülkede ve biyokütle projelerinin teknik, finansal ve sosyoekonomik fizibilitesini kanıtlayan yüksek kaliteli proje dokümantasyon ekonomilerinin olmayışı, bu projeler için finansmana erişim için kilit bir engeldir.

Bu çalışma biyokütlenin yakma metoduyla enerji üretimi üzerine kurgulanmıştır. 1990'ların sonuna kadar, biyokütle güç piyasası, neredeyse yalnızca 2 MW'lık elektrik gücü veya daha büyük bir uygulama büyüklüğüyle, geleneksel Rankine buhar çevrimleri tarafından gerçekleştirilmiştir. Geleneksel Rankine çevrimleri iyi performans ve güvenilirlik göstermiştir ancak aynı zamanda tesisin performansında azalma ve yatırım maliyetinde artış, işletme ve bakım maliyetlerinde artış gibi nedenlerle 2 MW'ın altındaki boyutlar için pek uygun olmamaya başlamıştır. Bu nedenle, çoğu durumda, artık biyokütle, yalnızca ısı içeren biyokütle kazanlarında kullanılmıştır.

Geleneksel Rankine çevrimlerinde işi yapan akışkan olarak su kullanılır. Suyun termodinamik özelliklerinin bu çevrim için uygun olması, rankine çevrimini yıllardır kullanılan bir teknoloji haline getirmiştir. Ancak suya göre daha düşük sıcaklıkta kaynama noktasına sahip kimyasal akışkanların keşfedilmesiyle birlikte, rankine çevriminde su yerine organik akışkanlar kullanılmaya başlanmıştır ve adına da Organik Rankine Çevrimi denilmiştir.

Rankine çevriminde su kullanımının avantajları şu şekildedir;

- Termal ve kimyasal dengenin iyi olması
- Pompalanabilir olması ve düşük viskoziteye sahip olması
- Yanmaz, çevreye zararsız ve zehirsiz olması
- Doğada bol miktarda bulunması ve ucuz olması

Dezavantajları ise şunlardır;

- Buhar türbinlerinde yüksek verimlilikte elektrik üretimi için, kızgın buhar formuna dönüştürülmesi gerekmektedir,
- Buhar türbini kanatlarında, kızgın buharın kuruluk derecesinin düşük olduğu durumlarda korozyona sebebiyet vermesi,
- Yüksek basınç altında kızgın buhar formuna dönüştürülmesi,
- Türbinin yüksek hızlarda dönmesi,
- Ağır ve maliyetli işletme ve bakım prosesi ihtiyacı.

Organik rankine çevriminin de klasik rankine çevrimin göre en büyük avantajlarını, kullanılan akışkanların kaynama noktalarının düşük oluşu, korozyon riski olmaması, türbinin düşük hızlarda dönmesi olarak sayabiliriz.

Turboden'in Organik Rankine Çevrimi (ORC) teknolojisini küçük ölçekli biyokütle tesislerine uygulama sezgisi, tüm Avrupa'da yeni bir biyokütle kombine ısı ve enerji (CHP) uygulamaları pazarını başlatmış ve bu sezginin önemi yüzlerce tesis tarafından kanıtlanmıştır.

Son 15 yılda, Avrupa'da biyokütle kaynaklı ORC CHP sistemlerinde etkileyici bir gelişimi yaşandı. Şu anda yaklaşık 300 tesis işletmede ya da yapım aşamasında, özellikle Avrupa'da değil, Kuzey Amerika ve Asya'da bunlara dahildir. Başlıca uygulamaları şunlardır: bölgesel ısıtma, pelet üretimi, hızarhaneler ve ahşap esaslı endüstriler. Teknolojinin son hali, bir biyokütle termal yağ kazanı ile bağlantılı ORC ile ikili bir döngü sağlar. İşletmedeki tesislerin çoğunluğu, sırasıyla 2 MW ve 8 MW termik güce karşılık gelen 500kW ve 2 MW elektrik gücündedir. Uygun çalışma sıvılarının kullanımı (çoğunluğu silikon yağlardır), biyokütlenin yanmasından elde edilen yüksek sıcaklıkların kullanılmasına izin verir. Sonuç olarak, yoğunlaştırıcıda bırakılan sıcak suyun nispeten yüksek sıcaklığına (80-120°C) rağmen yüksek elektrik verimliliğidir. Küçük ölçekli tesisler için doğrudan ısı değişimi çözümleri ve daha büyük ölçekli tesisler için çalışma sıvısı olarak hidrokarbonlar ile yeni gelişmeler devam etmektedir.

Ülkemizde yayımlanan YEK kanunu çerçevesinde, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımına ve yenilenebilir enerji projelerinde yerli ekipman kullanımına verilen teşviklerden sonra, bazı ORC türbin üreticileri Türkiye'de üretim yapmaya başlamışlardır. Son 10 yıl içerisinde ORC kullanan tesis sayısı oldukça artmıştır. Ayrıca Türkiye ORC pazar payı sıralamasında Avrupa'da ilk 5'te bulunmaktadır. Halen gelişmekte olan ORC teknolojisi, yabancı ORC Türbin üreticileri açısından Türkiye'yi üretim açısından cazibe merkezi konumuna getirmiştir. Bu durum ülkemiz açısından, imalat ve enerji sektörü adına ek istihdam oluşturmuş, ihracat hacmimize katkı sağlamıştır.

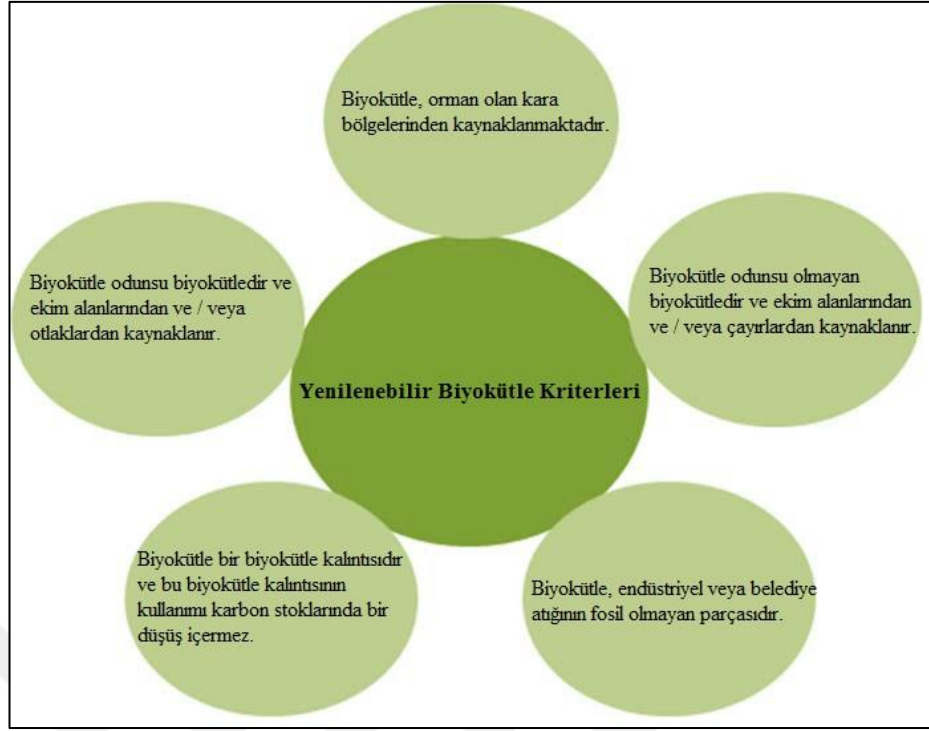
1. BİYOKÜTLE NEDİR?

Biyokütle, biyolojik olarak parçalanabilen ürünler, atıklar ve biyolojik kaynaklı atıklar tarım, ormancılık ve su ürünleri yetiştiriciliğidir. Biyokütle, odun, tarımsal ürünler, odun işleme yan ürünleri, gübre ve atık ürünlerin organik kısımlarını içeren çok çeşitli hammaddelerden gelmektedir. Başka bir deyişle biyokütle, bir enerji kaynağı olarak kullanılabilen herhangi bir organik odun, mahsul, deniz yosunu, hayvan atıklarıdır. Biyokütle muhtemelen en eski enerji kaynağımızdır.

Binlerce yıldır insanlar evlerini ısıtmak ve yemeklerini pişirmek için odun yaktılar. Biyokütle enerjisini güneşten alır. Tüm organik maddeler güneşten depolanmış enerji içerir. Fotosentez adı verilen bir işlem sırasında güneş ışığına bitkileri su, karbondioksit ve mineralleri oksijene ve şekere dönüştürmek için ihtiyaç duydukları enerji verir. Karbonhidratlar olarak adlandırılan şekerler, bitkilere (veya bitkileri yiyen hayvanlara) enerji verir. Karbonhidrat bakımından zengin besinler (spagetti gibi) insan vücudu için iyi bir enerji kaynağıdır [5]. Yenilenebilir bir enerji şekli olarak biyokütle, ihtiyaç duyulan enerjinin yerinde ve zamanında esnek bir yük ve uygulamalarla kolayca saklanması, taşınması ve kullanılması avantajlarına sahiptir. Bu, biyokütleyi diğer yenilenebilir enerji seçenekleri arasında benzersiz kılar.

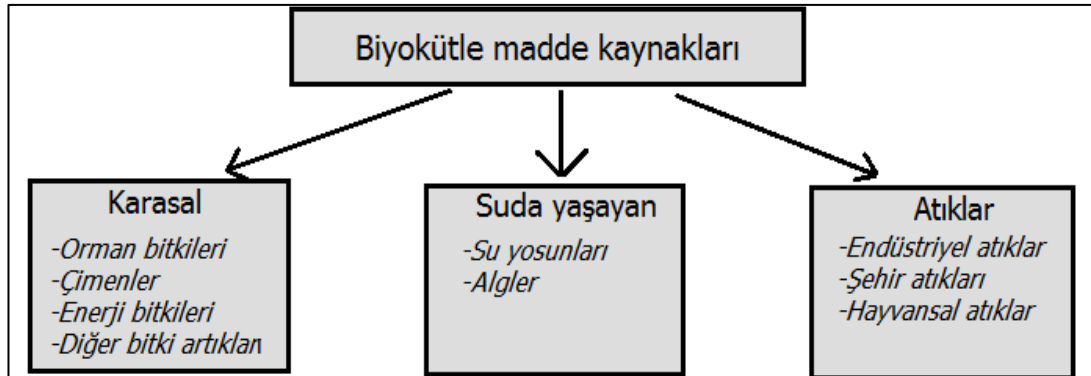
Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne (UNFCCC, 2006) göre, biyokütle yenilenebilir veya yenilenemez olabilir. Beş kriterli sistem (Şekil 1.1), biyokütlenin yenilenebilir mi yoksa yenilenemez mi olduğunu belirlemek için kullanılabilir.

Beş koşulun tümü ilgili ülke veya bölgedeki doğa koruma düzenlemelerine uygun olmalı, biyokütle üretiminde sürdürülebilir yönetim uygulamalı ve karbon stok seviyelerini sabit tutmamalıdır. Bu koşullardan hiçbiri geçerli değilse, biyokütle yenilenemez olarak kabul edilir (UNFCCC, 2006). Biyokütle potansiyeli üzerine eleştirel incelemenin bir sonraki adımı, dünyadaki enerji sektörleri için uzun vadeli kullanılabilirliği ve talebidir.



Şekil 1.1. Yenilenebilir biyokütle için kriterler

Biyokütle hammadde kaynakları fazlaca türde doğada bulunabilirler. Fakat temel olarak karasal, suda yaşayan ve atıklar olmak üzere üç farklı kategoride sınıflandırabiliriz. Şekil 1.2’de biyokütle kaynaklarının sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Biyokütle hammadde kaynaklarının sınıflandırılması

Bitkisel biyokütle kaynakları olarak; orman ürünlerini, tüm ağaç türlerini içeren enerji ormanlarını, enerji tarımı amacıyla yetiştiriciliği yapılan sorgum, şeker kamışı, mısır gibi C4 enerji bitkilerini ve bunların yanı sıra; buğday, arpa, çavdar, şeker pancarı gibi C3 enerji bitkilerini, yağlı tohumlu bitkileri, bazı su otları ve mavi yeşil algleri sayabiliriz. Enerji üretimi amaçlı ekilen bitkiler ve ormansal atıklar enerji elde

etmek amacıyla değerlendirilebilen bitkisel kaynaklardan bazılarıdır. Bu tür biyokütle hammaddelerinin ısı değeri 3500-4500 kcal/kg arasında değişmektedir [6].

Tablo 1.1. Bazı tarımsal ürünlerin ısı değeri [6]

Ürünler	Atıklar	Birim Isıl Değeri (Mj/kg)
Buğday	Saman	17,9
Arpa	Saman	17,5
Çavdar	Saman	17,5
Yulaf	Saman	17,4
Mısır	Kabuk	18,5
Pirinç	Saman	16,7
Tütün	Sap	16,1
Pamuk	Sap	18,2
Ayçiçeği	Sap	14,2
Soya	Saman	19,4



Şekil 1.3. Bazı biyokütle hammaddeleri

Hayvansal gübre enerji elde etmek amacıyla kullanımı geçmiş yıllardan beri bilinen bir yöntemdir. Hayvansal gübrenin Anadolu'da konvansiyonel yöntemlerle değerlendirilip, samanla karıştırıldıktan sonra kurutulması sonucunda elde edilen tezeğin köylerde yakacak olarak kullanılması çok yaygın ve köylüler için ekonomik bir yöntemdir. Ayrıca gübrenin fermentasyon sonucu üretiminden elde edilen biyogaz(metan gazı ağırlıklı) ülkemizde ve dünyada kullanımı oldukça yaygın bir

enerji formudur. Biyogazın ısı değeri, karışımdaki metanın oranına göre değişerek 1800 ile 27600 kJ/m³ arasında değişmektedir [6].

Çöp deponi alanlarındaki, kentsel ve endüstri kaynaklı atıkların, atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurlarının fermente edilerek metana dönüştürülmesiyle de biyogaz elde edilir. Elde edilen biyogazın doğal gaz dağıtım sisteminde kullanılması, gaz temizleme işleminin yüksek maliyetli oluşu nedeniyle ülkemizde pek uygulanmamaktadır. Avrupa da bu yöntemin örnekleri mevcuttur. Depolama alanlarından oluşan 1 metreküp biyogazın ısı değeri ise çöpün içeriğine bağlı olarak 17- 28 MJ/Nm³ aralığında değişmektedir [6].

Tablo 1.2. Biyokütle kaynaklarının fiziksel ve kimyasal içeriği [7]

	Odun	Tahıl	Kentsel Atık	Hayvansal Atıklar (Gübre)
Karbon(%)	50,0-53,0	45,0	47,6	35,1
Hidrojen (%)	5,8-7,0	5,8	6,0	5,3
Azot(%)	0-0,3	2,4	1,2	2,5
Kükürt(%)	0-0,1	0	0,3	0,4
Oksijen(%)	38,0-44,0	42,5	32,9	38,7
Uçucu Madde(%)	77,1-87,0	80,0	77,0	76,5
Sabit Karbon(%)	13,0-21,0	0	11,0	0
Kül(%)	0,1-2,0	4,0	12,0	23,5
Nem(%)	25,6-60,0	16,0	20,0	7,0-35,0
H/C Oranı	1,4-1,6	1,5	1,5	1,8
Isıl Değer (MJ/Kg) (Kuru)	19,8-21,0	16,7	19,0	13,4

1.1. Türkiye’de Biyokütle Enerjisi

Türkiye’de ki biyokütle enerji hammaddeleri, tarımsal atıklar, ormansal atıklar, organik şehir atıkları ve hayvansal kaynaklı atıklardan oluşmaktadır. Türkiye’nin faydalı enerjiye önülebilen biyokütle enerjisi potansiyeli yaklaşık olarak 18 MTep olup odun ve ormansal kesim atıklarından enerji üretimi potansiyeli yaklaşık olarak 8 MTep olarak tahmin ediliyor. Orman artıkları, Türkiye’nin enerji üretiminin yaklaşık 2 MTep’ini karşılama potansiyeline sahiptir [7].

Aşağıdakiler potansiyel biyokütle enerji kaynaklarıdır;

- Ormansal kesim artıkları
- Budama bakımında oluşan artıklar
- Aralama kesimlerinden oluşacak atıklar

- Döküntüler ve süceyrat
- Saha temizliğinden elde edilen biyokütle
- İnce dallar, kabuk ve kozalaklar

1.2. Biyokütle Enerjisi Dönüşüm Yöntemleri

Biyokütle, birkaç farklı işlem kullanılarak faydalı enerji formlarına dönüştürülebilir. Dönüşüm sürecinin seçimini etkileyen faktörler şunlardır; biyokütle besleme stoğunun türü ve miktar, enerjinin arzulan şekli, yani son kullanım gereksinimleri, çevresel standartlar, ekonomik koşullar ve projeye özgü faktörler. Pek çok durumda, proses rotasını belirleyen enerjinin gerekli olduğu formdur, ardından mevcut biyokütle türleri ve miktarları takip eder [1].

Günümüzde ticari olarak en çok aşağıdaki 2 çevrim yöntemi kullanılmaktadır;

- Doğrudan Yakma
- Anaerobik Fermantasyon (Biyogaz)

1.2.1. Doğrudan yakma

Biyokütlenin hava ile birlikte uygun ortamlarda yakılması, çeşitli ekipman öğelerini kullanarak biyokütle de depolanan kimyasal enerjiyi ısıya, mekanik güce veya elektriğe dönüştürmek için geniş bir çıktı aralığında kullanılır. Örneğin sobalar, fırınlar, kazanlar, buhar türbinleri, turbo-jeneratörler, vb. Biyokütlenin yanması, 800-1200 derece sıcaklıklarda sıcak gazlar üretir. Her tür biyokütleyi yakmak mümkündür, ancak pratikte yanma, yalnızca nemsiz biyokütle için mümkündür. Biyokütle önceden kurutulmuş değilse ($nem < \% 50$) yüksek nem içeriğine sahip biyokütle, biyolojik dönüşüm işlemlerine daha uygundur. Ya da ön kurutma işlemine tabi tutulup içeriğindeki nem oranı düşürüldükten sonra yakılmalıdır [8].

Yanma tesisinin ölçeği çok küçük ölçekli (örneğin evsel ısıtma için) ile 100–3000 MW arasındaki büyük ölçekli sanayi tesislerine kadar uzanmaktadır. Kömür yakıtlı elektrik santrallerinde biyokütlenin birlikte yakılması, bu tesislerin yüksek dönüşüm verimliliği nedeniyle özellikle ilgi çekici bir seçenektir [9].

Biyokütle yanma enerji santralleri için net biyoenerji dönüşüm verimleri %20 ile %40 arasında değişmektedir. Daha yüksek verimler 100 MWe'in üzerindeki

sistemlerde veya biyokütle kömür yakıtlı elektrik santrallerinde birlikte yakıldığında elde edilir [10].

Yakma yönteminin avantajları şunlardır;

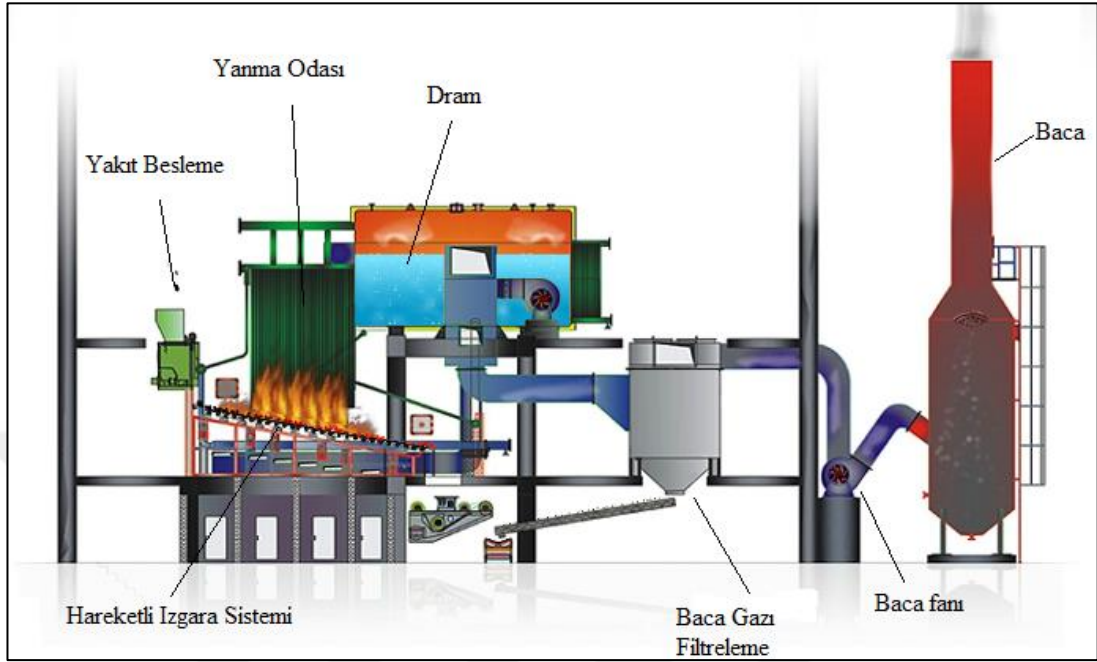
- Yakma işlemi sonucunda, giren hammadde miktarında ağırlık ve hacimsel olarak %80 azalış olur.
- Diğer dönüşüm metotlarıyla kıyasla, kapladığı alan ihtiyacı en az olan metottur,
- Atık toplama noktalarına yakın bir yere kurulması sonucunda, nakliye (taşıma) maliyetlerinin düşürülmesini sağlar,
- Elektrik enerjisi ve termal enerji üretir
- Fosil yakıtların sebep olduğu sera gazı etkilerini azaltır.
- Yakma yönteminin bazı dezavantajları şunlardır;
- Enerji tesisi için yapılacak ilk yatırım ve işletme maliyetleri fazladır,
- Nitelikli ve kalifiye personel ihtiyacı fazladır,
- Yerleşim mekanları içerisinde ya da yakınında bulunan tesisler için kontrol edilemeyen baca kaynaklı emisyon gazları halk sağlığını olumsuz etkileyebilmektedir [11].

Günümüzde biyokütle atıkları enerjiye dönüştürmek için en uygun yakma teknolojisi, ızgaralı tip ve akışkan yataklı kazan olarak görülmektedir. Her iki teknolojiye kendine has avantaj ve dezavantaj barındırmaktadır. Genellikle iri parçacıklı biyokütle atıklar için ızgaralı tip kazanlar tercih edilirken, daha küçük boyutlarda ve standardizasyonu sağlanmış yakıtlar için ise akışkan yataklı kazanlar daha ön plana çıkmaktadır.

Izgaralı Kazanlar

Katı yakıtlı yanma sistemlerinde uygulanan hareketli ızgaralı yakma tesisin ısı ihtiyacına göre oransal olarak çalışma imkanı sağlar ve yüksek verimli bir yakma teknolojisidir. Yanma ızgaralarında içinde bulunduğu ön ocak içinde gerçekleşir. Yanmanın oluşturduğu sıcak gazların iletimi ocak içinde radyasyon ile, kazanda ise konveksiyon ile sağlanır. Yanma sonucu meydana gelen baca gazı ise kazan içerisinden geçer, kurum tutucularda kurum ve diğer partiküller baca gazından ayrılır. Hava kalitesini koruma yönetmeliğinin izin verdiği baca gazı değerlerine

uygun olarak bacadan atılır. Şekil 1.4'te örnek bir ızgaralı kazanın çalışma prensibi gösterilmiştir [12].



Şekil 1.4. Izgaralı kazan çalışma prensibi

Kazan teknolojilerinde ızgaralı yakma sistemleri genel olarak “sabit yatak” adı ile bilinir. Genel olarak ızgara ateşlemeli üniteler yüksek neme, yüksek kül içeriğine ve değişken parçacık boyutlarına sahip olan ancak ince parçacıklar için daha düşük bir limite sahip yakıtlar için uygundur. Izgara teknolojisi, 50 MWe'ye kadar olan biyokütle santrallerinde kullanılmaktadır.

Biyokütle partiküllerinin büyüklüğü ve yanma kalitesi, ızgara ateşlemesinin tipine karar verirken dikkate alınmalıdır. Büyük parçacıklar ızgara sonunda kül uzaklaştırılmadan önce yanması için yeterli zamana sahip olmalıdır. Yakıt yatağından salındığında küçük parçacıklar yanmamış parçacıklarla ve karbon monoksit emisyonlarıyla daha yüksek miktarda uçucu küle neden olabilir.

Yakıt külünün erime sıcaklığı, kül içeriği ve yanma gazı sıcaklıkları da dikkate alınmalıdır. Yüksek gaz sıcaklıkları ve düşük kül erime sıcaklıkları, yakıtın yandığı bölgede ciddi şekilde cüruf oluşmasına neden olabilir. Seçilen ideal ızgara tipi ve ebadı yakıt tipini, ebatını ve enerji çıkışını (ısı, güç) dikkate almalıdır. Endüstriyel

biyokütle ünitesinin performansı böylece kesintisiz ve sorunsuz çalışmayı sağlayacak şekilde optimize edilebilir [13].

Günümüzde biyokütle kazanlarında 3 farklı tipte ızgara teknolojisi kullanılmaktadır;

- İleri İtimli Hareketli Izgaralar
- Titreşimli Izgaralar
- Döner Tip Hareketli Izgaralar



Şekil 1.5. Hareketli ızgara sistemi

Akışkan Yataklı Kazanlar

Akışkan yatak yakma biyokütle yakıtlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. İki akışkan yataklı yakma teknolojisi mevcuttur; kabarcıklı akışkan yatak (BFB) ve dolaşimli akışkan yatak (CFB). Her ikisi de kanıtlanmış teknolojilerdir. BFB kazanları genellikle düşük ısıtma değerine ve yüksek nem içeriğine sahip yakıtlarla küçük ölçekli uygulamalarda tercih edilir. CFB kazanları normalde daha büyük uygulamalarda kullanılır [14].

Her iki tip de geniş bir biyokütle yelpazesi için kullanılabilir ve özellikle yüksek nem içeriğine ve yüksek kül içeriğine sahip yakıtlar için uygundur. Akışkan yataklı kazanlar, saman gibi yüksek alkali içeriğe sahip yakıtlar için kullanılır [14].

Yanma sonucu meydana gelen kül ve uçucu kül atıkları, çimento ile karıştırılarak ya da asfalt veya dolgu malzemesi niteliğinde kullanılarak bertaraf edilmiş olur. Bertaraf etmenin bir başka yöntemi ise önce çok yüksek sıcaklıklarda eritip, ardından tekrar soğutarak katılaştırmaktır. Katılaştıran yanma atıkları, yollarda parke olarak döşenebilir veya arazilerin ıslahında da kullanılabilir.

1.2.2. Anaerobik fermentasyon (Biyogaz)

Biyogaz, ısınma ve enerji elde etmek maksadı ile kullanılan bir tür yanıcı bir gazdır. Biyogaz; doğalgaz ve yanıcı diğer gazlardan farklı olarak hayvansal ve bitkisel organik maddelerin işlenmesi sonucunda elde edilir.

Hayvan gübreleri, gıda endüstrisi atıkları, çürümüş bitkisel ürünler, mısır veya pancar gibi yüksek enerji içeren bitkiler, yağlar kısaca her türlü organik ürün ve atıklar, biyogaz tesislerinde hammadde olarak kullanılabilir.

Biyogaz tesislerinde çıktı olarak üç çeşit çıktı alınır;

I. Elektrik enerjisi

II. Isı enerjisi

III. Organik gübre

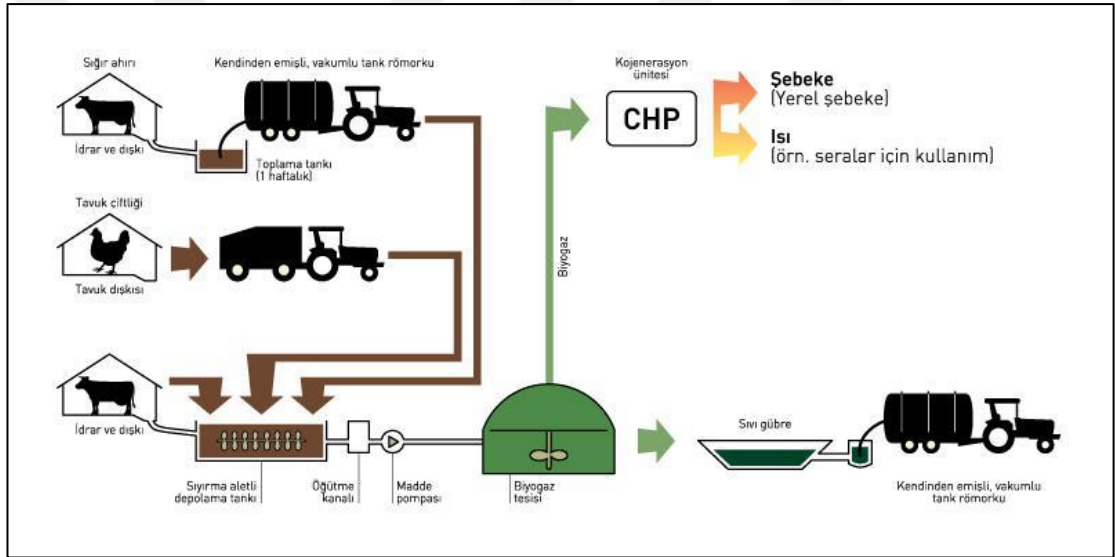
Biyogaz tesisinin temel çalışma prensibi aşağıdaki gibidir;

Biyogaz tesisinin bulunduğu konum çok önemlidir. Tesise olabildiğince en yakın noktalardan ve mümkün olan en ucuz maliyetle temin edilen gübre ve diğer organik hammaddeler öncelikle homojen olarak karıştırılır. Karışım içindeki organik olmayan malzemeler ayrıştırılır ve karışım mümkün olduğunca fiziksel ve hücre bazında parçalanarak ufalanır ve çürütücü tanklara beslenir.

Bakteriler ve diğer bazı mikro organizmalar kullanılarak çürütücü içindeki biyokütle ayrıştırılarak fermentasyon işlemi başlatılır. Fermentasyon sürecinin çıktıları olarak, oksijen, metan (% 40-65) ve karbon dioksit (% 28-60) oluşur.

Biyogaz prosesi sonucu üretilen gazın kalitesi biyogaz içerisindeki metan oranına bağlıdır. Oluşan biyogaz gaz motorlarında yakılarak elektrik ve ısı enerjisine çevrilir. Üretilen elektrik şebekeye verilebilir. Biyogazın yanması sırasında oluşan ısı tesis yakınlarında bulunan konutların, seraların, çiftliklerin veya ahırların ısıtılması amacıyla da kullanılabilir.

Fermente edilmiş biyokütle atıklar ise tarımsal alanda kaliteli organik gübre olarak kullanılabilir. Hem katı hem de sıvı haldeki organik gübreler, bitkiler tarafından rahat bir şekilde topraktan emilebilir. Ayrıca fermente ürün oldukları için az yakıcı ve kokusuzdur. Hastalık yapıcı bakteri ve parazitlerin büyük bir çoğunluğu ise yok edilmektedir.



Şekil 1.6. Biyogazdan elektrik üretim şeması [15]

1.3. Ülkemizdeki Biyokütle Enerjisi Teşvikleri ve Güncel Kurulu Santraller

Ülkemizde üretim lisansı sahibi tüzel kişilere, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisleri için Yenilenebilir Enerji Kaynak (YEK) Belgesi verilmesi ile YEK Destekleme Mekanizmasının (YEKDEM) kuruluşu ve işleyişine ilişkin usul ve esaslar belirlenmiştir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunun (EPDK) “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belgelendirilmesi ve Desteklenmesine İlişkin Yönetmeliği” 01.10.2013 tarihinde yayımlanmıştır [16].

Yönetmeliğe göre, YEK belgesi, lisansı kapsamındaki yenilenebilir enerji kaynağından üretilebilir elektrik enerjisinin ulusal ve/veya uluslararası piyasalarda

satışında kaynak türünün belirlenmesi ve takibi, lisansı kapsamındaki üretim tesisinde bu yönetmelik kapsamındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi için YEKDEM kapsamındaki uygulamalardan yararlanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisinde üretilen elektrik enerjisinin emisyon ticareti kapsamındaki piyasalarda satışında kaynak türünün belirlenmesi ve takibi için kullanılması amacıyla verilecektir [17]. YEKDEM fiyatları Tablo 1.3’de minimum ve maksimum değerleri ile verilmiştir.

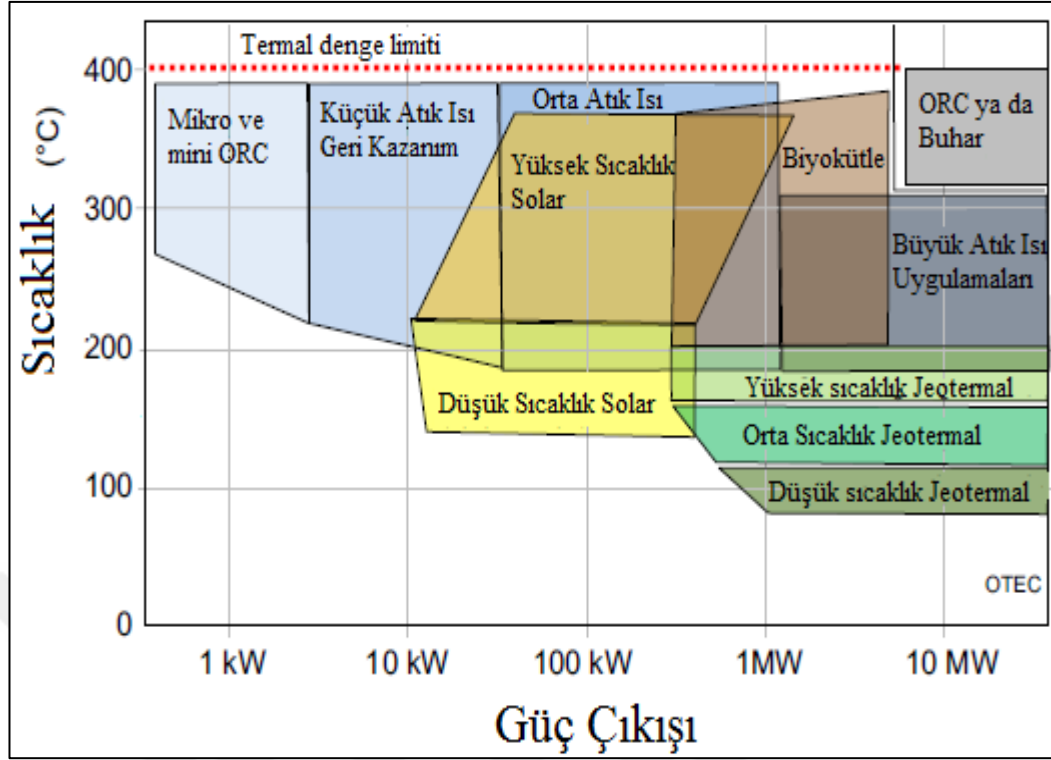
Tablo 1.3. Yenilenebilir enerji teşvik fiyatları [16]

	Alım Garantili Fiyat (UScent/kWh)	Ek, Yerli Ekipman teşviği maksimum (UScent/kWh)	Maksimum Toplam Fiyat (UScent/kWh)
Hidroelektrik	7,3	2,3	9,6
Rüzgar	7,3	3,7	11
Fotovoltaik Güneş Enerjisi	13,3	6,7	20
Konsantre Güneş Enerjisi	13,3	9,2	22,5
Biyokütle	13,3	5,6	18,9
Jeotermal	10,5	2,7	13,2

1.4. Organik Rankine Çevrimi

Rankine Çevrimi ısıyı işe dönüştüren bir termodinamik çevrimdir. Bu dönüşüm, çevrim akışkanı olarak genelde su kullanan kapalı bir çevrimle sağlanmaktadır. Su bazlı Rankine Çevrimi, dünya elektrik üretiminin yaklaşık 85%'ine karşılık gelmektedir [18]. Termik bazlı enerji üretim metotlarının başında gelen klasik Rankine Çevrimi, son yıllarda belirli güç mertebelerinde Organik Rankine Çevrimi ile kıyasıya yarış içerisine girmeye başlamıştır. Organik Rankine Çevrimi'nin çalışma prensibi ise, termal enerjiyi mekanik enerjiye dönüştüren, sonra bu mekanik enerjiyi bir jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine çeviren Rankine Çevrimiyle aynı şekilde çalışır.

Akışkan olarak su kullanarak buhar üretmek yerine ORC sistemi, daha düşük türbin dönüş hızı ve düşük basınç sağlayan, metal parçalar ile çarklarda aşınma yapmayan, sudan daha yüksek bir moleküler kütleyle sahip olan bir organik akışkanı kullanarak bu çevrimi tamamlamaktadır. Şekil 1.7’de ORC sisteminin kullanım sıcaklıkları ve kullanıldığı alanlar ile ilgili şema verilmiştir.

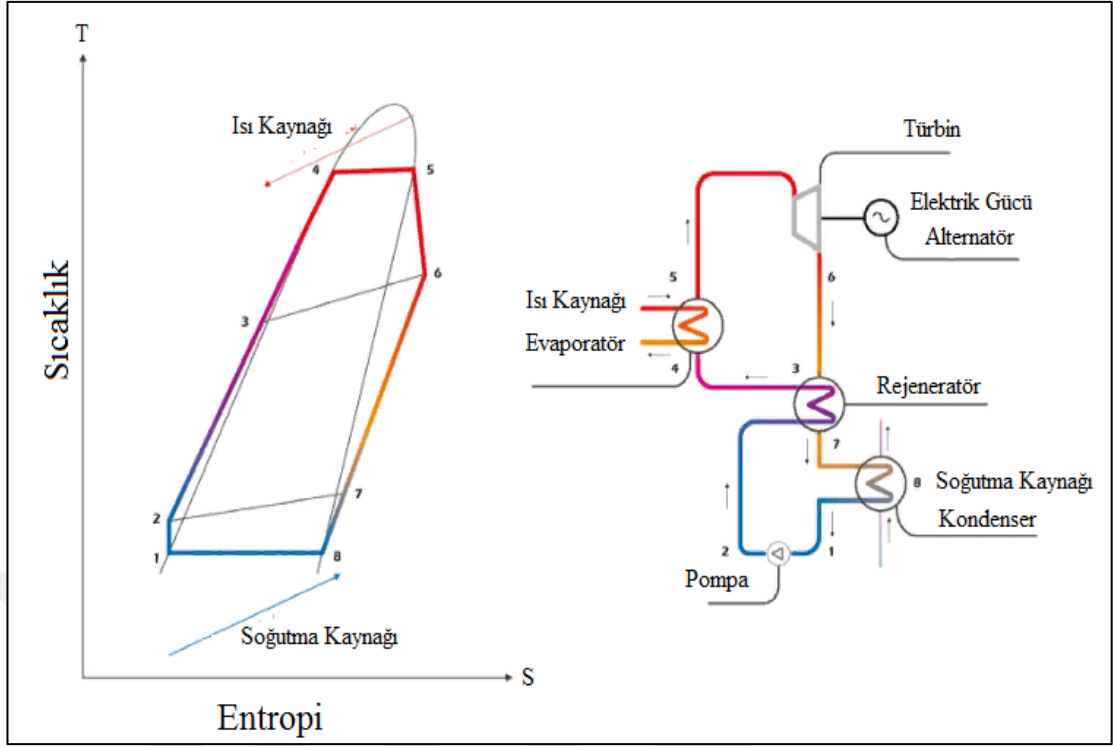


Şekil 1.7. Uygulamalara göre ORC sıcaklık güç şeması

ORC sisteminin çalışma prensibini T-S grafiği üzerinden daha teknik olacak şekilde anlatacak olursak; ORC turbo jeneratörü orta-yüksek ısıda termal yağ kullanarak buharlaştırıcıda uygun işletim akışkanına ön ısıtma yapar ve buharlaştırır (4>5). Organik akışkan buharı direkt olarak elektrik jeneratörüne bağlanmış olan türbini döndürür (5>6) ve sonucunda elektrik gücü elde edilir.

Egzoz buharı rejeneratörden geçerken (6>7) organik akışkanı ısıtır (2>3), ardından kondenserde yoğunlaşır ve soğutma devresinde soğutulur (7>8>1). Sonra, organik işletim akışkanı rejeneratöre ve buharlaştırıcıya pompalanarak (1>2) kapalı devre işletimi tamamlar (Şekil 1.8) [18].

Genellikle yüksek sıcaklık ORC uygulamalarında, ısı taşıyıcı olarak termal yağ tercih edilmektedir. Fakat bunun yanı sıra, doymuş buhar ya da kızgın su alternatifleri de son yıllarda üreticiler tarafından tercih edilmektedir. Termal yağın tercih edilmesinin sebeplerinden bazıları; su buharına ve kızgın suya göre özgül ısı değerinin daha yüksek olması ve aralıklı yakıt kesintilerinde, mevcuttaki ısını belli bir süre daha koruyabilmesidir. Stabil sıcaklıklarda çalışmayan sistemler için, termal yağ daha kararlı bir çalışma ortamı sağlamaktadır.



Şekil 1.8. ORC sıcaklık - entropi diyagramı

1.4.1. ORC tarihçesi

Organik Rankine Çevrimi (ORC) gelişiminin tarihi, 19. yüzyılın başlarından ORC güç sistemlerinin 21. yüzyılın enerji endüstrisinde önemli bir niş pazar haline gelmesine kadar yayılmaktadır. ORC tarihi, buhar motorlarının deneysel gelişimi ile iç içe geçmiştir. Carnot'un, termodinamiğin temelini oluşturan deneysel gelişimi, anlama çabası ve bununla birlikte teori ve pratik arasındaki kopukluk onlarca yıl boyunca devam etmiştir. Bu bölümde orijinal ve sürdürülebilir ticarileşmeye yol açan ORC gelişmelerini ele alacağım.

University of Naples Çalışmaları

Gerçek bir türbin sisteminde organik bir sıvıyı kullanan ilk kişi, Prof. Luigi D'almelio (1935) olmuştur. Aynı zamanda, sadece buhar basıncına odaklanmak yerine rpm ve türbin aşamalarının sayısını azaltmak için yüksek moleküler kütle akışkanların avantajlarını düşünen ilk kişidir. D'Amelio, 1930'larda Napoli Üniversitesi'nde etil klorür kullanarak deneyler yaptı. D'Amelio'nun çalışması 1935'te güneş enerjisiyle çalışan küçük bir pompanın ortaya çıkmasına yol açtı. Daha sonra, 1940'larda D'Amelio, Citara, Ischia Adası'nın etilen iş sıvısı olarak

kullanıldığı bir jeotermal tesis tasarladı. Tesis birkaç yıl çalışmıştır ve 1950'lerin başında görevinden alınmıştır [19].

İsrail Uluslararası Fizik Laboratuvarı Çalışmaları

1958-1961 yılları arasında, 1955'te başlatılan güneş enerjisinden yararlanma programının bir parçası olarak, Kudüs'teki İsrail Ulusal Fiziksel Laboratuvarı'nda, küçük bir motor projesi çerçevesinde itici akışkan seçimi için net kriterler geliştirilmiştir.

D'Amelio'nun moleküler kütle değerlendirmesinden sonra (buhar basıncına ek olarak), Tabor ve Bronicki tarafından diğer akışkan özelliklerine dikkat edildi. Küçük motorlardaki Carnot verimliliği üzerine yapılan çalışmalar ve verimliliği önemli ölçüde azaltan kayıpların analizi sonucunda, türbinin bir pistonlu motora göre tercih edilmesi sonucuna varılmıştır. Daha sonra sistemde kullanılacak sıvının fiziksel özellikleri, ısı kaynağının ve soğutma sisteminin özelliklerine ve ayrıca güç çıkışına bağlı kriterlere göre seçilmiştir [20].

Ne yazık ki, 1950'lerde sıvıların ayrıntılı özellikleri yalnızca sınırlı sayıda akışkan için mevcuttu. Akışkanların çoğu için sadece seyrek veriler mevcuttu. Mevcut olan şey, birkaç veri noktasından bir dizi koşuldaki özellikleri hesaplama yöntemleriydi. Akışkanlar için günümüzdeki kadar fazla özellik bilinmiyordu [21].

Hesaplamaları yapmak çok fazla zamanlarına mal oluyordu ve bu sistem için akışkan seçiminin hazır bilgiler doğrultusunda olması kanısına varılmıştır.

Yapılan çalışmalar ardından 3 kW'lık bir türbin, mono-klorobenzen kullanılarak tasarlanıp ve üretilmiştir. Türbin güneş kolektörleri ve ısı depolamayı içeren bir güneş santralının parçasıydı ve 1961'de Roma'da Birleşmiş Milletler Yeni Enerji Kaynakları Konferansı'nda gösterilmiştir (Şekil 1.9) [22]. Bu çalışma Ormat'ın kurulmasına sebep olmuştur. Ormat günümüzde ORC türbin üreten firmalar arasında, özellikle jeotermal enerji bazında lider konumdadır. Kendine has tasarımları olan bu şirket ORC pazarında geçmiş yıllardan beri, büyük projelere imza atmıştır. Ayrıca ülkemizde bulunan jeotermal enerji santral projelerinin bir çoğunda Ormat üretimi türbinler tercih edilmiştir.



Şekil 1.9. 3 kW ORC Sistemi (1961) [22]

Politecnico di Milano Çalışmaları

ORC alanındaki ilk İtalyan aktiviteleri, 1970'lerde Prof. G. Angelino (1984) 'un bilimsel rehberliğinde Politecnico di Milano'da başlamıştır. Ennio Macchi ve Mario Gaia gibi bilim adamlarından oluşan bir ekipte başta otomotiv, uzay ve güneş uygulamaları adına Rankine döngüsünü güçlendirmek için su yerine organik sıvılar kullanma olasılığını incelenmiştir. İlk prototiplerin gerçekleştirilmesi, Mario Gaia'nın ailesine ait mekanik bir dükkan olan Gemmindustria (Milano) tarafından gerçekleştirilmiştir.

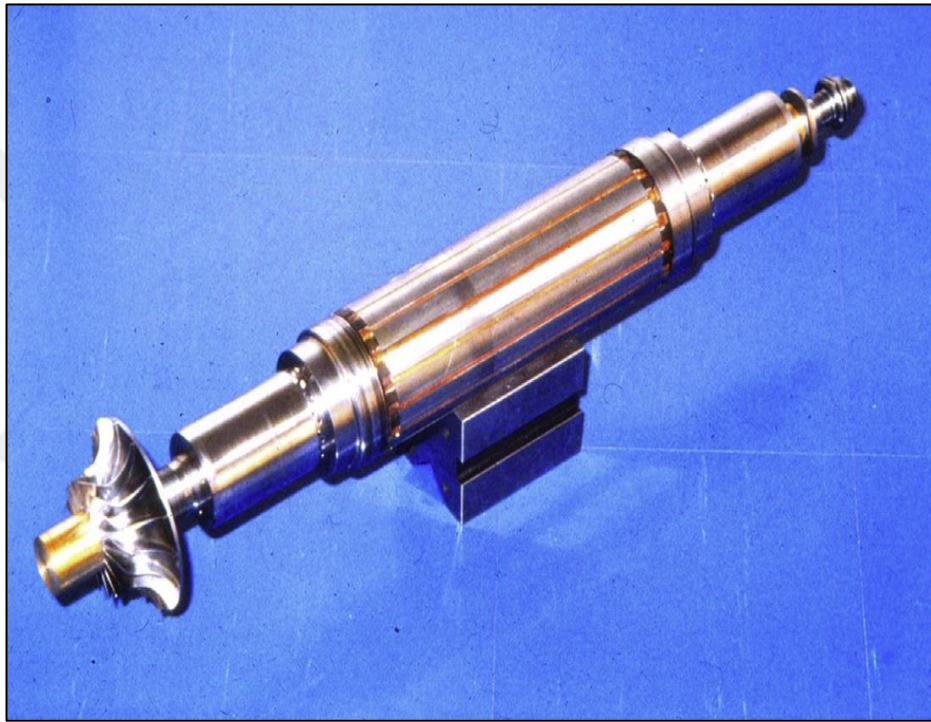
İlk türbin (1976) 4 kW enerji çıkışına sahipti. Isı kaynağı olarak sıcak su (90-70 C) seçilmiş ve ısı emici olarak da soğuk su (15-25 C) seçilmiştir, çalışma sıvısı ise doymuş bir döngüde perkloretilen olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, çok düşük güç çıkışında bile yüksek verimli, düşük mekanik stresli bir türbin tasarlamının mümkün olduğunun kanıtıydı. Ardından 1978 yılında orta sıcaklıktaki bir ısı kaynağından Flutec PP3 (C8F16) akışkanı kullanılarak 35 kw güç elde etmeyi başarmışlardır [23].

Bu çabalar 1980 yılında Turboden'in Mario Gaia tarafından kurulmasına yol açarken, Angelino ve Macchi, Turboden'i bilimsel araştırmalarla desteklemeye devam etmiştir. Daha sonra Angelino ve Invernizzi (1993), tamamen toksik olmayan, orta derecede yanıcı ve 400 °C'ye kadar çalışma sıcaklıklarına dayanıklı olan bir

siklik polimetilsiloksan ailesini keşfetmiş ve test etmiştir. Günümüzde Turboden firması ORC üreticileri arasında en büyük oyuncularından birisidir [23].

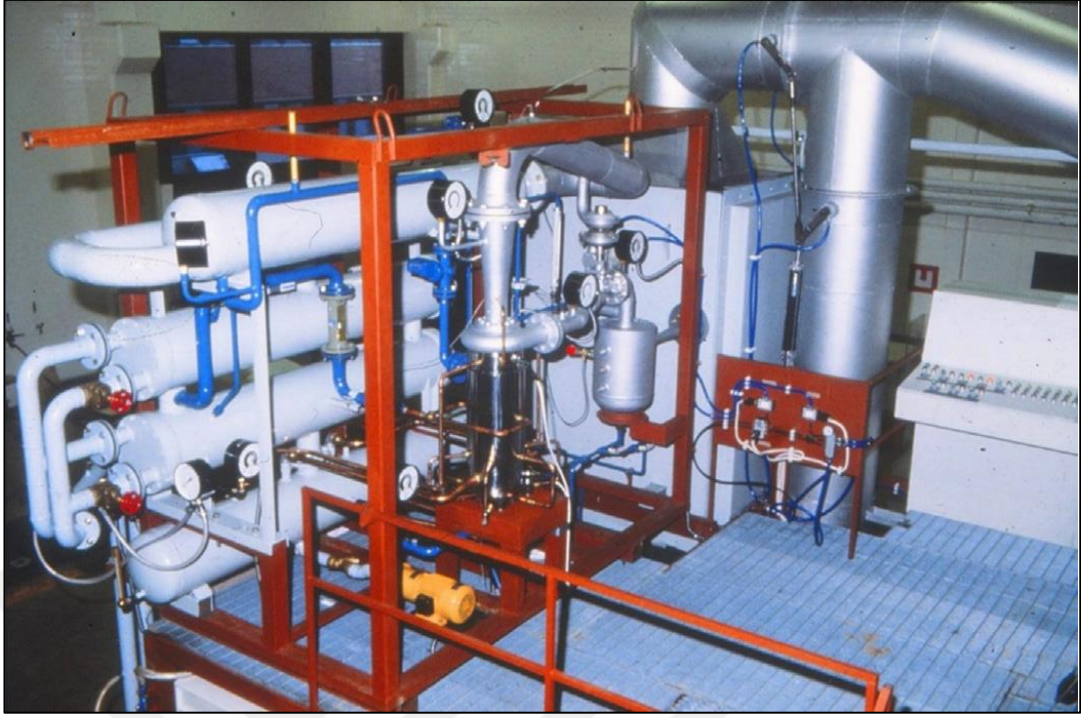
Lappeenranta Teknoloji Üniversitesi Çalışması

1980'lerin başlarından itibaren Profesör Jaakko Larjola türbin, jeneratör ve pompanın hareket eden sıvı yatakları tarafından desteklenen aynı shaftı paylaştığı (Şekil 1.10), yüzlerce kW aralığında sızdırmazlık sağlayan yüksek hızlı hermetik turbojeneratörlerin geliştirilmesine öncülük etmiştir [24].



Şekil 1.10. Jeneratör ve besleme pompalı radyal türbin, 1984[24]

1983-85 döneminde ilk R114 akışkanı kullanılan 100 kW'lık ORC ünitesini geliştirmiş ve test etmişlerdir. Bu türbin 30000 devir/dk hızında dönerek, aynı zamanda yağlamasını da kullandığı akışkan tarafından yapıyordu (Şekil 1.11). Ayrıca bu türbin çeşidi, günümüzde ticari olarak Calnetix markası tarafından halihazırda kullanılmaktadır. Türbin ve jeneratör ünitesinin aynı mil üzerine bağlı olduğu bu tasarım maksimum 125 kW güçlerinde elektrik üretimi sağlamaktadır. Daha yüksek mertebelerde enerji üretimi sağlayabilmek için, makinaların seri şekilde bağlanması gerekmektedir. Megawatt bazındaki enerji üretim amacıyla bu tasarımları kullanmak günümüzde pek ekonomik olmamaktadır [24].



Şekil 1.11. 100 kW komple ORC sistemi [24]

Daha sonra 1986-89 döneminde atık ısı kullanarak 75 kW güç üreten ikinci bir prototip türbin tasarlamışlardır. Bu sistemde ilkinde olduğu gibi ORC'de kullanılan akışkan tarafından yatak rulman yağlaması yapılıyordu.

Üçüncü bir prototip ise, bir denizaltı işletimi için 1990 yılında yapılan 25 kW'lık hermetik bir ORC'dir [25]. Bu gelişmelerde edinilen bilgiler daha sonra 2000'li yılların başından itibaren Hollanda'daki Tri-O-Gen Şirketi tarafından pazarlanan ticari birimlerde kullanılmıştır [25].

Tarihteki Diğer Çeşitli ORC Projeleri

1960'larda Amerika Birleşik Devletleri'nde Aerojet General, Rockeddyne, General Elektrik (GE) ve Sundstrand Aviation Corp. tarafından başlatılan bir solar sistem geliştirilmiştir. Sundstrand, iki 6600 kW dizel jeneratör setinin atık ısını kullanarak 600 kW'lık bir tesis geliştirmiştir [26]. Kullanılan akışkan Toluen idi ve bu şekilde dört tesis inşa edildi. Tesislerden birisi 8000 saat çalıştı ve 4.000.000 kWh enerji üretti. Daha sonra Mechanical Technology Inc. bir süredir Torrance Kaliforniya'da işletilen 600 kW'lık hava geçirmez şekilde yalıtılmış bir ünite inşa etmiştir [27].

Thermo Electron Corporation, FL-85 adında % 85 trifloroetanölü, çalışma akışkanı olarak kullanan bir ORC sistemi geliştirdi. Bu uygulamanın amacı bir Mack kamyonundaki dizel motor egzoz gazlarından ısı geri kazanımıydı. ORC'li bu kamyon, karayolu üzerinde 25.000 milden daha fazla bir süredir kullanıldı ve ORC'li kamyonda %15'in üzerinde yakıt tasarrufu sağlanmıştır [28].

1975 yılında Barber-Nichols 91°C'de ısı sağlayan düz plaka kolektörlerine bağlı Freon 113 kullanarak 1 kW'lık bir ORC inşa etmiştir. Daha sonra, 1985 yılında, evaporatif kondenser soğutma teknolojisi kullanan bu iki türbinle 700 kW gücünde bir jeotermal tesis inşa etmiştir (Şekil 1.12). Bu tesis 2015 yılı itibariyle halen faaliyet göstermektedir [29].

1970'lerin ortasında, GE, Mobil Evler için 3 kW'lık bir ORC yakıtla çalışan ünite inşa etti. Genişletici ve diğer soğutma donanımı olarak bir soğutma kompresörü kullandı. Proje hiçbir zaman laboratuvar testlerinin ötesine geçemedi ve terk edildi.

Birleşik Krallık'ta, ORC çalışmaları 1955'te başlamıştır. 150 HP (110 kW) gösteri sistemi Clarke Chapman ve Co. [30] tarafından gelişmelerden vazgeçilmeden önce kurulmuş ve test edilmiştir.

1979'da Fransız Bertin şirketi Meksika'da FC75'i kullanarak 50 kW'lık bir güneş enerjisi ORC'si üretti ve 1990'da Endonezya'da N-pentan kullanan 2,5 MW'lık bir su soğutmalı tesis inşa etmişlerdir [31].



Şekil 1.12. Barber-Nichols 700 kW üniteler, 1985 [31]

1980 yılında Idaho Raft Nehri'nde 143°C tuzlu su kullanılarak 5 MW'lık bir fabrika inşa edildi. Tesisin türbin arızaları ve genel performansının düşük olması nedeniyle çalışması durduruldu [32].

1982'de Fluor Engineers, Heber, California'da brüt 70 MW'lık bir tesis kurdu, tek bir türbin ve akışkan olarak %10 izopentan ile izobütan karışımı kullandı. Girişteki tuzlu eriyik suyun sıcaklığı 182 derece suyla soğutuluyordu. Parazitik kayıpların fazlalığı, özellikle de sıvı pompasından 23,4 MW'lık kayıp (%33) ve çok sayıda mekanik ekipman arızası nedeniyle tesis hizmet dışı bırakıldı [32].

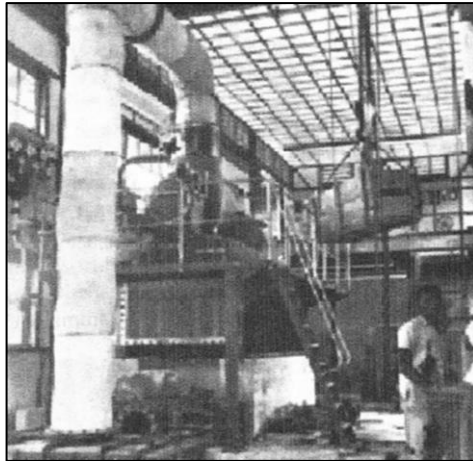
1984 yılında, Fransız şirketi EDF, 15,5 MW'lık bir buhar döngüsü ve 5 MW'lık susuz bir amonyak taban ünitesinden oluşan 20 MW'lık bir hibrit tesisi işletmiştir [33].

1.4.2. Dünyadaki ilk ticari ORC tesisleri

1952'de Kongo'daki Kiabukawa'da küçük bir 200 kW ORC ünitesi (Şekil 1.13) bir kaynaktan 91°C'de su kullandı ve birkaç yıl boyunca bir madene elektrik gücü sağlamıştır [32].

1966 yılında, İsrailli Ormat firması 0,6 kW solar turbo jeneratör (Şekil 1.14), diklorobenzen kullanarak Mali Afrika'da elektriksel bir sualtı sulama pompasına enerji sağlamıştır.

1967, Rusya SSCB'de bulunan Paratuka Kamtchatka'da R12 akışkanı kullanılarak 500 kW'lık bir jeotermal tesis devreye alınmıştır [34].



Şekil 1.13. Kiabukawa 200 kW ORC ünitesi, 1952 [34]

1. 1979 yılında Japonya'daki Kashima Steel Works'te Kawasaki firması Freon 11'i kullanarak [35] proses ısı geri kazanımı için 2900 kW'lık bir ORC sistemi inşa etmiştir. Kimitsu'daki bir başka çelik fabrikasında, Mitsui ve Thermo Electron tarafından, Fluorinol 85 akışkanı kullanarak 11,5 MW'lık bir ORC ünitesi üretilmiştir [36].
2. 1979 yılında İsrail'i Ormat tarafından 150 kW'lık bir solar havuz güç ünitesi kurulmuştur (Şekil 1.15).



Şekil 1.14. Ormat 0,6 kW solar pompa

3. 1984, Perth Avustralya'da güneş kolektörlerinden (Şekil 1.17 ve 1.18) çalışan bir Turboden 35 kW'lık türbin kurulmuştur.
4. 1984 yılında Ormat tarafından Freon 114 kullanılarak ve bir indüksiyon jeneratörü kullanan 600 kW'lık (net) bir jeotermal ORC kurulmuştur (Şekil 1.19). Jeotermal kuyu sıcaklığı 95°C, kondenser için soğutma suyu ise 10-25°C'dir. 2015 yılı itibariyle ünite 31 yıllık sürekli çalışmanın ardından hala tam güçte çalışmaktadır.
5. 1979'da McCabe, East Mesa California'da iki akışkan (izopentan ve izobütan) içeren ORC'yi 12,5 MW'lık bir ORC tesisi inşa etmiştir (Şekil 1.16). Kondenserler için soğutma suyu buharlaşma havuzlarında soğutuldu. Tesis J. Hilbert Anderson tarafından tasarlandı ve York genişleticileri kullanıldı. Daha sonraları tesis sadece birkaç yıl boyunca faaliyet göstermiştir [32].



Şekil 1.15. İsrail'in Ölü Deniz'deki 150 kW güneş enerjisi havuzu ve güç ünitesi (Ormat)

6. 1984'te Ben Holt Şirketi, Rotoflow radyal akış genişleticilerini [37] ve izobütan sıvısını kullanarak Richard Campbell (1989) tarafından tasarlanan prosesiyle hava soğutmalı bir tesis inşa etmiştir. Güç çıkışı 165°C'lik bir tuzlu su sıcaklığından 8 MW netti ve yıllık ortalama hava sıcaklığı 7°C civarındaydı. 1990 yılında, aynı tesise 14 MW'lık yeni birimler ilave edilmiştir. Üç birimin toplam satışları kışın 40 MWnet'in üzerinde gerçekleşmiştir. Birimler, 2015 yılında yenilenene kadar güvenilir bir şekilde çalışmaya devam etmiştir.



Şekil 1.16. McCabe 12,5 MW kademeli ORC, 1979

7. Ben Holt Şirketi, Nevada'daki Reno yakınlarındaki Steamboat'ta iki adet 15 MWnet ünite daha tasarlamıştır. Ben Holt Co.'nun Mammoth jeotermal ikili çevrim enerji santralinin proses tasarımının ilk aşamalarında, genel duygu, geleneksel su soğutması kullanan bir tesisin en iyi olacağı yönündeydi. Su soğutmalı bir tesisin ilk sermaye maliyeti daha düşük olurdu, ancak hava soğutmalı kondenser seçimine yol açan bir dizi faktör vardır.



Şekil 1.17. Avustralya'daki güneş kolektörlerinden çalışan 35 kW dört kademeli türbin, 1984 Perth

Önemli bir husus, santralin bulunduğu yeri. Mamut Gölleri, Kaliforniya'da kışın dünya standartlarında yıl boyunca kayak yapılan bir dağ kayak tesisi alanıdır. Bu nedenle, tesisin görsel etkisini en aza indirmek önemliydi. Hava soğutmalı kondenserler, görünüm açısından daha düşük bir profile sahip olması sebebiyle, oldukça görünür bir soğutma kulesi olan su soğutmalı bir tesise göre daha iyi bir avantaja sahiptir. Soğutma kulesi buharı ile ilgili ikinci bir endişe ise, kondenserlerin yakınlardaki karayolunda su damlacıkları bırakması ve bunun da potansiyel olarak kış aylarında buzlanma sorunlarına yol açmasıydı.

Diğer hususlar, su soğutmalı bir tesis için devam eden kimyasal arıtma maliyetinin yanı sıra bölgede iyi bir soğutma suyu kaynağının bulunmamasını içeriyordu. Bu son değerlendirme, tesis işletmeye alındığından beri Kaliforniya'nın karşılaştığı şiddetli kuraklık koşullarında özellikle önemli olduğunu kanıtladı.



Şekil 1.18. 35 kW ORC'ye kızgın yağ sağlayan konsantre güneş kollektörleri, 1984

8. 1970'lerde test edilen GM ve Thermo Electron üniteleri hariç, otomotiv uygulamaları için, Cummins, Honda, Bosh ve diğerleri gibi otomotiv üreticileri AR-GE çalışmalarına devam ediyor.



Şekil 1.19. 600 kW jeotermal ORC, Wabuska, Nevada

1.4.3. Günümüzdeki ticari ORC türbin üreticileri

Ormat

Ormat, Lucien ve Dita Bronicki tarafından 1964 yılında Lucien'in çalışmasının ardından patent alıp Ulusal Hazırlık Liderliği Girişimi (NPLI) ile bir anlaşma yaparak kurulmuştur. Şirket yenilenebilir enerjide safkan bir oyuncudur. Jeotermal ve geri kazanılmış enerji enerjisi işiyle uğraşan, ORC piyasasında lider konumundadır. Jeotermal ve geri kazanılmış enerji kaynaklı enerji santrallerini ağırlıklı olarak kendisi tarafından tasarlanan ve üretilen ORC üniteleri kullanarak dizayn eder, geliştirir, işletir ve işletirir. Yaklaşık ABD'de 100 farklı patent ile orijinal teknolojisini korumaktadır.

2004 yılından beri Nevada Reno merkezli Ormat Technologies Inc. New York borsasında işlem gören halka açık bir şirkettir. Dünya çapında 1000'den fazla kişi istihdam etmektedir. Ormat, 2015 itibariyle, 4 kW'a kadar 3000'den fazla ORC ünitesi ve 1-25 MW güç aralığında, yaklaşık 2000 MW'tan fazla 500'ün üzerinde modül üretmiştir.

Ormat'ın ilk ünitesi, evsel bir buzdolabı gibi hava geçirmez bir şekilde kapatılmış, organik akışkan olarak diklorobenzen ve yağlama maddesi kullanan, güneş enerjisiyle çalışan 600 W'lık bir ORC idi. 1966'da Mali'de bir elektrikli su pompasına güç vermiştir.

Ormat'ın doğal gaz, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) veya gazyağı ile çalışan tesisler için 200 W ila 4 kW güç aralığında hava geçirmez bir şekilde üniteler geliştirmiştir [38]. Kullanılan akışkanlar dikloro ve triklorobenzen izomerlerinin karışımlarıdır. Türbin, itici akışkan tarafından yağlanan yataklarla desteklenen aynı shaft üzerinde fırçasız bir alternatöre sahip 20.000 RPM radyal giriş süpersonik bir türbini. Sistemdeki düşük buhar basıncı, yerçekimi sayesinde pompa kullanmaya gerek görülmemiştir. Bu tür ünitelerden 3000 kadarı satılmıştır, 1975'te Trans Alaska boru hattına kurulan 120 ünitenin çoğu hala 2015 yılında ağır bakım yapılmadan çalışmasına devam ediyordur (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. Vana istasyonları enerji beslemesi için kullanılan 2 adet 600 W'lık ORC Alaska 2015

1980'lerde Amerika Birleşik Devletleri'ndeki elektrik piyasasının kuralıslılaştırılması, elektrik piyasasını yenilenebilir enerji bağımsız enerji üreticilerine açtı ve Ormat ünitelerinin geleneksel buhar türbini sistemleriyle başarılı bir şekilde rekabet ettiğı ORC ünitelerinin olgun teknolojisini kullanarak bu yeni pazara katılmasını sağladı. İlk olarak, Freonlar (11, 113 ve 114) kullanıldı, fakat 100 ° C'nin üzerindeki uygulamalar için yetersiz stabilite nedeniyle ve daha sonra da yüksek GWP nedeniyle düşük sıcaklıklar için bile freonlar terk edildi.

Günümüzde, düz hidrokarbonlar, esas olarak pentanlar, yanıcı, fakat oldukça kararlı ve aşındırıcı olmayan bütanlar ve heksanlar kullanılmaktadır. Ne toluen ne de benzen, kanserojen oldukları için kullanılmamıştır. Eksenel ultrasonik iki ve üç aşamalı türbinler kullanılmıştır (Şekil 1.21).



Şekil 1.21. 15 MW üç kademeli eksenel türbin montajı, Ormat

Yüksek basınçlı akışkan pompasının brüt gücün önemli bir kısmını tükettiği süperkritik döngünün dezavantajının üstesinden gelmek için kademeli entegre iki ve üç seviyeli tesisler geliştirilmiştir [39].

Dört adet 25 MW'lık modülden oluşan 100 MW'lık bir jeotermal enerji santrali (Şekil 1.22), operasyondaki en büyük ORC tabanlı enerji santralidir. Buhar ağırlıklı bir kaynakta çalışmasına rağmen, aynı şartlar altında bir flaş buharlı tesisinden daha verimlidir. Bunun operasyonel ve tasarımsal açıdan birçok sebepleri bulunmaktadır. Örnek olarak sayacak olursak; buhar bazlı tesislerde hava soğutmalı kondenser kullanımına bağlı olarak yaşanan verim kayıpları daha fazladır. Çünkü su buharının yoğunlaşabilmesi için gerekli vakum değeri, ORC sistemlerinde kullanılan organik akışkanlara göre daha düşük bir değerdedir. Bu da sıcak havalarda düşük vakum değerlerine ulaşmanın zor olmasından dolayı, enerji üretiminde verimsel açıdan kayıp olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 1.22. 100 MW ORC jeotermal güç santrali, Yeni Zelanda, 2013

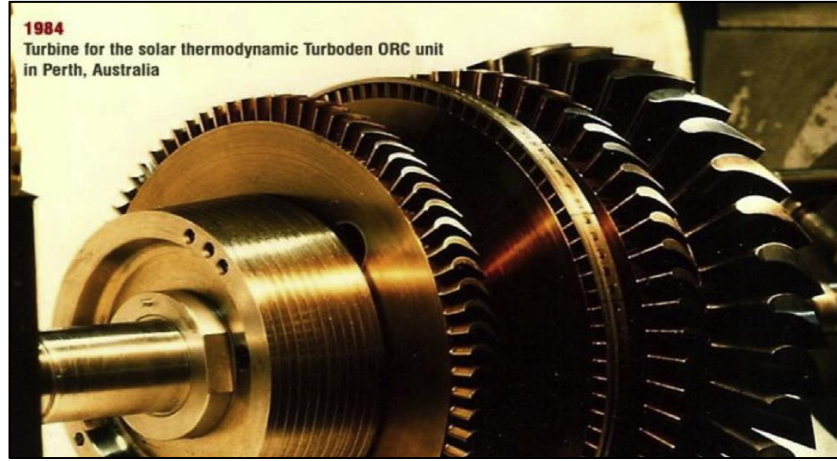
Ormat, Mayıs 2018 tarihinden itibaren, en büyük jeotermal tesisi olan Endonezya'da ki 330 MW'lık santrali devreye almıştır [40].

Turboden

Turboden Orc şirketi 1980 yılında Mario Gaia tarafında, orc turbojeneratör tasarlama, geliştirme ve üretme amacıyla kurulmuştur [41].

Turboden özel bir şirkettir ve 2009 yılında United Technology Corporation, Turboden'in hisselerinin %51'ini satın almıştır. Daha sonra 2013 yılında Mitsubishi Heavy Industries UTC firmasını satın almıştır. Şu an İtalyan hisse sahipleri yönetimden sorumlu olmaya devam ediyor. Ormat gibi, Turboden de yenilenebilir enerjide safkan bir oyuncu ve kendi türbinlerini üretiyor. Aynı zamanda ülkemiz sınırları içerisinde fabrikası bulunan ve yerli üretim ORC türbinleri imal eden bir şirkettir. 2015 yılından beri Ankara Sincan'da bulunan fabrikasında, biyokütle ve jeotermal enerji projelerine özel, terzi işi türbin üretimi yapmaktadırlar. Yüksek verimlilik ve emre amadelik sağlayan bu türbinler, Türkiye pazarında birçok biyokütle enerji projelerinde tercih sebebi olmuştur.

İlk faaliyet yıllarında (yani 1980'den 1997'ye kadar), Turboden'in ORC turbojeneratörleri güneş (düşük ve orta sıcaklık), jeotermal ve ısı geri kazanım uygulamaları için küçük güçte (3-100 kW) idi [42].



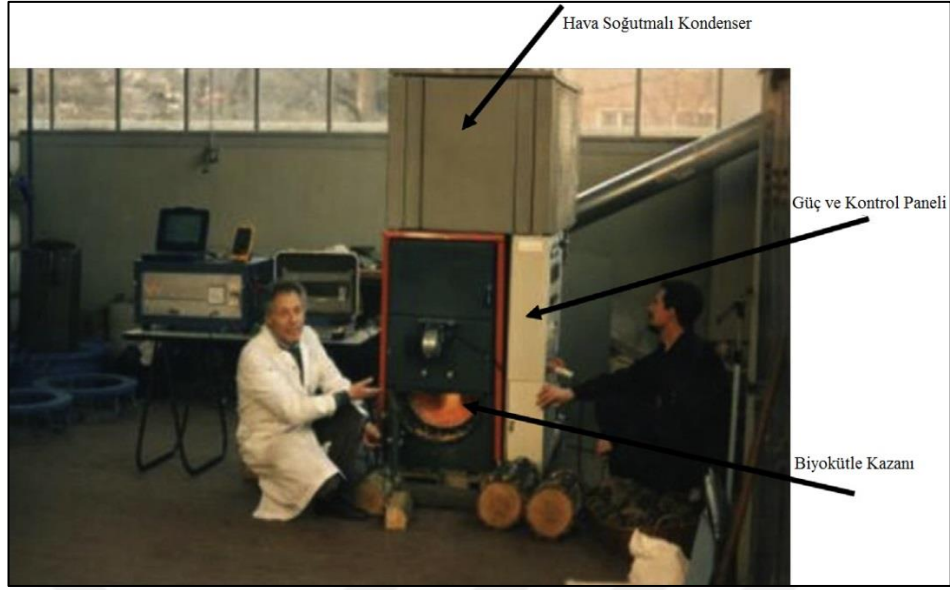
Şekil 1.23. Turboden yapımı 4 kademeli 35 kW Türbin, 1984

1988'de Zambiya'da her biri 100 kW'lık iki jeotermal ünite başarıyla devreye alınmıştır (Şekil 1.24). Kullanılan çalışma sıvısı tetrakloroetilendi ve kaynağın düşük sıcaklığı (yaklaşık 100°C) ve organik akışkanının düşük basıncı sayesinde, ORC ünitesi bir sirkülasyon pompası olmadan yerçekimi ile çalışabiliyordu.



Şekil 1.24. 100 kW'lık Turboden Jeotermal Orc Türbinleri, Zambiya 1988

1988'den itibaren, Turboden orta-yüksek sıcaklık uygulamalarına konsantre olmaya karar verdi ve odun kütükleriyle çalışan ilk 3 kW ORC ünitesini üretmeyi başardı (Şekil 1.25). Başarılı termodinamik özellikleri, sağlık ve çevre dostu olması sebebiyle ORC ünitesinde ilk kez bir siloksan sıvı kullanılmıştır.



Şekil 1.25. Odun kütüğü yakıtlı 3 kW ORC, 1988

1995 yılında bir çelik fabrikasında, biyokütle uygulaması için ilk endüstriyel ünite olan 1 MW gücünde kademeli sistem (iki farklı çalışma sıvısı ile) kurulmuştur. Bu birim, 300°C'de termal yağdan 300 kW üretmiştir ve bir İsviçre Ordusu eğitim merkezine kojeneratif modda 80°C'de sıcak su sağlamıştır (Şekil 1.26). Bu ünite de iki aşamalı eksenel türbin kullanılmıştır.



Şekil 1.26. 300 kW biyokütle ünitesi, Biere – İsviçre, 1998

2000'den 2009'a kadar, Turboden, Avusturya, Almanya, İtalya ve diğer Kuzey Avrupa ülkelerindeki biyokütle kaynaklı ORC tesislerini kurarak üst düzey bir büyüme yaşadı. Bu ülkelerde mevcut olan tarifelerdeki olumlu durum, bu pazardaki yükselişe yardımcı olmuştur.

Son beş yıl boyunca Turboden, ORC'lerinin büyüklüğünü artırarak portföyünü daha büyük ısı geri kazanımı, jeotermal (Şekil 1.27) ve biyokütle (Şekil 1.28) tesislerine genişletti ve güç birimleri ünite başına 5 MW'ı aştı. Isı taşıyıcısı olarak termal yağ kullanan geleneksel uygulamaların yanı sıra, farklı ısı taşıyıcıları veya doğrudan değişim kullanılarak gaz kaynaklarından ısı geri kazanımı için bir dizi ünite başarıyla çalıştırılmıştır.



Şekil 1.27. 5,6 MW jeotermal enerji santrali, Durnhaar - Almanya, 2013

2014 yılında Turboden, Kanada'da dört büyük biyokütle tesisi kurmuştur. Üniteler 315 °C'de termal yağ ile beslenir ve % 25'lik brüt dönüşüm verimi (% 23,6 net) ile çalışmaktadır. Çalışma sıvısı olarak siklopentan kullanılıyor.



Şekil 1.28. 6 MW biyokütle ORC ünitesinin kurulum aşamasında görüntüsü, Fraser Lake, Kanada, 2015

Günümüz itibariyle 42 farklı ülkede toplamda 370'in üzerinde, 607 MW kurulu güçte tesisi bulunmaktadır (Turboden 2018). Ayrıca tüm dünyada olduğu gibi biyokütle ve atık ısı santralleri alanında, ülkemizde de faaliyet gösteren önemli orc üreticilerinden birisi konumundadır.

Exergy

Exergy, radyal dıştan akışlı türbin teknolojisine sahip bir İtalyan şirkettir (Şekil 1.29). Şirket 1990'ların sonunda bir enerji santrali mühendislik hizmeti sağlayıcısı olarak Claudio Spadacini tarafından kurulmuş ve 2005'ten sonra ORC enerji santrali tedarikçisi olarak ORC pazarına giriş yapmıştır.



Şekil 1.29. 3,5 MW Jeotermal Enerji Santrali, Türkiye, 2015

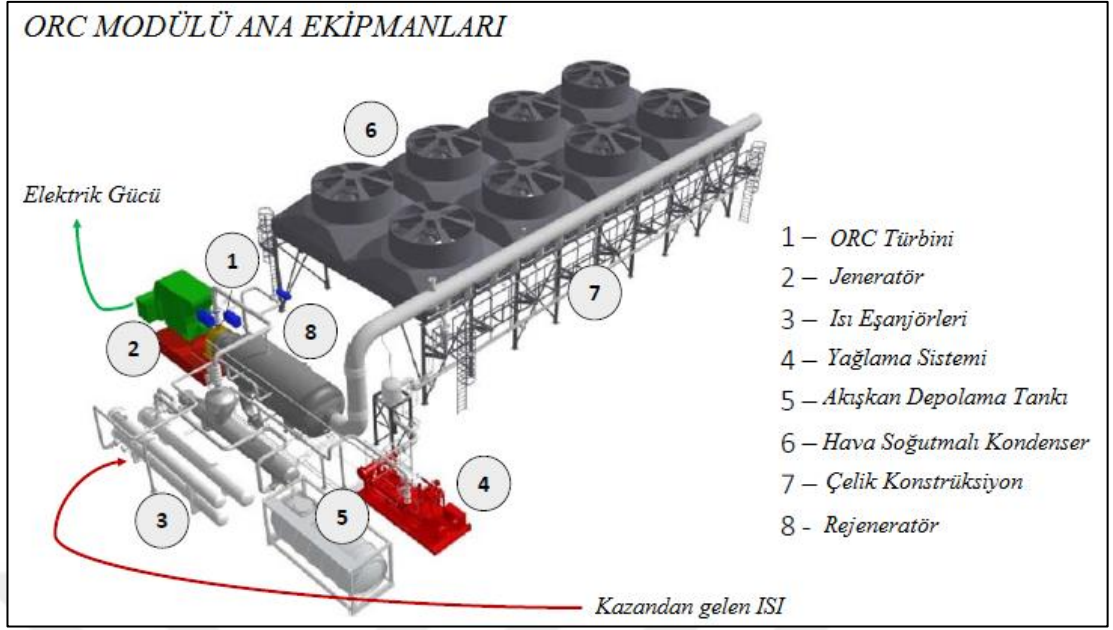
2009 yılında Exergy, çok kademeli radyal çıkışlı türbinini ticari ORC'lere uygulayarak kendi teknolojisinin geliştirilmesine başlamıştır. Radyal çıkış teknolojisi, 20. yüzyılın başlarında Ljungstrom (karşıt dönen) ve Parsons (tek dönen) tarafından buharı genişletmek için tasarlanmış ve uygulanmıştır. Radyal çıkışlı türbinin buharla kullanılma tercihi, özellikle piyasada karşı-basınçtan tam yoğuşma konfigürasyonuna geçtiğinde multidisk radyal akış türbininin yaşadığı büyük komplikasyonlar nedeniyle ciddi sınırlamalar göstermesidir. Bu konular, eksenel türbinlerin buhar uygulamaları için kademeli olan bu tür türbinlerde önemli bir gelişme olmadığı anlamına gelmektedir.

Dünyada'ki diğer ORC üreticileri;

- Opcon Energy Systems
- Adoratec / Maxxtec
- Calnetix
- General Electric
- CETY / Heat Recovery Solutions
- Dürr Cyplan
- Enertime
- ENEX
- gT - Energy Technologies
- ENOGIA
- TMEIC
- Enreco
- Electratherm
- BEP E-Rational
- GMK
- Johnson Control
- Kaishan
- TAS
- Triogen
- UTC Power

1.4.4. ORC sistemlerinde kullanılan ekipmanlar

Herhangi bir ORC çevrimi temel olarak dört ana bileşen tarafından yapılır: (1) ısı eşanjörleri, (2) türbin ve genişletici expander, (3) pompa ve (4) jeneratör ünitesi. Bunların yanı sıra, sistemin güvenli ve istikrarlı bir şekilde çalışması ve kontrolü için birçok başka bileşen gereklidir. ORC üreticilerinin tasarlayıp ve ürettikleri ana kısım türbin ve genişletici expander bölümüdür. Diğer ekipmanlar farklı tedarikçilerden temin edilerek montajı yapılmaktadır. ORC sistemlerinin projeye özel olması sebebiyle standart seri üretimi pek yaygın değildir. Üretilen modüller genellikle uygulanacağı projeye özgüdür.



Şekil 1.30. Hava soğutmalı ORC sistemi ana ekipmanları

1.4.4.1. Isı değıştircileri

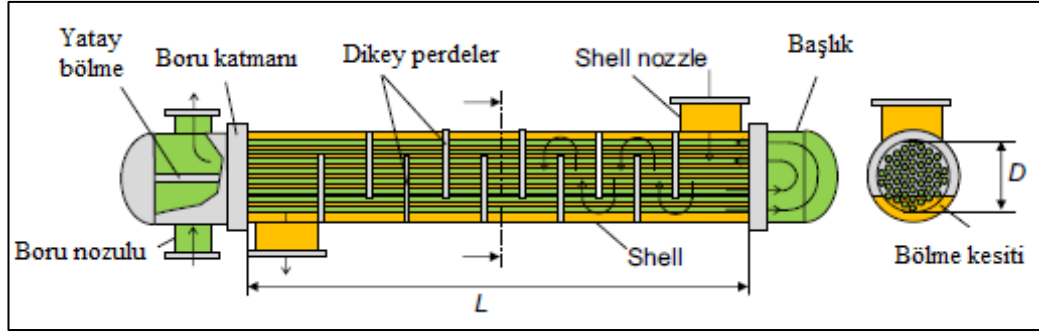
Bu bileşen genellikle aşağıdakiler için kullanılır:

(1) Birincil Eşanjör (PrHE) denilen ısı giriş işlemi, (2) yoğunlaştırıcıdaki çevreye ısı salınımı ve (3) iç ısı kazanım için türbin tarafından geri kazanıcıya boşaltılan sıcak buhardan elde edilebilen enerji. PrHE'nin mimarisi, uygulamaya, akışkanların tipine ve termodinamik döngünün çalışma koşullarına bağlı olarak değişir. Kritik olmayan çevrimler için ekonomizer, buharlaştırıcı ve muhtemelen kızdırıcıdan oluşur. Süperkritik çevrimler için faz geçişinin sürekli gerçekleştiği yerlerde kullanılır [43].

ORC'nin düşük verimliliği nedeniyle, ısı değıştircilerin tasarımına özel olarak dikkat edilmelidir, çünkü bunlar tipik olarak güç bloğu maliyetinin en yüksek bölümüdür. Tüm ısı eşanjörleri için, tasarım farklı zıt etkiler arasındaki dengeyi dikkate almalıdır: Yüzeyin artması, termodinamik açıdan olumludur, çünkü entropi üretimini en aza indirmeye ve daha yüksek performanslar elde etmesine izin vermektedir. Karbon çeliği bu bileşenler için en yaygın malzemedir [43].

Shell and Tubes Isı Değıştircileri

Shell ve Tubes (S&T), ORC alanında en yaygın ısı eşanjörüdür ve sıcak akışkan bir sıvı olduğunda ekonomizer ve kızdırıcı bileşenleri için kullanılırlar.

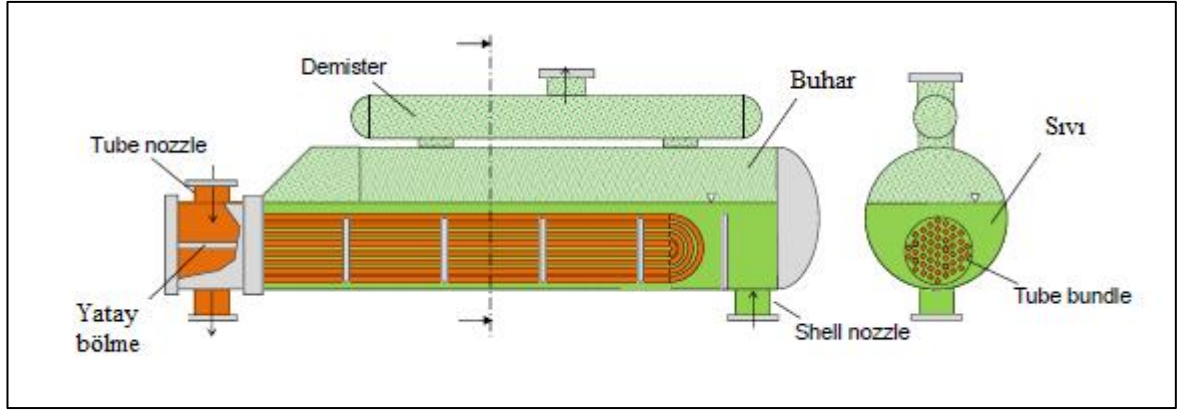


Şekil 1.31. Shell&Tube ısı değıştirici şematik gösterimi

Sıcak ve soğuk sıvının eşanjör içindeki konumu, doğalarına ve çalışma koşullarına bağlıdır. Yüksek basınçlı akışkan (genellikle aracı akışkan), ısı eşanjörünün ağırlığını ve maliyetini sınırlamak için tüplerde akar. Bununla birlikte eğer sıcak akışkanda jeotermal uygulamalarda olduğu gibi kirlenme ve kireçlenme sorunları ortaya çıkarsa, tüplerde akmasına izin vermek tercih edilir. Bu sayede, mekanik temizlik kullanılabildiğinden, ısı eşanjörlerinin bakımı daha kolay ve ucuzdur. Bu teknikler, bir fırça veya kazıyıcı tarafından yapılan ve pig adı verilen boruların tüplere taşınmasında kullanılır. Pigler basınçlı hava veya basınçlı su ile itilir ve sürtünme ile kabuklanmaları giderir. Bu durumda, yüksek basınçlı çalışma sıvısı, daha kalın bir kazan ile daha pahalı bir ısı eşanjörüne yol açan genel tasarım ilkelerinin aksine, Shell(kabuk) tarafına yerleştirilir. Alternatif olarak, jeotermal tuzlu su Shell(kabuk) tarafına yerleştirilebilir ve kireçlenme giderimi kimyasal bileşiklerle birlikte gerçekleştirilir [43].

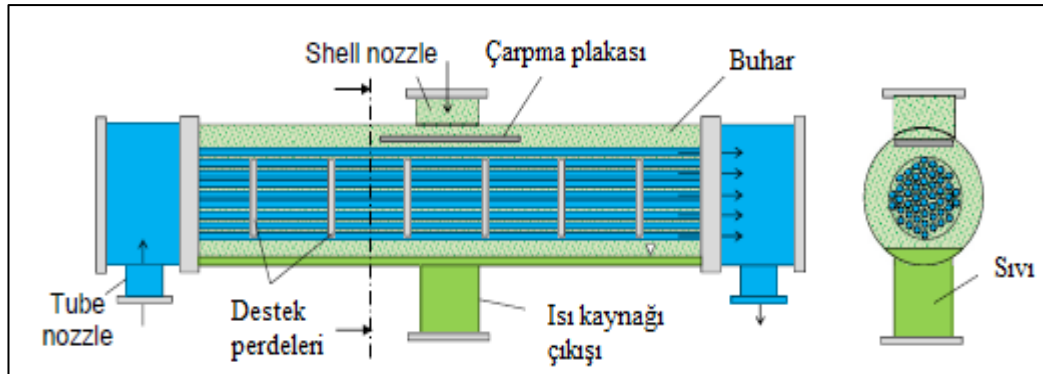
Evaporatör ve Su Soğutmalı Kondenserler

Sıcak sıvı kaynaklı buharlaştırıcılara sahip büyük boy tesisler için genellikle Kettle reboiler tipi ısı değıştiricisi kullanılır. Bu bileşenler, sıcak sıvının aktığı, kendi buharı ile dengede olan bir sıvı akışkan ile çevrili iki geçişli bir tüp demetinden meydana gelir. Çalışma sıvısı soğutulmuş koşullarda ayrı bir bölüme girer ve doymuş sıvı ile karıştırılarak doymuş duruma kadar ısıtılır. Isı eşanjörünün üstünde, buhar akışı tarafından sürüklenen ve türbin kanatları için tehlikeli olabilecek sıvı damlacıklarını gidermek için her zaman bir demister ünitesi bulunur. Bu bileşenler genellikle daha kalın kabuk ve içerdiği fazla miktarda sıvı nedeniyle klasik Shell&Tube'den daha pahalıdır, ancak buharın kalitesini ve ısı eşanjörüne seviyesini kontrol etme imkanı nedeniyle büyük enerji santrallerinde en yaygın çözümdür [44].



Şekil 1.32. Kettle reboiler ısı değıştirci şematik gösterimi

Su soğutmalı kondenserler için benzer bir konfigürasyon kullanılır. Soğuk su çevreden temin edilebilir (nehirler, göller, denizler ve sondaj delikleri) veya bölgesel ısıtma ya da endüstriyel termal kullanıcılar için bir kojeneratif geri basınç konfigürasyonunda bir ısı transfer sıvısı olabilir. İlk durumda genellikle soğutma akışının kütle akış hızında bir sınırlama yoktur, ancak çevreyi korumak için suyun sıcaklık artışını düzenlemek ile sınırlıdır. İkinci durumda ise teslim edilecek olan termik enerji genellikle sabittir ve bu gereksinimi karşılamak için enerji santrali kontrol edilir. Son seçenekte ise sınırlı miktarda su tüketen hava soğutmalı sistemlere kıyasla yoğunlaşma sıcaklığının düşürülmesini hedefleyen buharlaştırıcı kule teknolojisini kullanmaktır [44].

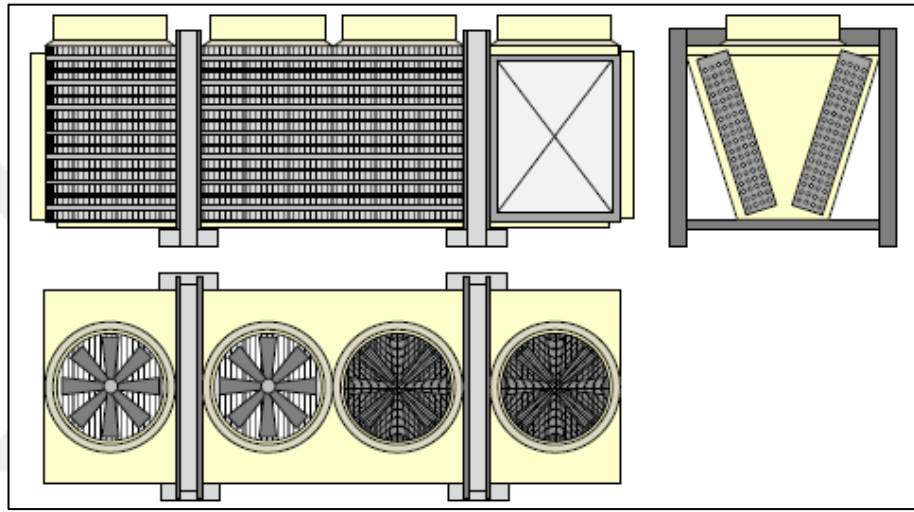


Şekil 1.33. Su soğutmalı kondenser şematik gösterimi

Hava Soğutmalı Kondenserler

Bu tip kondenserlerde soğutmayı sağlayan havadır. Burada alınan ısı hava sıcaklığı ile kondenser sıcaklığı arasındaki farka ve havanın hareketine bağlıdır.

Havanın çok düşük bir ısı transfer katsayısı gösterdiğini ve yoğunlaştırıcının çevreye güç girişinin büyük bir kısmını engellemesi gerektiğini göz önüne alarak, hava soğutmalı yoğunlaştırıcı (ACC) tasarımının tesis ekonomisini büyük ölçüde etkileyebileceği kesindir. Güç ünitesi içerisindeki maliyet payı% 20 civarındadır. Büyük bir yüzey, yoğunlaşma basıncında bir azalma ve güç çıkışında bir artış sağlar. Ancak daha yüksek ekipman maliyeti, daha büyük boyutlar ve daha yüksek fan elektrik tüketimine yol açar. Bu bileşenin tasarımı; ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme (HVAC) endüstrisinden türetilmiştir [45].



Şekil 1.34. Hava soğutmalı kondenser çizimi

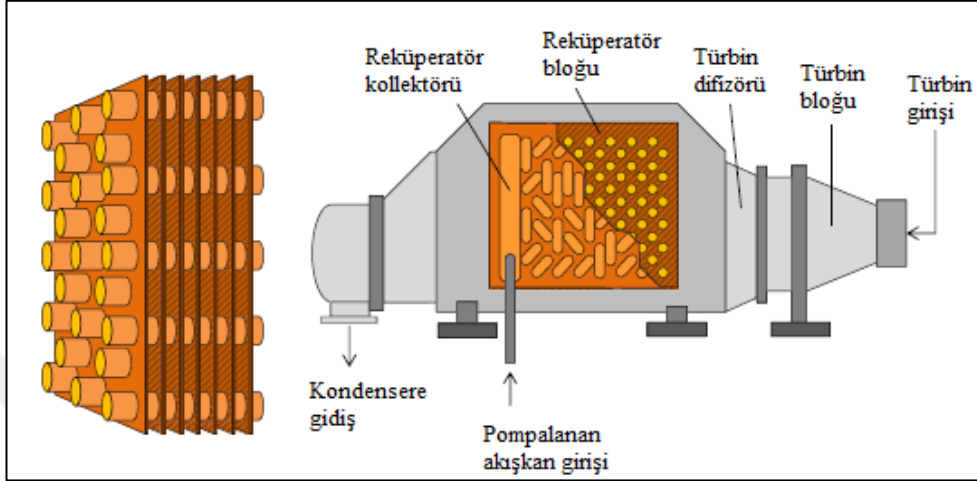
Rekuperatör

Rekuperatör, yüksek sıcaklık uygulamalarında ve ısı kaynağının asgari yüksek sıcaklığı ile karakterize edilen durumlarda önemli bir bileşendir. Genellikle yüksek sıcaklık kaynakları için, genleşme boyunca küçük sıcaklık düşüşleri ve türbin çıkışında mevcut büyük bir termal güç içeren karmaşık çalışma akışkanları kullanılır. Pompalanan sıvının tekrar ısıtılması; ön ısıtma, yüksek verimlilik elde etmek, birincil eşanjördeki sıcaklık farklılıklarını sınırlamak ve çevreye salınan ısıyı azaltmak için önemlidir. Rekuperatör, buharın aktığı tüpün dış tarafında ısı transfer katsayısını arttırmak için genellikle kanatlı tüplerden oluşan ısı eşanjörü tipinde tasarlanmıştır.

1.4.4.2. Expander (Genişletici)

Genişletici, bir ORC'nin ana bileşenidir ve tesisin büyüklüğüne ve çalışma akışkanının özelliklerine bağlı olarak, genişletici tipi tamamen değişebilir.

Genişleticinin ana görevi, türbin içerisine giren yüksek basınçlı organik akışkan buharının, düşük basınçlarda yoğunlaşmasını sağlamaktır. Bu süre zarfında, expander içerisinde bulunan rejeneratör vasıtası ile yoğunlaşmış organik akışkana yapılan ön ısıtma da bu bölüm içerisinde gerçekleşmiş olur.



Şekil 1.35. Reküperatörlü expander modelinin şematik gösterimi

Turbo makineler

Turbo makineler, bir stator ve bir rotor tarafından yapılan bir dizi aşamadan oluşur. Statörde akışkan, yakınsak (veya yakınsak olan) statik kanallarda hızlanır. Daha sonra rotora girer ve burada daha fazla genişletilir ve türbin kanatları dönmeye başlar. Rotor diskleri türbin miline bağlanır. Sıvının şafta göre nispi hareketine bağlı olarak, türbin: eksenel, radyal giriş veya merkezci ve radyal çıkış olarak sınıflandırılabilir.

Turbo makineler orta / büyük enerji santralleri için uygundur ve tipik güç çıkış aralığı 100 kW ile 15 MW arasındadır. 0,5 MW'tan yüksek güç çıkışı için eksenel türbinler ORC alanında en yaygın seçimdir; Ormat ve Turboden tarafından geliştirilmiştir. Radyal giriş türbinleri büyük tesisler için Atlas Copco tarafından, küçük uygulamalar için ise GE Calnetix tarafından üretilmiştir. Bu son durum, türbin manyetik yataklarla donatıldığından ve çok yüksek RPM'de döndüğünden dolayı ilgi çekici bir uygulamadır. Genişleme; çok yüksek bir hacim oranı ve büyük bir hacimsel akış hızı ile karakterize edilirse, prizmatik bıçak kullanma ve aynı rotor diskinde birkaç aşama düzenleme imkanı sayesinde radyal çıkışlı türbinler önerilmektedir. Bu makineler Exergy tarafından ticarileştirilmiştir [46].

1.4.4.3. Pompalar

ORC pompaları genellikle değişken hızlı çok kademeli santrifüj pompalardır ve tasarımları hem kimya hem de rafineri alanlarında geniş kullanımları nedeniyle nispeten yaygındır. Çevrim konfigürasyonuna, sıvı seçimine ve çevrim tasarım parametrelerine bağlı olarak, pompa türbin brüt güç çıkışının (yüksek kritik basınç akışkanları ile süper kritik çevrimlerde % 20 ila % 30'a kadar) ilgili bir payı olan bir tüketim gösterebilir. Bu durumda, pompa verimi çok önemli bir parametredir ve yüksek çevrim verimi elde etmek için bileşenin dikkatlice tasarlanması gerekir. Bu etki, pompa verimliliğinin büyük ölçüde olduğu küçük boyutlu uygulamalarda daha belirgindir.

1.4.4.4. Jeneratörler, dişli kutuları ve güç elektroniği sistemleri

Jeneratör mekanik gücü elektriğe dönüştürür; genellikle şebeke frekansında döner ve doğrudan genişleticiye bağlanır. Bununla birlikte; ORC alanında çalışma akışkanlarının ve uygulamalarının değişkenliği, çok farklı optimal dönme hızlarına sahip genişleticilere yol açar. Büyük tesisler genellikle yavaş makineler gerektirirken, mikro ORC'ler süper hızlı radyal akış türbinleri gerektirir. İlk durumda, kutup çifti sayısına bağlı olarak 1500, 1000 veya 750 RPM'de dönen bir jeneratör kullanmak mümkündür.

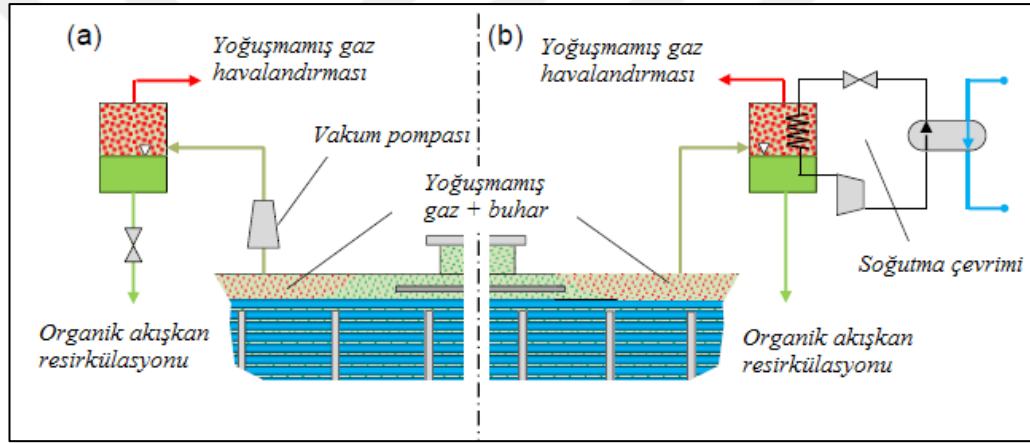
Alternatif olarak, türbin şaftı ve jeneratör şaftı arasında bir dişli kutusu kullanılabilir. Aynı bileşen hızlı bir türbin gerektiren uygulamalar için kullanılabilir, ancak belirli dişli oranının üstünde dişli kutusu kullanımı yüksek mekanik kayıplar nedeniyle uygun değildir. Çok yüksek optimum dönme hızı için, jeneratör genellikle doğrudan türbine bağlanır ve şebekeden daha yüksek bir frekansta elektrik gücü üretir. Sonunda frekansı düzeltmek için bir AC / DC + DC / AC güç şartlandırma sistemi kullanılır.

1.4.4.5. Yoğuşmamış gaz ayırma sistemi

Yoğunlaştırıcıdaki basınç, akışkanın kritik özelliklerine ve yoğunlaşma sıcaklığına bağlı olarak ortam basıncının üstünde veya altında olabilir. Türbin girişindeki termodinamik durum sabitlendiğinde, yoğuşma basıncının azaltılması, genellikle

devir performansları için avantajı olan daha yüksek bir güç üretimine yol açar, ancak diğer yandan, daha büyük bir kondenser yüzeyi, daha karmaşık bir türbin ve daha yüksek özellikte bir yardımcı madde gerektirir. Tesis ekonomisi üzerinde tek taraflı bir tüketim etkisine sahiptir.

Genellikle ORC alanında; çalışma sıvısı ve devir parametreleri, yoğuşma basıncını önlemek için çok düşük seçilmiştir. Ancak bazı durumlarda, kondenserdeki yüksek vakum, hava kaçağı endişelerine rağmen karlı olabilir. Kondenserdeki yoğunlaşamayan gazların artışı, türbinin geri basıncının kademeli olarak artmasına ve güç çıkışı üzerinde zararlı etkilere neden olur. Ayrıca yüksek oksijen içeriği nedeniyle yüksek sıcaklık tesis bölümlerinde aşındırıcı olaylar oluşabilir.



Şekil 1.36. Yoğuşmamış gaz ayırma sistemi şematik gösterimi

Yaygın buhar çevrimlerinde, türbinden alınan aşırı ısıtılmış bir buhar akımı ile yoğuşmayan gazları çıkarmak için bir havalandırıcı kullanılır; gazlar ve buharlar sıyırma kolonunun üstünden atmosfere verilir. Ancak ORC alanında, bir havalandırıcı kullanılamaz çünkü organik sıvılar çevreye salınamaz. Bunun sebebi: (a) yüksek Küresel Isınma Potansiyeli (GWP); (b) yanıcılıkları veya toksisiteleri ile ilgili güvenlik nedenleri; (c) ve bunların ilgili maliyetleri. Yoğuşma basıncı ortamın altında ise, yoğuşmayan gazların giderilmesi için cihaz gerekir. Yaygın bir çözüm, Şekil 1.36'da gösterildiği gibi, kondenser 43hell tarafından bir organik sıvı buharı ve yoğunlaştırılamayan gaz karışımını gideren bir vakum pompası kullanmaktır. Karışım, organik molekülleri emen aktif karbon filtrelerinin oluşturduğu bir arıtma ünitesinden oluşur.

Alternatif olarak, büyük tesisler veya genleşen sıvılar için, çalışma sıvısı kaybını sınırlamak önemlidir; Bu durumda, organik sıvı karışımı bir tank içerisine akar ve sıvı faz buhardan ayrılır. Daha yüksek basınç nedeniyle, organik fazda sıvı daha konsantre olurken, buhar fazı yüksek miktarda yoğunlaşmayan gaz içeriğine sahiptir. Gazlar havalandırılırken, sıvı kondenserde tekrar dolaştırılır. Böylece tam bir ayrışım sağlanmış olur [47].

1.4.4.6. Yardımcı tesisler ve enstrümanlar

Yardımcı tesisler (BOP), kurulumu tamamlamak ve tesisi çalıştırmak için gereken tüm bileşenleri içerir. Bileşenler; valfler, bypass bağlantısı ve enstrümanlar arasındaki borular BOP'un bir parçasıdır ve maliyetleri, ekipman maliyetinin önemli bir kısmını (% 25-30) oluşturur.

Tesisin kontrol edilmesi, bileşenlerin performansını karakterize etmek ve bakımını planlamak için araçlar gerekir. Isı eşanjörlerinin ısı transfer katsayılarını ve işlem sırasında genleştiricinin etkinliğini izlemek amacıyla her bir bileşenin giriş ve çıkış bölümünde basınç ve sıcaklık önlemlerinin alınmasının sağlanması gibi uygulamalar belirli enstrümanlar sayesinde gerçekleşir.

1.4.5. ORC sistemlerinde kullanılan akışkanlar

Organik rankine sistemlerini, klasik rankine sistemlerinden ayıran en önemli fark, türbin içerisinde kullanılan akışkanın su buharı yerine organik bir akışkan olmasıdır. Bu akışkanlar su buharına göre daha büyük moleküler yapısına ve daha düşük sıcaklıklarda kaynama noktalarına sahiptirler. Akışkanların sistemlerde kullanımını sınırlandıran ve tercih edilmesini sağlayan bazı özellikleri bulunmaktadır. Örneğin biyokütle enerji uygulaması ile jeotermal enerji uygulamasında kullanılacak olan organik akışkan hiçbir zaman aynı değildir. Burada akışkan seçiminde ilk olarak belirleyici olan özellik; sıcak kaynağın sıcaklık değeridir. Ayrıca sistemin yalnızca elektrik mi yoksa elektrik ve ısı üreteceği durumlarda da aynı tip akışkan kullanımı olmamaktadır. Tamamen uygulamanın çeşidi ve yöntemine göre akışkanların seçimine karar verilmektedir. Maliyet açısından da oldukça ekonomik olan bu akışkanlar, sistemin sürekliliği açısından temin edilmekte zorluk yaşatmamaktadır. Tablo 1.4'de bazı organik akışkanların termodinamik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.4. ORC sistemlerinde kullanılan akışkan tipleri

	P kritik	T kritik	P mol	Tsat 1 Bara
Propan	42,5	96,7	44,1	-42,4
HFC-134a	40,6	101	102	-26,1
HFC-236fa	32	124,9	152	-1,8
İzobütan	36,4	134,7	58,1	-12,2
HFC-245fa	36,4	154,1	134	15
Solkatherm	28,5	177,6	184,5	34,4
İzopentan	33,8	187,3	72,2	27,5
n-Pentan	33,7	196,6	72,2	35,7
MM	19,1	245,6	162,4	100
Sikloesan	40,8	280,7	84,2	80,3
MDM	14,4	291,3	236,5	151,9
Toluen	41,1	318,6	92,1	110,2
MD2M	12,3	326,3	310,7	193,7
VP1	31,7	495,4	165,7	256,6
n-Butan	38	152	58,1	-0,9
Siklopentan	45,1	238,6	70,1	48,9
HFO-1233zd	36,237	166,5	130,5	17,9

1.4.6. ORC sistemlerinde kullanılan türbin çeşitleri

a) Eksenel Türbinler; Eksenel akışlı türbinlerde, buharın türbin içinde akış doğrultusu türbin mili eksenine paralel iken, Radyal tiplerde dik olarak gerçekleşir. Türbinler daha çok Eksenel tipte, daha nadir olaraksa Radyal tip olarak yapılır.

Tüm istatistiksel veriler, eksenel akış türbininin bir termodinamik güç döngüsü içinde çalışan bir sıvının potansiyel enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için tercih edilen bir çözüm olduğunu kanıtlamaktadır; Aslında, dünya çapında üretilen elektriğin çoğu, eksenel akış türbinleri tarafından tahrik edilen elektrik jeneratörleri tarafından elde edilmektedir.

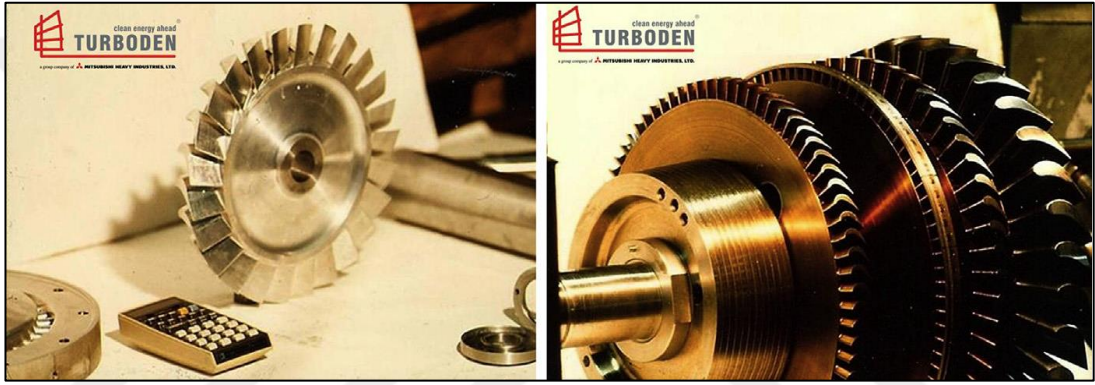
Bilindiği gibi, dünyadaki elektriğin yaklaşık% 70'i fosil yakıtlarla (karbon, doğal gaz ve petrol) beslenen elektrik santrallerinde, ya gaz türbininde ya da türbin çevrimlerinde üretilir; bu santrallerin tümü çok kademeli eksenel akış türbinlerini benimser. Dünya elektriğinin kabaca% 12'sini üreten nükleer reaktörlerin güç çevrimleri için de benzer bir seçim yapılmaktadır. Jeotermal türbinlerin, biyokütle buhar türbinlerinin, hidro aksiyal akış türbinlerinin ve rüzgar türbinlerinin katkısını toplarsak, dünya çapında üretilen enerjinin yaklaşık % 90'ının eksenel akış türbinlerinden geldiğini öğreniriz [48].

Çalışma sıvısı: Bir gaz (en yaygın gaz türbinlerindeki yanma ürünleri), bir buhar (en yaygın buhar, aşırı ısıtılmış veya ıslak) veya bir sıvı (en yaygın sudur) olabilir;

- Sıcaklık: Modern gaz türbinlerinin ilk aşamalarında olduğu gibi 1400 ° C kadar yüksek olabilir; bir buhar türbininin son aşamalarında olduğu gibi çevre sıcaklığına

yakın olabilir; veya kriyojenik tesislerde olduğu gibi çevre sıcaklıklarından çok daha düşük olabilir [48].

- Basınç: Çok yüksek (Ultra Süper Kritik (USC) buhar tesislerinde olduğu gibi 300 bar'ın üzerinde) veya çok düşük (bir buhar döngüsünün son aşamasında olduğu gibi düşük bir sıcaklıkta yoğunlaşan bir bara birkaç yüzlerce)) [48].
- Devir hızı: Mikro gaz türbinleri için 100.000 rpm'den, büyük rüzgar türbinleri için birkaç rpm'ye.
- Dış çaplar: Mikro türbinlerde olduğu gibi birkaç santimetreden, 100 m'nin üzerinde, çoklu MW rüzgar türbinlerinde.



Şekil 1.37. 1970'lerin sonunda tasarlanan Organik Rankine Çevrimi eksenel akış türbinleri [41]

b) Radyal Türbinler; Radyal türbinler ORC pazarının iki lider firması olan Ormat ve Turboden tarafından, uzun yıllar yapılan Ar-Ge çalışmaları sonucunda; projelerinde pek fazla kullanılmamıştır. Fakat bunun aksine, pazara son yıllarda giriş yapan Exergy firması tarafından geliştirilerek ticari amaçlı kullanılmıştır.

Radyal türbinlerde akışkan türbinin merkezine dik olarak giriş yapar. Casing üzerine monte edilmiş statör kanatlardan ve tek bir disk üzerine işlenmiş rotor kanatlardan oluşan birkaç kademedan geçerek genişler. Akışkan son rotor kademesinden çıkarken radyal difüzörden geçer. Daha sonra tahliye volütüyle sistemin kondenserine geçer ve akışkan yoğunlaşarak tekrar sisteme verilir [49].

ORC sistemlerinin geliştirilmesi, aşağıdakiler de dahil olmak üzere bir dizi kısıtlama nedeniyle (bu bölümün geri kalan kısmında ayrıntılı olarak belirtilmiştir) bu iki yapılandırma ile sınırlandırılmıştır [50];

- Radyal giriş türbinleri için sınırlama; hacimsel genleşme oranı ve hacimsel egzoz akışıdır.
- Eksenel türbinlerde kısıtlamalar, hacimsel genişleme oranını sınırlayan bıçak yüksekliğine bağlıdır.

Sistem karmaşıklığında önemli bir artışa karşı bu sorunlar aşağıdaki çözüm metodlarıyla aşılmıştır;

- Yüksek hacimsel genleşme oranı için seri halinde çift kademeli radyal giriş (GE ORegen metodu).
- Yüksek hacimsel egzoz akışı için paralel olarak çift kademeli radyal giriş (Atlas Copco Energas metodu).
- Farklı devir sayılarında seri olarak çift gövdeli eksenel türbin (Turboden metodu).



Şekil 1.38. İlk kademeli 1 MW Exergy radyal çıkış türbini [51]

1.5. Organik Rankine Çevrim Uygulamaları

1.5.1. Jeotermal güç santrallerinde ORC uygulamaları

Yer kabuğunda derin bölgelerde birikmiş olan ısıyla meydana gelen enerji çeşitlerinden biriside Jeotermal enerjidir. Yağmur ve diğer etmenlerden dolayı yer altına sızan sular buradaki gözenekli ve geçirimli özelliğe sahip kayalarda birikmeye

başlar. Bu hazne kayalar üzerinde geçirimsiz örtü kaya tabakası bulunmaktadır. Buradaki ısı yer kabuğundaki kırık veya çatlaklarda dolanan sular aracılığıyla yeryüzüne aktarılır. Eğer yer kabuğunda doğal yöntemlerle su sirkülasyonu sağlanacak yeterli kırık yoksa ve ısı birikimi tespit edilirse, oluşturulacak yapay çatlaklardan dolaştırılacak akışkanlar vasıtasıyla da enerji üretilmesi mümkündür. Jeotermal enerji alanları, etkin depremlerin olduğu tektonik bakımdan aktif olan genç volkanların bulunduğu kuşaklardır. Yeryüzüne ulaşan buhar ve sıcak suyun içerdiği enerjiden ya doğrudan ya da dolaylı olarak başka enerji çeşitlerine dönüştürülerek kullanılmaktadır.

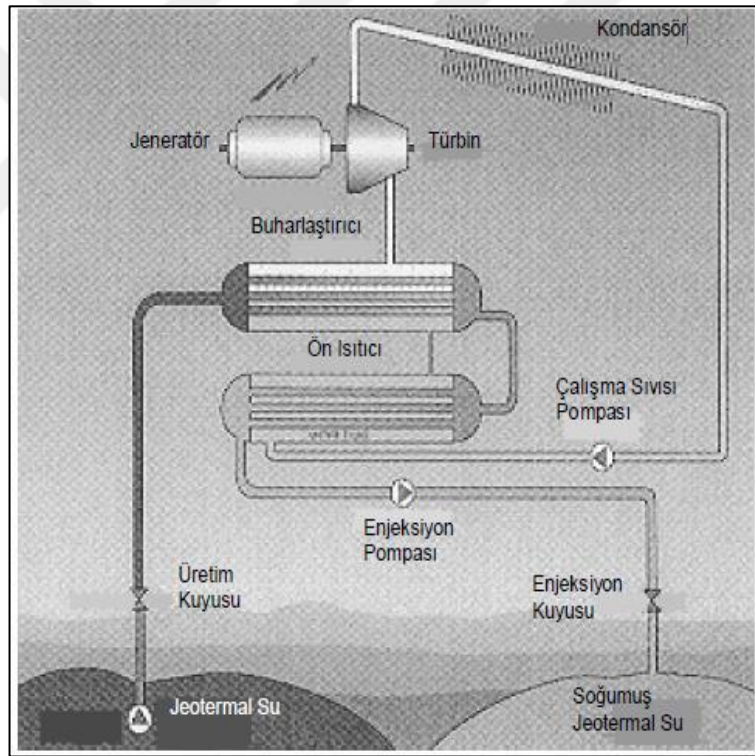
Jeotermal enerjinin son yıllardaki gelişimi enerji dönüşüm teknolojileriyle alışılmış geleneksel sistemlerin dışında kalan jeotermal sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. “ORC” organik rankine çevrimi, prosesi esnasında, akışkanın sıcaklıklarından bağımsız olarak, su tüketmemektedir. Bunun için ORC sistemleri hava soğutmalı kondenserleri etkin bir şekilde kullanarak, soğutma için kullanılan suyun tüketilmesinin önüne geçmektedir. Bu tür kapalı devre tesisler 85 dereceden 320 dereceye kadar, su kaybı ve korozyona sebep olmadan, elektrik üretimi yapmaktadırlar. Organik akışkanın yoğunlaşma vakum değerinin su buharına göre daha yüksek olmasından dolayı da elektrik üretim değerlerinde verim açısından klasik buhar çevrimlerinden daha yüksek verime sahiptir [52].

JEOTERMAL AKIŞKANIN SICAKLIĞINA GÖRE KULLANIM ALANLARI		
Sıcaklık C°	Kullanım alanı	
180	Elektrik üretimi, Amonyum absorpsiyonu ile soğutma	
170	Ağır su (D ₂ O) ve hidrojen sülfür eldesi, Diyatomitlerin kurutulması.	
160	Kereste kurutulması, balık vb. yiyeceklerin kurutulması	
150	Bayer's yoluyla alüminyum ve diğer kimyasal maddeler eldesi	
140	Konservecilikte	
130	Şeker endüstrisi, tuz eldesi	
120	Saf su eldesi, tuzluluk oranının artırılması	
110	Kerestecilik, çimento kurutma (yosun, et, sebze)	
90	Balık kurutma	
80	Ev ve sera ısıtılması	
70	Soğutma (alt sıcaklık sınırı)	
60	Sera, kılmes ve ahır ısıtma,	
50	Mantar yetiştirme, balneolojik banyolar.	
40	Toprak ısıtma, kent ısıtılması (alt sınır)	
30	Yüzme havuzları, fermentasyon, damıtım	
20	Balık çiftlikleri	

Şekil 1.39. Jeotermal enerji kullanım alanları

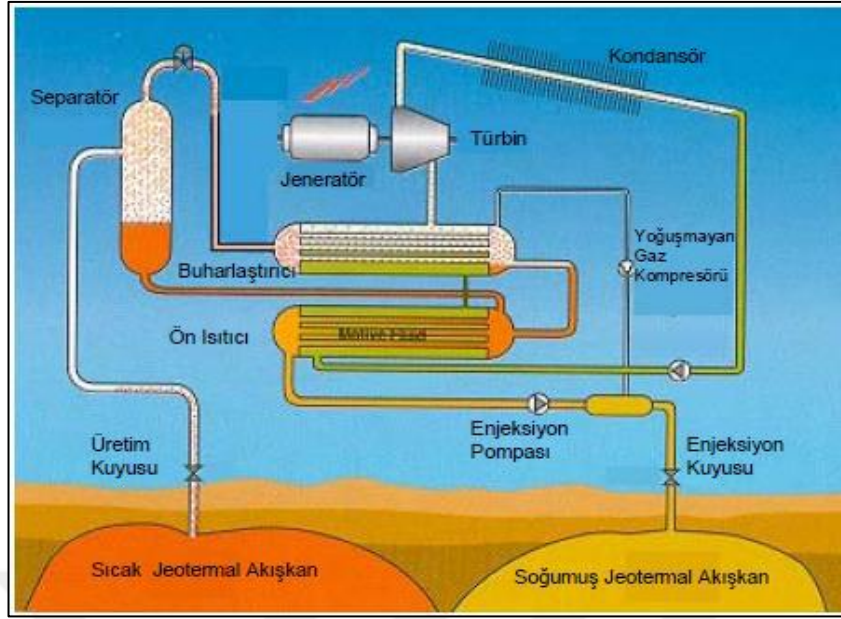
ORC teknolojisi ilk olarak 1961’de İsrail’de Ormat tarafından geliştirilmiştir ve özellikle ikili jeotermal enerji santralleri başta olmak üzere birçok farklı endüstri de hızla gelişmekte olan bir teknoloji olmuştur. Genel olarak kullanılan teknoloji, kuru ve flaş buhar sistemleri, jeotermal kuyulardan elektrik üretimi amacıyla kullanılan ana teknolojilerdi. Ama ikili sistem teknolojisi giderek büyümektedir ve 2020 senesine kadar bu ORC teknolojisinin, jeotermal enerji üretim pazarının yarısına hakim olarak en önemli teknoloji olacağı öngörülmektedir.

Şekil 1.40’daki ORC sistemi, 320°C sıcaklığa kadar olan jeotermal akışkanların jeotermal sistemlerin enerji üretimi amacıyla uygulamalarında, hava soğutmalı kondenserlerin kullanılmasına ve su tüketiminin sıfıra yakın olmasına olanak sağlamaktadır [53].



Şekil 1.40. Jeotermal ORC Binary sistem şematik gösterimi

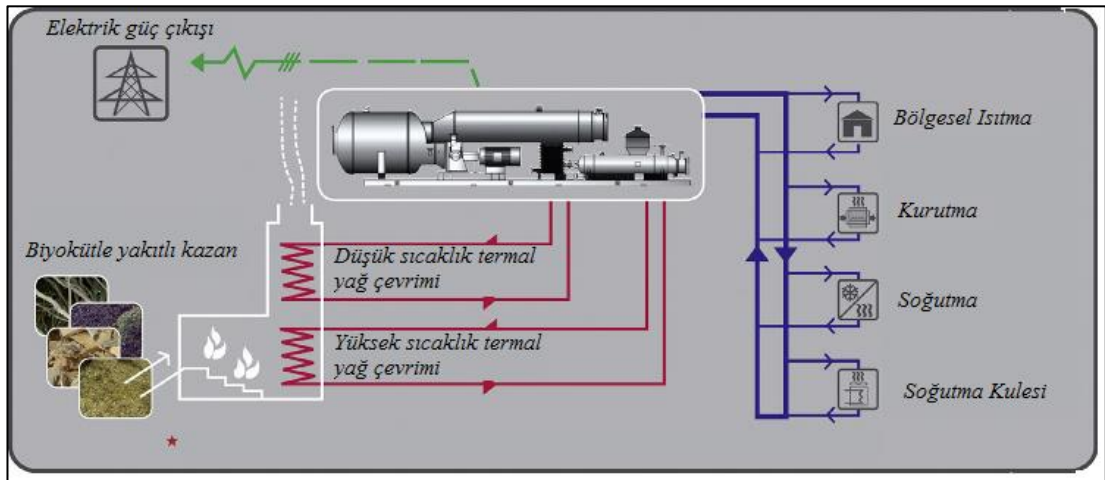
İkili Binary Çevrimi, düşük basınçlı buhar için, buharın doymuşluk oranına ve bazı özelliklerine göre Şekil 1.41’deki gibi uygulanmaktadır. Bu sistemde, separatörden gelen düşük basınçlı buhar, binary çevriminin buharlaştırıcısında yoğunlaşmaya başlar ve sıcak jeotermal su orc çalışma akışkanına ön ısıtma yapmak amacıyla kullanılmaktadır [53].



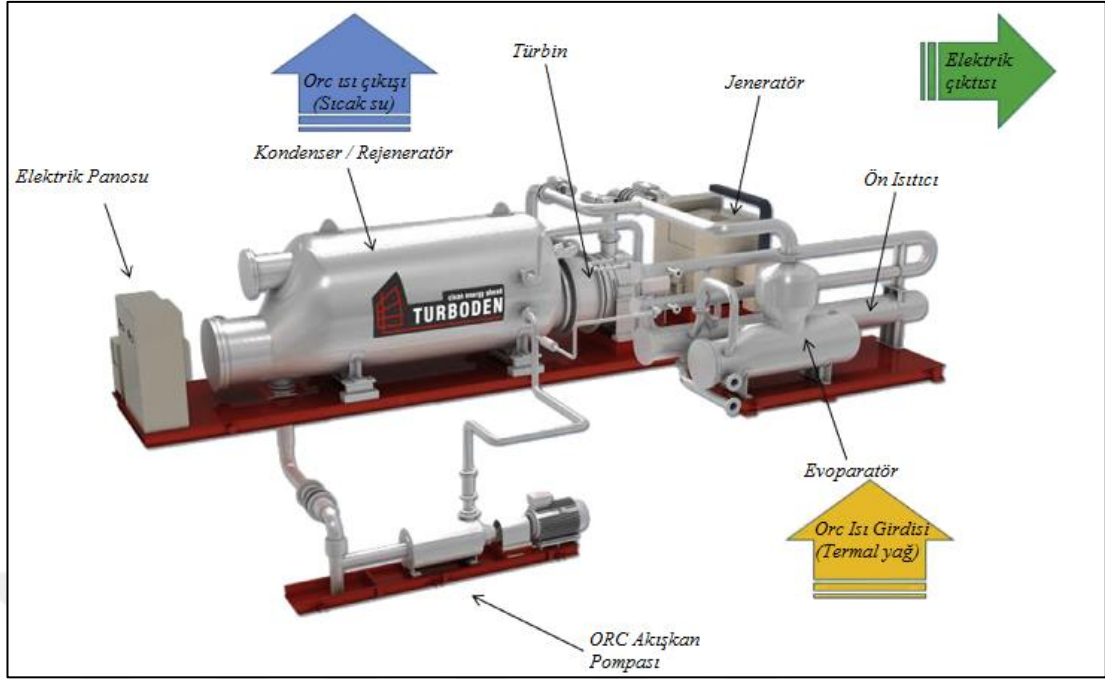
Şekil 1.41. Jeotermal ORC iki fazlı Binary Çevrimi şematik gösterimi

1.5.2. Biyokütle enerjisi santrallerinde ORC uygulamaları

Biyokütle yakıtlı ORC sistemleri ikili döngü olarak çalıştırılır; çünkü çalışma sıvısı ve ısı taşıyıcı farklıdır ve ayrı devrelerde çalışırlar. Biyokütle kazanında yanma gazı, normalde sentetik bir termal yağ olan ısı taşıyıcısı görevi gören bir ortama ısı aktarır. Sıcak termal yağ kapalı bir devrede dolaşır ve ORC'yi besler, sonra eşanjörde soğur ve kazana geri gönderilir. Bir pompa sistemi, kazandaki aşırı sıcaklığı önlemek için termal yağın sürekli sirkülasyonunu sağlar.



Şekil 1.42. Biyokütle güç santrallerinde Orc kullanımı şematik gösterimi



Şekil 1.43. 1 MWe gücünde Turboden ORC ünitesi

ORC sınırlı ara yüzleri sayesinde, tesisin geri kalanı için bir “kara kutu” olarak çalışmaktadır; Isıl yağ, ısıyı kazandan ORC'ye aktarır. Üretilen elektrik elektrik şebekesine iletilir veya yerel olarak kullanılabilir. Isı; bölgesel ısıtma ve soğutma, düşük sıcaklıkta kurutma işlemleri için veya 120°C'ye kadar olan sıcaklıklarda herhangi bir termal talebi karşılamak için kullanılabilir. Son gelişmelerle birlikte, ORC'lerde ortak üretilen ısı olarak buhar üretimi de yapılmaya başlanacaktır.

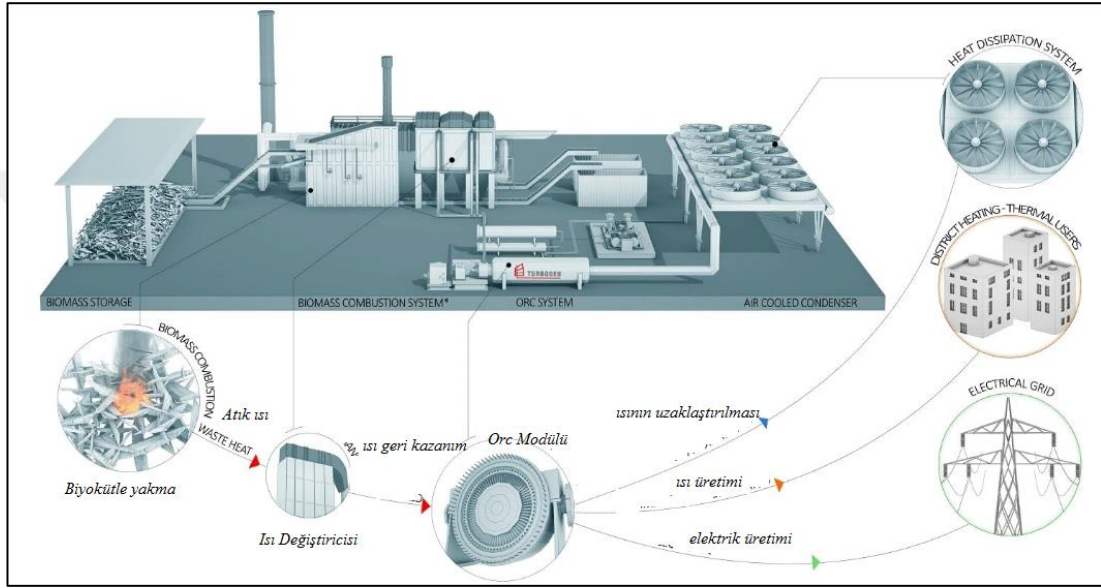
Biyokütle yakıtlı ORC'nin çalışması, geleneksel Rankine çevrimine kıyasla birçok avantaj sunar;

1. Kazanda bir faz değişikliği veya yüksek basınç seviyesi yoktur. Termal yağ, atmosferik basınçta 320°C'ye veya üzerinde bir sıcaklığa yükseltilerek sıvı fazda kalır (termal yağın normal çalışma basıncı 5-7 bar g arasındadır).
2. Kazan içerisinde termal ortamın fazında değişiklik olmadığından patentli operatör gerekmez. Geçmişte olduğundan daha az olsa bile, kazanın fazında bir değişiklik olursa, bazı ülkelerde patentli bir operatörün varlığı zorunludur.
3. Termal ve termodinamik işlemlerin ayrı çevrimlerde olması. Bu özellik, biyokütle kazanının ve ORC'nin serbest seçimine izin verir.

Dünyada 400'ün üzerinde ORC sistemli biyokütle enerji santrali bulunmaktadır. Bunlardan 4 tanesi Türkiye'de bulunuyor.

Tablo 1.5. Türkiye’de kurulu ORC’li biyokütle enerji santralleri

Tesis adı	Kurulu güç	Teknoloji	Yakıt
Starwood – Mendez Enerji	5,5 MWe	Izgaralı Kazan - Yakma	Ağaç kabuğu
Kastamonu Entegre	1 MWe	Gazlaştırma	Ağaç atıkları, kabuk
AGT	5,5 MWe	Izgaralı Kazan - Yakma	Ağaç atıkları, kabuk
Güres Tavukçuluk	2,3 MWe	Akışkan Yataklı Kazan	Tavuk gübresi



Şekil 1.44. ORC sistemli biyokütle enerji santrali animasyonu

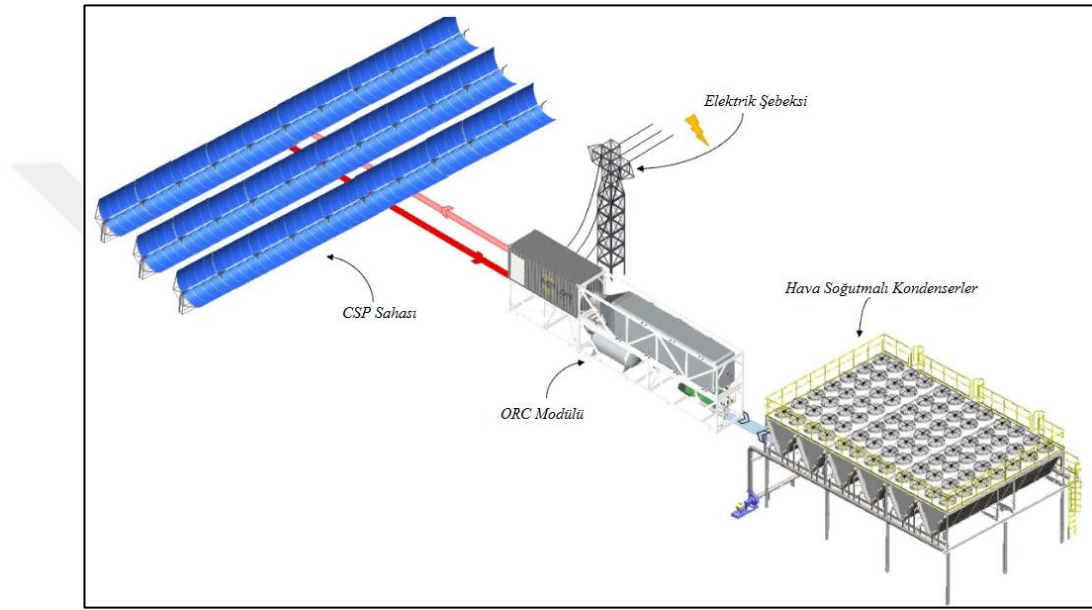
1.5.3. CSP güneş enerji santrallerinde ORC uygulamaları

Konsantre solar güç sistemleri, son zamanlarda popülerliği artan yenilenebilir enerji türlerinden birisidir. Ülkemizde de geçtiğimiz yıllarda bu teknoloji kullanılmaya başlanmıştır. CSP sistemlerinin temel çalışma prensibi şu şekildedir; parabolik oluk şeklindeki aynalar, güneş ışığını yoğun bir şekilde ortasından geçen boruya odaklar. Boru içerisinden geçen akışkanın sıcaklığı artırılarak; örneğin kızgın yağ formunda 310 dereceye kadar ısıtılır. Daha sonra ısınan bu akışkan, bir orc modülüne gönderilerek elektrik enerjisi üretilir.

Konsantre solar teknolojilerinin başlıca üç ana uygulaması bulunmaktadır. Bunlar; parabolik tekne kollektörler, freshnel teknolojisi ve solar kulelerdir. Bu teknolojilerden enerji üretimi için en uygun teknolojiler; stirling motorları ve buhar çevrimli enerji üreten makinalardır.

Tablo 1.6. Dünya'daki kurulu CSP tesislerinden bazıları

Boyut	Lokasyon	Durum	Not
2,0 MWe (ORC)	Fas	2014	Çimento kaynaklı atık ısı ve parabolik konsantre solar uygulaması (hibrit tesis)
0,6 MWe (ORC)	İtalya	2017	Freshnel ayna uygulamalı solar tesis
3,8 MWe (ORC)	Danimarka	İnşa halinde	Biyokütle ve parabolik solar uygulaması (hibrit tesis)
1,0 MWe (ORC)	İtalya	İnşa halinde	Parabolik konsantre solar uygulaması

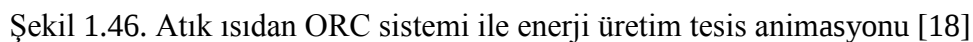


Şekil 1.45. CSP güneş enerjisi ORC uygulaması

1.5.4. Atık ısıdan elektrik üretiminde ORC uygulamaları

Birçok üretim endüstrisi, atık ısı şeklinde büyük miktarlarda enerjiyi atmosfere boşaltır. Atık ısıların ekonomik ve çevresel etkileri oldukça fazladır. Bundan dolayı hem büyük miktarda enerji tasarrufu sağlamak hem de endüstriyel enerji verimliliğini artırarak çevresel etkileri azaltmak için, bu atık ısının geri kazanılması gerekmektedir. Birçok üretim işleminden salınan endüstriyel atık ısı, bir güç döngüsünü yürütmek ve yerinde kullanım veya satış için elektrik üretmek için yeterli derecede yüksek bir sıcaklığa sahiptir. Çimento üretimi, çelik üretimi ve petrol damıtma endüstrileri büyük miktarda enerji tüketen ve aynı zamanda çok büyük miktarda atık ısı üreten devasa proses tesislerini işletmektedir. Üretim işlemleri sırasında kullanılan enerjinin %20-50'si atmosfere salınır. Bununla birlikte, bazı durumlarda (örneğin, endüstriyel fırınlar), WHR ile enerji verimliliği % 10

süreklilik sağlayamamaktadır. Fakat ORC sistemleri %10 kısmi yük koşullarında bile rahatlıkla çalışabilmektedir. Ayrıca ORC sistemlerinin daha düşük basınç altında çalışması, sistemlerin işletme açısından da kolay ve güvenilir olmasını sağlamaktadır. Termal yağ bazlı sistemlerde, termal yağ basıncı 4-12 bar basınç değeri aralığındadır. Fakat buhar sistemlerinde çalışma basınç değerleri ise 35 – 40 bar aralığındadır. İşletme güvenliği açısından yüksek risk oluşturan bu durum, son yıllarda yatırımcılar tarafından pek tercih edilmemektedir. Ülkemizde de her iki teknoloji bazında uygulama yapılmış tesisler bulunmaktadır.



Tablo 1.7. Atık ısıların sıcaklıklarına göre sınıflandırılması ve tavsiye edilen enerji kazanım teknolojileri [54]

Kategoriler	Isı kaynağı	Sıcaklık	Önerilen geri kazanım teknolojileri
Yüksek sıcaklık (>650°C)	Katı atık	650-1000	Hava ön ısıtma
	Nikel rafine fırını	1370-1650	Rankine çevrim
	Cam eritme fırını	1000-1550	Buhar üretimi (ısıtma)
	Alüminyum rafine fırınları	650-760	Isı değiştirici (ön ısıtma)
	Bakır reverber fırın	900-1100	Termoelektrik
	Bakır rafine fırını	760-815	Termal PV
	Çinko rafine fırını	760-110	
	Çimento fırını	620-730	
	Hidrojen tesisi	650-100	
Orta sıcaklık (230-650°C)	Buhar kazanı bacası	230-480	Rankine çevrim
	Gaz türbini bacası	370-540	Organik rankine çevrim
	Kurutma ve pişirme fırınları	230-600	Isı değiştirici (ön ısıtma)
	Katalitik krater	425-650	Hava ön ısıtma
	Pistonlu motor egzozu	315-600	Termoelektrik
	Tavlama fırını soğutma sistemi	425-650	
Düşük sıcaklık (<230°C)	Proses buhar kondensatı	50-90	Mekan ısıtma
	İçten yanmalı motor soğutma suyu	66-120	Isı pompası
	Proses sıvıları ve katılarının soğutma suyu	32-232	Organik rankine çevrim
	Tav fırını soğutma suyu	66-230	Isı değiştirici
	Kurutma ve pişirme fırınları soğutma suyu	93-230	Absorpsiyon / adsorpsiyon soğutma
	Kaynak ve enjeksiyon makineleri soğutma suyu	32-88	Kalina çevrimi
	Yatakların soğutma suyu	32-88	Piezoelektrik
	Hava kompresörleri soğutma suyu	27-50	

2. LİTERATÜR TARAMASI

Tocci ve arkadaşları bu makalede küçük çaplı ORC türbinleri üzerinde bir araştırma yapmıştır. Kilowatt mertebelerindeki orc uygulamalarının megawatt bazındaki uygulamalara göre, daha az ticarileştirildiğini belirtmiştir. Küçük ölçekli işletmelerdeki enerji tasarrufu ve kendi enerjilerini üretme potansiyeli açısından, küçük çaplı orc sistemlerinin daha avantajlı olduğundan bahsetmiştir [55].

Muharrem E. Yapmış olduğu çalışmada; biyokütleden elektrik ve ısı üreten, Hexamethyldisiloxane organik akışkan kullanan bir ORC ünitesinin enerji ve ekserji analizini yapmıştır. ORC ünitesinin başlıca ekipmanlarından olan buharlaştırıcı, yoğunlaştırıcı, türbin ve rejeneratörün enerji ve ekserji analizleri değişik çalışma koşulları için gerçekleştirmiştir. Tam yük birinci test çalışmasında ORC ünitesinden 860,06 kW net elektrik üretilmekte ve net elektrik üretim verimini %12,59 olarak belirlemiştir. ORC ünitesinin ekserji verimini %33,26 olarak hesaplamıştır. Tam yük ikinci test çalışmasında net elektrik üretim verimi %13,22 ve ekserji verimi %35,50 olarak hesaplamıştır. Tam yük üçüncü test çalışmasında ORC ünitesinin elektrik üretim verimi %12,91 ve ekserji verimi %33,80 olarak hesaplamıştır [56].

Kaşka Ö. ısı kaynağı olarak atık ısı ve organik akışkan olarak R245fa kullanan bir ORC sisteminin enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmiştir. Güç üretim tesisinden alınan gerçek verilerle ORC çevriminin performansı değerlendirilmiştir. Evaporatör/kondenser basınçları değişimi, kızdırma ve aşırı soğutma durumlarında sistemin enerji ve ekserji verimlilikleri hesaplanarak grafiklerle gösterilmiştir. İki farklı çalışma şartları için (251,8 kW ve 203 kW brüt güç üretimi) yapılan analiz sonuçlarında sistemin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %10,2; %48,5 ve %8,8; %42,2 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca sistemdeki her bir komponentin ekserji kaybı miktarı belirlemiştir [57].

Arun K. yapmış olduğu çalışmada ORC sistemi için çalışma sıvısı olarak benzen uygulamasını incelemektedir. Makalesinde verimliliği artırmak ve daha iyi ekonomik sonuçlar elde etmek için organik rankine çevriminin çalışma sıvısı olarak benzen ile performans analizi yapmıştır. Bu makalede ayrıca, Reynolds sayısı ile aynı kütle debisi değişkenliğinde 9 kW güç çıkışı üretmek istiyorsak, ORC sisteminin verimliliğinin

%32,87'den %54,98'e kadar yükselmesi gerektiğini ve bunun mümkün olduğunu açıklamaktadır. Benzenin yangın noktası çok düşük olduğundan ve herhangi bir ani kıvılcım tehlikeye neden olabileceğinden, sistemlerinde sadece sıvıdan sıvıya ısı transfer cihazı kullanmışlardır. ORC sisteminin kazanı, bir termal enerji rezervuarına batırılmış helezon bobin bakırından, yani ısı transfer akışkanı, üst sıcaklık sınırı 415 °C olan terminol vp-1'den oluşmaktadır [58].

Rentizelas A. bu makalesinde; ORC bazlı gazlaştırma teknolojilerinin, biyokütleden enerji üretimi konusunu ele almıştır. Her iki teknoloji içinde belirli vaka çalışmalarını incelemiş ve gazlaştırma teknolojisinin, elektriksel verim olarak daha önde olduğunu vurgulamıştır. İki teknolojinin teknolojik ve finansal karşılaştırması sonucu, gazlaştırma teknolojisinin daha verimli bir yatırım olacağını belirtmiştir. Ancak gazlaştırma teknolojisindeki bazı olumsuz faktörlerin, yatırımcılar açısından sorun teşkil edeceğini de belirtmiştir [59].

Angelo A. 'nın yapmış olduğu çalışmanın amacı, enerjisel performansların araştırılması ve biyokütle yakıtlı birleşik ısı ve güç (CHP) üretimi için Organik Rankine Döngülerinin (ORC) ekonomik olarak uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu amaçla, uygun sistem konfigürasyonlarını tanımlamak için bazı parametrik bir enerji analizi yapmıştır. Türbin girişindeki doymuş ve aşırı ısınan koşullar ile alt-kritik ve transkritik çevrimler analiz edilmiş ve iç rejenerasyonun sistem davranışı üzerindeki etkisi çalışılmıştır. Çalışma sonucunda, maksimum sıcaklığın büyük etkisini ve iç rejenerasyonun ORC sistem performansları ve göreceli enerji tasarrufu yetenekleri üzerindeki etkileri incelenmiştir [60].

Taifin Bin N. makalesinde, küçük bir biyokütle ile beslenen Organik Rankine Çevrimi (ORC) enerji santralinin ekserji analizi ile incelemektedir. Sistem, biyokütleyi yakıt olarak kullanmak için yakıcı brülör ünitesinden, genişleticiden ve güç elde etmek için organik Rankine çevrim ünitesinden oluşuyor. Yanma brülöründen gelen ısı, buharlaştırıcı bölümündeki ORC çalışma akışkanını buharlaştırmak için termal yağ ile transfer edilmiştir. Reküperatördeki ekserji yıkımının etkilerini araştırmıştır. Ayrıca, buharlaşma basınçları, ortam sıcaklıkları ve genleşme basınçları gibi farklı çalışma parametrelerine sahip sistem konfigürasyonlarındaki değişikliklerin sonuçlarını analiz etmiştir. Prosesler sırasında

meydana gelen en büyük ekserji tahribatının yanma kısmında, ardından evaporatör, kondenser, genişletici ve pompa olduğunu tespit etmiştir. Ekserji yıkımının en yüksek kayıplarının yanma odası ünitesinde gerçekleştiği, bunu evaporatör, kondenser, genişletici ve pompanın takip ettiğini belirlemiştir [61].

Piotr K. bu makalede, domestik bir biyokütle kazanı için türbin tabanlı bir mikro ORC sisteminin analizini sunmaktadır. Varsayılan nominal kazan kapasitesi, 15 kW ile 20 kW arasındadır. Bu kadar küçük bir termal çıktı, enerji üretimi açısından özellikle zor bir yöntemdir. En önemli konulardan biri sistemin ekonomik yönü olduğunu belirtmiştir. Genel olarak, küçük sistemlerin nispeten daha pahalı olduğunu ve başka bir problem olarak, genleşme ünitesi ve besleme pompası gibi ayrı bileşenlerin verimlerinden kaynaklanan düşük elektrik verimliliği olduğunu vurgulamıştır. Sistemin genel verimliliğini incelemiştir. Düşük debilerden dolayı, dönüş hızının bazı tasarımlarda 100 krpm'yi aşıya bile bu hızların yeterli olmadığını belirtmiştir. Bunların haricinde küçük boyuttaki ORC türbinlerinin üretim esnasında yaşanan zorluklarından bahsetmiştir [62].

Angelo A. bu makalesinde, Güney İtalya'daki 3000 hektar bir bölgede budama kalıntılarından kaynaklanan biyokütlenin kullanımı için kabul edilen Organik Rankine Çevrimlerinin performanslarını analiz edilmesini amaçlamıştır. Ana tesis çalışma koşullarının etkisini tanımlamak için parametrik bir enerji analizi yapmıştır. Bu amaçla hem kritik altı hem de kritik enerji santralleri incelemiş ve türbin girişinde doymuş ve aşırı ısınan koşullar uygulamıştır. Ayrıca, çalışmada akışkanının, yoğuşma sıcaklığının ve iç rejenerasyonun sistem performansları üzerindeki etkilerini de araştırmıştır. Sonuç olarak organik rankine çevrim tesislerinin, merkezi olmayan ve küçük ölçekli enerji üretimi için ilginç ve sürdürülebilir bir çözümü temsil ettiğini belirtmiştir. Ayrıca analizlerinde, maksimum sıcaklığın ve içsel rejenerasyonun biyokütle enerji santrallerinin performansları üzerindeki belirgin etkisinin önemini vurgulamıştır [63].

Bu yayında, Gana'da bir milyon tondan fazla üretilen ancak yıllık olarak boşa harcanan kakao kabuğunun enerji potansiyeli araştırılmıştır. Bir biyokütle entegre kombine elektrik üretim sistemi, aspen plus simülasyon yazılımıyla yakıt olarak kakao kabuğu kullanılarak simüle edilmiştir. Biyokütle gazlaştırma tesisine entegre

edilmiş bir ORC ve Stirling Motor jeneratörü,% 36,69 genel tesis verimliliğinde 1,3 MW güç üretmektedir. Mevcut 2,5 MW'lık bir güneş enerjisi santrali ile yapılan bir karşılaştırma, biyokütle entegre kombine elektrik santralinin toplam sermaye maliyetinin daha yüksek olmasına rağmen, uzun vadeli operasyonlarda sermaye maliyetindeki farkın geri ödeme süresi yaklaşık 12,55 yıl olduğundan daha ekonomik olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, biyokütle entegre elektrik santrali yıllık güneş enerjisi santralinden 1,98 GWh daha fazla enerji üretmekte olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, tüm kakao kabuğuna ait depoların aynı tesis yapılandırmasını ve şartnamelerini kullanarak elektrik üretmek için biyokütle yakıtı kullanılması durumunda, Gana'da ki ulusal elektrik üretiminin %4,8 oranında artacağı vurgulanmıştır [64].

Günümüze kadar ki yapılan çalışmalar incelendiğinde organik akışkan olarak Octamethyltrisiloxane kullanılarak ORC ünitesinin teknik ve ekonomik analizi yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada Brüt 5500 kWe elektrik üretim kapasiteli, enerji kaynağı olarak biyokütleden elde edilen termal yağı kullanan ve organik akışkan olarak Octamethyltrisiloxane kullanılan bir ORC ünitesinin teknik ve ekonomik analizi yapılmıştır.

3. TESİS HAKKINDA BİLGİ VE TESİSTE KULLANILAN BİYOKÜTLE YAKITLAR VE ORC SİSTEMİ İÇİN KIZGIN YAĞ ÜRETİMİ

3.1. Tesis Hakkında Genel Bilgi

Çalışmanın yapıldığı tesis, orman ürünleri sektöründe faaliyet gösteren, Türkiye'nin en büyük MDF, yonga levha üreticilerinden biridir. Bursa'nın İnegöl ilçesinde kurulu olan bu fabrikada toplamda 4 adet biyokütle ve mdf tozu yakan kazan bulunmaktadır. ORC sisteminin kurulu olduğu Nisa kazan, Mendez Enerji Üretim A.Ş. adı altında, üretilen elektriği YEKDEM mekanizması kapsamında teşvikli fiyattan 10 yıl boyunca devlete satacaktır.

3.2. Biyokütle Enerji Tesisinde Kullanılan Atık Bilgileri

3.2.1. Ağaç kabuğu

Yonga levha ve MDF üretiminin hammaddesi odundur. Ham olarak kesilen odunlar öncelikle kabuk soyma işlemine tabi tutulurlar. Bu işlemde açığa çıkan kabuklar, enerji tesisi için yakıt olarak kullanılır. Ortalama ısı değerleri 2500 kcal/kg – 3500 kcal/kg aralığındadır. Yakıtın nem oranına göre ısı değeri değişmektedir.



Şekil 3.1. Tesiste yakıt olarak kullanılan ağaç kabukları

3.2.2. Kereste atıkları

Ağaç kabuklarına ek olarak, inşaat ve mobilya üretiminden açığa çıkan kereste atıkları da yakıt olarak değerlendirilmektedir. Kırıcılarda uygun boyutlara getirilen atıklar, kazana sorunsuz şekilde beslenebilmektedir.



Şekil 3.2. Kereste atıkları

3.3. Tesisteki Biyokütle Kazanları ve Yardımcı Ekipmanları

Sanayi tesisinde bulunan kazan, kızgın yağ ve sıcak gaz üretmektedir. Üretilen kızgın yağ, hem ORC türbini için gerekli olan ısıyı sağlamakta, aynı zamanda da buhar ihtiyacının arttığı durumlarda; buhar jeneratöründe doymuş buhar üretimi için kullanılmaktadır. Sıcak gazlar ise yonga levha üretimi prosesinde kullanılmaktadır. Kazanın toplam ısıl kapasitesi 50 MWth gücündedir.

Tablo 3.1. Tesisteki kazanın ısıl güç değerleri

Biyokütle Enerji Tesisi Kazan Isıl Gücü		
Kızgın Yağ	35	MW
Sıcak Gaz	15	MW
Toplam	50	MWth

3.3.1. Yakıt besleme sistemi

Biyokütle kazanında yakılacak olan ağaç kabuğu ve kereste atıkları hareketli yataklı yakıt besleme sistemine iş makinaları vasıtasıyla taşınmaktadır. Hareketli tabanlı

yakıt besleme sisteminde 4 adet kaymalı taban bulunmakta ve bu tabanlardaki taşıyıcılar vasıtası ile yakıt bantlı konveyöre gönderilmektedir. Hareketli tabanlı yakıt besleme sistemi 4 adet piston vasıtasıyla, hidrolik tahrik yöntemiyle çalışmaktadır. Kayar tabanların çalışma periyotları mevsim şartları, yakıt nem oranı ve kazan çalışma kapasitesi parametrelerine bağlı olarak, bir zaman rölesi yardımı ile ayarlanmaktadır.

Yakıt bunkerinden geçen yakıtlar eğimli tarzda çalışan bantlı konveyöre geldikten sonra buradan kazana taşınmaktadır. Konveyör öncesinde bulunan diskli elek sistemi, çok iri parçalı ağaç atıklarını ya da taş toprak gibi istenmeyen atıkları ayırarak, kazana gönderilmesini engellemektedir. Bantlı konveyörde yakıtın eğim nedeniyle geri düşmesini engelleyen bölmeler bulunmaktadır. Bantlı konveyör açısı yakıtın rahatlıkla taşınmasını sağlayacak tarzda tasarlanmıştır. Bantlı konveyör sistemleri taşıdığı yakıtı, yakıt besleme bunkerlerinde bulunan yakıt seviye sensörlerinden aldığı sinyallerle, boş olan bunkere göndermektedir.



Şekil 3.3. Kayar tabanlı yakıt besleme sistemi

BERSEY yakıt besleme sisteminin bir parçası olan yakıt bunkerine gelen yakıtlar besleme sistemine inerek yine hidrolik pistonlar vasıtasıyla tahrik alan yakıt besleme itme kolları ile yakma ocağına aktarılmaktadır. Yakıt besleme itme kolları, değişken

parametrelere göre zaman rölesi ile ayarlanabilmektedir. İtici kolların zaman ayarlaması operasyon binasında bulunan bilgisayarlı otomasyon ekranında görülebilmekte ve gerektiğinde müdahale edilebilmektedir.



Şekil 3.4. Bantlı konveyör sistemi

Yakıt besleme sisteminde bulunan hareketli tabanlı yakıt besleyici, bantlı konveyörler, ve BERSEY tipi yakıt besleme sisteminin tüm elemanları otomasyon ekranından sürekli takip edilebilmekte ve gerekli müdahaleler bu ekrandan yapılabilmektedir.



Şekil 3.5. Disk elek sistemi



Şekil 3.6. Diskli ayırıcıdan gelen atıkların toplandığı hazne

3.3.2. Yanma ocağı

Biyokütle kazanında yakılacak olan biyokütle atıklar yakma ocağında bulunan ileri hareketli ızgaralar üzerinde yanmaktadır. Yanma ocağı refrakter malzemeden yapılmış duvarlarla kaplıdır ve ısı kaybının minimum olacağı şekilde dizayn edilmiştir. İleri hareketli ızgara yakıt kurutma, yanma ve kül dökme bölgeleri olacak şekilde 3 bölmeden oluşmaktadır. Yakıt besleme sisteminden gelen yakıt birinci bölme olan kurutma bölgesinde ön kurutmaya tabi tutulmakta ve yanma sıcaklığına getirilmektedir. Kurutulan yakıt ikinci bölmeye gönderilmekte ve burada yanma işlemi gerçekleşmektedir. Yanma sonunda geriye kalan cürufklar ve küller ise üçüncü bölmeye gönderilerek burada soğutulma işlemi yapılmaktadır. Soğutma işlemi son basamakta su ile yapılmaktadır. Soğutulan yanma ürünleri üçüncü bölme sonunda bulunan kül dökme alanına helezonlarla dökülerek ocaktan uzaklaştırılmaktadır. Kül dökme alanına dökülen küller, sanayi tesisi içerisinde mevcut inşaat alanlarında dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3.7. Yanma odası bakım çalışmaları

İleri hareketli ızgara sisteminin üç bölmesi de ayrı ayrı hidrolik pistonlardan tahrik almaktadır. Yakıtın durumuna ve kapasiteye göre ayarlanabilen piston hareketleri otomasyon ekranından izlenebilmekte olup, gerektiği durumlarda müdahale edilebilir ve otomatik olarak da çalıştırılabilmektedir.



Şekil 3.8. Yanma sonrası oluşan kül depolama alanı

Yanma ocağına akuple edilen bir kamera sistemi ile kazan operatörü ızgara hareketlerini, yanma durumunu ve yakıtın ızgara üzerine dökülme durumunu, operatör odasında bulunan bir ekrandan izleyebilmektedir. Bu izleme sistemi

sayesinde operatör hareketli ızgara sisteminin piston mekanizmasına müdahale edebilmektedir.



Şekil 3.9. Yanma odasında bulunan video kamera görüntüsü

Yanma odası dış saç gövdesi, çelik profilleri ve köşebentlerle takviye edilmiş sağlam bir çelik konstrüksiyon yapıdan ibarettir. Yanma Kamarası iç yüzeyi, yüksek sıcaklığa mukavim paslanmaz çelik ankorlar ve askı tuğlaları ile desteklenmiş çok katmanlı refrakter malzeme ile kaplıdır. Değişik gaz sıcaklıklarına göre 350 – 400 mm kalınlıkta olan refrakter malzemeler içten dışarıya doğru sırasıyla yüksek sıcaklığa ve ateşe mukavim plastik refrakter, yüksek sıcaklığa mukavim izolasyon harcı ve seramik faybır katmanlarından müteşekkildir. Yanma Kamarası, tam yanma için gerekli olan minimum gaz tutum zamanının sağlanabilmesi için yeter yükseklikte ve hacimde dizayn edilmiştir olup ısı tansfer yüzeylerine kirletici ve aşındırıcı küllerin taşınmasını engellemek için uygun gaz hızlarını sağlayacak şekilde gaz akış kesit alanına sahiptir.

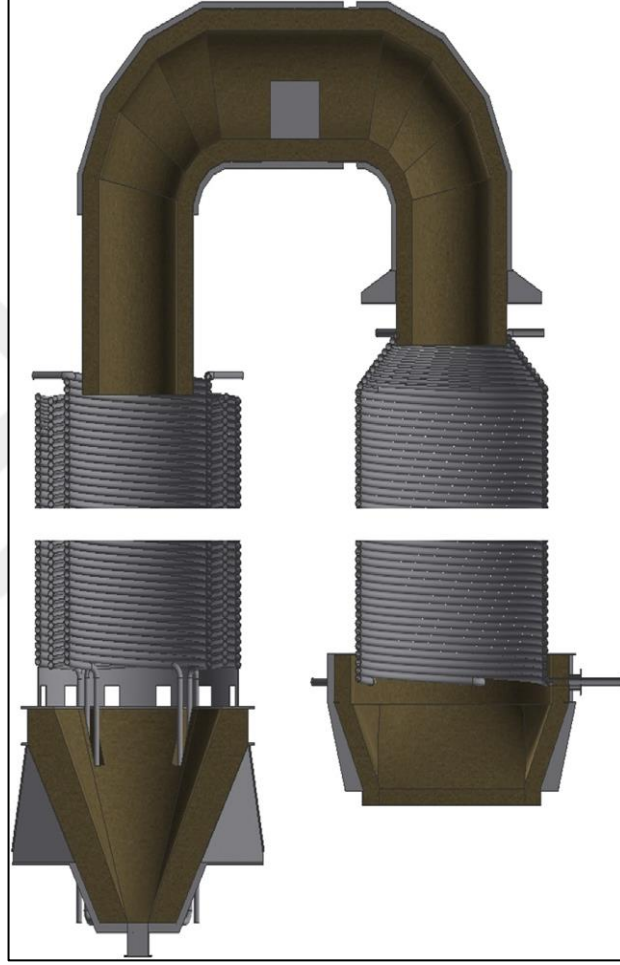
Yanma kamarası, gözetleme camları bakım ve işletme için gerekli olacak adam delikleri ile donatılmıştır.

Tablo 3.2. Yanma odası malzeme özellikleri

Miktar	1 Adet
Tip	Çok Katmanlı Refrakter Kaplı
Gövde ve Taşıyıcı Çelik Malzemeler	S 235 JRG2
Ankor Malzemeleri	Isıya mukavim paslanmaz çelik – AISI AISI 310

3.3.3. Kızgın yağ kazanı

Kızgın yağ kazanı, radyasyon ve konvektif bölümlerinden oluşmaktadır. Radyasyon bölümünde yanma alevine maruz kalarak alevin ısınıı serpantinler ile kızgın yağa aktarmaktadır. Radyasyon enerjisi kazanılan yanma gazları, konvektif bölgesine geçerek burada taşınım ile ısınıı kızgın yağa aktarmaktadır.



Şekil 3.10. Kızgın yağ kazanı radyasyon ve konveksiyon bölgesi

Kazandaki refrakter kaplama ile minimum ısı kaybı oluşmaktadır. Kızgın yağ geri dönüş hattında bulunan degazör yardımıyla gazlardan arındırılan ısı transfer sıvısı, kızgın yağ sirkülasyon pompalarına gelmektedir. Ardından sisteme entegre olan kızgın yağ filtreleme sistemine geçerek, içerisindeki yabancı partiküllerden arındırılmaktadır. Filtreleme sistemi vücudumuzdaki böbrek sistemi mantığıyla çalışmaktadır. Sadece mekanik olarak bir filtreleme işlemi yapılmaktadır. Kimyasal değerlere herhangi bir müdahale söz konusu değildir.



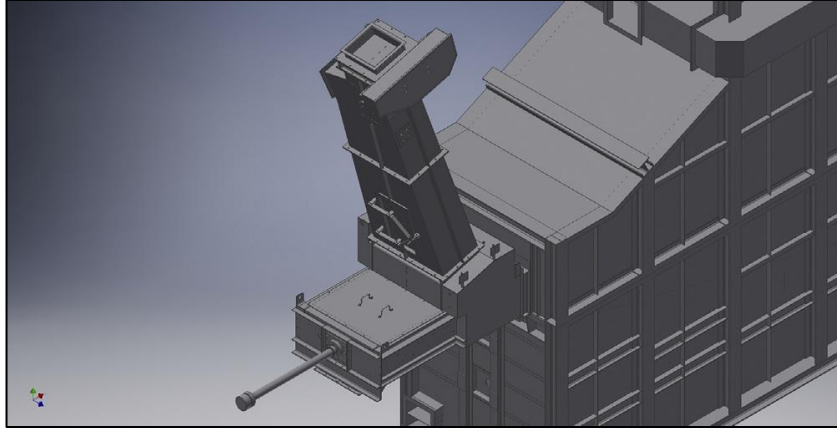
Şekil 3.11. Kızgın yağ hattı sirkülasyon pompa ve vana grubu

Tablo 3.3. Kızgın yağ kazanı malzeme özellikleri

RADYASYON KAZANI			
Miktar		1 Unite	
Standardlar	Sistem		DIN 4754
Boru ve Kollektörler		EN 10216-2	
Saç Plakalar		EN 10028-2	
Malzemeler	Gövde Saçları		S 2355 JRG2
Boru ve Kollektörler		16 Mo 3 veya üzeri	
KONVEKSİYON KAZANI			
Miktar		1 Ünite / 5 adet	
Standartlar	Sistem		DIN 4754
Boru ve Kollektörler		EN 10216-2	
Saç Plakalar		EN 10028-2	
Malzemeler	Gövde Saçları		S 2355 JRG2
Boru ve Kollektörler		16 Mo3 / P 235 GH	

3.3.4. Hareketli ızgaraya yakıt besleme sistemi

Yakıt besleme sistemi ızgaranın üstüne istenen boyutlarda ve miktardaki yakıtı beslemek için geliştirilmiştir. Isıl gücün istenilen miktarda olabilmesini sağlayan bölümdür. Yanmanın geri kaçmasını önlemek için su soğutma sistemi, nem ayarlamak için sprey nozulları ve sıcaklık ölçüm sistemi ile donatılmıştır. Bu sayede yakıt besleme sisteminde bulunan yakıtların, bunker içerisinde tutuşmaları önlenmektedir. Aksi taktirde beslemene sistemi içerisine kaçan alev, sistem açısından güvenlik problemi oluşturarak kontrolsüz yangınlara sebebiyet verebilecek potansiyele sahiptir.



Şekil 3.12. Izgara yakıt besleme sistemi

Miktarı: 1 Adet

Tipi: Hidrolik

Genişlik: 2.730 x 2 adet

Piston sayısı: 2 x 2

Kapama klapesi: 400 x 600 Hidrolik

Alt / Ust Seviye Kontrolü: Camlogic

Sıcaklık kontrolü: Pt 100 Sensor

3.3.5. Sistem hidrolik güç modülü

Hareketli meyilli ızgara ve yakıt besleme bunkerı pistonlar ile kayar kapak pistonunu kumanda etmek için kullanılmaktadır. Hidrolik ünitesi sıcaklık kontrolü, seviye göstergesi, soğutma ünitesi ve diğer gerekli ölçüm ve kontrol ekipmanları ile donatılmıştır.

Miktarı: 1 Adet

Marka: PROTEK

Pompa Basıncı: 180 bar

Pompa Debisi: 100 litre /dakika

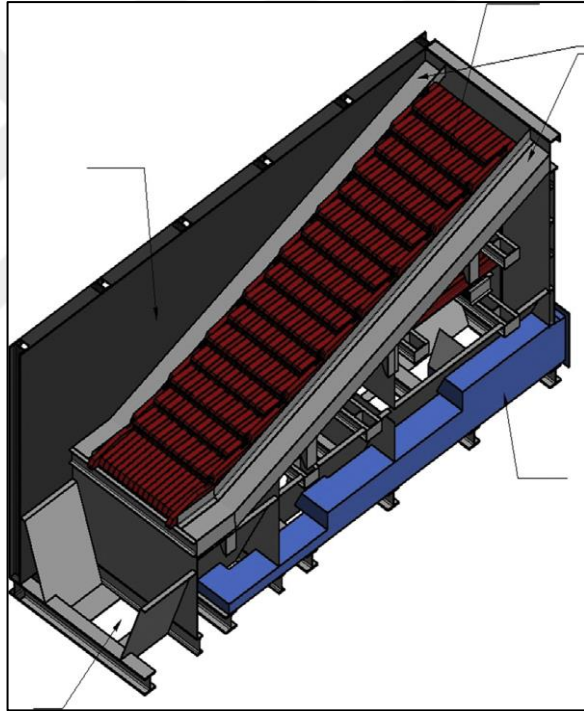
Tank Hacmi: 250 litre

3.3.6. İleri itmeli hareketli ızgara

Bersey, BHMI, model ileri itmeli hareketli meyilli ızgaralar, sağlam bir çelik yapı üzerine dizilmiş hareketli ve sabit ızgara elemanlarından oluşur.

Izgara 3 ayrı yanma bölümünden müteşekkil olup, beher yanma bölgesinin hareketi sıralı bir şekilde beraber PLC ekranı üzerinden otomatik veya operatör tarafından manuel olarak kontrol edilebilir. Bu sayede değişik rutubet ve alt ısı değerine haiz yakıtlar, operatör tarafından ayarlanarak tam yanma olacak şekilde yakılabilir.

Izgara elemanları, sabit ve hareketli olacak şekilde birbirleri üzerine otururlar. Izgaralar arasında hava geçiş kanalları “Z” şeklinde labirent tipli olup, hava kanallarından alt bunkerlere yakıt düşmesi de bu sayede engellenir. Yüksek sıcaklığa mukavemetli Cr-Ni alaşımlı çelik döküm olarak imal edilen ızgaralar, hava soğutmalı olarak dizayn edilmiştir, bu sayede su ile soğutmadan kaynaklanan problemlerin ve enerji kayıplarının önüne geçilmiştir.



Şekil 3.13. İleri itmeli hareketli ızgara

Miktar: 1 Set 2 Parça

Izgara Yüzeyi: 66 m²

Yakma Kapasitesi: 60 MW

Izgara Malzemesi: A 10 Kalite – Ni / Cr alaşımlı

Tahrik Sistemi: Hidrolik

Ayar Kademesi: 1:3

Kontrollü Yakma Bölümü: 3 bölme

3.3.7. Ön ocaklı kızgın yağ kazanı

Termik yağın çıkış sıcaklığı: 300 °C max

Termik yağın gidiş-dönüş sıcaklık farkı: 40 °C

Yakıt cinsi: Ağaç kabuğu

Yakıtın alt ısı değeri: 2.500 Kcal/kg

Kazan verimi %75

Izgara tipi: İleri itmeli hareketli meyilli ızgara

3.3.8. Kızgın yağ kazanı serpantini

Kızgın yağ kazanı ısıtıcı ve ön ocak serpantini 5-6 mm et kalınlığında EN 10216-2 normuna uygun P235GH kalitesinde çelik çekme (dikişsiz) boruların sarılmasından meydana gelmiştir. Serpantin içindeki termik yağın akış hızı standartlara uygun olarak seçilmiştir. Bu durum serpantin girişlerinde bulunan akış kontrol cihazı ile kontrol altına alınmıştır. Bu cihazlar vasıtasıyla korozyon, parçalanma ve film tabakası oluşumu önlenmekte ayrıca ısı transfer yağının kullanım ömrü uzamaktadır. Kızgın yağ serpantini iç içe iki serpantin olarak imal edildiğinden duman gazlarına üç geçiş sağlanmıştır. Böylece gazların ısısından en üst düzeyde yararlanılmıştır.

3.3.9. Gaz alma ünitesi (Degazör)

Kızgın yağ kazanı ve boru hatlarında dolaşan akışkanın içinde bulunan gazların dışarıya atılması için gaz alıcı yapılmıştır. Bunun sayesinde kazanın hava yapması engellenmekte daha düzenli ve emniyetli koşullarda bir çalışma sağlanmaktadır.



Şekil 3.14. Degazör tankı

3.3.10. Kızgın yağ kazanı sirkülasyon pompası

Tipi: NTT 100-250/02 500 m³/h ALLWEILLER Marka

Pompa özel fanlı, çelik döküm gövdeli, tek kademeli, hava soğutma halkalı, mekanik salmastralı ve elektrik motoru ile beraber bir şasi üzerine elastik kaplinle akuple edilmiştir.

3.3.11. Kazan ve pompa armatürleri

Tablo 3.4. Kazan ve pompa armatürleri

Miktar	2 Takım		
Basınç Sınıfı	PN 25 / PN 40		
Marka	ARI ARMATUREN		
Tip	Çelik Döküm – Metal Körüklü – Kaynak Boyunlu		
Çap	DN 250		
Yağ Giriş Vanası	DN 250	2 adet	
Pislik Tutucu	DN 250	2 adet	
Pompa Boşaltma Vanası	DN 25	2 adet	
Çek Valf- Wafer Tip	DN 250	2 adet	
Çek Valf Boşaltma Vanası	DN 20	2 adet	
Yağ Çıkış Vanası	DN 250	2 adet	Ayar Klapeli
Kollektör Boşaltma Vanası	DN 50	3 adet	
Havalık Vanası	DN 20	6 adet	
Manometre Takımı	0-10 bar	2 adet	Ø 160 mm
Manometre Takımı	0-2,5 bar	2 adet	Ø 100 mm
Manometre Takımı	0-10 bar	2 adet	Ø 100 mm
Termometre	L: 200 mm	2 adet	Ø 160 mm
Emniyet Vanası Oransal	DN 80	1 adet	

3.3.12. Genleşme tankı

Miktarı: 1 Adet

Tipi: Yatık silindirik bombe başlı

Hacmi: 20 m³ (Su hacimli)

Çapı: Ø 2100 mm

Toplam boyu: 6150 mm (Bombeler dahil)

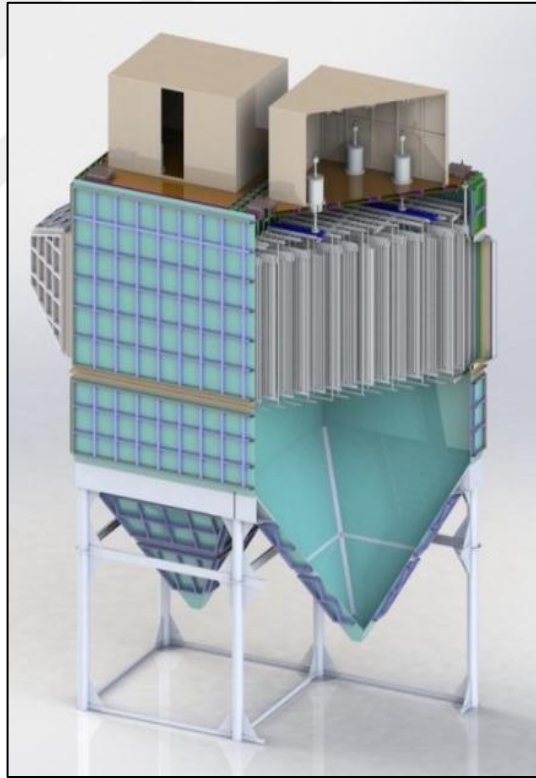
Sistemin çalışma sıcaklığı limitlerinde sirküle eden akışkanda meydana gelen hacim artışını emniyetli bir şekilde karşılayacak genleşme tankı sistemin en yüksek noktasına monte edilmiştir.

3.3.13. Elektrostatik toz filtresi

Rekuperatörden çıkan gaz Elektrostatik Filtre'ye girer. Elektrostatik Filtre'de tozların tutulmasında etken olan kuvvet elektrik kuvvetidir ve bu kuvvet sadece taneye etki ettiğinden, basınç kayıpları diğer toz tutma sistemlerine göre çok azdır.

Bu filtrelerin genel çalışma prensibi şöyledir;

- Tanelerin (-) elektrik yükü ile yüklenmesi,
- Yüklenmiş tanelerin bir elektrik alanı içerisinde gaz akışından ayrılması,
- Yüklenmiş ve gaz akışından ayrılmış toz tanelerinin (+) toplama elektrotlarında biriktirilmesi,
- Toplama elektrotlarında biriken tozların bunkerlere çekilerek dökülmesi,
- Bunkerlerde ki tozların Elektrostatik Filtre dışına aktarılması



Şekil 3.15. Elektrostatik toz filtresi (ESP)

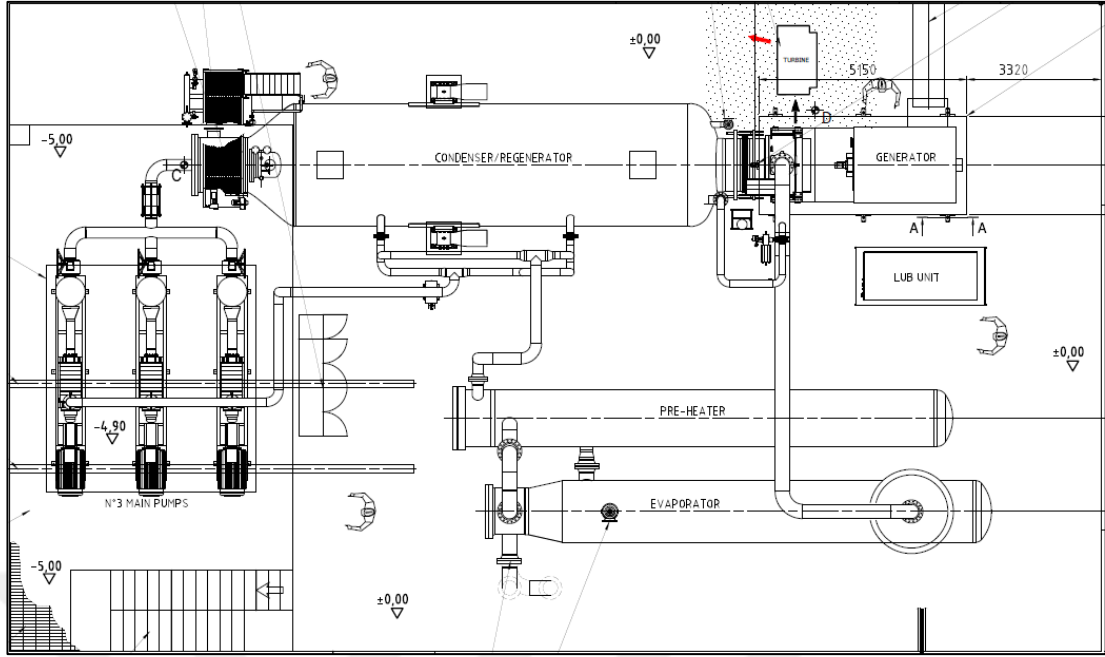
3.4. ORC Türbin Ekipmanı Özellikleri

Tesiste bulunan ORC türbini İtalyan menşeli olan TURBODEN markasının T55-CHP modelidir. ORC modülünün teknik özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Bu projeye özel olarak Türkiye’de imal edilen bu türbin, yerli imalat olması sebebiyle mevcut tarifeye ek olarak 20 USD/MWh ekstra yerli ekipman teşviği almaya hak kazanmıştır.

Tablo 3.5. ORC modülü teknik özellikleri

Parametreler	Değerler
Nominal yükte termal yağın giriş sıcaklığı (°C)	300
Nominal yükte termal yağın çıkış sıcaklığı (°C)	259
Nominal yükte ORC ünitesinde termal yağın basınç düşüşü (bar)	1,70
ORC ünitesi termal yağ hacmi (lt)	2.500 lt (evaporator) 4900 lt (preheater)
Nominal yükte soğutma suyu kondenser giriş sıcaklığı (°C)	90
Nominal yükte soğutma suyu kondenser çıkış sıcaklığı (°C)	110
Nominal yükte ORC ünitesinde sıcak suyun basınç kaybı (bar)	1
ORC ünitesi kondenser su hacmi (lt)	5080
Su içerisindeki glikol (%)	0
Nominal yükte termal yağ gücü (kW)	35.695
Nominal yükte brüt elektrik üretim gücü (kW)	5.533
Nominal yükte ORC ünitesi elektrik tüketim gücü (kW)	417
Nominal yükteki net elektrik üretimi (kW)	5.116
Nominal yükte kondenserden elde edilen ısı gücü (kW)	30.300
Minimum çalışabileceği yük (%)	10
Nominal yükte ORC modülünden kaybolan ısı (kW)	90
1 m yakındaki gürültü seviyesi [dB(A)]	90
Organik akışkan	Octamethyltrisiloxane (MDM Silikon Yağ)
ORC ünitesindeki organik akışkan miktarı (kg)	14.800
ORC ünitesi toplam ağırlığı (kg)	194.250
ORC ünitesi toplam uzunluğu(oda) (mm)	27.000
ORC ünitesi genişliği(oda) (mm)	15.000
ORC ünitesi yüksekliği(oda) (mm)	8.000



Şekil 3.16. ORC modülü oda yerleşimi



Şekil 3.17. ORC türbin odası üstten görünüm

3.4.1. Ön Isıtıcı

Ön ısıtıcıda, Orc organik akışkanı termal yağ tarafından ısıtılmaktadır. Ön ısıtıcı çıkışında organik akışkan sıvı fazdadır. Organik akışkan ön ısıtıcısının teknik özellikleri Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Ön ısıtıcı teknik özellikleri

Eşanjör malzemesi	Karbon Çeliği
Eşanjör tipi	Borulu ısı değiştirici
Üretimde baz alınan norm	EN13445
Dizayn basıncı (Termal yağ tarafı)	0~13 bar
Dizayn basıncı (organik akışkan tarafı)	-1~19 bar
Dizayn sıcaklığı (Termal yağ tarafı)	-10~340 °C
Dizayn sıcaklığı (Organik akışkan tarafı)	-10~340 °C

3.4.2. Evaporatör

Evaporatör, kızgın yağdan aldığı termal enerji ile organik akışkanı ısıtarak sıvı fazdan buhar fazına geçirmektedir. Buharlaştırıcı teknik özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Evaporatör teknik özellikleri

Eşanjör malzemesi	Karbon çeliği
Eşanjör tipi	Borulu ısı değiştirici
Üretimde baz alınan norm	EN13445
Dizayn basıncı (Termal yağ tarafı)	0~13 bar
Dizayn basıncı (organik akışkan tarafı)	-1~19 bar
Dizayn sıcaklığı (Termal yağ tarafı)	-10~340 °C
Dizayn sıcaklığı (Organik akışkan tarafı)	-10~340 °C



Şekil 3.18. ORC preheater ve evaporatör

3.4.3. Rejeneratör

Türbin çıkışında buhar fazındaki organik akışkan, kondenserdeki yoğunlaşmış ve pompa tarafından basıncı artırılmış sıvı haldeki organik akışkanı ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Malzeme olarak bakırdan imal edilmiştir ve kanatçıklı boru tipli eşanjör ile, türbin çıkışındaki akışkanın ısını, pompadan çıkan soğuk haldeki akışkana transfer etmektedir. Rejeneratörün sistem verimine etkisi oldukça yüksektir. Sistem içerisinde yapılan bu ara ısıtma prosesi, ünitenin elektrik üretim verimini % 2-3 puanında artırmaktadır. Rejeneratörün teknik özellikleri Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Rejeneratör teknik özellikleri

Eşanjör malzemesi	Bakır
Eşanjör tipi	Kanatçıklı boru
Dizayn basıncı (sıvı organik akışkan tarafı)	-1~19 bar
Dizayn basıncı (buhar organik akışkan tarafı)	-1~6 bar
Dizayn sıcaklığı (sıvı organik akışkan tarafı)	21~300 °C
Dizayn sıcaklığı (buhar organik akışkan tarafı)	21~340 °C

3.4.4. Kondenser

Orc türbininden çıkan çürük buharın yoğunlaştırılması ve bu ısıdan sıcak su üretilmesi için kullanılmaktadır. Su soğutmalı kondenser kullanılacaktır. Su soğutmalı kondenserler kojeneratif modda çalışma olanağı sağlamaktadır ve bu projede kondenser bölümünde soğutma işlemi yaparken, 110 santigrat derece sıcak su üretilmektedir. Kondenser teknik özellikleri Tablo 3.9’da sunulmuştur.

Tablo 3.9. Kondenser teknik özellikleri

Eşanjör malzemesi	Karbon çeliği
Eşanjör tipi	Borulu ısı değiştirici
Üretimde baz alınan norm	EN13445
Dizayn basıncı (su tarafı)	0~16 bar
Dizayn basıncı (organik akışkan tarafı)	-1~6 bar
Dizayn sıcaklığı (su tarafı)	-9~150 °C
Dizayn sıcaklığı (Organik akışkan tarafı)	21~340 °C



Şekil 3.19. ORC sistemi kondenseri

3.4.5. Türbin

Evaporatörden kızgın buhar olarak çıkan organik akışkan, türbin kanatçıklarına çarparak mekanik iş elde edilmektedir. Türbin aşağıdaki ekipmanları üzerinde bulundurmaktadır;

- Akış kontrol elemanı (flow switch),
- Yağlayıcıların sıcaklık kontrol elemanı,
- Aşırı hıza (devre) karşı emniyet valfi

Teknik özellikleri;

- Rulmanlı yataklar: Yağlama sistemli yatak
- Sızdırmazlık elemanı: Mekanik keçe
- Nominal dönme hızı: ~3000 dev/dak



Şekil 3.20. ORC türbini

3.4.6. Jeneratör

Buhar türbinine entegre edilen jeneratör ile mekanik iş elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Jeneratör aşağıdaki ekipmanlarla birlikte entegre olacaktır;

- Stator kanatları sıcaklık kontrolleri
- Rotor yatakları sıcaklık kontrolleri
- Jeneratör soğutma (su soğutmalı)

Nominal güç: 6000 kW – 6,3 kV

Frekans: 50 Hz



Şekil 3.21. ORC türbini tahrikli jeneratör

3.4.7. Pompa

Pompa, kondeserden çıkan sıkıştırılmış sıvı halindeki organik akışkanın basıncının kondeser basıncından buharlaştırıcı basıncına yükseltilmesi için kullanılacaktır.

Pompanın teknik özellikleri;

- Pompa sayısı: 3
- Pompa tipi: Kademeli santrifüj pompa
- Sızdırmazlık elemanı: Çift mekanik keçe
- Yataklar: Yağlama sistemli rulmanlı yataklar
- Kısmi yüklerde çalışma: Evet - Frekans konvertörlü
- Nominal hız: ~1.000 dev/dak



Şekil 3.22. ORC organik akışkan sirkülasyon pompaları

3.4.8. Ölçme ve kontrol parametreleri

Sistemde aşağıdaki sıcaklık ölçümleri yapılmaktadır;

- Evaporatöre termal yağ girişi
- Evaporatör ile ön ısıtıcı arasındaki termal yağ,
- Ön ısıtıcı çıkışı termal yağ,
- Yoğuşturucuya su girişi,
- Yoğuşturucu su çıkışı,

- Evaporatör organik akışkan çıkışı,
- Evaporatör organik akışkan girişi,
- Organik akışkan ön ısıtıcı girişi,
- Organik akışkan rejeneratör girişi,
- Organik akışkan rejeneratör çıkışı,
- Organik akışkan yoğuşturucu çıkışı,
- Jeneratör yatakları (ön kısım ve arka kısım),
- Jeneratör stator kanatları
- Yataklar soğutucu akışkan
- Yağlama gerektiren tüm sistemin yağlayıcı akışkan sıcaklığı,
- Yağlama gerektiren tüm sistemin soğutucu akışkan sıcaklığı,

Basınçlar;

- Evaporatör çıkışı Organik akışkan basıncı,
- Kondenserde organik akışkan basıncı.

Titreşim;

- Türbinin vibrasyon ölçümleri scada üzerinden izlenmektedir.



Şekil 3.23. ORC otomasyon ve sistem panoları

3.4.9. Türbin yağlama sistemi

ORC türbin modülünde bulunan yataklar ve yağlama gerektiren diğer elemanların yağlamaları, bu sistem üzerinden yapılmaktadır.



Şekil 3.24. ORC türbini yağlama sistemi

4. ORC TÜRİNİ ÇIKIŞINDA SICAK SU ÜRETİMİ

4.1. ORC Kojenerasyon Sistemi ve Sıcak Su Üretimi

Orc sistemleri, kojenerasyon modunda klasik rankine sistemlerine göre daha yüksek ısı verime sahiptirler. Yakıtların yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisi, kızgın yağ kazanında ısı transfer yağı vasıtasıyla, Orc türbinine aktarılmakta ve burada ısı enerjisinin bir bölümü türbin jeneratör ünitesinde elektriğe dönüştürülmektedir. Isı enerjisinin tamamı elektrik enerjisine dönüşemediği için, kalan büyük kısmının çevrimin devam edebilmesi adına uzaklaştırılması gerekmektedir. Orc türbininin kondenser bölümünde bu ısı sıcak suya aktarılarak, ısının tamamını kullanabilme imkanı sağlamaktadır. Böylelikle yakıttan elde edilen ısı enerjisinin yaklaşık olarak %98'ini faydalı enerjiye dönüşmüş oluyor.

4.2. Sıcak Suyun MDF Üretiminde Kullanılması

Orc türbini kondeserinde üretilen sıcak su, yonga levha üretiminde kullanılan liflerin kurutulması için tasarlanan kurutucuya ısı enerjisi sağlamaktadır. 110 °C sıcaklıkta kurutucuya giren sıcak su 90 °C ile kurutucuyu terk edip, orc için soğutma görevi yapmaktadır.



Şekil 4.1. ORC tarafından üretilen sıcak suyun kullanıldığı kurutma sistemi

5. MATERYAL VE METOTLAR

5.1. Biyokütle Yakıtlı Kızgın Yağ Kazanı

Yonga levha ve MDF üretimi yapılan tesiste üretimin ana maddesi olan ağaçların ön işleminden açığa çıkan kabuklar, hareketli ızgaralı kızgın yağ kazanında yakılarak 300 °C de kızgın yağ elde edilmektedir. Hareketli ızgaralı biyokütle kazanı teknik özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Üretilen kızgın yağın bir kısmı md f üretiminde bir kısmı ise ORC ünitesinde kullanılarak elektrik ve ısı enerjisi üretilmektedir. Kızgın yağ kazanında kullanılan biyokütlenin kimyasal analizi Tablo 5.2’de verilmiştir. Biyokütle kazanında ısı transfer yağı olarak kullanılan termal yağın özellikleri Tablo 5.3’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Hareketli ızgaralı biyokütle kazanı özellikleri

Hareketli ızgaralı biyokütle kazanı	
Kazan tipi	Dik silindirik
Isıl kapasitesi (MWth)	50 MWth
Termal yağın çıkış sıcaklığı (°C)	300
Termal yağın gidiş-dönüş sıcaklık farkı (°C)	40
Yakıt türü	Ağaç kabukları, kereste atıkları
Yakıtın alt ısı değeri (kcal/kg)	2.500
Kazan verimi (%)	75
Izgara tipi	İleri itmeli hareketli ızgara
Izgara yüzey alanı (m2)	66

Tablo 5.2. Yakıt olarak kullanılan biyokütlenin kimyasal analizi

Yakıt (Biyokütle) Bileşenleri	%
C (karbon içeriği kg/kg)	46,0
H (hidrojen içeriği kg/kg)	6,0
N (azot içeriği kg/kg)	0,2
O (oksijen içeriği kg/kg)	41,0
S (kükürt içeriği kg/kg)	0,0
W (su içeriği kg/kg)	6,0
A (kül içeriği kg/kg)	0,8
Toplam	100

Tablo 5.3. Biyokütle kazanında kullanılan ısı transfer yağının özellikleri

Parametreler	Değerler
Kompozisyon	Sentetik hidrokarbon karışımı
Nem miktarı (max)	250 ppm
Tutuşma noktası (ASTM D-92)	177 °C
Yanma noktası(ASTM D-92)	218 °C
Kendi kendine tutuşma noktası (ASTM E-659)	343 °C
Kinematik viskozite (40°C’de)	19 mm ² /s
Kinematik viskozite (100°C’de)	3,5 mm ² /s
Özgül ağırlık (25 °C’de)	868 kg/m ³
Termal genleşme katsayısı (200°C’de)	0,000961 °C
Ortalama molekül ağırlığı	320
Akma noktası	-54 °C
Pompalanabilirlik (2000 mm ² /s)	-28 °C
Pompalanabilirlik (300 mm ² /s)	-8 °C
Kaynama aralığı (%10)	340 °C
Kaynama aralığı (%90)	390 °C
Buharlaşma ısısı (290 °C)	228 Kj/kg
Optimum kullanım aralığı	-25 °C ~ 290 °C
Genişletilmiş maksimum kullanım sıcaklığı	315 °C
Maksimum film sıcaklığı	335 °C

5.2. Enerji Analizi

Termodinamik terimi ilk kez, İngiliz bilim adamı Lord Kelvin tarafından, 1849 yılında yaptığı bir yayında kullanıldığı görülmüştür. Termodinamik sözcüğü, Latince therme (ısı) ve dynamis (güç) sözcüklerinden ortaya çıkarılmıştır ve eski zamanlardan beri varlığı bilinen ısıyı işe dönüştürme çabalarının uygun bir tanılması olmaktadır. Başka bir deyimle Termodinamik, fiziğin enerji ve enerjinin form değiştirmesi ile uğraşan bilim dalı olarak da tanımlanabilir. Termodinamiğin bu gibi değişik birçok tanımı olmakla birlikte termodinamikte esas unsur enerji olduğu için termodinamiği enerjinin bilimi olarak tanımlamak en doğrusudur.

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin korunumu yasasıdır. Bu yasa bir etkileşim sırasında enerjinin formunun bir formdan başka bir forma dönüşebileceğini fakat enerji miktarının sabit kaldığını ifade ediyor. Başka bir deyimle enerjinin yoktan var, vardan da yok edilemeyeceğini ancak form değiştirebileceğini vurgulamaktadır. Termodinamiğin, ikinci yasası ise enerjinin niceliğinin yanı sıra niteliğini de incelemektedir.

5.2.1. Birinci yasa analizi

1. yasa, kapalı ve açık sistemler için iki farklı şekilde incelenir. Çevresi ile ilişkisi olmayan bir sistemde (kapalı sistem), toplam enerji hep aynıdır. Çevresi ile arasında iş ve ısı alışverişi olan sistemlerde (açık sistem) enerji değişimi, sistemle çevresi arasındaki net ısı değişimine eşittir [65].

Sürekli akışlı açık sistemlerde, akışkan kontrol hacminde sürekli bir akış vardır. Akışkanın özellikleri kontrol hacmi içinde bir noktadan diğer noktaya farklılıklar gösterebilir fakat verilen noktada zamanla değişim olmamaktadır.

5.2.1.1. Kütlenin korunumu

Sürekli akışlı açık sistemde kontrol hacmi içindeki toplam kütle zamanda değişmemektedir. Sisteme giren kütle ile sistemden çıkan kütle birbirine eşittir. Sürekli akışlı açık sistemleri çözümlerken, bir zaman sürecinde sisteme giren veya çıkan kütleden çok birim zamanda akan kütle veya kütle debisi önem kazanmaktadır. Birçok giriş ve çıkışı olan sürekli akışlı açık sistem için kütlenin korunumu ilkesi aşağıdaki gibidir [65].

(Birim zamanda giren kütle miktarı) = (birim zamanda çıkan kütle miktarı)

$$\sum \dot{m}_{\text{giriş}} = \sum \dot{m}_{\text{çıkış}} \quad (5.1)$$

5.2.1.2. Enerjinin korunumu

Enerji analizi, termodinamiğin birinci kanunu olan enerjinin korunumu prensibine dayanmaktadır. Enerjinin korunumu denklemleri, sistem ile çevre arasında gerçekleşen iş ve ısı etkileşimlerinin net etkisinden türetilmektedir. Sürekli akışlı açık sistemde kontrol hacminin toplam enerjisi sabit olduğu belirtilmiştir. Böylece kontrol hacmine ısı, iş ve kütle akışı olarak giren enerjinin çıkan enerjiye eşit olması gerekmektedir. Sürekli akışlı açık sistemler için termodinamiğin birinci yasasına göre enerji korunumu aşağıdaki gibi yazılabilir [65]:

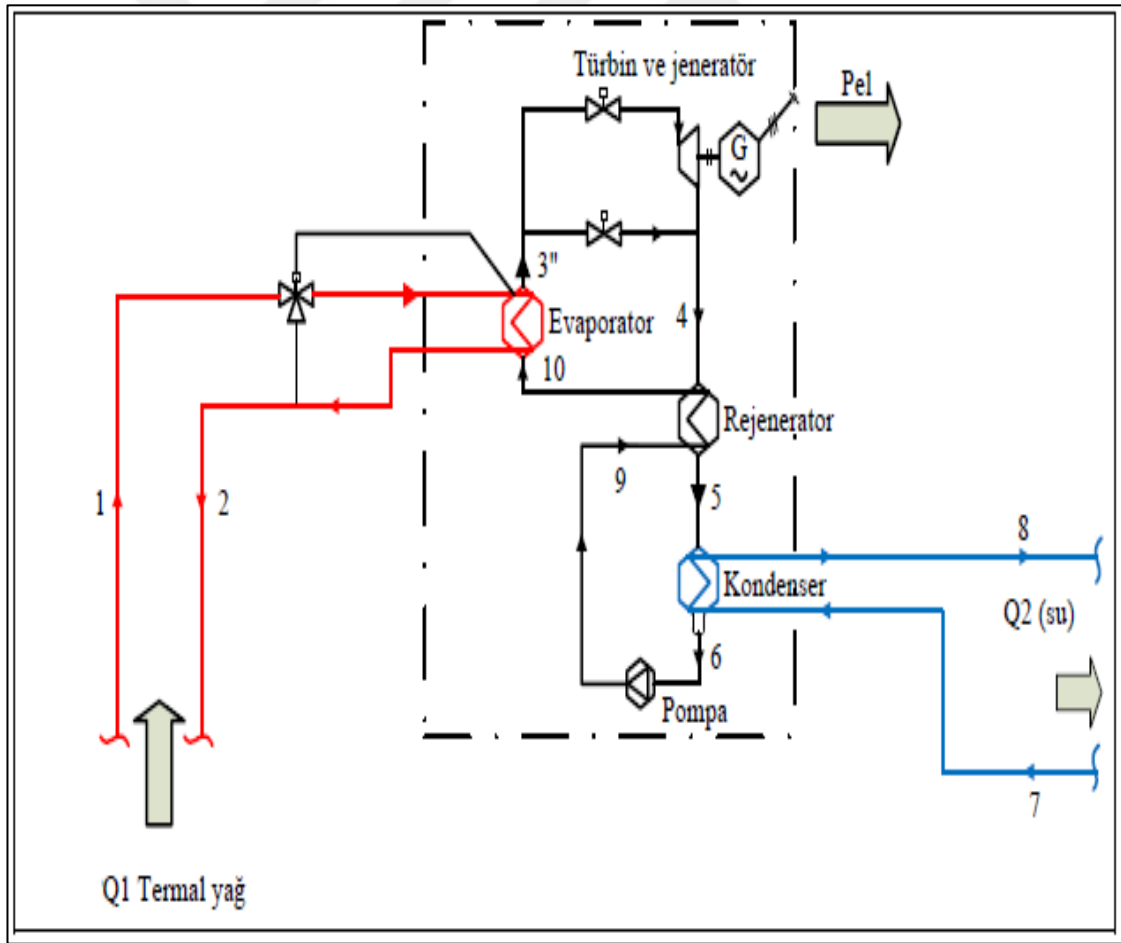
$$\left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{sınırları geçen} \\ \text{toplam enerji} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kütle ile birlikte} \\ \text{çıkan toplam enerji} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Birim zamanda} \\ \text{kütle ile birlikte} \\ \text{giren toplm enerji} \end{array} \right)$$

$$Q + W = \sum m_{\text{çıkış}} h_{\text{çıkış}} - \sum m_{\text{giriş}} h_{\text{giriş}} \quad (5.2)$$

Bu denklem genelde enerjinin korunumu kanununa karşılık gelmektedir ve herhangi bir hal değişimi gerçekleşen bir sistem için uygulanabilir. Bu denklemin mühendislik problemlerinin çözümünde başarılı bir şekilde uygulanması, enerjinin farklı formlarının anlaşılmasına ve enerji geçişi formlarının fark edilmesine bağlıdır.

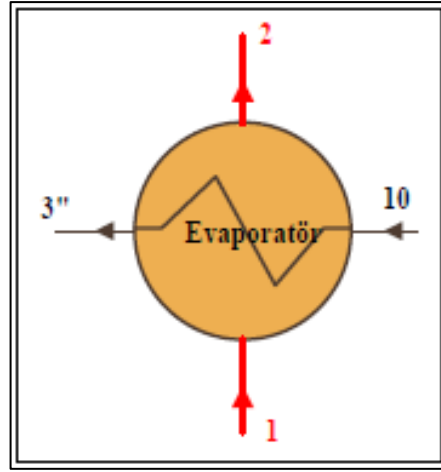
5.3. ORC Modülü Birinci Yasa Analizi

Biyokütle kazanında, biyokütle atıklar yakılarak kızgın yağ elde edilen bir mdf üretim tesisinde kızgın yağın ısıl enerjisinden faydalanılarak ORC ünitesinde elektrik ve sıcak su üretilmektedir. ORC ünitesinde organik akışkan olarak octamethyldisiloxane (MDM Silion yağ) kullanılmaktadır. ORC ünitesinin akış şeması aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 5.1. ORC sistemi prosesi şematik gösterimi [54]

5.3.1. Evaporatörün birinci yasa analizi



Şekil 5.2. Evaporatör şematik gösterimi [54]

Kütlenin Korunumu:

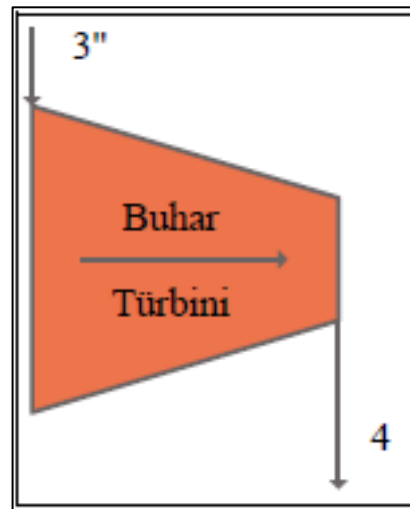
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Enerjinin Korunumu:

$$Q = \sum \dot{m}_{\text{çıkış}} h_{\text{çıkış}} - \sum \dot{m}_{\text{giriş}} h_{\text{giriş}} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{3''} h_{3''} \quad (5.3)$$

5.3.2. Türbin birinci yasa analizi



Şekil 5.3. Türbin şematik gösterimi [54]

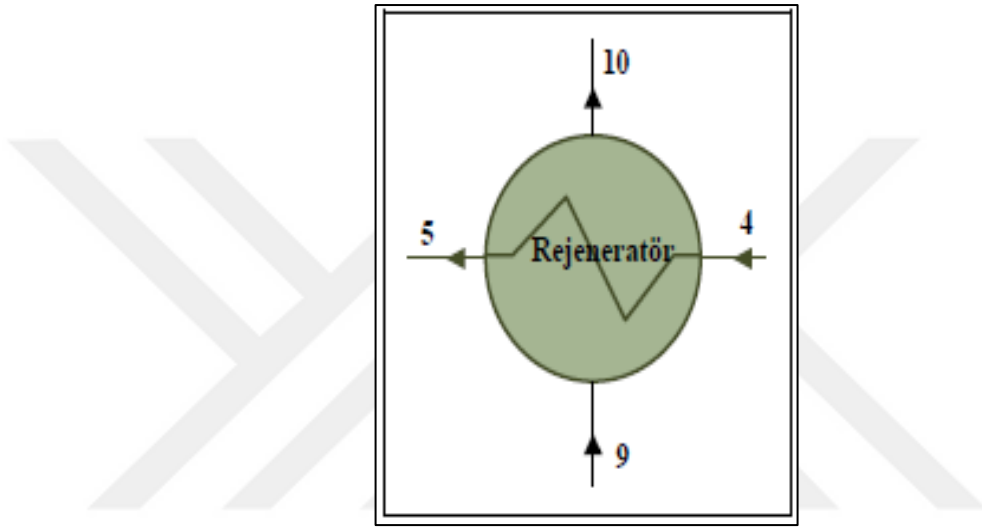
Kütlenin Korunumu:

$$\dot{m}_{3''} = \dot{m}_4$$

Enerjinin Korunumu:

$$\dot{W}_{\text{tür}} = \eta_{\text{tür}} \dot{m}_{3''} (h_{3''} - h_4) \quad (5.4)$$

5.3.3. Rejeneratör birinci yasa analizi



Şekil 5.4. Rejeneratör şematik gösterimi [54]

Kütlenin Korunumu:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5$$

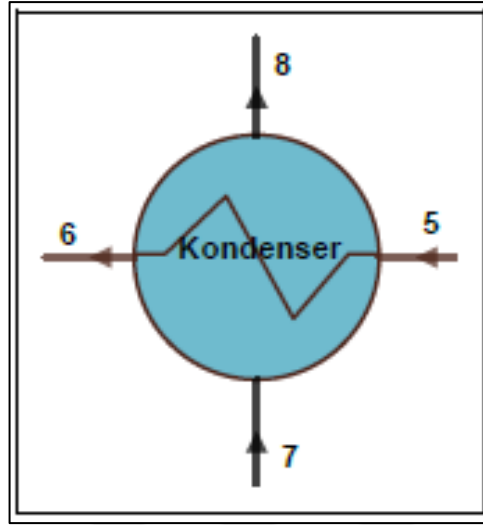
$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$$

Enerjinin Korunumu:

$$Q = \sum \dot{m}_{\text{çıkış}} h_{\text{çıkış}} - \sum \dot{m}_{\text{giriş}} h_{\text{giriş}} \quad (5.5)$$

$$\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{10} h_{10} \quad (5.6)$$

5.3.4. Kondenser birinci yasa analizi



Şekil 5.5. Kondenser şematik gösterimi [54]

Kütlenin Korunumu:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

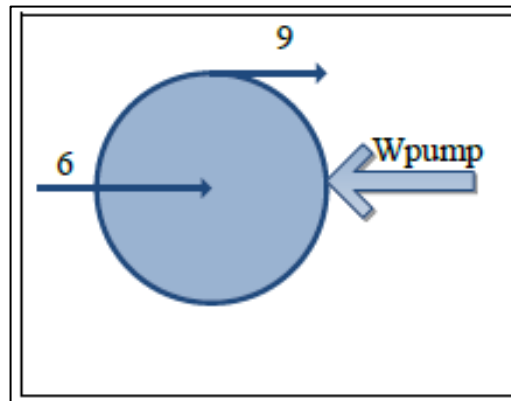
$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8$$

Enerjinin Korunumu:

$$Q = \sum \dot{m}_{\text{çıkış}} h_{\text{çıkış}} - \sum \dot{m}_{\text{giriş}} h_{\text{giriş}} \quad (5.7)$$

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_8 h_8 \quad (5.8)$$

5.3.5. Pompa birinci yasa analizi



Şekil 5.6. Pompa şematik gösterimi [54]

Kütlenin Korunumu:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_9$$

Enerjinin Korunumu:

$$Q = \sum \dot{m}_{\text{çıkış}} h_{\text{çıkış}} - \sum \dot{m}_{\text{giriş}} h_{\text{giriş}} \quad (5.9)$$

$$\dot{W}_{\text{pompa}} = V_6(P_9 - P_6) = \frac{\dot{m}_6(h_9 - h_6)}{\eta_{\text{pompa}}} \quad (5.10)$$

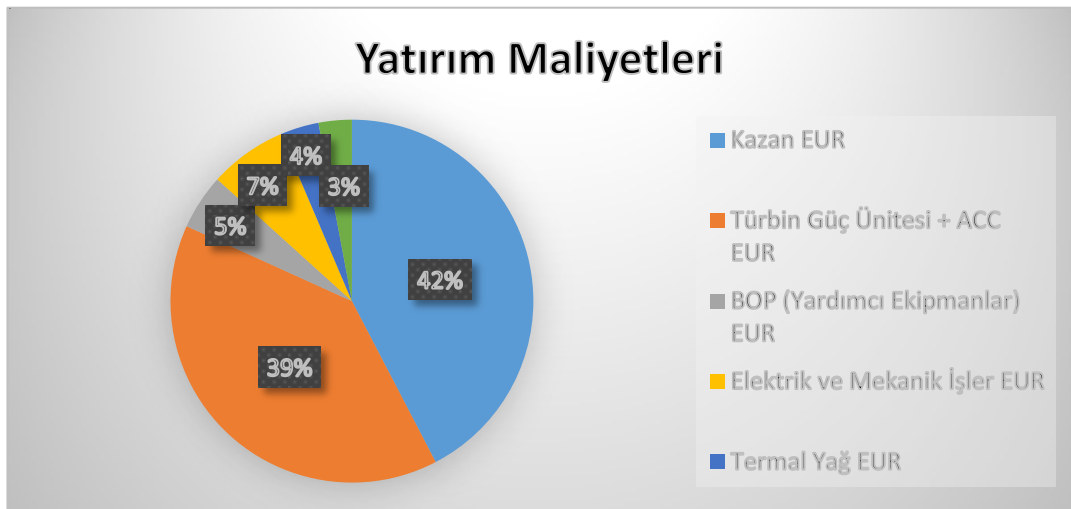
5.4. Ekonomik Analiz

5.4.1. Tesisin yatırım ve işletme maliyeti

Tablo 5.4’de ORC sistemli Biyokütle Enerji Tesisi’nin yatırım maliyetleri verilmiştir.

Tablo 5.4. Tesis yatırım maliyetleri

CAPEX (Toplam Yatırım Maliyeti)		
Kazan	EUR	4.300.000
Türbin Güç Ünitesi + ACC	EUR	4.000.000
BOP (Yardımcı Ekipmanlar)	EUR	500.000
Elektrik ve Mekanik İşler	EUR	700.000
Termal Yağ	EUR	350.000
İnşaat	EUR	300.000
Toplam	EUR	10.150.000



Şekil 5.7. Yatırım maliyetleri dağılım grafiği

5.4.2. Net bugünkü değer yöntemi ile maliyet analizi

Projenin faydalı ömrü boyunca sağlayacağı net nakit girişlerinin ve yatırım harcamalarının belirlenmiş bir iskonto oranı ile bugüne indirgenmiş değerleri arasındaki farktır. Bu yöntemde, projenin nakit girişlerinin şimdiki değeri ile nakit çıkışlarının arasındaki farkın belirlenmesi ve farkın sıfırdan büyük olması durumunda projenin kabulü öngörülür.

$$\left| \text{NBD} \quad \sum_{t=m+1}^n A_t/(1+i)^t = \sum_{t=0}^m C_t/(1+i)^t \right| \quad (5.11)$$

A_t = İşletme döneminde t yılındaki net nakit girişi

C_t = Yatırım döneminde t yılındaki net nakit çıkışı

m = Yatırım dönemi yıl sayısı

n = Yatırım dönemi + işletme dönemi yıl sayısı

i = İskonto (İndirgeme) oranı

5.4.3. İç karlılık oranı yöntemi ile maliyet analizi

İç kârlılık oranı; projenin Net Bugünkü Değerini sıfıra eşit kılan indirgeme oranıdır. İç verim oranı, bir yatırım projesinin net bugünkü değerini sıfıra eşitleyen diğer bir deyişle nakit girişlerinin bugünkü değerini nakit çıkışlarının bugünkü değerine eşitleyen iskonto oranı olarak tanımlanır. İç verim oranı aynı zamanda yatırımın ne oranda katma değer yaratacağını ifade eder.

$$\left| \text{İKO} \quad \sum_{t=m+1}^n A_t/(1+r)^t = \sum_{t=0}^m C_t/(1+r)^t \right| \quad (5.12)$$

A_t = İşletme dönemindeki t yılında nakit girişi

C_t = Yatırım dönemindeki t yılında nakit çıkışı

m = Yatırım döneminin yıl sayısı

n = Yatırım dönemi + işletme döneminin yıl sayısı

i = İskonto (İndirgeme) oranı

5.4.4. Geri ödeme süresi

Paranın zaman değerini dikkate alarak, projenin sağlayacağı net para girişinin yatırım tutarını kaç yılda geri ödeyeceğini gösterir.

$$\sum_{t=0}^m \frac{I_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=m+1}^p \frac{NK_t + D_t}{(1+i)^t} \quad (5.13)$$

NK_t = t yılındaki net kâr miktarı

D_t = t yılındaki amortisman oranı

I_t = t yılındaki yatırım tutarı miktarı

p = geri ödeme süresi

m = projenin yatırım süresi

i = indirgeme oranı

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. ORC Türbin Enerji Analizi

ORC modülü, biyokütle atıkların yakılması sonucu elde edilen sıcak termal yağdan elektrik enerjisi ve sıcak su üretmektedir. Üretilen sıcak su, mdf üretim fabrikasında hammadde kurutma amacıyla bantlı kurutucularda kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, bu sistemin teknik ve ekonomik açıdan fizibilite çalışması yapılmıştır. Tam kapasitede çalışması sonucunda her bir ekipmanda meydana gelen ısı güç ve türbin tarafından üretilen enerji hesaplanmıştır.

Tablo 6.1. ORC sistemi için her noktaya ait akışkanların termodinamik özellikleri

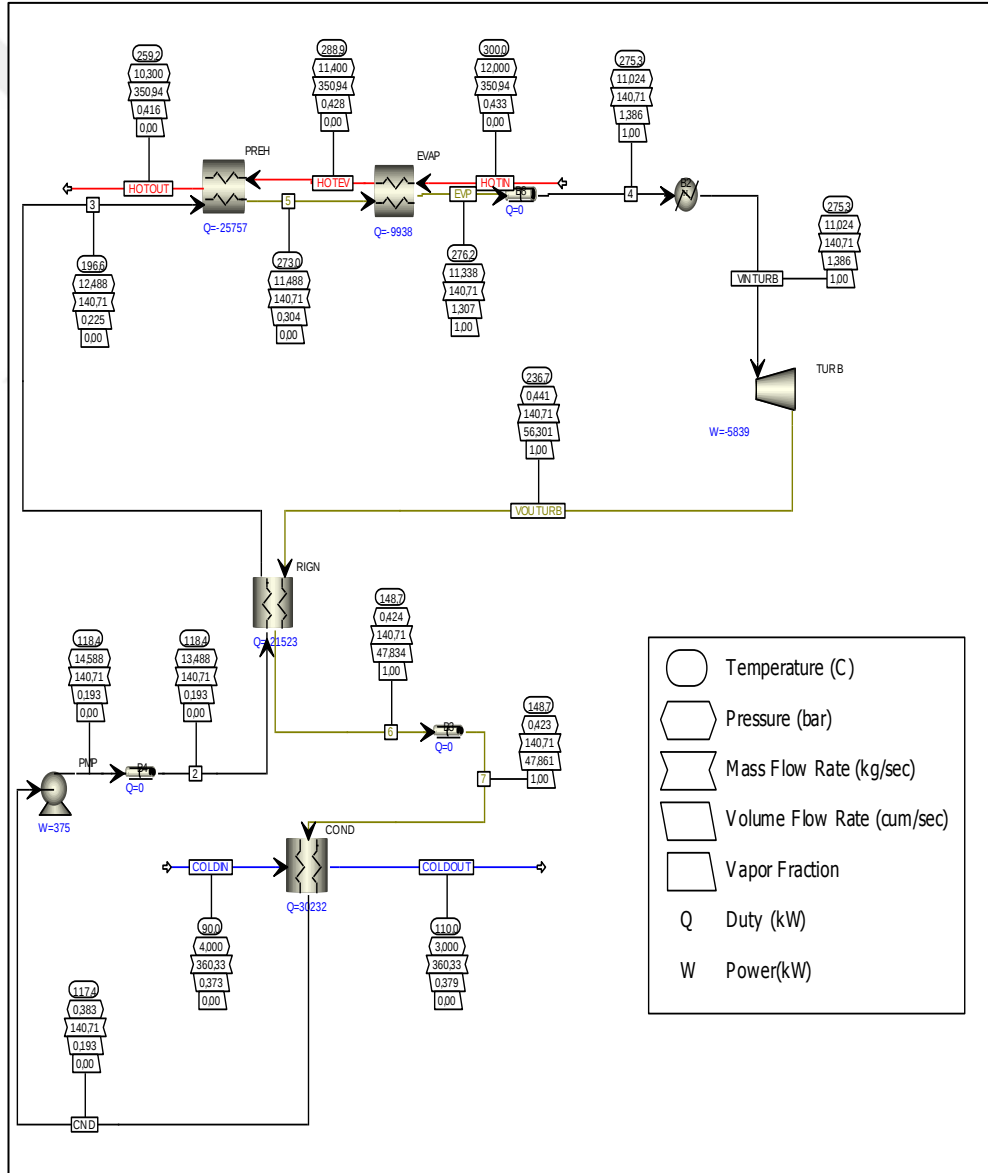
Nokta	T (°C)	Akışkan Cinsi	Faz	P(bar)	h(kj/kg)	m(kg/s)
0	25	Su	Referans hal	1	104,89	-
0'	25	OMTSX	Referans hal	1	-249	-
0"	25	Kızgın yağ	Referans hal	1	61,88	-
1	300	Kızgın yağ	Sıvı	12	632	350,94
2	259,2	Kızgın yağ	Sıvı	10,3	532,3	350,94
3"	273	OMTSX	Doymuş buhar	11,488	280,4	140,71
3	275,3	OMTSX	Kızgın buhar	11,024	352,8	140,71
4	236,7	OMTSX	Kızgın buhar	0,441	311,09	140,71
5	148,7	OMTSX	Kızgın buhar	0,424	148,2	140,71
6	117,4	OMTSX	Sıkıştırılmış sıvı	0,383	-72,53	140,71
7	90	Su	Sıkıştırılmış sıvı	4	377,22	360,33
8	110	Su	Sıkıştırılmış sıvı	3	461,47	360,33
9	118,4	OMTSX	Sıkıştırılmış sıvı	13,488	-69,81	140,71
10	196,6	OMTSX	Sıkıştırılmış sıvı	12,48	95,74	140,71

Tablo 6.2. Enerji analiz sonuçları

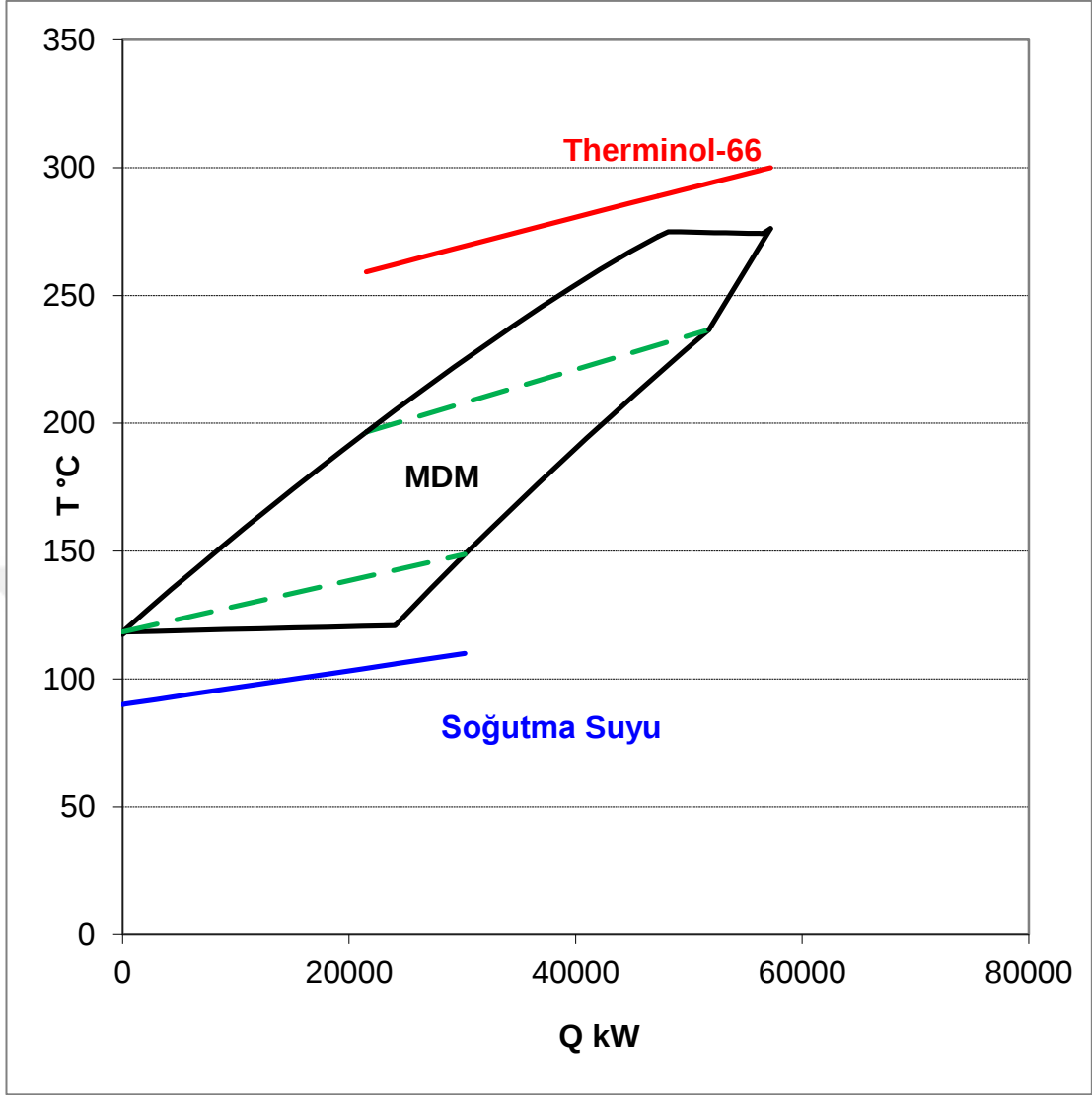
Energy	
Q(evap,kW)	35695
Q(regn,kW)	21523
W(tur,kW)	5839
W(pump,kWe)	375
O(con,kW)	30232
n(cycle,%)	15,5

ORC'ye termal yağdan 35695 kW ısı aktarılmaktadır ve brüt 5839 kWe elektrik üretilmektedir. Buna ek olarak kondenserde 30232 kW sıcak su üretilmektedir. Brüt elektrik üretim verimi % 15,5'dir.

Yapılan hesaplamalarda yakıtın yanması sonucu açığa çıkan termal enerjinin büyük kısmının, termal yağ vasıtasıyla evaporatör kısmında organik akışkana aktarıldığı görülmüştür. Rejeneratör tarafında yine bu enerjinin büyük bir bölümü orc modül içerisinde tekrardan kullanılarak verimlilik artırılmıştır. Ayrıca giren termal enerjinin % 84'lük bir kısmının da kondenserde sıcak suya dönüştürüldüğü görülmüştür. Toplamda modülün ısı veriminin % 98 civarında olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 6.1. ORC sistemi proses akış şeması



Şekil 6.2. ORC sistemi T-Q grafiği

6.2. ORC'li Biyokütle Enerji Santrali Maliyet Analizi ve Fizibilite Çalışması

Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan biyokütle enerjisi, elektrik enerjisi üretimi amacıyla yaygınlaştırmak, güvenilir, ekonomik ve kaliteli bir biçimde Türk ekonomisine kazandırmak, bunun yanında atıklarında güvenli bir şekilde bertarafı amacıyla YEK kanununa eklenmiştir. YEK kanununa göre güneş, rüzgar, hidrolik, jeotermal ve biyokütle enerjisi 10 yıl boyunca teşvikli fiyat üzerinden Türkiye Cumhuriyeti devleti tarafından satın alınmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen bu tesis de YEK kanunu kapsamında elektrik satışı gerçekleştirmektedir ve Tablo 6.3 ve 6.11 arasındaki tablolarda, projenin ekonomik göstergeleri hesaplanmıştır.

Tablo 6.3. ORC modülü enerji üretim ve iç tüketim değerleri

Enerji Üretim ve İç Tüketim Değerleri		
Tesiste Üretilecek Net Elektrik Gücü	kW(el)	5.116
Tesiste Üretilecek Net Isı Gücü (110 °C sıcak su)	kW(th)	30.300
ORC/SRC pompa, yağlama ünitesi	kW(el)	417
Soğutma Kulesi ve Pompalar	kW(el)	-
Türbin Brüt Güç Çıkışı	kW(el)	5.533

Tablo 6.4. Biyokütle yakıt tüketimi ve verimlilik değerleri

Biyokütle Tüketimi ve Verimlilikler		
Kazan Verimliliği	-	75,0%
Türbin Güç Ünitesi Verimliliği (Brüt)	-	15,5%
Toplam Biyokütle Termal Gücü	kW(th)	47.596
Biyokütle Isıl Değeri	kcal/kg	3.500
Biyokütle Yakıt Tüketimi	ton/h	11,7
Biyokütle Yakıt Maliyeti(Lojistik Dahil)	EUR/ton	20
Saatlik Biyokütle Maliyeti	EUR/h	-234

Tablo 6.5. Elektrik satışı ve ısı kullanımı maliyetleri

Elektrik Satışı ve Isı Kullanımı		
YEKDEM Biyokütle Tarifesi	\$/MWh	133
Yerli Teşvik Tarifesi	\$/MWh	20
Isı Tarifesi	\$/MWh	7,3
Saatlik Nakit Akışı (Yıl1-Yıl5)	\$/h	820
Saatlik Nakit Akışı (Yıl5-Yıl10)	\$/h	680
EUR:USD	-	1,13
Saatlik Nakit Akışı (Y1-Y5)	EUR/h	726
Saatlik Nakit Akışı(Y5-Y10)	EUR/h	602

Tablo 6.6. Toplam yatırım maliyetleri

CAPEX (Toplam Yatırım Maliyeti)		
Kazan	EUR	4.300.000
Türbin Güç Ünitesi + ACC	EUR	4.000.000
BOP (Yardımcı Ekipmanlar)	EUR	500.000
Elektrik ve Mekanik İşler	EUR	700.000
Termal Yağ	EUR	350.000
İnşaat	EUR	300.000
Toplam	EUR	10.150.000

Tablo 6.7. Tesis işletme maliyetleri

OPEX(İşletme Maliyeti)		
Kazan ve Türbin Güç Ünitesi	EUR/h	5
Tesis İç Tüketim (450 kWe x 0,06 EUR)	EUR/h	27
Toplam	EUR/h	-32
Saatlik Net Nakit Akışı (Y1-Y5)	EUR/h	460
Saatlik Net Nakit Akışı (Y5-Y10)	EUR/h	336

Tablo 6.8. Tesis öngörülen yıllık işletme saatleri

Yıllık İşletme Saatleri		
Y1	h/yr	8.000
Y2	h/yr	8.000
Y3	h/yr	8.000
Y4	h/yr	8.000
Y5	h/yr	8.000
Y6	h/yr	8.000
Y7	h/yr	8.000
Y8	h/yr	8.000
Y9	h/yr	8.000
Y10	h/yr	8.000

Tablo 6.9. Fizibilite ekonomik sonuç değerleri

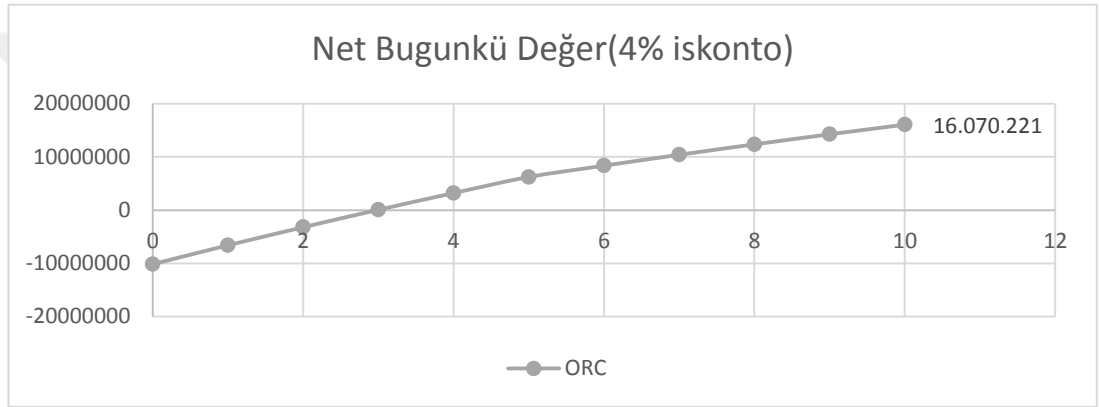
Ekonomik Sonuçlar	
İskonto Oranı	4,0%
NPV (10 yr) (Net Bugünkü Değer)	16.070.221 €
IRR (10 yr) (İç Karlılık Oranı)	27%
PBT (Basit Geri Ödeme Süresi)	3,94

Tablo 6.10. Öngörülen yıllık nakit akış değerleri

Yıllık Nakit Akışı	
0	-10.150.000
1	3.678.790
2	3.678.790
3	3.678.790
4	3.678.790
5	3.678.790
6	2.689.998
7	2.689.998
8	2.689.998
9	2.689.998
10	2.689.998

Tablo 6.11. Projenin hesaplanan net bugünkü değeri

Net present Value (Net Bugünkü Değer)	
0	-10.150.000
1	- 6.612.702
2	- 3.211.454
3	58.977
4	3.203.622
5	6.227.319
6	8.353.264
7	10.397.442
8	12.362.998
9	14.252.955
10	16.070.221



Şekil 6.3. Net bugünkü değer grafiği



Şekil 6.4. Nakit akış değerlerinin gösterimi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

MDF üretim sektöründe faaliyet gösteren tesis, biyokütle atıkları yakma yöntemiyle sıcak termal yağ formuna dönüştürmekte ve bu termal yağ ile ORC modülü vasıtasıyla elektrik enerjisi ve sıcak su üreterek, üretilen elektrik enerjisini YEK kanunu kapsamında devlete satışını yapmaktadır. Bu çalışma kapsamında ORC sisteminin tarihçesi, bileşenleri, teknik olarak enerji incelemesi ve ekonomik fizibilitesi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılabilir;

- ORC sistemlerinin geliştirilme amacı, düşük sıcaklıktaki kaynaklardan elektrik üretimi olmasına karşın, günümüzde yüksek sıcaklıktaki ısı kaynaklarından da elektrik üretiminin, başarılı ve verimli bir şekilde yapıldığı görülmüştür.
- Dünya’da gittikçe yaygınlaşan ORC uygulamalarının, ülkemizde de ilgi çeken bir elektrik enerjisi üretim teknolojisi olduğunu ve özellikle biyokütle enerjisinden elektrik üretimi konusunda, Türkiye’de tercih edilen bir teknoloji olduğu belirtilmiştir.
- ORC sistemlerinin tarihçesi incelendiğinde, ilk üretilen sistemlerin halen günümüze kadar çalışmalarına devam ettiklerini görmekteyiz. Buradan bu sistemlerin ne kadar güvenilir ve uzun ömürlü sistemler oldukları kanısına varabiliriz.
- Ülkemizde ORC sistemlerinin üretildiğini ve incelemiş olduğumuz projede de yerli imalat belgesine sahip bir ORC modülüyle üretim yapıldığını, bunun sayesinde YEK kanunu kapsamında elektrik satışından ekstra 20\$/MWh teşvik aldığını görmekteyiz.
- ORC sistemlerinin birleşik ısı ve güç yani kojenerasyon modunda toplam ısı verimliliklerinin daha yüksek olduğunu ve evaporatör kısmında modüle verilen enerjinin yaklaşık %84’lük kısmının, kondenser bölümünde sıcak su formuna dönüştürülerek MDF üretim hattında kurutma amacıyla kullanıldığını ve bu sayede toplam çevrim veriminin %99 civarına ulaştığını görmekteyiz. Klasik rankine çevrimlerine, ORC sistemleri daha yüksek ısı verime sahiptirler.

- ORC sistemli biyokütle enerji tesisinin fizibilite çalışması yapılırken gider olarak biyokütle alım fiyatı ve işletme bakım maliyetleri değerlendirmeye alınmıştır. Gelir olarak ise elektrik satış fiyatları ve ısı satışı olarak dikkate alınmıştır.
- ORC ünitesinin ve yakma sisteminin toplam yatırım maliyeti 10.150.000 Euro'dur. Yapılan ekonomik hesaplamalara göre projenin iç karlılık oranı %27, 10. yıl sonunda ki net bugünkü değeri 16.070.000 Euro olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre projenin basit geri ödeme süresi 3,94 yıl olarak hesaplanmıştır.
- Aynı güçteki kömür yakıtlı termik santral ile karşılaştırıldığında; atmosfere 112,4 ton/yıl CO₂ salınımı engellenmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] McKendry P., Energy Production From Biomass Conversion Technologies, *Bioresource Technology*, 2002; **83**: 30–48.
- [2] Saxena R.C., Adhikari D.K., Goyal, H.B., Biomass-Based Energy Fuel Through Biochemical Routes: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009,**13**(1): 162-179.
- [3] Encinar J.M., Beltrán F.J., Ramiro A. ve González J.F., Pyrolysis/Gasification of Agricultural Residues by Carbon Dioxide in the Presence of Different Additives: Influence of Variables, *Fuel Processing Technology*, 1998, **55**(3): 220-235.
- [4] ADAS, The Potential of Miscanthus as a Fuel Crop, *ETSU Report ETSU B*, 1992, 1354.
- [5] Ingwald O., Thek, G., The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets, *Routledge*, 2010.
- [6] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, Biyokütle Enerjisi   alışma Raporu, Hidroelektrik ve Yenilenebilir Enerji   alışma Grubu, 2007.
- [7]   a  al F.E., 2009. Biyokütle Enerjisi Potansiyelinin Türkiye Açısından Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Coombs J., Bioconversion Assessment Study, *CPL Scientific Ltd*, (Air – CT92 – 8007), 1996, UK.
- [9] Mitsui Babcock, 1997; Aston   niversitesi ve DK Teknik, 1993; Warren Spring Laboratory, 1993a, b; EU, 1999.
- [10] Aston University and DK Teknik, An Assessment of Thermochemical Conversion Systems for Processing Biomass and Wastes, *ETSU*, 1993, B/T1/00207/Rep.
- [11] EPDK Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belgelendirilmesi ve Desteklenmesine İ  şkin Yönetmelik, *T.C. Resmi Gazete*, 28782, 1.10.2013.

- [12] TETA Kazan
http://www.tetakazan.com.tr/teta.php?mod=products&sub_mod=1_1_1
(Ziyaret tarihi: 05.05.2019).
- [13] Bauen A. and Slade R. Biomass Use on a Global Scale, *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 2013, Pp. 1607–18.
- [14] Armesto L., Bahillo A., Veijonen K., Cabanillas A., And Otero J., Combustion Behaviour Of Rice Husk In A Bubbling Fluidised Bed. *Biomass And Bioenergy*, 2002, **23**(3), 171–79.
- [15] <http://www.biyogaz.web.tr> (Ziyaret tarihi: 02.04.2019).
- [16] EPDK Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Belgelendirilmesi ve Desteklenmesine İlişkin Yönetmelik, *T.C. Resmi Gazete*, 28782, 1.10.2013.
- [17] <http://enerjienstitusu.com/yenilenebilir-enerji-tesvikleri-yekdem-nedir>, erişim tarihi 15.04.2016.
- [18] <https://www.turboden.com.tr> (Ziyaret tarihi: 06.05.2019).
- [19] Dow H.H., Diphenyl-Oxide Bi-Fluid Power Plants, *Mechanical Engineering*, 1926, **48** (8), 815-818.
- [20] Tabor H., Bronicki L., Establishing Criteria For Fluids For Small Vapor Turbines, *Sae Technical Paper*, 1964, 640823.
- [21] Reid R.C., Sherwood T.K., 1958. The Properties Of Gases And Liquids, Their Estimations And Correlations. Mcgraw-Hill Inc.
- [22] Tabor H., Bronicki L., Small Turbine For Solar Energy Power Package. In: Proc. U.N., *Conf. On New Sources Of Energy*, 1961, Rome, **4**, P. 68.
- [23] Angelino G., Gaia M., Macchi E., 1984, A Review Of Italian Activity in The Field of Organic Rankine Cycles, In: *Proceedings Of The International Vdi Seminar On Orc*, Zurich 1984, In Vdi Berichte, **539**. Vdi Verlag, Pp. 465-482
- [24] Larjola J., Orc-Plant With High-Speed Gas Lubricated Turbogenerator, In: *Vdi Berichte E Proceedings of The International Vdi Seminar*, 1984, **539**. Vdi Verlag, Pp. 697-705. I73.
- [25] Larjola J., Orc Power Plant Based On High Speed Technology, In: *Proceedings Of The Conference On High Speed Technology*, 1988, No. Ente D-15. Lappeenranta University Of Technology, Pp. 63-77.

- [26] Parsad A., Field Testing of a 600 Kw Organic Rankine Cycle Waste Recovery, *In: Energytechnology: Proceedings of The Energy Technology Conference*, 1980, **1**, Pp. 482-494.
- [27] Sternlicht B., Development Prospects for Organic Rankine Cycles and Heat Pumps, *In: Proceedings of The International Vdi Seminar on Orc*, 1984, Zurich 1984, In Vdi Berichte, **539**. Vdi Verlag.
- [28] Schad J.L., 1981. Comparison of Organic Rankine Working Fluids, *In: Conference On Use of Organic Fluids for Waste Heat Recovery In Ships and Industry*, 1981, City University London.
- [29] Prigmore D.R., Barber R.E., 1974. Prototype Solar Powered Rankine Cycle System Providing Residential Air Conditioning and Electricity, *In: Proc. 9th Iecec*, 1974, Pp. 326-333, 205. Sargent.
- [30] Owen J.R., The Organic Rankine Cycle E a Review of Applications and Factors Affecting Working Fluid Selection Research Memorandum M1 76, *The City University Department of Mechanical Engineering*, June 1975, London.
- [31] Copreau C., Thermodynamic Power Conversion Unit, *In: Societe Bertin*, 1979, 78370 Plaisir Fr.
- [32] Dipippo R., Geothermal Power Plants, Third Ed. *Elsevier Ltd*, 2012.
- [33] Jeumotte A.L., Le Cycle Binaire Pour Centrale Électrique a Refroidissement Sec. *In: Rev. Gen. Therm*, 1983, Fr. No 255.
- [34] Gokhshtein D.P., Smirnov G.F., Kirov V.S., Some Features of Binary Cycle Systems With Non-Aqueous Vapours, *In: Asme Paper*, 1966, No. **66-Gt-84**.
- [35] Yamashita A., Power Generation System by Heat Recovery from Converter Cooling Water, *The Sumitomo Search*, 1979, No. **25**.
- [36] Hirakawa T., Suzuki T., 14 Mw Orc Plant Installed at Nippon Steel, *Modern Power Systems* 2, 1983.
- [37] Holm J., The Application of Turboexpanders for Energy Conservation. *Transactions of the Imech*, 1981.
- [38] Bronicki L.Y., Experience With High Speed Organic Rankine Cycle Turbomachinery. *In: Proceedings of Conference On High Speed Technology*, 1988, No. Ente D-15. Lappeenranta University of Technology, Pp. 44-61.

- [39] Krieger Z., Kaplan U., Apparatus and Method for Producing Power Using Geothermal Fluid, *Us Patent 6009711*, 2000.
- [40] Ormat Technologies Inc. Official website: www.ormat.com (Ziyaret tarihi: 06.05.2019).
- [41] Gaia M., 30 Years of ORC Development, *In: Keynote Lecture at The ORC2011 - 1st International Seminar on ORC Power Systems E Delft*, 2011, (NL), September 22-23.
- [42] Bini R., Viscuso F., High Efficiency (25%) ORC for Power-Only Generation Mode in The Range 1e3 MW: an Already Proven Technology Also Available for Partially Cogenerative Applications, *In: ORC2011 E 1st International Seminar on ORC Power Systems – Delft*, 2011, (NL), September 22-23.
- [43] Kakac S., Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design, *Second Ed. CRC Press. S.L.*, 2002.
- [44] Kakac S., Boilers, Evaporators and Condensers, *Wiley & Sons S.L.* ,1991.
- [45] Akasaka R., 2014. A Thermodynamic Property Model for The R-134a/245fa Mixtures. *In: 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*, July 14-17, 2014.
- [46] Heberle F., Br€Uggemann D., Thermo-Economic Evaluation of Organic Rankine Cycles for Geothermal Power Generation Using Zeotropic Mixtures, *Energies*, 2015, **8** (3), 2097-2124.
- [47] Lemmon E.W., Tillner-Roth R., A Helmholtz Energy Equation of State for Calculating The Thermodynamic Properties of Fluid Mixtures. *Fluid Phase Equilibria*, 1999, **165**, 1-21.
- [48] Ainley D.C., Mathieson G.C.R., A Method of Performance Estimation for Axial-Flow Turbines, *British Aeronautial Research Council*, 1951, R&M 2974.
- [49] <http://exergy-orc.com/tr/teknolojmz/radyal-d-kl-trbin> (Ziyaret tarihi:06.05.2019).
- [50] Ainley D.G., Mathieson G.C.R., A Method of Performance Estimation for Axial-Flow Turbines., *Aeronautical Research Council*, 1951, R&M 2974.
- [51] Spadacini C., Centemeri L., Xodo L.G., Astolfi M., Romano M.C., Macchi E., A New Configuration for Organic Rankine Cycle Power Systems. *In: Proc. Of 1st Int. Sem. On ORC Power Systems*, 2011, September, Delft.

- [52] Serpen U., Jeotermal Enerji Teknolojisinde Yeni Gelişmeler, *Jeotermal Enerji Semineri*, 511.
- [53] Grassiani M., Krieger Z., Advanced Power Plants for Use with Hot Dry Rock (Hdr) and Enhanced Geothermal Technology. Proc, *World Geothermal Congress*, 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28-June 10, Pp. 3719-3723.
- [54] Eyidoğan M., Organik Rankine Çevrimli Güç Üretim Sisteminin Enerji Ve Ekserji Analizi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2014.
- [55] Tocci L., Small Scale Organic Rankine Cycle (Orc):A *Techno-Economic Review*.
- [56] Muharrem E., Energy and Exergy Analysis of an Organic Rankine Cycle in a Biomass-Based Forest Products Manufacturing Plant, *Turkish Journal Of Electrical Engineering And Computer Sciences*, 2016, **24**(6), 5100-5112.
- [57] Kaşka Ö., Energy and Exergy Analysis of an Organic Rankine for Power Generation from Waste Heat Recovery in Steel Industry, *Energy Conversion and Management*, **77** (1): 108-117 (2014).
- [58] Shukla A.K., Analysis and Performance of Orc Based Solar Thermal Power Plant Using Benzene as a Working Fluid, *3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering (ICIAME)*, 2016.
- [59] Rentizelas A., Karellas S., Kakaras E., Tatsiopoulou I., Comparative Techno-Economic Analysis of Orc and Gasification for Bioenergy Applications, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50** (3): 674-681.
- [60] Algieri A., Techno-Economic Analysis of Biomass-Fired Orc Systems for Single-Family Combined Heat and Power (Chp) Applications, *Energy Procedia*, 2014, **45**:1285-1294.
- [61] Taufiq B.N., Exergy Analysis of Biomass Organic Rankine Cycle for Power Generation, *Materials Science and Engineering*, 2018, **309** (2018) 012057.
- [62] Klonowicz P., Witanowski L., Jędrzejewski L., Suchocki T., Lampart P., A Turbine Based Domestic Micro Orc System, *Energy Procedia*, 2017, **129**, 923-930.
- [63] Algieri A., Morrone P., Energy Analysis of Organic Rankine Cycles for Biomass Applications, *Thermal Science*, 2015, **19**, No. 1, Pp. 193-205.

- [64] Addai-Asante S., Hao T., Techno-Economic Analysis of Biomass Integrated Electricity Generation System, *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, **6**, 2017, Pp 21-31.
- [65] Çengel Y.A., Boles M.A., Thermodynamics: An Engineering Approach, *5th Ed.*, McGraw-Hill College, 2006, Boston.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Ercan E., Küçük C., Kaya D., Electricity Generation With Organic Rankine Cycle from Waste Gases, *3rd International Iron & Steel Symposium*, Karabük, 3-5 April 2017.



ÖZGEÇMİŞ

Emrehan Ercan, 1993 yılında Kars ilinin Selim ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kars'ın Selim ilçesinde tamamladı. 2010 yılında Selim Anadolu Lisesi'nden mezun oldu ve 2011 yılında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2015 yılında lisans eğitimini tamamlayarak mezun oldu ve ardından aynı yıl içerisinde Lefa Temsilcilik İth. İhr. Ltd. firmasında biyokütle enerji yatırımları ve ORC türbini satış ve proje geliştirme bölümünde işe başladı. 2017 yılında Turboden Turkey ORC Turbojeneratör A.Ş. firmasında Biyokütle ve Çöpten Enerji Projeleri Danışmanı olarak çalışmaya başladı. Halen Turboden Turkey firması ile çalışmaya devam etmektedir ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.