

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**


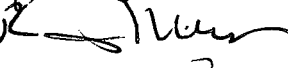

**ABSORPSİYONLU SOĞUTMALI KOJENERASYON
SİSTEMLERİNİN TEKNİK ETÜDÜ**

Mak. Müh. Önder BÜYÜKİŞCAN

FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR

Prof. Dr. Ahmet Bayri Chen 
Doç. Dr. Şükrü BEKDEMİR 
Doç. Dr. Recep ÖZTÜRK 

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KOJENERASYON.....	3
2.1 Kojenerasyonun Tanımı.....	3
2.2 Kojenerasyon Kullanım Alanları.....	6
2.2.1 Konutsal Kojenerasyon.....	7
2.2.2 Endüstriyel Kojenerasyon.....	7
2.2.3 Ticari veya Kurumsal Kojenerasyon.....	8
2.2.4 Trijenerasyon.....	8
3. KOJENERASYON TEKNİKLERİ.....	10
3.1 Kojenerasyon Sistemleri.....	10
3.2 Güç Makinaları.....	11
3.2.1 Buhar Türbinleri.....	11
3.2.1.1 Karşı Basıncılı Buhar Türbini Sistemleri.....	12
3.2.1.2 Yoğuşmalı (Kondensasyonlu) Buhar Türbini Sistemleri.....	13
3.2.1.3 Alt Çevrimli Buhar Türbini Sistemleri.....	14
3.2.1.4 Buhar Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Performansı.....	15
3.2.2 Gaz Türbinleri.....	15
3.2.2.1 Açık Çevrimli Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemleri.....	16
3.2.2.2 Kapalı Çevrimli Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemleri.....	17
3.2.2.3 Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Performansı.....	18
3.2.3 Pistonlu Motorlar.....	19
3.2.3.1 Sıkıştırma Ateşlemeli (Dizel) Motorlar.....	20
3.2.3.2 Patlamalı (Otto) Motorlar.....	21
3.2.3.3 Pistonlu Motorlu Kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Performansı.....	22
3.2.4 Kombine Çevrimler.....	23
3.2.4.1 Brayton-Rankine Kombine Çevrim Sistemleri.....	24
3.2.4.2 Dizel-Rankine Kombine Çevrim Sistemleri.....	24
3.2.5 Stirling Motorları.....	25
3.2.6 Mikrotürbinler.....	26
3.2.7 Yakıt Hücreleri.....	27
3.3 Atık Isı Geri Kazanım Sistemleri.....	31
3.4 Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Yakıtlar.....	32

4.	ABSORPSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMLERİ	35
4.1	Absorpsiyonlu Soğutma Sistemlerinin Çalışma Prensibi.....	35
4.2	Soğutucu - Absorbent Kombinasyonları	37
4.2.1	Amonyak - Su Sistemleri.....	38
4.2.2	Su - Lityum Bromit Sistemleri	40
5.	TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN TERMODİNAMİK İNCELENMESİ ...	42
5.1	Buhar Türbinli Trijenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Analizi	42
5.2	Gaz Türbinli Trijenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Analizi	45
6.	BİR TRİJENERASYON SİSTEMİNİN İNCELENMESİ	48
6.1	Sistemin Ekonomik Analizi.....	50
6.2	Özgül Üretim Maliyetleri	52
6.3	Sistemin İşletme Analizi.....	54
	SONUÇLAR	56
	KAYNAKLAR.....	58
	ÖZGEÇMİŞ.....	60

SİMGE LİSTESİ

C_{pma}	Havanın sabit basınçtaki özgül ısısı
C_{pmg}	Gazın sabit basınçtaki özgül ısısı
C_B	Buhar sistemi yatırım maliyeti
C_S	Soğutma sistemi yatırım maliyeti
C_T	Trijenerasyon sistemi yatırım maliyeti
\dot{E}	Elektrik gücü
G_i	İşletme giderleri
G_k	Kar
G_k^*	Karlılık oranı
G_y	Yatırım maliyeti
h	Entalpi
H	Yıllık çalışma saati
i	Faiz Oranı
J	Jeneratör
m_b	Buhar kütleli debisi
M_B	Buhar sistemi yakıt gideri
M_S	Soğutma sistemi yakıt gideri
M_T	Trijenerasyon sistemi yakıt gideri
n	Sistem ömrü
P_e	Elektrik gücü
P_q	Isı gücü
P_{qb}	Buhar gücü
P_{qs}	Soğutma gücü
P_p	Pompa gücü
P_y	Yakıt gücü
P_{BT}	Buhar türbini gücü
P_{GT}	Gaz türbini gücü
OM_B	Buhar sistemi işletme ve bakım gideri
OM_S	Soğutma sistemi işletme ve bakım gideri
OM_T	Trijenerasyon sistemi işletme ve bakım gideri
Pr	Basınç oranı
Q	Isı
\dot{Q}	Isı gücü
Q_H	Alınan ısı
Q_L	Atılan ısı
\dot{S}	Soğutma gücü
T	Sıcaklık
W	İş
W_{BT}	Buhar türbini işi
W_{GT}	Gaz türbini işi
Y_B	Özgül buhar üretim maliyeti
Y_E	Özgül elektrik üretim maliyeti
Y_S	Özgül soğutma üretim maliyeti
$(Y_E)_{\$}$	Elektrik şebeke satış fiyatı
η	Sistem verimi
η_b	Yanma odası verimi
η_c	Kompresör verimi
η_g	Jeneratör verimi

η_m	Mekanik verim
η_p	Pompa verimi
η_k	Kazan verimi
η_t	Türbin verimi
η_y	Yararlanma oranı
β	Amortisman faktörü



KISALTMA LİSTESİ

AFO	Ağır Fuel Oil
AIK	Atık Isı Kazanı
CHP	Bileşik Isı ve Güç
COP	Soğutma Performans Katsayısı
EIO	Elektrik Isı Oranı
EYO	Enerjiden Yararlanma Oranı
O&M	İşletme ve Bakım
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Konvansiyonel ve kojenerasyon sistemlerinin karşılaştırılması	4
Şekil 2.2 Bir ısı makinası	5
Şekil 3.1 Karşı basınçlı buhar türbini sisteminin şematik şekli	12
Şekil 3.2 Yoğuşmalı buhar türbini sisteminin şematik şekli	13
Şekil 3.3 Alt çevrimli buhar türbini sisteminin şematik şekli	14
Şekil 3.4 Açık çevrimli gaz türbinli kojenerasyon sisteminin şematik şekli.....	16
Şekil 3.5 Kapalı çevrimli gaz türbinli kojenerasyon sisteminin şematik şekli.....	17
Şekil 3.6 Gaz türbinli sistemlerde yük faktörünün verime etkisi	19
Şekil 3.7 Pistonlu motorlu kojenerasyon sisteminin şematik şekli	19
Şekil 3.8 Brayton-Rankine kombine çevrim sistemi şematik şekli.....	24
Şekil 3.9 Stirling motoru tipleri.....	25
Şekil 3.10 Yakıt hücreli bir kojenerasyon sistemi örneği	28
Şekil 3.11 Yakıt türleri ve ısıl değerleri	33
Şekil 4.1 Absorpsiyonlu ve buhar sıkıştırımlı soğutma sistemlerinin şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.2 Absorpsiyonlu soğutma sisteminin şematik gösterimi.....	37
Şekil 4.3 Amonyak-Su sisteminin şematik gösterimi	39
Şekil 4.4 LiBr-Su sisteminin şematik gösterimi.....	41
Şekil 5.1 Buhar türbinli trijenerasyon sistemi	42
Şekil 5.2 Buhar çıkış sıcaklığı ve basıncının elektriksel verime etkisi	43
Şekil 5.3 Buhar çıkış sıcaklığı ve basıncının toplam verime etkisi.....	44
Şekil 5.4 Ne/Nq oranının toplam verime etkisi.....	44
Şekil 5.5 Gaz türbinli trijenerasyon sistemi	45
Şekil 5.6 Toplam verimin T_3 ve basınç oranına göre değişimi	47
Şekil 5.7 Gaz türbini çıkış sıcaklığının T_3 ve basınç oranına göre değişimi.....	47
Şekil 6.1 Trijenerasyon sisteminin şematik şekli	48
Şekil 6.2 Özgül elektrik üretim maliyetinin kapasite kullanımına göre değişimi	52
Şekil 6.3 Özgül buhar üretim maliyetinin kapasite kullanımına göre değişimi	53
Şekil 6.4 Özgül soğutma üretim maliyetinin kapasite kullanımına göre değişimi.....	53
Şekil 6.5 Kapasite kullanımının geri ödeme süresine etkisi.....	54
Şekil 6.6 Sistemin karlılığının kullanım süresi ve kapasite kullanımına göre değişimi.....	55

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Dizel motorların sınıflandırılması	20
Çizelge 3.2 Pistonlu motor performans değerleri örneği	23
Çizelge 3.3 Kojenerasyon sistemlerinin teknik karakteristikleri.....	29
Çizelge 3.4 Kojenerasyon sistemlerinin avantajları ve dezavantajları.....	30
Çizelge 3.5 Bazı yakıtların metan sayıları.....	34
Çizelge 6.1 Sistemde kullanılan motorların teknik verileri.....	49
Çizelge 6.2 Sistemde kullanılan absorpsiyonlu soğutma sisteminin teknik verileri	50
Çizelge 6.3 Sistemin kullanımı süresi ve kapasite kullanımına göre karlılığı	55



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, elektrik, ısı ve soğutma enerjilerini birlikte üretebilen absorpsiyonlu soğutmalı kojenerasyon sistemleri diğer adıyla trijenerasyon sistemleri incelenmiştir. Enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması için geliştirilen kojenerasyon sistemleri, bir güç makinasının veya bir prosesin atık ısını faydalı enerjiye dönüştürerek sisteme verilen yakıttan daha yüksek verimler elde edilmesini sağlarlar. Sistemden elde edilen verimi daha da yükseltmek için, elektrik ve ısı enerjisinin yanında soğutma ihtiyacı olan yerlerde, kojenerasyon sistemine bir absorpsiyonlu soğutma sistemi kombine edilebilir. Bu suretle elde edilen yüksek verim, sistemin yatırım maliyetini daha kısa sürede geri ödemesini sağlar.

Bu önemli konuda çalışmamı sağlayan ve çalışmalarımda bana destek olan tez danışmanım Doç.Dr. Şükrü Bekdemir'e, değerli yardımlarını esirgemeyen Doç.Dr. Recep Öztürk ve Prof.Dr. Bahri Şahin'e ve desteklerinden dolayı değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.



ÖZET

Enerji, günümüzün politik, sosyal ve ekonomik yapısının belirlenmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. İnsan yaşamını kolaylaştırmak için üretilen teknolojilerin artan kullanımı ile birlikte enerji ihtiyacı da artmıştır. Enerji ihtiyacının karşılanması için çoğunlukla petrol bazlı yakıtlar, doğal gaz ve kömür gibi birincil enerji kaynakları kullanılmaktadır. Bu kaynaklar bakımından ülkemiz oldukça fakir bir ülkedir. İhtiyaç duyulan birincil enerji kaynaklarını başka ülkelerden satın alan bir ülke olduğumuz için enerji politikaları çok dikkatli bir şekilde belirlenmelidir.

Kojenerasyon sistemleri, enerjinin tüketildiği bölgelere yakın kurulması ve yüksek verim değerleri ile enerji üretim sistemi olarak oldukça uygun bir seçenektir. Gelişen teknoloji ile kojenerasyon sistemlerinin verimleri değişik şekillerde artırılabilir. Bu yöntemlerden biri trijenerasyondur. Trijenerasyon, güç, ısı ve soğutmanın aynı anda elde edilmesidir. Soğutma, absorpsiyonlu soğutma sistemleri ile elde edilebilir. Absorpsiyonlu soğutma sistemi için gerekli enerji, sistemden çekilen ısı ile veya sistemden atılan ısı ile sağlanabilir. Bu sistem ile daha yüksek verimler elde edilebilir. Bu çalışmada kojenerasyon sistemleri ve absorpsiyonlu soğutma sistemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kojenerasyon ve absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin kombinasyonu teorik olarak ve bir örnek tesis ile pratik olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kojenerasyon, Trijenerasyon, Absorpsiyonlu Soğutma, Atık ısı, Enerji Üretimi.

ABSTRACT

Energy is playing a very important role to shape today's political, social and economical life. Energy demand has increased with the increasing use of new technologies that facilitate human lives. Mostly, primary energy resources such as oil based fuels, natural gas and coal, are used to cover energy demand. Turkey is lack of these resources. Turkey has to determine energy policies very carefully as a country that buys primary energy resources from other countries.

High efficiencies and construction of energy generating centers near the energy consumption areas make cogeneration systems very reasonable choice for enery generation. With the developing technologies, efficiencies of cogeneration systems can be raised by different methods. Trigeration is one of these methods. Trigeration is generating power, heat and cooling at the same time. Cooling can be generated by absorption refrigeration systems. The energy needed for absorption refrigeration system can be obtain from heat taken from system or from waste heat. With this system higher efficiencies can be obtained. In this research, cogeneration systems and absorption refrigeration systems are examined. Combination of cogeneration systems and absorption refrigeration systems are examined theoretical and practical for a sample system.

Key Words: Cogeneration, Trigeration, Absorption Refrigeration, Waste Heat, Energy Generation.

1. GİRİŞ

Tüm dünyadaki endüstriyel ve ticari yapılar enerjinin başlıca kullanıcılarıdır. Gelişmekte olan ülkelerde, sanayi sektörünün enerji talebi içinde elektrik, sadece %20'lik bir paya sahiptir. Geriye kalan enerji talebinin büyük bir kısmını termal enerji oluşturmaktadır. Benzer şekilde sıcak iklim bölgelerindeki modern binaların enerji talebinin yaklaşık %60'ını konfor amaçlı soğutma oluşturmaktadır. Genel olarak, devletlerin sahip olduğu güç şirketleri elektriği sağlarken, bölgesel kazan ve soğutucular ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılamaktadırlar.

Gelişmekte olan ülkelerde, elektrik üretimi için başlıca kaynak termik güç santralleridir. Güç santraline verilen birincil enerjinin sadece çeyreğinin elektrik olarak kullanıcılara ulaştığı düşünülürse, gücün üretiminde ve iletiminde kullanılan klasik metodun israfı olduğu görülmektedir. Güç üretimi prosesinde başlıca kayıp, kullanılan termodinamik çevrimlerin doğurduğu zorunluluklara bağlı olarak, gücün üretiminde ve dönüştürülmesinde ısının çevredeki suya veya havaya atılmasıdır. Ayrıca, kullanıcılar üretim noktasından uzakta olabilirler, bu da kayıplara ek olarak iletim hatlarındaki iletim ve dağıtım kayıplarını ortaya çıkarır. Kojenerasyon kavramının temelini, üretilen güç için ortaya çıkan atık ısının ısıtma veya soğutmada kullanılması oluşturur. Bu da verimde kayda değer bir artış meydana getirir.

Bileşik ısı ve güç üretimi veya bilinen adıyla kojenerasyon, düşük yatırım maliyeti, kısa kurulum süresi, kullanılabilen yakıt çeşitliliği, düşük yakıt tüketimi ve yarattığı az miktardaki kirlilik sebebiyle tipik güç ve ısı üretim sistemlerinin yerini alabilecek cazip bir alternatiftir.

Kojenerasyon kavramı bir asırdır bilinmesine rağmen, popüleritesini ve yenilenen ilgiyi 70'lerin ikinci yarısında ve 80'lerin başlarında kazanmıştır. Bunun başlıca sebebi, enerji fiyatlarında artışlara yol açan iki petrol şokudur. Bunun sonucu olarak tipik büyük ölçekli elektrik santrallerine alternatif olarak, verimli ve küçük ölçekli kojenerasyon sistemleri gündeme gelmiştir. Bu dönemde kojenerasyonun teşviki için, devlet otoriteleri bazı düzenlemeler yapmışlardır.

80'lerin ortalarında enerji fiyatlarının düşmeye başlaması ile bazı ülkeler bu teknolojiye olan ilgilerini kaybetmişlerdir. Avrupa göz önüne alınırsa, üye ülkeler arasında büyük farklılıklar göze çarpmaktadır. Örneğin, kojenerasyon ile üretilen elektrik oranı Hollanda'da %34 iken Fransa'da %1.5'tan azdır (UNESCAP, 1998).

Kojenerasyona olan ilginin tekrar artmasının sebepleri, hızla artan enerji talebi, devletin ek güç üretim kapasitelerini finanse etme zorlukları ve çevre kirliliğine karşı getirilen sınırlamalardır. Kojenerasyon, mevcut tesislerin genişletilmesinde, yeni sanayi bölgelerinin kurulmasında, ömrü bitmiş buhar üretim sistemlerinin değiştirilmesinde veya enerji fiyatlarının yüksek olduğu ve enerji satımına olanak olduğu durumlarda tavsiye edilen bir sistemdir.

Kojenerasyon sistemleri, günümüz dünyasında pek çok yerde kullanılabilir. Endüstriyel yapılarda, ticari veya kurumsal yapılarda, büyük konut topluluklarında veya elektrik, ısı ve soğutmanın birlikte üretildiği trijenerasyon sistemlerinde kullanılabilirler. Kojenerasyonun kullanım alanları Bölüm 2'de anlatılmaktadır.

Kojenerasyon sistemlerinin, uygulanacağı bölgenin enerji ihtiyaçlarını verimli ve güvenli bir şekilde sağlayabilmesi için pek çok farklı teknolojiler geliştirilmiştir. Kojenerasyonun uygulanacağı bölgenin ihtiyaçlarına ve imkanlarına bağlı olarak seçilebilecek kojenerasyon teknikleri Bölüm 3'te anlatılmaktadır.

Soğutma ihtiyacı olan tesislerde veya yapılarda, soğutma elde etmek için absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin kullanılması gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bunun sebebi, absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin soğutma elde etmek için sadece bir ısı kaynağına ihtiyaç duymasıdır. Uygulandığı tesiste veya yapıda bir atık ısı kaynağı mevcut ise bu sistem oldukça avantajlı bir hale gelmektedir. Bölüm 4'te absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin çalışma prensibi ve bu sistemlerde kullanılan akışkan çiftleri anlatılmaktadır.

Elektrik, ısı ve soğutma enerjilerinin birlikte ihtiyaç duyulduğu tesislerde, bir kojenerasyon sistemine kombine edilmiş bir absorpsiyonlu soğutma sistemi ile tesisin ihtiyaçları karşılanabilir. Elektrik, ısı ve soğutma enerjilerinin birlikte üreten bu sistemlere trijenerasyon sistemleri denir. Bölüm 5'te trijenerasyon sistemlerinin termodinamik analizi yapılarak verim denlemleri elde edilmiştir.

Bölüm 6'da, elektrik, buhar ve soğutma ihtiyacı olan bir tesise kurulabilecek bir trijenerasyon sistemi için ekonomik inceleme yapılmıştır. Sistemde üretilen enerjilerin birim maliyetleri hesaplanmış ve sistemin karlılığı incelenmiştir.

2. KOJENERASYON

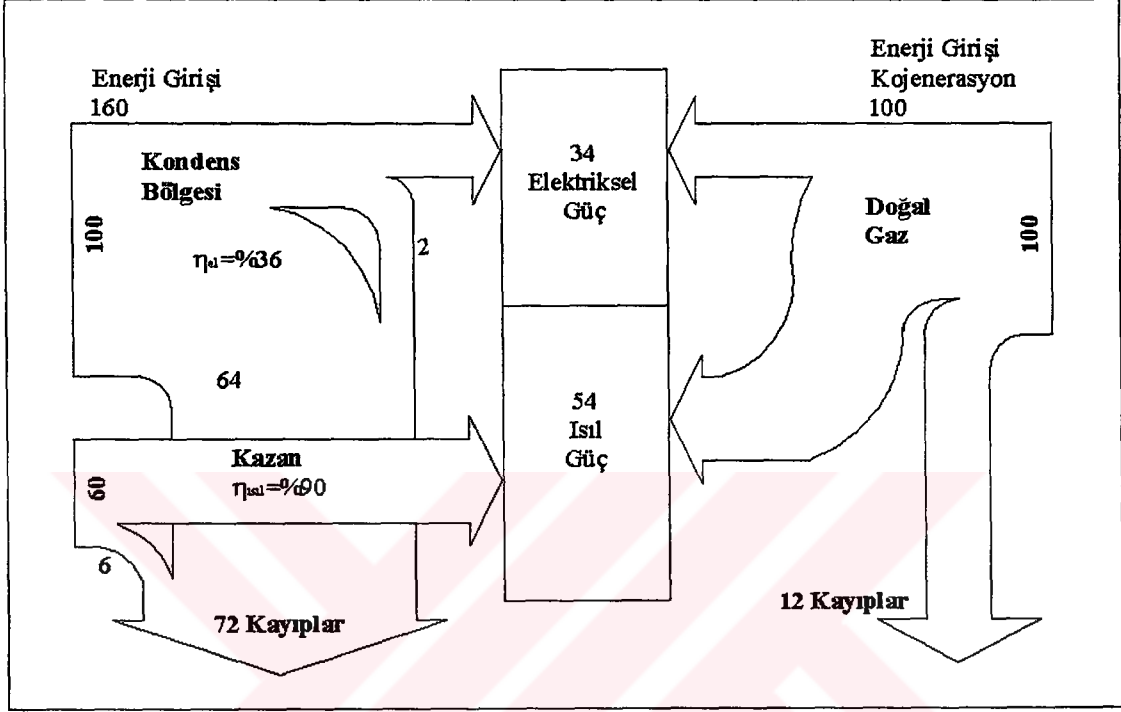
2.1 Kojenerasyonun Tanımı

Kojenerasyon veya diğer adıyla bileşik ısı ve güç üretimi, tek bir sistemden eş zamanlı olarak elektrik ve/veya mekanik güç ile kullanılabilir ısı üretilmesi demektir. Sistemin ana amacı, basit mantıkla sadece elektrik üreten termik güç santrallerinden aynı zamanda ısı enerjisi elde edilmesidir. Mekanik enerji genellikle bir elektrik jeneratörünün güç kaynağı olmakla birlikte pompa veya kompresörlerin tahrik kaynağı olarak da kullanılmaktadır. Termal enerji, doğrudan proses uygulamalarında veya buhar, sıcak su, kurutma için sıcak hava üretmek veya soğutma amacıyla kullanılmaktadır.

Tipik ve klasik enerji üretim sistemleri (termik santrallerde elektrik, kazanlarda ısı üretimi) çevreyi kirletmekte ve birincil enerjinin büyük bir kısmı atık ısı olarak ziyan olduğundan ekonomik de olmamaktadır. Buna karşılık kojenerasyon sisteminden elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan ısı, eşanjörler yardımı ile çeşitli ısı ihtiyaçları için (sıcak su, buhar, absorpsiyonlu soğutma vb.) değerlendirilebilmektedir. Gazla çalışan CHP (Combined Heat and Power – Bileşik Isı ve Güç) sistemlerinde elektrik ve ısının eş zamanlı üretilmesiyle %80-90 oranında verim elde edilebilmektedir. Bu yüksek sistem verimi sayesinde kojenerasyon sistemi, ilk yatırım tesis giderini 1.5 - 3 sene gibi çok kısa sürede öder (Koçak ve Gülşen, 1998). Ayrıca elektrik üretiminin bölgesel olması sebebiyle iletim hatlarındaki kayıplar engellenmektedir.

Kojenerasyon, hem makro hem de mikro bakış açısından mantıklıdır. Makro açıdan, devletin yükümlülüğünde olan güç sistemlerinin finansal yükünün özel sektör ile paylaşılmasını sağlar. Ayrıca milli enerji kaynakları verimli kullanılmakta ve yakıt ithal miktarı azalmaktadır. Mikro açıdan bakıldığında ise, bölgede hem güç hem de ısı ihtiyacı varsa kullanıcıların enerji giderleri azalmaktadır.

Şekil 2.1’de konvansiyonel ve kojenerasyon sistemleri ile enerji üretimi bir Sankey diyagramı üzerinde karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere; 34 birim elektriksel, 54 birim ısı güce ihtiyacı olan bir tesisin bu ihtiyaçları karşılamak için, konvansiyonel sistemde 160 birim enerji gerekirken, kojenerasyon sistemiyle 100 birim enerji yeterli olmaktadır.

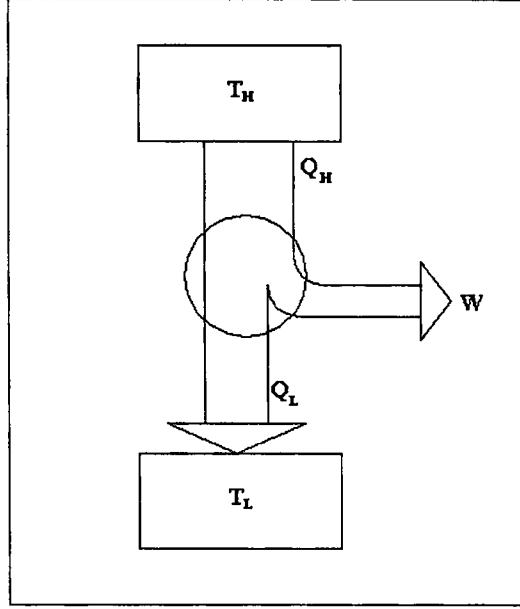


Şekil 2.1 Konvansiyonel ve kojenerasyon sistemlerinin karşılaştırılması

Kısaca özetlersek kojenerasyon sistemi tüm ısı makinalarının çevreye vermek zorunda oldukları atık ısıdan yararlanmayı amaçlar. Şekil 2.2’deki ısı makinasından görüleceği üzere, bir ısı makinasından üretilen işin (W), alınan ısı enerjisine (Q_H) oranı, ısı verim, η ’dir.

$$\eta = \frac{W}{Q_H} \quad (2.1)$$

Bu ısı verime kojenerasyon uygulamalarında elektrik çevrim verimi adı da verilmektedir.



Şekil 2.2 Bir ısı makinası

Çevreye aktarılan ısı enerjisi (Q_L), kojenerasyon sisteminde kullanılan ısıdır. Böylece enerjiden yararlanma oranı (EYO) maksimum düzeye çıkartılmaktadır.

$$EYO = \frac{W + Q_L}{Q_H} \quad (2.2)$$

EYO'ya kojenerasyon uygulamalarında toplam verim de denilmektedir. Her ne kadar EYO, termodinamiğin birinci yasasına göre "1" olsa da, uygulamada atık ısının tümünden yararlanılamadığından bu mümkün olmamaktadır. Bu atık ısıdan, doğrudan ısı olarak yararlanılmadıkça yani ortaya çıkan ısı enerjisi doğrudan proseslerde kullanılmadıkça %35-55 aralığında uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bileşik çevrimde dünyadaki iyi örneklerden biri olmasına rağmen, Ambarlı Kombine Çevrim Santrali'nde bu verim değeri %50 civarında kalmaktadır. Oysa atık ısıdan, gene ısı olarak faydalanılan kojenerasyon sisteminde toplam sistem verimini yani enerjiden yararlanma oranını %80-90'lara dek çıkarmak mümkün olmuştur (Koçak ve Gülşen, 1998).

Bileşik ısı güç santrallerinde üretilen işin (elektriğin) faydalanılan ısıya oranı, elektrik ısı oranı, EIO diye tanımlanır. EIO, kojenerasyon sisteminin önemli özelliklerinden biridir.

$$EIO = \frac{W}{Q_L} = \frac{\eta}{1-\eta} \quad (2.3)$$

2.2 Kojenerasyon Kullanım Alanları

Gelişmekte olan ülkelerde, sistemdeki teknik sorunlar nedeniyle veya tüketicinin belirli bir zaman aralığında talep ettiği enerjinin, şebeke kapasitesinin üzerinde olması nedeniyle gerekli gücün sağlanamaması olağandışı bir durum değildir. Bu zamanlarda endüstriyel ve ticari yapılar ihtiyaçları olan enerjiyi sağlamak için yedek jeneratörler kullanırlar. Üretim kayıplarını en az miktarda tutmak veya müşterilerinin konforunu minimum seviyede de olsa sağlamak zorunlu bir iştir. Yedek jeneratörler, yıl içinde sınırlı kez kullanılırlar. Ayrıca bu jeneratörler yatırım, işletme ve bakım masrafları getirmekte ve işletmenin enerji faturasının azaltılmasına hiçbir etki yapmamaktadırlar. Bu nedenlerden ötürü endüstriyel ve ticari yapılarda, sadece güç eksikliği olduğu zamanlarda değil tüm sene çalışan güç üretim sistemleri ile sistemin ihtiyaçlarının sağlanması daha güvenilir ve ekonomik olmaktadır. Bu yapılara kurulacak bir güç makinası sistemi ile sürekli ve güvenli güç üretimi sağlanabilir.

Bir gaz türbininde veya motorunda, kullanılan birincil enerjinin üçte biri güce dönüşmekte geriye kalan kısmı ise 300 ila 500°C aralığındaki sıcaklıklarda atık ısı olarak sistemden atılmaktadır. Termal enerjinin bir şekilde gerekli olduğu bölgelerde atık ısı, ihtiyacı karşılamak üzere kullanılabilir. Örneğin, düşük veya orta basınçlı proses uygulamaları için buhar veya bölgedeki kazan ve kurutucular için gerekli olan ve birincil enerji kullanılacak noktalarda atık gazların ısısından faydalanılabilir.

Kojenerasyon kurulması için ideal bir işletme aşağıdaki özellikleri taşır:

- Güvenilir bir güç ihtiyacı
- Sürekli elektrik ve termal enerji talebi
- Elektrik talebinden daha yüksek termal enerji talebi
- Uzun işletme saatleri
- Yüksek şebeke fiyatı

Tipik kojenerasyon uygulamaları başlıca dört alanda kullanılabilir. Bunlar, konutsal kojenerasyon, endüstriyel kojenerasyon, ticari kojenerasyon ve trijenerasyondur.

2.2.1 Konutsal Kojenerasyon

Şehir, bölge veya sitenin ısıtma ve/veya soğutma ile güç ihtiyacını karşılamak üzere kurulur. Bu anlamda kurulacak bir veya büyük şehirlerde birkaç merkez ile bir şehrin veya bölgenin veyahut önemlice bir konutlar topluluğunun enerji ihtiyaçlarının karşılanması hedeflenir.

Merkezi ısıtma denilen bu sistem pek çok ülkede kullanılmaktadır. Özellikle ısı yükü fazla ve soğuk mevsimi uzun süren şehirlerde bu sistem ile hem enerji ekonomisi sağlanmış hem de hava kirliliği büyük ölçüde azaltılmıştır. Rusya'nın toplam binalarının yaklaşık %70'i merkezi ısıtma ile ısıtılmaktadır. İskandinav ülkelerinde toplam binaların %30 ila %80'i bu sistemle ısıtılmakta olup ısıtma merkezleri bileşik ısı güç üretimi şeklinde tesis edilmiştir (Narter ve Öztürk, 1996).

2.2.2 Endüstriyel Kojenerasyon

Endüstriyel kojenerasyon sistemleri, tüm yıl boyunca yüksek ısı ve elektrik talebi olan yerlerde kullanılırlar. Genel olarak iki tip endüstriyel alan mevcuttur. Yüksek sıcaklıkta termal enerji gereken yerler (rafineriler, gübre fabrikaları, çelik, çimento, seramik ve cam endüstrisi) ve düşük sıcaklıklarda termal enerji gereken yerler (kağıt fabrikaları, tekstil fabrikaları, gıda ve içecek fabrikaları).

Endüstriyel kojenerasyon sistemlerinde proses atıklarından veya prosesin kendisinden termal enerji üretmek mümkün olabilir. Örneğin kağıt fabrikalarında kağıt yapımında ortaya çıkan yüksek miktarda atık madde (ağaç kabuğu, iskartalar, kağıt hamuru için uygun olmayan ağaç parçaları) yardımcı yakıt olarak kullanılabilir veya çelik yapımında çıkan sıcak gazlar buhar üretmekte yardımcı olabilir.

Endüstride ihtiyaç duyulan ısı çoğunlukla buhar formundadır. Bu nedenle gaz türbini çevriminin çıkışındaki egzoz gazlarının ısısından buhar elde edilen kombine çevrimli kojenerasyon sistemleri yaygın olarak kullanılır. Endüstriyel kojenerasyon sistemleri yılda 8000 saat veya daha fazla çalışabilirler (EDUCOGEN, 2001a). Bu yüzden endüstrileşmiş ülkelerde, endüstrideki ısı potansiyeli, kojenerasyonu uygun bir seçenek haline getirmiştir.

2.2.3 Ticari veya Kurumsal Kojenerasyon

Ticari ve çok katlı yapılardaki kojenerasyon sistemleri kısmen daha küçüktür ve genellikle paket ünitelerdir. Paket üniteler bir pistonlu motor, bir küçük jeneratör ve bir atık ısı kazanından oluşmaktadır. Tüm bileşenler ses geçirmez bir muhafazanın içindedir. Ünite sadece yakıt girişi ile ısı ve elektrik çıkışı bağlantıları bulunmaktadır. Kullanılan yakıt genellikle doğal gazdır. Bu sistemler otellerde, eğlence merkezlerinde, ofislerde, hastanelerde ve pek çok konutun bulunduğu yüksek katlı binalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kullanılan pistonlu motorlar tipik olarak dizel motoru veya doğal gaz ile çalışmaya uyarlanmış otomotiv motorlarıdır. Çift yakıtlı da olabilirler. Isı geri kazanımı soğutma suyundan ve egzoz gazlarından sağlanır. Daha büyük ölçekli uygulamalarda, endüstride kullanılan kojenerasyon teknolojileri kullanılır. Bunlar gaz türbinli veya büyük pistonlu motorlar olabilir. Bu tip sistemler büyük hastaneler, büyük ofis kompleksleri, üniversiteler veya diğer büyük okullar için uygun olabilirler.

2.2.4 Trijenerasyon

Trijenerasyon, tek bir yakıt kaynağından, elektrik, buhar veya sıcak su ve soğutma olmak üzere üç enerji üreten sistemdir. Bu sistemler, az miktarda kirlilik yaratırlar ve farklı üç ürün ürettikleri için verimleri çok yüksektir. Tipik kojenerasyon sistemlerinin soğutucular ile kombine edilmesi için iki değişik metot vardır. Bunlar, sıkıştırma (kojenerasyon kompresörleri tahrik eder) ve absorpsiyondur (soğutma oluşturmak için ısı kullanılır). Trijenerasyon, kojenerasyonun uygulandığı tüm alanlarda kullanılabilir:

- **Merkezi soğutma**

Merkezi soğutma, son yıllarda, mahal soğutması ihtiyacı olan konutsal yapılarda, ticari merkezlerde ve hatta endüstride pek çok noktada uygulanmaya başlanmıştır. Ofislerin bulunduğu büyük binalarda ve klima ihtiyacı olan büyük konutsal yapılarda kullanılması oldukça yaygındır.

Bu uygulamalarda genellikle absorpsiyonlu soğutma sistemi kullanılır. Çünkü bu sistemlerde kloroflorokarbon kullanılmaz ve kojenerasyon sistemlerine kombine edilmiş olarak çalışabilirler.

Merkezi soğutma sistemleri, merkezi ısıtma sistemlerinin tamamlayıcılarıdır. Yazın ısı talebi kışa göre daha düşüktür. Bu yüzden kojenerasyondan elde edilen ısı merkezi soğutmaya gönderilir ve ısı talebinin mevsimsel dengesinin sağlanmasına yardımcı olunur. Bu işlem kojenerasyon sisteminin toplam verimini artırır.

- **Endüstriyel yapıların soğutma talebi**

Pek çok endüstride, özellikle gıda endüstrisinde, yaz aylarında soğuk su eksikliği hissedilmektedir. İhtiyaç duyulan 10-15°C'de su çevrede bulunan akarsulardan karşılanamaz çünkü nehir suları yazın 25-30°C'de olmaktadır.

Örneğin, soğutma ihtiyacı yüksek olan bira üreticileri, ürettikleri büyük miktardaki birayı soğutmalıdır ve soğuk ortamda depo etmelidirler. Büyük mandıralar da sütün saklanması ve dondurulmuş ürünlerin depolanabilmesi için soğutmaya ihtiyaç duyar. Dondurulmuş gıda üreticileri de -20°C ile -30°C arasında depolama sıcaklıklarına ihtiyaç duyarlar (EDUCOGEN, 2001a).

- **Kişisel binalarda soğutma**

Bu sistemler, otellerde, spor ve eğlence merkezlerinde ve konutsal yapılarda kullanılırlar. Kojenerasyon üniteleri küçüktür ve genelde pistonlu motorlar kullanılır. Isı geri kazanımı soğutma suyu ve egzozdan sağlanır. Geri kazanılan ısının kullanımının artırılması için absorpsiyonlu soğutucular kullanılır. Böylece yaz aylarında kojenerasyon sistemi düşen ısı talebinden etkilenmez.

3. KOJENERASYON TEKNİKLERİ

Kojenerasyon, eş zamanlı olarak ısı ve güç ihtiyacı olan endüstriyel tesislerde uzun süreden beri kullanılmaktadır. Son yirmi yılda, kojenerasyonun uygulanacağı bölgenin tüm ihtiyaçlarına tam olarak cevap verebilecek çok çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Ayrıca, bu dönemde yasalarda yapılan düzenlemeler ile kojenerasyonun kurulması ve işletilmesi daha da kolaylaştırılmıştır.

Kojenerasyon projelerinde dört ana kategori vardır:

- a) Küçük ölçekli kojenerasyon projeleri: Uygulanacak yapının, sistem kurulabilecek alanına ve su ısıtma ihtiyacına göre planlanırlar. Genellikle patlamalı motorlar kullanılır.
- b) Büyük ölçekli kojenerasyon projeleri: Endüstriyel tesislerde veya büyük binalarda buhar elde etmek amacıyla planlanırlar. Patlamalı motorlar, buhar türbinleri veya gaz türbinleri kullanılabilir.
- c) Büyük ölçekli, güç üretimi yanında merkezi ısıtma yapan ve yerel bir şebekeyi besleyen kojenerasyon projeleri: Bu sistemlerde buhar türbinleri veya gaz türbinleri kullanılabilir.
- d) Yenilenebilir enerji kaynaklı çeşitli ölçeklerdeki kojenerasyon projeleri

3.1 Kojenerasyon Sistemleri

Kojenerasyon sistemleri üst çevrimli (topping cycle) ve alt çevrimli (bottoming cycle) olarak ikiye ayrılırlar. Üst çevrimli sistemlerde, yüksek sıcaklıktaki bir akışkan (egzoz gazı veya buhar) ile bir güç makinası tahrik edilerek elektrik elde edilir. Alt çevrimli sistemlerde ise yüksek sıcaklıktaki ısı enerjisi ilk önce prosesler için kullanılır. Proseslerden çıkan sıcak gazlar doğrudan bir gaz türbininde veya bir atık ısı kazanında buhar üretmek suretiyle buhar türbininde elektrik üretiminde kullanılırlar.

Kojenerasyon sistemleri dört temel elemandan oluşur.

- Güç makinası
- Elektrik jeneratörü
- Atık ısı kazanı
- Kontrol sistemi

İhtiyaca göre herhangi bir enerjiyi mekanik güce çevirecek güç makinası, buhar türbini, pistonlu motor veya gaz türbini olabilir. Bu makineler elektrik jeneratörünü tahrik eder ve atık ısı geri kazanılarak ihtiyaçlar karşılanır.

3.2 Güç Makinaları

Kojenerasyon sistemleri genellikle güç makinalarının tipine, jeneratörün tipine veya kullanılan yakıtın tipine göre adlandırılırlar.

Kojenerasyonda yaygın olarak kullanılan sistemler şunlardır:

- Buhar Türbinleri
- Gaz Türbinleri
- Pistonlu Motorlar
- Kombine Çevrimler

Teknolojinin gelişmesi ile önümüzdeki yıllarda ekonomik olarak uygulanabilecek sistemler de bulunmaktadır. Bu sistemler şunlardır:

- Yakıt Hücreleri
- Stirling Motorları
- Mikro Türbinler

3.2.1 Buhar Türbinleri

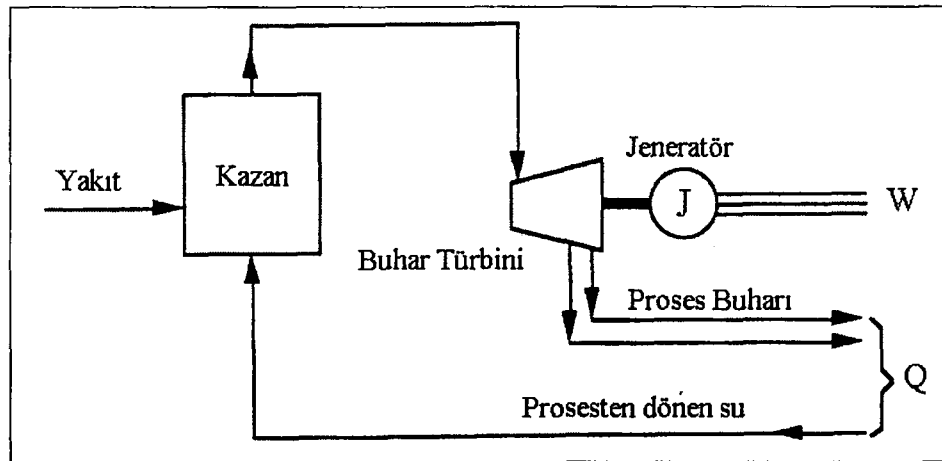
Buhar türbinleri, uzun yıllardan beri endüstriyel kojenerasyon sistemleri için güç makinası olarak kullanılmaktadır. Bir ısı kazanından çıkan yüksek basınçta buhar, türbinde genişleyerek mekanik enerji oluşturur ve bu mekanik enerji ile bir elektrik jeneratörünü tahrik edilerek güç yani elektrik üretilir. Üretilen gücün miktarı, prosesler için ihtiyaç duyulan ısı enerjisine bağlı olarak, türbinde düşürülebilecek basınç miktarına bağlıdır. Buhar türbini sistemleri, gaz türbini ve pistonlu motor sistemlerine göre birim yakıt başına daha az elektrik enerjisi üretirler. Buna karşılık toplam verimleri daha yüksektir.

Uygun bir güç üretimi için türbine giren buharın yüksek basınç ve sıcaklıkta olması gerekir. Prosesin ihtiyaç duyduğu sıcaklık, buharın türbin çıkış şartlarını belirler. Türbine giren buharın basıncı arttırılırsa elde edilen güçte artar. Fakat artan buhar basıncı ile kazan maliyeti ve işletme maliyetleri de artar. Bu yüzden optimum basıncı, santral boyutu ve proses ihtiyaçları belirler. Buhar çevrimlerinin en önemli avantajı, kazanları her türlü yakıt ile çalışabilmesidir. Yakıt olarak gaz, ağır fuel-oil (AFO), kömür, ıskartalar ve diğer atıklar kullanılabilir.

Buhar türbini çevrimleri, karşı basınçlı, yoğuşmalı ve alt çevrimli buhar türbini çevrimleri olmak üzere üçe ayrılırlar.

3.2.1.1 Karşı Basınçlı Buhar Türbini Sistemleri

En basit sistem şeklidir. Buhar türbinine yüksek basınçta giriş yapan buhar, daha düşük bir basınç seviyesine genişletilir. Böylece yüksek basınçlı buharın termal enerjisi kinetik enerjiye ve daha sonra da türbin kanatları ile mekanik güce dönüştürülür. Türbin çıkışındaki buhar proste kullanılacağı için çıkış basıncını, proses ihtiyacı belirler. Proses için birden farklı seviyede ısıya ihtiyaç duyuluyorsa, buhar türbininden gerekli şartlarda ara buhar çekilir. Türbinden çıkan buhar kullanılacağı yere gider, burada ısını verir ve yoğuşarak sisteme geri döner. Sisteme dönen suyun debisi, proseslerde doğrudan kullanımla veya borulardan sızıntı dolayısıyla gerekli olan buhar debisinden az olabilir. Bu durumda sistemdeki su dengesinin ayarlanması için ilave su verilir.



Şekil 3.1 Karşı basınçlı buhar türbini sisteminin şematik şekli

Karşı basınçlı sistemlerin şu avantajları vardır:

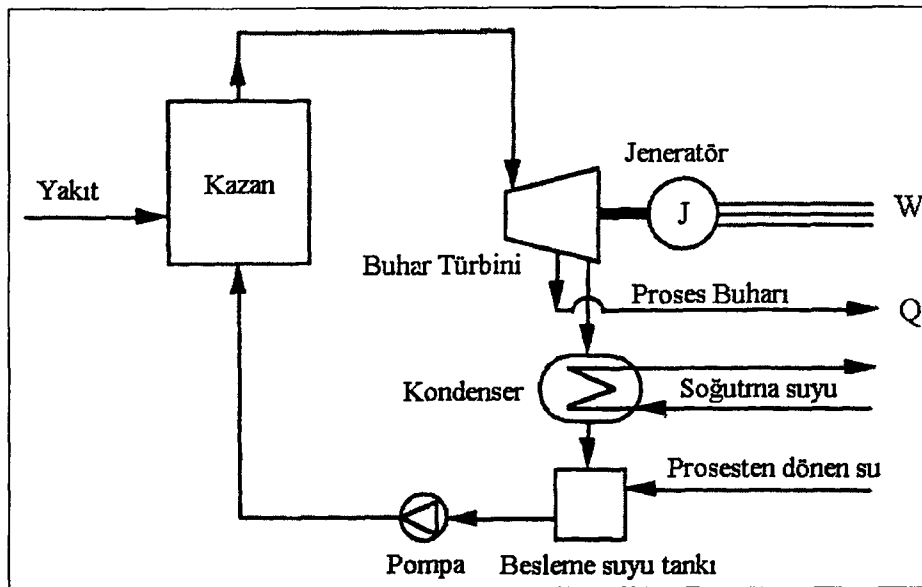
- Birkaç bileşen ile basit bir sistem yapısı vardır.
- Buharın düşük basınç seviyeleri için gerekli olan maliyetler ortadan kalkar.
- Yatırım maliyeti azdır.
- Soğutma suyuna çok az ihtiyaç vardır hatta hiç yoktur.
- Toplam verimi yüksektir.

Dezavantajları

- Türbin giriş çıkış entalpi farkının küçük olması sebebiyle aynı gücü üretmek için daha büyük türbin boyutuna ihtiyaç olur.
- Türbinden geçen buharın debisi termal yüke bağlıdır. Bundan dolayı üretilen elektrik de termal yüke bağlıdır. Yani elektrik yükünde veya ısı yükünde bir değişiklik olduğunda sistem ısı veya elektrik için fazlalık veya eksiklik verecektir. Bunu önlemek için elektrik alımı ve satımı için şebeke ile bağlantı yapılmalıdır.

3.2.1.2 Yoğuşmalı (Kondensasyonlu) Buhar Türbini Sistemleri

Bu sistemde, termal ihtiyaca göre buhar türbininden değişik basınç ve sıcaklıklarda bir veya birkaç noktadan ara buhar çekilir. Geriye kalan buhar, 0.05 bar gibi düşük basınç değerlerinde olabilen kondenser basınç seviyesine kadar genişler. Kondenserdeki vakumun etkisi ile türbinden elde edilen güç artırılır. Çekilen ara buhar, kazan besleme suyunun ön ısıtılmasında kullanılabilir. Bu sayede çevrim verimi artırılabilir.

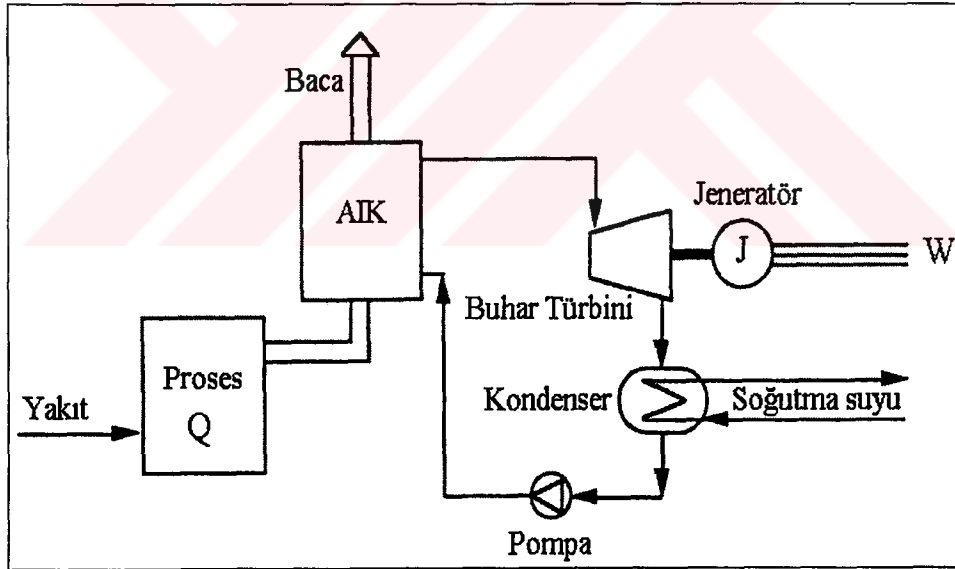


Şekil 3.2 Yoğuşmalı buhar türbini sisteminin şematik şekli

Karşı basınçlı sistem ile karşılaştırılırsa, yoğuşmalı sistemin yatırım maliyeti daha yüksektir ve toplam verimi daha düşüktür. Yatırım maliyetinin daha yüksek olmasının sebebi yoğuşturuculu sistemlerde yoğuşturucu ve soğutma kuleleri gibi ekipmanların olmasıdır. Bunlara karşılık yoğuşturuculu sistemlerin en önemli avantajı, termal ihtiyaçlar ile elektrik ihtiyacının birbirinden bağımsız olarak ayarlanabilmesidir.

3.2.1.3 Alt Çevrimli Buhar Türbini Sistemleri

Pek çok endüstriyel proseslerde (demir fabrikalarında, cam fabrikalarında, seramik fabrikalarında, çimento fabrikalarında, petrol rafinerilerinde vb.) çok yüksek sıcaklıklarda (1000-1200°C) egzoz gazları ile işlem yapılmaktadır. Proses çıkışında bu gazlar hala yüksek sıcaklıkta (500-600°C) olmaktadır. Bu gazları doğrudan atmosfere atmak yerine bu gazlar bir atık ısı kazanından geçirilerek buhar elde edilebilir. Bu buhar ile bir buhar türbini tahrik edilerek elektrik üretilebilir. Buradan da anlaşılacağı gibi yakıt enerjisi ile önce termal ihtiyaçlar karşılanır daha sonra buhar türbini ile elektrik üretilir (Elliot, 1989).



Şekil 3.3 Alt çevrimli buhar türbini sisteminin şematik şekli

3.2.1.4 Buhar Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Performansı

- Buhar türbini sistemlerinin verimi ve EIO

Toplam enerji verimleri yüksektir (%60-85) ve yükün azalması ile biraz düşerler. Fakat elektrik verimleri düşüktür (%15-20), dolayısıyla elektrik ısı oranları da düşüktür (EIO=0.1-0.5). Genel olarak, proses buharının sıcaklığı ne kadar yüksek olursa elektrik verimi de o kadar düşük olur. Elektrik verimi, türbin giriş basıncı ve sıcaklığı artırılarak yükseltilebilir.

- Karşı basınçlı buhar türbini sistemleri

Buharın tüm ısı enerjisi kullanıldığında ve hiçbir ek soğutma olmadığında toplam verim %85 seviyelerine kadar çıkabilir. Elektrik üretimi proses için gerekli buhar debisine bağlı olduğundan yük değişimlerinde EIO sabit kalır.

- Yoğuşmalı buhar türbini sistemleri

Kondenserde dışarı atılan ısı nedeniyle toplam verim daha düşüktür. Bu sistemin en büyük avantajı elektrik ve ısı yüklerinin birbirinden bağımsız olarak ayarlanması dolayısıyla EIO'nun değiştirilebilmesidir.

- Alt çevrimli buhar türbini sistemleri

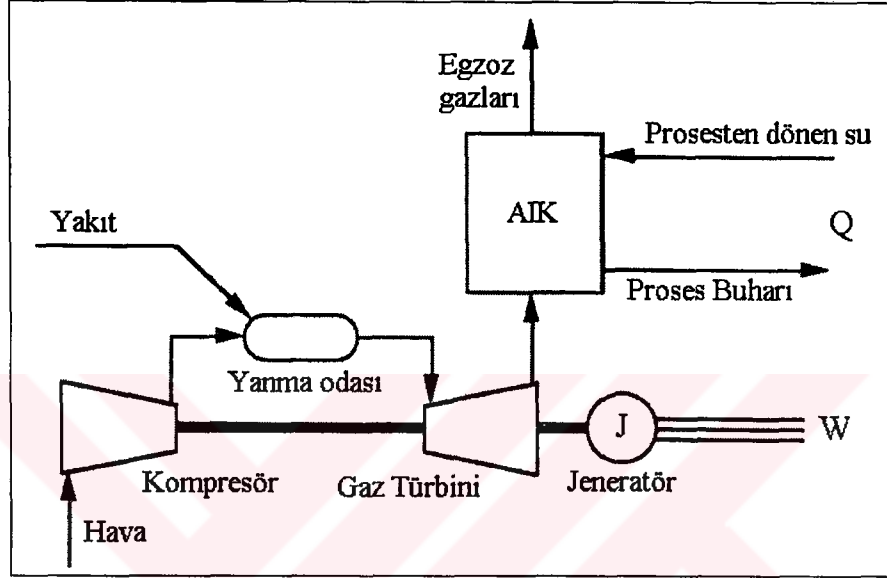
Elektrik verimleri genellikle %5-15 aralığındadır. Bu değer düşük bir değerdir fakat atmosfere atılacak enerjiden elektrik üretmek önemli bir fayda sağlar.

3.2.2 Gaz Türbinleri

Gaz türbinleri, son yıllarda büyük ölçekli kojenerasyon sistemlerinde en çok kullanılan güç makinasıdır. Mevcut bir yapıya gaz türbini sistemi kurmak, yüksek basınçlı kazan ve buhar türbini kurmaktan daha kolaydır. Pek çok yapıda tesis kurulacak mahal sorunu gaz türbini seçimi ile giderilmektedir. Bunun yanında düşük yatırım maliyeti gaz türbinini optimum seçim durumuna getirmektedir.

3.2.2.1 Açık Çevrimli Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemleri

Uygulamalarda en çok kullanılan sistem açık Brayton çevrimidir. Bu sistemde, bir kompresör ile atmosferden alınan hava yanma odası basıncına kadar sıkıştırılır. Havanın sıcaklığı sıkıştırmadan dolayı artar. Eski ve küçük sistemlerde basınç oranı 15:1 aralığında olabilir. Yeni ve büyük sistemler de bu değer 30:1 oranına çıkabilir.



Şekil 3.4 Açık çevrimli gaz türbinli kojenerasyon sisteminin şematik şekli

Sıkıştırılan hava, yanma odasına girer ve içine yakıt püskürtülür ve yakılır. Yanma odasında %1-2 seviyesinde bir basınç kaybı olur. Yanma sonucunda yüksek sıcaklıkta ve içinde %15-16 oksijen olan egzoz gazları ortaya çıkar. Bu noktada çevrimin en yüksek sıcaklığı ortaya çıkar. Bu sıcaklık ne kadar yüksek olursa çevrim verimi o kadar yüksek olur. Sıcaklığın üst limitini gaz türbin materyali ve türbin kanatlarının soğutulma oranı belirler. Bu sıcaklık değeri günümüzde yaklaşık 1300°C'dir (EDUCOGEN, 2001b).

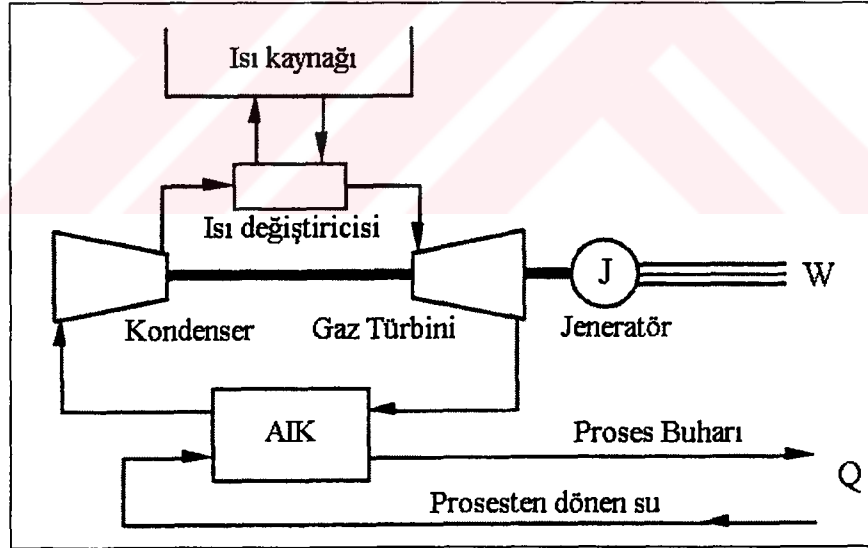
Yüksek basınç ve sıcaklıkta gaz türbinine giren egzoz gazları ile kompresör ve jeneratörü tahrik eden mekanik enerji elde edilir. Egzoz gazları, türbin yüksek sıcaklıklarda (450-600°C) terk eder.

Atık ısı kazanında egzoz gazlarının enerjisinden buhar elde edilir. Elde edilen buhar yüksek kalitede olabilir. Bu buhar ile bir buhar türbini tahrik edilerek ek güç elde edilebilir. Bu çevrime kombine çevrim denir. Buhar üretmek yerine egzoz gazları yüksek sıcaklıkta ısıtma veya kurutma için doğrudan kullanılabilir.

Sistem ihtiyacına göre egzoz gazlarının sıcaklığı ek bir yanma ile yükseltilebilir. Bunun için atık ısı kazanına ek yakıcılar eklenir. Daha önce belirtildiği gibi egzoz gazlarının içinde bulunan oksijen miktarından dolayı ek havaya ihtiyaç olmaz. Açık çevrimli gaz türbini sistemlerinde elektrik çıkışı 1 -100 MW aralığındadır (Onsite Sycom, 1999).

3.2.2.2 Kapalı Çevrimli Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemleri

Kapalı çevrimli sistemde, iş akışkanı (genellikle helyum veya hava) kapalı bir sistemde dolaşır. İş akışkanı türbin girişinden önce bir ısı değiştiricisi ile ısıtılır ve türbin çıkışından sonra ısısını bir ısı değiştiricisi ile vererek soğur. Böylece iş akışkanı temiz kalır ve erozyon veya korozyona yol açmaz.



Şekil 3.5 Kapalı çevrimli gaz türbinli kojenerasyon sisteminin şematik şekli

Isının kaynağı, herhangi bir yakıtın yakılması olabilir. Bunun yanı sıra nükleer enerji veya güneş enerjisi de kullanılabilir. Bu tip sistemlerin güç çıkışları 1-50 MW aralığındadır.

3.2.2.3 Gaz Türbinli Kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Performansı

- Gaz türbini sistemlerinin verimi ve EIO

Küçük ve orta çaptaki gaz türbini sistemlerinin elektrik verimi %25-35 aralığındadır. Daha büyük sistemlerde, egzoz gazlarının yüksek sıcaklığından dolayı bu değer %35-40 seviyelerine çıkabilir. Tipik olarak toplam verimleri %60-80'dir. Elektrik ısı oranları (EIO) 0.5-0.8 aralığındadır.

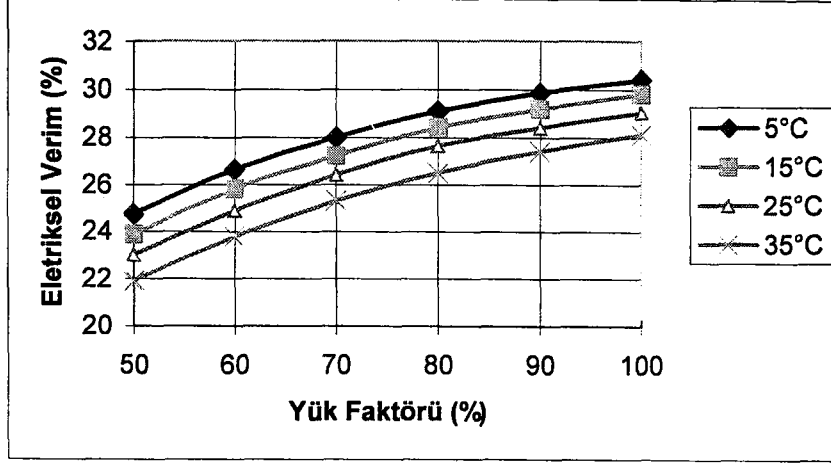
Türbin çıkışının %50 gibi önemli bir oranı kompresörü tahrik etmek için kullanılır. Bundan dolayı elektrik verimi düşer. Yüksek basınç oranları kullanmak yerine sıkıştırma işleminin orta seviyelerinde ara soğutma yapılarak, kompresör için gerekli güç azaltılabilir. Elektrik verimini yükseltmek için diğer bir yol yanma odası girişindeki havanın egzoz gazları ile ısıtılması olan rejenerasyondur.

Geri kazanılabilecek maksimum ısı değerini egzoz gazlarının minimum sıcaklık değeri belirler. Eğer kullanılan yakıtın içinde kükürt varsa egzoz gazlarının sıcaklığı 140-165°C'den daha düşük olamaz. Bu sıcaklıkların altına inilirse sülfürik asit oluşacaktır. Doğal gazda olduğu gibi yakıtta kükürt yoksa egzoz çıkış sıcaklığı 90-100°C'ye kadar düşürülebilir.

- Gaz türbini sistemlerinde ortam koşullarının ve yük faktörünün güç çıkışına ve verime etkisi

Kompresöre giren hava ortam koşullarındadır. Ortam sıcaklığı ve havanın yoğunluğu sıkıştırma için gerekli işi, yakılacak yakıtı ve yakıt miktarını belirler. Dolayısıyla net güç çıkışı, verim, egzoz çıkış debisi ve sıcaklığı ortam koşullarının birer fonksiyonudur.

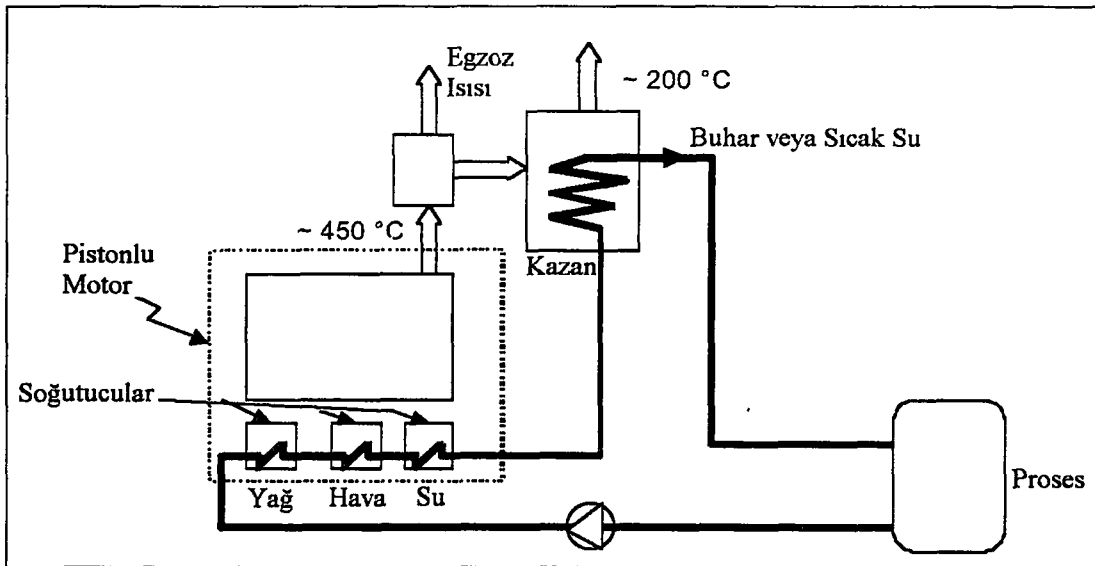
Türbin imalatçıları, türbin kapasitesini ve performansını ISO standart koşulları için verirler. Ortam standardı şöyledir: 15°C, %60 bağıl nem ve deniz seviyesi. Türbinin kapasitesi, ortam sıcaklığı ve denizden yükseklik arttıkça azalır. Her 300 m. yükseklik artışı için kapasite yaklaşık %2-4 azalır. Yükün, verim üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yük azaldıkça elektrik verimi de azalır.



Şekil 3.6 Gaz türbinli sistemlerde yük faktörünün verime etkisi (EDUCOGEN, 2001b)

3.2.3 Pistonlu Motorlar

Kojenerasyonda kullanılan pistonlu motorlar, otomotivde kullanılan içten yanmalı motorlar ile aynı prensipte çalışan motorlardır. Sistem, gaz türbini ile benzer olsa da aralarında çok büyük farklar vardır. Pistonlu motorlar daha yüksek elektrik verimi sağlarlar. Fakat ürettikleri termal enerjinin kullanılması oldukça zordur. Bunun sebebi enerjinin genellikle düşük sıcaklıkta olması ve motor soğutma sistemi ve egzoz gazlarına dağılmasıdır. Pistonlu motorlar çevrimlerine göre ikiye ayrılırlar. Bunlar Otto çevrimi ve Dizel çevrimidir. Bir Otto motorunda, her silindirde hava ve yakıt karışımı sıkıştırılır ve bir kıvılcım ile tutuşturulur. Dizel motorunda ise silindirde sadece hava sıkıştırılır ve sıkıştırma stroğunun sonuna doğru yakıt püskürtülür. Sıkıştırılan havanın yüksek sıcaklığı ile tutuşma sağlanır.



Şekil 3.7 Pistonlu motorlu kojenerasyon sisteminin şematik şekli

3.2.3.1 Sıkıştırma Ateşlemeli (Dizel) Motorlar

Şekil 3.7’de pistonlu motorlu bir kojenerasyon sisteminin basit bir şematik şekli gösterilmiştir. Bu sistemde motor jeneratörü tahrik eder ve elektrik üretilir. Yağ soğutucusu, şarj havası soğutucusu, ceket suyu soğutucusu ve egzoz gazlarının ısıları ısı değıştircileri ile geri kazanılır. Üç soğutucudan elde edilen ısı ile su 75-90°C’ye kadar ısıtılabilir. Bu şekilde ön ısıtılan su, atık ısı kazanında sıcak su veya buhara dönüştürülür. Orta büyüklükteki motorlar 180-200°C’de doymuş buhar üretebilirler. Daha büyük motorlarda 15-20 bar basınçta ve 250-350°C’de kızgın buhar elde edilebilir. Dizel motorlar yüksek hızlı, orta hızlı ve düşük hızlı olmak üzere üçe ayrılırlar (Gibbons, 1983).

Çizelge 3.1 Dizel motorların sınıflandırılması

Tip	Hız (d/d)	Güç (kW)
Yüksek hızlı	1200 – 3600	75 – 1500
Orta hızlı	500 – 1200	500 – 10000
Düşük hızlı	100 – 160	2000 – 50000

Büyük ölçekli kojenerasyon sistemlerinde kullanılan dizel motorlar daha çok aşırı doldurmalı ara soğutmalı dört stroklu doğrudan enjeksiyonlu makinalardır. Dizel motorları yakıt olarak motorin, gaz yağı, AFO ve doğal gaz da kullanabilir. Çift-yakıtlı modelde, ateşlemeyi garantilemek için motorin içine küçük miktarda (%5 civarında) gaz yağı enjekte edilir. Şaft verimleri %35 ila %40 arasındadır. Çıkışları 20 MW’a kadar olabilmektedir. Patlamalı motorlara nazaran daha karışık soğutma sistemleri vardır ve sıcaklıkları daha düşüktür, tipik olarak 85°C’dir. Dolayısıyla ısı geri kazanım imkanı kısıtlanmıştır. Egzoz içindeki hava miktarı yüksektir ve ek yanma sağlanabilir. Dizel motorlar 500 ila 1500 devir/dakika hız aralığında çalışırlar. Genel olarak 500 kW’a kadar olan motorlar otomotiv dizellerinin türevleridir, gaz yağı ile çalışırlar ve en üst hız noktalarında çalışırlar. 500 kW – 20 MW arasındaki motorlar gemi dizellerinden gelişmişleridir, çift-yakıtlı çalışırlar ve orta hızda çalışırlar (EDUCOGEN, 2001a).

Modern motorlarda geciktirilmiş ateşleme zamanı ve arttırılmış sıkıştırma oranları kullanılır. Bu sayede yüksek güç çıkışı ve verim elde edilirken NO_x miktarı da sınırlandırılır. Bunun için gelişmiş yakıt enjeksiyonu ve motor kontrol ünitesi gereklidir.

3.2.3.2 Patlamalı (Otto) Motorlar

Otto motorları, benzin, doğal gaz, propan, kanalizasyon gazı, çöplük gazı gibi geniş yakıt seçenekleri ile çalıştırılabilirler. Gaz yakıt kullanıldığında bu motorlara “gaz motorları” denir. Yakıt olarak gaz kullanan motorlarda en önemli özelliklerden biri vuruntu direncidir. Bu da yakıtın metan sayısı ile ilgilidir. Yaktın metan sayısı arttıkça vuruntu direnci de artar. Buradan da anlaşılacağı gibi metan sayısı 10 olan bütanın ve metan sayısı 0 olan hidrojenin vuruntu dirençleri çok düşüktür.

Patlamalı motorlar, dizel motorları ile benzerdirler. Bazı noktalarda yaklaşık aynı değerleri verirler. Örneğin motor soğutma sularının sıcaklığı 90°C’dir. Patlamalı motorların egzoz gazlarındaki ısıları geri kazanılabilir. Bu geri kazanımla 160°C’de sıcak su veya 20 bar basıncında buhar elde edilebilir.

Tipik olarak, şaft verimleri sıkıştırma ateşlemeli motorlardan daha düşüktür ve %27 ila %35 arasındadır. Çıkışları maksimum 2MW’tır. Yeni 3 MW’lık patlamalı motorlarda ön yanma odası mevcuttur ve karışım sitokiyometriktir. Küçük motorlarda ön yanma odası bulunmaz ve konvansiyonel motorlar olarak adlandırılırlar. Ön yanma odalı motorlar %44’lük şaft verimine sahiptirler. Patlamalı motorların çıkış güçleri dizel motorlara göre biraz düşüktür. Dizel motorlarının ürettiğinin %83’ünü üretebilirler. Bunun sebebi vuruntu olasılığıdır.

Patlamalı motorlar küçük ve basit kojenerasyon sistemleri için kullanılırlar. Sistemde genellikle soğutma suyu ve egzoz gazı ısı geri kazanım cihazı ile bağlantılı bir atık ısı kazanı bulunur ve sıcak su elde edilir.

Patlamalı motorlarda genellikle gaz yakıtlar ve doğal gaz kullanılır. Biyogaz ve bir miktar iyileştirilmiş gazlarda kullanılır. Fakat düşük ısı değerleri yüzünden çıkış gücü düşük olur. Patlamalı motorlar dizel motorlara göre egzozu daha az ısı verirler, soğutma suyunu ise daha fazla ısı verirler.

Pistonlu motorlardan sağlanan termal enerji ile en çok yapılan uygulamalar şunlardır:

- Egzoz gazları ile 15 bar basınçta buhar eldesi ve motor soğutma suyu ile 85-90° C 'de sıcak su eldesi.
- 100° C 'de sıcak su üretimi. soğutma suyu ve egzoz gazlarının ısısı ile elde edilir.
- Egzoz gazlarının doğrudan kullanımı. Egzoz gazları, kurutma gibi proseslerde doğrudan kullanılabilirler.
- Sıcak hava eldesi. Motorun her türlü atık ısısı uygun cihazlar ile sıcak hava elde edilmesinde kullanılabilir.

Pistonlu motorlar çalışırken dengesiz kuvvetler üretirler. Bunun için titreşim absorbe eden yardımcı elemanlara ihtiyaç duyarlar. Gürültü, gaz türbinlerinde olduğu kadar büyük bir problem değildir. Fakat yüksek seviyede düşük frekanslı gürültü oluşur ve gürültü engelleyici elemanlar kullanılabilir.

3.2.3.3 Pistonlu Motorlu Kojenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Performansı

Verim ve EIO

Küçük ve orta büyüklükteki patlamalı motorların elektrik verimleri %27-40 aralığındadır. Aynı büyüklükteki dizel motorların elektrik verimleri %35-45 aralığındadır. Daha büyük motorlarda ise bu verim %50 seviyelerine çıkabilmektedir. Pistonlu motorlu kojenerasyon sistemlerinin toplam verimleri %60 ila %85'tir. Elektrik ısı oranları 0.8-2.4 aralığındadır.

Çevre koşullarının, yakıt kalitesinin ve yük faktörünün sistem performansına etkisi

Pistonlu motorlar, gaz türbinlerine göre ortam koşullarının ve yük faktörünün değişimine daha az duyarlıdır.

Doğal çekişli motorlarda, denizden yüksekliğin her 300 m. artışında üretilen güç yaklaşık %3 azalır. Aşırı doldurulmalı motorlarda, 1500 m. yüksekliğe kadar performansta bir düşüş yoktur bu noktadan sonra her 300 m.'de üretilen güç yaklaşık %2 azalır. Buna ek olarak, ortam sıcaklığındaki her 5.5°C'lik artış ile sistemden elde edilen güç yaklaşık %1 azalır.

Pistonlu motorlar, geniş yük aralıklarında verimlerini korurlar. İmalatçılar yüke göre performans değişimlerini çizelge veya grafikler ile verirler. (Çizelge 3.2)

Çizelge 3.2 Pistonlu motor performans değerleri örneği

Şaft gücü	kW	827			1500		
Yük	%	100	75	50	100	75	50
Elektrik gücü	kW _e	803	601	398	1464	1092	724
Termal gücü	kW _{th}	1018	800	578	1536	1245	935
Isı kaynakları:							
Şarj havası soğutucusu	%	5.9	3.2	0.2	7.4	5.1	2.7
Yağ soğutucusu	%	4.4	4.9	6.0	5.2	6.0	7.6
Ceket suyu soğutucusu	%	13.8	17.3	21.0	8.8	10.9	12.7
Egzoz gazları	%	25.0	24.6	24.2	22.2	23.4	24.7
Termal verim	%	49.1	50.0	51.4	43.6	45.4	47.7
Elektriksel verim	%	37.6	37.6	35.3	41.5	39.8	36.9
Toplam verim	%	86.7	87.6	86.7	85.1	85.2	84.6
Su sıcaklığı:							
Gidiş	°C	90	87	83	90	86	82
Dönüş	°C	70	70	70	70	70	70
Veriler şu koşullar için geçerlidir: Yakıt: Doğal gaz, alt ısı değeri 34200 kJ/Nm ³ Maksimum ceket suyu sıcaklığı 90°C Egzoz gazlarının 120°C'ye soğutulması Isı, sıcak su formunda kullanılmaktadır.							

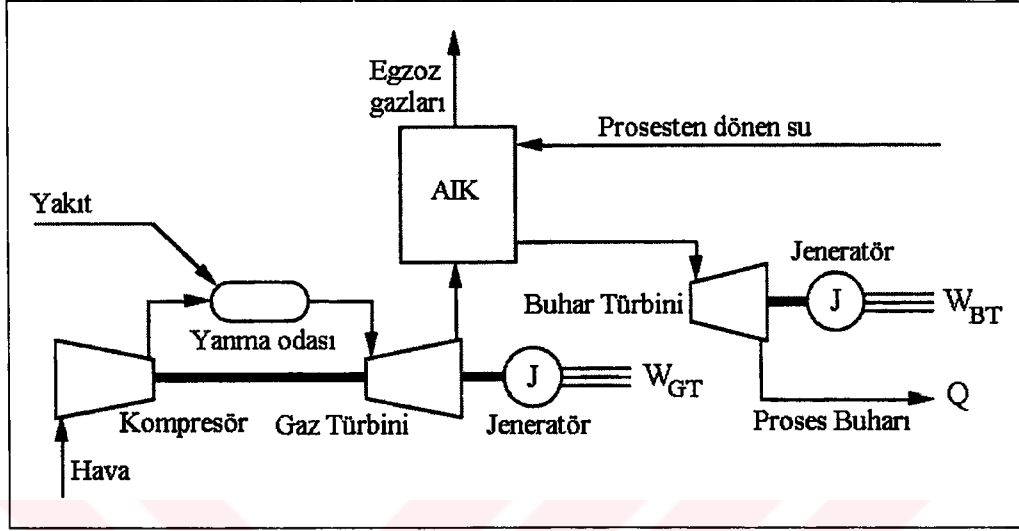
3.2.4 Kombine Çevrimler

Kombine çevrim terimi, bir iş akışkanı ile birbirine bağlı farklı sıcaklık derecelerinde iki termodinamik çevrimden oluşan sistem için kullanılır. Yüksek sıcaklıktaki çevrimden çıkan ısı, düşük sıcaklıktaki çevrim tarafından geri kazanılarak ek elektrik veya mekanik güç üretir. Böylece elektrik verimi artırılır.

Güç çıkışı 4 MW'tan büyük olan sistemlerde gaz türbini ve buhar türbini kombinasyonu kullanılabilir. Gaz türbini çevriminden çıkan egzoz gazları, buhar türbini için buhar üretmekte kullanılır. Bu sisteme kombine çevrim adı verilir. Gaz türbinli kombine çevrim sistemleri, doğal gazın çok olduğu yerlerde kurulabilirler. Kombine çevrimin kojenerasyon uygulamalarında buhar türbini çıkışındaki egzoz veya çekilen ara buhar ile proses için gerekli ısı sağlanır. Kombine çevrimli kojenerasyon santrallerinin en büyük avantajı, elektrik üretimindeki toplam veriminin daha önce anlatılan sistemlerin daha üzerinde olmasıdır. Bu yüzden bu tip santraller günümüzde en çok kullanılan santral tiplerindedir.

3.2.4.1 Brayton – Rankine Kombine Çevrim Sistemleri

En çok kullanılan kombine çevrim sistemleri, gaz türbini ve buhar türbini kullanılan kombine Brayton-Rankine çevrimi sistemleridir.



Şekil 3.8 Brayton-Rankine kombine çevrim sistemi şematik şekli

Elde edilebilecek buharın sıcaklığı, ek yanma olmadan, gaz türbininden çıkan egzoz gazlarının 25 ila 40°C altında olabilir. Buhar basıncı da 80 bar'a kadar çıkarılabilir. Eğer daha yüksek sıcaklık ve basınca ihtiyaç duyulursa atık ısı kazanında ek yakıt yakılır. Egzoz gazları içinde %15-16 oksijen bulunduğundan ek havaya ihtiyaç olmaz. Ek yanma ile buhar sıcaklığı 540°C'ye ve basıncı 100 bar'a ulaşabilir.

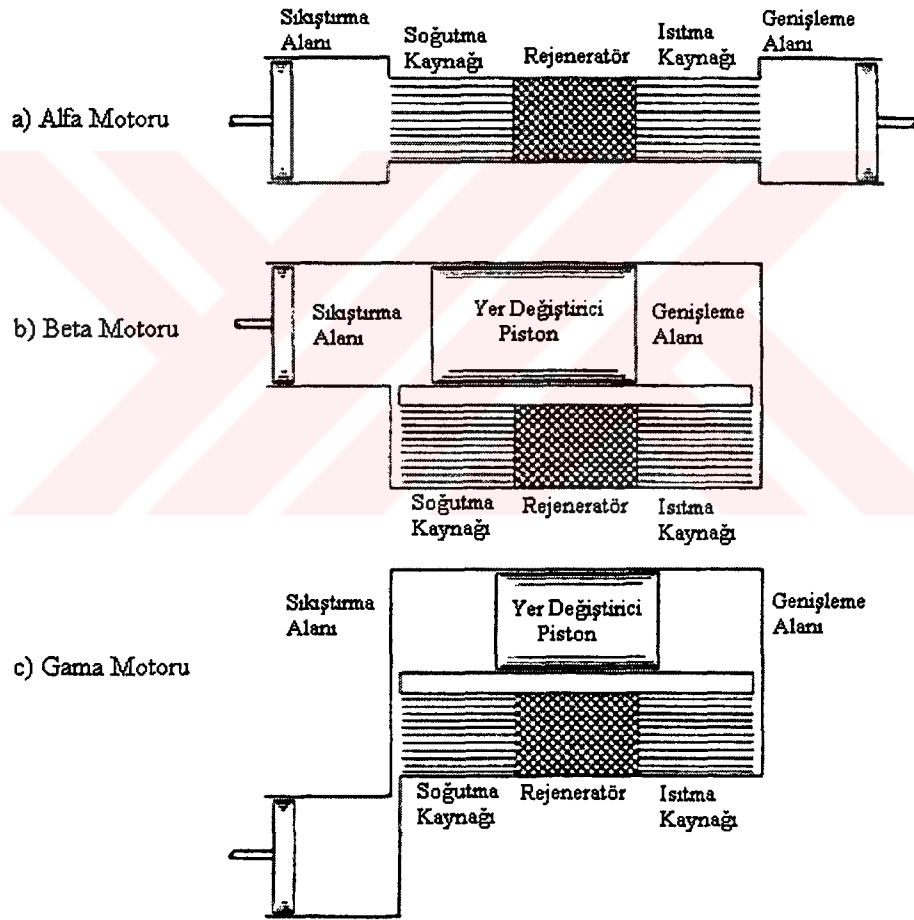
Sistemin elektrik verimi %35 ila %45, toplam verimi ise %70 ila % 88'dir. Elektrik ısı oranları 0.6 ila 2.0 arasındadır.

3.2.4.2 Dizel-Rankine Kombine Çevrim Sistemleri

Dizel çevrimi ile Rankine çevrimi de kombine olarak kullanılabilirler. Bağlantıları aynı gaz türbinli sistemde olduğu gibidir. Sadece gaz türbininin yerini bir dizel motoru almıştır. Orta ve yüksek güçteki motorlar, Rankine çevrimi ile ekonomik olarak daha iyi kombine edilirler. Bu sistemlerde atık ısı kazanında ek yanma yapılabilir. Fakat egzoz gazları içinde oksijen oranı düşük olduğu için taze hava ilavesi yapılmalıdır.

3.2.5 Stirling Motorları

Stirling motoru, bir dıştan yanmalı makinadır. Bu yüzden yakıtın makinanın içinde yandığı tipik yanmalı santrallerden çok büyük farklılıklar gösterir. Stirling motoruna ısı bir dış ısı kaynağından, örneğin yanan bir gazdan, sağlanır. Bu ısı kaynağı, bir çalışma akışkanının (helyum gibi) genişlemesini sağlar. Genişleyen akışkan, iki pistondan birinin silindir içinde hareket etmesini sağlar. Bu pistonu güç pistonu denir. Yer değiştirici denilen ikinci piston, güç pistonunun sıkıştıracağı gazı soğuk ortama transfer eder. Daha sonra yer değiştirici piston sıkıştırılmış gazı sıcak bölgeye transfer eder ve çevrim devam eder. Stirling motorları Alfa, Beta ve Gama olarak sınıflandırılırlar.



Şekil 3.9 Stirling motorlarının sınıflandırılması

Stirling motorlarının tipik motorlara göre, hareket eden daha az elemanı vardır. Stirling motorlarında valfler, yakıt enjektörleri veya kıvılcım ateşlemeli sistemler yoktur. Bu yüzden normal motorlara göre daha sessizdirler. Stirling motorlarının emisyonlarında nitrojen oksitler ve yanmamış hidrokarbonlar çok düşüktür. Bu makinaların verimleri, içten yanmalı motorlara ve gaz türbinlerine göre daha yüksektir.

Bu teknoloji, 60 yıldan daha fazla bir süredir olmasına rağmen, yeni olan mikro kojenerasyon kazanlarıdır. Bu tip kazanlar için, kapasitesi 0.2 ila 4 kW arasında olan küçük bir motora ihtiyaç vardır. Stirling motorları uygun bir alternatif oluştururken gaz türbinleri hatta gaz motorları bu kapasite için uygun olmamaktadırlar. Stirling motorlarının pek çok avantajı vardır. Bunlardan birkaçını şöyle sıralayabiliriz: Düşük sürtünmeli az sayıda hareketli eleman, ekstra bir kazana ihtiyaç olmaması, iç yanma odasına ihtiyaç olmaması ve yüksek teorik verim. Ayrıca dışta yapılan yanma çok temiz egzoz oluşturur ve sıcak tarafın sıcaklığı değiştirilerek elektrik çıkışını kontrol edilebilme olanağı sağlar. Böylece ısı talebine bağlı olmaksızın elektrik üretim miktarı değiştirilebilir.

3.2.6 Mikrotürbinler

Gaz türbini sistemleri, 1MW'ın altındaki sistemlerde genelde ekonomik gözükmemektedir. Fakat günümüzde bu anlayış değişmektedir. İmalatçılar gittikçe küçülen sistemler geliştirmektedirler ve günümüzde 25 kW'lık mikrotürbinler de mevcuttur. Mikrotürbinler 25 kW ila 200 kW arasında güçler üretebilmektedirler. Mikrotürbinler, türbin, kompresör, jeneratör bulunduran, yüksek hızlı küçük santrallerdir. Şebekeye güç aktaran elektronik elemanlar dahil olmak üzere tüm parçalar tek bir shaft üzerine monte edilmiştir. Mikrotürbinlerin hareketli tek parçası vardır; hava yataklamaları kullanılır ve yağlayıcılara ihtiyaç duymaz. Yakıt olarak genellikle doğal gaz kullanılır. Fakat motorin, benzin ve diğer yüksek enerjili basit fosil yakıtlar da kullanılabilir.

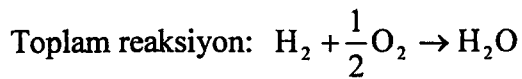
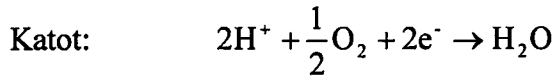
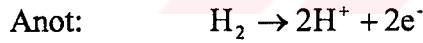
Mikrotürbinler tipik pistonlu motorlardan oldukça küçüktürler. Yatırım ve bakım masrafları da azdır. Çevresel avantajları da mevcuttur, emisyonlarında NO_x miktarı 10-25 ppm veya daha azdır. Mikrotürbinler, endüstriyel yapılarda, ticari yapılarda ve gelecekte konutlarda dahi güç üretiminde kullanılabilirler. Gelecekte mikrotürbinler ile yapılabilecekler arasında klasik kojenerasyon, atıklar ve biyoyakıtlar ile elektrik üretimi, yedek güç gibi uygulamalar bulunabilir.

3.2.7 Yakıt Hücreleri

İlk uygulandığı 1839 yılından beri yakıt hücrelerinin geliştirilmesi en zor teknolojik problemlerden biri olmuştur. Son 30-40 yıldan beri süren sistematik çalışmalar meyvelerini vermiş ve pek çok pilot santralde bu sistem kurulmuş ve işletilmiştir. Yakıt hücreleri şu an için çok pahalıdır. Fakat gelecekte elektrik üretimi ve kojenerasyon için kullanılması muhtemel bir sistemdir.

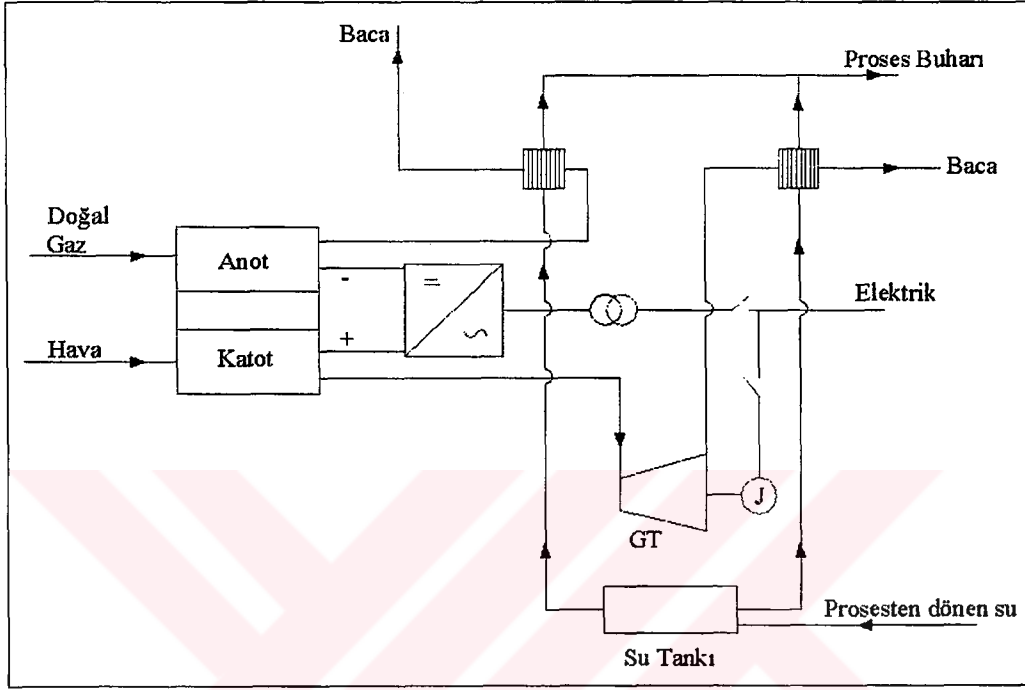
Yakıt hücreleri, oksijen ve hidrojenin kimyasal enerjilerini, gaz türbinleri veya motorlarda olan yanma veya mekanik iş olmadan, doğrudan elektriğe dönüştürürler. Yakıt hücrelerinde, yakıt ve oksidant (hava) sürekli olarak hücreye beslenir. Tüm yakıt hücrelerinin temelini hidrojenin oksidasyonu oluşturur. Yakıt olarak kullanılan hidrojen değişik kaynaklardan elde edilebilir. Bunlar: doğal gaz, propan, kömür ve biyokütle veya elektroliz için rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardır.

Yakıt hücreleri en basit formunda çalışma prensibi şöyledir: elektrolitin olduğu sistemde hidrojen ve oksijen reaksiyona girerek su oluşturur. Aynı anda elektrokimyasal gerilim oluşur ve bu gerilim dış devrede bir elektrik akımının doğmasına yol açar. İki elektrotta gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar şöyledir:



Anotta, iyonlar ve elektronlar üretilir. İyonlar, elektrolitten geçerek katoda doğru hareket ederler. Elektronlar ise dış devreden geçerek katoda doğru hareket ederler. Reaksiyon egzotermiktir. Ortaya çıkan ısı proseslerde kullanılabilir.

Tek bir hücre 1 Volt'a çok yakın bir gerilim üretir. İhtiyaç duyulan gerilimi sağlamak için gerekli sayıda hücre seri olarak bağlanır. İhtiyaç duyulan gücün sağlanması için ise hücrelerin paralel bağlanması gerekir. Üretilen akım doğru akımdır. Doğru akımı, uygun gerilim ve frekansta alternatif akıma dönüştürmek için bir transformatör kullanılır. Yakıt hücresi bir kojenerasyon sistemi Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Yakıt hücresi bir kojenerasyon sistemi örneği

Yakıt hücreleri, bölgesel kojenerasyon için yüksek performans ve çevresel avantajlar sunarlar: Hidrojen kaynağı olarak doğal gaz kullanılan yerlerde, emisyonlar yok denecek kadar azdır: 0.045 ppm NO_x, 2 ppm CO ve 4 ppm HC (Silveira, 2000). Düşük yüklerde yüksek verimlerle çalışırlar; az sayıda hareketli elemanları vardır ve yanma enerjisinin mekanik enerjiye çevrilmesinde ortaya çıkan kuvvetlere dayanıklı sistem elemanlarına ihtiyacı yoktur. Bu sebepten dolayı uzun servis zamanı aralıkları, düşük bakım masrafları ve böylece kesintiye uğramayan üretimleri nedeniyle güvenilir işletme imkanı sunarlar.

Tüm kojenerasyon sistemlerinin birbirleriyle karşılaştırılabilmesi için teknik karakteristikleri Çizelge 3.3'te, avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Kojenerasyon sistemlerinin teknik karakteristikleri

Sistem	Elektrik Gücü	Elektrik Verimi		Toplam Verim	Elektrik Isı Oranı
	MW	%100 Yük	%50 Yük	%	-
Buhar Türbini	0.5-100	14-35	12-28	60-85	0.1-0.5
Açık Çevrimli Gaz Türbini	1-100	25-40	18-30	60-80	0.5-0.8
Kapalı Çevrimli Gaz Türbini	1-50	30-35	30-35	60-80	0.5-0.8
Brayton-Rankine Kombine Çevrimi	4-100	35-45	25-35	70-88	0.6-2.0
Dizel Motor	0.07-50	35-45	32-40	60-85	0.8-2.4
Patlamalı Motor	0.015-2	27-40	25-35	60-80	0.5-0.7
Yakıt Hücresi	0.04-50	37-45	37-45	85-90	0.8-1.0
Stirling Motoru	0.003-1.5	35-50	34-49	60-80	1.2-1.7

Çizelge 3.4 Kojenerasyon sistemlerinin avantajları ve dezavantajları

	Avantajları	Dezavantajları
Buhar Türbinleri	Yüksek toplam verim; Her türlü yakıt kullanılabilir; Değişken şartlar için ısı güç oranı değiştirilebilir; Farklı ısı seviyeleri elde edilebilir; Geniş boyut seçenekleri; Uzun çalışma ömrü.	Yüksek ısı güç oranları; Yüksek masraf; Yavaş çalışmaya başlama.
Gaz Türbinleri	Kesintisiz uzun süreli çalışma sonucu yüksek güvenilirlik; Yüksek seviyede ısı elde edilebilir; Elektrik çıkışının kontrolü; Yüksek güç ısı oranı; Soğutma suyu ihtiyacı yok; Düşük yatırım maliyeti (\$/kW) Kullanılabilen yakıt çeşitliliği; Düşük emisyonlar.	Çıkış gücüne göre sınırlı seçenek; Pistonlu motorlara göre daha düşük mekanik verim; Gaz yakılıyorsa yüksek basınç ihtiyacı; Yüksek gürültü seviyesi; Düşük yükte düşük verim; Sadece temiz yakıtlar kullanılır; Uzun bakım süresi.
Pistonlu Motorlar	Geniş yük aralığında yüksek verim; Düşük yatırım maliyeti(\$/kW) 15 kW'tan başlayan geniş boyut seçenekleri; Yüke kolay uyum sağlama; Çabuk çalışmaya başlama (15 sn.'de tam yük); Normal operatörler ile bakım yapılabilme; Küçük boyutlarda düşük maliyet; Düşük basınçta gaz ile çalışabilme.	Soğutulması şarttır; Düşük güç ısı oranı; Çalışmada oluşan dengesiz kuvvetler; Yüksek seviyede düşük frekanslı ses; Yüksek bakım masrafları
Stirling Motorları	Teknik avantajlar: Yüksek güç aralığında tecrübe; Düşük sürtünme ile hareket eden az sayıda parça; İç yanma odasına gerek yok; Yüksek teorik verim. Mikro kojenerasyon avantajları: Isı üretiminden bağımsız elektrik üretimi; Çok düşük emisyonlar; Kolay kontrol.	Düşük güç aralığında az tecrübe; Düşük shaft verimi; Pahalı sistem.

	Avantajları	Dezavantajları
Mikro Türbinler	Hareket eden az sayıda parçadan dolayı yüksek güvenilirlik; Kolay kurulum; Düşük bakım ihtiyacı; Küçük boyut; Hafif yapı; Düşük gürültü seviyesi; Düşük emisyonlar; Isı geri kazanımı için yüksek egzoz sıcaklığı; Kabul edilebilir güç kalitesi.	Maliyetler.
Yakıt Hücreleri	Düşük emisyonlar; Düşük gürültü seviyesi; Yük aralıklarında yüksek verim; Kısa kurulum süresi; Yük değişimlerine uyum sağlama; Esnek ısı güç oranı; Yakıt hücresi tipine bağlı olarak düşük veya yüksek seviyede ısı.	Maliyetler; Yavaş çalışmaya başlama; Sıvı elektrolitlerin korozyonu.

3.3 Atık Isı Geri Kazanım Üniteleri

Atık ısı kazanı, kojenerasyon sisteminin temel elemanlarından biridir. Gaz türbinlerinin veya pistonlu motorların egzoz gazlarının ısını geri kazanır. En basit tipi, içinden geçen egzoz gazlarının ısılarını besleme suyuna aktardıkları ısı değiştirgecidir. Soğuyan gazlar egzoz borusuna veya bacaya geçerler ve atmosfere atılırlar.

Atmosfere atılan egzoz gazları önemli miktarda ısı içermelerine rağmen zorunlu olarak tüm ısı geri kazanılamaz. Bunun nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Etkili bir ısı transferinin sağlanabilmesi için egzoz gazlarının sıcaklığı, ısı aktarılacak sıvının sıcaklığından bir miktar yüksek olmalıdır. Pratikte minimum sıcaklık farkı 30 °C 'dir.
- Egzoz gazları, atmosfere atılma noktalarından her türlü hava koşulunda dağılabilmek için yükselmesini engelleyecek sıcaklıkların altına soğutulmamalıdır.
- Egzoz gazları, asit yoğuşmasının başlayacağı sıcaklıkların altına soğutulmamalıdır. Bu risk, sülfür içeren fosil yakıtların yakıldığı durumlarda ortaya çıkar. Belli sıcaklıkların altına inildiğinde sülfürik asit yoğuşur.

- Su buharının gizli ısısının geri kazanılması için egzoz gazının sıcaklığının 100°C 'in altına indirilmesi gerekir. Bu noktada su buharı yoğuşarak sıvı hale geçecektir ve gizli ısısını atacaktır. Kazanlar bu işlemi verimli şekilde yapabilirler fakat daha önce belirtilen üç sakınca bu tekniğin uygulanmasını engellemektedir.

Atık ısı kazanınının (veya atık ısı geri kazanım ünitesi) tipik özelliklerinden biri yakıt yakan kazanlardan boyut olarak daha büyük olmasıdır. Bunun iki temel nedeni vardır:

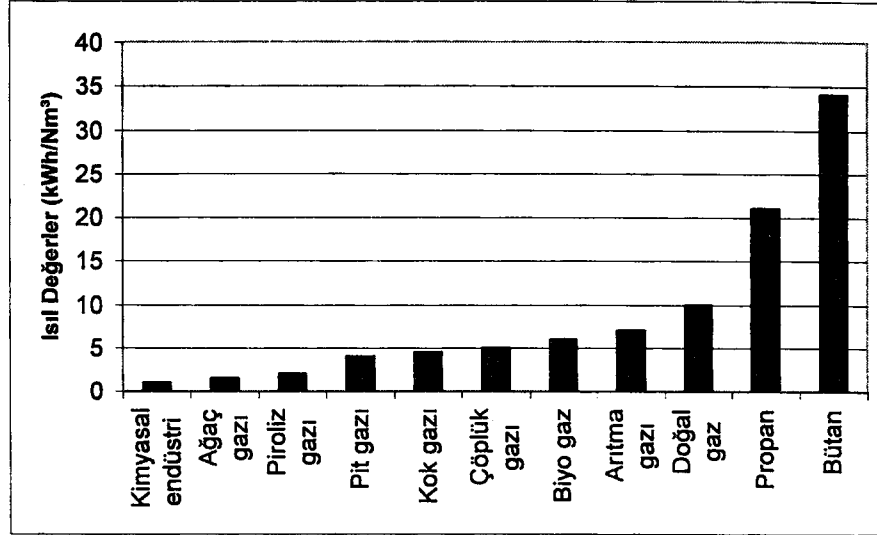
- Egzoz gazı sıcaklığı düştükçe ısı transfer alanı artmaktadır.
- Pratikte akış için sınırlamalar mevcuttur. Egzoz gazı akışında kazanda oluşacak yüksek bir akış direnci türbinin veya motorun çalışmasını da etkileyecektir.

Bu yüzden atık ısı kazanı şartları göz ardı edilemez. Bunun için türbin veya motorun oluşturacağı egzoz şartlarına göre dizayn edilmelidirler. Genelde uygulanan prosedür, kazan tedarikçisine egzoz gazı akışı bilgileri ve ne kadar miktarda ısının, basınç ve sıcaklık şartları ile birlikte, geri kazanılması gerektiği bilgileri verilir. Kazan tedarikçisi bu bilgilere göre uygun kazanı sağlar.

3.4 Kojenerasyon Sistemlerinde Kullanılan Yakıtlar

Güç makinası tipine uygun olarak hemen hemen tüm yakıtlar kojenerasyon sistemlerinde kullanılabilir. 0.54 kWh/Nm^3 lük bir ısıl değere sahip, düşük metan sayılı, kimyasal endüstriden elde edilen gazlardan, 34 kWh/Nm^3 lük bir ısıl değere sahip bütana kadar birçok yakıt kullanmak olasıdır. Pratikte, fosil yakıtlar, özellikle doğal gaz yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yakıt türlerinden bazı örnekler ve ısıl değerleri Şekil 3.11'de görülmektedir.

Yakıtın seçiminde, yakıtın kalitesi ve devletin yaptığı teşvikler önemli faktörlerdir. Bazı ülkeler, doğal gaz, biyokütle veya biyogaz gibi yüksek kaliteli yakıtları teşvik edici uygulamalar yaparlar. Düşük kaliteli yakıtlar ucuz olmalarına rağmen, kullanılmaları, yakılmaları ve çevre yönetmeliklerine uygun olma gereksinimleri ekstra masraflar ortaya çıkarır. Yakıtlar katı, sıvı veya gaz olabilirler. Bu yakıtlar ayrıca ticari veya atık olabilirler. Ticari yakıtlar, kimyasal işlemlerden geçmiş veya rafine edilmiş ve ülke çapında satılan fosil yakıtlardır. Atık yakıtlar, üretim işlemlerinde ortaya çıkan atıklardır.



Şekil 3.11 Yakıt türleri ve ısıl değerleri

• Ticari Yakıtlar:

- Kömür: Kömür, uzun yıllardan beri kojenerasyon sistemlerinde kullanılmaktadır. Fakat kömür kullanan santrallerin boyutları, küçük endüstriyel kojenerasyon uygulamaları için uygun değildir. Kömür kullanan santrallerin çoğu eski, verimsiz ve çevreyi kirleticidir.

- Hafif veya ağır fuel oil

- Motorin

- Doğal gaz: Doğal gaz, 1980'lerden beri güç üretiminde giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun sebepleri, ucuzluğu, kullanım esnekliği ve diğer yakıtlara göre daha düşük emisyon değerleridir.

- LPG

• Alternatif Yakıtlar:

- Katı: Alternatif katı yakıtlar için pek çok kaynak mevcuttur. Bunlara örnek olarak, mobilya üretiminden çıkan ağaç parçaları, ziraat ve ormancılıktan ortaya çıkan biyokütle ve atık tekerlekler sayılabilir.

- Sıvı: Kağıt yapımından kullanılan odunlardan çıkan sıvılar kullanılabilir.

- Gaz: Çöp ve kanalizasyon arıtma işlemlerinde oluşan organik reaksiyonlar ile ortaya çıkan biyogaz, kojenerasyon sistemlerinde yakıt olarak kullanılabilir. Ayrıca demir ve çelik üretiminden, kimyasal tesislerden ve rafinerilerden, prosesler sırasında ortaya çıkan gazlar da yakıt olarak kullanılabilir. Bu alternatif yakıtların avantajı, maliyetlerinin olmaması veya çok düşük olmasıdır. Buna karşın, depolama ve kullanma, arıtma ve özel yakma ekipmanları ekstra masraflar ortaya çıkarmaktadır.

Kojenerasyon sistemi için gaz motoru kullanılan bir sistemde, yakıtın seçilmesinde en önemli faktörlerden biri vuruntu direncidir. Gazın vuruntu direncini “metan sayısı” belirler. Metan sayısının 100’e yakın veya üzerinde olması, sıkıştırma oranını yükseltme ve böylece mekanik verimi artırma olanağı sağlar. Çizelge 3.5’de bazı yakıtların metan sayıları gösterilmiştir.

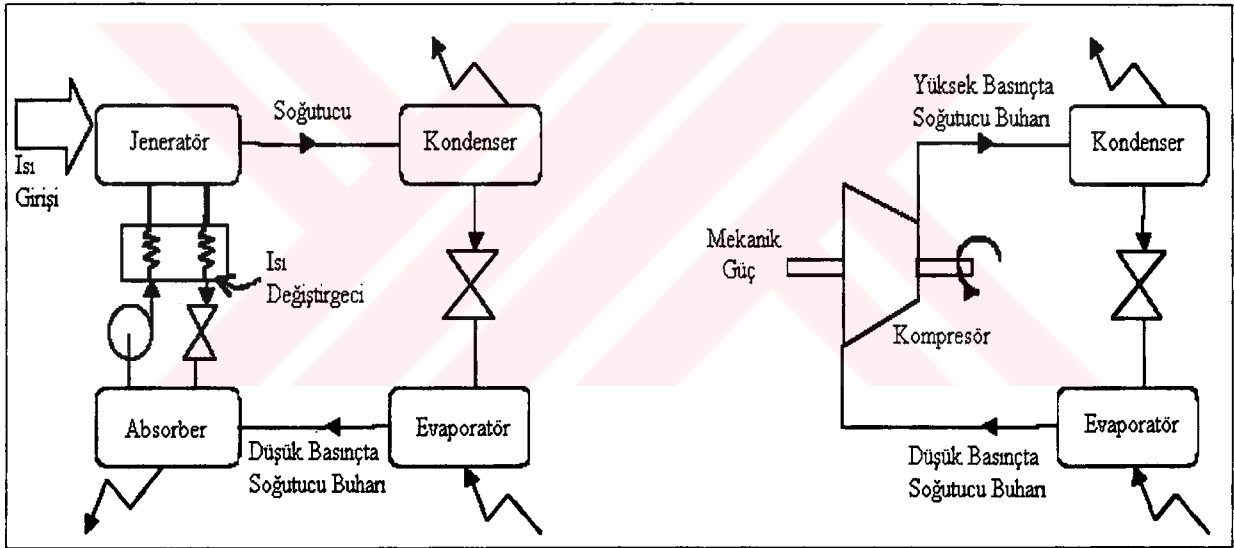
Çizelge 3.5 Bazı yakıtların metan sayıları

Yakıt		Metan Sayısı
Tipi	Bileşimi	
Hidrojen	H ₂	0
Metan	CH ₄	100
Etilen	C ₂ H ₄	15
Etan	C ₂ H ₆	43.7
Propilen	C ₃ H ₆	18.6
Propan	C ₃ H ₈	33
Bütan	C ₄ H ₁₀	10
Karbon monoksit	CO	75
Doğal gaz	CH ₄ %88.5 C ₂ H ₆ %4.7 C ₃ H ₆ %1.6 C ₄ H ₁₀ %0.2 N ₂ %5.0	72-98
Kanalizasyon gazı	CH ₄ %65 CO ₂ %35	134
Çöplük gazı	CH ₄ %50 CO ₂ %40 N ₂ %10	136

4. ABSORPSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMLERİ

4.1 Absorpsiyonlu Soğutma Sistemlerinin Çalışma Prensibi

Absorpsiyonlu soğutma çevrimleri, iki akışkan ve bir miktar ısı ile soğutma elde eden çevrimlerdir. Absorpsiyonlu soğutma çevrimleri, buhar sıkıştırımlı çevrimler ile oldukça benzerdir. Buhar sıkıştırımlı ve absorpsiyonlu soğutma çevrimlerinin her ikisinde de soğutulacak ortamdan ısının çekilmesi, düşük basınçtaki soğutucunun buharlaşması ile sağlanır ve bu ısının dışarıya atılması yüksek basınçtaki soğutucunun yoğuşması ile sağlanır. İki sistem arasındaki fark, soğutucu akışkan buharının yoğuşturulmasında yatmaktadır. Buhar sıkıştırımlı sistemde evaporatörden gelen soğutucu akışkan buharının yoğuşturulmasında kompresör ve kondenser kullanılmaktadır. Absorpsiyonlu sistemde ise kondenser kullanılmasına rağmen kompresörün yerini bir absorber-jeneratör kombinasyonu almıştır.



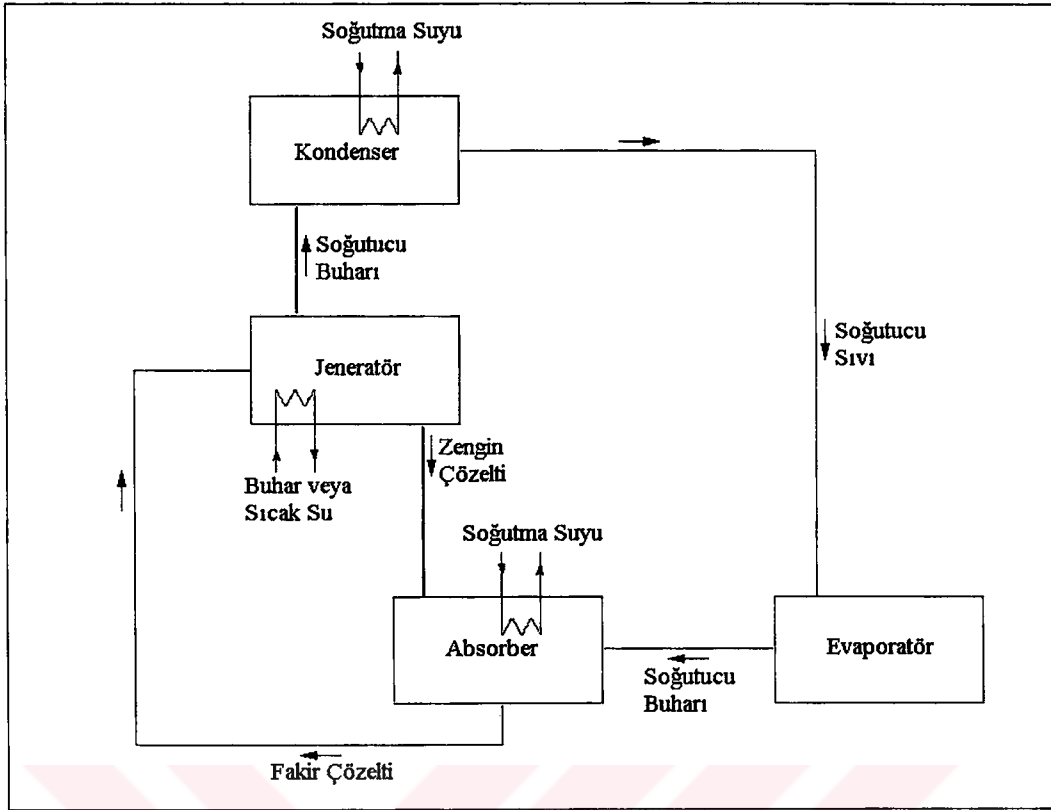
Şekil 4.1 Absorpsiyonlu ve buhar sıkıştırımlı soğutma sistemlerinin şematik gösterimi

Buhar sıkıştırımlı sistemde, soğutulacak ortamdan gizli ısısını alan soğutucu akışkan evaporatörde buharlaşır ve kompresörün yarattığı emme bu buharı evaporatörden çeker. Kompresör soğutucu akışkan buharını sıkıştırır ve yüksek basınçlı buharın sıvı hale dönüşeceği kondensere gönderir. Buradan görüleceği gibi üç temel bileşen kullanılmaktadır. Bunlar evaporatör, kondenser ve kompresördür. Kompresör buharı emer, sıkıştırır ve kondensere basar. Buradan kompresörün bir emme tarafı ve basma tarafı olduğu görülmektedir.

Absorpsiyonlu sistemde de buhar sıkıştırılmalı sistemdeki aynı işlevleri gerçekleştiren evaporatör ve kondenser bulunmaktadır. Kompresörün emme tarafının işlevi absorber tarafından, basma tarafının işlevi jeneratör tarafından gerçekleştirilmektedir.

Absorpsiyonlu sistemde kullanılan soğutucu akışkanın buharının çözüldüğü diğer bir sıvıya veya çözeltiliye absorbent denir. Absorbent buharlaşabilir olmamalıdır. Soğutucu akışkanın bulunduğu kısım ile absorbentin bulunduğu kısım birbirlerine bağlantılıdır. Soğutucu akışkan evaporatörde buharlaşır. Absorbentin soğutucu akışkana olan yüksek ilgisinden dolayı absorberde bulunan absorbent tarafından absorbe edilir. Bu durumda evaporatörde düşen buhar basıncı, soğutucu sıvının sürekli şekilde buharlaşmasına izin verir ve sürekli soğutma sağlanır. Buradan görüleceği gibi buhar sıkıştırılmalı sistemdeki kompresörün emme tarafının evaporatörden soğutucu buharını çekerek düşük buhar basıncı yaratarak akışkanın sürekli olarak buharlaşmasını ve sürekli soğutmaya sağlama işini absorbent yapmaktadır. Soğutucu buharını emen ve absorbe eden absorbent, jeneratöre gönderilir. Jeneratöre gelen çözeltili (absorbent) bir dış etki ile ısıtılır. Isıtma ile birlikte çözeltideki soğutucu buharı çözeltiden ayrılır ve yoğuşacağı yer olan kondensere geçer. Buradan görülmektedir ki jeneratör kompresörün basma tarafının işlevini yapmaktadır. Kondenserden çıkan soğutucu sıvı evaporatöre gider ve soğutma çevrimi tamamlanır (Şekil 4.2). Jeneratörde absorbent ile soğutucu buharını ayırmak için bir ısı gereklidir. Buradan da anlaşılacağı gibi absorpsiyonlu sistem için gerekli olan buhar ve sıcak su şeklindeki bir ısı kaynağıdır. Buhar sıkıştırılmalı sistemde ise kompresörü çalıştırmak için mekanik enerji gerekmektedir. Mekanik enerji de ısı ile üretilmektedir. Örneğin elektrik motoru için gerekli olan elektrik enerjisi bir buhar motoru veya içten yanmalı bir motor ile elde edilmiş olabilir. Absorpsiyonlu makinalarda ise ısı enerjisi doğrudan kullanılmaktadır.

Buhar sıkıştırılmalı çevrimde olduğu gibi soğutucu buharının sıvı hale geçmesi için kondenserde gizli ısını alacak hava veya su gibi soğutma ortamına ihtiyaç vardır. Ayrıca absorberdeki çözeltilinin soğutulması için de bir soğutma ortamı gerekmektedir. Bunun sebebi evaporatörden gelen soğutucu buharı, absorbentte çözünürken, buharlaşma gizli ısını uzaklaştırılmalıdır ve absorpsiyon ısı denilen ısının da uzaklaştırılması gerekmektedir. Buradan görüleceği gibi absorpsiyonlu sistem buhar sıkıştırılmalı sisteme göre daha fazla soğutucuya (su veya hava) ihtiyaç duyar. Bundan dolayı absorpsiyonlu sisteminin soğutma kulesi kapasitesi aynı kapasitedeki buhar sıkıştırılmalı sisteminkinden daha yüksek olmalıdır (Dossat, 1997).



Şekil 4.2 Absorpsiyonlu soğutma sisteminin şematik gösterimi

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi absorbentin ve soğutucunun gidiş yolları farklılık göstermektedir. Soğutucu jeneratörden kondansere, kondanserden evaporatöre, evaporatörden absorber ve çözelti ile birlikte jeneratöre gitmektedir. Absorbent ise absorberden jeneratöre ve sonra absorber geri dönmektedir. Jeneratörden dönen çözelti sıcaktır ve absorber sıcaklığına soğutulmalıdır. Bunun için jeneratörden dönen çözeltinin ısısının, absorberden jeneratöre giden çözeltiliye verilebilmesi için araya bir ısı değiştirgeci eklenir.

4.2 Soğutucu – Absorbent Kombinasyonları

Absorpsiyonlu soğutma sistemleri için kullanılacak soğutucu-absorbent kombinasyonları için belirli kriterler mevcuttur (ASHRAE, 1996).

1. Katı fazın olmaması. Göz önüne alınan sıcaklık ve derişiklik aralıklarında, hiçbir zaman soğutucu absorbent çifti katı fazda olmamalıdır. Herhangi bir yerde katılaşma olduğu takdirde, burada akış duracağından buradaki cihazın devre dışı kalmasına neden olacaktır.
2. Buharlaşma oranı. Soğutucu akışkan, absorbente göre çok daha kolayca buharlaşabilmelidir. Bu şekilde iki akışkan kolaylıkla birbirinden ayrılabilir.

3. Birleşme eğilimi. Absorbent, absorpsiyonun olduğu şartlarda soğutucu akışkanla kuvvetli bir birleşme eğiliminde olmalıdır. Bu eğilim, sistemde devredeki absorbent miktarını azaltır ve dolayısıyla ısı değiştirici boyutlarını küçültür.
4. Basınç. Sistemdeki işletme basınçları normal seviyelerde olmalıdır. Yüksek basınçlar kalın cihazlar gerektirir ve akışkanın pompalanması için önemli elektrik gücüne ihtiyaç doğurur. Alçak basınçlar (vakum) ise büyük hacimli cihazları ve soğutucu akışkan buharlarının basınç düşümü için özel elemanları gerektirir.
5. Kararlılık. Sistemdeki akışkanların yıllarca görev yapabilmesi ve zamanla özelliklerinin değişmemeleri için, devrede kullanılan akışkanların mutlak anlamda karalı olması istenir.
6. Korozyon. Kararsızlık sonucunda akışkanlar veya çeşitli maddeler, konstrüksiyonda kullanılan malzemeleri aşındırabilir. Olumsuz etkileri azaltabilmek için devrede korozyon önleyici maddeler kullanılmalıdır.
7. Emniyet. Konutlarda kullanılan soğutma devrelerinde akışkanlar, zehirsiz ve yanmaz olmalıdır. Endüstriyel kullanımlarda bu şart fazla önemli değildir.
8. Taşınım özellikleri. Soğutucu akışkanın ve absorbentin viskozite, yüzey gerilme, ısı yayılım katsayıları önemli karakteristik özellikleridir. Örnek olarak, akışkanın düşük viskoziteye sahip olması, ısı ve kütle geçişini iyileştirir ve pompalama problemlerini azaltır.
9. Gizli buharlaşma ısısı. Devrede dolaşan soğutucu ve absorbent miktarının en az değerde olabilmesi için, soğutucu akışkanın gizli buharlaşma ısısı büyük olmalıdır.

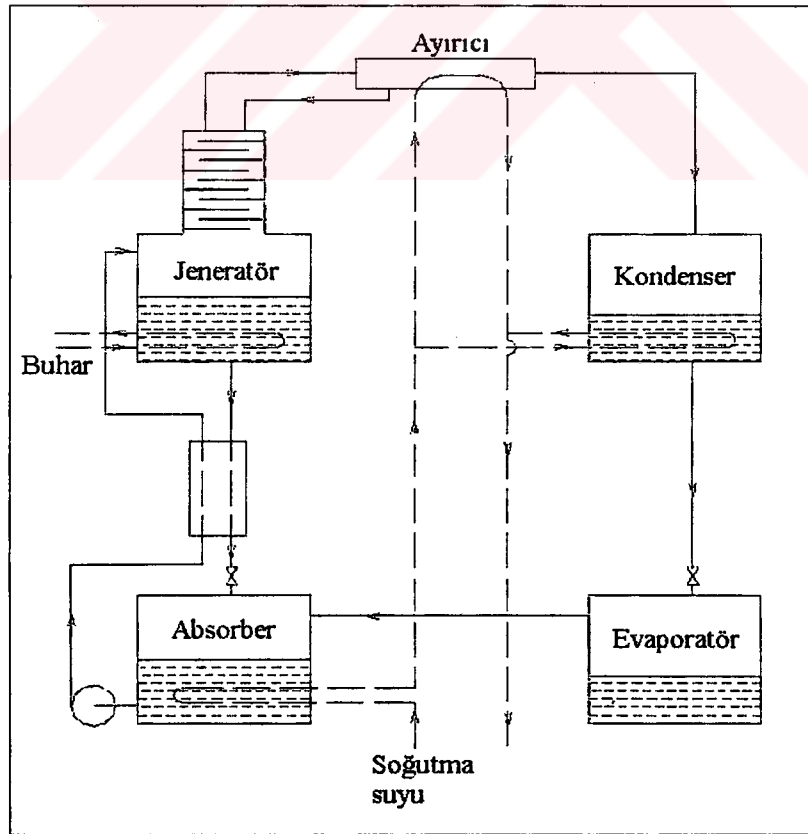
Genel olarak iki tip soğutucu-absorbent kombinasyonu kullanılmaktadır. Kullanımda olan en eski kombinasyon amonyak ve sudur. Burada amonyak soğutucu, su ise absorbenttir. Daha yeni bir kombinasyon ise su ve lityum bromittir. Bu kombinasyonda su soğutucu, lityum bromit absorbenttir.

4.2.1 Amonyak – Su Sistemleri

Amonyak-su sistemleri genel olarak sıcaklığın 0°C'den düşük olduğu iç mekan soğutucularında, ticari ve endüstriyel sistemlerde kullanılır. Amonyak-su kombinasyonu soğutma için önemli kriterleri sağlar fakat bazı noktalarda yetersiz kalır. Absorbent olan suyun amonyak buharına ilgisi çok yüksektir ve geniş işletme şartlarında karşılıklı olarak çözünebilirler.

Her iki akışkanın özellikleri yüksek oranda tutarlıdır ve soğutma sisteminde bulunan materyaller ile uyumludur. Amonyakın gizli ısı değeri yüksektir. Fakat amonyak toksik bir maddedir. Bu da klima uygulamalarında kullanımı sınırlar.

Amonyak-su sisteminin genel dezavantajı absorbent olan suyun büyük ölçüde buharlaşabilir olduğudur. Jeneratörden çıkan amonyak buharının içindeki su buharının kondensere geçmesine izin verilirse su kondenserdan evaporatöre geçer. Evaporatördeki su, sıcaklığı düşürür. Bu sebepten dolayı amonyak-su sisteminin verimi, jeneratörden çıkan karışımdaki su buharının kondensere ulaşmadan ayrılması için sisteme eklenen analizer ve ayırıcı ile artırılabilir. Şekil 4.3'de gösterildiği gibi analizer, jeneratörün tepesine monte edilen bir damıtma kolonudur. Amonyak ve su buharı jeneratörden çıkınca analizerden geçerler. Burada soğurlar ve daha yüksek doyma sıcaklığına sahip su buharı yoğunlaşır ve süzülerek jeneratöre geri döner. Bu esnada amonyak buharı yükselmeye devam eder ve analizeri terk eder. Amonyak buharı daha sonra ayırıcıya geçer. Burada geriye kalan su buharı ve az miktarda amonyak buharı yoğunlaşarak analizerde geri dönerler. Bu zayıf çözelti, analizerin görevini yerine getirmesi için gerekli bir unsurdur.



Şekil 4.3 Amonyak-Su sisteminin şematik gösterimi

4.2.2 Su – Lityum Bromit Sistemleri

Su - lityum bromit sistemleri genellikle klima ve diğerk yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar. Soğutucu akışkanın su olması sebebiyle bu sistemler 0°C'nin altındaki sıcaklıklar için uygun değildirler.

Lityum bromit hidroskopik bir tuzdur ve su ile oluşturduğu çözeltisinin su buharına ilgisi çok yüksektir. Su – lityum bromit kombinasyonunun bir dezavantajı sistemde oluşabilecek her işletme şartı için absorbent suda tam olarak çözünmeyebilir. Ayrıca absorbent kristalizasyonunu ve çökmesini engellemek için sistemin dizaynında ve işletme şartlarında önlemler alınmalıdır.

Su – lityum bromit sistemlerinin başlıca avantajı absorbentin buharlaşamaz olduğudur. Böylece jeneratörü terk eden soğutucu akışkanın içinde soğutucu olmaz. Dolayısıyla sistemde analizer ve ayırıcıya ihtiyaç yoktur.

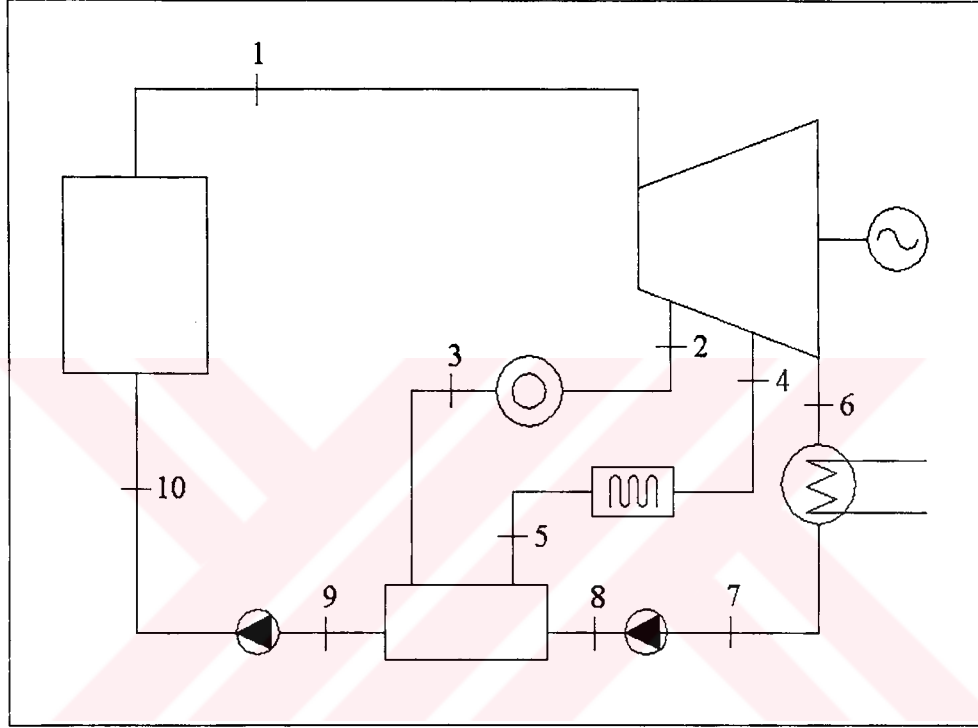
Suyun soğutucu akışkan olması sebebiyle işletme basıncı çok düşüktür. Örneğin 4,5°C'lik evaporatör sıcaklığı ve 38°C'lik kondenser sıcaklığı için evaporatördeki basınç yaklaşık 8,4 mbar, kondenserdeki basınç yaklaşık 65,4 mbar olmalıdır (Wang, 1993). Sistemin düşük ve yüksek basınç tarafları arasındaki basınç farkı küçük olduğu kullanımlar için düşük ve yüksek basınç tarafları arasındaki basınç düşürücü valflere ihtiyaç duyulmaz. Bunun sebebi bağlantı boruları ve sprej nozullarındaki basınç düşüşünün gerekli basınç farkının sağlayabilmesidir.

Absorbentin soğutucu buharını absorbe etme kabiliyeti, absorbentin bağıl konsantrasyonuna bağlıdır. Bu sebepten dolayı absorbent çözeltisinin konsantrasyonunun kontrolü, soğutma yüklerine göre sistem kapasitesinin değiştirilmesine imkan sağlar. Çözelti konsantrasyonunun kontrolü için kullanılan bazı metotlar vardır. Bunlar, üretece giden buhar veya sıcak suyun kontrolü, kondenser suyunun akışının kontrolü ve jeneratörden dönen zengin karışımın doğrudan kontrolüdür (Gordon ve Ng, 2000). Tipik bir LiBr – Su sistemi Şekil 4.4'de gösterilmiştir.

5. TRİJENERASYON SİSTEMLERİNİN TERMODİNAMİK İNCELENMESİ

5.1 Buhar Türbinli Trijenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Analizi

Buhar türbinli trijenerasyon sistemlerinde güç ihtiyacı buhar türbininden, ısı ve soğutma ihtiyacı buhar türbininden çekilen ara buhar ile sağlanır. Bu sistemin şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Buhar türbinli trijenerasyon sistemi

Sistem yararlanma oranı:

$$\eta_y = \frac{P_e + P_{qb} + P_{qs} - P_p}{P_y} \quad (5.1)$$

Üretilen elektrik gücü:

$$P_e = [\dot{m}_b(h_1 - h_2) + (\dot{m}_b - \dot{m}_1)(h_2 - h_4) + (\dot{m}_b - \dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_4 - h_6)] \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (5.2)$$

Isı gücü:

$$P_{qb} = \dot{m}_1(h_2 - h_3) \quad (5.3)$$

Soğutma gücü:

$$P_{qs} = \dot{m}_2(h_4 - h_5) \cdot \text{COP} \quad (5.4)$$

Kondenser yoğuşma suyu pompasının çektiği güç çok düşük olduğu için ihmal edersek, pompa gücü,

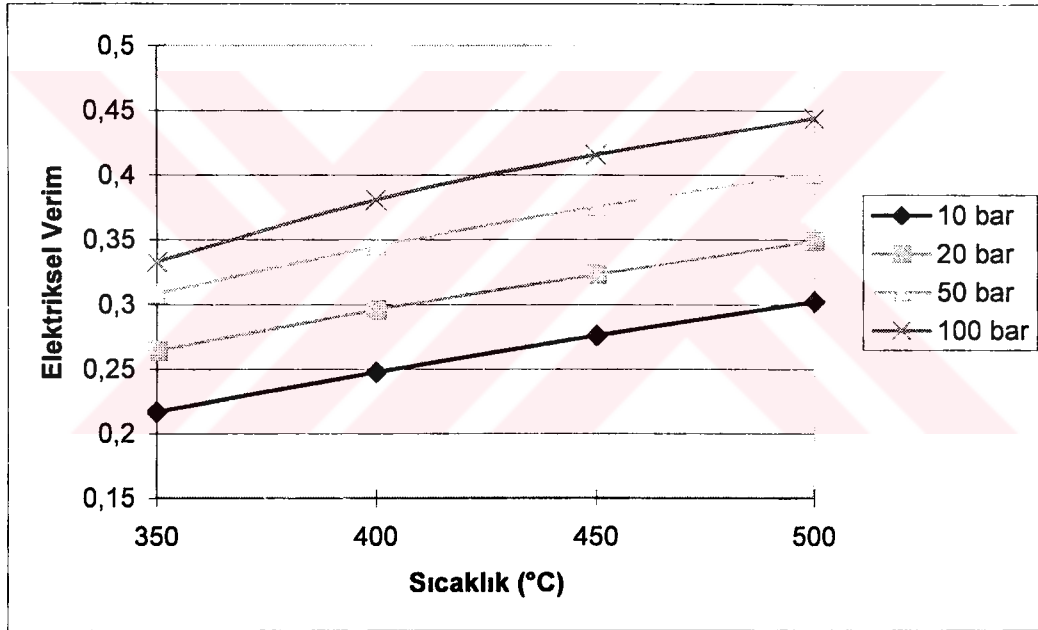
$$P_p = \dot{m}_b (h_{10} - h_9) / \eta_p \quad (5.5)$$

Yakıt gücü:

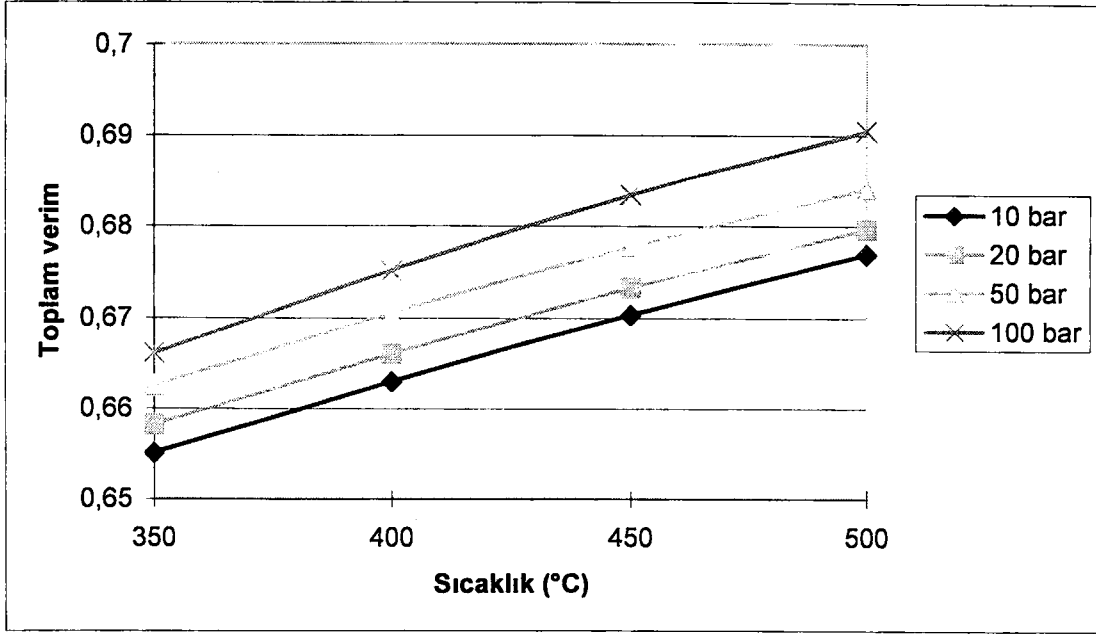
$$P_y = \dot{m}_b (h_1 - h_{10}) / \eta_k \quad (5.6)$$

Yararlanma oranı:

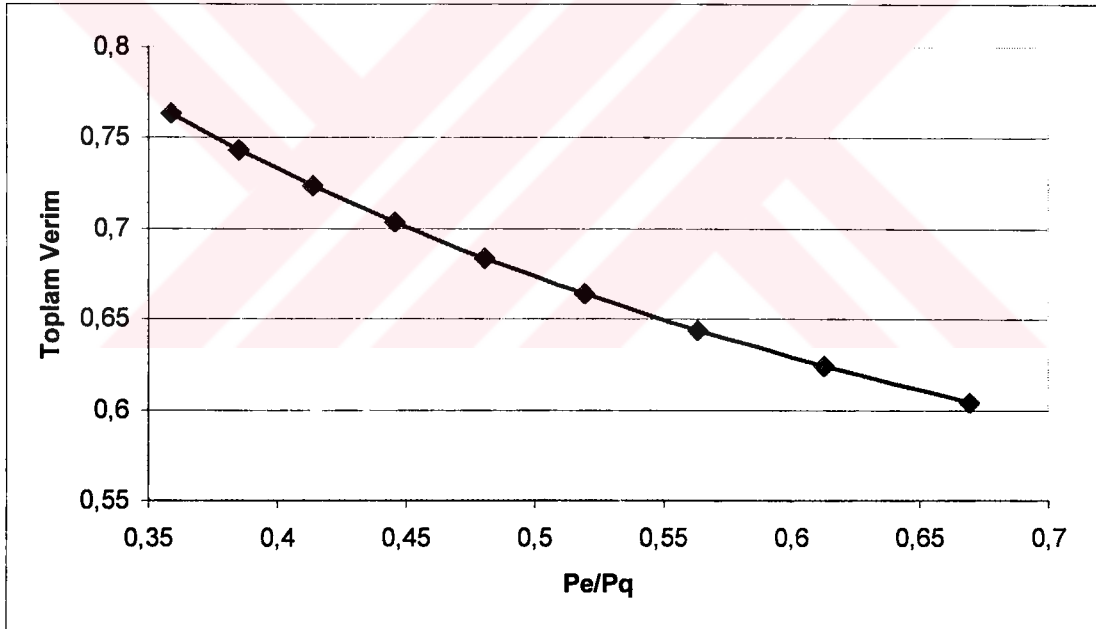
$$\eta_y = \frac{[\dot{m}_b (h_1 - h_2) + (\dot{m}_b - \dot{m}_1)(h_2 - h_4) + (\dot{m}_b - \dot{m}_1 - \dot{m}_2)(h_4 - h_6)] \cdot \eta_m \cdot \eta_g}{\dot{m}_b (h_1 - h_{10}) / \eta_k} + \frac{\dot{m}_1 (h_2 - h_3) + \dot{m}_2 (h_4 - h_5) \cdot \text{COP} - \dot{m}_b (h_{10} - h_9) / \eta_p}{\dot{m}_b (h_1 - h_{10}) / \eta_k} \quad (5.7)$$



Şekil 5.2 Buhar kazanı çıkış sıcaklığı ve basıncının elektriksel verime etkisi



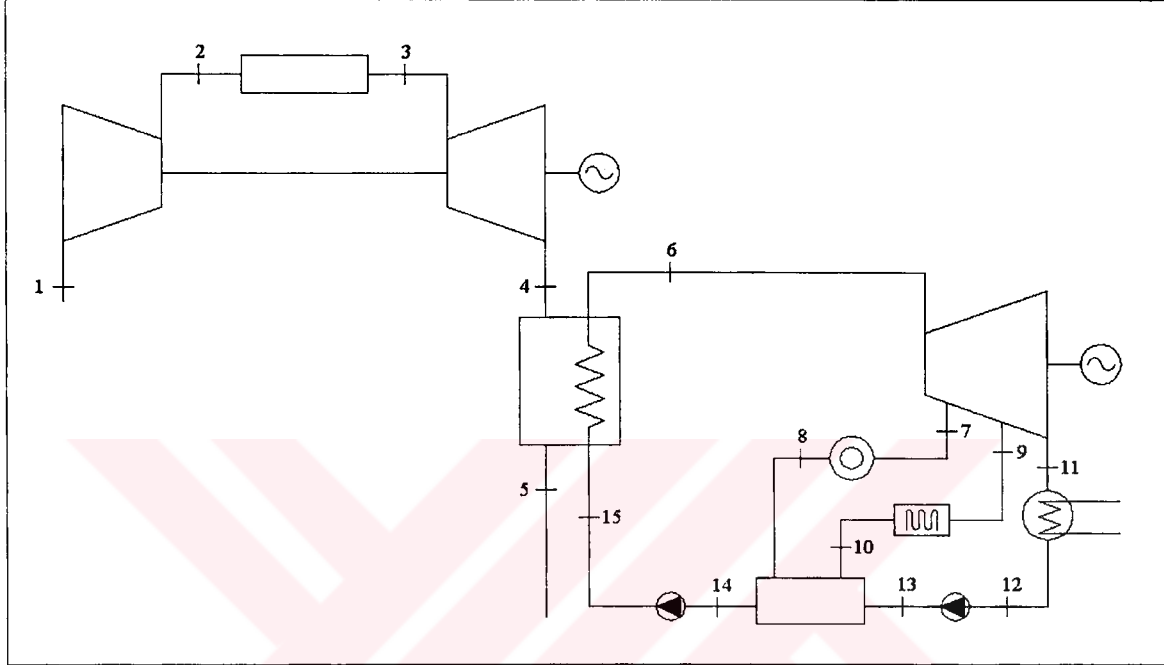
Şekil 5.3 Buhar kazanı çıkış sıcaklığı ve basıncının toplam verime etkisi



Şekil 5.4 P_e/P_q oranının toplam verime etkisi

5.2 Gaz Türbinli Trijenerasyon Sistemlerinin Termodinamik Analizi

Gaz türbinli trijenerasyon sistemlerinde, bir gaz türbini çevrimi ve bir buhar türbini çevrimi kombine olarak çalışır. Güç ihtiyacı gaz türbini ve buhar türbininden, ısı ve soğutma ihtiyacı buhar türbininden çekilen ara buhar ile sağlanır. Bu sistemin şeması Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Gaz türbinli trijenerasyon sistemi

Sistemi yararlanma oranı:

$$\eta_y = \frac{P_{GT} + P_{BT} + P_{qb} + P_{qs} - P_p}{P_y} \quad (5.8)$$

Gaz türbini gücü:

$$P_{GT} = C_{p_{mg}} (T_3 - T_4) - C_{p_{ma}} (T_2 - T_1) \quad (5.9)$$

$$\frac{T_{2i}}{T_1} = (P_2 / P_1)^{\frac{k-1}{k}} = Pr^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_{2i} = T_1 \cdot Pr^{\frac{k-1}{k}} \quad (5.10)$$

$$\eta_c = \frac{T_{2i} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{1}{\eta_c} (T_{2i} - T_1) \quad (5.11)$$

$$T_2 = T_1 \left[1 + \frac{1}{\eta_c} (Pr^{\frac{k-1}{k}} - 1) \right] \quad (5.12)$$

$$\frac{T_3}{T_{4i}} = (P_3 / P_4)^{\frac{k-1}{k}} = Pr^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_{4i} = \frac{T_3}{Pr^{\frac{k-1}{k}}} \quad (5.13)$$

$$\eta_t = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4i}} \Rightarrow T_4 = T_3 - \eta_t (T_3 - T_{4i}) \quad (5.14)$$

$$T_4 = T_3 \left[1 - \eta_t \left(1 - \frac{1}{Pr^k} \right) \right] \quad (5.15)$$

$$P_{GT} = C_{p_{mg}} \cdot T_3 \left[\eta_t \left(1 - \frac{1}{Pr^k} \right) \right] - C_{p_{ma}} \left[\frac{T_1}{\eta_c} (Pr^k - 1) \right] \quad (5.16)$$

Üretilen buhar miktarı:

$$m_B = \frac{C_{p_{mg}} (T_4 - T_5)}{h_6 - h_{15}} \quad (5.17)$$

$$P_{BT} = m_B (h_6 - h_7) + (m_B - m_1)(h_7 - h_9) + (m_B - m_1 - m_2)(h_9 - h_{11}) \quad (5.18)$$

$$P_{qb} = m_1 (h_7 - h_8) \quad (5.19)$$

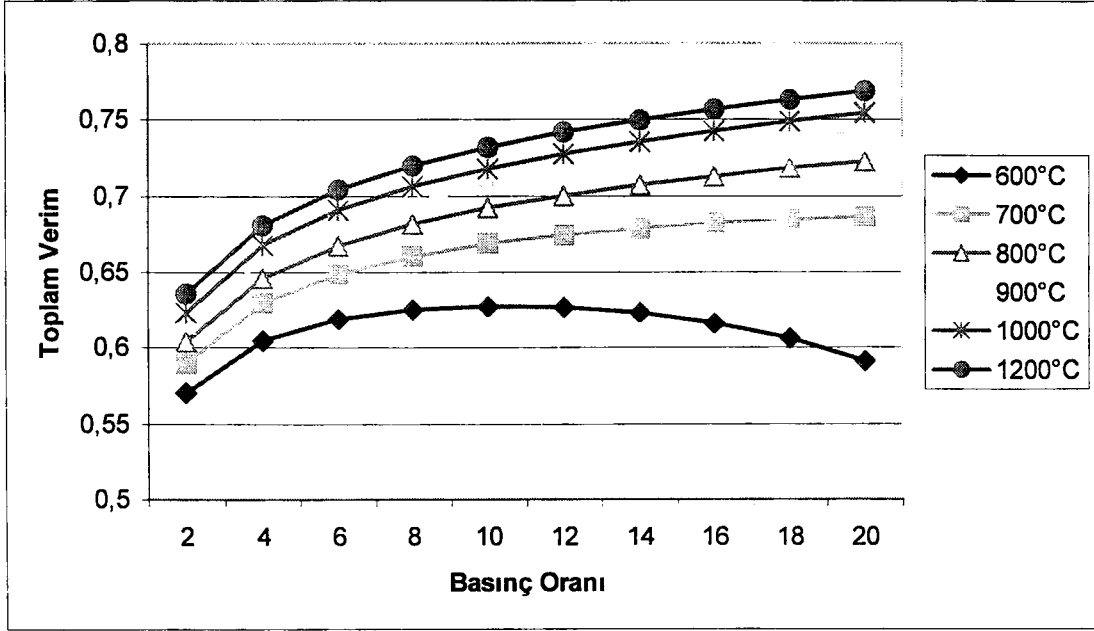
$$P_{qs} = m_2 (h_9 - h_{10}) \cdot COP \quad (5.20)$$

$$P_p = m_B (h_{15} - h_{14}) / \eta_p \quad (5.21)$$

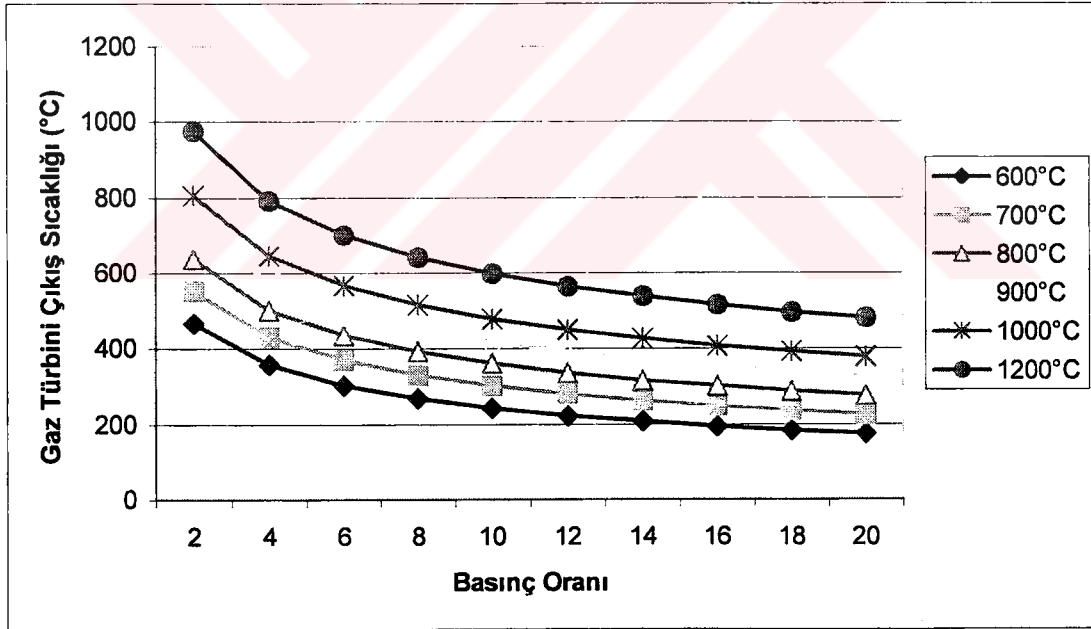
$$P_y = C_{p_{mg}} (T_3 - T_2) \cdot \eta_b \quad (5.22)$$

Yararlanma oranı:

$$\eta_y = \frac{[C_{p_{mg}} \cdot T_3 \left[\eta_t \left(1 - \frac{1}{Pr^k} \right) \right] - C_{p_{ma}} \left[\frac{T_1}{\eta_c} (Pr^k - 1) \right]] \cdot \eta_m \cdot \eta_g}{C_{p_{mg}} \left[T_3 - T_1 \left(1 + \frac{1}{\eta_c} (Pr^k - 1) \right) \right] \cdot \eta_b} + \frac{[m_B (h_6 - h_7) + (m_B - m_1)(h_7 - h_9) + (m_B - m_1 - m_2)(h_9 - h_{11})] \cdot \eta_m \cdot \eta_g}{C_{p_{mg}} \left[T_3 - T_1 \left(1 + \frac{1}{\eta_c} (Pr^k - 1) \right) \right] \cdot \eta_b} + \frac{m_1 (h_7 - h_8) + m_2 (h_9 - h_{10}) \cdot COP - m_B (h_{15} - h_{14}) / \eta_p}{C_{p_{mg}} \left[T_3 - T_1 \left(1 + \frac{1}{\eta_c} (Pr^k - 1) \right) \right] \cdot \eta_b} \quad (5.23)$$



Şekil 5.6 Toplam verimin T_3 ve basınç oranına göre değişimi

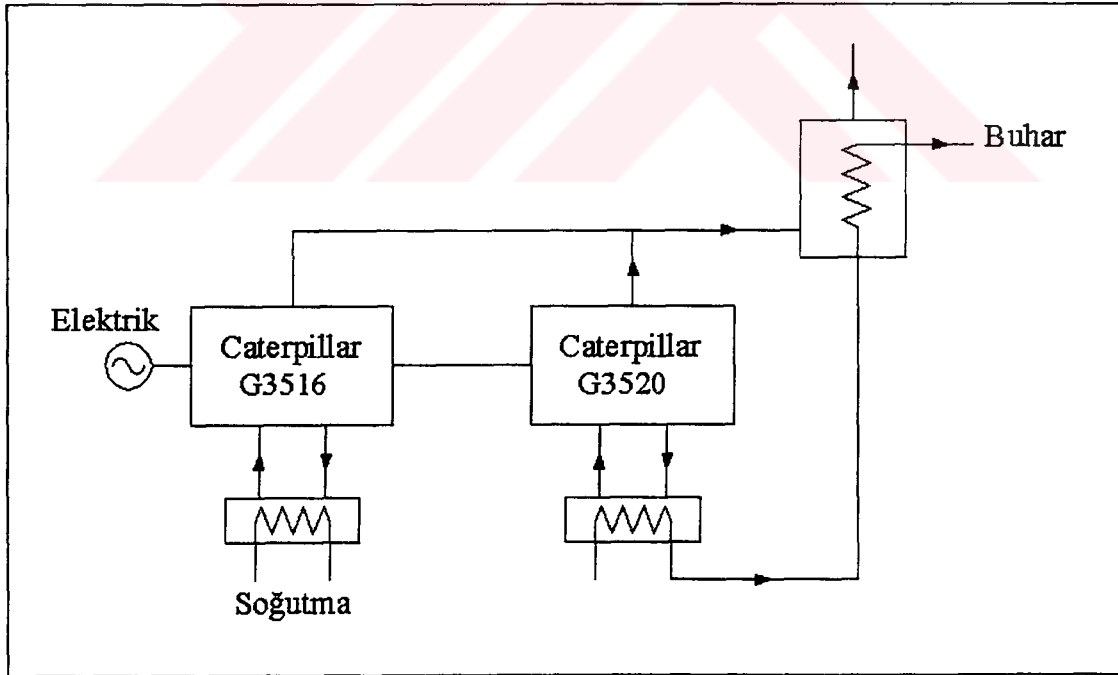


Şekil 5.7 Gaz türbini çıkış sıcaklığının, T_3 ve basınç oranına göre değişimi

6. BİR TRİJENERASYON SİSTEMİNİN İNCELENMESİ

Bu çalışma kapsamında trijenerasyon sisteminin uygulanması için Trakya Birlik Entegre Tesisleri seçilmiştir. Bu firma, ayçiçek tohumundan sıvı yağ ve margarin üretmektedir. Yağ üretim işlemleri için 14 MW'lık buhar gücüne ihtiyaç duymaktadır. Tesisin elektrik ihtiyacı 3 MW'tır. Üretilen margarinin depolanması için 350 kW soğutma yükü bulunmaktadır. Tesisin elektrik ihtiyacı şebekeden sağlanmaktadır. Soğuk hava deposunun soğutulması elektrik ile çalışan soğutma ünitelerinden sağlanmaktadır. Tesisin buhar ihtiyacı, kömür yakıtlı kazanlardan oluşmuş buhar santralinden sağlanmaktadır.

Bu değerler göz önüne alınarak, tesisin elektrik ihtiyacının gaz motorları ile sağlanması öngörülmüştür. Tesisin soğutma ihtiyacının, bir motorun soğutma suyunu ısı kaynağı olarak kullanan bir absorpsiyonlu soğutma sistemi ile sağlanması öngörülmüştür. Ayrıca gaz motorlarının egzoz gazlarındaki ısıdan yararlanılarak buhar ihtiyacının bir kısmının karşılanması öngörülmüştür. Bu sayede düşük verimde çalışan buhar santralinin kömür sarfiyatı azalacaktır. Uygulanacak sistemin şeması Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Trijenerasyon sisteminin şematik şekli

Sistemde kullanılacak gaz motorları için Caterpillar'ın G3520 ve G3516 modelleri seçilmiştir. Absorpsiyonlu soğutma sistemi için ise Mitsubishi marka, orta sıcak su ile tahrik edilen MSS-21B modeli seçilmiştir. Bu makinelerin teknik verileri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Sistemde kullanılan motorların teknik verileri

Model		G3516	G3520
Emisyon seviyesi (NO _x)	mg/Nm ³	250	250
Arka soğutucu, iki seviyeli	°C	92/54	82/32
Paket performansı	kW _e	1100	2016
Elektrik verimi	%	36,4	40,1
Yakıt sarfiyatı			
%100 yük	Nm ³ /h	306	501
%75 yük	Nm ³ /h	241	387
%50 yük	Nm ³ /h	172	269
Yükseklik yeteneği			
25°C çevre sıcaklığı	m	375	310
Soğutma sistemi			
Ceket suyu sıcaklığı	°C	99	90
Egzoz sistemi			
Yakma havası giriş debisi	Nm ³ /dak	93	149
Egzoz gazı sıcaklığı	°C	516	457
Egzoz gazı debisi	Nm ³ /dak	100	158
Egzoz flanşı boyutu (iç çap)	mm	305	300
Isı atımı			
Ceket suyuna atılan ısı	kW	624	1023
Egzozu atılan ısı	kW	921	1743
Atmosfere atılan ısı	kW	100	125
Emisyonlar			
NO _x @ %5 O ₂	mg/Nm ³	250	250
CO @ %5 O ₂	mg/Nm ³	940	957
HC (toplam) @ %5 O ₂	mg/Nm ³	2267	2540
HC (metan olmayan) @ %5 O ₂	mg/Nm ³	341	381
Egzoz O ₂	%	9	9,7

Çizelge 6.2 Sistemde kullanılan absorpsiyonlu soğutma sisteminin teknik verileri

MSS-21B	Soğutma kapasitesi	kW	362
Soğuk su	Debi	m ³ /h	62,3
	Basınç düşüşü	kPa	100
Soğutma suyu	Debi	m ³ /h	149,8
	Basınç düşüşü	kPa	88
Sıcak su	Giriş sıcaklığı	°C	88
	Çıkış sıcaklığı	°C	83
	Debi	m ³ /h	87,6
	Basınç düşüşü	kPa	6
Elektrik	Çözelti pompası	kW	1,2
	Soğutucu pompası	kW	0,75
	Vakum pompası	kW	0,2

6.1 Sistemin Ekonomik Analizi

	G3516	G3520
Güç	1.100 kW	2.016 kW
Yakıt Tüketimi	306 Nm ³ /h	501 Nm ³ /h
Motor Soğutma Suyu Isısı	624 kW	1.023 kW
Egzoz Gazlarının Isısı	921 kW	1.743 kW
Yıllık Çalışma Saati	8000	8000
Yakıt: Doğal Gaz		
Yakıt Birim Fiyatı	281.250 TL/Nm ³	281.250 TL/Nm ³
Yakıtın Alt Isıl Değeri	34.518 kJ/Nm ³	34.518 kJ/Nm ³
Yıllık Yakıt Tüketimi	2.448.000 Nm ³ /yıl	4.008.000 Nm ³ /yıl
Yıllık Elektrik Üretimi	8.800.000 kWh/yıl	16.128.000 kWh/yıl
1 kWh Elektrik Üretim Bedeli	78.239 TL/kWh 0,054 \$/kWh	69.894 TL/kWh 0,048 \$/kWh
Yıllık Toplam Yakıt Tüketimi	6.456.000 Nm ³ /yıl	
Yıllık Toplam Elektrik Üretimi	24.928.000 kWh/yıl	
1 kWh Elektrik Üretim Bedeli	72.840 TL/kWh 0,050 \$/kWh	
İlk Yatırım Giderleri, Gy		
Kojenerasyon Sistemi	1506207 \$	
Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi	300000 \$	
Toplam	1806207 \$	

KOJENERASYON SİSTEMİ**YAKIT:**

Yakıt Tüketimi	6.456.000 Nm ³ /yıl
Yıllık Yakıt Gideri	-1.252.241 \$/yıl

İŞLETME BAKIM (O&M):

Birim O&M	50 \$/kW.yıl
Toplam O&M Gideri	-155.800 \$/yıl

ABSORPSİYONLU SOĞUTMA SİSTEMİ**Elektrik:**

Elektrik İç Tüketim Miktarı	17.200 kWh/yıl
Elektrik İç Tüketim Gideri	1.282 \$/yıl
Soğutma İçin Satın Alınmayacak Elektrik	3.520.000 kWh/yıl
Soğutmadan Elde Edilen Kazanç	262.301 \$/yıl

ELEKTRİK

TEDAŞ'tan Satın Alınmayacak Elektrik	24.928.000 kWh/yıl
TEDAŞ Elektrik Satış Fiyatı	108.050 TL/kWh
	0,075 \$/kWh
Elektrikten Elde Edilen Kazanç	1.857.566 \$/yıl

ISI

Buhar Santralinde Üretilmeyecek Isı Miktarı	3.318 kWb
Yıllık Tasarruf Edilen Kömür Miktarı	7.631.400 kg/yıl
Kömür Fiyatı	65.000 TL/kg
	0,045 \$/kg
Isıdan Dolayı Yıllık Net Kazanç	342.097 \$/yıl

Toplam Tasarruf (Gi) 1.053.922 \$/yıl

6.2 Özgül Üretim Maliyetleri

Özgül elektrik üretim maliyeti

Sistemde amaç fonksiyon elektrik olduğunda oluşacak özgül elektrik üretim maliyeti Eşitlik 6.1 ile hesaplanır.

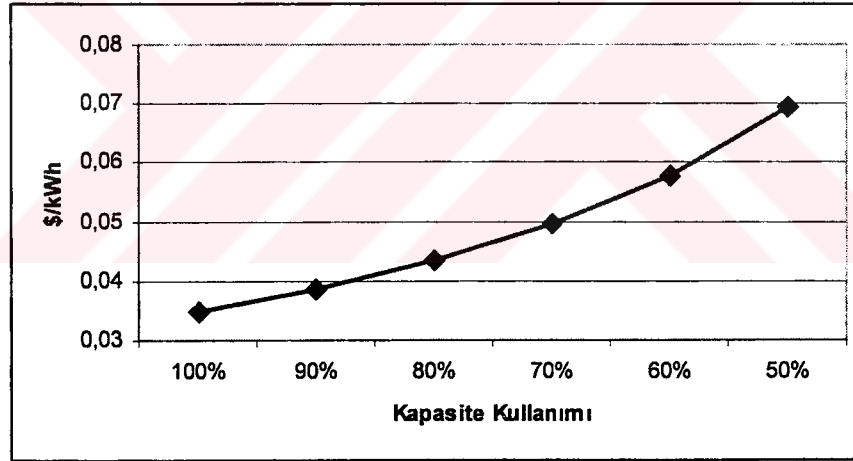
$$Y_E = \frac{\beta(C_T - C_B - C_S)}{\dot{E}.H} + \frac{M_T - M_B - M_S}{\dot{E}.H} + \frac{OM_T - OM_B - OM_S}{\dot{E}.H} \quad (6.1)$$

$$\beta = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6.2)$$

$i=5\%$ ve $n=30$ yıl ise $\beta = 0,065$

$$Y_E = \frac{0,065(1506207 - 20000 - 208000)}{3116.8000} + \frac{1252241 - 342097 - 262301}{3116.8000} + \frac{155800 - 2000 - 20000}{3116.8000}$$

$$Y_E = 0,0347 \text{ \$/kWh}$$



Şekil 6.2 Özgül elektrik üretim maliyetinin kapasite kullanımına göre değişimi

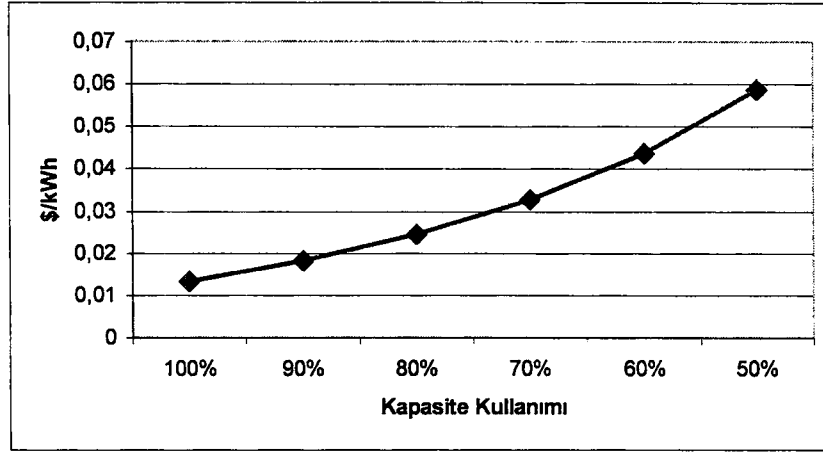
Özgül buhar üretim maliyeti

Sistemde amaç fonksiyon buhar olduğunda oluşacak özgül buhar üretim maliyeti Eşitlik 6.3 ile hesaplanır.

$$Y_B = \frac{\beta(C_T - C_S)}{\dot{Q}.H} + \frac{M_T - M_S}{\dot{Q}.H} + \frac{OM_T - OM_S}{\dot{Q}.H} - \frac{E.(Y_E)_{SS}}{\dot{Q}} \quad (6.3)$$

$$Y_B = \frac{0,065(1506207 - 208000)}{3318.8000} + \frac{1252241 - 262301}{3318.8000} + \frac{155800 - 20000}{3318.8000} - \frac{3116(0,0345)}{3318}$$

$$Y_B = 0,0132 \text{ \$/kWh}$$



Şekil 6.3 Özgül buhar üretim maliyetinin kapasite kullanımına göre değişimi

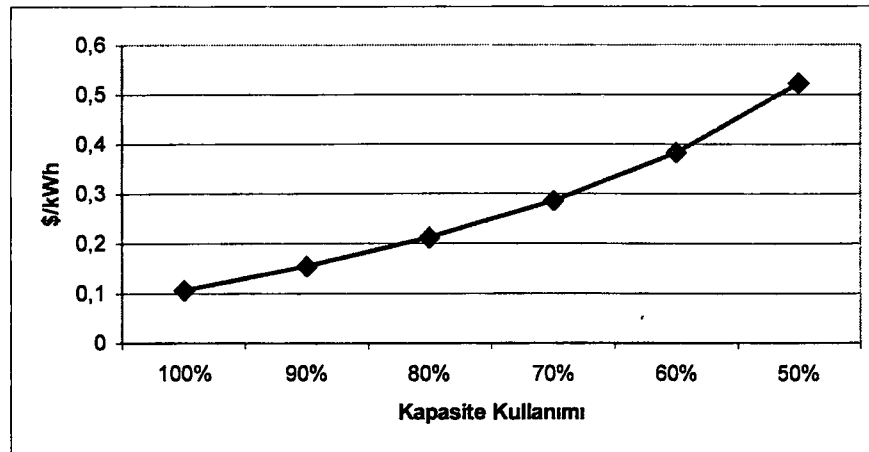
Özgül soğutma üretim maliyeti

Sistemde amaç fonksiyon soğutma olduğunda oluşacak özgül soğutma üretim maliyeti Eşitlik 6.4 ile hesaplanır.

$$Y_S = \frac{\beta(C_T - C_B)}{\dot{S}.H} + \frac{M_T - M_B}{\dot{S}.H} + \frac{OM_T - OM_B}{\dot{S}.H} - \frac{E.(Y_E)_{SS}}{\dot{S}} \quad (6.4)$$

$$Y_S = \frac{0,065(1506207 - 20000)}{350.8000} + \frac{1252241 - 342097}{350.8000} + \frac{155800 - 2000}{350.8000} - \frac{3116(0,0345)}{350}$$

$$Y_S = 0,107 \text{ \$/kWh}$$



Şekil 6.4 Özgül soğutma üretim maliyetinin kapasite kullanımına göre değişimi

6.3 Sistemin İşletme Analizi

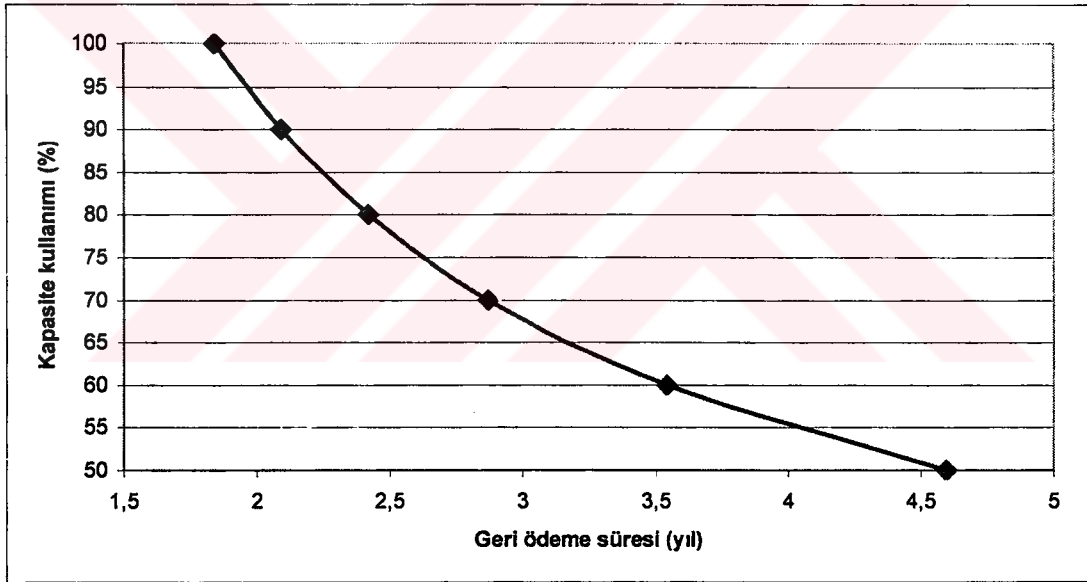
Sistemin kendini geri ödeme süresi, Eşitlik 6.5'den hesaplanabilir.

$$t_g = \frac{\ln[G_i / (G_i - G_y \cdot i)]}{\ln(1 + i)} \quad (\text{yıl}) \quad (6.5)$$

G_i = Yıllık işletme giderleri (\$/yıl)

G_y =İlk yatırım giderleri (\$/yıl)

Eşitlik 6.5, sistemin değerleri için ve $i=5\%$ olarak hesaplanırsa geri ödeme süresi $t_g = 1,84$ yıl olarak bulunur. Bu değer sistemin maksimum kullanımı yani %100 kullanımı için geçerlidir. Tesis ihtiyaçları her zaman aynı olmayacağı için, kurulan sistemin geri ödeme süresi kapasite kullanımına göre değişir. Kapasite kullanımına göre geri ödeme süresinin değişimi Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Kapasite kullanımının geri ödeme süresine etkisi

Sistem, geri ödeme süresi sonunda kendini amorte ettikten sonra kar etmeye başlayacaktır. Sistemin kullanım süresine göre elde edilen kar Eşitlik 6.6'den hesaplanabilir (Yılmaz, 1997).

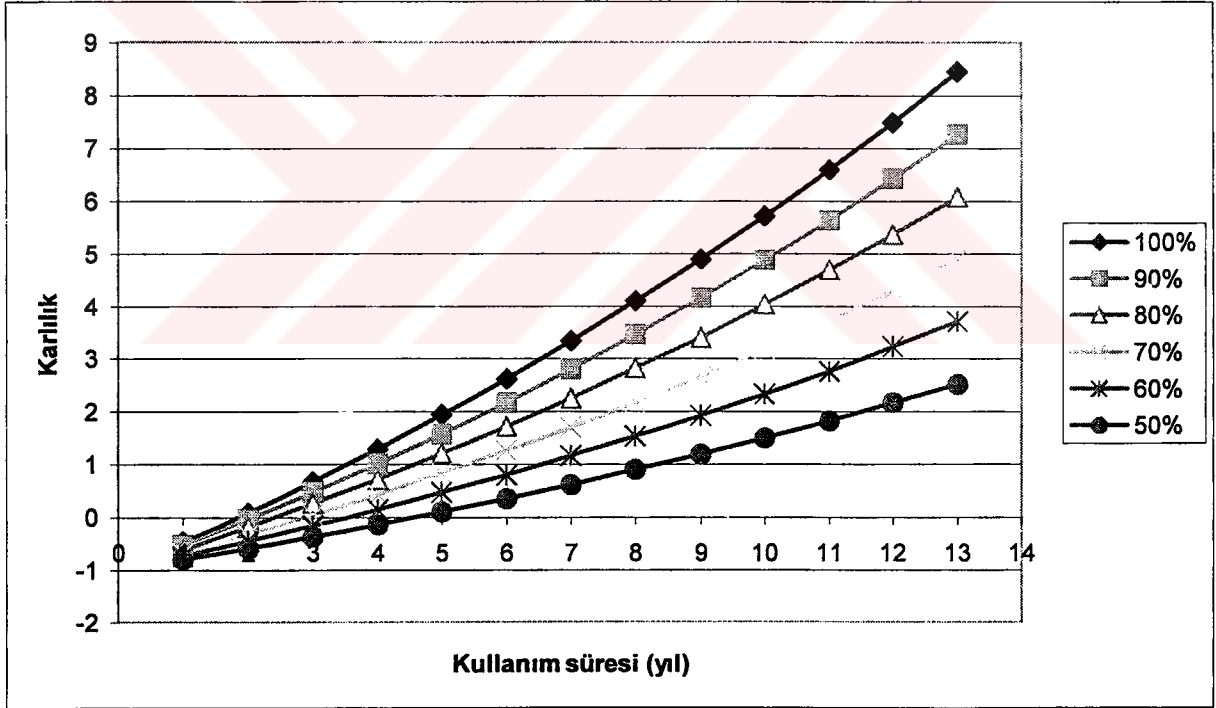
$$G_k = G_i \frac{(1+i)^n - 1}{i} - (1+i)^n \cdot G_y \quad (6.6)$$

$$G_k^* = \frac{G_k}{G_y} \quad (6.7)$$

Sistemin karlılığı (G_k^*) Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3 Sistemin kullanımı süresi ve kapasite kullanımına göre karlılığı

Süre (yıl)	100%	90%	80%	70%	60%	50%
1	-0,466	-0,533	-0,600	-0,667	-0,734	-0,801
2	0,094	-0,044	-0,181	-0,318	-0,456	-0,593
3	0,682	0,471	0,260	0,048	-0,163	-0,374
4	1,299	1,011	0,722	0,433	0,145	-0,144
5	1,948	1,578	1,208	0,838	0,468	0,098
6	2,629	2,173	1,718	1,262	0,807	0,351
7	3,344	2,798	2,253	1,708	1,162	0,617
8	4,094	3,455	2,815	2,176	1,536	0,897
9	4,883	4,144	3,406	2,667	1,929	1,190
10	5,710	4,868	4,025	3,183	2,341	1,498
11	6,579	5,628	4,676	3,725	2,773	1,822
12	7,492	6,426	5,360	4,294	3,228	2,161
13	8,450	7,264	6,077	4,891	3,705	2,518



Şekil 6.6 Sistemin karlılığının kullanım süresi ve kapasite kullanımına göre değişimi

SONUÇLAR

İnsan yaşamının vazgeçilmez bir parçası olan enerji, geçmişte olduğu gibi bugün de dünya ve Türkiye gündeminde büyük önem arz eden konuların başında yer almaktadır. Sanayileşmeye ve toplumun refah seviyesinin yükseltilmesine bağlı olarak artan enerji talebi ve enerji üretmek için kullanılan birincil enerji kaynaklarının yetersizliği, kaynakların hem küresel hem de bölgesel bakımdan verimli ve dengeli bir biçimde kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Özellikle sanayi sektöründe, işletme masrafları içinde enerji masraflarının oranının çok yüksek olması, işletmecileri, daha verimli ve daha ekonomik çözümler aramaya teşvik etmiştir. Bu noktada, kojenerasyon sistemleri gündeme gelmiştir. Kimya, tekstil, gıda, kağıt, demir çelik gibi yüksek miktarda elektrik ve değişik formlarda ısı enerjisine ihtiyaç duyan sektörlerde kojenerasyon sistemlerinin kurulması cazip bir seçenek haline gelmiştir.

Kojenerasyon sistemlerinin enerjinin tüketildiği bölgelerde kurulması ile iletim hatlarındaki kayıpların ortadan kalkması ve sistem verimlerinin yüksek olması nedeniyle kojenerasyon sistemlerinde üretilen elektriğin birim maliyeti, elektriğin şebeke fiyatından daha düşük olmaktadır. Ayrıca, kojenerasyon sistemi ile tesisin ısı ihtiyaçları ek bir enerji kaynağı kullanılmadan karşılanmaktadır. Elektrik ve ısı enerjisi masraflarından elde edilen tasarruf ile kojenerasyon sistemi için yapılan yatırım kendini kısa sürede geri öder.

Elektrik ve ısı enerjisi ile birlikte soğutma ihtiyacı da bulunan tesislerde, kojenerasyon sistemine kombine edilecek bir soğutma sistemi ile ana enerji kaynağından elektrik, ısı ve soğutma aynı anda elde edilebilir. Trijenerasyon denilen bu sistem ile tesis verimi daha da artırılır. Dolayısıyla birim enerji maliyeti düşerek yatırımın kendini daha kısa sürede geri ödemesini sağlar. Trijenerasyonda soğutma elde etmek için en uygun sistemler absorpsiyonlu soğutma sistemleridir. Bunun sebebi absorpsiyonlu soğutma sistemlerinde enerji kaynağı olarak ısının doğrudan kullanılmasıdır. Kojenerasyon sisteminin herhangi bir noktasından elde edilecek bir ısı enerjisi ile sistem çalıştırılabilir ve soğutma elde edilebilir.

Trakya Birlik Entegre Tesisleri için yapılan örnek trijenerasyon sisteminde, tesisin elektrik ihtiyacı gaz motorlarından, buhar ihtiyacının bir kısmı gaz motorlarının egzoz ısılarından ve soğutma ihtiyacı bir gaz motorunun soğutma suyu ısından sağlanmıştır. Sistemde amaç fonksiyon elektrik olduğunda birim elektrik maliyeti 0,0347 \$/kWh olmaktadır. Bu fiyat şebeke elektrik satış fiyatının %47'sine denk gelmektedir. Yani 1 kWh elektrik yaklaşık yarı fiyatına üretilmektedir. Yapılan karlılık hesapları da göstermiştir ki düşük enerji üretim maliyetleri ile sistem kendini kısa bir sürede ödemektedir. Elde edilen tasarruf dışında, sistemin enerji ihtiyaçları bu sistem ile güvenli bir şekilde sağlanmaktadır.

Günümüz dünyasında, enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması ve birim enerji maliyetlerinin minimize edilmesi dolayısıyla karlılığın maksimize edilmesi bir zorunluluktur. Özellikle elektrik, ısı ve soğutma enerjilerini birlikte kullanan firmalar, trijenerasyon alternatifini kesinlikle gözden geçirmeli ve ön fizibilite çalışmalarını vakit kaybetmeden yapmalıdırlar.

KAYNAKLAR

- ASHRAE Fundamentals, (1996), Termodinamik ve Soğutma Çevrimleri (Çev. O. Genceli), Tesisat Mühendisliği Derneği Teknik Yayınlar Bölüm:1, İstanbul.
- ASHRAE Fundamentals, (1997), Yakacaklar ve Yanma (Çev. O. Genceli), Tesisat Mühendisliği Derneği Teknik Yayınlar Bölüm:15, İstanbul.
- Aybers, N. ve Şahin, B., (1995), Enerji Maliyeti, YTÜ Yayınları No:299, İstanbul
- Blamire, D.K., (1999), “Utility Perspective on Technology Related to Green Gas Abatement”, NSPI, Halifax.
- Derbentli, T., (1998), “Bölge Isıtması ve Kojenerasyonun Ekonomik Olurluğu” , Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyon Konferansı, 24-25 Ekim 1998, İstanbul, 61-69.
- Dossat, R.J., (1997), Principles of Refrigeration, Englewood Cliffs, New Jersey.
- EDUCOGEN, (2001a), “A Guide to Cogeneration” , COGEN Europe Publications, Brüksel.
- EDUCOGEN, (2001b), “The European Educational Tool on Cogeneration” , COGEN Europe Publications, Brüksel.
- Elliot, T.C., (1989), Powerplant Engineering, McGraw-Hill, New York.
- Gibbons, J.H., (1983), Industrial and Commercial Cogeneration Congress, Şubat 1983, Princeton, 131-132.
- Gordon, M.G. ve Ng, K.C., (2000), Cool Thermodynamics, Cambridge International Science, Cambridge
- Horlock, J.H., (1992), Combined Power Plants: Including Combined Cycle Gas Turbine Plants, Pergamon, Oxford.
- Horlock, J.H., (1997), Cogeneration – Combined Heat and Power, Krieger, Florida.
- Koçak, T. ve Gülşen, O. , (1998), “Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyon” , Bölgesel Isıtma ve Kojenerasyon Konferansı, 24-25 Ekim 1998, İstanbul, 35-58.
- Limaye, D.R., (1985), Planning Cogeneration Systems, Fairmont Press, Atlanta.
- Narter, F. ve Öztürk, İ.T., (1996), Merkezi Isıtma, Tesisat Mühendisliği Derneği Teknik Yayınlar, İstanbul.
- Onsite Sycom Energy Corporation, (1999), “Review of Combined Heat and Power Technologies”, Washington.
- Öztürk, A., Kılıç, A. ve Yavuz, H., (2000), Termodinamik ve Isı Geçişi Tabloları, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Silveira, J.L., (2000), "Study of a Fuel Cell Cogeneration System: Energetic, Exergetic and Economic Analysis", Sao Paulo State University, Sao Paulo.

UNESCAP, (1998), "Promotion of Cogeneration Technology as a Means of Pollution Control and Increase in Energy Efficiency in Industrial and Commercial Sectors", United Nations Publications.

Wang, S.K., (1993), Handbook of Air conditioning and Refrigeration, McGraw-Hill, New York.

Wilkinson, B.W. ve Barnes, R.W., (1980), Cogeneration of Electricity and Useful Heat, CRC Press, Florida.

Yılmaz, T., (1997), "Isı Geri Kazanım Sistemleri", III. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 20-23 Kasım 1997, İzmir, 109-133.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	17.12.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1990-1997	Tekirdağ Anadolu Lisesi
Lisans	1997-2001	Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Programı

Çalıştığı kurumlar

2002-2003	Klips Mühendislik
2003-2004	TUBİTAK Vizyon2023 Projesi

