

Gazlaştırıcıli Kombine Çevrim Santrallerinde Yanma Öncesi Karbondiyoksit Tutma

Pre-Combustion Carbondioxide Capture in Integrated Gasification Combined Cycles

M. Zeki YILMAZOĞLU*

Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06570, Ankara

Geliş Tarihi/Received : 18.08.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 29.12.2009

ÖZET

Elektrik enerjisinin üretilmesinde termik santraller çok büyük bir paya sahiptir. Termik santraller, ısı enerjisinin mekanik enerjiye ve mekanik enerjinin de elektrik enerjisine dönüştüğü sistemlerdir. Isı enerjisi, yanma prosesi ile sağlanır ve yanma sonucu küresel ısınmaya neden olan, CO₂ gibi bazı zararlı emisyon atmosfere salınır. Karbondiyoksitin küresel ısınmaya olan katkısı yapılan çalışmalarla belirlenmiştir. Bu nedenle, temiz enerji teknolojileri tüm dünyada hızlı bir gelişme göstermektedir. Kömür, santrallerde kullanılan ve birim elektrik enerjisi maliyeti diğer yakıtlara göre daha az olan bir fosil yakıttır. Rezerv oranı da dikkate alındığında, kömürün, daha verimli ve temiz bir şekilde enerjiye dönüştürülmesi gereklidir. Temiz kömür teknolojilerinde amaç, kömürün zararlı emisyonlarının yok edilerek, yanma sonucu oluşan karbondiyoksitin de çeşitli formlarda depolanmasının sağlanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda karbondiyoksit, yanma öncesi tutma ile, O₂/CO₂ geri beslemeli yakma sistemleri ile ve yakma sonrası tutma sistemleri ile yakalanıp tutulabilmektedir. Yanma öncesi tutma işleminde gazlaştırıcıli kombine çevrim santralleri, O₂/CO₂ geri beslemeli yakma sistemlerinde ultrasüper kritik kazan teknolojisi ve yakma sonrası tutma işleminde ise yanma gazlarının aminlerle yıkanması işlemleri gerçekleştirilir. Bu çalışmada, gazlaştırıcıli bir kombine çevrim santrali ile konvansiyonel bir santralin CO₂ emisyonu salınımı yönünden karşılaştırılması yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda tasarlanan sistemden tutulacak CO₂ miktarı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Karbondiyoksit tutma; Temiz kömür teknolojileri; Yakma öncesi CO₂ tutma.

ABSTRACT

Thermal power plants have a significant place big proportion in the production of electric energy. Thermal power plants are the systems which converts heat energy to mechanical energy and also mechanical energy to electrical energy. Heat energy is obtained from combustion process and as a result of this, some harmful emissions, like CO₂, which are the reason for global warming, are released to atmosphere. The contribution of carbondioxide to global warming has been exposed by the previous researchs. Due to this fact, clean energy technologies are growing rapidly all around the world. Coal is generally used in power plants and when compared to other fossil energy sources unit electricity production cost is less than others. When reserve rate is taken into account, coal may be converted to energy in a more efficient and cleaner way. The aim for using the clean coal technologies are to eradicate the harmful emissions of coal and to store the carbondioxide, orginated from combustion, in different forms. In line with this aim, carbondioxide may be captured by either pre-combustion, by O₂/CO₂ recycling combustion systems or by post combustion. The integrated gasification combined cycles (IGCC) are available in pre-combustion capture systems, whereas in O₂/CO₂ recycling combustion systems there are ultrasuper critical boiler technologies and finally flue gas washing systems by amines exists in post combustion systems. In this study, a pre-combustion CO₂ capture process via oxygen blown gasifiers is compared with a conventional power plant in terms of CO₂ emissions. Captured carbondioxide quantity has been presented as a result of the calculations made throughout the study.

Keywords : Carbondioxide capture, clean coal technologies, Pre-combustion CO₂ capture.

* Yazılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : zekiyilmazoglu@gazi.edu.tr (M. Z. Yilmazoğlu)

1. GİRİŞ

Hızla gelişen ve enerji ihtiyacı her geçen gün artan dünyamızda, enerji kaynaklarının maksimum ekserji ile kullanılması ve çevreye zarar vermeden temiz enerjinin üretilmesi, enerji dönüşüm tasarımcılarının en önemli sorunu durumundadır. Bir enerji kaynağının enerjisinin, en yüksek ekserjisi ile kullanılması ve bu enerji dönüşümü sırasında çevreye mümkün olan en az zararın verilmesi mühendislik tasarımı ile ilgilidir. Enerji-çevre-sosyal yaşam üçgeninde, sürdürülebilirliğin sağlanması, bunların birbirlerine olan etkilerinin araştırılması ve maksimum fayda minimum zarar prensibine uygun olacak biçimde tasarımın yapılması, enerji dönüşüm sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Enerji dönüşüm sistemleri yanma temelli olup, yanmadan kaynaklanan emisyonların etkilerin en aza indirilmesi gerekmektedir. Yanma sonucu oluşan karbondioksitin, küresel ısınmaya katkısı yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. Karbondioksit emisyonunun salınımının azaltılması için ülkeler arası antlaşmalar yapılmıştır. İklim değişikliği antlaşmalarından sonra, sera gazı etkisi yapan karbondioksit emisyonunun tutulması ve depolanması yönünde birçok Ar-Ge çalışmaları yapılmıştır ve halen yapılmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları pulverize kömür yakan bazı termik santrallere uygulanmış ve verimli sonuçlar elde edilmiştir. Yakıtlar arasında kömür, 300 yılın üzerinde yetecek rezervi ile 30-40 yıl içinde tükenmesi beklenen petrol ve doğalgaza kıyasla dünya enerji dengesinin kilit yakıtı olma özelliğini taşımaktadır. Bu nedenle kömürlerin verimli (enerji maliyetinin düşürülmesi ve rezervlerin en uzun süre kullanımı) ve temiz (çevre kirleticisi emisyonların en aza indirilmesi ve doğal dengenin korunması) yakılması günümüz enerji teknolojisinin en zor ve en önemli sorunlarından birini oluşturmaktadır (Durmaz ve Kural, 1998). Gazlaştırma teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak kömür, odun, biyokütle v.b birçok yakıt daha verimli ve temiz halde yanmaya dahil edilebilmektedir. Temiz enerji üretim teknolojileri uygulamalarda yerini almaya başlamış olup, dünya ülkeleri CO₂ emisyonlarının azaltılması yönünde birçok önlem almaya başlamıştır. 2006 yılı enerji istatistiklerine göre, elektrik üretiminde fosil kaynaklı yakıtların % 69'lük bir paya sahip olduğu görülebilir (Anon., 2007).

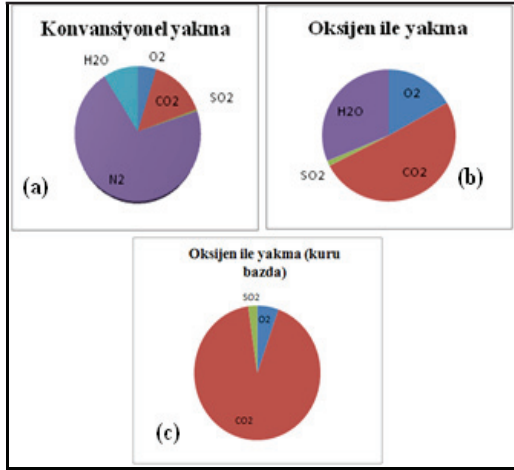
Fosil kaynaklı yakıtların yanması sonucu meydana gelen ürünlerin başında, küresel ısınmaya neden olan, CO₂ bulunmaktadır. Atmosferde konsantrasyonu her geçen gün artan CO₂, (2008'de yaklaşık 385 ppmv) sera etkisine neden olarak yerkürenin ısınmasına ve doğanın dengesini bozmaya başlamıştır. Bu nedenle, yanma sonucu oluşan CO₂'in tutulup depolanabileceği yakma sistemlerinin dizaynı önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Bu bilgiler ışığında, yakma sistemlerinin geliştirilerek yanma kaynaklı emisyonların minimum düzeye indirilmesi gerekmektedir (Yılmazoğlu ve Durmaz, 2007). Sıfır emisyonlu kömür teknolojilerinden faydalanmanın en verimli yollarından biri ZECA olarak adlandırılan gazlaştırma ile hidrojen üretimi ve üretilen bu hidrojenin katı oksit yakıt pilinde (SOFC) kullanılarak elektrik üretilmesidir (Slowinski, 2006). Bu proseste yakıt pili kullanılarak elektrik üretiminde Carnot limiti kaldırılmış ve % 70'lere varan verim elde edilmiştir. Yakıt pilinin atık ısı ile kalsinasyon prosesinin oluşması için gerekli ısı sağlanmıştır. Bu proses sonucunda CO₂ saf olarak elde edilmekte ve jeolojik formlarda depolanma imkanı olmaktadır. Hem elektrik üretimi yönünden yüksek verim hem de kömürden temiz enerji elde edilmiştir. Bununla birlikte Slowinski çalışmasında, kömürden üretilen hidrojenin içinde bulunan sülfürün katı oksit yakıt pilinin anoduna yaptığı olumsuz etkiler gözlemlenmiş ve her ne kadar temiz bir teknoloji de olsa da prosesin ısı transferi ve anot zehirlenmesi yönlerinden geliştirilmesi gerektiğini belirtilmiştir. Henüz çok büyük kapasitelerde güç üretimine imkan vermeyen bu sistemler hızla geliştirilmektedir. Bu gelişim süresince alışımlı enerji üretim tesislerinin rehabilitasyonu ve temiz enerji üretim teknolojilerinin adaptasyonu gereklidir.

Petrol fiyatlarının artması gazlaştırma ile enerji üretimine olan ilginin artmasına neden olmuştur. Gazlaştırma, üzerinde bir çok çalışma yapılmış olan bir alan olup termik santrallere temiz enerji kapsamında uygulanması geliştirilmeye açık bir konudur. Özellikle oksijen ile gazlaştırma ile elde edilen sentetik gazın yine oksijen ile yakılması sonucu yanma ürünü olarak karbondioksit ve su oluşmaktadır. Su yoğunlaştırıldıktan sonra geriye kalan karbondioksit petrol yataklarına basılarak petrol çıkartmanın kolaylaştırılması ya da jeolojik formlarda depolanması temiz enerji üretimi için güncel bir yöntemdir.

Martinez ve Brandt (Martinez-Frias v.d., 2003), çalışmalarında 400 MW kurulu gücündeki gazlaştırıcı entegreli bir santralin termodinamik ve ekonomik analizini gerçekleştirmişler ve sonuç olarak santralin toplam net verimini % 42.6 (alt ısı değer bazında) olarak bulmuşlardır. Oksijen üretimi için hava ayırıştırma ünitesi ve karbondioksiti sıkıştırmak için kullanılan kompresörler santral iç tüketim değerini arttırarak net elektrik verimini düşürmektedir. Bununla birlikte üç tip gazlaştırıcı için (Texaco, Shell ve Koppers-Totzek) iki farklı kömür türünden elde edilecek elektrik maliyetini, CO₂ depolanmadan 4.6 cent/kWh ve depolanarak 5.3 cent/kWh olarak belirtmişlerdir. Oksijen ile yakma, CO₂'nin tutulması ve depolanması için incelenmekte olan bir başka metottur (Czakiert v.d., 2006). Konvansiyonel pulvarize kazanlar kömürün yanması için havayı kullanmaktadır. Bu durumda baca gazı içindeki CO₂ oranı düşük olmaktadır

(Şekil 1a) ve baca gazının aminlerle yıkanarak CO₂'in tutulması zorlaşmaktadır. Aminlerle yıkama işleminde, aminlerin rejenerasyonu için enerji tüketimi iç tüketimi arttırmaktadır ve verim düşmektedir. Oksijen ile yakma sistemi ile yanma gazı içinde % 95 saflıkta CO₂ elde edilebilmektedir (Şekil 1c). Elementel analizi C:0.60, H:0.05 S:0.04 ve alt ısıl değeri Hu=6324 kcal/kgy olan yakıt için (Şekil 1a)'da konvansiyonel yakma (n=1,3), Şekil 1(b)'de oksijen ile yakma (n=1.05) ve Şekil 1(c)'de oksijen ile yakma durumlarında baca gazı içindeki suyun yoğunlaşması sonucu oluşan kuru baca gazlarının yüzdelik dilimleri gösterilmiştir. Oksijen ile yakma ile santralin toplam yüzey alanı alışımlı santrallere göre daha küçük olacaktır. Buna karşın, oksijen ile yakma sonucunda yanma odasında adyabatik alev sıcaklığı hava ile yakmaya göre daha yüksek olmaktadır ve bu da beraberinde malzeme sorununu getirmektedir. Bununla birlikte, bu malzeme sorunu yanma odasına baca gazı içinde bulunan yüksek konsantrasyonlu CO₂'nin geri beslenmesi ile giderilmektedir. Geri besleme oranı yaklaşık olarak baca gazının hacimsel debisinin % 70'i kadardır.



Şekil 1. (a), (b), (c). Konvansiyonel ve oksijen ile yakma sistemlerinin, yanma ürünlerinin karşılaştırılması.

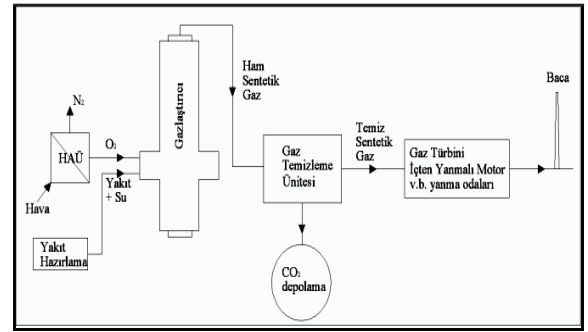
Şekil 1'den de görüldüğü gibi, konvansiyonel yakma sistemlerinde yanma ürünleri içinde azot içerikli bileşikler yaklaşık % 70'lik bir paya sahip olmaktadır. Azot içeren bileşiklerin yanma gazları içinden çıkartılması oksijen ile yakma ile sağlanmıştır (yakıt kaynaklı NO_x emisyonları hariç). Oksijen ile yakma ile oluşan su buharı da yoğunlaştırılarak CO₂ yoğun bir yanma ürünleri karışımı elde edilir ve bu karışım aminlerle yıkanarak CO₂ tutma işlemi gerçekleştirilebilir.

Gazlaştırıcılı kombine çevrim santrallerinde ise gazlaştırma ürünü olarak elde edilen ham sentetik gazın, gaz temizleme işlemleri ile temizlenerek yakılması esastır. Ham sentetik gazın içerisinde bulunması beklenen gazlar; CO, CO₂, CH₄, H₂, H₂S, H₂O, COS, N₂'dir. Zararlı gazlar, uygun sıcaklıklarda kimyasal tepkimelerle tutulabilmekte ve elde edilecek

temiz sentetik gazın içerisinde uygulanan prosese göre H₂ ya da CH₄ yoğun olarak bulunabilmektedir. CH₄ konvansiyonel yakma sistemlerinde kullanılan bir yakıt olduğu için ham sentetik gazın metanlaştırma reaksiyonuna sokulması gerekmektedir. H₂ yoğun temiz sentetik gaz elde edilmesinde ise CO kaydırma prosesi uygulanmış olup elde edilen bu sentetik gazın yüksek sıcaklıklarda ve verimlerde çalışan yakıt pillerinde (katı oksit yakıt pili ve eriyik karbonatlı yakıt pili) değerlendirilmesi başka bir seçenektir.

Gazlaştırıcılılar genel olarak üç ana tipte imal edilmektedir. Bunlar sabit yataklı gazlaştırıcılar, akışkan yataklı gazlaştırıcılar ve sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılardır. Tablo 1'de bu gazlaştırıcıların uygulama alanlarına göre birbirlerine göre karşılaştırılması verilmiştir. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda gazlaştırılacak yakıtın tane büyüklüğü 6-50 mm iken, akışkan yataklı gazlaştırıcılarda 6-10 mm ve sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda 100µm'den küçük olmalıdır. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda gazlaştırılacak yakıtın tane büyüklüğü 6-50 mm iken, akışkan yataklı gazlaştırıcılarda 6-10 mm ve sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda 100µm'den küçük olmalıdır. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda gazlaştırılacak yakıtın tane büyüklüğü 6-50 mm iken, akışkan yataklı gazlaştırıcılarda 6-10 mm ve sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda 100µm'den küçük olmalıdır. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda gazlaştırılacak yakıtın tane büyüklüğü 6-50 mm iken, akışkan yataklı gazlaştırıcılarda 6-10 mm ve sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda 100µm'den küçük olmalıdır. Sabit yataklı gazlaştırıcılarda gazlaştırılacak yakıtın tane büyüklüğü 6-50 mm iken, akışkan yataklı gazlaştırıcılarda 6-10 mm ve sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda 100µm'den küçük olmalıdır.

Oksijen kömür gazlaştırıcılı yanma öncesi CO₂'yi tutma prosesi akım ve bağlantı şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Oksijen gazlaştırıcılı yakma öncesi CO₂ tutma sisteminin akım ve bağlantı şeması.

Bu çalışmada, iki kademeli sürüklenmeli akışlı bir gazlaştırıcı modeli, Thermoflex programı kullanılarak tasarlanmış ve simülasyonu yapılmıştır.

Tablo 1. İşletme parametrelerine göre gazlaştırıcı tipleri.

Parametre	Sabit Yataklı	Akışkan Yataklı	Sürüklenmeli Akışlı
Yakıt Büyüklüğü	< 51 mm	< 6 mm	< 0.15 mm
İnce Tanecik Toleransı	Sınırlı	İyi	Mükemmel
İri Tanecik Toleransı	Çok iyi	İyi	Zayıf
Sentez Gazı Çıkış Sıcaklığı	450-650°C	800-1000°C	> 1260°C
Yakıt Türü	Düşük kaliteli linyit	Düşük kaliteli linyit ve biyokütle	Tüm kömür tipleri (biyokütle için uygun değil)
Oksijen Gereklinimi	Düşük	Orta	Yüksek
Reaksiyon Bölgesi Sıcaklığı	1090 °C	800-1000 °C	>1990 °C
Buhar Gereklinimi	Yüksek	Orta	Düşük
Kül Yapısı	Kuru	Kuru	Eriyik
Soğuk Gaz Verimi	%80	%89	%80
Uygulama Alanı	Küçük Kapasiteler	Orta Kapasiteler	Büyük Kapasiteler
Problemler	Tar oluşumu	Karbon dönüşümü	Sentez gazı soğutma

2. HESAPLAMALAR

Tasarlanan sistem yapısında, gaz türbininde yakılan temiz sentetik gaz, bir atık ısı kazanından geçirilerek buhar üretimi sağlanmıştır. Elde edilen buhar, buhar türbininden geçirilerek kombine çevrim yapısı tamamlanmıştır. Gazlaştırıcı entegreli olan bu kombine çevrim santralinde E-Gas Process (entrained flow type-sürüklenmeli akışlı) olarak bilinen iki kademeli gazlaştırıcı tipi seçilmiştir. GE Process tipi gazlaştırıcı ile birçok ortak noktası olmasına karşın, E-Gas Process teknolojisi iki kademeli olup, ikinci kademe sonrasında daha yüksek alt ısı değere sahip ve diğer karşıt akışlı gazlaştırma sistemlerine kıyasla daha düşük sıcaklıkta sentetik gaz elde etmeye imkan vermektedir. Gazlaştırıcıda yakıt olarak 25 °C'de alt ısı değeri 22325 kJ/kg olan kömür kullanılmıştır. Kömüre ait elementel ve kaba analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

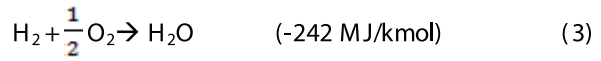
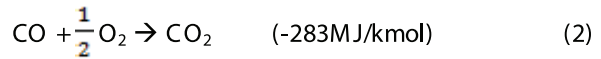
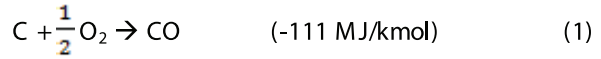
Tablo 2. Gazlaştırılacak kömür için kaba ve elementel analiz değerleri.

Elementel Analiz		Kaba Analiz	
W	12	W	12
A	16	A	16
C	55,5	V	33
H	4	Cs	39
N	1,1	Toplam	100
S	4		
O	7,4		
Toplam	100		

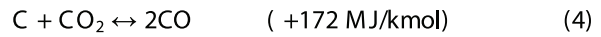
Gazlaştırıcıya hava yerine oksijen vermek için bir hava ayrıştırma ünitesi yerleştirilmiştir (Şekil 2-3). Hava ayrıştırma ünitesinden elde edilen O₂ gazlaştırıcıya beslenmektedir. Gazlaştırıcıda elde edilen ham sentetik gaz, gaz temizleme ünitesinden geçmektedir ve burada istenmeyen bileşenlerinden arındırılan temiz sentetik gaz yakılmak üzere gaz türbine gönderilmektedir. Bu ünite içinde CO kaydırma işlemi de yapılmakta ve H₂ ayrı bir çıkış noktasından da alınabilmektedir. Buna karşın, bu çalışmada H₂ ayrı olarak sistemden alınmamış ve buharlı CO kaydırma işlemi yapılmıştır (Eş. 1). CO kaydırma sonucu oluşan CO₂ sentetik gaz içinden

ayrılarak depolamaya, kalan sentetik gaz ise gaz türbini yanma odasına gönderilmiştir. Bu sentetik gazın diğer yakma sistemlerinde ve yakıt pillerinde de kullanılması mümkündür. Hesaplamalarda H₂O / CO_{mol} = 2 olarak alınmıştır. Gazlaştırma işlemi, 800 °C ile 1800 °C arasında gerçekleştirilmektedir. Gazlaştırma sıcaklığını etkileyen en önemli parametre yakıttır. Yakıtın kül ergime sıcaklığı direkt olarak gazlaştırma reaksiyonu sıcaklığını belirler. Gazlaştırıcı tipine bağlı olarak reaksiyon bölgeleri ve sıcaklıkları farklılık gösterse de, termodinamik incelemeye esas olacak reaksiyonlar aynıdır. Katı karbonun gazlaştırılması sırasında karbon, karbonmonoksit, karbondioksit, hidrojen, su ve metana ait temel kimyasal reaksiyonlar ve bu reaksiyonlara ait enerji girdi ve çıktıları aşağıda gösterilmiştir.

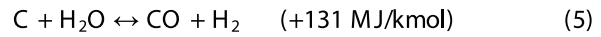
Yanma reaksiyonları;



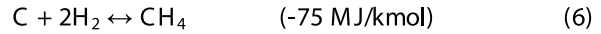
Boudouard reaksiyonu;



Su gaz reaksiyonu;

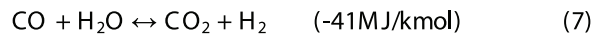


Metanlaşma reaksiyonu;

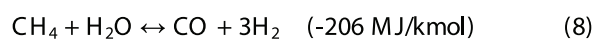


Karbon dönüşümünün tamamlandığı durumlar için Eş. 4-5-6 aşağıda belirtilen iki homojen gaz reaksiyonuna indirgenebilir.

CO kaydırma reaksiyonu;



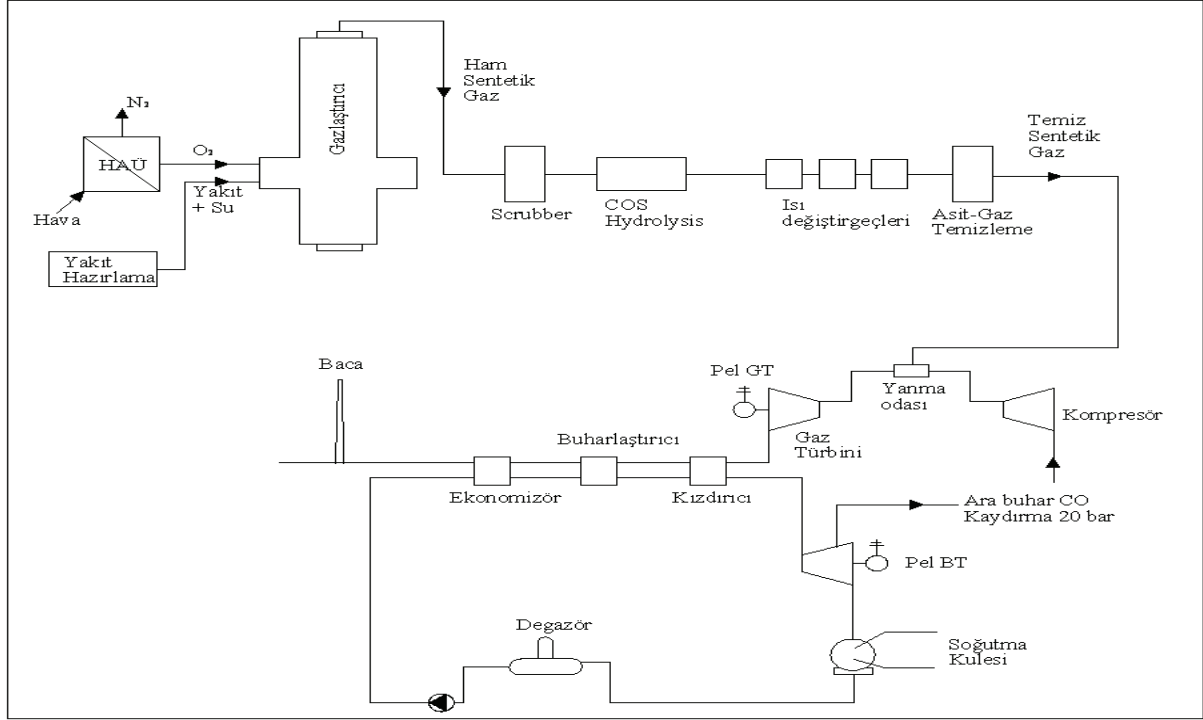
Buharlı metan yapılandırma reaksiyonu;



Boudouard reaksiyonu (Eş. 4), saf karbonun O₂/CO₂ karışımı ile gazlaştırılarak CO üretiminde etkindir. Gazlaştırma işlemi ise kısmi oksidasyon (Eş.1) ve su gaz reaksiyonunun (Eş. 5) kimyasal dengesine bağlıdır.

Gaz türbini olarak GE firmasına ait tek şaftlı, basınç oranı 11.8 olan, türbin giriş sıcaklığı 1104 °C ve çıkış sıcaklığı 534 °C, dizayn koşullarında (15 °C deniz

seviyesi % 65 bağıl nem) 39.6 MW elektrik üretebilen ve verimi % 32.5 olan GE 6541B modeli seçilmiştir. Türbin çıkışında tek basınçlı bir atık ısı kazanı yerleştirilmiştir. Atık ısı kazanı ile elde edilecek buhar, bir buhar türbini üzerinden geçirilmektedir. Bununla birlikte, degazör ve CO kaydırma işlemi için gereken buhar, türbinden ara buhar alınarak ve sentetik gazın gaz temizleme ünitesine girmeden önce soğutulması sırasında elde edilen buhar ile sağlanmıştır.



Şekil 3. Oksijen ile gazlaştırmalı bir kombine çevrim santralinin akım ve bağlantı şeması.

CO kaydırma prosesi için 20 bar'lık buhar basıncı öngörülmüştür. Hava ayrıştırma ünitesi santralin iç tüketimini artırarak kombine çevrimin toplam net verimini azaltıcı bir etki yapmaktadır. Bununla birlikte konvansiyonel bir kombine çevrimde olmayan gazlaştırıcı, hava ayrıştırma ünitesi (HAÜ) ve gaz temizleme ünitesi (GTÜ) de sisteme eklenerek santralin ilk yatırım maliyetini arttırmıştır. Sentetik gazın, gaz türbininde hava ile yakılması sonucunda konvansiyonel bir yakma sistemi sonucunda elde edilebilecek emisyonlar yanma gazı içinde bulunur. Sıfır emisyonlu bir santral tasarımında gaz türbininde sentetik gazın da oksijen ile yakılması gerekir. Sonuç olarak CO₂ yoğun karışım depolanabilir. Buna karşın, bir hava ayrıştırma ünitesinin daha sisteme eklenmesi sonucu santralin toplam verimi daha da düşecektir. Aynı zamanda türbin kanatlarında ciddi soğutma problemi de ortaya çıkacaktır. Soğutma sorunu O₂/CO₂ geri besleme sistemi ile çözümlenebilir. Yanma odasına bir kısmı geri beslenen CO₂ yanma odası sıcaklığını normal düzeylere indirir. Tüm bu alternatiflerin mühendislik yaklaşımı ile irdelenip ekonomik analizlerinin de gerçekleştirilmesi ve birim

elektrik maliyetinin diğer elektrik üretim sistemleri ile karşılaştırılması gerekmektedir. 2007 yılı verilerine göre gazlaştırıcı bir kombine çevrim santralinin birim elektrik üretim maliyeti 7.79 cent\$/kWh olarak bulunmuştur. CO₂ tutma durumunda ise birim elektrik üretim maliyeti 10.63 cent\$/kWh olmaktadır. Doğalgazla çalışan konvansiyonel çevrim santralinde ise birim elektrik üretim maliyeti 6.84 cent\$/kWh olmaktadır (Martinez-Frias v.d., 2003).

3. SONUÇLAR

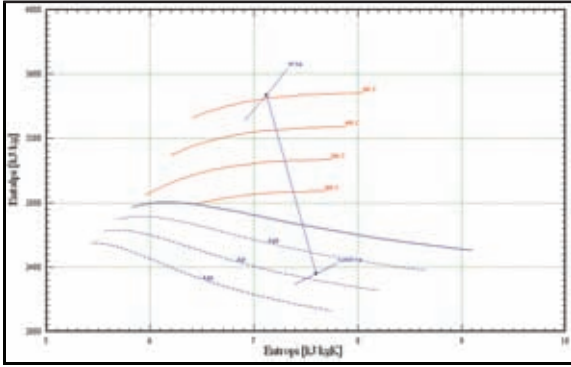
Hesaplamalar sonucunda tasarlanan santrale ait sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir. Santralin net elektrik veriminin, gaz türbini elektrik veriminden düşük çıkması santralin toplam üretiminin % 15,6'lık kısmının santralde tüketiliyor olmasındandır. Sadece hava ayrıştırma ünitesinin tüketimi 5.926 MW_{el} olarak bulunmuştur. Çevre hava kompresörü 4,507 MW_{el}'lik kısmını geri kalanını ise oksijen kompresörü tüketmektedir. Oksijen HAÜ'ni 30 bar ve 105 °C'de terk etmektedir. Soğutma kulesi su giriş ve çıkış sıcaklıkları sırası ile 19 °C ve 29 °C'dir. Soğutma kulesi tipi ıslak-fanlı olarak seçilmiştir. Soğutma kulesinde

pompanın ve fanın iç tüketim değerleri sırası ile 86,86 kW_{el} ve 85,24 kW_{el} olarak bulunmuştur. Şekil 4'te h-s diyagramı üzerinde buhar türbininin genişleme eğrisi gösterilmiştir.

Tablo 3. Santralden elde edilen net güç, net verim ve iç tüketim değerleri.

Ortam Sıcaklığı [°C]	15
Ortam Basıncı [bar]	1,013
Net güç [MW _{el}]	51,556
Net verim [%]	29,35
İç tüketim [MW _{el}]	8,05

Tablo 4'te baca gazı kompozisyonu ve özellikleri belirtilmiştir. Bacada yoğunlaşma olmayacağı çığ noktası sıcaklıklarının kontrolü ile sağlanmıştır. Bacadan atmosfere 1.18 kg/s debisinde CO₂ salınımı olacağı bulunmuştur. Buna karşın, CO kaydırma sonucu oluşan CO₂ 14,75 kg/s (53,1 t/h) debisinde, depolanmak üzere tutulmaktadır.



Şekil 4. Buhar türbini için h-s diyagramı.

Tablo 4. Baca gazı kompozisyonu ve özellikleri.

Baca Gazı Kompozisyonu ve Özellikleri			
Özellikler		Gaz kompozisyonu	
Gaz çıkış sıcaklığı [°C]	179,25	O ₂ [%]	13,992
Gaz Debisi [kg/s]	143,51	CO ₂ [%]	0,509
Partikül [ppm]	0	H ₂ O [%]	14,878
Sülfür Çiğ Noktası [°C]	120	N ₂ [%]	69,781
Su Çiğ Noktası [°C]	54,1	Ar [%]	0,838
CO ₂ debisi [kg/s]	1,18	SO ₂ [%]	0,002

Tablo 5. Sentetik gaz temizleme girişi ve çıkışında hacimsel olarak gaz kompozisyonları ve termodinamik özellikleri.

% Hacim	Ham Sentetik Gaz			Temiz Sentetik Gaz			% Hacim
	P [bar]	T [°C]	m [kg/s]	P [bar]	T [°C]	m [kg/s]	
	18,6	380	14,7	16,74	260	7,197	
CO	37,64	O ₂	0	CO	0,6823	O ₂	0
CO ₂	11,14	H ₂ O	16,46	CO ₂	2,179	H ₂ O	33,43
CH ₄	0,5086	COS	0,0506	CH ₄	0,4609	COS	0,0009
H ₂	31,35	N ₂	1,543	H ₂	61,84	N ₂	1,398
H ₂ S	1,306	Ar	0	H ₂ S	0,0123	Ar	0

Aynı kömür özellikleri ve debisi için alışılmış bir santral tasarımı hesabına göre, %35 santral verimi için üretilen elektrik 58,03 MW_{el} olarak bulunur. Bu durumda atmosfere salınan CO₂ emisyonu hesaplanırsa 54,46 t/h'lik bir salınım olacağı bulunur.

Sonuç olarak alışılmış bir santral ile tasarlanan sistem karşılaştırılırsa atmosfere salınacak CO₂'nin büyük miktarda tutulabileceği bulunur. Hesaplamalarda CO₂ sadece sentetik gaz içinden alınmıştır. CO₂'nin tutulması için sıkıştırılması ve soğutulması gerekmektedir (Yılmazoğlu ve Durmaz, 2007). Atmosfer basıncında -80 °C'de gaz fazından sıvı fazına geçen CO₂'nin bu kadar soğutulması büyük miktarda bir iç tüketimin daha ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bunun yerine, CO₂ 6 MPa'da 20 °C'de sıvı halde bulunmaktadır. Tutulan bu CO₂'nin basınçlandırılıp soğutulması santralin iç tüketimi açısından ayrı bir optimizasyon problemini de beraberinde getirmektedir.

Yoğuşturucu basıncı 0,0689 bar olup, buhar türbini çıkışında buhar kuruluk derecesi 0,92 olarak hesaplanmıştır. CO kaydırma ve degazör için yüksek basınç türbininden sonra 20 bar basınçta ara buhar çekilmiştir. Atık ısı kazanında ekonomizerde 14776 kW, buharlaştırıcıda 30976 kW ve kızdırıcıda 11952 kW ısı transferi olacağı hesaplanmıştır. Buharlaştırıcı için yaklaşım sıcaklığı 20 °C üretilen buhar miktarı 17,9 kg/s ve blöf miktarı ise 0,179 kg/s olarak bulunmuştur.

Sentetik gaz temizleme ünitesinde hacimsel olarak gaz kompozisyonları Tablo 5'te verilmiştir. Ham sentetik gaz içinde hacimce % 37,64 oranında bulunan CO, CO kaydırma işlemi ile CO₂'ye dönüştürülmüş ve büyük bir kısmı depolanmak üzere tutulmuştur. Elde edilen temiz sentetik gazın gaz kompozisyonuna göre alt ısıl değeri 17478 kJ/kg olarak bulunmuştur.

4. DEĞERLENDİRMELER

Fosil kaynaklı yakıtlarla elektrik ve güç üretimi, CO₂ salınımına büyük katkı yaparak sera etkisi oluşturmaktadır ve küresel ısınmaya neden olmaktadır. Bu çalışmada kömür, oksijen ortamında gazlaştırılmış ve gaz temizleme işlemleri ile elde edilen sentetik yakıt bir gaz türbininde yakılarak elektrik üretilmiştir. Yanma gazları bir atık ısı kazanından geçirilerek buhar türbininden de elektrik üretimi sağlanmıştır.

Konvansiyonel bir elektrik üretim tesisine kıyasla CO₂, % 92 oranında tutulabilmektedir. Santralin toplam verimi hava ayrıştırma ünitesinden dolayı düşük çıkmıştır. Bununla birlikte CO₂ sıkıştırma ve depolama işlemleri sırasında tüketilecek enerji de hesaba katılınca daha da düşecek olan verim, bu santral teknolojisinin geliştirilmesi ile yüksektir. CO₂'nin tutulduktan sonra sıkıştırılması ve soğutulması da bir başka optimizasyon sorunudur.

Depolama alanına kadar taşıma ve bu taşıma sırasında CO₂'nin yeniden gaz fazına geçmemesi de gerekmektedir. Tüm bu ayrıntılar mühendislik yaklaşımı ile ele alınmalı ve santralin toplam yatırım maliyeti ve birim elektrik üretim maliyetlerinin de ülkemiz şartlarına göre yeniden hesaplanması gerekmektedir. Düşük kaliteli linyitlerin yanma problemleri de gazlaştırıcılı kombine çevrim santrallerinde ortadan kalkmaktadır. Düşük kaliteli linyitlerin yüksek nem içeriği nedeni ile gazlaştırılarak değerlendirilmesi ülkemiz açısından çok büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Anonymous, 2007. NETL Reports "Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants" <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/>

Czakiert, T., Bis, Z., Muskala, W. and Nowak, W. 2006. "Fuel Conversion from oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed", Fuel Processing Technology 87,531-538.

Durmaz, A. ve Kural, O. 1998. "Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri", Chp. 22, pp. 353-395.

Higman, C. and Van der Burgt, M. 2003. "Gasification", Elsevier Science pp. 86.

Martinez-Frias, J., Aceves S.M., Smith, J.R. and Brandt, H. 2003. "A coal Fired Powerplant with Zero Atmospheric Emissions" 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress, November 15-21, Washington, DC.

Slowinski, G. 2006. "Some technical issues of zero-emission coal technology" International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 31, pp.1091-1102.

Yılmazoğlu, M. Z. ve Durmaz, A. 2007. "Sıfır emisyonlu Termik Santral Geliştirilmesinde Mühendislik Yaklaşımları ve İrdelemeler", ULIBTK07-094, 408-412.