



Bir Karbon Tutulum Depolama Teknolojisi-Oksiyantın Akışkan Yataklı Sistemde Deneysel Olarak İncelenmesi

A Carbon Capture and Storage Technology- Oxycombustion, Experimental investigation in a Fluidized Bed System

Ufuk Kayahan ^{1*}

¹ TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü Gebze, Kocaeli, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: ufuk.kayahan@tubitak.gov.tr

Geliş Tarihi / Received: 10.01.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 18.03.2020

Atıf şekli / How to cite: KAYAHAN, U.(2020). Bir Karbon Tutulum Depolama Teknolojisi-Oksiyantın Akışkan Yataklı Sistemde Deneysel Olarak İncelenmesi. DEUFMD 22(66), 715-723.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2020226606

Öz

Artan dünya nüfusu enerji taleplerinde de artış eğiliminin sürmesine neden olmaktadır. Önümüzdeki birkaç on yıl içerisinde fosil yakıtların enerji talebini karşılamada kullanılmaya devam edeceği ön görülmektedir. Fosil yakıt kullanımından kaynaklanan atmosferik CO₂ konsantrasyonundaki artışı kontrol altında tutabilmek için farklı teknolojiler önerilmektedir. Oksi-Yanma bu teknolojiler arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada seçilen bir Türk Linyiti (Tunçbilek) 30kWth kapasiteli dolaşimli akışkan yataklı bir yakıcıda oksi yanma ve hava ile yanma koşullarında yakılmıştır. Yapılan testler sonucunda oksi yanma koşullarında kuru bazda %88 oranında CO₂ içeren bir baca gazı elde edilmiştir. Ayrıca oksi yanma koşullarında hava ile yanma koşullarına göre daha düşük NO_x emisyonu ortaya çıktığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Karbon Tutulum ve Depolama, Oksi Yanma, Akışkan Yatak Yakma

Abstract

Energy demand is expected to increase because of increasing world population. Fossil fuel will still play important role to meet this demand in next decades. It is utmost important to keep atmospheric CO₂ concentration rise caused by fossil fuel usage under control. Oxy combustion is seen as a promising technology to control atmospheric CO₂ concentration. In this study a selected Turkish Lignite (Tunçbilek) was combusted in a 30kWth circulating fluidized bed combustion system under both air and oxy combustion conditions. 88% CO₂ concentration was observed in flue gas at dry basis during Oxy combustion. Results also indicate that NO_x emissions in oxy combustion are lower than that in air combustion.

Keywords: Carbon Capture and Storage, Oxy combustion, Fluidized Bed Combustion

1. Giriş

Dünya nüfusu her geçen gün artmaktadır. BM nüfus projeksiyonlarına göre dünya nüfusunun 2050 yılında 9.7 milyara ulaşması

beklenmektedir [1]. Nüfus artışına bağlı olarak enerji talebinde de artış öngörülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı her yıl yayınladığı dünya enerji görünümü raporunda günümüze

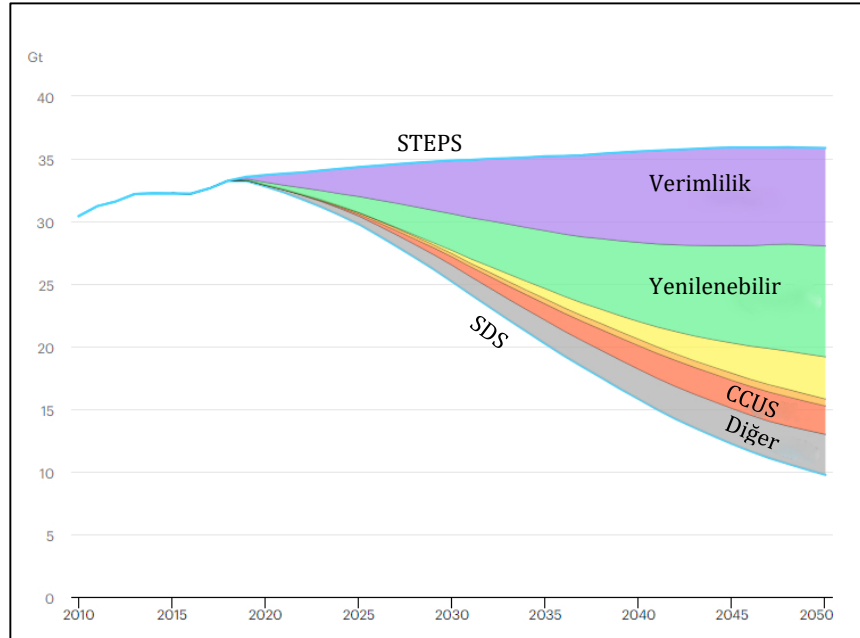
dair istatistikler vermekle kalmaz, geleceğe dair de ön görülerini farklı senaryolar altında paylaşır. Dünya Enerji Görünümü 2019 raporunda öne çıkan iki senaryo aşağıda tanımlanmıştır [2].

Belirtilen Politikalar Senaryosu (Stated Policies Scenario-STEPS): Devletlerin geleceğe dair duyurdukları enerji politikalarına göre geliştirilen senaryodur. Politika yapıcıların planlarının sonuçlarına ayna tutmayı hedefler. Bu senaryoya göre her yıl enerji talebinde %1 artış olacağı öngörülür.

Sürdürülebilir gelişme senaryosu (Sustainable Development Scenario-SDS): Bu senaryoya göre

enerji hedeflerinin tamamına sürdürülebilir olarak ulaşmak için yol haritaları çizilir. Senaryo Paris anlaşması ile tamamen uyumludur ve küresel sıcaklık artışını endüstri devrimi öncesine göre en fazla 2 °C daha yüksek olacak şekilde sabitlemeyi hedefler.

Enerji kaynaklı CO₂ emisyonlarının bu iki senaryoya göre öngörülen değişimleri Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre STEPS senaryosunda CO₂ emisyonları artarken, SDS senaryosunda 2020 yılındaki tepe noktanın ardından düşüşe geçmektedir.



Şekil 1. Çeşitli IEA senaryolarına göre CO₂ emisyonlarının projeksiyonu [3]

Yoğun olarak emisyon üreten kömür santrallerinin çoğu halen işletmededir ve ortalama yaşları da 12'dir. Dolayısıyla söz konusu enerji üretim teknolojilerinin önümüzdeki birkaç onyılıda CO₂ emisyonu üretmeye devam edeceği öngörülmektedir. Mevcut santrallerden açığa çıkan CO₂ emisyonlarının azaltılmasında kullanılabilecek en önemli alternatiflerden birisi de karbon tutulum-kullanım-depolama (CCUS) olarak gösterilmektedir.

Şekil 1'de SDS Senaryosuna göre CO₂ salınımının azaltacak enstrümanlar ve bunların hedefe katkı payları da gösterilmiştir. SDS projeksiyonuna göre CCUS teknolojileri hedeflenen CO₂ emisyonunu tuturmada %9'luk bir katkı sağlamaktadır

CCUS, karbon salınımı yapan bir prosesten kaynaklanan CO₂'nin tutulması, tutulan CO₂'nin taşınması, son olarak kullanılması ya da depolanması adımlarını kapsayan bir teknolojiler kümesinin genel adıdır. CO₂'nin tutulmasında 3 ana teknoloji alternatifi vardır.

Bunlar i) yanma öncesi tutulum, ii) yanma sonrası tutulum, iii) oksijen-yanmadır [4].

Yanma öncesi tutulum: Bu proses entegre gazlaştırma kombine çevirim (IGCC) prosesi olarak da bilinir. Bu süreçte fosil yakıt, sınırlı oksijen ortamında gazlaştırılır. Gazlaştırma sonucunda CO, H₂ ve CO₂ ile bazı kirleticiler (H₂S, COS, NH₃, HCl) içeren bir sentez gazı açığa çıkar. Çıkan sentez gazı, su gaz dönüşüm reaktörlerine gönderilerek içerisindeki CO'nun (1) numaralı denklem vasıtasıyla CO₂+H₂'ye dönüştürülmesi sağlanır.



Dönüşüm sonrası elde edilen CO₂+H₂ karışımı bir CO₂ ayırma ünitesine gönderilerek CO₂'nin tutulması sağlanır. Son durumda sadece H₂ içerikli sentez gazı bir gaz türbinine gönderilir. İçeri giren yakıtta karbon içerikli herhangi bir gaz bulunmadığından türbin egzozu sadece su buharından oluşmaktadır. Gaz türbininin çıkışındaki baca gazı atık ısısından da ilave elektrik elde edebilir. Böylelikle %43'e kadar çevirim verimine ulaşabilmektedir [5]. Bu teknolojinin en büyük dezavantajı düşük emre amadelidir. Literatüre göre kömüre dayalı IGCC sistemlerinin emre amadeligi yıl boyunca ortalama %50-70 arasında gösterilmektedir [6].

Yanma sonrası tutulum: Konvansiyonel yanma sistemlerinin baca gazı hatlarına yerleştirilen bir CO₂ ayırma sistemi sayesinde yanma sonrası CO₂ tutulumu gerçekleştirilebilir. Hava ile yakma sistemlerinin baca gazındaki CO₂ konsantrasyonu %7-14 arasındadır [7]. Yakma oksidantı olarak hava kullanıldığı için baca gazının da yaklaşık %70'ini N₂ oluşturmaktadır. Bu baca gazı kimyasal bir solventle yıkanarak içerisindeki CO₂ tutulur.

Buna göre CO₂ tutulum sisteminde iki ana kolon bulunur. Bu kolonlardan biri baca gazındaki CO₂'nin tutulduğu absorber kolonu, ikincisi ise yıkayıcı solventin rejenere edildiği desorber kolonudur. Baca gazı absorber kolonuna girer. Burada sıvı bir kimyasalla yıkanır. Bu kimyasal genellikle amin bazlı bir kimyasaldır. En sık kullanılanı ise Monoetanolamindir [8] Absorber çıkışında, içindeki CO₂'nin büyük kısmı tutulmuş olan baca gazı atmosfere salınır. Literatürde bu yöntemle baca gazındaki CO₂'nin %90'ının tutulabileceği belirtilmektedir [9]. CO₂'yi tutmuş olan sıvı çözelti ise rejenere edilmek üzere desorbere gönderilir. Desorbere CO₂'ce zengin sıvı çözelti ile beraber buhar da beslenerek

tutulan CO₂'nin salınması sağlanır. Desorberin altında rejenere edilmiş ve tekrar kullanıma hazır olan sıvı çözelti bulunurken, yukarıdaki gaz çıkışında ise saf CO₂ bulunur. CO₂ daha sonra sıkıştırılarak taşımaya hazır hale getirilir.

Oksijen-Yanma: Oksijen yanma sistemlerinde hava yerine saf oksijen kullanılır. Ancak sadece saf oksijen kullanılması durumunda yanma sıcaklıkları çok yüksek olacağından baca gazının bir kısmı tekrar yanma odasına gönderilerek soğutma etkisi sağlanır. Yani pratikte havadaki N₂ ile baca gazı yer değiştirmiş olur. Yanma ortamına hava ile N₂ girişi olmadığı için baca gazında da teorik olarak N₂ bulunmaz. Ancak atmosferik yanma sistemleri tam olarak sızdırmaz olmadıkları için gazın içerisinde bir miktar hava, dolayısıyla azot karışabilir. Yeni kurulmuş bir yakma sisteminde baca gazı debisinin %3'ü kadar dışarıdan hava girişi olabilirken bu oran eski sistemlerde %8-16 arasında değişebilmektedir [10]. Oksijen yanma sistemlerinde elde edilen baca gazında kuru bazda %80-98 arasında değişen CO₂ konsantrasyonu elde edilebilir [7]. Oksijen yanma prosesinin avantajları şöyle sıralanabilir.

i) Baca gazı, tutulmaya uygun yüksek oranda CO₂ içerir [11]. Dolayısıyla ilave bir CO₂ tutma ünitesine ihtiyaç olmaz

ii) Baca gazının bir kısmı geri döndürüldüğünde debisi azalır. Baca gazı debisi düştükçe ekipmanların boyutları da küçülür. Sistemin kurulum ve işletme maliyetleri düşer.

iii) Yanma ortamına geri döndürülen baca gazındaki NO_x, yanma ortamında NO_x oluşum mekanizmalarının ters yönde çalışmasına ve NO_x azalmasına neden olur [11]. Araştırmalara göre oksijen yanma koşullarında ortaya çıkan NO konsantrasyonu değeri, hava ile yanma koşullarında ortaya çıkan değerinden dörtte biri altına kadar düşebilmektedir [12].

Oksijen yanmanın dezavantajları ise şöyle sıralanabilir.

i) Saf oksijeni elde etme maliyeti çok yüksektir. Bu sırada kullanılan enerji yaklaşık %8,8 verim kaybına yol açabilir [13]

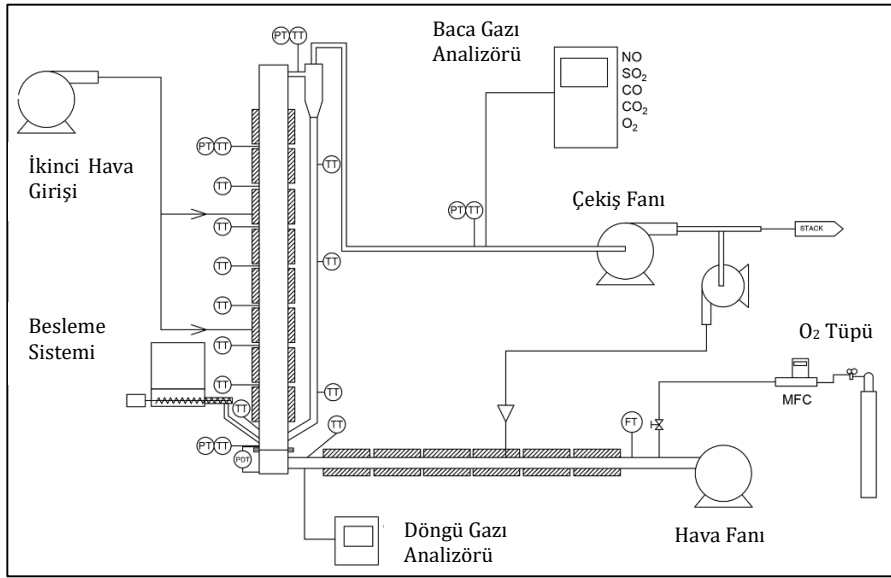
ii) Prosesite saf oksijen ve yüksek CO₂ konsantrasyonuna sahip baca gazı işletme güvenliği riski yaratmaktadır. Bu gazların dikkatli olarak ele alınması gerekir.

2. Materyal ve Metot

Türk linyitinin oksijen yanma davranışlarının incelenmesi için seçilen Tunçbilek bölgesi linyiti ile hava ile yanma ve oksijen yanma koşullarında testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Testler esnasında TÜBİTAK MAM bünyesinde bulunan 30kWth kapasiteli dolaşimli akışkan yatak yakma sistemi kullanılmıştır. Kullanılan yakıtın analizi Tablo 1’de verilmiştir.

Yakıt testlerden önce bir hazırlama sürecinden geçer. Bu kapsamda nemi <math><20\%</math> olana kadar kurutulur. Sonra da 3mm altı parçacık boyutuna gelecek şekilde kırıcıdan geçirilir.

Akışkan yataklı sisteme ait akış şeması Şekil 2’de verilmiştir. Yakıcı sistem 108mm iç çap ve 6m yüksekliğe sahiptir. Çıkışında bir siklon bulunur. Siklonda tutulan katı parçacıklar geri dönüş ayağı vasıtasıyla tekrar yatağa döndürülür. Bu şekilde katı dolaşımı sağlanmış olur. Siklondan çıkan baca gazı ikinci bir siklondan geçerek önce torba filtreye gönderilir. Torba filtre çıkışındaki çekiş fanından geçtikten sonra da bacaya gönderilir. Oksijen yanma deneyleri için çekiş fanı çıkışında, bacadan önce bir hat ayrımı olur ve gazın bir kısmı bacadan atılırken bir kısmı da ikinci bir çekiş fanından geçerek tekrar yakıcıya gönderilir.



Şekil 2. 30kWth Dolaşimli akışkan yatak yakma sistemi akım şeması

Deneyler sistemin elektrikli ısıtıcılarla ısıtılmasıyla başlar. Elektrikli ısıtıcılar hem yakıcının doğrudan üstünde bulunur hem de içeri giren havayı ısıtır. Yatak sıcaklığı yaklaşık 400 °C’ye ulaştığında yakıt beslenmeye başlar. Sıcaklık artışı yavaş ancak düzenlidir. Sistem 800-850 °C sıcaklık arasına geldiğinde yanma dengeye ulaşmış olur ve gaz analizi alınmaya başlar.

Tablo 1 Tunçbilek Linyiti Yakıt Analizi

	Parametre	Birim	Orjinal Baz	Kuru Baz
Kısa Analiz	Nem	% ağırlık	14,14	-
	Kül	% ağırlık	11,87	13,83
	Uçucu Madde	% ağırlık	33,84	39,41
	Sabit Karbon	% ağırlık	40,16	46,77
	Alt Isıl Değer	cal/g	5082	6009
Elemental Analiz	C	% ağırlık		65,15
	H	% ağırlık		4,76
	N	% ağırlık		1,38
	S	% ağırlık		1,17
	Kül	% ağırlık		13,83
	O	% ağırlık		13,71

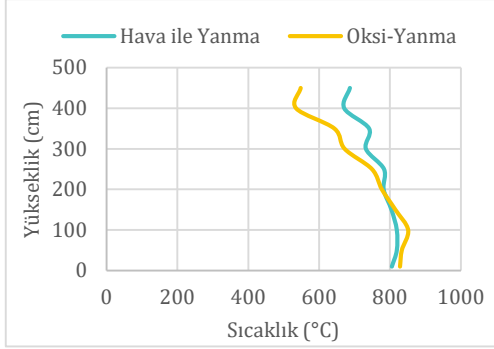
Tüm deneyler hava ile yakma koşullarında başlar. Eğer oksijen yakma yapılmak isteniyorsa sistem hava ile yanma modunda dengeye geldikten sonra oksijen yanma moduna geçilir. Buna göre birinci hava besleme hattına bağlı saf oksijen besleme vanası kontrollü olarak açılarak besleme hattına saf oksijen verilir. Bu aşamada beslenen saf oksijen kadar oksijen içeren hava debisi kısılr. Örneğin 1m^3 saf oksijen beslenince aynı anda içerisinde 1m^3 oksijen bulunan yaklaşık 4.76m^3 hava kısılr. Böylelikle içeri beslenen oksijenin miktarı değişmemiş olur. Ancak hava yerini saf oksijene bıraktığında azotun soğutma etkisi de kaybedildiğinden yatak sıcaklıkları yükselmeye başlar. Sıcaklığı kontrol etmek için eş zamanlı olarak baca gazının bir kısmı geri döndürülmeye başlanır. Havanın kısılması, oksijenin beslenmesi ve baca gazının döndürülmesi eş zamanlı olarak yapılan çok hassas bir işlemdir. Bu mod değiştirme sürecinde hem sıcaklık hem gaz konsantrasyonu hem de akışkanlaşma koşulları kontrol edilmeye çalışılır. Hava tamamen kısıldıktan ve yerini saf oksijen/baca gazı karışımına bıraktıktan sonra sistemin dengeye gelmesi beklenir. Sistem sıcaklıkları ve baca gazı konsantrasyonu dengeye ulaştığında sistem dengeye ulaşmış kabul edilir. Sistemde oluşan gazın bileşimi torba filtre çıkışından gaz analizörü yardımıyla ölçülür. Oksijen yanma deneyleri sırasında ikinci bir gaz analizörü de içeri giren O_2 /Baca gazı karışımının içeriğini analiz eder. Böylelikle hem giren hem de çıkan gaz konsantrasyonları sürekli kontrol altında tutulmuş olur. Çalışma kapsamında Tunçbilek Linyiti hem hava hem de oksijen-yanma koşullarında test edilmiştir. İki testin sonuçlarının kıyaslanabilir olması için baca gazındaki oksijen miktarı %4 civarında sabit tutulmuştur. Bu şekilde her iki test için de hava yakıt oranının aynı olduğu kabul edilmiştir. Oksijen yanma koşullarında baca gazının yaklaşık %60'ı geri döndürülmüştür. Her iki test için işletme parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Sistem üzerinde farklı yüksekliklerde toplam 10 adet sıcaklık ölçer bulunmaktadır. Sıcaklık ölçerlerden yakıcının ilk 1,5m yüksekliğinde bulunan dört tanesinin ortalaması *yatak ortalaması*; sonraki altı tanesinin ortalaması *serbest bölge ortalaması*; tüm sıcaklık ölçerlerin ortalaması ise *sistem ortalaması* olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2 Deney parametreleri

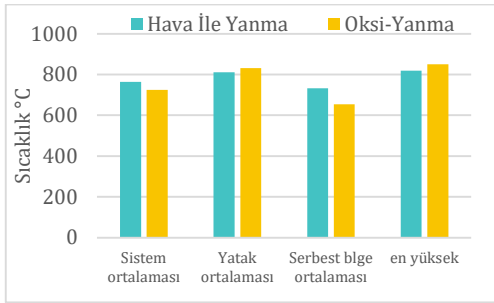
Parametre	Birim	Hava ile Yanma	Oksijen Yanma
Baca gazındaki O_2 oranı	% Hacim	4	4
Yakma oksidant içeriği		O_2/N_2	O_2/CO_2
Yanma havasındaki O_2 oranı	% Hacim	21	21
Baca gazı geri döndürme oranı	% Hacim	-	60

3. Bulgular

Sıcaklıklar: Sistemde yakıcı boyunca sıcaklık dağılımları ile ortalama sıcaklık değerleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Buna göre oksijen yanma koşullarında yatak bölgesinin ortalama sıcaklığı hava ile yanmaya göre daha yüksektir. Öte yandan serbest bölge ve tüm sistem ortalama sıcaklıkları hava ile yanma koşullarında daha yüksektir. Bu durumun en önemli nedeni CO_2 'nin özgül ısısının N_2 'den yüksek olmasıdır. Her iki testte de O_2/N_2 ve O_2/CO_2 karışımlarının içerisindeki O_2 oranları aynı olduğu için oksijen yanma koşullarında daha düşük ortalama sıcaklığın elde edilmesi beklenen bir sonuçtur. Öte yandan yatak bölgesinde oksijen yanma koşullarında daha yüksek sıcaklık elde edilmiştir. Bunun muhtemel nedeni saf O_2 ile geri döndürülen baca gazının yakıcıya girişten hemen önce karıştırılmasıdır. Muhtemelen iki gaz akımı homojen olarak karışacak zamanı bulamadan yakıcının içerisine girmiş, gazın ilk girdiği yer olan yatakta lokal olarak değişik O_2 konsantrasyonları oluşmuştur. O_2 konsantrasyonunun yüksek olduğu noktalarda daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir.

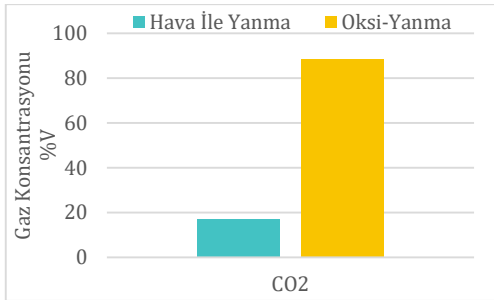


Şekil 3. Yakıcı boyunca sıcaklık dağılımı



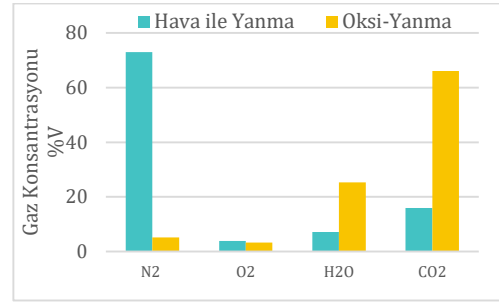
Şekil 4. Hava ve oksiyanma koşullarında ortalama sıcaklıklar

Emisyonlar: Hava ile yakma ile oksiyakma koşullarında elde edilen baca gazı içeriklerinin karşılaştırılması Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Orjinal bazda baca gazı içerikleri karşılaştırıldığında hava ile yanma testlerinde yaklaşık %16 oranında CO₂ elde edilmişken, bu oran oksiyanma koşullarında %66'ya çıkmıştır. Oksi yanma koşullarındaki CO₂ oranı kuru bazda değerlendirildiğinde %88'e çıktığı görülür.

Şekil 5. Kuru bazda baca gazındaki CO₂ konsantrasyonu

Baca gazının azot içeriğinin de hava ile yanmadan oksiyanmaya geçerken %73'ten %5'e

düştüğü görülmektedir. Teorik olarak oksiyanma koşullarında baca gazında sadece yakıttan gelen azot kaynaklı bir azot gazı bileşeni görülmesi beklenir. Ancak pratikte yakma sistemleri tam olarak hava sızdırmaz değildir. Sistemin en sonunda bulunan çekiş fanı dolayısıyla yakıcının çıkışından başlayarak fana kadar olan kısım atmosfer altı basınçta çalışır. Bu hat üzerindeki ekipmanlara dışarıdan hava girmesi muhtemel ve beklenen bir durumdur. Oksi yanma testlerinde görülen %5 civarında bir azot miktarı da içeriye giren havadan kaynaklanan ancak atmosferik koşullarda çalışan bir yakma sistemi için kabul edilebilir bir orandır.

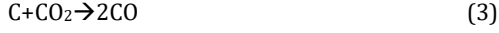


Şekil 6. Baca gazındaki ana gaz bileşenleri

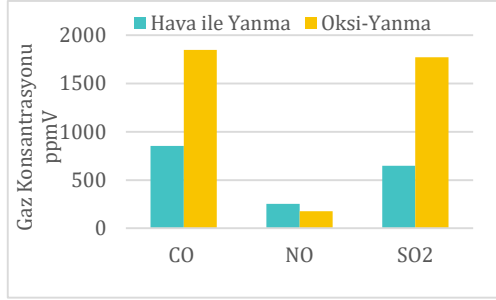
Su buharı oranlarına bakıldığında yine oksiyanma koşullarında daha yüksek bir su buharı çıkışı olduğu görülür (%25). Bunun önemli bir nedeni baca gazının geri döndürülmesidir. Geri döndürülen baca gazı nedeniyle sistemde bir miktar su buharı birikmesi gerçekleşmektedir. Yakma sistemlerinde baca gazı 150-160 °C sıcaklıklarda atmosfere salınmaktadır. Bunun en önemli nedeni SO₃ yoğunlaşmasını engellemektir. Bu sıcaklıklarda atmosfere salınan baca gazından ve özellikle baca gazındaki su buharından dolayı önemli ölçüde bir ısı kaybı olmaktadır. Dolayısıyla su buharı, yakma sistemlerinde verim kaybına yol açar. Konvansiyonel hava ile yakma sistemlerinde baca gazındaki su buharının kaynağı, havadaki nem, yakıttaki nem, ve yakıttaki H₂'nin yanmasıyla oluşan su buharıdır. Dolayısıyla atmosfer havası içerisinde önemli ölçüde bulunan nem, verim kaybına yol açan nedenler arasındadır. Oksiyanmada kullanılan saf oksijen kurudur ve nem içermez. Bu nedenle baca gazında konsantrasyon olarak daha yüksek bir su buharı olsa da toplam miktar olarak üretilen su buharı azalmaktadır.

Hava ve oksijen yanma koşullarında açığa çıkan CO, NO ve SO₂ emisyonları Şekil 7'de gösterilmiştir.

CO emisyonlarının hava ile yakma koşullarında 800 ppm iken oksijen yanma koşullarında 1800ppm'e çıktığı görülmektedir. CO oluşumunda etkili olan iki reaksiyon aşağıda verilmiştir.



Oksijen yanma koşullarındaki yüksek CO konsantrasyonunun iki nedeni vardır. Birincisi oksijen yanma koşullarında ortalama sıcaklık daha düşüktür. Yanma sırasında (2) numaralı reaksiyon üzerinden gerçekleşen CO oluşumu egzotermik bir reaksiyondur ve sıcaklık arttıkça azalır. Dolayısıyla sıcaklığın düşük olduğu oksijen yanma koşullarında hava ile yanmaya göre daha fazla CO oluşması beklenen bir durumdur. Yüksek CO konsantrasyonunun diğer bir nedeni de yanma ortamında bulunan CO₂ kısmi basıncının yüksek olmasıdır. Bu durumda çar etrafında kümelenen CO₂ nedeniyle (3) numaralı reaksiyon üzerinden CO oluşumu artar.



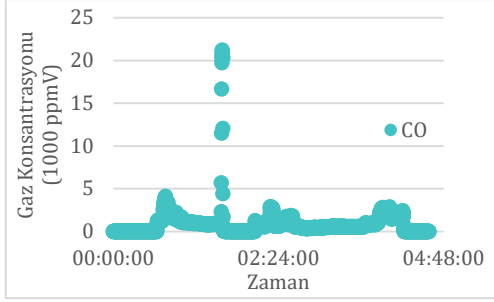
Şekil 7. Baca gazı emisyonları

Akışkan yatak yakma sistemlerinde en önemli NO_x oluşma mekanizması yakıttaki N₂'nin NO'ya dönüşmesidir. Termal NO oluşumu ise düşük çalışma sıcaklıkları nedeniyle ve ayrıca ortamda hava ile gelen azot olmaması nedeniyle beklenmez. Öte yandan yakıttaki N₂'nin NO'ya dönüşmesi çok karmaşık bir mekanizmadır ve halen tam olarak ortaya konulabilmiş değildir. NO konsantrasyonu hava ile yanma deneyinde 250ppm iken oksijen yanma deneyinde 170ppm'e kadar inmiştir. Bunun nedeni yanma ortamına geri döndürülen NO_x gazıdır. İçeri geri döndürülen NO_x, içerideki NO_x oluşum mekanizmasının bir kısmının tersine çalışmasına neden olur ve NO_x yıkımı gerçekleşir. Hava ile yanmaya göre daha düşük

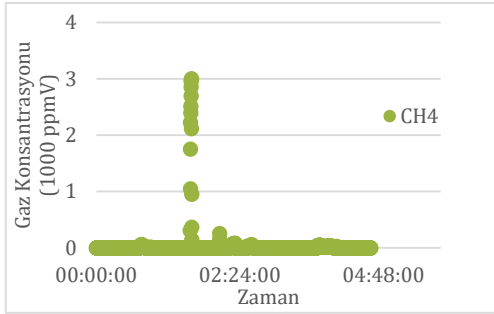
NO_x oluşumu oksijen yanma sistemlerinin en önemli avantajlarından bir tanesidir.

Hava ile yakma koşullarında oluşan SO₂ 640ppm iken Oksijen yanma koşullarında bu oranın üç katına çıkarak yaklaşık 1800ppm'e ulaştığı görülmektedir. SO₂ oluşmasında NO_x oluşumunda olduğu gibi tersine çalışan bir mekanizma bulunmamaktadır. Birim yakıt başına ortaya çıkan SO₂ miktarı hem oksijen yanma hem de hava ile yanma koşullarında benzer olmasına rağmen oksijen yanmada baca gazı ile SO₂'nin bir kısmı tekrar yanma ortamına döndürüldüğünden birikime yol açmakta ve konsantrasyonu çok yükselmektedir. Bu durum akışkan yatak sistemlerinde yatak içi SO₂ tutulum yöntemleriyle bir miktar baskı altına alınabileceksene de yine de baca gazı hattı üzerinde SO₂ tutulumuna yönelik ilave önlem alınmasını gerektirmektedir.

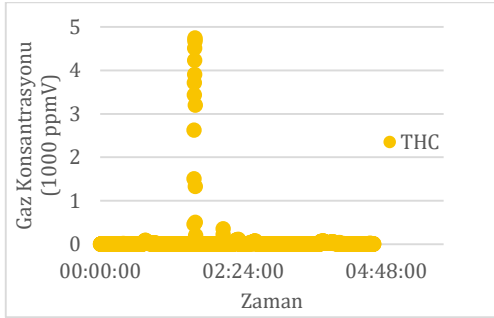
Hava ile Yanmadan Oksijen Yanmaya geçiş: Oksijen yanma prosesinin en zorlu adımı hava ile yanmadan oksijen yanmaya geçiş yani mod değiştirme sürecidir. Bu süreç metodoloji bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır. Bu süreçte baca gazı geri döndürülmeye başlatıldığından itibaren yanma gazlarındaki CO, CH₄ ve toplam hidrokarbon (THC) miktarlarında çok büyük artışlar görülebilmektedir. Yapılan deneyde oksijen yanmaya geçişteki konsantrasyon değişimleri Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre anlık olarak CO, CH₄ ve THC konsantrasyonları sırasıyla 20000, 3000 ve 5000ppm'e çıkmıştır. Yanıcı ve zehirli gaz özelliği taşıyan bu gazların bu kadar yüksek oranlara çıkması ticari sistemlerde kabul edilemez bir durumdur. Saf oksijen ilavesi, havanın kısılması ve baca gazının geri döndürülmesi işlemlerinin kademeli olarak gerçekleştirilmesi sırasında ortaya çıkan bu durumun en büyük nedeni ölçüm ve kontrol ekipmanlarının tepki süresindeki gecikmelerdir. Mod değiştirme işlemi giren ve çıkan baca gazı konsantrasyonları ile giren, çıkan ve geri döndürülen gaz akımlarının debilerinin ölçülmesi ve kontrol edilmesi yoluyla gerçekleştirilmektedir. Ölçüm ekipmanlarından okunan değerlere göre kontrol ekipmanlarına, vana, motor ve kütleli debi kontrol cihazlarına komutlar gönderilmektedir. Ölçüm ekipmanlarındaki saniyeler mertebesindeki tepki süreleri zaten çok kısa sürede gerçekleştirilen mod değiştirme sürecini olumsuz yönde etkileyebilmektedir.



Şekil 8. Hava ile yanmadan oksijen yanmaya geçiş sırasında CO konsantrasyonundaki değişim



Şekil 9. Hava ile yanmadan oksijen yanmaya geçiş sırasında CH4 konsantrasyonundaki değişim



Şekil 10. Hava ile yanmadan oksijen yanmaya geçiş sırasında Toplam Hidro Karbon konsantrasyonundaki değişim

4. Tartışma ve Sonuç

21/79 O₂/CO₂ (oksi yanma) ortamında gerçekleşen yanma sonucunda ulaşılan ortalama sıcaklık 21/79 O₂/N₂ (hava) yanma ortamında gerçekleşen yanma sonucunda ulaşılan sıcaklıktan daha düşüktür. Bu durum CO oluşumunu arttırdığı gibi ticari ölçekli bir sisteme geçildiğinde ısı transferini de olumsuz yönde etkileyecektir. Oksi yanma koşullarında sıcaklığın daha yüksek tutulması için O₂/CO₂

karışımındaki O₂ oranının artırılması gerekmektedir. Birim yakıt başına gönderilen O₂ sabit olduğuna göre aynı termal kapasitede O₂ oranını arttırmak sadece içeri beslenen CO₂ miktarını azaltmakla mümkündür. Başka bir deyişle geri döndürülen baca gazı miktarı azaltılmalıdır.

Oksi yanma koşullarında baca gazında kuru bazda yaklaşık %88 CO₂ elde edilmiştir. Bu değer literatürde belirtilen %80-95 aralığında kalmaktadır [7]. Hava ile yanma ile kıyaslandığında oksi yanma sonucunda CO ve SO₂ emisyonlarında artış görülürken, NO_x emisyonlarında azalma tespit edilmiştir. O₂/CO₂ oranını arttırmak hem sıcaklık artışına hem de ortama beslenen CO₂ miktarında azalışa neden olacağından CO oluşumu azalacaktır. SO₂ emisyonlarını azaltmak ise akışkan yataкта yatak içi SO₂ tutulumu amacıyla kireç taşı beslenmesi ile mümkündür. Ancak bu da yeterli olmayacak ilave bir SO₂ tutuma ünitesi gerekecektir.

Hava ile yanmadan oksi yanmaya geçişte karşılaşılan yüksek CO, CH₄ ve THC oranlarını azaltmak için mod değiştirmeden hemen önce yanma ortamındaki O₂ konsantrasyonu artırılabilir. Ancak yüksek O₂ konsantrasyonu oluşabilecek CO, CH₄ ve THC ile tepkimeye riski taşımaktadır. O₂ artışı kontrollü olarak gerçekleştirilmelidir.

Tunçbilek kömürünün hava ile yanma (21/79, O₂/N₂) ve oksi yanma (21/79 O₂/CO₂) koşullarında testleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar şunlardır

- Oksi yanma koşullarında baca gazında kuru bazda %88 oranında CO₂ elde edilmiştir.
- Hava ile yanmada 250ppm olan NO_x oksi yanmada 170ppm'e düşmüştür.
- Oksi yanmada CO, SO₂ konsantrasyonlarının her ikisi de yükselmiştir.
- Oksi yanmada ortalama sıcaklık hava ile yanmaya göre daha düşüktür.

Oksi yanmada daha yüksek sıcaklıklar elde etmek, böylelikle CO oranlarını düşürmek için ileriki çalışmalarda O₂/CO₂ karışımındaki O₂ oranının %30'a kadar artırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsü altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynakça

- [1] Birleşmiş Milletler 2019. World Population Progress, <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html> (Erişim Tarihi: 09.01.2020).
- [2] IEA (2019), "World Energy Outlook 2019", IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>. (Erişim Tarihi: 09.01.2020)
- [3] IEA (2019), "CO2 emissions reductions by measure in the Sustainable Development Scenario relative to the Stated Policies Scenario, 2010-2050", IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-reductions-by-measure-in-the-sustainable-development-scenario-relative-to-the-stated-policies-scenario-2010-2050> (Erişim Tarihi: 17.03.2020)
- [4] Elias, R.S., Wahab, M.I.M., Fang, L., 2018. Retrofitting carbon capture and storage to natural gas-fired power plants: A real-options approach. *Journal of Cleaner Production*, Cilt 192, s. 722-734. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.05.019
- [5] Zhang, J., Zhou, Z., Ma, L., Li, Z., & Ni, W., 2013. Efficiency of wet feed IGCC (integrated gasification combined cycle) systems with coal-water slurry preheating vaporization technology. *Energy*, Cilt 51, s. 137-145. DOI:10.1016/j.energy.2012.12.024
- [6] Laugwitz, A., Gräbner, M., Meyer, B., 2011. Availability analysis of integrated gasification combined cycle (IGCC) power plants, in: *Power Plant Life Management and Performance Improvement*. S. 110-142. DOI:10.1533/9780857093806.1.110
- [7] Leung, D.Y.C., Caramanna, G., Maroto-Valer, M.M., 2014. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 39, s. 426-443. DOI:10.1016/j.rser.2014.07.093
- [8] Kárászová, M., Zach, B., Petrusová, Z., Červenka, V., Bobák, M., Šyc, M., and Izák, P., 2019. Post-combustion carbon capture by membrane separation, Review. *Separation and Purification Technology*. DOI:10.1016/j.seppur.2019.116448
- [9] Dave, N., Do, T., Palfreyman, D., & Feron, P. H. M. 2011. Impact of post combustion capture of CO2 on existing and new Australian coal-fired power plants. In *Energy Procedia*, Cilt 4, s. 2005-2019. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.02.082
- [10] Kim, S., Ahn, H., Choi, S., & Kim, T. 2012. Impurity effects on the oxy-coal combustion power generation system. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Cilt11, s. 262-270. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.09.002
- [11] Buhre, B. J. P., Elliott, L. K., Sheng, C. D., Gupta, R. P., & Wall, T. F. 2005. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. *Progress in Energy and Combustion Science*. Cilt 31, s. 283-307 DOI: 10.1016/j.pecs.2005.07.001
- [12] Liu, H., Okazaki, K., 2003. Simultaneous easy CO2 recovery and drastic reduction of SOx and NOx in O2/CO2 coal combustion with heat recirculation. *Fuel*, Cilt 82, s. 1427-1436. DOI:10.1016/S0016-2361(03)00067-X
- [13] Burdyny, T., Struchtrup, H., 2010. Hybrid membrane/cryogenic separation of oxygen from air for use in the oxy-fuel process. *Energy*. Cilt 35, s. 1884-1897. DOI: 10.1016/j.energy.2009.12.033