

Bu şekilde ülkemizin enerji gereksiniminin önemli bir kısmı ve bazı temel kimyasalların kömürden temiz bir şekilde eldesinin önü açılmış olacaktır. Tüm bu çalışmalar petrol ve doğalgazda dışa bağımlılığımızın ve cari açığımızın azalmasına; rekabet gücümüzün ve yenilikçiliğin artmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

Günümüzde gazlaştırma teknolojisinin en önemli uygulama alanlarından birisi enerji ve kimyasallar üretimi amacıyla kömürün gazlaştırılmasıdır. Ancak, gazlaştırmada organik atıklar da en az kömür kadar güçlü bir hammadde alternatifi olabilmektedir. Tüm dünyada evsel, endüstriyel atıklarla birlikte biyokütle-nin gazlaştırılmasına yönelik ilgi ve ticari uygulamalar hızla artmaktadır. Dolayısıyla, İTÜ’de kurulacak merkezde kömür gazlaştırma teknolojileri konusunda üretilecek veriler ve elde edilecek tecrübeler, benzer şekilde atıklardan enerji ve kimyasallar üretimi konusunda da kullanılabilecektir [6].

7. DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA LİNYİT ve BİYOKÜTLE-KÖMÜR KARIŞIMLARININ YAKILMASI

Türkiye birincil enerji temini yönünden dışa bağımlı bir ülkedir. Yıllık bazda toplam enerji talebinin yaklaşık %72’si ithalatla karşılanmaktadır. Türkiye’nin enerji politikalarında artan talebin daha çok yerli kaynaklardan elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ancak, yerli linyitlerimiz mevcut eski santrallerde düşük verim (%22-25) ve yüksek emisyonlarla yakılmaktadır. Ülkemiz linyit kömürleri genel olarak kül ve kükürt oranları yüksek olan kömürlerdir. Kükürt içeriği %1’den %10’a kadar değişmektedir. Pulverize kömür (PK) santrallerinde geleneksel yöntemlerle yakılan yüksek kükürt içerikli linyitlerden kaynaklanan SO₂’nin tutulması için Baca Gazı Desülfürizasyon (BGD) sistemi kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem gerek işletme, gerekse kurulum masrafları açısından oldukça maliyetlidir. Bu tür yüksek kükürt içeren kömürler akışkan yataklı yakıcılarda yakıldığında, yakıcıya kireçtaşı eklenmekte ve oluşan SO₂ yatakta yanma sırasında tutulmaktadır. Bu çalışmalar Dolaşımli Akışkan Yatak (DAY) sistemlerinde de yapılmış, son olarak 2012 de bitirilen KAMAG-1007 (105G023) projesinde DAY sisteminde yakılan linyit kömürlerinden oluşan SO₂ gazı, kireçtaşı ile tutulmuştur. Bu tip düşük kaliteli yakıtların daha verimli ve daha temiz bir şekilde kullanılmasına yönelik yoğun bir Ar-Ge ve teknoloji uygulama çalışmaları da sürmektedir. Bu bağlamda düşük kaliteli linyitlerin uygun bir teknoloji olan Dolaşımli Akışkan Yatakta yakılması, hem verimi arttırmakta, hem de emisyonların daha ucuz ve etkin şekilde tutulmasını sağlamaktadır. Ülkemizde kullanılmayan büyük miktarda atık biyokütle de bu-

lunmaktadır. Özellikle orman altı atıkların bertarafı, orman yangınlarının önlenmesi için önemlidir. Biyokütle, aynı zamanda kükürt içeriği hemen hemen sıfır, CO₂ emisyonu açısından da nötr bir maddedir. Bu nedenle düşük kaliteli kömürlerle birlikte yakılması çok uygun olmaktadır [21].

Bu çalışma, bir TÜBİTAK-KAMAG Projesi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Proje adı: “BİYOKÜTLE ve BİYOKÜTLE/KÖMÜR KARIŞIMLARINI DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA YAKMA TEKNOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ” dir [22].

- Proje Kodu: 105G023 (Alt projeler:107G049 ve 107G050)
- Proje başlama tarihi: 1 Ekim 2007, Proje bitiş tarihi: 1 Mart 2012

Bu çalışmanın amacı,

- Ülkemizdeki ulusal kaynaklarımızı enerji üretiminde daha fazla kullanabilmek amacı ile düşük ısı değerli linyit kömürlerimizi biyokütle ile beraber yakarak kısa ve orta vadede bu kaynaklardan temiz enerji üretiminin artmasını sağlamak, en azından bir miktar kömür kullanımını kükürt miktarı sıfır olan temiz yakıtla ikame etmek,
- Atıl vaziyette duran biyokütle enerjisinden yararlanmak,
- Küçük ve orta boy işletmelerin enerji ihtiyacını kendilerinin karşılayabilmesine yönelik sistemler geliştirmek,
- Biyokütle, linyit ve bunların karışımlarını (linyit + biyokütle) düşük emisyon ve yüksek verimle yakabilecek enerji üretim sistemlerinden “Dolaşımli Akışkan Yatakta Yakma” (DAY) teknolojisini ülkemizde geliştirmek,
- Isı ve elektrik enerjisini birlikte üretebilecek **ko-jenerasyon sistemlerinin** yaygınlaşmasına yardımcı olmak,
- Enerji güvenliğini arttırmak,
- DAY sistemi için bir **enerji üretim-bilgi paketi (know-how)** oluşturmaktır.

7.1 Kullanılan Sistemler ve Malzemeler

Laboratuvar Ölçekli DAY Sistemi – 30 kW_t

Öncelikle laboratuvarında ön yakma deneylerini yapmak için 10 cm iç çapında ve 6 m yüksekliğinde bir sistem kurulmuştur [21]. Laboratuvar ölçekli DAY sisteminin PID diyagramı Şekil 10’da verilmiştir.

Deneylerde Bursa-Orhaneli ve Bolu-Göynük linyit kömürleri, biyokütle olarak kızılçam parçaları kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan yakıtların analiz sonuçları Tablo 7’de verilmiştir [21]. En fazla kül oluşumu Bolu-Göynük linyit kömüründe gözlenirken

(24,59%), en düşük oranda kül kızılçam parçalarının dan çıkmıştır (1,88%).

Yatak sıcaklığı 800-850°C'da tutulmuş, hava fazlalık katsayısı, Ca/S oranı parametre olarak alınmıştır. Tüm baca gazı emisyonları, baca gazı analiz sistemleri ile ölçülmüştür. Ön deneyler bu sistemde yapılmış, daha sonra gerekli deneyler pilot sistemde tekrarlanmıştır [21].

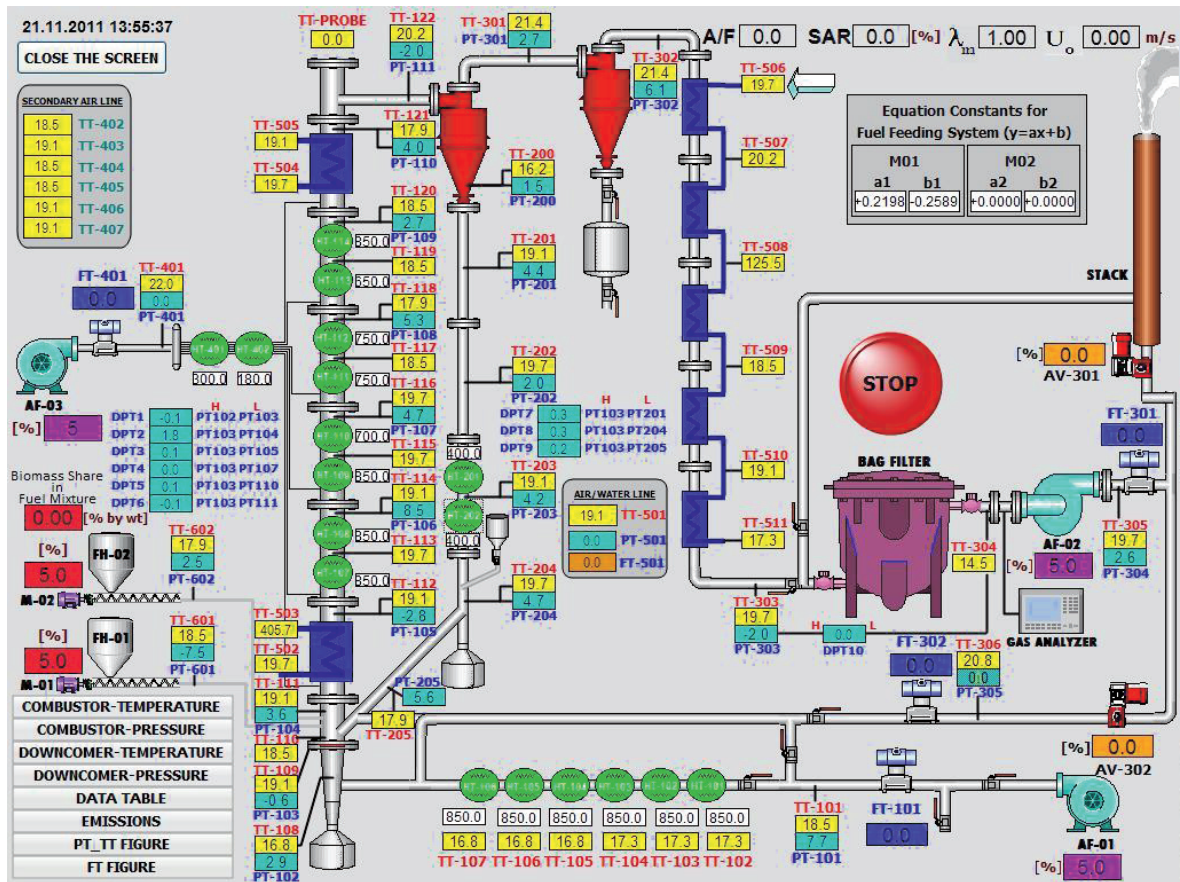
Pilot Ölçekli DAY Sistemi – 0,7 MW_i

MAM'da ülkemizde yerleşmesi arzu edilen Dolaşım Akışkan Yatak (DAY) teknolojisi ile çalışan bir Yakma ve Kazan sistemi kurulmuştur. Böyle bir Pilot

DAY sistemi Türkiye'de ilk defa kurulan bir sistemdir. Bu sistemde yakma ve buhar üretimi çalışmaları yapılmıştır. Sistemin gücü 700 kW termiktir. 24 bar ve 260°C de, 800 kg/saat buhar üretmektedir. Boyutları: 40cmx40cm kesit, H = 12 m (ızgaradan itibaren) dir. Duvarlar da 15 cm ateş tuğlası ile kaplıdır [21].

Pilot Sistemdeki Üniteler

1. Yakıt ve kireçtaşı besleme ünitesi, 2. Dolaşım akışkan yatak (DAY), 3. Kabarcıklı akışkan yatak (KAY), 4. Siklonlar, 5. Kazan ünitesi, 6. Hava besleme ve çekiş fanları, 7. Kül boşaltma ünitesi, 8. Kontrol ünitesi, 9. Emisyon ölçüm ünitesi, 10. Torbalı Filtre, 11. Yardımcı üniteler.



Şekil 10. Laboratuvar ölçekli DAY sisteminin PID diyagramı (Kaynak [21]'den ekran alıntısı).

Tablo 7. Deneylerde kullanılan yakıtların analiz sonuçları.

	Nem*	Uçucu Madde*	Kül*	Sabit Karbon*	Uçucu Madde**	Kül**	Sabit Karbon**
Bursa-Orhaneli	30,14	33,06	12,04	24,76	47,31	17,23	35,46
Bolu-Göynük	33,91	26,20	16,26	23,65	39,63	24,59	35,77
Kızılçam	17,01	65,27	1,56	16,16	78,65	1,88	19,47
	% C	% H	% N	% Top. S	% O*	% Kül	
Bursa-Orhaneli	60,03	3,15	0,56	2,05	16,98	17,23	
Bolu- Göynük	55,57	10,29	1,73	2,89	4,93	24,59	
Kızılçam	56,26	8,09	0,24	0	32,72	1,88	
Kalorifik Değer**	Üst Isıl** (kcal/kg)	Alt Isıl** (kcal/kg)					
Bursa-Orhaneli	5281	4992					
Bolu-Göynük	4925	4725					
Kızılçam	4852	4553		*Islak baz, **Kuru baz			

* Orijinal Baz (% ağırlıkça), ** Kuru Baz (% ağırlıkça)

Kaynak: [21]

7.2 DeneySEL Sonuçlar

Pilot sistemde yakma deneyleri üç ana başlık altında yapılmıştır :

- Tek başına Kömür
- Kömür+ Kireçtaşı (Ca/S= 3)
- Kömür- Kızılçam karışımı (%70 kömür + %30 kızılçam)

Fazla Hava Katsayısının Sıcaklık Profili Üzerindeki Etkileri

Dağıtıcı plakadan itibaren yatak içinde yükseklik arttığında sıcaklık da artmaktadır. Yatak malzemesinin bulunduğu bölgede sıcaklık 800°C civarında iken, üst kısımlara yükseldikçe sıcaklık artmakta, sonra azalmaktadır. 4 m. yükseklikte maksimum 900-950 °C'a ulaşmaktadır. Kömür ve kızılçam parçalarının beraberce yakıldığı durumda, kızılçam içinde bulunan uçucu maddelerin yanmasının daha uzun sürmesinden dolayı sıcaklık, yanma kolonunun en üst kısımlarında bile (yaklaşık 12 m) 800 °C civarında olmaktadır. Maksimum sıcaklık artışı, kömür için 100-120 °C, kömür ve kızılçam karışımı için 150 °C civarındadır.

SO₂ emisyonları çok yüksektir, 3000 mg/Nm³ ün, yani standartlarda belirtilen değer üzerindedir. Yanma sırasında yatağa kireçtaşı ilave edildiğinde (Ca/S=3), SO₂ emisyonları 800-900 mg/Nm³ seviyesine kadar düşmektedir. Diğer emisyonların değerleri çok

düşüktür. Sadece N₂O konsantrasyonu kayda değer miktarda olup 50-80 mg/Nm³ seviyesinde seyretmektedir [21].

Yapılan çalışmada tüm emisyon değerleri %6 oksijene göre normalize edilmiştir. Bolu-Göynük linyitinde de benzer sonuçlar görülmüştür. Ancak, Bolu-Göynük linyiti uçucu maddesi az, kalori değeri daha düşük ve külü fazla olan bir linyittir. CO emisyonları hava fazlalık katsayısı (λ) arttıkça önce azalmış, sonra çok değişmemiştir. NO emisyonlarının hava fazlalık katsayısının artmasıyla arttığı, yaklaşık 250 mg/Nm³ arasında sabit kaldığı görülmüştür [21]:

Bolu-Göynük linyitinde SO₂ emisyonları çok yüksektir, 3500-4000 mg/Nm³ ün, yani standartlarda belirtilen değerler üzerindedir (kömürde kükürt oranı ağırlıkça %2,89). Yanma sırasında yatağa kireçtaşı ilave edildiğinde (Ca/S=3), SO₂ emisyonları 1000-1500 mg/Nm³ seviyesine kadar düşmektedir. Diğer emisyonların değerleri çok düşüktür. Sadece N₂O konsantrasyonu kayda değer miktarda olup 50-100 mg/Nm³ seviyesine seyretmektedir. Kömür %30 kızılçam parçaları ile yakıldığında ise λ arttıkça CO değeri azalmaktadır, bu da artan oksijen miktarı ile daha iyi bir yanma olduğunu göstermektedir. NO değerinde ise artış gözlenmiştir, çünkü CO, NO için indirgen bir ortam sağlamaktadır. CO nun değeri azalırken NO

değerinin artması normaldir. Kömüre %30 biyokütle katıldığında kireçtaşı ilave edilmediği halde SO₂ konsantrasyonu kısmen 2000-2500 mg/Nm³ e kadar azalmaktadır. Nedeni ise eklenen biyokütle içinde kükürt oranının sıfır olmasıdır. Dolayısı ile kömüre biyokütle katıldığında daha az SO₂ oluşmaktadır [21].

Elde edilen sonuçlar, DAY sisteminin linyit kömürleri ve biyokütle-kömür karışımı için uygun yakma sistemi olduğunu göstermiştir [21].

- Orhaneli linyiti: Yanma verimi (C- dengesinde): a) %96,3, b) %95,4 ve c) %99,2 olarak bulunmuştur.
- Bolu-Göynük linyiti: Yanma verimi (C- dengesinde) a) %92,0, b) %91,85 ve c) %94,8 bulunmuştur.
- Emisyonlar: CO emisyonu fazla hava oranı ile azalmakta, CO azaldıkça NO emisyonu artmaktadır. Biyokütle eklenmesi ile yanma çok daha iyileşmekte, yanma verimi artmaktadır.
- SO₂ emisyonu kireçtaşı ilavesi ile düşük düzeylere indirilmektedir. NH₃, N₂O, HCl ve HCN emisyonu çok azdır.
- Bu projeden elde edilen deneyim ile DAY sisteminin Türkiye’de enerji üretiminde yaygınlaşmasının gerektiği, tasarım ve imalatının ülkemizde gerçekleştirilebileceği ve yeterli sanayi birikiminin olduğu görülmüştür.
- Bu konudaki Ar-Ge’nin devam etmesi gereklidir. Bu alt yapı ile daha geliştirilmiş projeler yapılmalıdır.
- Bu projelerden birisi hemen DAY projesinin arkasından başlattığımız ve yine TÜBİTAK tarafından desteklenen oksji-yanma projesidir.

8. OKSİ-YANMA TEKNOLOJİLERİ

Oksji-yanma (oxy-fuel combustion), son yıllarda gelişen ve kömürün yanmasını ve CO₂ tutmayı bir arada gerçekleştirmeye olanak veren bir teknolojidir. Böylece bu teknoloji, kömüre dayalı elektrik üretimini CO₂ emisyonları radikal bir şekilde azaltarak daha temiz bir şekilde gerçekleşmesini mümkün kılabilir [23]. Oksji-yanmada, kömür hava yerine O₂/CO₂ karışımıyla yakılmaktadır. Bunun için baca gazları belirli oranlarda geri döndürülerek O₂ ile karıştırılmakta ve yakma odasına beslenmektedir. Ortaya çıkan baca gazlarındaki CO₂ oranı %90 ve üstüne kadar çıkabilmektedir. Bu da, CO₂’nin baca gazlarında ayrılması ve tutulmasına imkân vermektedir. Son yıllarda dünyada oksji-yanma konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır ve yapılmaktadır. Çalışmalar hem kömürün [24–27] hem de kömür-biyokütle [28–31] karışımlarının yakılmasını kapsamaktadır. Bu çalışmalardan elde

edilen önemli sonuçlar ve oksji-yanma teknolojisinin ulaştığı aşama ve uygulamaları son yıllarda yayınlanan birçok makalede incelenmiştir [23,32–35].

Türkiye’de oksji-yanma çalışmaları hemen hemen yok denecek kadar azdır. Ancak, son bir kaç yıl içinde kömür ve kömür-biyokütle karışımlarının oksijen-çe-zengin ve oksji-yanma koşullarında yanması daha çok TGA yöntemiyle incelenmiştir. Yüzbaşı ve Selçuk [36] yaptıkları çalışmada linyit, linyit-petrokok karışımlarının yanmasını TGA yöntemini kullanarak hava ile yanma ve oksji-yanma koşullarında incelemişlerdir. Araştırmacılar, oksji-yanma koşullarında yanma aşamaların biraz geciktiğine işaret etmektedir [32].

Yapılan yeni bir çalışmada, yine TGA tekniği ile iki linyit kömürünün hava ve O₂/O₂ atmosferlerinde yanmaları ve yanma kinetikleri araştırılmıştır. Kömürlerin oksji-yanma koşullarında aktivasyon enerjilerinin, hava ortamına kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir [37]; Engin vd. [38] Türkiye’de ilk kez Türk linyitlerini 30 kW_l kapasitedeki bir hızlı akışkan yataktaki oksji-yanma koşullarında yakmışlardır. Araştırmacılar, baca gazlarındaki CO₂ miktarının yakıcıya beslenen O₂ miktarındaki artışla arttığını belirtmektedirler. Çalışmada baca gazlarında %96’ya varan CO₂ derişimlerine ulaşılmıştır.

8.1 Oksji-Yanma Sistemleri

Oksji-yanma Sistemlerine Genel Bakış

Oksji-yanma teknolojisi prensip olarak, elektrik üretiminde kullanılabilecek ve her yakıt için uygulanabilecek esnekliğe sahip bir teknolojidir. Bunun yanı sıra halen çalışmakta olan geleneksel yakma sistemleri de oksji-yanma sistemlerine dönüştürülebilir. Başka bir ifadeyle oksji-yanma sistemleri var olan sistemlere *retrofit* olarak entegre edilebilir [32].

Hava ile yanmada, havanın içermiş olduğu yüksek miktarlardaki N₂’un seyreltme etkisi nedeniyle yanma/baca gazlarındaki CO₂ oranı düşük (tipik olarak %12-16) olmaktadır. Oksji-yanmada ise hava yerine saf oksijen geri döndürülen baca gazlarına katılarak kullanılmakta olup ve böylece CO₂ oranı yüksek (%65-95 hacimsel ve kuru baz) baca gazları elde edilmektedir. Baca gazları diğer safsızlıklardan arındırıldıktan sonra sıkıştırma ve soğutmayla yoluyla CO₂ sıvılaştırılmakta ve depolanmaktadır. Baca gazındaki CO₂ oranı sistemdeki hava sızıntıları tarafından önemli ölçülerde etkilenebilmektedir. Kömür yakan tipik bir oksji-yakma sistemi Şekil 12’de görülmektedir. Sistem temel olarak şu ünitelerden oluşmaktadır [34]:

- Hava ayırma ünitesi (ASU),
- Yakma ünitesi,
- Gaz temizleme ünitesi,

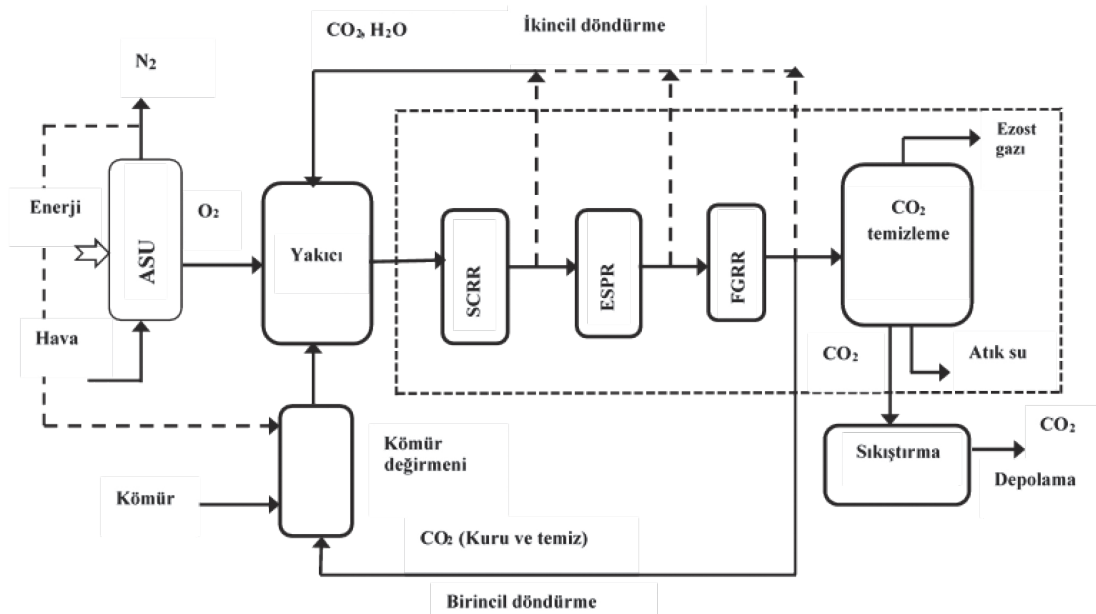
- Baca gazı geri döndürme ünitesi,
- CO₂ ayırma ve depolama ünitesi.

Bu sistemleri geleneksel yakma sistemlerinde ayıran üniteler ASU, baca gazı geri döndürme ve CO₂ ayırma ve depolama üniteleridir.

Hava Ayırma Ünitesi (ASU): ASU yanma için gerekli olan oksijeni sağlar ve sistemin en kritik ünitelerinden bir tanesini oluşturur. Oksijeni, havayı ayırıştırarak sağlamaktadır. Bu ünitenin kapasitesi yakma sisteminin ihtiyacına bağlı olarak değişmektedir. Endüstriyel ölçekli uygulamalarda kriyojenik yöntemle oksijen üreten ASU'lar kullanılmaktadır. Kriyojenik ayırma enerjisi yoğun bir işlemdir ve %95 saflıktaki O₂ için yaklaşık 0,24 kWh/kg O₂ enerji gerekmektedir [39]. 500 MW gücündeki bir santral için 9.000-10.000 t/gün oksijene gereksinim vardır [34]. ASU, bir oksi-yanma santralının işletmesi en pahalı ünitesidir. Bir oksi-elektrik santralinde ASU tarafından tüketilen elektrik miktarı santralde üretilen tüm elektriğin %3-4 civarındadır [35]. Havadan O₂'nin eldesi için ticari olarak adsorpsiyon ve membranla ayırma yöntemleri de mevcuttur, ancak pahalı oldukları için tercih edilmemektedirler. Onun için oksijen üretimi için daha ucuz yöntemler üzerinde çalışılmaktadır. İlgi çeken alternatif yöntemlerden bir tanesi kimyasal döngü (chemical looping) ile ayırmadır [40].

Baca Gazının Geri Döndürülmesi: Oksi-yanma sistemlerinde havadaki azot yerine kullanılan CO₂ baca

gazlarının geri döndürülmesiyle sağlanmaktadır. Geri döndürülen baca gazı (RFG) aynı zamanda yakıcıdaki sıcaklığın ayarlanması için de kullanılmaktadır. RFG, çekildiği ve O₂ ile karıştırıldığı konum oksi-yanma sistemlerinin çalışmasını en çok etkileyen parametreler arasında yer almaktadır. RFG elektrik santrallerinde ekonomizlerden sonra değişik konumlarda kuru veya ıslak olarak çekilebilmektedir. Genel olarak RFG tüm baca gazlarının %60-80'i kadar olmaktadır. Yakma atmosferindeki O₂ oranı ise genellikle %28-32 aralığında değişmektedir. Çoğu uygulamada, oksijen RFG ile karıştırıldıktan sonra yanma odasına beslenmektedir. RFG genellikle ikiye ayrılarak yakma sistemine beslenmektedir: 1. Birincil RFG, 2. İkincil RFG. **Birincil RFG:** RFG'nin yaklaşık %30-35'i soğutulup neminden arındırıldıktan sonra tekrar 200-250°C' a kadar ısıtılmakta sonra yakıt değirmenine gönderilmekte ve burada kurutulan ve öğütülen kömürü yanma odasına taşınması için kullanılmaktadır. **İkincil RFG:** ikinci RFG akımı O₂ ile karıştırılarak O₂/CO₂ karışımı şeklinde yanma gazı olarak doğrudan yakıcıya beslenmektedir. Şekil 12' de görüldüğü gibi RFG sistemin değişik noktalarından (kesikli çizgiler) çekilebilmekte ve buna bağlı olarak içermiş olduğu su ve safsızlık (NO_x, SO₂...v.s) miktarları da değişebilmektedir. Gazın içerdiği su miktarı kömürün yakma karakteristiklerini etkilemektedir. Geri döndürme nedeniyle RFG içindeki SO₂ derişimi artacağı için (2-3 kat) yüksek miktarda kükürt içeren kömürlerin kullanılan sistemlerde korozyonu azaltmak için, baca gazlarındaki SO₂'nin en azından kısmen giderilmesi gerekmektedir [32].



Şekil 12. Tipik bir oksi-yanma tipi güç santralının mümkün konfigürasyonları. ASU: Hava ayırma ünitesi, SCRR: seçimli katalitik indirgeme reaktörü, ESPR: Elektrostatik çöktürücü, FGRR: kükürt giderme ünitesi [39].

Oksi-yanma sistemlerinde gaz temizleme işlemi, CO₂ hariç olmak üzere, geleneksel yakma sistemlerinde uygulanan işleme benzerdir. Temel olarak partiküler madde, NO_x ve SO₂ gidermeyi kapsamaktadır. Partiküler madde emisyonu ve giderimi konusunda geleneksel ve oksi-yanma süreçleri arasında önemli bir fark bulunmamaktadır [23]. Buna karşın, oksi-yanmada NO_x emisyonu, havayla yanmaya kıyasla, %50-70 gibi önemli oranlarda düşmektedir [41,42]. Ancak kirlenmeler konusunda yerel ve global regülasyonlarda öngörülen sınır değerleri karşılamak için ek bir NO_x giderimine gerek olabilir. SO₂ emisyonu ise havayla yanmaya göre önemli bir farklılık göstermemekte ve yine benzer yöntemlerle tutulmaktadır [43].

CO₂ Tutulması ve Depolanması: Oksi-yanma sistemlerinin geleneksel sistemlere göre en önemli farkı baca gazlarında CO₂ oranının çok yüksek olması (%65-95) ve böylece CO₂'in ayrılması ve tutulmasının mümkün olmasıdır. CO₂ ayırma ünitesi bir dizi çok aşamalı sıkıştırma ve soğutma adımlarından oluşmaktadır. Burada önce su uzaklaştırılmakta ve daha sonra CO₂ sıvılaştırılmaktadır. Şekil 12'de görüldüğü gibi, sıvılaşmayan gazlar (Ar, N₂, O₂, CO, NO_x) ise ekzost gazı olarak bacadan atılmaktadır.

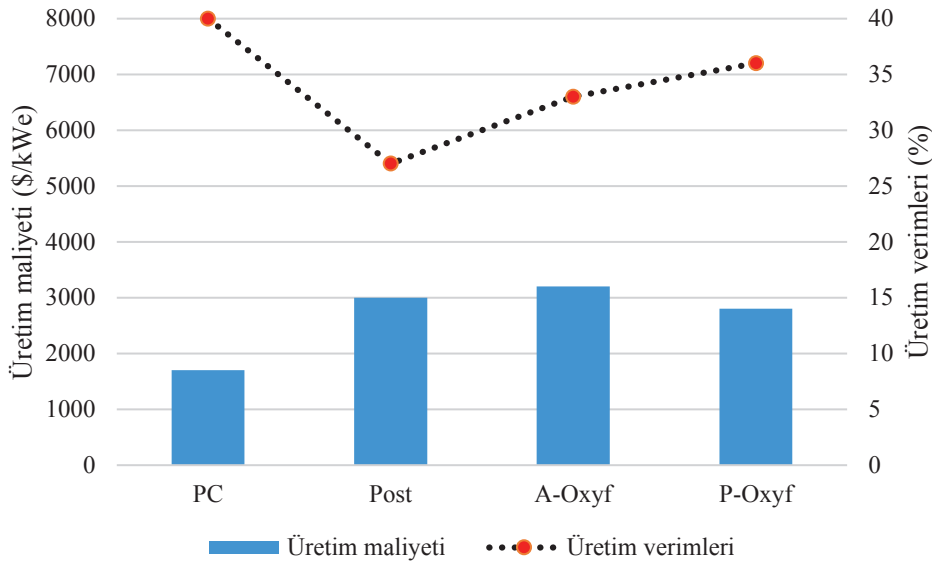
8.2 Oksi-Yanma Sistemlerinin Performansları

Güç üretim sistemlerinde *maliyetler* ve *enerji üretim verimliliği* önemli konulardır ve bu sistemlerin performanslarının birer ölçüsüdür. Şekil 13'te yeni yapılmış

oksi-yanma sistemlerinin performansları, süper kritik pulvarize kömür (SKPY) yakma sistemlerinin performanslarıyla kıyaslanmıştır. Bu grafikteki değerler çeşitli çalışmaların bir ortalaması olarak verilmiştir ve yaklaşık değerlerdir. CO₂ tutmanın olmadığı SKPY *baz sistem* olarak alınmıştır. Buna göre, SKPY'e CO₂ tutma eklendiğinde, baz SKPY'e kıyasla verimde %10-15'lik bir kayıp olmaktadır. Oksi-yakma sistemleri ise, geleneksel sistemlere göre aynı konfigürasyon için, SKPY'e kıyasla verimde %1-5 kazanç sağlayabilmektedir. Bunun yanı sıra oksi-yanmanın basınçlı olması durumunda verimde %3'e varan ek iyileşmeler sağlanabilmektedir [39].

Maliyetlerde ise hesaplamalar arasında büyük farklar olmaktadır. Bu da maliyet hesaplamalarında yapılan varsayımlardan kaynaklanmaktadır. Daha gerçekçi maliyet tahminleri için demo ve endüstriyel ölçek çalışmalarının sonuçlarını görmek gerekmektedir. Ancak retrofit olarak kurulan oksi-yanma sistemlerinin maliyetleri, yeni sistemlere kıyasla daha düşük olmaktadır [39].

Şekil 13'te, PC: CO₂ tutmayı içermeyen geleneksel pulvarize yakma sistemleri, post : CO₂ tutmayı içeren geleneksel pulvarize yakma sistemleri, A-oxyf: Baca gazının döndürüldüğü oksi-yanma sistemleri, P-oxyf: Baca gazının döndürüldüğü basınçlı oksi-yanma sistemleri [39] görülmektedir. Oksi-yanma sistemleri iki grupta toplanmaktadır: 1. Oksi-pulvarize oksi-yanma sistemleri, 2. Oksi-akışkan yatak yanma sistemleri.



Şekil 13. CO₂ tutma teknolojilerinin üretim verimleri ve maliyetlerinin kıyaslanması (Kaynak [32]'den uyarlanmıştır).

8.3 Oksi-Pulvarize Yanma Sistemleri

Oksi-pulvarize yakma (Oksi-PY) sistemleri, geleneksel pulvarize yakmanın O_2/CO_2 ortamında gerçekleştirilmesine dayanmaktadır. Şekil 12'deki diyagram, yakıcı pulvarize yakıcı olduğunda aynı zamanda oksi-PY sistemlerini temsil etmektedir. Kömürden elektrik üretimi ağırlıklı olarak pulvarize yanma yoluyla yapıldığından, ilk oksi-yanma çalışmaları daha çok pulvarize kömür konusunda yoğunlaşmıştır ve son 10 yılda bu teknolojinin geliştirilmesinde önemli yol alınmıştır. Halen dünyanın bir çok yerinde kapasiteleri 0,3-30 MW_ı aralığında değişen çeşitli entegre oksi-PY sistemleri bulunmaktadır. Kapasitesi 30 MW_ı-300 MW_e arasında değişen sistemler ise proje aşamasındadır [44]. Bu sistemlerde yanma gazları prosesin değişik noktalarından çekilerek kuru veya ıslak olarak geri döndürülebilmektedir. Döndürülen gazlar (RFG) birincil RFG (RFG-1) ve ikincil RFG (RFG-2) olmak üzere ikiye bölünüp yanma odasına gönderilmektedir. Baca gazının yaklaşık %65-70'i geri döndürülmekte, bunun da %30-35'i RFG-1 olarak kömür öğütme değirmenlerinde kömür kurutma ve kuru toz kömürün buradan kazana taşınmasında kullanılmaktadır. %65-70 ise RFG-2 şeklinde oksijenle karıştırılarak yanma odasına yakma gazı olarak beslenmektedir. Bazı uygulamalarda, üçüncül RFG (RFG-3) de kullanılmaktadır. Bu akım daha üst bölgelerde yanma odasına beslenmektedir. Oksijen bu RFG'lerden herhangi birisine veya birden fazlasıyla karıştırılarak ve/veya doğrudan yanma odasına beslenmektedir. Bu sistemlerle ilgili ayrıntılar çeşitli yayınlarla bulunabilmektedir [32-35,39,44]

8.4 Akışkan Yatak Yakma Sistemleri

Akışkan yataklı yanma sistemleri, katı yakıt taneciklerinin yakma gazları içerisinde asılı kalarak sıvı gibi davrandığı ve yanmanın da bir sıvı yanmasına benzediği sistemlerdir. Bu sistemler, pulvarize yakma sistemlerine kıyasla, yüksek ısı ve kütle transfer hızları, kompakt kazan tasarımı, yakıt esnekliği ve düşük kirletici (NO_x ve SO_2) emisyonları gibi üstünlüklere sahiptirler. Oksi-akışkan yataklar (Oksi-AY), yanmanın, hava yerine, O_2/CO_2 ortamında gerçekleştiği sistemlerdir. Üç tip akışkan yatak kullanılmaktadır [32]:

1. Habbeli akışkan yataklar (HAY),
2. Dolaşımli akışkan yataklar (DAY),
3. Basınçlı akışkan yataklar (BAY).

Bunlar içinde en yaygın kullanılanları dolaşımli akışkan yataklardır (DAY). Bu sistemler hakkında ayrıntılı bilgi birçok kaynaktan bulunmaktadır [45,46]. Bu sistemlerde akışkanlaştırma ve yanma gazları, yakıcının tabanındaki dağıtıcı elek içinden (birincil besleme) ve yanma odasının duvarı içinde değişik noktalardan bes-

lenebilmektedir (ikinci hava). Oksi-AY'larda yanma hava yerine, O_2/CO_2 karışımıyla gerçekleştirilmektedir. Ortamdaki O_2 derişimi, RFG ve O_2 miktarları değiştirilerek ayarlanmaktadır. Operasyon sıcaklığı, yanmanın etkin bir şekilde gerçekleşmesi için yeterince yüksek ancak aglomerasyonun başlamasını önleyecek seviyelerde tutulmaktadır. Bunun yanı sıra NO_x ve SO_2 emisyonları da göz önüne alındığında optimum operasyon sıcaklıkları 800-900 °C'dır. RFG ıslak veya kuru olabilmektedir [32]. Genellikle ıslak RFG akışkanlaşmayı sağlamak üzere dağıtıcı elek içinden beslenmektedir. Kuru RFG ise yakıtların yakıt silolarından yakıcıya beslenmesi için kullanılmaktadır. Oksi-yanma koşullarında çalışan DAY tipi yakıcılarda RFG miktarları değiştirilerek ortamdaki O_2 oranı %30-50 yükseltilebilmektedir ve yanma daha küçük hacimlerde gerçekleşebilmektedir. Böylece oksi-DAY'ların boyutları havayla yanmanın yapıldığı yakıcılara göre daha küçük olmaktadır [23,32].

Oksi-DAY çalışmaları halen laboratuvar ve pilot ölçeklerde yapılmaya devam edilmektedir. Bunların çoğu 100 kW_ı den küçük kapasitelere sahiptir. Halen kurulmuş en büyük ünite ise AB tarafından desteklenen ve İspanya'da bulunan CIUDEN'a ait 30 MW_ı kapasiteye sahip sistemdir [47].

Kömür bütün dünyada ve Türkiye'de en önemli ve en çok kullanılan enerji kaynaklarından bir tanesidir. Ancak kömürün yanması sonucunda diğer kirleticilerin yanı sıra önemli miktarda CO_2 ortaya çıkmakta atmosfere atılmaktadır. CO_2 sera etkisine sahiptir ve atmosferin ısınmasına ve iklim değişikliğinde sorumlu tutulmaktadır ve insanlığın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan birisidir. CO_2 emisyonun azaltılması için dünyada yoğun çalışmalar yapılmaktadır [32].

Oksi-yanma teknolojisi kömürün yanmasını ve ortaya çıkan CO_2 'yi tutmayı bir arada gerçekleştirme imkanı veren ve son yıllarda gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu teknoloji oksi-pulvarize ve oksi-akışkan yataklar olmak üzere başlıca iki şekilde uygulama bulmaktadır. Dünyada kapasitesi 30 MW_ı'e ulaşan pilot oksi-yanma sistemleri devreye alınmıştır. Kapasiteleri 30 MW_ı-300 MW_e arasında değişen sistemler ise proje aşamasındadır. Türkiye'de oksi-yanma çalışmaları son derece sınırlı kalmıştır. Bu konudaki çalışmaların hızlandırılması gerekmektedir.

Türkiye'de oksi-yanma teknolojisi öncelikli araştırma konuları içine alınmalı ve desteklenmelidir. Bu konuda Enerji Bakanlığı, TKİ, TÜBİTAK, üniversiteler, enerji sektörünün (kamu ve özel) diğer bütün paydaşları gibi enerjiyle ilgili kuruluşların işbirliği yapması büyük önem taşımaktadır [32].

9. KÖMÜRLER İÇİN KİMYASAL DÖNGÜLÜ YANMA TEKNOLOJİLERİ

CO₂ tutma ve depolama (CO₂ Capture and Storage, CCS) teknolojisinin adımlarına (tutulum, taşıma, depolama) ait maliyetler karşılaştırıldığında, en yüksek maliyetin, CO₂'in baca gazından ayrıştırılması (capture) basamağına ait olduğu görülür. Doğalgaz kullanılan kombine çevrimli bir güç santrali veya toz kömür kullanılan bir güç santrali için taşıma maliyeti 1-8 U.S.\$/(ton CO₂, 250 km); depolama maliyeti 0,6-8,3 U.S.\$/ton CO₂ iken, seyreltik haldeki CO₂'nin baca gazından tutulma ve ayrıştırılma maliyeti 30-90 U.S.\$/ton CO₂ şeklindedir. (Cao ve Pan, 2006; Bouzalakos ve Mercedes, 2010; Jerndal, 2010). Karşılaştırma enerji açısından yapılacak olursa, bir kömür santralinde üretilen elektriğin kabaca %20'sinin, CO₂'nin ayrıştırılmasına harcadığı söylenebilir [48].

Kimyasal Döngülü Yanma (KDY); CO₂'i diğer baca gazı bileşenlerinden %100'e yakın saflıkta ve mevcut CO₂ tutma ve depolama (CO₂ Capture and Storage, CCS) yöntemlerine göre daha düşük maliyetle ayırma potansiyeline sahip, yeni gelişen bir temiz yanma teknolojisidir. Bu teknoloji sayesinde, yanma ürünü olan CO₂, yakma havasından gelen N₂'dan prosesin doğal işleyişi içinde kendiliğinden ayrılmakta; dolayısıyla bu işlem için ilave bir gaz ayırma prosesine ve ayrıca enerji sarf edilmesine gerek kalmamaktadır. Başka bir deyişle, mevcut temiz yanma proseslerinde CO₂'in tutulması için harcanan enerji, KDY yönteminin kullanılması halinde prosesin içinde kalmakta, böylece, birim yakıt başına daha fazla temiz enerji elde edilmektedir. Sonuç olarak, fosil yakıtların daha yüksek verimle ve daha düşük çevresel yükü enerjiye dönüşümü sağlandığından, üretilen temiz enerjinin birim maliyeti de azalmaktadır [48].

Kimyasal Döngülü Yanma (Chemical Looping Combustion, CLC) ifadesi, bilimsel bir terim olarak ilk defa Ishida vd. (1987) tarafından, güç santrallerinde meydana gelen ekserji kayıplarını azaltmaya yönelik bir çalışmada kullanılarak literatüre kazandırılmıştır. Ishida ve Jin (1994a, 1994b) tarafından yapılan sonraki çalışmalarda yöntemin, Fe ve Ni bazlı oksijen taşıyıcılar eşliğinde, CO₂ tutulumu amacıyla da kullanılabileceği belirtilmiştir. KDY teknolojisi üzerinde uzmanlaşmış ve bu sahadaki tüm gelişmelere öncülük etmiş araştırma grupları (Chalmers University of Technology (İsveç), Korean Institute of Energy Research (Kore), Instituto de Carboquímica CSIC (İspanya) ve Vienna University of Technology (Avusturya), Japonya (Tokyo Institute of Technology), Norveç (Norwegian University of Science and Technology) ve Amerika'daki (Ohio State University)) çalışmalarına yoğun bir şekilde devam etmektedir [48].

Yakın tarihli araştırmalar kömür, petrol koku ve biokütle gibi katı yakıtların Kimyasal Döngülü Yakılması üzerinde yoğunlaşmaktadır. ENCAP CO₂ tarafından 2005 yılında 455 MW_t'lık bir katı yakıtlı KDY santralinin fizibilite raporu yayınlanmış olup, halihazırda Technical University of Darmstadt (Almanya) bünyesinde 1 MW_t'lık ve ALSTOM-Power Inc. (Windsor, A.B.D) bünyesinde 3 MW_t'lık pilot, katı yakıtlı KDY tesisleri bulunmaktadır. Ayrıca, Alberta-Kanada'da, yakıt olarak katran, oksijen taşıyıcı olarak NiO kullanan 10 MW_t'lık bir katı yakıtlı KDY santralinin inşasına başlanmış olup, 2020 itibarıyla devreye alınması planlanmaktadır. Türkiye'de bu konuda TÜBİTAK'ın desteği ile Çankırı Karatekin Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünde kurulan laboratuvar ölçekli alternatif atmosferli akışkan yatak KDY sistemi bulunmakta ve gaz yakıtların KDY çalışmaları yapılmaktadır [48].

Sistemler ve Uygulamalar

Katı Yakıt Kullanılan Kimyasal Döngülü Yanma, kömür başta olmak üzere katı yakıtların KDY prosesi kullanılarak enerjiye dönüştürülmesi 3 yolla mümkündür (Şekil 14).

- **Ön-Gazlaştırmalı KDY (Syngas-CLC):** Katı yakıt, KDY reaksiyonlarına katılmadan önce gazlaştırma işlemine tabi tutularak, taşıyıcının rahatça reaksiyon verebileceği sentez gazı formuna dönüştürülür. Daha açık bir ifadeyle, proste temelde katı yakıtın enerjisi açığa çıkarılmakla birlikte; yakıt reaktörüne CO-H₂ karışımı olan gaz yakıt beslenir. Proses bu yönüyle, katı yakıt gazlaştırması eklenmiş gaz yakıtlı KDY prosesi gibi düşünülebilir (Şekil 14-a). Ancak gazlaştırmada kullanılan saf O₂, havanın damıtılması ile elde edildiğinden, prosesin toplam enerji dönüşüm etkinliğinde bir miktar azalma söz konusudur. Katı yakıtların gazlaştırma vs. gibi herhangi bir ön işleme ihtiyaç duymadan, doğrudan KDY yakıt reaktörüne beslenmesini içeren yöntemler ise aşağıda verilmiştir [48].
- **Yerinde Gazlaştırmalı KDY (iG-CLC, In-situ Gasification CLC):** Bu yöntemde katı yakıt, akışkan yataklı KDY yakıt reaktörüne direkt olarak beslenir ve burada proses şartlarının etkisiyle Eş.(1) reaksiyonunda görüldüğü üzere, uçucu maddelerini bırakır (Volatilization). Uçucu maddenin ayrılmasından sonra arta kalan kömür koku (Char); hem akışkanlaşmayı, hem de gazlaşmayı sağlayan H₂O ve CO₂ gazlarıyla reaksiyona girerek (Gasification); CO ve H₂ gazlarına dönüşür (Eş.(2) ve Eş.(3)) [48].

Esas yanma tepkimesi, kömürden gelen bu gazlaştırma ürünleri ve uçucular ile oksijen taşıyıcı arasında meydana gelir (Eş. (4)). Bir başka deyişle, yanmayı içeren gaz-katı tepkimesinin gaz türü yakıt tarafından; katı türü ise oksijen taşıyıcı tarafından sağlanır (Şekil