

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖMÜRÜN GAZLAŞTIRILMASINDA GAZLAŞTIRMA
PARAMETRELERİNİN YAPAY GAZ (SYNGAS) ENERJİ
POTANSİYELİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ünal ALTINTAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KÖMÜRÜN GAZLAŞTIRILMASINDA GAZLAŞTIRMA
PARAMETRELERİNİN YAPAY GAZ (SYNGAS) ENERJİ
POTANSİYELİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ünal ALTINTAŞ
(503131317)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurdil ESKİN

HAZİRAN 2018

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503131317 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ünal ALTINTAŞ** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**KÖMÜRÜN GAZLAŞTIRILMASINDA GAZLAŞTIRMA PARAMETRELERİNİN YAPAY GAZ (SYNGAS) ENERJİ POTANSİYELİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Nurdil ESKİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mesut GÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2018**
Savunma Tarihi : **30 Mayıs 2018**





Aileme ve dostlarıma,



ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması, TÜBİTAK tarafından desteklenen Proje No: 3527682465 sayılı “*Ülkemiz kömürleri için yeraltında kömür gazlaştırma teknolojisinin geliştirilmesi*” başlıklı proje dâhilinde hazırlanmıştır ().

Tezimin her noktasında değerli görüş ve önerileriyle bana yol gösteren değerli hocam tez danışmanım Prof. Dr. Nurdil Eskin’e ve bana bu projede çalışma imkânı veren desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mesut Gür’e teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca süreç boyunca bana destek olan proje arkadaşlarım ve dostlarım Mak. Yük. Müh. Oğuz Büyüksirin’e, Mak. Yük. Müh. Ahmet Yıldız’a, Mak. Yük. Müh. Engin Deniz Canbaz’a, Mak. Yük. Müh. Olgu Yıldırım’a ve sevgili eşim İclal Altıntaş’a teşekkür ederim. Onlar olmadan bu çalışmayı tamamlamam mümkün olmazdı.

Haziran 2018

Ünal Altıntaş
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. KÖMÜR GAZLAŞTIRMA NEDİR ?	1
1.1 Bugüne Kadar Yapılan Araştırmalar	2
1.1.1 Yeraltında kömür gazlaştırma teorik çalışmalar	2
1.1.2 Yeraltında kömür gazlaştırma deneysel çalışmalar	6
1.1.3 Yeraltında kömür gazlaştırma pilot çalışmalar ve saha uygulamaları	13
1.1.4 Türkiye’de kömür gazlaştırma	15
1.2 Bu Çalışmanın Amacı	16
2. KÖMÜR ANALİZİ.....	17
2.1 Malkara-Pirinççeşme Sahası 3 Nolu Damar Özellikleri	19
2.2 Kömür Numunesi Özellikleri	20
3. DENEY TESİSATI TASARIMI VE KURULUMU	23
3.1 Laboratuvar Ölçekli Yeraltı Kömür Gazlaştırma Deney Düzeneği	24
3.1.1 Tasarım kriterleri.....	24
3.1.2 Deney düzeneği ekipmanları.....	25
3.1.2.1 Gazlaştırma ajanı besleme düzeneği	26
3.1.2.2 Reaktörler	28
3.1.2.3 Döngülü toz tutucu (Siklon).....	30
3.1.2.4 Soğutucu.....	31
3.1.2.5 Gaz Yıkama Ünitesi	31
3.1.2.6 Vakum pompası	32
3.1.2.7 Gaz kromatografî örnek alma hattı	33
3.1.2.8 Yakıcı (Flare)	33
3.1.3 Ölçme sistemleri	34
3.1.3.1 Sıcaklık ölçümü.....	34
3.1.3.2 Basınç ölçümü.....	36
3.1.3.3 Gaz kromatografî ve MRU taşınabilir ölçüm cihazı	37
3.1.3.4 SCADA sistemi.....	40
3.2 Deney Plan ve Programı.....	40
3.2.1 Deney düzeneğinin hazırlanması	41
3.2.2 Deneyin yapılışı	43
4. YAPAY GAZ (SYNGAS) ENERJİ POTANSİYELİ	45
4.1 Yanma İşlemi Enerji Potansiyeli	47
4.2 Gazlaştırma İşlemi Enerji Potansiyeli	48
4.3 Gazlaştırma İşlemi Karbon Dengesi.....	59
5. PROSES DEĞERLENDİRME	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR	76
EKLER.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	82

KISALTMALAR

CRIP	: Kontrollü Tepkime Besleme Noktası
GC	: Gaz Kromatografi
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IGCC	: Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi
LLNL	: Lawrence Livermore National Laboratory
LVW	: Bağlantılı Düşey Kuyular
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
TKİ	: Türkiye Kömür İşletmeleri
YKG	: Yeraltında Kömür Gazlaştırma





ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Malkara kömürü elementel analiz sonuçları (Dresden Teknik Üni.)	21
Çizelge 2.2: Malkara kömürü kısa analiz sonuçları (Dresden Teknik Üni.)	21
Çizelge 3.1: Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm aletleri.	34
Çizelge 3.2: Kullanılan farklı tip ölçüm aletlerinin kapasiteleri.....	35
Çizelge 3.3: Deney tesisatı üzerindeki ısıtıcı çiftlerin konum ve ölçüm aralıkları.....	36
Çizelge 3.4: Deney hattı üzerinde kullanılan sıcaklık ölçerlerin yerleri ve kullanım amaçları.	36
Çizelge 3.5: Deney tesisatı üzerindeki basınç ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları.	37
Çizelge 3.6: Kullanılan referans gazın bileşimi (molar oran).....	39
Çizelge 4.1: TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında yapılan deneyler.....	46
Çizelge 4.2: Kömürün yanma işlemi enerji potansiyelleri	48
Çizelge 4.3: Örnek yapay gaz enerji potansiyeli hesabı.	49
Çizelge 4.4: Proses aşamalarına göre enerji potansiyeli değerleri.	59
Çizelge 6.1: TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında yapılan proses özet tablosu.	75



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Bir IGCC tesisinin şematik görünümü [1].	1
Şekil 1.2: YKG sürecinde kömür yatağının farklı bölümleri ile burada gerçekleşen olaylar [5].	5
Şekil 1.3: Sıcaklık ve basıncın yapay gaz bileşimine etkisi [5].	6
Şekil 1.4: a) Liu ve diğ. tarafından yapılan çalışma sonucu sıcaklık-yapay gaz bileşimi. b) Buhar/oksijen oranının yanıcı gaz oluşumuna etkisi [7].	7
Şekil 1.5: Daggupati ve diğ. tarafından yapılan çalışmalar sonucu tahmin edilen oyuk geometrisi [8].	8
Şekil 1.6: Stanczyk v.d tarafından kullanılan reaktör [9].	9
Şekil 1.7: Çift aşamalı gazlaştırma sürecinde, aşamalar arası sürenin oksijen derişimine bağlı değışimi [11].	11
Şekil 1.8: Kuyular arası bağlantı metoduyla yapılan gazlaştırma işlemi yapay gaz bileşimi [13].	13
Şekil 1.9: Dünya çapındaki UCG testlerinin dağılımını ve jeolojik karbon depolanması için potansiyeli gösteren harita [1].	13
Şekil 2.1: İnceleme alanını gösteren yer bulduru haritası.	17
Şekil 2.2: Kömür sahası ve analiz için alınan kömür numunesi görseli.	18
Şekil 2.3: Numune alınan bölgenin koordinatlarını gösteren damar mostra haritası.	19
Şekil 2.4: 3 Nolu damar katman dağılımı.	20
Şekil 3.1: Deney düzeneğı elemanlarının şematik görünümü.	25
Şekil 3.2: Üfleç, buharlaştırıcı ve oksijen ile azot tüplerinin bulunduğu gazlaştırma ajanı besleme düzeneğı.	27
Şekil 3.3: Oksijen regülatöründen sonra debiyi kontrol etme amaçlı eklenen iğne vana.	28
Şekil 3.4: Büyük reaktör.	28
Şekil 3.5: Büyük reaktörün kesit görünümü ve ısılıçift noktaları.	29
Şekil 3.6: a) Küçük reaktörün yandan görüntüsü, b) Küyük reaktörün kesit görünümü ve ısılıçift noktaları.	29
Şekil 3.7: Siklon ve arkasında soğutucunun montaj halinde görünümü.	30
Şekil 3.8: Soğutucudan biriktirme tankı gösterimi.	31
Şekil 3.9: Gaz Yıkama Ünitesi.	32
Şekil 3.10: a) Su tankı çıkışında yakıcı ve GC hatlarının ayrılması. b) GC öncesi tahliye hattı.	33
Şekil 3.11: a) Gaz Kromatografi Cihazı. b) MRU taşınabilir yapay gaz ölçüm cihazı.	38
Şekil 3.12: Örnek bir gaz kromatografi sonucu.	39
Şekil 3.13: Proses bilgi föyü örneğı.	41
Şekil 4.1: 3 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.	50
Şekil 4.2: 3 numaralı proses yapay gaz debisi.	50
Şekil 4.3: 4 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.	51
Şekil 4.4: 4 numaralı proses yapay gaz debisi.	51
Şekil 4.5: 5 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.	52
Şekil 4.6: 5 numaralı proses yapay gaz debisi.	53
Şekil 4.7: 6 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.	54
Şekil 4.8: 6 numaralı proses yapay gaz debisi.	54
Şekil 4.9: 7 numaralı proses yapay gaz bileşimi.	56

Şekil 4.10: 7 numaralı proses enerji potansiyeli.....	57
Şekil 4.11: 7 numaralı proses yapay gaz debisi.....	58
Şekil 5.1: 3 numaralı proses sıcaklık değerleri.....	62
Şekil 5.2: 4 numaralı proses sıcaklık değerleri.....	62
Şekil 5.3: 4 numaralı proses sinterleşmiş kömür numuneleri.....	63
Şekil 5.4: 5 numaralı proses sıcaklık değerleri.....	63
Şekil 5.5: 5 numaralı proses kömür numunesi.....	64
Şekil 5.6: 6 numaralı proses sıcaklık değerleri.....	65
Şekil 5.7: a) Deney sonrası refrakter tuğla ve taş yününün kaldırılmış haldeki numunenin görünümü. b) Giriş bölümündeki çökmenin yakından görünümü ve Tr3. c) Oluşan kavitasyonun girişten görünümü ve Tr3,Tr7,Tr30. d) Çıkarılacak parçanın konumu. e) Parçanın çıkarılmış haldeki görünümü ve kavitasyonun varlığı. f) Tr4'ün görünümü. g) Numunenin 3 boyutlu görünümü. h) Kavitasyonun görünümü. ı) Kavitasyonun görünümü. i) Gazlaştırma kanalının çıkış bölümüne yakın yerdeki görünümü.....	67
Şekil 5.8: Kavitasyon duvarında oluşan sinterleşme görünümü.....	67
Şekil 5.9: Sıcaklık ölçümü alınan noktalar.....	68
Şekil 5.10: 7 numaralı proses kömür içerisinde sıcaklık dağılımı.....	68
Şekil 5.11: 7 numaralı proses gazlaştırma ajanı besleme debileri.....	69
Şekil 5.12: 7 numaralı proses gazlaştırma ajanı besleme debileri.....	70
Şekil 5.13: a) Kavitasyon görünümü. b) Kavitasyon görünümü. c) Reaktör içerisindeki ikinci blok görünümü. d) Reaktör ön bölgesinden çıkarılan kömür ve kil parçalarının oluşturduğu yapının görünümü.....	71
Şekil A.1: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası-1.....	79
Şekil A.2: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası-2.....	80
Şekil A.3: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası-3.....	81

KÖMÜRÜN GAZLAŞTIRILMASINDA GAZLAŞTIRMA PARAMETRELERİNİN YAPAY GAZ (SYNGAS) ENERJİ POTANSİYELİNE ETKİSİ

ÖZET

Günümüzde ülkelerin gelişmişliğiyle orantılı olarak açığa çıkan enerji ihtiyacı petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlar ile yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar vb.) kullanılarak karşılanmaya çalışılmaktadır. Enerjinin ülke ekonomisine olan katkısı ve elde edilme biçimindeki dışa bağımlılık gibi faktörler düşünüldüğünde enerji kaynağı olarak kullanılabilen her yakıt önem arz etmektedir. Ülkemizde kömür rezervleri büyük önem taşımaktadır ve sadece %15'i geleneksel madencilik yöntemiyle çıkarılmaktadır. Geleneksel madencilikte son yıllarda yaşadığımız kazalar ile birlikte kömürün enerji eldesinde farklı bir metotla kullanılması ihtiyacı açığa çıkmıştır. Yeraltında kömür gazlaştırma (YKG) işlemi, geleneksel madencilik yöntemiyle çıkarılması ekonomik olmayan ve düşük kaliteli kömürlerden enerji elde edilmesi için kullanılan bir metottur. Bu metotta kömür yatağı üzerine sondajlar ile kuyular açılarak kontrollü şekilde ateşleme yapıldıktan sonra hava, oksijen ve su buharı gibi gazlaştırma ajanları vasıtasıyla yapay/yanıcı gaz (syngas) elde edilmesi sağlanır. Gazlaştırma işlemi sonucunda CO₂, CO, H₂ ve CH₄ gibi yanıcı gazlar oluşmaktadır.

Yeraltında kömür gazlaştırma işlemi kömür yatağının derinliği, kömürün termofiziksel özellikleri, gazlaştırma ajanının tipi/karışım oranı (hava, oksijen ve su buharı), ateşleme süresi ve kömür yatağında sıcaklık dağılımı gibi parametrelere bağlı olup kontrolü zor bir işlemdir. Laboratuvar ölçekli olarak yapılan çalışmada, kömür kütlesi, yüksekliği, uzunluğu, gazlaştırma ajanı cinsi, besleme debisi ve kömür bloğu içerisinde sıcaklık dağılımı parametrelerine bağlı olarak işlemin verimi değerlendirilmiştir. Çalışmada gazlaştırma parametrelerine bağlı olarak, yapay gaz enerji potansiyeli, karbon dengesi ve gazlaştırma verimi incelenmiştir. Yapılan işlemlerde kömür bloğunun uzunluk/genişlik oranına bağlı olarak gazlaştırma verimindeki değişimler incelenmiştir. Değerlendirmeler yapılırken proses sonrasında reaktör içerisinde çıkarılan kömür numuneleri ve oluşturulan kavite de gazlaştırma veriminin yorumlanmasında önem arz etmektedir. Tek bir noktadan ateşleme yapılan işlemlerde özellikle saf oksijen beslemesi yapılan bölümlerde artan sıcaklığa bağlı olarak kömür yüzeyinde oluşan aglomerasyon (camsı yapı - sinterleşme) gazlaşma işleminin ilerlemesini yavaşlatıp durdurmaktadır. Bu durumda kavite büyümediği için gazlaştırma verimi düşmektedir.

Deney düzeneği, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Yanma Laboratuvarlarında kurulmuştur. Düzenek, biri büyük ve diğeri küçük olmak üzere iki farklı boyutta, ısı ve kütle yalıtımlı, içine sıcaklık ölçüm ısı çiftleri yerleştirilmiş reaktörlerden, yapay gaz içeriğinde olan katı tanelerin temizlendiği siklon, yapay gazın sıcaklığının düşürüldüğü ve buharın yoğunlaştırıldığı soğutucu, H₂S tutumunu sağlamak için yıkama kolonu, sistemi negatif basınçta tutarak dışarıya yapay gaz sızmasını engelleyen vakum pompası ve elde edilen yapay gazın zararsız şekilde imha edilmesini sağlayan yakıcıdan (flyer) oluşmaktadır. Düzenekte ayrıca gazlaştırma ajanlarının ve yapay gazın debilerini ölçmek için orifisler kullanılmıştır. Yapay gaz bileşimini tayin edebilmek için gaz kromatografi ve taşınabilir syngas analizör kullanılmıştır.

Çalışma boyunca dokuz adet başarılı deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin 7 tanesi küçük ölçekli reaktörde son iki tanesi ise büyük ölçekli reaktörde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde Malkara, Pirinççeşme yöresinden çıkarılan linyit kömürü kullanılmıştır ve yapılan işlemlerde gazlaştırma ajanı olarak hava, saf oksijen, hava/osijen karışımı, su buharı beslemesi yapılmıştır. Deneylerde zamana bağlı olarak besleme ve yapay gaz debileri ölçümü, sıcaklık ölçümleri ve gaz bileşimi ölçümleri yapılmıştır. Yapılan işlemlerde %50-65 oranlarında yanıcı gaz eldesi, kömür içerisinde 1200 °C sıcaklıklar gözlenmiştir. Gazlaştırma ajanlarının debileri ve tipleri işlemin ilerlemesinde çok büyük önem taşımaktadır. Yalnızca hava ile yapılan işlemlerde kömür içerisinde sıcaklıklar yavaş artarken, saf oksijen ile yapılan işlemlerde kömür hızlıca ısınmakta ve yapay gaz bileşiminde ve debisinde önemli değişikliklere sebep olmaktadır. su buharının gazlaştırma işleminde kullanılma zamanı ve kullanılma süresinde işlemin ilerlemesinde önemli rol oynamaktadır. Su buharının ilk beslenmesinde kömür içerisinde sıcaklıklar düşerken bir süre sonra yapay gaz bileşiminde H₂ oranında artış sağlamaktadır. Saf oksijenin uzun süreli beslemelerinde agromelasyon (camsı yapı) olarak adlandırılan yapı ortaya çıkmakta ve gazlaştırma işleminin ilerlemesinde yavaşlama veya durma meydana getirebilmektedir.

YKG sürecinde parametre etkilerinin görebilmek için dokuz deney yapılmıştır. Bu çalışmada Yapılan işlemlerde kullanılan kömür numunesinin alt ısı değerine bağlı olarak enerji potansiyeli hesaplamaları yapılmıştır. Gaz kromatografî ve taşınabilir analizör ile tespit edilen gaz bileşimine bağlı olarak açığa çıkan yapay gazın enerji potansiyeli hesaplamaları yapılmıştır. Açığa çıkan yapay gaz enerji potansiyeli ve kömür numunesinin başlangıçtaki enerji potansiyeli ile gazlaştırma verimi hesaplanmıştır. Küçük reaktör ile %17,3-%36,3 arasında verimle gazlaştırma işlemleri yapılmıştır. Büyük reaktör ile yapılan proste gazlaştırma verimi %39,7 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada ayrıca C (karbon) dengesi incelenmiştir. Küçük reaktörde yapılan proste %27,5 oranında karbon dönüşümü sağlanmıştır ve %11 oranında karbon yanıcı gaz (CO,CH₄) olarak dönüştürülmüştür. Büyük reaktörde yapılan proste ise %42,9 oranında C (karbon) dönüşümü %21,3 yanıcı gaz olmak üzere sağlanmıştır. Sonuç olarak tek noktadan ateşleme yapılan gazlaştırma işlemlerinde gazlaştırma verimi %17,3-%39,7 arasında değişmiştir.

GASIFICATION PARAMETERS EFFECT OF COAL GASIFICATION ON SYNGAS ENERGY POTENTIAL

SUMMARY

Today, in proportion to the development of the countries, the energy demand that is turned on is met by using renewable energy sources (sun, wind etc.) and/or fossil fuels such as oil, natural gas and coal. Since the contribution of energy to the country's economy and external dependency in the way it is achieved are considered, any fuel that can be used as an energy source is important. In our country, coal reserves are of great importance and only 15% are extracted by conventional mining methods. With the accidents we have experienced in conventional mining in recent years, it has become necessary to use coal with a different method to produce energy. Underground coal gasification (UCG) process is a method used to produce energy from low-quality coal, which is not economical to extract by conventional mining. In this method, drilling and wells are opened on the coal bed and firing is done in a controlled manner, then artificial / flammable gas (syngas) is obtained by means of gasification agents such as air, oxygen and water vapor. As a results of the gasification process, flammable gases CO_2 , CO , H_2 and CH_4 .

UCG process has many advantages over conventional mining in terms of economic, environmental, healty and safety factors. It is expected that there will be a decrease in investment and operating costs when considering factors such as no need to gasifier, lack of coal transportation and storage costs. When environmental factors considered, UCG process causes a decrease in CO_2 , H_2S and NO_x emissions. CO_2 is stored in the gasification cavity. In UCG process, slag and ash remain underground. UCG process is considered to be healthier and safer than conventional mining because drilling pits are used intead of miners. On the other hand, there is a risk of contamination of groundwater and collapse of the coal field.

Underground coal gasification process depends on parameters such as depth of coal bed, thermophysical properties of coke, type / mixture ratio of gasifier (air, oxygen and water vapor), ignition time and temperature distribution in coal bed and it is a difficult process to control. In the lab-scale study, the process efficiency was evaluated depending on the parameters such as coal mass, height, length, type of gasification agent, feed rate and temperature distribution in the coal block. In study, syngas energy potential, carbon balance and gasification efficiency were investigated depending on the gasification parameters. Variations in the gasification efficiency depending on the length / width ratio of the coal block in the experiments are discussed. In the evaluations, the coal samples extracted from the reactor at the end of the process and the formed cavity are also important in interpreting the gasification efficiency. Agglomeration (glassy structure) on the surface of the coal due to the increased temperature in the processes from single point firing, especially at the sections where pure oxygen feed is done, stops the progress of gasification process.

In order to gasification efficiency calculation, firstly the properties of lignite coal used in experiments have been determined. According to the studies carried out at Dresden Technical University, elemental and short proximately analyzes of Malkara lignite were carried out. According to the short proximate analysis results, Malkara lignite coal contains 22,83% moisture, 15,67% ash, 28,9% volatile matter and 32,6% fixed carbon in the original sample. Also, lower heat value (LHV) of the lignite is 15768

kJ/kg. In addition according to elemental analysis results, 41,85% C, 3,06% H, 1,35% N, 11,56% O₂ and 3,68 S were included in the original sample. Malkara lignite coal sphere temperature is 1231 °C, hemisphere temperature 1257 °C and melting temperature 1324 °C.

An experimental setup was built in the Combustion Laboratories of the Istanbul Technical University Mechanical Engineering Faculty. The experimental apparatus consists of a reactor in which the gasification will occur, a cyclone to remove solid particles such as ash from the syngas, a heat exchanger to cool down the syngas and condense the water and tar in the syngas, a scrubber in order to remove the H₂S from the syngas, a vacuum pump to overcome pressure losses in the experimental setup and a flare to burn the resulting syngas in order to safely remove the product. Reactor is designed to allow different well configurations, contains twenty temperature measurement points and is highly insulated in order to correctly simulate the underground conditions. Gas chromatograph and portable syngas analyzer were used to determine the composition of the artificial gas.

During the study, nine successful experiments were performed. Seven of these experiments were conducted in the small scale reactor and the last two were in the large scale reactor. Lignite coal extracted from Malkara and Pirinçesme provinces was used in the experiments and air, pure oxygen, air / oxygen mixture, water vapor feed was used as the gasification agent in the processes. In the processes, 50-65% artificial gas was obtained. 1200 °C temperatures were observed in coal. The flow and type of gasification agents are important in the progress of the process. In air-based experiments, the temperatures increase slowly in the coal, whereas in pure oxygen processes the coal heats quickly and causes significant changes in the composition and flow of the artificial gas. The time and duration of use of water vapor in the gasification process play an important role in the progress of the process. At the first feeding of the water vapor, the temperature in the coal decreases and after a while the H₂ ratio in the artificial gas composition is increased. In long-term feeds of pure oxygen, a structure called agglomeration (glassy structure) emerges and can slow down the progress of the gasification process.

Nine experiments were conducted to see the parameter influences in the UCG process. In this study, energy potential calculations were made based on the lower heat value of the coal sample used in the processes. Energy potential calculations of the artificial gas, which is activated due to the gas composition determined by gas chromatography and portable analyzer, are made. Within the scope of the study; parameters such as coal mass, length, width, effect of gasification agent, effect of gasification channel, duration of ignition, effects on syngas energy capacity were investigated. In processes, the gasification efficiency varied between 17,3% and 39,7%. C (carbon) balance is also studied in the study. In the small reactor, 27,5% carbon conversion was achieved and converted to carbon flammable gas (CO, CH₄) by 11%. In the case of the large reactor, 42,9% C (carbon) conversion was achieved with 21,3% flammable gas.

As a results, using the forward combustion method the maximum gasification efficiency of 39,7% was achieved. Coal blocks with similar length / width ratio have 10% variation in gasification efficiency. As the length / width ratio increases, the gasification ratio increases. In gasification process, if air used as a gasification agent the gasification power increases. In addition to this energy potential increases when water vapor is used as a gasification agent.

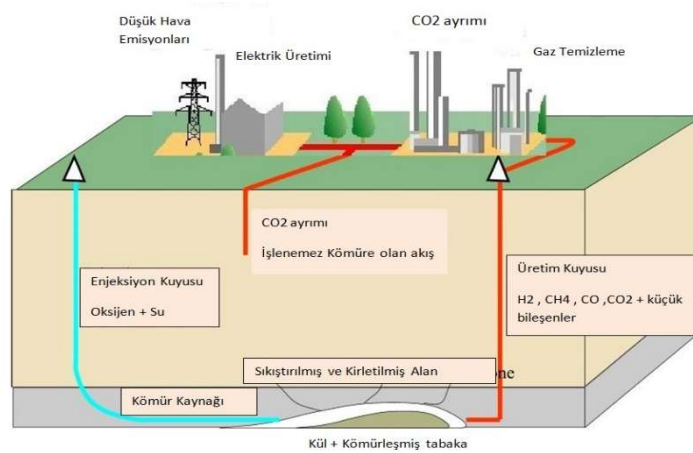
As a recommendation, the continuous retracting injection point (CRIP) method should be used to increase the efficiency in the gasification process. Care should be taken not to exceed the temperature of 1000 °C in the coal in processes made with pure oxygen feed.





1. KÖMÜR GAZLAŞTIRMA NEDİR ?

Yeraltında Kömür Gazlaştırma (YKG) işlemi, kömürün geleneksel madencilikten farklı olarak birkaç bölgeden sondaj işlemleri yapılarak öncelikle ateşleme işlemi yapıldıktan sonra hava, oksijen ve su buharı gibi gazlaştırma ajanları kullanılarak yanıcı gaz (syngas) elde edilmesinde kullanılmasıdır [1]. YKG, geleneksel madencilik ile çıkarılması ekonomik olmayan maden yataklarının kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Proses sonucu açığa çıkan gaz çoğunlukla hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit ve metan içermektedir. Gaz içeriği gazlaştırma ajanına bağlı olmakla birlikte hava ile gerçekleştirilen Yapılan işlemlerde yapay gaz içerisinde azot bulunmaktadır. Elde edilen yapay gaz (syngas) kuyulardan toplanarak yerüstünde kurulu tesislerde yıkama/arıtma işlemi yapılarak doğaya zararlı etkilerinden arındırılmaktadır. Yıkama tesislerinde hidrojen sülfür (H_2S) gibi zararlı maddeler arındırılmaktadır. Doğaya zarar verebilecek maddelerin arındırılması ve yapay gaz içeriğinde hidrojen gibi temiz yakıtın eldesi bakımından YKG işlemi temiz enerji yöntemi olarak adlandırılmaktadır [2]. Proses sonucu açığa çıkan yapay gaz Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi (IGCC) tesislerinde kullanılarak elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Şekil 1.1’de IGCC tesisi şematik olarak gösterilmiştir. Elde edilen yapay gaz yakıt olarak kullanılmanın yansira sıvılaştırma, metanol ve amonyak üretimi vb. çeşitli kimyasal işlemde de kullanılabilir [3].



Şekil 1.1: Bir IGCC tesisinin şematik görünümü [1].

1.1 Bugüne Kadar Yapılan Araştırmalar

Alman araştırmacı Sir William Siemens tarafından 1868 yılında kömürün yeraltında gazlaştırması fikri ortaya atılmıştır. Benzer zamanlarda Dmitriy Mendeleev enjeksiyon ve üretim kuyuları fikrini de içeren kendiliğinden oluşan yeraltı kömür yangınlarını kontrol etme ve yönetme fikirlerini savunmuştur [1]. 20. yüzyılın başında gelişen sanayi ile birlikte pek çok sanayi kenti duman ile kaplanmıştır. Günün nl bilim adamı Sir William Ramsay kömürün yakılmasının durdurularak ve kömürün yeraltında gaz haline getirilerek hem dumandan kurtulunacağı hem de enerji üretilebileceğini ifade etmiştir [4]. ABD, Eski Sovyetler Birliği, Çin, Kanada, Avusturalya, Yeni Zelanda, Güney Afrika başta olmak üzere birçok ülke yeraltında kömür gazlaştırma işlemi üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. ABD’de 1975 1996 yılları arasında bitümlü, alt-bitümlü ve linyit kömürleri üzerine 30’dan fazla pilot çalışma gerçekleşmiştir [1].

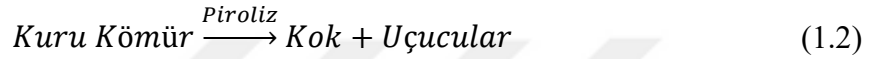
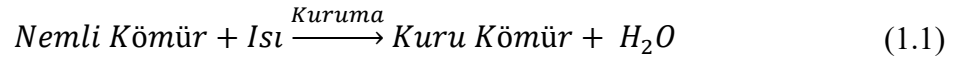
ABD’de devam eden çalışmalardan en büyük denemede, Rocky Mountain, yeraltında kömür gazlaştırma işleminin çevresel ve teknolojik performansı test edilmiştir. Burada yapılan çalışmalarda biri geleneksel dikey sondajlı diğeri ateşleme noktasının kontrollü olarak geri çekilmesi yöntemiyle (CRIP) oksijen ve su buharı gazlaştırma ajanları kullanılmıştır. alışmalar sonucunda 15000 ton üzerinde kömür gazlaştırılmış ve yüksek kalitede yapay gaz (syngas) eldesi gerçekleşmiştir. Buna rağmen yağ fiyatlarının düşmesiyle birlikte yeraltında kömür gazlaştırma işlemine yapılan yatırımlar durdurulmuş ve elde edilen kazanımlardan önemli bir deneyim kaybolmuştur [4].

ABD’nin yanısıra Avrupa’da da YKG testleri yapılmıştır. Avrupa’da çalışmalar 1980 yıllarında başlamış, Belçika’da 1982-84, Fransa’da 1983-84 ve İşpanyada 1992-1999 yılları arasında ve en son yıllarda İngiltere’de yapılmıştır [1].

1.1.1 Yeraltında kömür gazlaştırma teorik alışmalar

Kömür gazlaştırma işlemi, kömür içeriğinde bulunan karbonun sıcaklık ve basına bağlı olarak gazlaştırma ajanlarıyla birlikte çeşitli tepkimeler sonucu yanıcı gaz (syngas) elde edilmesi işlemidir. Elde edilen bu yanıcı gaz içeriği karbon temelli karbonmonoksit, metan ve kısmen daha yüksek hidrokarbonlar olabileceği gibi, hidrojen de olabilmektedir. Gazlaştırma işlemisin bir evresi olan piroliz yanıcı gaz elde edilmesinde çok büyük bir etkendir.

Yeraltında kömür gazlaştırma işleminin verimli bir şekilde ilerlemesi sıcaklık ve basınca bağlı olup 700°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklar gazlaşma işleminin gerçekleşmesi için ideal sıcaklıklardır. Kömürün bu sıcaklığa ulaşması evresinde öncelikle kömür içerisindeki nemin buharlaşmasına bağlı olarak kuruma gerçekleşmektedir. Kuruyan kömürde yüksek sıcaklık ve eksik oksijen etkisiyle birlikte içerisindeki uçucular açığa çıkar (piroliz). Piroliz ile açığa çıkan gaz bileşiminde H₂, CO, CO₂ ve CH₄ gibi hafif moleküller yer almaktadır. Gaz bileşiminde eser miktarda karmaşık hidrokarbon yapıları bulunabilmektedir.



Yeraltı kömür gazlaştırma işlemi sırasında gerçekleşen belli başlı tepkimeler ise şunlardır:

Tam Yanma:



Eksik Yanma:



Boudouard Tepkimesi:



Su Buharı ile Gazlaşma:



Metan Oluşumu:



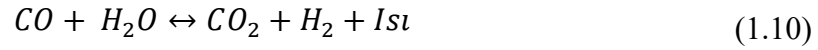
Karbonmonoksit Yanması:



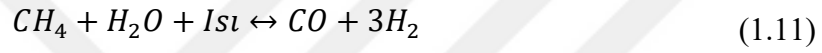
Hidrojen Yanması:



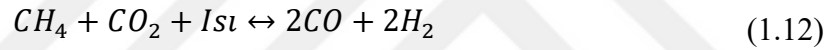
Su-Gaz Değişimi:



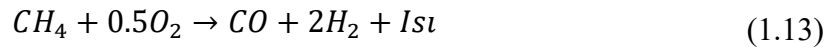
Metanlaşma Tepkimesi:



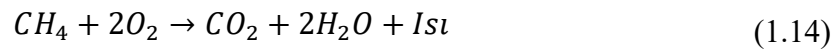
Metanın Karbondioksit ile Reformu:



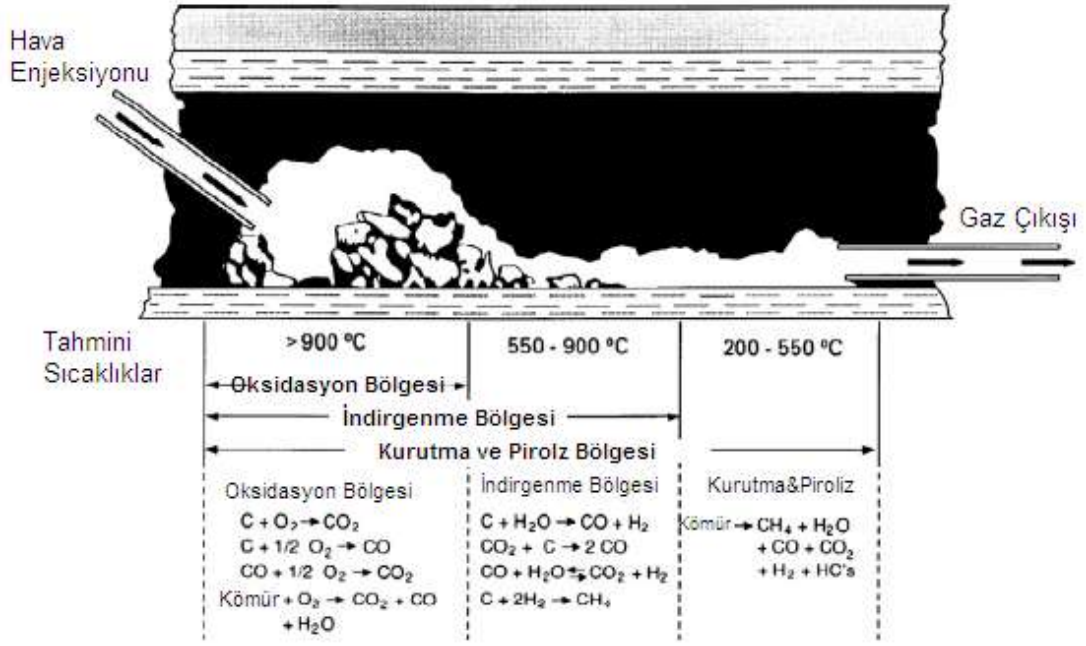
Metan Kısmi Oksitlenme Tepkimesi:



Metan Yanması:



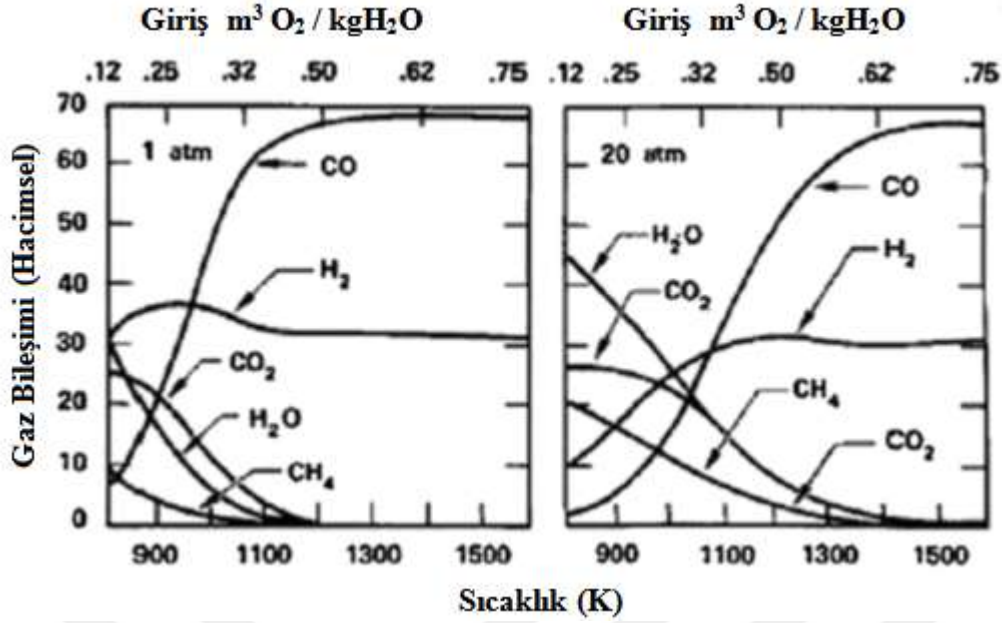
Gazlaştırma işleminde kömür damarı içerisinde Şekil 1.2’de gösterildiği gibi üç bölgeden söz edilebilir. Bunlar sırasıyla yanma bölgesi, indirgenme bölgesi ve piroliz bölgesidir.



Şekil 1.2: YKG sürecinde kömür yatağının farklı bölümleri ile burada gerçekleşen olaylar [5].

Gazlaştırma işleminde yukarıda verilen tepkimeler aynı zamanlarda oluşmaktadır. Tepkimelerden bir kısmı endotermik (ısı alan) tepkimeler olup gerçekleşmesi için ekzotermik reaksiyonların oluşturduğu ısı gereklidir. Özellikle yanıcı gazların olduğu tepkimeler endotermik olup oksidasyon (yanma) bölgesinde oluşturulan ısı sayesinde gerçekleşmektedir.

Proses boyunca sıcaklığın yanısıra basınçta önemli bir rol oynamaktadır. Yukarıda verilen tepkimelerden bir bölümü basınçla birlikte etkinlik kazanmakta ve yanıcı gaz bileşimine katkı sağlamaktadır. Atmosferik basınç altında yapılan çalışmalarda elde edilen gazın ısıl değeri, kinetik kısıtlamalar nedeni ile düşük olmaktadır. Ayrıca basınç artışı ile yapay gaz bileşimindeki metan oranının arttığı yapılan çalışmalarla bilinmektedir [6]. Sıcaklığın ve basıncın elde edilen yapay gaz bileşimine etkisi Şekil 1.3'te verilmiştir.



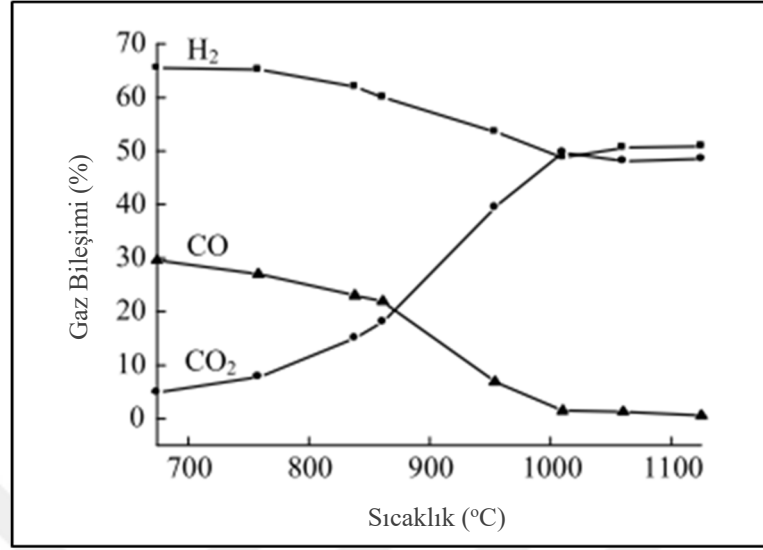
Şekil 1.3: Sıcaklık ve basıncın yapay gaz bileşimine etkisi [5].

1.1.2 Yeraltında kömür gazlaştırma deneysel çalışmalar

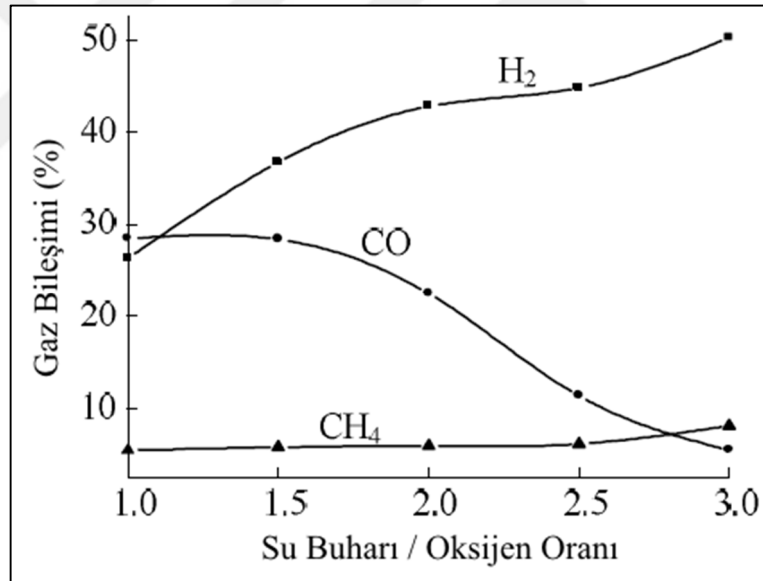
Ulusal ve uluslararası literatürde yeraltı kömür gazlaştırma ile ilgili deneysel yayınlar incelendiğinde, deneysel çalışmaların ağırlıklı olarak gazlaştırma sonucunda elde edilen yanıcı gazın ısı değerini arttırmak için yapıldığı söylenebilir. Literatürde deneysel çalışmalarda yeraltı koşulları sağlanarak simülasyonlar yapılmış ve sistem değişkenlerinin çıkan yanıcı gazın içeriğine ve ısı değerine nasıl etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Liu ve diğ. (2009) çalışmalarında linyit kömürü için yeraltı kömür gazlaştırma işlemi ile H₂ gazı üretimini laboratuvar ölçekli düzenekte yapılan deneyler ile incelemiştir. Çalışmada piroliz aşaması, gazlaşma reaksiyonu, gazlaştırma ajanı olarak oksijen-buhar kullanılması ve yeraltı suyunun etkisi değerlendirilen konulardır. Ayrıca kararlı/dengeli bir gazlaştırma işlemi için linyit kömürünün avantajları analiz edilmiştir. Sonuçlarda linyit kömürünün gazlaştırma için yüksek aktiviteye sahip olduğu görülmüştür. Hidrojen oluşumu için kömürün piroliz aşamasının etkin olduğu sonucu çıkarılmıştır. Hidrojen oluşumunun 350 °C sıcaklıkta başladığı ve 725-825 °C arasında maksimum değere ulaştığı görülmüştür. Çalışmada ayrıca CO₂ ayrışma oranına bağlı olarak linyit kömürünün gazlaştırma işlemine uygunluğu incelenmiştir. Sonuç olarak linyitin gazlaştırma için iyi bir maden olduğu, CO₂ gazı bozunmasının

850 °C için %50'ye yakın, 950 °C sıcaklığın üzerinde ise %96 değerine ulaşması ile anlaşılmaktadır [7].



(a)



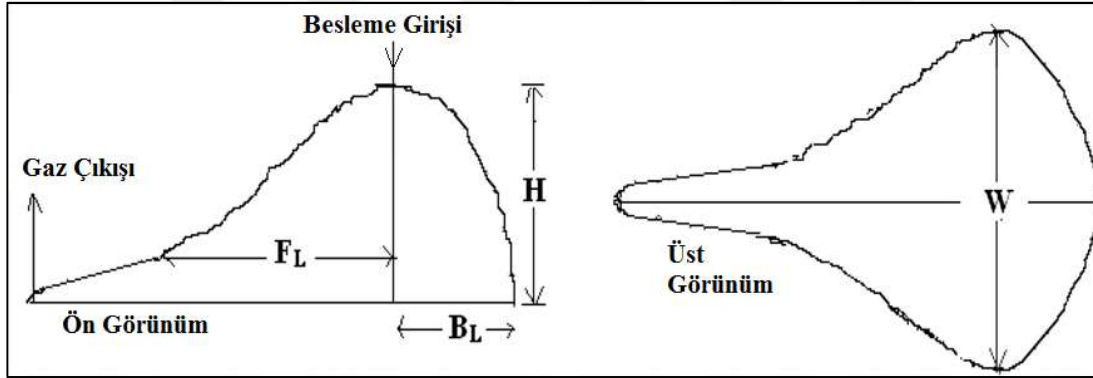
(b)

Şekil 1.4: a) Liu ve diğ. tarafından yapılan çalışma sonucu sıcaklık-yapay gaz bileşimi. b) Buhar/oksijen oranının yanıcı gaz oluşumuna etkisi [7].

Çalışmada, sıcaklığa bağlı olarak yapay gaz içeriğinin değişimi ve su buharı/oksijen besleme oranının yapay gaz bileşimi üzerinde etkisi de araştırılmıştır ve sonuçları Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Çalışmada buhar/oksijen oranı 2:1 olduğu zaman sürekli olarak %40-50 H₂ gazı derişimine sahip yanıcı gaz elde edilebilmiş ve bu süreç içerisinde linyit kömürü gazlaştırma için uygun koşullarda kalmıştır. Yeraltı suyu akışının da belli jeolojik koşullarda basınç kontrolü ile hidrojen hazırlama için

kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada suyun kütlesinin kömür kütlesine oranı 0,4 iken en uygun oksijen gazlaştırması yapıldığı gözlemlenmiştir [7].

Daggupati ve diğ. (2010) yeraltında kömür gazlaştırma işlemi verimi için önem arz eden ve kömür bloğunda gazlaştırma işleminin etkinliği gösteren kavite (oyuk) oluşumunu deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD/CFD) methodu ile birlikte incelenerek kavite şekline bağlı olarak korelasyonlar türetilmiştir. Kavite oluşumunun ilk aşamalarında sıcaklık alanının dengede tutmak için yanma reaksiyonu gerçekleştirilir. Oyuk oluşumunun ilk aşamalarında sıcaklık alanını dengede tutmak için sadece yakma uygulanmıştır. Bu çalışmada kavite oluşumunda önemli olan parametrelerden kuyular arasındaki mesafe, besleme akış desisi ve operasyon süresi gibi parametreler incelenmiştir. HAD ile yapılan simülasyonlar deneysel olarak elde edilen veriler ile uyumludur [8].

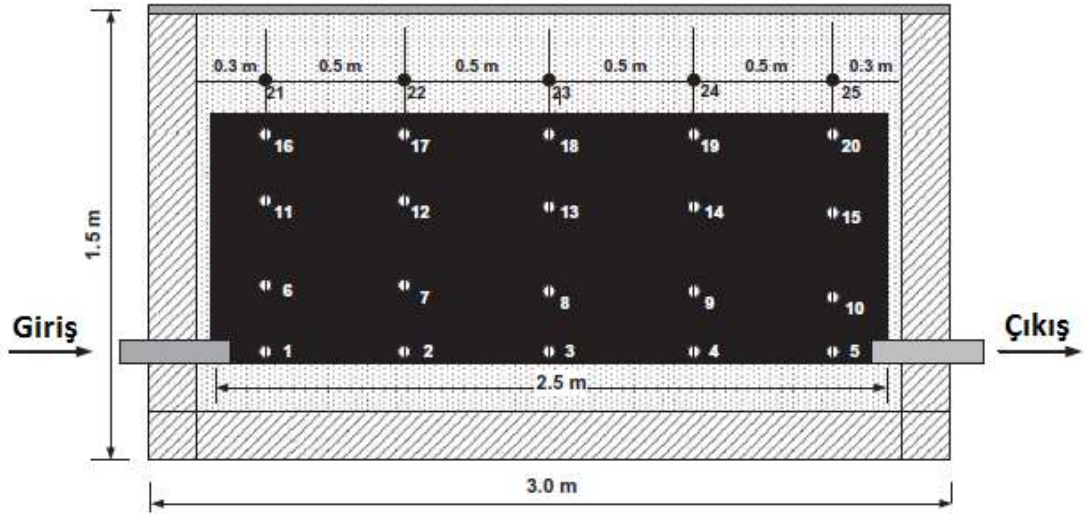


Şekil 1.5: Daggupati ve diğ. tarafından yapılan çalışmalar sonucu tahmin edilen oyuk geometrisi [8].

Çalışmanın sonucunda diğer faktörler aynı olduğunda, akış hızındaki artış ve gazlaştırma işleminin süresi kavite boyutlarında ve hacminde monotonik olmayan (non-monotonic) değişimler oluşturmaktadır. Kuyular arasındaki mesafe (besleme ve yapay gaz çıkış kuyuları) arttıkça oluşan kavite hacminde ileriye doğru büyüme oranındaki düşüşe bağlı olarak düşüş meydana gelmektedir. Deney sonuçları kavite şekli ve büyümesinin kömür içerisinde dolaşan gazın içerisindeki oksijenin kömür yüzeyine olan kütle transferi ile orantılı olduğu sonucuyla uyumludur. Gelecekte yapılacak çalışmalar için ise farklı kömür türleri ve gazlaştırma ajanı kullanılmasının yararlı olacağı öngörülmüştür [8].

Stanczyk ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada linyitin yeraltında gazlaştırılması sonucu hidrojen zengin bir yanıcı gaz elde edilmesini kurulan reaktör düzeneğinde (Şekil 1.6) yeraltındaki ortamın modellenmesi ile irdelenmiştir. Bu çalışmadaki deney

düzeneği, 113M038 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında kurulan deney düzeneği ile uyumludur. Proseste gazlaştırma jani olarak oksijen ve su buharı kullanılmıştır. Kömür bloğu ölçüleri 0,7x0,7x2,5 m'dir. Kömür bloğu içerisinde 20 noktadan sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Proses 4 aşamalı olup, ateşleme (0-3 h), oksijen ile gazlaştırma (3-21,5 h), su buharı ile gazlaştırma (21,5-22,25) ve oksijenle gazlaştırma bölümlerinden oluşmaktadır (22,25-54). Oksijen beslemesi ile yapılan işlemin ilk aşamasında ortalama %16,1 H₂ ve %7 oranında CO açığa çıkmıştır. Buhar beslemesi ile gerçekleştirilen proseste %46,3 oranında H₂ açığa çıkmıştır. Bu aşamada su buharının hidrojen üretimi üzerindeki olumlu etkisi açık bir biçimde görülmüştür ancak bu aşamada açığa çıkan yapay gaz debisinin düşüklüğü ve sıcaklıklardaki ani düşüşler proseste kullanılan %53 oranında nem içeren linyit kömürü için buhar ile gazlaştırmanın uygun olmadığı tespit edilmiştir. Değişken olmayan işlem koşullarında ikinci kez oksijenle gazlaştırma sonucu elde edilen gazın ısı değeri 5,2 MJ/m³, üretilen gazın hacimsel debisi 16 m³/saat ve üretilen gazın içeriğinde hacimce %26,4 H₂ bulunduğu tespit edilmiştir [9].



Şekil 1.6: Stanczyk v.d tarafından kullanılan reaktör [9].

Sonuçlarda yapay gaz bileşiminin ve içeriğinin gazlaştırılacak kömür bloğunun nem oranının önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda iki önemli sonuç açığa çıkmıştır. İlk olarak nem kontrolü ve kömür yatağıetrafında su akışının düzenlenmesi gelmektedir. Linyit yataklarının sığ olması nedeniyle gazlaştırma işlemi düşük basınçlarda mümkün olmaktadır. Yüksek basınçta yapılacak çalışmalar için drenaj sağlanmalıdır. İkinci sonuç ise ısı artışının reaksiyon alanı ile birlikte artması sebebiyle kalın kömür yataklarının gazlaştırma için uygun olduğu yönündedir [9].

Stanczyk ve diğ. (2011) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise kömür tipinin gazlaştırma işlemine etkisinin incelenmesidir. Bu çalışmada linyit ve taş kömürü bloklarının yer altında gazlaştırılması ile ilgili deneysel bir çalışma yapılmış ve elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Linyit kömürü bloğu ölçüleri 0,7x0,7x2,5 m'dir. Linyit kömürü gazlaştırma işlemi 50 saat sürmüştür ve gazlaştırma ajanı olarak oksijen, hava ve oksijence zenginleştirilmiş hava kullanılmıştır. Gazlaştırma ajanı olarak oksijen kullanılan bölümde %19,2 H₂ , %1,7 CH₄ ve %6,2 oranında CO açığa çıkmıştır. Bu aşamada açığa çıkan yapay gazın ısıl değeri 3,49 MJ/m³'tür. Gazlaştırma ajanı olarak hava kullanılan bölümde ise %2,5 H₂ , %0,17 CH₄ ve %1,3 oranında CO açığa çıkmıştır. Bu bölümde açığa çıkan yapay gazın ısıl değeri 0,49 MJ/m³'tür. Oksijenle zenginleştirilmiş havanın gazlaştırma ajanı olarak kullanıldığı bölümde en yüksek ısıl değerli yapay gaz (4,18 MJ/m³) açığa çıkmış olup %23,1 H₂ , %2,3 CH₄ ve %6,3 oranında CO içermektedir.

Taş kömürü ile gerçekleştirilen gazlaştırma işlemi ise 30 saat sürmüştür. Burada taş kömürü bloğu ölçüleri 0,7x0,45x2,5 m'dir. Taş kömürü ile yapılan proseste de gazlaştırma ajanı olarak oksijen, hava ve oksijence zenginleştirilmiş hava kullanılmıştır. Gazlaştırma ajanı olarak oksijen kullanılan bölümde %31,5 H₂ , %3,2 CH₄ ve %33,2 oranında CO açığa çıkmıştır. Açığa çıkan yapay gazın ısıl değeri 8,58 MJ/m³'tür. Hava ile yapılan gazlaştırma işleminde %11,8 H₂ , %2,8 CH₄ ve %10,3 oranında CO açığa çıkmıştır ve ısıl değeri 3,63 MJ/m³'tür. Oksijence zenginleştirilmiş hava ile yapılan proseste ise %18,7 H₂ , %4,3 CH₄ ve %17,3 oranında CO açığa çıkmıştır ve ısıl değeri 5,74 MJ/m³'tür.

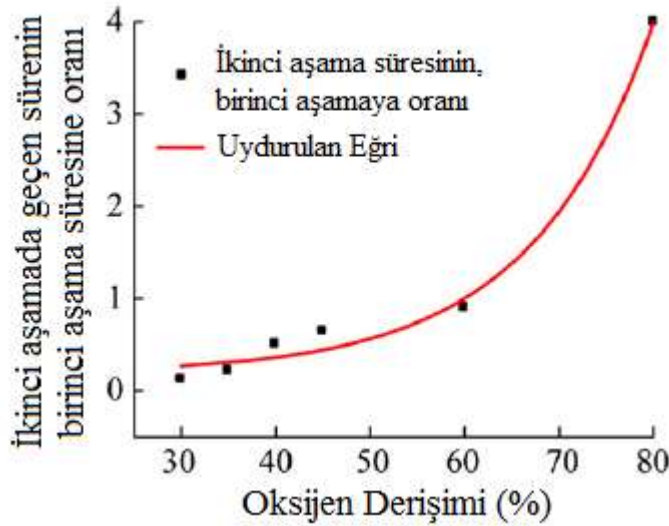
Sonuç olarak hava ile yapılan işlemlerde sıcaklıkların düşmesi nedeniyle gazlaştırmanın devam etmesi için oksijen beslemesinin yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Linyit ile yapılan gazlaştırma işleminde optimum oksijen/hava oranı 4:2'dir. Taş kömürü ile yapılan gazlaştırmada optimum oksijen/hava oranı 2:3'tür. Daha düşük nem içeriğine sahip linyit kömürleri için gazlaştırmanın daha başarılı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca oksijen/hava oranı reaktörünün geometrisi ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir ve ilerleyen çalışmalarda dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır [10].

Hongtao ve diğ. (2011) gazlaştırma sonucu açığa çıkan yanıcı gazın ısıl değerini arttırmak ve gaz üretim süresini uzatmak için iki aşamalı gazlaştırma yöntemini denemişlerdir. Bu işlem için oksijence zenginleştirilmiş havanın sıcaklık arttırıcı gaz,

su buharının ise temel gazlaştırıcı olarak kullanıldığı, iki aşamalı bir deney kurgulanmıştır. Açığa çıkan gazın içeriği, gazlaştırma aşamalarında geçen zamanın birbirine oranı ve sıcaklık alanının ne şekilde değiştiği yapılan çalışmada analiz edilmiştir. Oksijenin zenginleşmesinin iki aşamalı gazlaştırma işleminin ilk aşamasının süresini kısalttığı ve ikinci aşamanın süresini ise uzattığı sonuçlardan elde edilmiştir [11].

Çalışma kapsamında %30, %35, %40, %45, %60, %80 oksijen derişiminde deneyler yapılmış ve bunun sonucunda birinci aşamada geçen sürenin ikinci aşamada geçen süreye oranı sırasıyla 1/0,12; 1/0,21; 1/0,51; 1/0,64; 1/0,90; 1/4 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu veriler Şekil 1.7'de grafiğe dökülmüş ve sonuçlara bir eğri uydurulmuştur. Deneysel olarak bulunan denklem şu şekildedir:

$$y = 0.00788e^{\frac{x}{0.12946}} + 0.18814 \quad (1.15)$$



Şekil 1.7: Çift aşamalı gazlaştırma sürecinde, aşamalar arası sürenin oksijen derişimine bağlı değişimi [11].

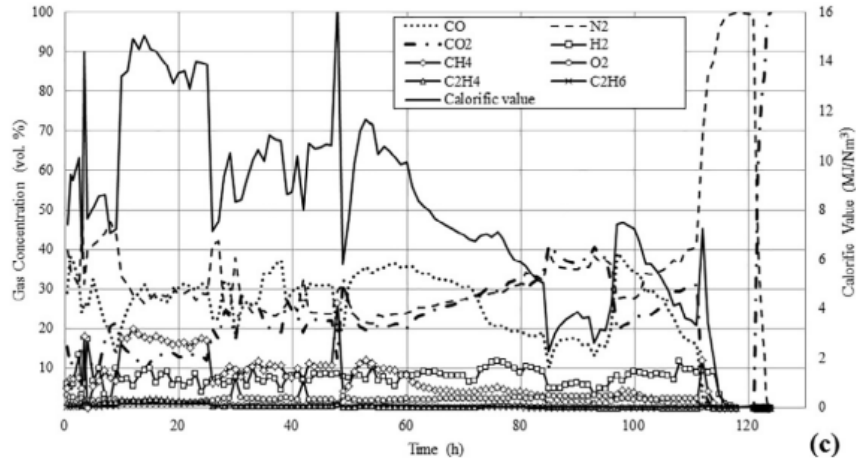
Sisteme buhar gönderilmesi sonucunda sıcaklık alanındaki değişimin oranı zamanla azalacak şekilde 19,1-27,4 °C/dk ile 2,3-6,8°C/dk arasında olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sıcaklık alanındaki değişimin oranı gazlaştırmanın ilk aşamasında artan oksijen derişimi ile artmaktadır. Ayrıca elde edilen yanıcı gazın ısıl değerinin gazlaştırmanın ilk aşamasında artan oksijen derişimi ile büyüdüğü deneyler sonucunda elde edilen veriler arasındadır. Oksijence %80 derişimi ile gönderilen havanın sistemden elde edilen en yüksek ısıl değeri verdiği ve ayrıca en uzun süre gaz elde edilmesini sağladığı da deneylerden gözlemlenmektedir. Reaktörden elde edilen yanıcı

gazın değişen oksijen derişimlerindeki ısıl değerinin 5,31 MJ/Nm³ ile 10,54 MJ/Nm³ arasında değiştii deneyin sonuçları arasındadır [11].

Kacur ve diğ. (2014) alışmalarında, laboratuvar ortamında kurulan deney düzeneği yardımı ile gazlaştırma ajanının, gazlaştırma sonucu elde edilen yanıcı yapay gazın ısıl değerine etkisi incelenmiştir. Bunun yanı sıra gazlaştırıcının yakıcı kısmındaki sıcaklığın, elde edilen yanıcı yapay gazın içeriğine ve ısıl değerine etkisi de incelenmiştir. Çalışmada gazlaştırıcı olarak öncelikle hava, sonrasında ise oksijen hava karışımı beslemesi yapılmıştır. Yanma alanında sıcaklık etkisi 1 saatlik zaman aralıklarında, sıcaklık ve üretilen yanıcı gazın ısıl değerinin rejim halindeki değeri kaydedilmiştir. Hava ile yapılan gazlaştırma işleminin yalnızca 1221°C sıcaklıkta gerçekleştiği ve bu sıcaklıkta elde edilen yanma sonu yapay gazı ortalama ısıl değerinin 2,9 MJ/m³ olduğu tespit edilmiştir. Oksijen hava karışımı ile yapılan deneylerde ise 1146 °C sıcaklıkta elde edilen yanıcı gazın ortalama ısıl değeri 8,18 MJ/m³ olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklıkta oksijen hacminin hava hacmine oranı %17'dir. 1089 °C sıcaklıkta 8,21 MJ/m³ elde edilen ısıl değer deneyler sırasında en yüksek oksijen hacmi- hava hacmi oranı olan %31,89 değerinde gerçekleşmiştir. Sonuç olarak doğru oksijen hava oranının bulunmasının, gazlaştırma işleminin verimini arttırmadaki en önemli etken olduğu ortaya konmuştur [12].

Fa-qiang ve diğ. (2018) alışmalarında ortak eksenli gazlaştırma kanallı ve kuyular arası bağlantılı gazlaştırma kanallı 3 proses için kavite gelişimi, yapay gaz bileşimi ve enerjileri, sıcaklık dağılımını incelemişlerdir. Kavite gelişimini akustik emisyon teknolojisi yardımıyla izlemişlerdir. Kömür tüketimi stokiyometrik method ile hesaplanmıştır. Deneyler sonucunda kuyular arası bağlantı metoduyla yapılan gazlaştırma işleminde yapay gaz enerji potansiyeli (kalorifik değer) 8,43 MJ/Nm³, ortak eksenli gazlaştırma proselerinde ise 5,11 MJ/Nm³ ve 5,51 MJ/Nm³ enerji potansiyeli elde edilmiştir. Ortak eksenli gazlaştırma metodu ve kuyular arası bağlantı yöntemiyle gazlaştırma işlemi arasında yapay gaz içerisinde metan (CH₄) bileşimi oranı farklılık göstermektedir. Kuyular arası bağlantı yöntemiyle yapılan proseste yapay gaz içerisinde ortalama metan oranı %7,5 olarak hesaplanırken, ortak eksenli gazlaştırma kanalı metoduyla yapılan işlemlerde %0,7-1,3 metan bileşimi görülmüştür. Sitokiyometrik method ile yapılan hesaplamalara göre kuyular arası bağlantı methodunda gazlaştırma oranı %71 olarak hesaplanırken, ortak eksenli gazlaştırma kanalı methodunda %43-49 gazlaştırma oranı görülmüştür [13]. Çalışma

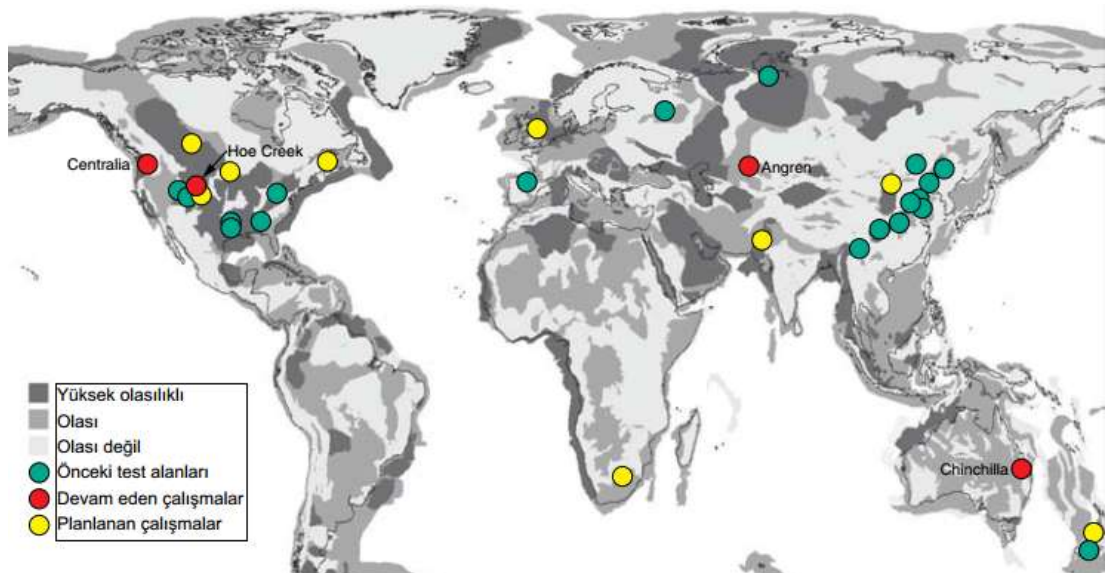
kapsamında kuyular arası bağlantı metoduyla yapılan gazlaştırma işleminin yapay gaz bileşimi Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8: Kuyular arası bağlantı metoduyla yapılan gazlaştırma işlemi yapay gaz bileşimi [13].

1.1.3 Yeraltında kömür gazlaştırma pilot çalışmalar ve saha uygulamaları

Dünya genelinde yeraltında kömür gazlaştırma yapılan 50’den fazla pilot tesis bulunmaktadır ve bunların yarısından fazlası Amerika’dadır. Şekil 1.9’da dünya genelinde yapılan, devam eden ve planlanan YKG tesisleri gösterilmiştir [1].



Şekil 1.9: Dünya çapındaki UCG testlerinin dağılımını ve jeolojik karbon depolanması için potansiyeli gösteren harita [1].

Amerika'da; Hanna'da, Hoe Creek'te, Centralia'da ve Rocky Mountain'de önemli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 1972-1977 yılları arasında Laramie Enerji Teknoloji Merkezi (LETC) Hanna, Wyoming'de başarılı saha çalışmaları yürütmüştür. Bu çalışma kapsamında üç deneyde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneylerin tümünde bağlantılı düşey kuyular (LVW) tekniği kullanılmıştır. Ortalama 6,7 MJ/m³ ısı değerli gaz ürün elde edilmiştir. Hanna I 1973'den 1974'e kadar sürmüş ve 5,0 MJ/m³ ısı değerli gaz ürün elde edilmiştir. Hanna II testi, Hanna I'deki gazın kalitesini ve kaynak kullanımını geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Hanna II testi üç faza bölünmüştür. Faz I dört ay sürmüş ve 6,0 MJ/m³ ısı değerli gaz elde edilmiştir. Faz II ve Faz III üç ay sürmüştür. Faz II'de 6,7 MJ/m³'lük, Faz III'de ise 5,4 MJ/m³'lük gaz elde edilmiştir. Hanna III testi bir ay sürmüştür. Gazın ısı değeri 5,4 MJ/m³'tür [14].

Yine 1970'lerde Hoe Creek'te üç deneme yapılmıştır [6,15]. Bunlar Hoe Creek I,II ve III olarak adlandırılmıştır. Her üç denemede de kuyular arasındaki geçirgenliği arttırmak için farklı teknikler uygulanmıştır. Hoe Creek I için hidrolik kırılma tekniği kullanılarak 3,80 MJ/m³ ısı değerli gaz ürün elde edilmiştir. Hoe Creek II için ise geri yanma tekniği kullanılarak 4,03 MJ/m³ ısı değere sahip gaz üretilmiştir. Hoe Creek III testinde ise yatay sondaj ile geri yanma tekniği birlikte kullanılarak 8,09 MJ/m³ ısı değere sahip gaz elde edilmiştir. Yapılan testler, önemli derecede yer altı sularının kirliliğine yol açmıştır [6].

1981-1982 yılları arasında Centralia'da CRIP sistemi test edilmiştir. Kömürü tutuşturmak için propan-silan kullanılmıştır. Farklı oksijen/buhar oranları ve farklı sondaj teknikleri kullanılarak, bu değişimlerin yapay gaz kalitesine etkileri gözlemlenmiş ve değişimlerin gaz kalitesini çok fazla değiştirmedeği görülmüştür. Bu deneme CRIP sisteminin ilk gerçek testidir. Ayrıca oyuk büyümesi de test edilmiş ve oyukların şekil ve boyut modelleri üzerine çalışılmıştır [1].

1987'de Rocky Mountain I denemeleri gerçekleştirilmiştir. Rocky Mountain IA denemesinde CRIP sistemi uygulanmış Rocky Mountain IB denemesinde ise LVW tekniği uygulanmıştır. Denemeler sonucunda yüksek kalitede yapay gaz üretilmiştir. 93 günde 14000 ton kömür gazlaştırılmıştır. Amerika'daki en başarılı girişim olmasına rağmen ekonomik destekçi eksikliğinden dolayı ticari boyutlu çalışma planı iptal edilmiştir [16].

Kanada'da (Alberta) gerçekleştirilen en önemli proje Swan Hills projesidir. Proje, hükümet tarafından desteklenmiştir. CCS ile donatılmış tesisten 300 MW'lık bir elektrik üretiminin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. 2008 yılında başlayan deneme çalışmalarında 1400 m derinliğindeki kömürler CRIP tekniğiyle yer altında başarılı bir şekilde gazlaştırılmıştır. Bu proje dünyadaki en derinde yer alan YKG tesisidir. Deneme çalışmalarından başarılı sonuçların elde edilmesi sonucunda ticari ölçekli uygulamaya geçilmesi kararlaştırılmıştır. Ticari ölçekli uygulamanın 2015 yılında faaliyete geçmesi planlanmaktadır. Süreci işletebilmek için oyuk basıncının, rezervuar basıncından daha düşük olması gerektiği, basıncın 0-4 MPa arasında olması gerektiği belirtilmiştir. Sabit bir şekilde çalışabilmek için oksijen besleme oranı günde 3-30 ton aralığında tutulmuş ve su/oksijen kütle oranı da 2-3/1 olarak belirlenmiştir [18,19].

Avustralya'da ise Chinchilla denemeleri 1999'da Linc Energy tarafından Ergo Exergy'nin sağladığı teknoloji kullanılarak yürütülmüştür. Proje ortalama 140 m derinliğinde ve 10 m kalınlığındaki kömürün gazlaştırılması için 9 adet besleme/ürün kuyusu ve 19 izleme kuyusu içermektedir. İlk kez Aralık 1999'da gaz üretimi başlamıştır. Sonrasında tesis gaz üretimini sürekli hale getirmiş ve kapasitesini 80.000 Nm³/h'a çıkarmıştır (Bu rakam günde 675 ton kömürün gazlaştırıldığı anlamına gelmektedir)[14]. 30 aylık süreçte kömür yatağının %95'i, toplam enerjinin %75 dönüşümü ile 35.000 ton kömür gazlaştırılmıştır. Gazlaşma sonunda 300°C ve 10 bar basınçta düşük ısı değerli (4,5-5,7 MJ/m³) 80×10⁶ Nm³ gaz ürün üretilmiştir [17].

1991'den beri Çin'de 16 pilot çalışma uygulanmaktadır. Çin, ticari gübre ve kimyasal üretimi için YKG'den ürettiği yapay gazı hammadde olarak kullanmaktadır. Shanxi Province projesinde ise YKG'den üretilen yapay gaz amonyak ve hidrojen üretimi için kullanılmıştır. Ayrıca Hebei Xin'ao Group ile China Üniversitesi ortak olup, YKG'den sıvı yakıt üretimi için bir tesis kurmuştur. Bu proje kapsamında yılda 100,000 ton metanol ve yılda 32,4 milyon kWh enerji üretilmiştir [20].

1.1.4 Türkiye'de kömür gazlaştırma

Son yıllarda artan enerji ihtiyacıyla birlikte gündemde olan temiz enerji teknolojileri kapsamında yeraltı kömür gazlaştırma (YKG) teknolojisine olan ilgi yeniden canlanmıştır. Günümüzde Linc Energy, Ergo Energy, Cougar Energy, Carbon Energy gibi şirketler birçok ticari proje geliştirmektedirler. Türkiye'de de yerli kaynakları devreye almak ve enerjide dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla yeraltı kömür

gazlaştırma teknolojisi ile ilgili araştırmalar başlatılmıştır ve proje için TKİ ve LLNL arasında Őubat 2011’de sözleşme imzalanmıştır. Sözleşme Türkiye linyit rezervlerinin yeraltı kömür gazlaştırması için uygunluğunun araştırılması ve pilot sahaların seçimini kapsamaktadır. [21,22]

Ülkemizde bu çalışmanın da içeriğini olşturan TÜBİTAK 113M038 numaralı proje ile yeraltında kömür gazlaştırma işlemi deneysel faaliyetlerle incelenmiştir.

1.2 Bu alışmanın Amacı

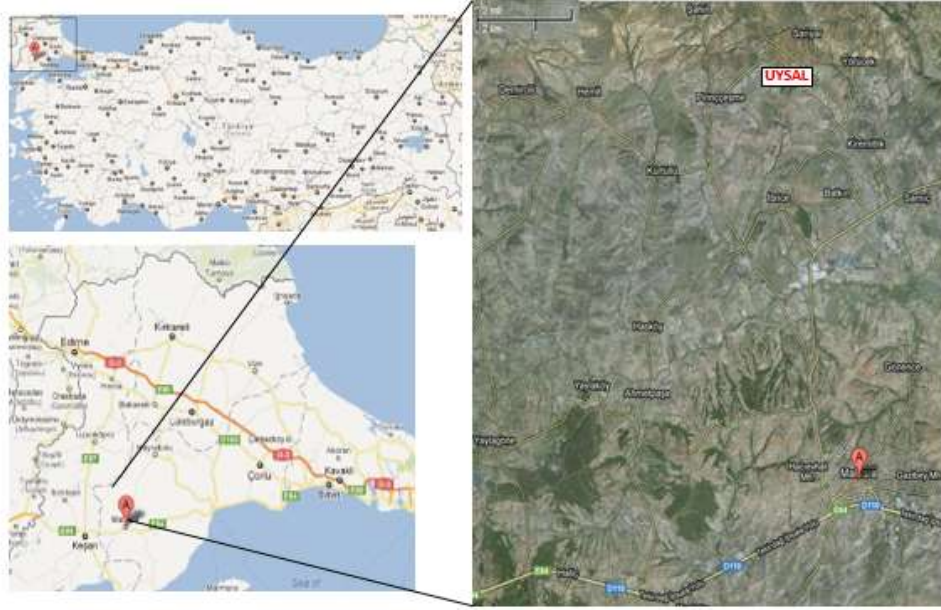
Enerji ülkelerin gelişmişlik düzeyini belirleyen olmazsa olmaz parametredir. Gelişen toplumlarda enerji ihtiyaı artmaktadır. Enerjinin eldesi için dışa bağımlılığın azaltılması ülkelerin daha hızlı büyümelerini sağlayacaktır. Ülkemizde 2013 yılı itibariyle linyit kömürü rezervi 14.2 milyar ton olarak hesaplanmakta olup enerji üretimi için önemli bir kaynaktır. Bu önemli linyit rezervinin geleneksel madencilik ve/veya YKG işlemi ile enerji sektörüne ekonomik olarak kazandırılması gerekmektedir. Madencilik teknolojisinin sınırları ve kömürün eldesi için kullanılan kaynakların ekonomik düzeye indirilmesi çabası YKG işleminin ülkemiz linyit kömürleri için kullanılabilirliğinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Bu sebeple TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi Yanma Laborunda YKG deney düzeneği kurulmuş ve işlemin ülkemiz linyit kömürleri için kullanılabilirliği, yapay gaz bileşimine etki eden parametreler araştırılmıştır. Laboratuvar leğinde yapılacak deneyler ile kazanılacak deneyim sayesinde yerinde (in-situ) gazlaştırma işlemi için gerekli bilgi birikimi sağlanması ve proses etki eden parametreler yapay gaz enerji potansiyeli ve gazlaştırma verimi açısından incelenebilmesi amaçlanmıştır.

Ek olarak YKG teknoloji hakkında son yıllarda yapılan araştırmalar artarak devam etmektedir. Ülkemizde TÜBİTAK 1003 ağrısı kapsamında kömür araştırmaları projeleri çağrıya açılmıştır. Bu alışma kapsamında yapılan deneyler ve elde edilen bulguların ülkemizde yapılacak yeni araştırmalara yol gösterici olması amaçlanmaktadır.

2. KÖMÜR ANALİZİ

Yeraltında kömür gazlaştırma sürecinin doğru bir biçimde ilerleyebilmesi için öncelikle kömür özellikleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ve Dresden Teknik Üniversitesi bünyesinde yapılmıştır.

Kömür numunesi Tekirdağ ilinin 57 km batısında yer alan Malkara-Pirinççeşme köyü Uysal Madencilik firmasının işletme alanındaki 3 nolu damardan temin edilmiştir. Şekil 2.1’de inceleme alanını gösteren yer bulduru haritası verilmiştir.



Şekil 2.1: İnceleme alanını gösteren yer bulduru haritası.

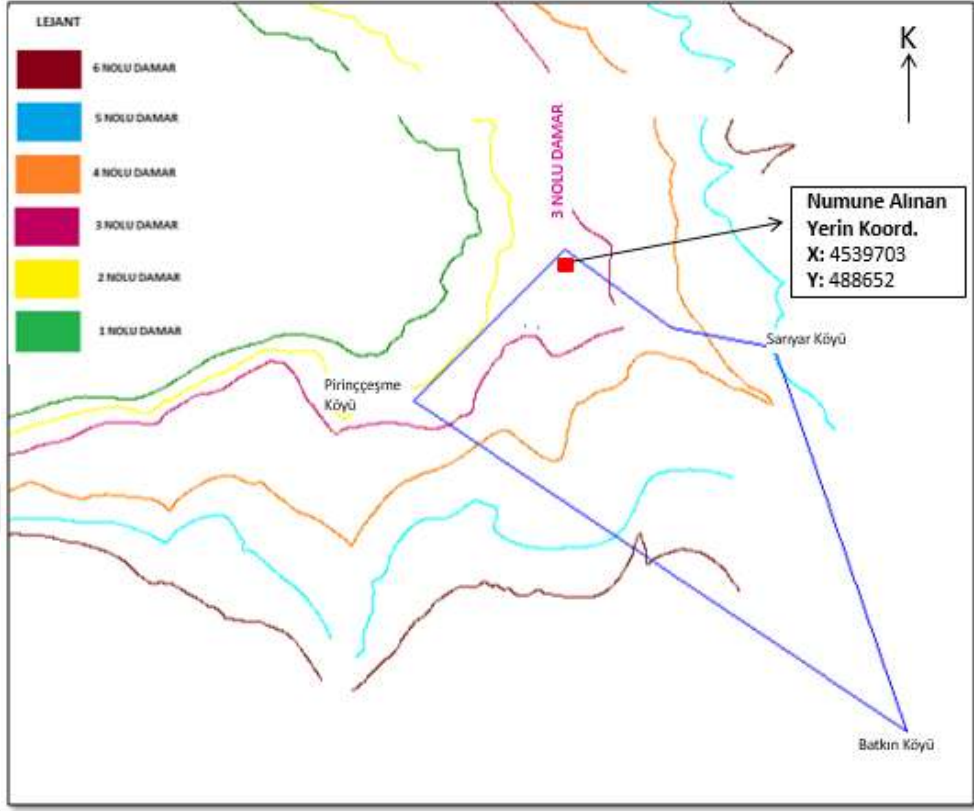
Şekil 2.2’de kömür yatağının genel görünümü ve kömür analizi için alınan numune gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Kömür sahası ve analiz için alınan kömür numunesi görseli.

2.1 Malkara-Pirinççesme Sahası 3 Nolu Damar Özellikleri

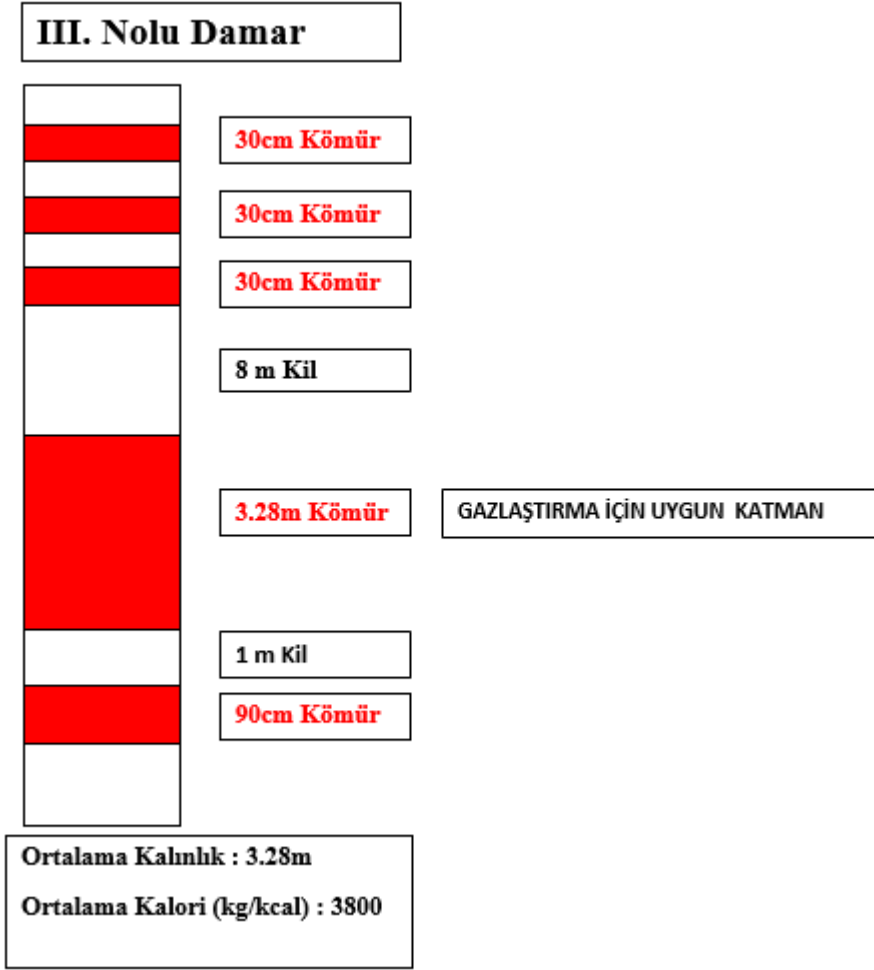
Numune alınan bölge Şekil 2.3'te verilmektedir.



Şekil 2.3: Numune alınan bölgenin koordinatlarını gösteren damar mostra haritası.

3 Nolu damar ortalama 53 metre derinlikte olup, ortalama damar kalınlığı 328 cm'dir.

Damarın katmanlarının dağılımını Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4: 3 Nolu damar katman dağılımı.

2.2 Kömür Numunesi Özellikleri

Dresden Teknik Üniversitesi tarafından TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında yapılan elementel analiz sonuçları Çizelge 2.1’de, kısa analiz sonuçları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Malkara kömürü elementel analiz sonuçları (Dresden Teknik Üni.)

	Orijinal Numune	Analiz Koşulları	Kuru Numune	Kuru Numune(Külsüz)
Nem	22,83	10,01	-	-
Kül (815 °C)	15,67	18,27	20,30	-
C (Karbon)	41,85	48,8	54,23	68,04
H (Hidrojen)	3,06	3,57	3,97	4,98
N (Azot)	1,35	1,57	1,74	2,19
O ₂	11,56	13,49	14,99	18,81
S (Kükürt)	3,68	4,29	4,77	5,98

Çizelge 2.2: Malkara kömürü kısa analiz sonuçları (Dresden Teknik Üni.)

	Analiz	Orijinal Numune	Analiz Koşulları	Kuru Numune	Kuru Numune (Külsüz)
	Nem	22,83	10,01	-	-
Kısa Analiz (%)	Kül	15,67	18,27	20,30	-
	Uçucu Madde	28,9	33,70	37,45	46,99
	Sabit Karbon	32,60	38,02	42,25	53,01
Isıl Değer (kJ/kg)	Üst Isıl Değer	16556	19712	21905	27485
	Alt Isıl Değer	15678	18689	21039	26398
	Uçucu Isıl Değer				22335



3. DENEY TESİSATI TASARIMI VE KURULUMU

Laboratuvar ölçekli yeraltı kömür gazlaştırma tesisatı İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakülte Yanma Laboratuvarında kurulmuştur. Deney tesisatı 8 ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

- Gaz Besleme Düzenegi
- Reaktör
- Siklon
- Soğutucu
- Gaz Yıkama Ünitesi
- Vakum Pompası
- Devirdaim Tankı
- Yakıcı (Flare)

Deney düzenegi, iki farklı kömür bloğu büyüklüğünde ve farklı gazlaştırma ajanı karışımları ile çalışmaya uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem, elde edilen gazın kimyasal özelliklerini ve gazlaştırma sırasında oluşan kül ve tar miktarlarını belirleyebilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan deney düzeneginin şematik gösterimi Şekil 3.1’de bulunmaktadır.

Deney esnasında kömür bloğu içerisinde sıcaklık dağılımının incelenmesi amacıyla küçük reaktörde 20 noktadan, büyük reaktörde ise 38 noktadan ısı çiftleri (termokupl) yardımıyla sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde işlemin ilerlemesinde önemli bir parametre olan sıcaklık kömür bloğu boyunca zamana bağlı olarak incelenebilmektedir. Ayrıca deney düzenegi üzerinde proses sonucu oluşan yapay (syngas) gazın sıcaklığı, basıncı ve debisi ölçülmektedir. Ek olarak sisteme beslenen gazlaştırma ajanlarının ve elde edilen yapay gazın debileri de süreç boyunca kaydedilmektedir.

Deneyleerin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için en az deney düzeneginin kendisi kadar, deneye hazırlık çalışmalarının da önemi yüksektir. Bu sebeple her deney

öncesi hazırlıklar büyük bir titizlikle, önceden belirlenmiş bir işlem sırasına göre yürütülmektedir.

3.1 Laboratuvar Ölçekli Yeraltı Kömür Gazlaştırma Deney Düzeneği

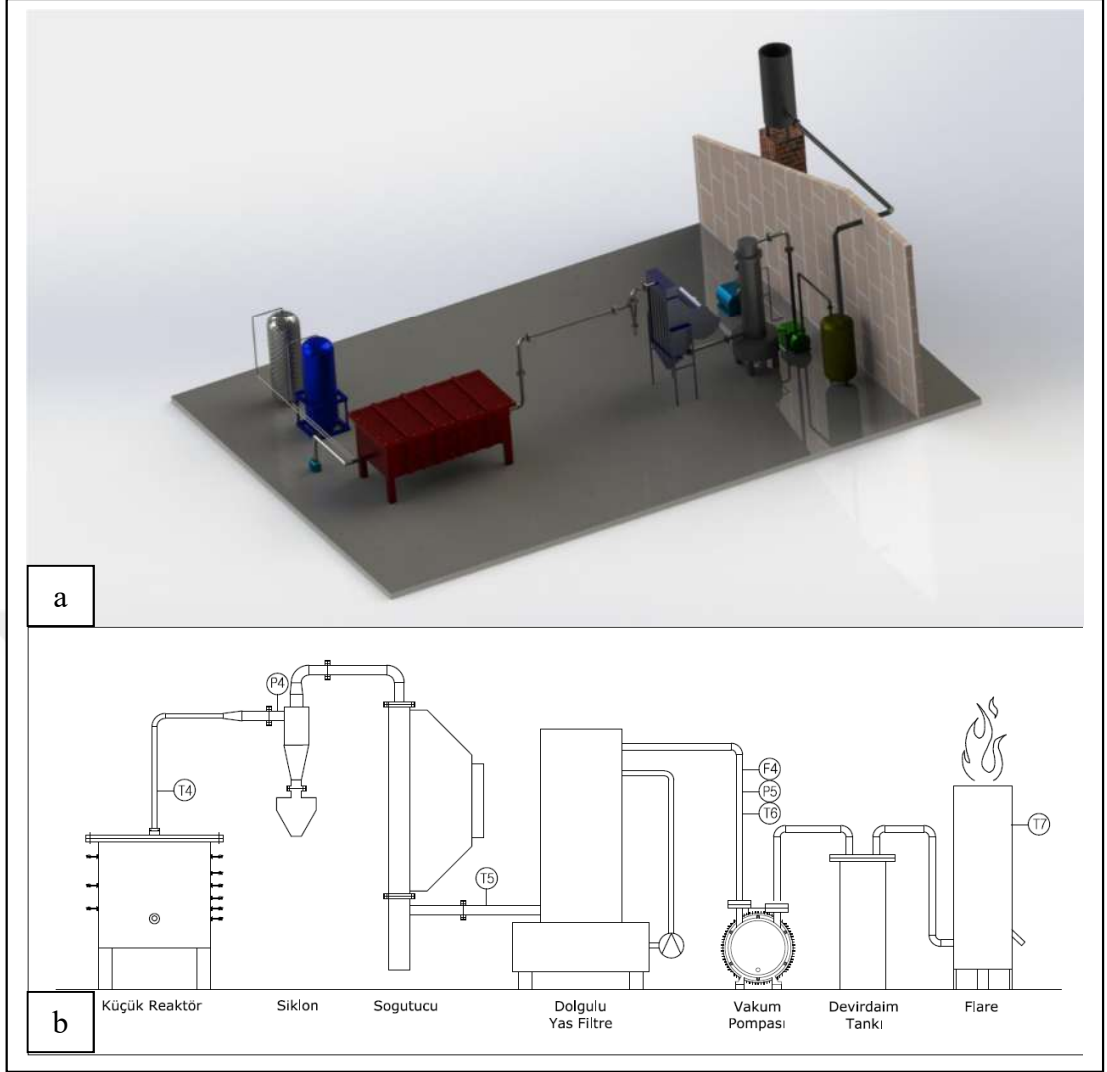
3.1.1 Tasarım kriterleri

Kurulan deney düzeneğinde işlemin sağlıklı bir biçimde ilerlemesi için kömür bloğunun yalıtımı önem arz etmektedir. Bu açıdan reaktörler yalıtımlı ortamı (adyabatik) sağlayacak şekilde yüksek ısı yalıtım kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca deney düzeneğinin tasarımında oluşacak yapay gazın (syngas) yüksek sıcaklıklara çıkabileceği göz önüne alınmıştır. Gazlaştırma işleminin başlayabilmesi için öncelikle kömür bloğunun ısıtılması gerekmektedir. Deney düzeneğinde ısıtma (ateşleme) işleminin yapılabilmesi için pratik çözümler üretilmiştir.

Literatürde yer alan gazlaştırma metodlarının deney düzeneğinde uygulanabilmesi için tasarım geliştirilmiştir. Düzenekte gazlaştırma ajanı olarak kullanılan hava, oksijen ve su buharı hem ayrı ayrı beslenebilmekte hem de karışım olarak beslenebilmektedir.

Proses yeraltındaki kömür damarını temsil edebilmesi için maden sahasından getirilen ham kömür ile gerçekleşmektedir. Bir ürün olarak kömür düşünüldüğünde madenden ham olarak çıkarılan kömür piyasaya sürülmeden önce kömür içindeki kükürtün temizlenmesi, yıkanması gibi işlemlerden geçmektedir. Ancak bu çalışmadaki işlemde yeraltında kömür gazlaştırma temsil edildiği için kükürt ayrıştırması yapılmamıştır. Bunun yerine proses sonucu açığa çıkabilecek H₂S'in (hidrojen sülfür) yıkanması için yıkama kolonu dizyn edilmiştir. Bu yıkama kolonunda hem H₂S yıkanmakta hem de proses sonucu açığa çıkan tar tutulmaktadır. Tar, deney tesisatı boyunca yoğunlaşarak hatta kirliliğe ve tıkanmalara sebep olabilmektedir. Ayrıca süreç boyunca oluşan ve akış ile birlikte taşınabilen katı maddelerin (örneğin kül) tutulması gerekmektedir.

Son olarak elde edilen gazın ve deney sonucunda oluşan diğer atıkların yönetiminin düşünülmesi gereklidir. Bu durumda yapay gazın yakılarak yok edilmesi, oluşan atıkların ise güvenli bir şekilde tahliye edilmesi uygun görülmüştür.



Şekil 3.1: Deney düzeneği elemanlarının şematik görünümü.

3.1.2 Deney düzeneği ekipmanları

Tasarım kriterleri göz önüne alınarak deney düzeneği tamamlanmıştır. Öncelikle farklı büyüklüklerde kömür blokları ile çalışmaya imkân vermesi açısından iki farklı büyüklükte reaktör kullanılmasına karar verilmiştir. İstenilen gazlaştırma ajanlarının istenilen oranlarda karışımlarının kullanılabilmesine imkân verecek ve CRIP metodu de kullanılabilir şekilde hareketli bir adet besleme düzeneği tasarlanmıştır.

Öncelikle reaktörden çıkan yapay gaz içeriğindeki kül, kurum ve kömür parçacıklarının ayrıca suyun ve ziftin (tarın) yoğunlaşacağı bir toplama kabı reaktör çıkışına yerleştirilmiştir. Bu toplama kabı proses sırasında açılarak yoğunlaşan tar ve su toplanmaktadır. Toplama kabından sonra siklon tasarımı yapılmıştır. Burada da yapay gaz içerisinde geriye kalan zift (tar) ve nemin yoğunlaşarak hattın diğer bölümlerinin kirlenmesi önlenmeye çalışılmıştır. Gazlaştırma işleminde en önemli problem ziftin

sistemin iç yüzeyini sıvamasıdır. Reaktör çıkışında ve siklonda tutulamayan tarın son olarak yoğunlaşmasını sağlamak için ısı değiştiricisi tasarımı yapılmıştır.

Kömürün S (kükürt) içermesi sebebiyle proses sırasında açığa çıkabilecek çevreye zararlı bir gaz olan H_2S 'in arındırılması gelmektedir. H_2S yıkaması için bir adet yıkama kolonu tasarımı yapılmıştır. Yıkama işleminde asit-baz tepkimesi ile H_2S tutumu sağlanmıştır. Bir su pompası yardımı ile kolon içerisinde sürekli olarak bazik bir çözelti ile yağmurlama başlıklardan yıkama yapılmakta ve yapay gaz rashing halkalarından geçirilerek yüzey artırımı sayesinde yapay gazın temizlenmesi sağlanmaktadır.

Deney tesisatı boyunca sürekli akışın sağlanması için yıkama kolonundan sonra bir adet vakum pompasının kullanılması uygun görülmüştür. Son olarak elde edilen yapay gaz çevreye zarar vermeyecek şekilde yok edilmek amacı ile yakıcıya gönderilir. Yakıcı aynı zamanda elde edilen yapay gazın yanıcılık özellikleriyle ilgili bir ilk fikir kazanılmasını da sağlamaktadır.

3.1.2.1 Gazlaştırma ajanı besleme düzeneği

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde hava, oksijen ve su buharının çeşitli oranlarda ve/veya saf olarak beslendiği çalışmalar görülmektedir. Tasarlanan besleme düzeneği farklı debi ve karışım oranlarını sağlayabilmektedir. Bunun yanı sıra, deneylerin ilerleyen aşamalarında CRIP tekniği üzerinde çalışmaların yapılabilmesi için besleme düzeneği ve besleme hattı hareketli olacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.2).

Gazlaştırma ajanı besleme düzeneğinde kapasiteler reaktör boyutlarına uygun olarak (kömür bloğu boyutu) çalışmalarda incelenerek belirlenmiştir. Hava besleme düzeneği olarak kullanılacak üflecın 20 m³/saat, buhar üretici olarak kullanılacak buharlaştırıcının ise 5 kg/saat kapasitesi mevcuttur. Gazlaştırma ajanı besleme düzeneğinde acil bir durumda işlemi durdurmak amacıyla beslenecek azot gazı tüpü de ihtiva edilmiştir.

Gazlaştırma ajanının sıcaklık ve debisinin ölçülebilmesi için hat üzerinde basınç ölçer, sıcaklık ölçer ve orifis mevcuttur. Debinin kontrollü bir şekilde beslenebilmesi için vanalar kullanılmaktadır. Özellikle oksijen beslemesinin kontrolü için iğne vana kullanılmıştır. 4 ayrı hattan gelen bu gazlar şekil değiştirebilen borular yardımı ile

kolektöre bağlanmaktadır. Birbirleri ile homojen karışan gazlaştırma ajanı, rekorlu bağlantı aracılığı ile reaktörün giriş bölümüne takılmaktadır.



Şekil 3.2: Üfleç, buharlaştırıcı ve oksijen ile azot tüplerinin bulunduğu gazlaştırma ajanı besleme düzeneği.

Oksijen beslemesinin kontrolü yalnızca debi kontrol valfi ile mümkün olmamıştır. Oksijen beslemesinin kontrollü olarak yapılabilmesi için basınç regülatörü kullanılmıştır. Oksijen besleme tüpü içerisinde deney süresince değişen basınç koşulları olduğundan ek olarak regülatör çıkışında iğne vana ile debi kontrolü sağlanmıştır. Oksijen besleme debisi kontrol panosundan anlık olarak takip edilerek gerekli müdahaleler yapılmıştır. Yapılan düzenlemenin fotoğrafı Şekil 3.3'te verilmiştir.

Azot beslemesi için ise debi kontrolü gerekmediğinden bu şekilde bir eklenti yapılmasına gerek görülmemiştir. Azot beslemesi ancak sistemi durdurmak ya da acil durumlarda ihtiyaç duyulan bir özellik olduğu için debi kontrolü kritik bir önem taşımamaktadır.



Şekil 3.3: Oksijen regülatöründen sonra debiyi kontrol etme amaçlı eklenen iğne vana.

3.1.2.2 Reaktörler

Literatürdeki deneysel çalışmalar incelendiğinde gazlaştırma kanallarının yatay ve dikey olabildiği görülmüştür. Her iki bağlantı metodunu deneyebilmek için reaktör tasarımı geliştirilmiştir. Böylece farklı konumda yerleştirilecek giriş-çıkış borusu konumlarının gazlaştırma işlemine etkileri gözlemlenebilecektir. Reaktörün girişi, gazlaştırma ajanlarının girişi için kullanılan esnek borunun rahatça takılıp çıkarılabilmesi için rekorlu bağlantıya sahiptir. Yapılan rekorlu bağlantı ile hızlı bir şekilde gazlaştırma ajanı beslemesi öngörülmüştür.

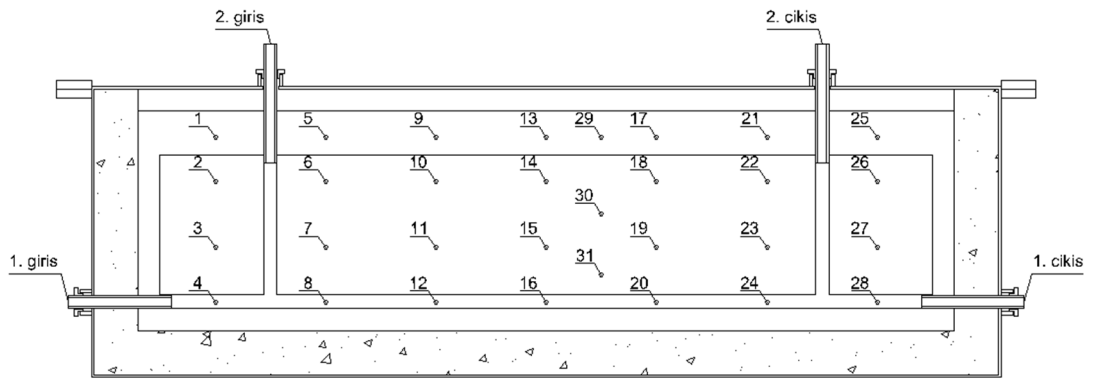


Şekil 3.4: Büyük reaktör.

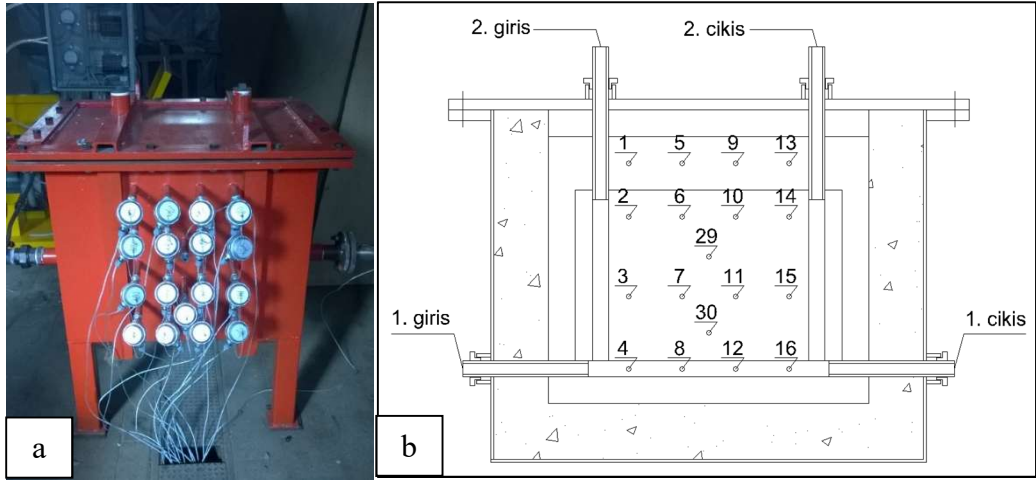
Reaktör tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan bir tanesi de reaktörün ısı yalıtımıdır. Araştırmalar sonucunda reaktör içerisinde sıcaklık yer yer 1300°C 'ye çıkabilse de reaktör genelinde bu değerin ortalama 800°C etrafında olduğu

varsayılabılır. Bu değer göze alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda reaktörün iç duvarlarına 10 cm kalınlığında ısıya dayanıklı beton ile yalıtım uygulanması uygun bulunmuştur. Kömür bloğunun üst kısmında ise maden sahasından getirilen kil, kum ve en üstte taş yünü ile gerekli yalıtım sağlanmıştır.

Deneyleerde farklı kömür bloğu boyutlarında çalışabilmek amacı ile iki farklı reaktör geometrisi tasarlanmıştır. Bunlardan ilki, küçük reaktör, 35×35×50 cm büyüklüğüne kadar kömür blokları ile çalışmaya olanak verirken, büyük reaktör 70×35×180 cm büyüklüğünde kömür blokları ile çalışmaya olanak vermektedir. Tasarlanan reaktörler Şekil 3.4 ve Şekil 3.6a'da görülmektedir.



Şekil 3.5: Büyük reaktörün kesit görünümü ve ısıçift noktaları



Şekil 3.6: a) Küçük reaktörün yandan görüntüsü, b) Küçük reaktörün kesit görünümü ve ısıçift noktaları

İşlemin ilerlemesini izlemek için reaktörlerin üzerinde ayrıca çok sayıda ısıçift girişi bulunmaktadır. Gazlaştırma süreci boyunca olabildiğince farklı noktadan sıcaklık verisi alınabilmesi amaçlanmıştır. Böylece gazlaştırmanın hangi aşamada olduğu, kömür içerisindeki oyuk gelişiminin nasıl gerçekleştiği gibi konularda bilgi edinmek

mümkün olmaktadır. Sıcaklık ölçümünün yapıldığı noktalar büyük reaktör için Şekil 3.5'te, küçük reaktör için ise Şekil 3.6b'de gösterilmiştir.

3.1.2.3 Döngülü toz tutucu (Siklon)

Reaktörden çıkan yapay gaz, içerisinde bir takım katı parçacıklar, tar ve istenmeyen bileşenler (örneğin H_2S) barındırmaktadır. Yapay gazın, içerisinde yer alan bu kirleticilerden ayrıştırılarak analiz edilmesi gerekmektedir. Yapay gaz öncelikle katı parçacıklardan ve tardan arındırılmıştır. Katı bileşenler döngülü toz tutucuda ayrıştırılmaktadır. Yüksek ataletle sahip katı parçacıklar, bu döngülü akış ile birlikte hareket edemez ve toz tutucunun duvarlarına çarparak aşağıya düşerler. Döngülü toz tutucunun alt kısmı koni şeklindedir. Böylece akış gittikçe azalan bir yarıçap karşısında daha da hızlanır. Söz konusu akış hızlanması nedeni ile gittikçe daha küçük katı parçacıkları da ayrılırlar. Katı parçacıklardan arınmış gaz, geometrinin ortasından yukarı çıkarak tesisat boyunca ilerlemeye devam ederken, katı parçacıklar ise aşağıda bulunan toplama kabında birikirler. Şekil 3.7'de toz tutucu ve soğutucu birlikte görülmektedirler.



Şekil 3.7: Siklon ve arkasında soğutucunun montaj halinde görünümü.

3.1.2.4 Soğutucu

Yapay gaz içerisindeki kirleticilerin arındırılmasında ikinci aşama tarın yoğuşturulması aşamasıdır. Yapay gazın içerisindeki katran ve su buharının yoğuşturulması için ısı değiştirici tasarlanmıştır. Isı değiştiricisinin altındaki hazne yoğuşan su buharı ve katran (tar) toplanarak deney sonrası miktarları tespit edilmiştir. Şekil 3.8’de ısı değiştiricisinin altındaki hazne gösterilmektedir.



Şekil 3.8: Soğutucudan biriktirme tankı gösterimi.

3.1.2.5 Gaz Yıkama Ünitesi

Kömürün içerdiği kükürde bağlı olarak gazlaştırma reaksiyonu sonucu açığa çıkan H_2S , asit baz tepkimesi ile tutularak yapay gazdan ayrıştırılmaktadır. Gaz yıkama ünitesi tankına ilave edilen kostik (NaOH) ile tepkimeye giren H_2S yapay gaz içerisinde ayrıştırılarak yıkama kolonunda tutulmaktadır. Gazın yıkanması aşamasında sprinkler başlıkları ile püskürtme yapılır ve rasching halkaları sayesinde artırılan yüzeyler ile NaOH ve yapay gazın tepkime alanı artırılır. Gaz yıkama ünitesinde süreç boyunca NaOH yeterliliği pH ölçümleri ile tespit edilmektedir.

Gaz yıkama ünitesi Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Gaz Yıkama Ünitesi.

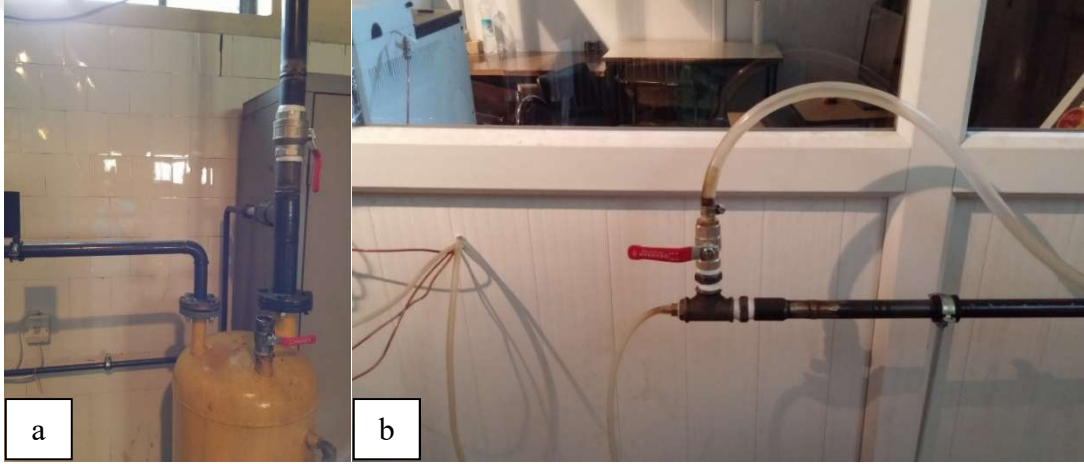
3.1.2.6 Vakum pompası

Gazlaştırma işlemi boyunca açığa çıkan yapay gaz vakum pompası yardımıyla deney tesisatından geçirilerek hem gaz ölçme sistemi (gaz kromatografi sistemi) hem de gaz yakma ünitesine (flare) yönlendirilmiştir. Vakum pompası yardımıyla oluşturulan negatif basınç sayesinde reaktörden ve/veya tesisat üzerinden yapay gaz sızıntısı engellenmiştir.

Vakum pompası, SCADA sistemi üzerinden kontrol edilmektedir. Kontrol sistemi üzerinden vakum pompasının çalışma frekansı değiştirilebilmektedir. Yapılan çalışmalarda, vakum pompası çalışma frekansının düzenek üzerinde büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Frekansın gerekenden düşük seviyelerde kalması, düzenek içerisindeki basıncın artmasına neden olmakta, bu basınç artışı ise bağlantı noktalarından sızıntılara sebebiyet verebilmektedir. Yüksek frekans değerleri ise tesisat içerisinde vakuma sebep olmaktadır ve sonuç olarak bağlantı noktalarından tesisatın (ya da reaktörün) içerisine ortamdan taze hava girmesine neden olabilir.

3.1.2.7 Gaz kromatografi örnek alma hattı

Yapay gazın içeriğinin belirlenmesi için gaz kromatografi cihazı kullanılmaktadır. Gaz kromatografi sisteminde incelenecek örnek, yapay gaz yakıcıya (Flare) gitmeden önce alınır. Burada vakum pompasına ait su tankından sonra 1/2'' çaplı boru ile hat ayrılmıştır (Şekil 3.10a). Ayrılan bu hat yaklaşık 4 metre uzunluğunda olup hattın çıkışında plastik hortum bağlantısı ile yapay gazın temizlenmesi amaçlı cam tüpe bağlanmıştır. Burada cam tüp, tedbir amaçlı kullanılıyor olup, yapılan deneylerde yapay gazın kirliliğine dair herhangi bir bulgu gözlemlenmemiştir. Gerekli görüldüğü durumda nem ve kirlilik tutmak için yedek cam tüp bulunmaktadır. Şekil 3.10b'de görülen vana sistemi ile örnekleme yapılmadan önce boru içerisinde kalan güncel olmayan yapay gazın tahliyesi gerçekleştirilir.



Şekil 3.10: a) Su tankı çıkışında yakıcı ve GC hatlarının ayrılması. b) GC öncesi tahliye hattı.

3.1.2.8 Yakıcı (Flare)

Açığa çıkan yapay gaz herhangi bir enerji üretim tesisi olmadığı için yakılarak bertaraf edilecektir. Gazın imhası için bir adet yakıcı kullanılması uygun bulunmuştur.

Yakıcı, deney düzeneğinin kurulu olduğu laboratuvarın dışında, açık havada durmaktadır. Yakıcı üzerinde bir adet pilot alevi sürekli yanar durumda bırakılmaktadır. Böylece yapay gaz kendi kendine yanmayı devam ettiremiyor olsa bile içerisinde bulunan yanıcı gazların yandığından emin olunmaktadır. Yakıcı içerisinde bulunan bir adet sıcaklıkölçer sayesinde SCADA sistemi üzerinden pilot alevinin yanıyor olduğu sürekli kontrol edilmektedir.

Normal çalışma şartlarında, elde edilen yapay gazın yakıcıda sürekli bir alev oluşturması beklenmektedir. Alevin büyüklüğüne, rengine ve kararlılığına göre elde edilen yapay gazın kalitesi ile ilgili görsel olarak bir fikir sahibi olmak mümkündür.

3.1.3 Ölçme sistemleri

Proses gazlaştırma ajanları ve yapay gazın tesisat üzerinde çeşitli noktalarda hacimsel debi, sıcaklık ve basıncın ölçülmesi vasıtasıyla takip edilmiştir. Ayrıca reaktör üzerinde de kömür tabakasının sıcaklığı ölçülerek gazlaşmanın ilerlemesi takip edilebilmiştir. Gazlaşma ajanlarının besleme noktasında sıcaklık, basınç ve hacimsel debi ölçümleri yapılarak işlemin başlangıç koşullar takip edilebilmiştir. Tesisat üzerinde kullanılan ısı çift ve basınç ölçerler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Ek olarak farklı tür ölçüm aletlerinin ölçüm aralıkları, oluşturdukları analog sinyal ve ölçüm hassasiyetleri ise Çizelge 3.2’de mevcuttur.

Çizelge 3.1: Deney düzeneğinde kullanılan ölçüm aletleri.

Ölçülen Fiziksel Özellik	Ölçüm Aletinin Türü	Ölçüm Aletinin Tipi/Modeli	Ölçüm Sisteminde Kayıtlı Cihaz	Deney Düzeneğinde Kullanıldığı Yer
Sıcaklık	Isıl çift	K Tipi	Tr1-38, T4, T7	Reaktör İçerisi, Reaktör Çıkışı ve Yakıcı
Sıcaklık	Direnç termometresi	PT100	T1, T2, T3, T5, T6	Deney Tesisatı Üzerindeki Diğer Konumlar
Mutlak Basınç	Piezodirenç Transmitteri	Keller PAA-21Y	P1-5, BB	Tesisat Üzerinde, Besleme Bağlantılarında ve Buhar Üreticinde
Fark Basıncı	Elektromanyetik Transmitter	Dwyer MS-331	F1-4	Besleme Bağlantılarında ve Vakum Pompası Çıkışında

3.1.3.1 Sıcaklık ölçümü

Gazlaştırma işleminin takibinde kullanılan en önemli parametre sıcaklıktır. Kömür yatağının sıcaklığı gazlaştırma işleminin takip edilebilmesini sağlamaktadır. Sıcaklık ölçümleri için ısı çiftleri tesisat üzerindeki konumlarına göre seçilmişlerdir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde reaktör içerisindeki sıcaklıkların 1200 °C mertebelerine ulaşmaktadır ayrıca deneyler esnasında kömür bloğunda oluşabilecek kırılmalara dayanıklı olması için “İnkonel” adlı alaşım kaplı K tipi ısı çifti kullanılmıştır. Bu alaşım içerisinde baskın olarak nikel ve krom barındırmakta ve yapısı bozulmadan 1200°C’ye kadar dayanabilmektedir. Gazlaştırma ajanlarının

(hava, oksijen ve su buharı) besleme noktasında sıcaklıkların daha hassas ölçülebilmesi için PT100 tipi termometre kullanılmıştır. Tesisat üzerinde kullanılan cihazlar ve ölçüm aralıkları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Sıcaklık ölçümü tesisat üzerinde ilk olarak gazlaştırma ajanlarının besleme noktasında ölçülmektedir. Reaktör içinde yapılan sıcaklık ölçümleri kömürde boşluğun oluşumu, gazlaşmanın ilerlemesi konularında işlemin takibi için önem arz etmektedir. Reaktör çıkışındaki ölçümde yapay gaz sıcaklığı tespit edilmektedir. Yakıcı (flare) üzerindeki ısı çifti ile yapay gazın yanması takip edilmektedir. Yakıcıda bulunan ısı çiftinde sıcaklık ani olarak düştüğünde SCADA'ya alarm düşmekte ve pilot alev müdahale yapılması gerekmektedir. Reaktör üzerinde sıcaklık küçük reaktörde 20, büyük reaktörde ise 38 noktadan yapılabilmektedir. Reaktör üzerindeki ısı çifti konumları kömürdeki boşluğun (kavitenin) ilerlemesini takip edebilecek şekilde konumlandırılmıştır.

Gazlaştırma ajanı besleme noktası ve reaktör çıkış noktasındaki sıcaklık ölçümleri orifisler ile birlikte kullanılmaktadır. Burada alınan ölçümler, hat içerisindeki gazın termodinamik halinin belirlenmesinde kullanılır. Bu işlemde debi ölçümü kısmında yeniden bahsedilecektir.

Soğutucu sonrası yapılan sıcaklık ölçümlerinde soğutucunun istenilen kapasitede çalışıp çalışmadığı görülmektedir.

Çizelge 3.2: Kullanılan farklı tip ölçüm aletlerinin kapasiteleri.

Ölçülen Fiziksel Özellik	Ölçüm Aletinin Türü	Ölçüm Aletinin Tipi/Modeli	Sinyal Çıkışı	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
Sıcaklık	Isıl çift	K Tipi	0-50 mV	0 – 1200 °C	± 2,5 [°C]
Sıcaklık	Direnç termometresi	PT100	60-212 Ohm	-100 – 300 °C	± 1,0 [°C]
Mutlak Basınç	Piezodirenç Transmitteri	Keller PAA-21Y	4-40 mA	0 - 4 bar (mutlak)	± 0,1 [bar]
Fark Basıncı	Elektromanyetik Transmitter	Dwyer MS-331	0-10 V	0 – 2000 Pa	± 1,0 %

Çizelge 3.4'te hat üzerinde bulunan sıcaklık ölçerlerin konumları ve kullanılış amaçları verilmiştir.

Çizelge 3.3: Deney tesisatı üzerindeki ısı çiftlerinin konum ve ölçüm aralıkları.

No:	Kullanıldığı Yer	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
T1	Oksijen Besleme	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T2	Su Buharı Besleme	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T3	Hava Besleme	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T4	Reaktör Çıkışı	0-1200 [°C]	± 2,5 [°C]
T5	Soğutucu Çıkışı	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T6	Vakum Pompası Çıkışı	-99-300 [°C]	± 1 [°C]
T7	Gaz Yakıcı (Flare)	0-1200 [°C]	± 2,5 [°C]

Çizelge 3.4: Deney hattı üzerinde kullanılan sıcaklık ölçerlerin yerleri ve kullanım amaçları.

Ölçüm Aletinin Kodu	Ölçüm Aletinin Konumu	Tip	Ölçüm Aletinin Kullanım Amacı
T1	Hava Girişi	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T2	Buhar Girişi	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T3	Oksijen Girişi	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T4	Reaktör Çıkışı	K Tipi	Yapay gazın reaktörden çıkış sıcaklığının belirlenebilmesi amaçlı
T5	Soğutucu Çıkışı	PT100	Soğutucunun etkili çalıştığını kontrol amaçlı
T6	Vakum Pompası Çıkışı	PT100	Debinin belirlenmesi amacı ile hal denkleminde kullanılmak üzere
T7	Yakıcı İçerisi	K Tipi	Pilot alevinin yandığını kontrol amaçlı

3.1.3.2 Basınç ölçümü

Gazlaştırma ajanlarının besleme noktalarında yapılan basınç ölçümleri hava, oksijen ve su buharının termodinamik özelliklerinin belirlenmesi noktasında önem taşımaktadır. Tesisat üzerinde yapılan ölçümlerde Deney düzeneği üzerinde basınç ölçümleri üç farklı sebeple alınmaktadır. Bunların ilki orifislerin yakınında, gazların termodinamik hallerinin hesabı içindir. İkinci ve asıl sebep ise hat üzerindeki gösterge basıncının ölçümüdür. Deney düzeneği hattında, reaktör çıkışında basıncın mutlak 1 atm olması istenmektedir. Eğer hat basıncı bu değerine altına düşer ise, oluşan vakum nedeni ile deney düzeneği içerisine taze hava girebilmektedir. Bu oksijen girdisi, istenmeyen durumlara yol açabilir ve uzak durulmalıdır. Hat basıncı atmosfer basıncının üstüne çıkması halinde ise bu sefer elde edilen yapay gaz ile yanma gazları deney ortamına sızacaktır. Bu gazların içerisinde CO ve H₂S gibi sağlığa zararlı

moleküller bulunur. Aynı vakum gibi, basıncın artmasından da kaçınmak gerekir. Söz konusu basınç dengelemesi vakum pompasının çalışma noktası değiştirilerek sağlanır. Son olarak bir adet basınç ölçer ise buharlaştırıcı tankına yerleştirilmiştir. Bu basınç ölçer sayesinde buharlaştırıcı iç basıncı sürekli kontrol edilmekte ve buharlaştırıcı iç basıncının her zaman güvenli bir seviyede tutulması sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra alınan basınç ölçümü, SCADA sistemi tarafından sürekli olarak takip edilmekte, iç basıncın 2 bar noktasının $\pm 0,1$ bar çevresinde sabit tutulacak şekilde buharlaştırıcının çalışması ayarlanmaktadır. Bu kontrole göre eğer buharlaştırıcı basıncı 1,9 barın altına düşmüş ise buharlaştırıcı sistem tarafından çalıştırılmakta, 2,1 barın üstüne çıkmış ise buharlaştırıcı durdurulmaktadır.

Deney düzeneğinde kullanılan basınç ölçerlerin konumlandırıldıkları noktalar, ölçüm aralıkları ve ölçüm hassasiyetleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5: Deney tesisatı üzerindeki basınç ölçerlerin konum ve ölçüm aralıkları.

No:	Kullanıldığı Yer	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
P1	Oksijen Besleme	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P2	Su Buharı Besleme	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P3	Hava Besleme	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P4	Siklon Girişi	-1 - 3 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
P5	Yıkama Kolonu Çıkışı	-1 - 3 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]
BB	Buharlaştırıcı İçi	0 - 4 [bar]	$\pm 0,1$ [bar]

3.1.3.3 Gaz kromatografi ve MRU taşınabilir ölçüm cihazı

Proses sonucu açığa çıkacak yapay gaz bileşiminin analizi için Agilent 7890B gaz kromatografi cihazı ve MRU taşınabilir yapay gaz ölçüm cihazı kullanılmıştır. Gaz kromatografi cihazı Şekil 3.11.a'da görülmektedir. MRU taşınabilir ölçüm cihazı ise Şekil 3.11.b'de gösterilmiştir.

Gaz kromatografi cihazı, örneklenen gazın bileşenlerinin moleküler olarak birbirlerinden ayrıştırılması prensibini esas alarak çalışmaktadır. Bu ayrıştırmayı sağlayabilmek için öncelikle örnek gaz, tepkimeye girmeyeceğinden emin olunan ve bir taşıyıcı gaz (mevcut sistemde bu He'dir) içerisine karıştırılır. Taşıyıcı gaz daha önce belirlenmiş bir 'metod'a göre şartlandırılmış fırın içerisinde bulunan, içerisinde 'hareketsiz faz' olarak adlandırılan özel bir malzeme bulunan 'kolon' isimli düşük iç çaplı, uzun bir spiral boru içerisinde sürekli olarak akmaktadır.



(a)

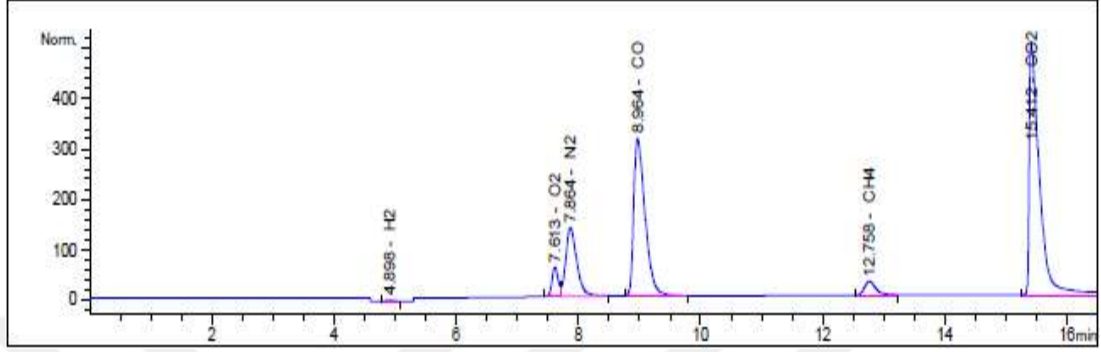


(b)

Şekil 3.11: a) Gaz Kromatografi Cihazı. b) MRU taşınabilir yapay gaz ölçüm cihazı.

Örnek alınan gazın kolona girmesi ile birlikte, örnek gaz içerisindeki farklı moleküler bileşenler, çeşitli fiziksel/kimyasal etkiler nedeni ile taşıyıcı gaz içerisinde birbirlerine göre farklı hızlarda ilerleme gösterirler. Böylece hareket hızları farklı olan bu bileşenler, kolonun sonunda birbirlerinden tamamen ayrışırlar. Kolon çıkışında bulunan bir sensör, taşıyıcı gaz dışında herhangi bir bileşen görmesi halinde bir elektrik sinyali üretir. Sensöre gelen bileşenin miktarı ne kadar fazla ise, sensörün oluşturduğu sinyal o kadar kuvvetli olmaktadır. Ayrıca her bir bileşen kolon boyunca

farklı bir hızla ilerlediği için, örnek gazın ilk sisteme alınmasından itibaren her bir bileşen, sistemde farklı bir süre kalmaktadır. Bu durumda, sensörde görülen sinyallerin gazın girişinden sonra hangi zamanda yaşandığının tespit edilmesi, aynı zamanda hangi bileşenin algılandığının da göstergesidir. Gaz kromatografi cihazı tarafından yapılan bir analiz sonucu alınan verilerin görünümü Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Örnek bir gaz kromatografi sonucu.

Bu cihazın kalibrasyonu, içeriği bilinen bir referans gazın sisteme enjeksiyon yapılması ve analiz sonuçlarının bilinen içeriğe göre tanıtılması esasına dayanmaktadır. Bir başka deyişle referans gaz cihaza enjekte edilir ve analiz sonuçları referans gazın bilinen “molar yüzde” değerleri olarak tablo halinde cihaza girilir. Çizelge 3.6’da kullanılan referans gazın analiz sonuçları görülmektedir. Yapılan her deneyden önce gaz kromatografi cihazı bu referans gaz yardımı ile kalibre edilmektedir. Deneyler esnasında örnek alınan yapay gaz ile yapılan analizler sonucunda oluşan veriler, referans gaz kullanılarak oluşturulmuş kalibrasyon tablosu ile karşılaştırılarak yapay gazın molar yüzde sonuçları verilmektedir.

Çizelge 3.6: Kullanılan referans gazın bileşimi (molar oran).

	H ₂	N ₂	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄
Teorik	20,0%	35,0%	2,0%	15,0%	20,0%	8,0%
Ölçülen	19,01%	33,74%	2,05%	16,4%	20,18%	8,62%
Doğruluk	± 2%	± 0,2%	± 2%	± 2%	± 2%	± 2%

Gaz kromatografi cihazı yaklaşık 20 dakikalık bir işlem sonrası sonuç vermektedir. Bir başka deyişle gaz kromatografi cihazı, deney sırasında elde edilen yapay gazın verilerini 20 dakikalık bir gecikme ile sunmaktadır. Burada başlangıçta bu cihazın seçilmesinin sebebi hem daha geniş gaz içeriğinin analiz edilebilmesi hem de analiz edilen gazlarda herhangi bir oran sınırlamasının olmamasıdır. Ancak 20 dakikalık işlem gerektirmesi de yapay gazın anlık olarak değerlendirilmesini engellemektedir.

MRU taşınabilir yapay gaz ölçüm cihazı ise anlık olarak yapay gaz içeriğini tespit edebilmektedir. MRU yapay gaz ölçüm cihazı ve gaz kromatografi cihazı ölçümleri karşılaştırılmış ve %99 oranında benzerlik tespit edilmiştir.

3.1.3.4 SCADA sistemi

Gaz kromatografi cihazı dışında kalan tüm ölçüm aletleri gruplanarak SCADA sistemine bağlanmaktadır. SCADA sistemi, tüm ölçümlerin anlık olarak kontrol ekranında görülmesini sağlar. Toplanan verilerin ekranda gösterilmesinin yanı sıra, sistem her üç saniyede bir topladığı verileri dijital olarak kaydetmektedir. Böylece deney sonuçları daha sonra ayrıntılı incelemek amacı ile kayıt altında tutulur.

Bunun yanı sıra sistem üzerinden deney düzeneği üzerindeki çeşitli ekipmanların çalışması kontrol edilebilmektedir. Üflecini çalıştırılması, soğutucu fanının ve su pompasının devreye alınması ve devreden çıkarılması gibi aç/kapa işlemleri yapılabildiği gibi, ekipmanların çalışmasında daha ayrıntılı ya da otomatik kontroller de mevcuttur. Örneğin vakum pompasının çalışma frekansı deney esnasında SCADA sistemi üzerinden kontrol edilebilmektedir.

Buharlaştırıcının kontrolü ise otomatik olarak sağlanmaktadır. Buharlaştırıcı üzerinde bulunan basınçölçer ile iç basınç sürekli olarak kontrol edilmektedir. Buhar basıncı belli bir seviyede tutulacak şekilde SCADA sistemi buharlaştırmada bulunan ısıtıcıyı açıp kapatabilmektedir. İstenilen basınç değeri ve toleransı sistem üzerinden değiştirilebilmektedir. Normal çalışma şartlarında çalışma basıncının 2,0 bar, toleransının ise 0,1 bar olması istenmektedir. İç basınç kontrolünün yanında, buharlaştırıcı içerisindeki suyun seviyesi de SCADA sistemi tarafından algılayıcılar sayesinde sürekli denetlenmektedir. Su seviyesi düştüğünde sistem, buharlaştırıcının su giriş hattında bulunan selanoid valfi açmakta, böylece su alımını başlatmaktadır. Su seviyesi belli bir yüksekliğe ulaştığında ise sistem bunu otomatik olarak algılayıp su alımını kesmektedir. Su alım işlemi dilerse otomatik kontrolden çıkarılarak kullanıcının kontrolüne de bırakılabilmektedir.

3.2 Deney Plan ve Programı

Deneylerin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi ve tekrarlanabilir olmaları için deney hazırlıklarının belli bir standartta yapılması gereklidir. Bu nedenle hazırlık çalışmaları sırasında yapılacaklar bir liste haline getirilmiştir. Ayrıca deney sırasında yapılacaklar

ve dikkat edilmesi gereken konular da ayrıca düzenlenmiştir. Şekil 3.13'te işlemin açıklamalarının, kömür numunesi özelliklerinin bulunduğu genel bilgi föyü örneği gösterilmiştir.

Deney Kodu	113M038 ÜLKEMİZ KÖMÜRLERİ İÇİN YERALTINDA KÖMÜR GAZLAŞTIRMA TEKNOLOJİSİNİN GELİŞTİRİLMESİ			Tarih
	KL11105			
Kömür Bilgileri	Tip	Ağırlık (kg)	Boyut (cm x cm x cm)	Not
	Linyit	45 kg	52x38x22	
Deney Planlaması	Ateşleme	Hava (m ³ /h)	Oksijen (m ³ /h)	Su buharı (kg/h)
0-2 h	x			
2-14 h		x	x	x
Açıklamalar	Deney hazırlıkları 27.07.2015 Pazartesi günü yapılmıştır. 7 adet termoeleman reaktör içerisine yerleştirilmiştir. Tr4,7, 8, 11, 12,16 ve Tr30. Deney 29.07.2015 tarihinde yapılmıştır. Proses 1 saat 40 dakika ateşlemeden sonra 1,5 m ³ /h debi ile oksijen besleme yapılarak başlanmıştır. Proses sırasında oksijen debisi 1,5 m ³ /h-3 m ³ /h arasında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca oksijenle zenginleştirilmiş hava ve daha sonra su buharı verilerle sonuçlara bakılmıştır. Deneye Prof. Dr. Mesut GÜR hocamızda katılmıştır ve proses ateşleme dahil yaklaşık 14 saatlik süre sonunda bitirilmiştir.			
Deney Ekibi	Yasaman FALLAHI	Ahmet YILDIZ	Oğuz BÜYÜKŞİRİN	Ünal ALTINTAŞ
	x	x	x	x

Şekil 3.13: Proses bilgi föyü örneği.

3.2.1 Deney düzeneğinin hazırlanması

Yeraltında kömür gazlaştırma deneylerinin yapılmasında daha önceden de belirtildiği gibi en önemli aşaması, deneyin hazırlık aşamasıdır. Hazırlık aşaması da iki temel bölüme ayrılabilir. Bunlardan ilki deney düzeneği üzerinde bulunan tüm ekipmanların temizliğini ve denetimini kapsamaktadır. İkinci bölüm ise deneyde kullanılacak kömürün ve reaktörün hazırlanmasıdır.

Tesisat üzerinde yapılan temizlik çalışmaları, deneyin sonlanması ile başlamaktadır. Soğutucuda ve toz tutucuda biriken maddelerden örnek alındıktan sonra, yıkama kolonunda ve vakum pompasına ait su tankında bulunan su ile birlikte tahliye edilmektedir. Tüm ekipmanlar deney sonrasında en az bir kere su yardımı ile yıkanmaktadır. Bunun amacı, deney sonrası kalmış atık maddelerin bir sonraki deney hazırlığına kadar sistem üzerinde herhangi bir paslanma ve aşınmaya sebep olmasını engellemektir.

Deney hazırlıklarının başlangıcında, reaktör dışında tüm ekipmanlar tekrar boşaltılarak yıkanmakta, ardından taze su ile doldurulmaktadır. Yıkama kolonunda su hareketini sağlayan pompa çalıştırılarak püskürtücülerden suyun yeterli çıkıp

çıkmadığı kontrol edilmektedir. Vakum pompasına su sağlayan tank da istenilen seviyeye kadar doldurulmaktadır.

Ön hazırlık aşamasının bir diğer önemli noktası ise deney düzeneği üzerinde bulunan bağlantı noktalarının kontrolüdür. Özellikle flanşlı bağlantılar deney başlangıcından önce tekrar kontrol edilmektedir. Hatalı yapılan bağlantılar deney esnasında kaçaqlara ya da hatta temiz hava girişine sebep olmaktadır. Her iki durumun da olumsuz etkileri bulunur. Olası bir kaçak durumunda deney ortamına zehirli gazlar yayılabilmektedir. Tesisata taze hava girmesi ise elde edilen yapay gazın özelliklerini değiştirmekte, tekrar yanmalara sebep olabilmektedir. Özellikle bu durumdan kaçınılmalıdır.

Deney hazırlıklarının asıl kritik noktası ise kullanılacak olan kömürün ve reaktörün hazırlanmasıdır. Sağlıklı bir deney için dikkat edilmesi gereken birkaç nokta bulunmaktadır. Bunlardan ilki üzerinde deney yapılacak kömürün büyüklüğüdür. Kömür, reaktör içerisinde, özellikle yan taraflardan mümkün olduğunca az boşluk kalacak düzeyde büyük seçilmelidir. Büyük bir kömür bloğu hem reaktör içerisinde adyabatik şartların sağlanmasını kolaylaştırmakta, hem de daha sağlıklı bir gazlaştırma yaşanmasını sağlamaktadır.

Kömür bloğu eğer biçimsiz ise, kömür öncelikle olabildiğince dikdörtgen prizma şekline sokulmaktadır. Reaktör tabanına 2-3 cm kalınlığında olacak şekilde kum yayılmakta, kömür bloğu bu kum tabakasının üzerine yerleştirilmektedir. Reaktör duvarları ile kömür bloğu arasında kalan boşluk ise ince kömür taneleri ile doldurularak sıkıştırılmakta, böylece boşluk herhangi bir kısım kalmaması sağlanmaktadır. Kömürün durumuna bağlı olarak reaktör giriş-çıkışı ile gazlaştırma kanalının bağlantısının herhangi bir çökme ve benzeri bir durum ile engellenmediğinden emin olmak amacı ile kısa çelik borular kullanılabilir.

Reaktör içerisine yerleştirilen kömür bloğunda 22 mm yarıçapa sahip matkap yardımı ile gazlaştırma kanalı açılmaktadır. Ayrıca ısı çiftlerinin kömür içerisine yerleştirilmesi için de kömür bloğu yan taraflardan 10 mm çaplı matkap ile kömürün orta noktasına kadar delinmektedir. Isıl çift için kanallar açılır iken Tr4, Tr8, Tr12 ve Tr16 kodlu ısı çiftlerinin tam olarak gazlaştırma kanalı içerisine denk geleceğinden emin olunmalıdır. Böylece deney süresince kömür sıcaklığının yanı sıra, gazlaştırma kanalının sıcaklıklarının da denetlenmesi mümkün olmaktadır.

Kömür yerleştirilerek gazlaştırma kanalı ve ısı çift kanalları açıldıktan sonraki işlem, kömürün üst kısmının herhangi bir gaz kaçağı olmayacak şekilde ısıya dayanıklı tuğla ile kapatılmakta ve ısı kayıplarını engellemek amacı ile tuğlaların üzerine seramik yünü serilmektedir.

Son olarak deney esnasında kullanılacak olan azot, oksijen, propan ve referans gaz tüplerinin yeterli miktarda ve seviyede bulunduğu kontrol edilmekte, eksik bulunması durumunda yenisinin temin edilmesi sağlanmaktadır.

3.2.2 Deneyin yapılışı

Tüm hazırlıklar ve kontroller yapıldığında deneye başlanabilir. Deney başlanmadan önce yapılması önerilen birkaç işlem bulunmaktadır. İlk olarak GC cihazı ile referans gaz kullanılarak deney öncesinde bir kere analiz yapılarak cihazın kalibrasyonun geçerliliğinin test edilmesi, deney sonuçlarına olan güveni arttıracaktır. Bunun yanında deney başlamadan hemen önce yakıcıda bulunan pilot alevin ateşlenmesi ve deney boyunca alevin korunması, deney boyunca oluşabilecek hoş olmayan kokuların azaltılması ve ortaya çıkabilecek yanabilir gazların imhası için tavsiye edilmektedir. Yakmanın başlaması ile birlikte yıkama kolonunda su devirdaimi de başlatılmaktadır. Deneyin ilk aşaması, kömür bloğunun yakılarak sıcaklığının yükseltilmesidir. Yapılan literatür araştırması ve ön çalışmaların sonucunda kömür bloğu sıcaklığının gazlaştırma sürecine büyük etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Yetersiz bir ilk ısıtma sonucu gazlaştırma deneyi başarısız olabilmektedir.

Yakma aşamasında besleme düzeneği reaktörden ayrılmaktadır. Kömür, giriş tarafından reaktörün içerisine doğru verilen propan alevi tarafından ısıtılmakta ve yakılmaktadır. Reaktörün içerisine doğru bir akım oluşması için vakum pompası kullanılmaktadır. Bu evrenin başlaması ile birlikte SCADA sistemi üzerinden veri kaydı da başlatılır. Yakma aşaması bir buçuk saat ile 2 saat arasında sürmektedir.

Yakma aşaması ile kömür bloğu yeterli düzeyde ısıtıldığında, besleme düzeneği reaktör girişindeki rekorlu bağlantı yardımı ile takılmakta ve gazlaştırma ajanları daha önce belirlenmiş ve ayarlanmış debilerde beslenmeye başlanmaktadır. Bu aşamadan sonra deneyin gidişatı dikkatle takip edilir. Sıcaklıklarda yaşanan aşırı yükselmeler ya da beklenmeyen düşüşler takip edilerek uygun debi ayarlamalı yapılır.

Daha önceden bahsedildiği şekilde GC cihazı ancak 20 dakikada bir örnek alabilmektedir. Fakat çoğu zaman bu sıklıkta örnek almak da mümkün olmamaktadır. Örnek alma hattında bir önceki analizden kalan yapay gazın bulunması ihtimaline karşı, bu hat üzerinden bir süre boyunca gaz tahliye edilmektedir. Tahliye işlemi sonucunda güncel gazın örnekleneceğinden emin olunmadan GC'ye örnek alımı gerçekleştirilmemektedir. Sonuçların zaman farkı ile geliyor olması nedeni ile yakıcı tarafı da sürekli olarak kontrol edilerek gazlaştırma sonucu yanıcı gaz eldesinin gerçekleşip geçmediği görsel olarak teyit edilir.

Gazlaştırma işlemi sırasında çıkan H_2S 'in verimli bir şekilde tutulabilmesi için yıkama kolonu içerisinde dolaşan suyun bazikliğini kaybetmemesi gerekir. Genel olarak pH seviyesinin 9'un altına düşmemesi istenmektedir. Bu nedenle deney boyunca yarım saat aralıklar ile pH seviyesi kontrol edilmekte ve gerektiği halde sisteme NaOH eklenmektedir.

Deney ilerledikçe bir noktadan sonra gazlaştırma sürecinin sağlıklı yürümediği, aynı zamanda hem sıcaklıkların kontrol edilmesi ve hem de kaliteli yanıcı gaz eldesinin mümkün olmadığı gözlemlendiğinde deneyin sonlandırılma kararı alınır. Deney sonlandırma işlemi için öncelikle gaz beslemesi kesilmektedir. Reaktör içerisinde tepkimeye girebilecek herhangi bir gaz bileşeninin kalmadığından emin olunmak istenir ise sisteme saf azot basılabilmektedir. Bu işlem ayrıca soğumayı da hızlandırmaktadır. Reaktörün herhangi bir yerden içerisine taze hava çekemeyeceğinden emin olunmalıdır. Yapay gaz çıkışı durana kadar yakıcı, yıkama kolonu ve soğutma fanı gibi teçhizatlar kapatılmamalıdır. Ancak sıcaklıklar güvenli bir seviyeye düştüğünde ve yapay gaz çıkışı tamamen durduğunda bu teçhizatların kapatılması tavsiye edilir.

Reaktör içerisindeki kömür bloğu soğuduğunda reaktör açılabilir. Deneyden arda kalan kömürün durumunu incelemek için yalıtım için konulan tabakalar kaldırılır. Genellikle oyuk büyümesine bağlı olarak kömür bloğunda çökmeler gerçekleşmektedir. Bu nedenle kömür bloğunun üst kısmına dizilmiş olan ısıya dayanıklı tuğlaların özenle alınması gerekmektedir. Kömür bloğuna erişildiğinde oyuğun ilerlemesi ve deneyin nasıl gerçekleştiği ile ilgili tespitler yapılarak kömür bloğu fotoğraflanır. Gazlaştırılan bölümlerden kömür ve kül örnekleri alınarak reaktörün temizlenme aşamasına geçilir.

4. YAPAY GAZ (SYNGAS) ENERJİ POTANSİYELİ

Yeraltında kömür gazlaştırma işlemi verimi aşağıda belirtilen parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir;

1. Kömür tipi,
2. Kömür uzunluğu,
3. Kömür genişliği,
4. Kömür kütlesi,
5. Gazlaştırma ajanı,
6. Gazlaştırma ajanı besleme debisi,
7. Gazlaştırma kanalı,
8. Ateşleme süresi,

TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında yapılan işlemlerde yukarıda belirtilen parametreler incelenmeye çalışılmıştır. Gerçekleştirilen işlemlerin özeti Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Gazlaştırma işlemi belirtilen parametrelere bağlı olmakla beraber gazlaştırma ajanı besleme sırası dahil işlemin ilerlemesine etki etmektedir. Proses başarısı yapay gaz enerji kapasitesi, kavite oluşumu, sinterleşme oluşumu incelenerek değerlendirilmiştir. Proses boyunca reaktör içerisinde yapılan sıcaklık ölçümleri de gazlaştırmanın ilerlemesi hakkında bilgi vermektedir.

İşlemin ilerlemesinde ve veriminin artırılmasında en önemli etkenlerden biri kontrollü tepkime besleme noktası (CRIP) metodudur. Laboratuvar ölçekli yapılan çalışmada CRIP metodu uygulanamamıştır. CRIP metodunun uygulanamaması sonucu ikinci bir ateşleme noktası oluşturulamamış ve tek kavite ile işlemler tamamlanmıştır. TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında işlemler ileri yanma metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yeraltında kömür gazlaştırma işleminde ileri yanma metodunun gazlaştırma verimi incelenmiştir.

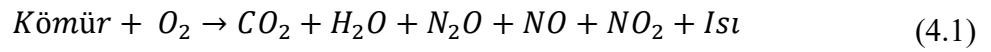
Çizelge 4.1: TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında yapılan deneyler

Deney Kodu	Reaktör Boyutu		Gazlaştırma Ajanı			Kömür Bloğu		Ateşleme Süresi (saat)	Proses Süresi (saat)	Gazlaştırma Kanalı
	Küçük Reaktör	Büyük Reaktör	Hava	Oksijen	Su Buharı	Boyut (cm)	Ağırlık (kg)			
1	x		x	-	-	55x40x23	70	2	7	22 mm delik
2	x		-	x	-	62x41x30	85	2	13	22 mm delik
3	x		x	x	-	62x41x20	50	2	13	22 mm delik
4	x		x	x	x	52x38x22	45	1.5	13	22 mm delik
5	x		-	x	x	52x34x25	45	2	13	22 mm delik
6	x		-	x	x	60x40x40	93	2	13	22 mm delik
7		x	x	x	x	105x44x41	169	4	26	30x15 U profil

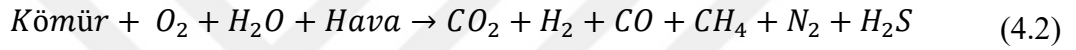
Bu bölümde gazlaştırma işlemi sonucunda açığa çıkan yapay gazın (syngas) enerji potansiyeli incelenmiş ve işlemin verim analizi yapılmıştır. Verim hesabı için reaktör içerisine yerleştirilen kömür bloğu kütlesi, yapay gaz debisi ve bağlı olarak alt ısıl değeri kullanılmıştır.

Verim analizi yapılabilmesi için öncelikle linyit kömürünün yanma reaksiyonun incelenmiştir. Linyit kömürü yanma ve gazlaştırma işlemleri bileşen katsayılarından bağımsız olarak aşağıda özetlenmiştir.

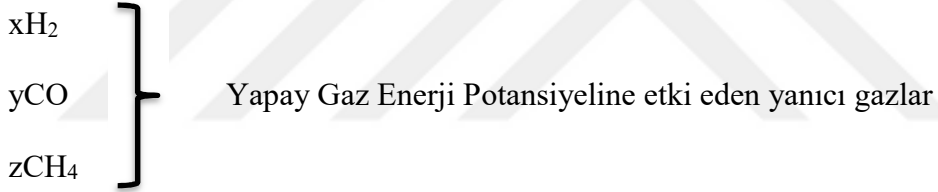
Linyit Kömürü Yanma:



Gazlaştırma Reaksiyonu:



Yapay Gaz (Syngas) Isı Kapasitesi:



Çizelge 4.1’de verilen tabloya göre işlemler için karşılaştırmaları sonuçlar oluşturulmuş, gazlaştırma parametrelerine göre sınıflandırma yapılmıştır.

4.1 Yanma İşlemi Enerji Potansiyeli

Çalışmanın bu bölümünde kömürün yanma işlemine karşılık gelen enerji potansiyeli incelenmiştir. TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında Dresden Teknik Üniversitesi tarafından yapılmış “kömür analizi“ sonuçlarına göre orijinal numunede kömürün alt ısıl değeri 15678 kJ/kg’dır. Verim hesaplamasında kömürün yanma değeri olarak bu değer kullanılmıştır.

$$Q = m_{\text{kömür}} \times H_a \quad (4.3)$$

Q : Yanma sonucu açığa çıkacak enerji miktarı (kJ)

$m_{\text{kömür}}$: Proseste kullanılan kömür kütlesi (kg)

H_a : Alt ısı değer (kJ/kg)

Kömürün gazlaştırma işlemi olmadan yakılarak kullanılması sonucu açığa çıkacak enerji miktarı Denklem 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Burada alt ısı değer orijinal numunedeki alt ısı değer olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan işlemlerde kullanılan kömürlere ait değerler Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2: Kömürün yanma işlemi enerji potansiyelleri

Deney Kodu	Kömür Bloğu		Enerji Potansiyeli (MJ)
	Boyut (cm)	Ağırlık (kg)	
1	55x40x23	70	1097.46
2	62x41x30	85	1332.63
3	62x41x20	50	783.900
4	52x38x22	45	705.510
5	52x34x25	45	705.510
6	60x40x40	93	1458.054
7	105x44x41	169	2649.582

Çizelge 4.2’de laboratuvar ölçekli Yapılan işlemlerde kullanılan kömür bloklarına ait ısı değerler verilmiştir. Yapılan işlemlerde elde edilen yapay gaz bileşimine bağlı olarak her bir proses için gazlaştırma verimi Bölüm 4.3’te incelenmiştir.

4.2 Gazlaştırma İşlemi Enerji Potansiyeli

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde yapay gaz bileşenleri gaz kromatografi cihazı (Agilent 7890B) ile tespit edilmiştir. Gaz kromatografi cihazı %hacim olarak gaz bileşenlerini göstermektedir. 5, 6 ve 7 numaralı deneylerde gaz kromatografi cihazının yanı sıra MRU Varioplus cihazı da kullanılarak yapay gaz bileşimi tespit edilmiştir. MRU Varioplus cihazı ile yapılan ölçümlerde yapay gaz bileşiminin yanında gazın alt ve üst ısı değerleri de verilmektedir.

Gaz kromatografi cihazı ile yapılan ölçümler sonucu belirlenen gaz bileşimi için alt ısıl değer hesabı yapılmıştır.

Gaz bileşimi alt ısıl değeri hesabı referans değerleri Çizelge 4.3'te örnek bir gaz bileşimi için verilmiştir.

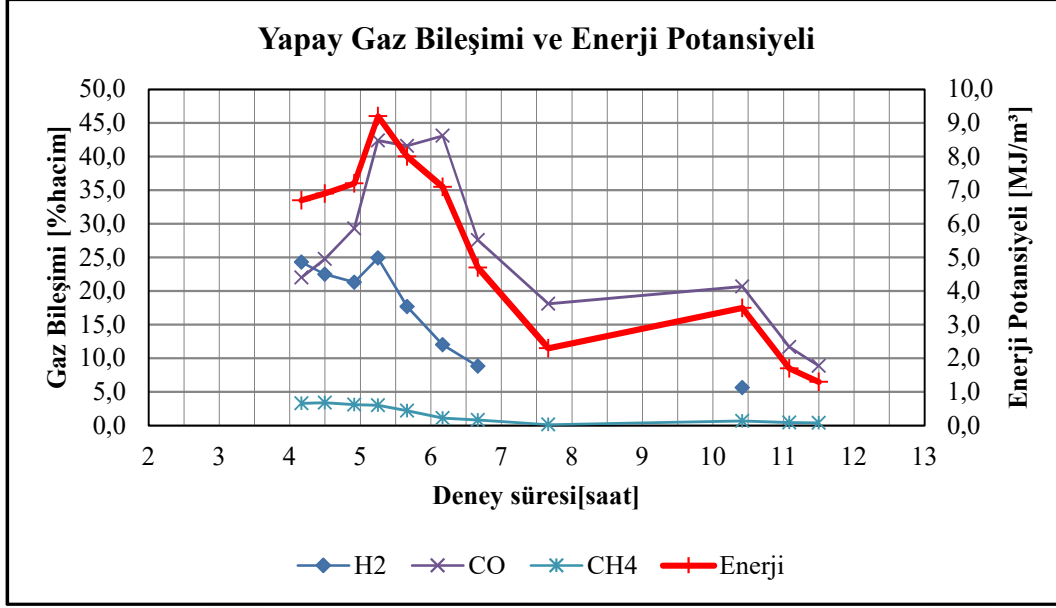
Çizelge 4.3: Örnek yapay gaz enerji potansiyeli hesabı.

Gaz Bileşeni	Hacimsel Oran (%hacim)	Molar Kütlesi (M) (g/mol)	H _a (MJ/m ³ , 25 °C)	H _a (MJ/m ³ , 0 °C)	Molar Ağırlık (g/mol-gaz)	H _a (gaz bileşen)
CO ₂	35,9	44,0	0,0	0,0	1579,6	0,0
CO	31,1	28,0	11,5	12,6	870,8	3,9
H ₂	24,7	2,0	9,9	10,8	49,4	2,67
CH ₄	3,3	16	35,9	39,2	52,8	1,29
O ₂	1,6	32	0,0	0,0	51,2	0
N ₂	3,4	28	0,0	0,0	95,2	0

Çizelge 4.3'te verilen referans değerlere göre hesaplama yapıldığında 2 numaralı proses sonucunda açığa çıkan yapay gazın enerji potansiyeli 6,4-8,4 MJ/Nm³ olarak hesaplanmıştır.

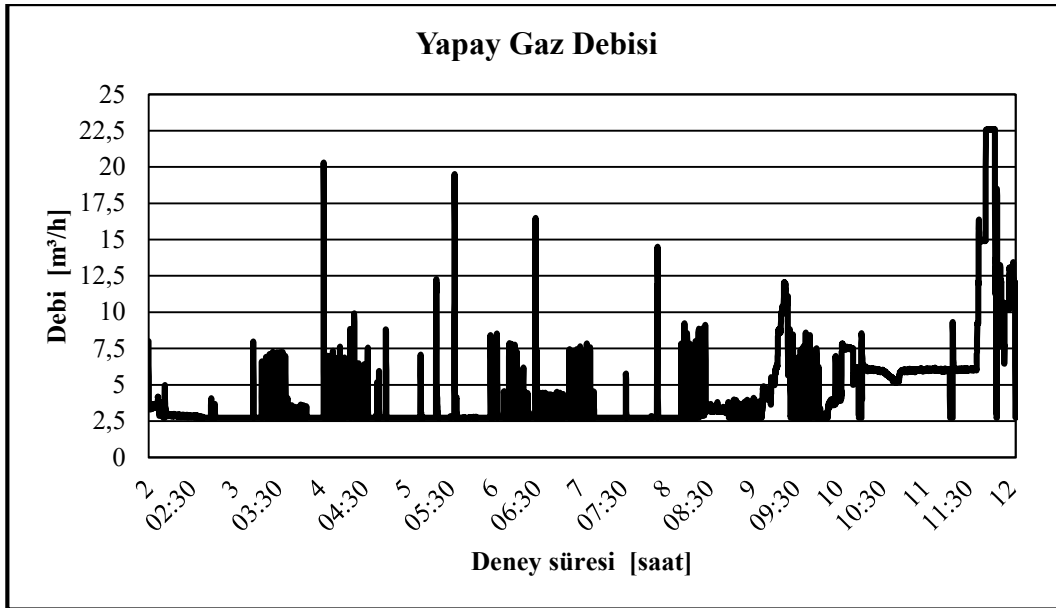
3 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli Şekil 4.1'de verilmiştir.

3 numaralı proses sonucu açığa çıkan yapay gaz enerji potansiyeli 4,7-9,2 MJ/m³ olarak hesaplanmıştır. İşlemin oksijen ile gazlaştırma yapılan bölümünde, yaklaşık 7 saat, toplam 16,6 Nm³ yapay gaz açığa çıkmıştır. 14.8 Nm³ yapay gazın ortalama enerji potansiyeli 7,5 MJ/m³'tür. 1.8 Nm³ yapay gazın ortalama enerji potansiyeli 4,7 MJ/m³'tür. Toplamda 119,7 MJ enerji gazlaştırma işleminin saf oksijen ile gazlaştırma bölümünde açığa çıkmıştır. Hava ve oksijen birlikte gazlaştırma ajanı olarak kullanıldığı bölümlerde yapay gaz enerji potansiyeli 1,3-3,5 MJ/m³ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1: 3 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.

İşlemin ilgili bölümünde ortalama enerji potansiyeli $2,2 \text{ MJ/m}^3$ olmaktadır. Hava ve oksijenin birlikte beslendiği bölümde açığa çıkan yapay gaz miktarı $24,72 \text{ Nm}^3$ ve enerjisi $54,4 \text{ MJ}$ olarak hesaplanmıştır. Proses boyunca hem saf oksijen beslenen bölüm hem de hava ve oksijenin birlikte beslendiği bölümde toplam açığa çıkan yapay gazın enerji potansiyeli 174 MJ olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.2’de verilen değerlere göre 3 numaralı işlemin gazlaştırma verimi %22,2 olarak hesaplanmıştır. 3 numaralı proses boyunca açığa çıkan yapay gaz debisi Şekil 4.2’de verilmiştir.

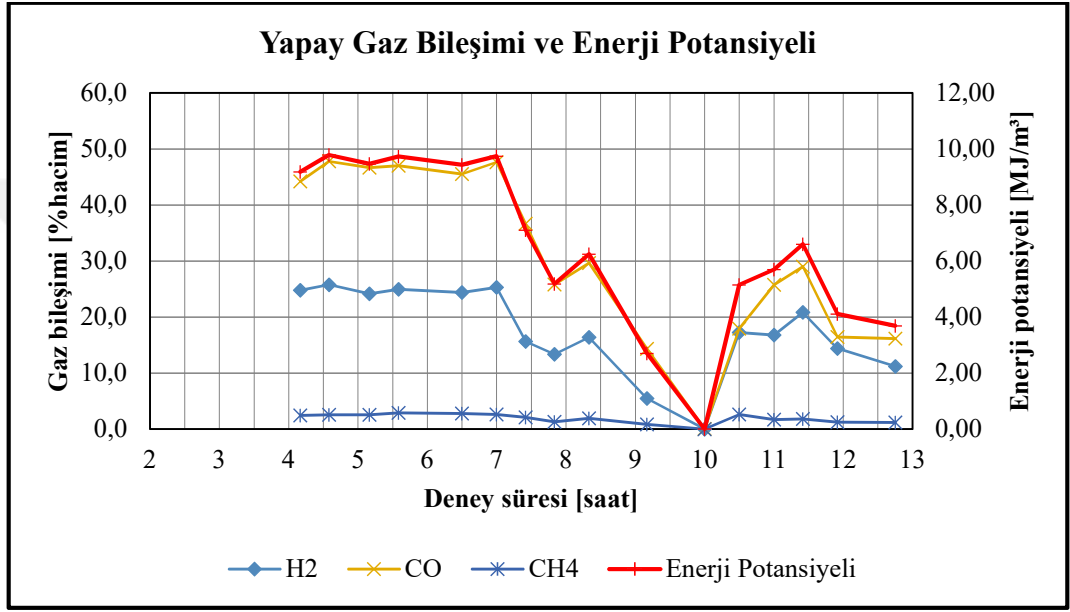


Şekil 4.2: 3 numaralı proses yapay gaz debisi.

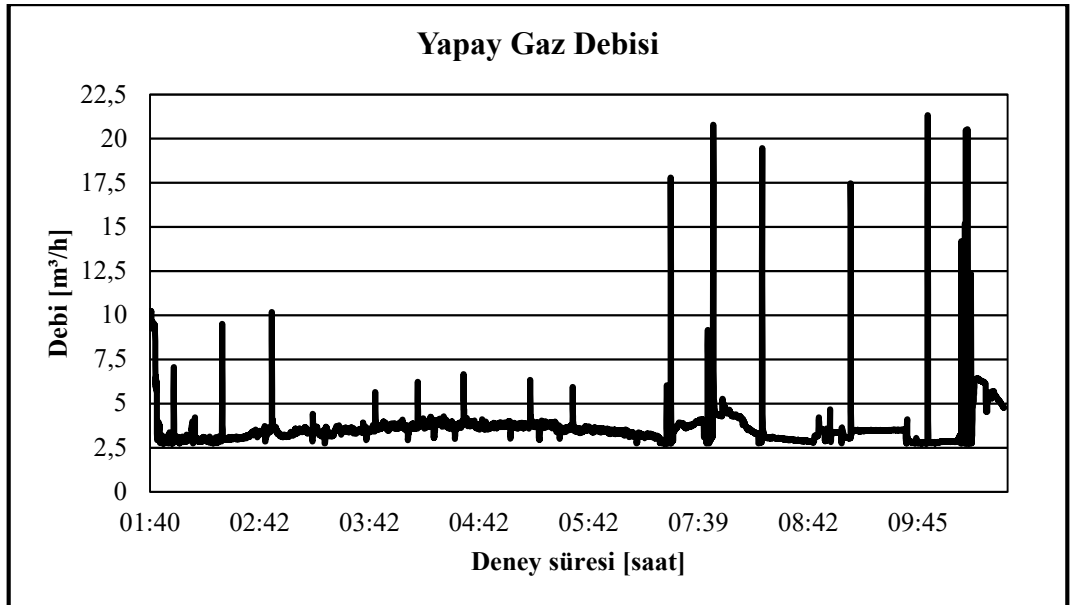
4 numaralı proses;

Bu proste hava, oksijen ve su buharı birlikte gazlaştırma ajanı olarak kullanılmıştır. Ateşleme işleminden sonra yaklaşık 7 saat süre boyunca saf oksijen beslenmiş daha sonra 50 dakika süre boyunca oksijence zenginleştirilmiş hava beslenmiş ve işlemin son bölümünde oksijen ve su buharı birlikte beslenmiştir.

Şekil 4.3'te 4 numaralı proses için yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli gösterilmiştir.



Şekil 4.3: 4 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.

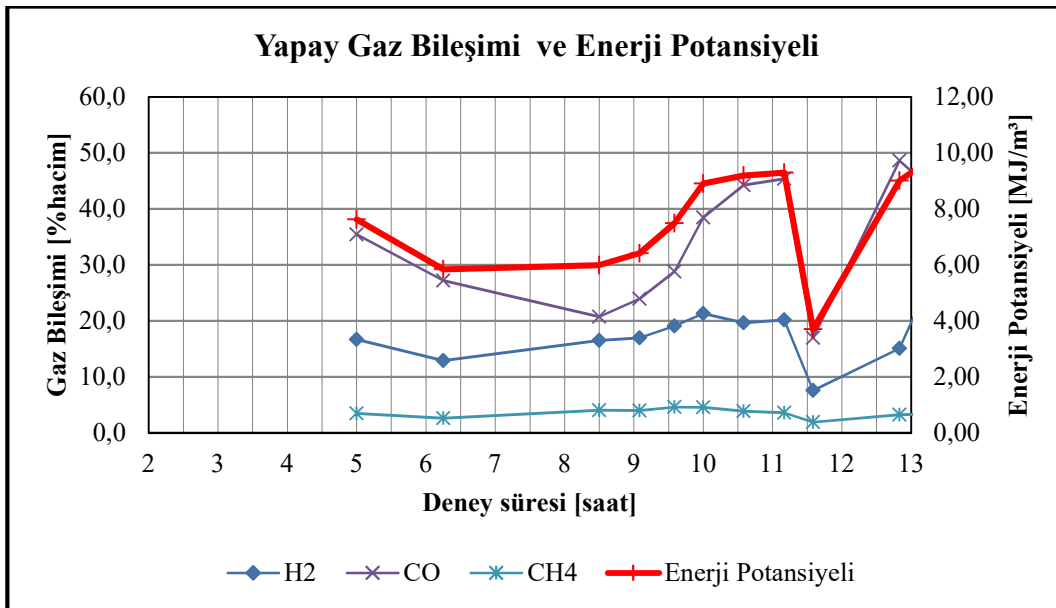


Şekil 4.4: 4 numaralı proses yapay gaz debisi.

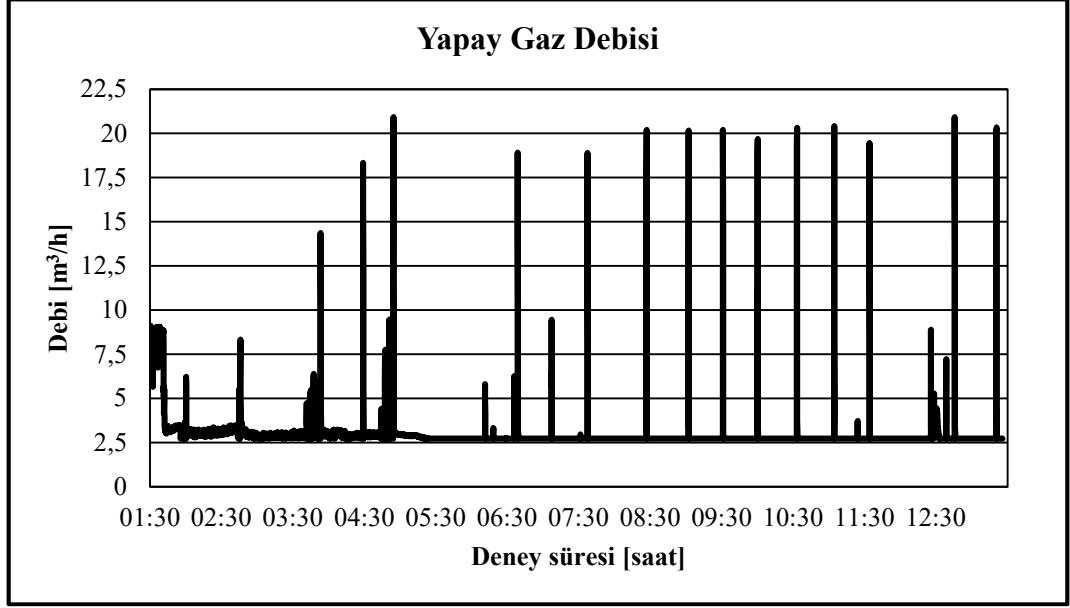
4 numaralı proseste Şekil 4.3'te görüldüğü gibi işlemin 7. saatine kadar açığa çıkan yapay gazın ortalama enerji potansiyeli 9,56 MJ/m³'tür. İlgili bölümde açığa çıkan yapay gaz miktarı ise 21 Nm³ olarak hesaplanmıştır. Bu aşamada açığa çıkan yapay gazın toplam enerji potansiyeli 202 MJ olarak hesaplanmıştır. Oksijence zenginleştirilmiş hava ile yapılan proses sonucunda ortalama enerji potansiyeli 2,70 MJ/m³ olan 2,85 Nm³ yapay gaz açığa çıkmıştır. Bu bölümde açığa çıkan gazın toplam enerji potansiyeli 7,65 MJ olarak hesaplanmaktadır. İşlemin son bölümünde oksijen ve su buharı gazlaştırma ajanı olarak kullanılmıştır. Bu bölümde açığa çıkan yapay gazın ortalama enerji potansiyeli 5,05 MJ/m³ miktarı ise 3,6 Nm³'tür, toplam enerji potansiyeli ise 18 MJ'dür. Proses süresince açığa çıkan yapay gazın toplam 228 MJ enerji potansiyeli mevcuttur. Proseste kullanılan kömürün yanma işlemine göre enerji potansiyeli 745,02 MJ olduğuna göre gazlaştırma işleminin verimi %32,3 olarak hesaplanmaktadır.

5 numaralı proses;

Bu proseste oksijen ve su buharı gazlaştırma ajanı olarak kullanılmıştır. Proses süresince gaz kromatografi cihazından yapılan ölçümlere göre yapay gaz enerji potansiyeli 4,7-10 MJ/m³ arasında değişim göstermektedir. Özellikle işlemin son aşamasında su buharı beslemesinden sonra açığa çıkan yapay gazın enerji potansiyelinin H₂ ve CO artışına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: 5 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.

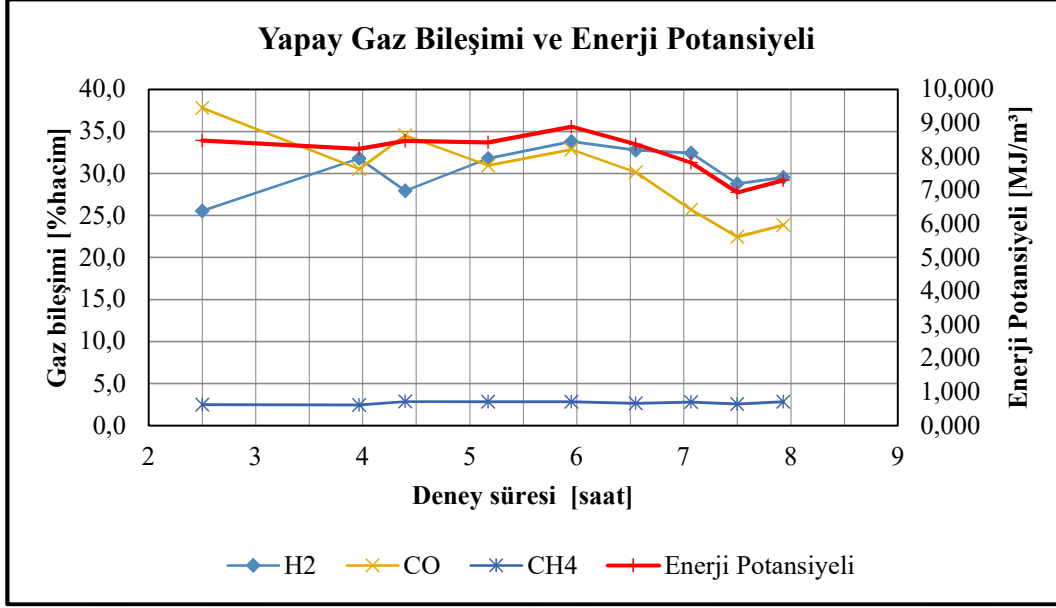


Şekil 4.6: 5 numaralı proses yapay gaz debisi.

İlk 7 saatlik bölümde yapay gaz ortalama enerji potansiyeli $6,73 \text{ MJ/m}^3$, açığa çıkan yapay gaz miktarı 18 Nm^3 , toplam enerji potansiyeli ise $122,5 \text{ MJ}$ olarak hesaplanmıştır. Daha sonraki 4 saatlik bölümde ortalama enerji potansiyeli $7,88 \text{ MJ/m}^3$, açığa çıkan yapay gaz miktarı 10 Nm^3 , enerji potansiyeli $78,8 \text{ MJ}$ olarak hesaplanmıştır. Yarım saatlik periyotta ortalama enerji potansiyeli $3,7 \text{ MJ/m}^3$ olan $1,2 \text{ Nm}^3$ gaz çığa çıkmıştır. Bu bölüm de $4,4 \text{ MJ}$ enerji potansiyeli mevcuttur. İşlemin su buharı beslenmesi bölümünde yapay gaz enerji potansiyelinde artış meydana gelmiştir. Bu bölümde ortalama yapay gaz enerji potansiyeli $9,55 \text{ MJ/m}^3$ 'tür. Bu bölümde açığa çıkan yapay gaz miktarı 5 Nm^3 olup enerji potansiyeli $50,2 \text{ MJ}$ olarak hesaplanmıştır. 5 numaralı proseste toplamda 256 MJ enerji potansiyeli olan yapay gaz oluşmuştur. Kömür bloğunun enerji potansiyeli $745,02 \text{ MJ}$ olduğundan gazlaştırma verimi $\%36,3$ olarak hesaplanmıştır.

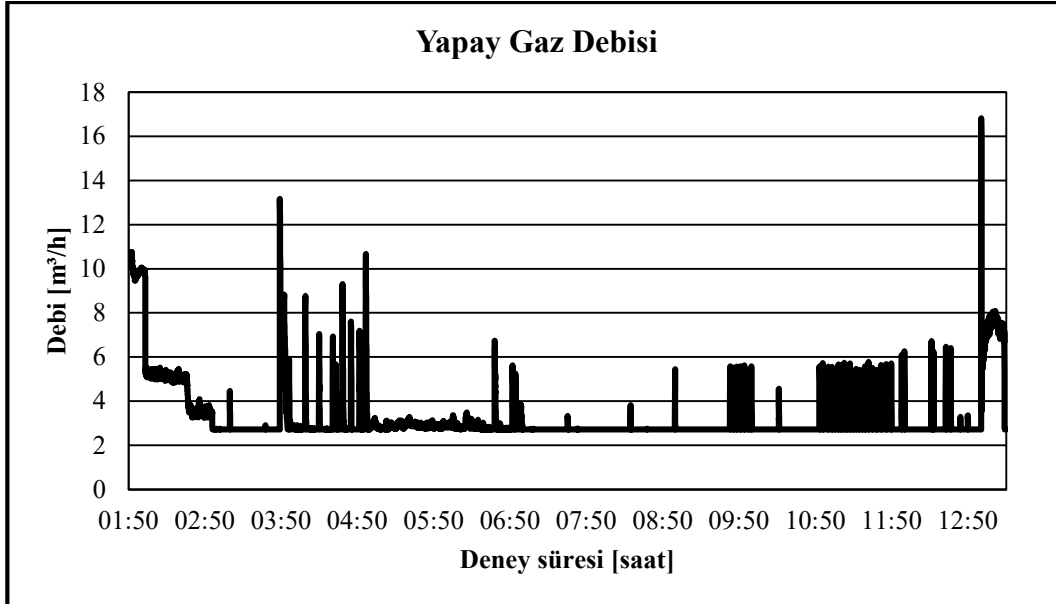
6 numaralı proses;

Bu proses 5 numaralı proses ile karşılaştırma yapmak amacıyla benzer parametreler kullanılarak yapılmıştır. Gazlaştırma ajanı olarak oksijen ve su buharı kullanılmıştır. Şekil 4.7'de yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli verilmiştir.



Şekil 4.7: 6 numaralı proses yapay gaz bileşimi ve enerji potansiyeli.

Gazlaştırma işlemi süresince toplam 36 Nm³ yapay gaz açığa çıkmıştır. Şekil 4.8’de açığa çıkan yapay gaz debisi verilmiştir. İlk 8 saatlik bölümde 26Nm³ yapay gaz ortalama 8,10 MJ/m³ enerji potansiyeli ile açığa çıkmıştır. Toplam enerji potansiyeli 211 MJ’dür. İşlemin 5 saatlik bölümünde ise toplam 10 Nm³ gaz ve 41,7 MJ enerji potansiyeli açığa çıkmıştır. 6 numaralı proseste toplamda 252,7 MJ enerji potansiyeli olan yapay gaz üretilmiştir. Proseste gazlaştırma verimi %17,3 olarak hesaplanmıştır.

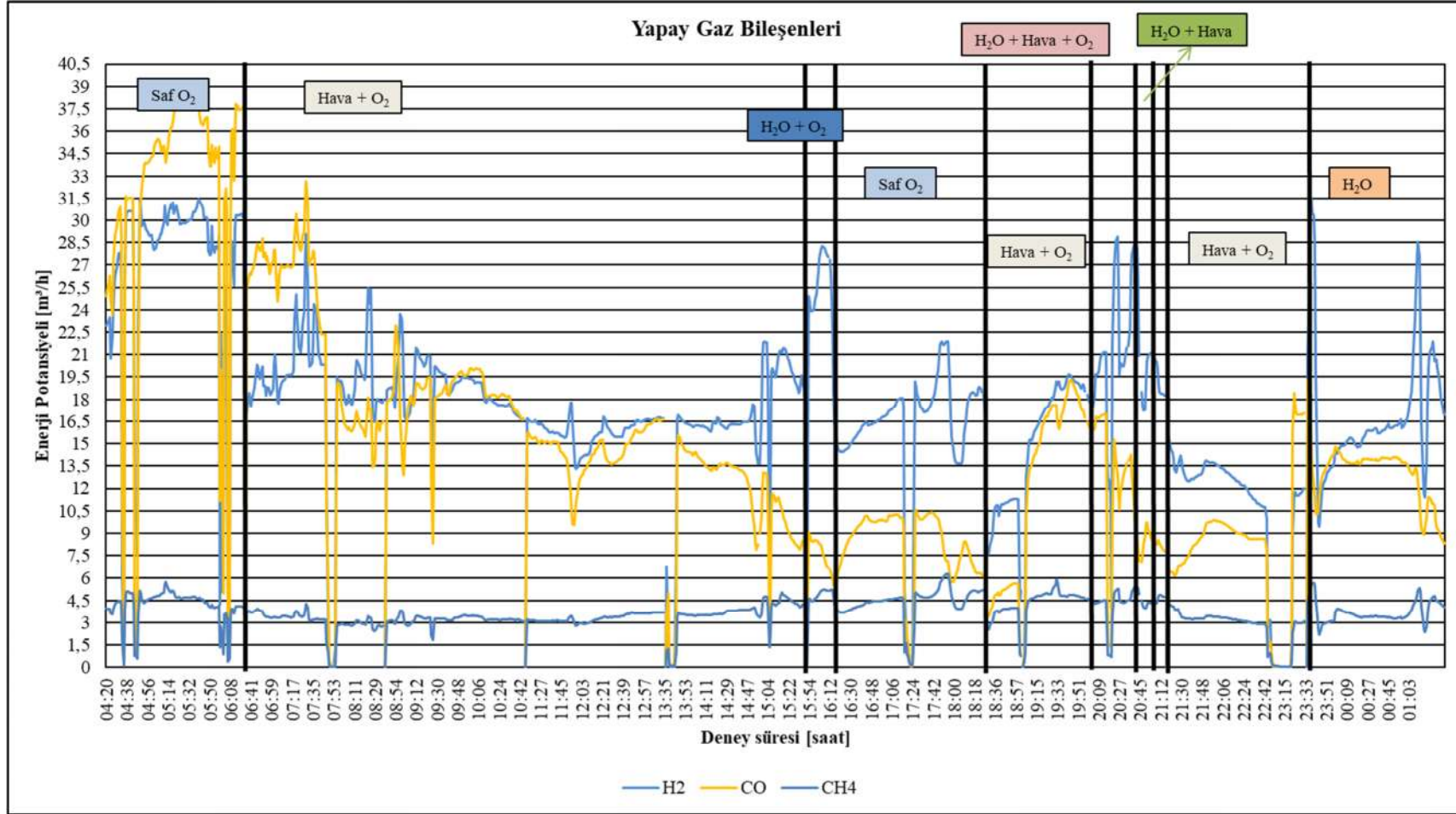


Şekil 4.8: 6 numaralı proses yapay gaz debisi.

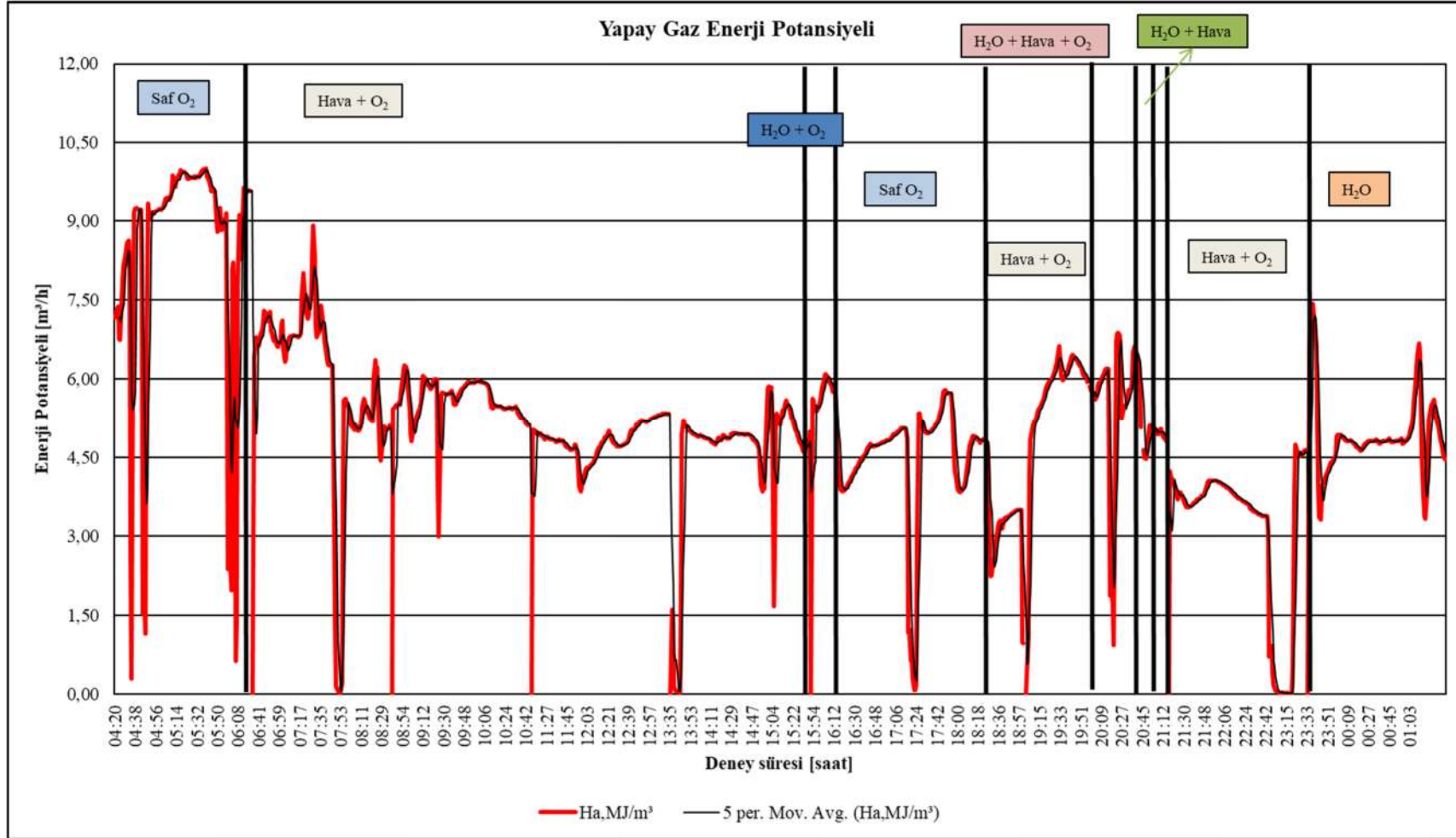
7 numaralı proses;

Bu proste gazlaştırma reaktörü değiştirilmiştir. Proses boyunca önce saf oksijen, sonra oksijence zenginleştirilmiş hava, oksijen ve su buharı karışımı gazlaştırma ajanı olarak kullanılmıştır. Proses yapay gaz enerji potansiyeli Şekil 4.9'da verilmiştir. Proste 2 saat saf oksijen beslenen bölümde 12 m³, 103 MJ enerji potansiyeli olan yapay gaz üretilmiştir.

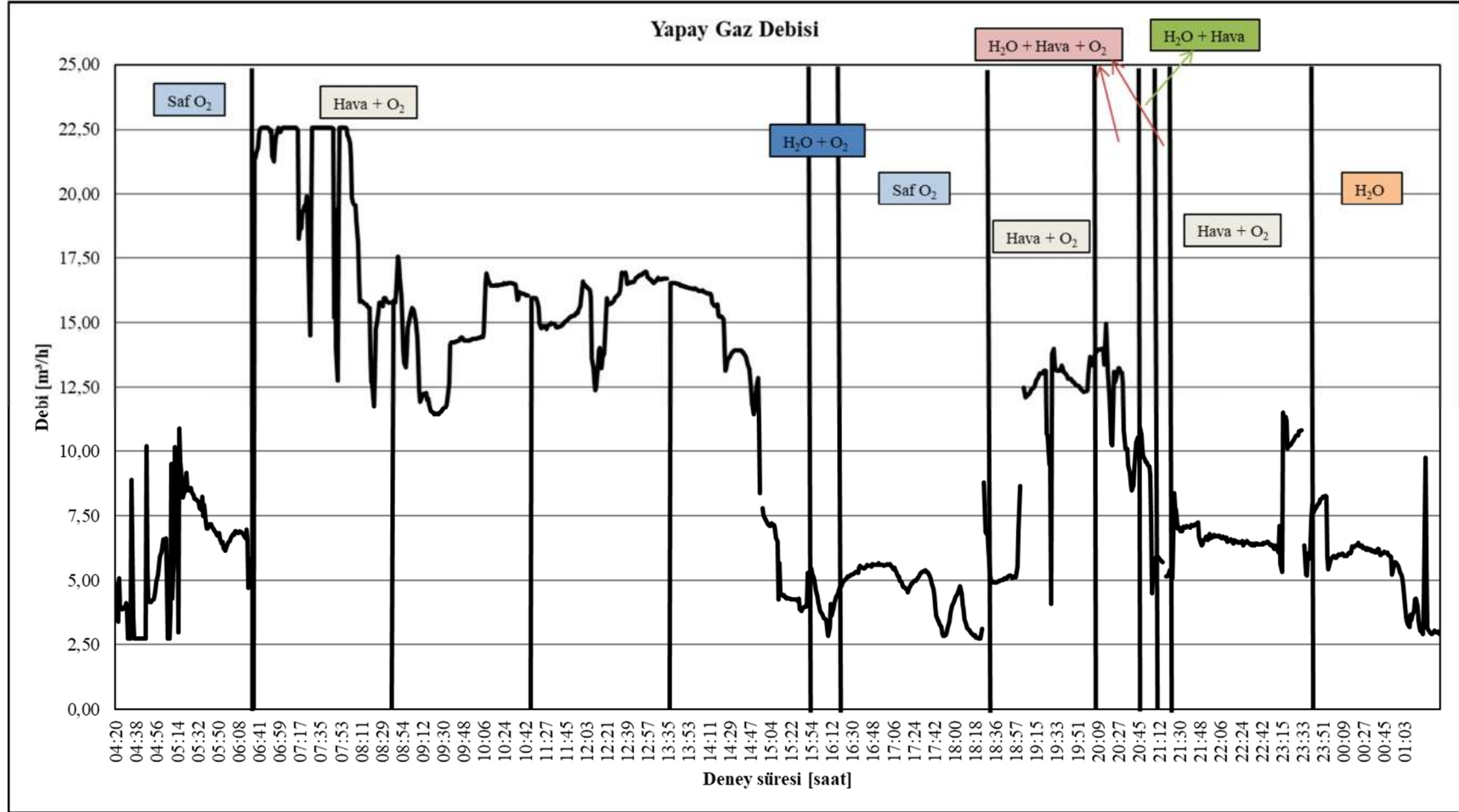




Şekil 4.9: 7 numaralı proses yapay gaz bileşimi.



Şekil 4.10: 7 numaralı proses enerji potansiyeli.



Şekil 4.11: 7 numaralı proses yapay gaz debisi.

Şekil 4.9-4.11’de gösterilen yapay gaz enerji potansiyeli ve yapay gaz debisi değerleri Çizelge 4.4 ile özetlenmiştir. Çizelge 4.4’te gazlaştırma işlemi aşamalarında ayrı ayrı enerji potansiyelleri ve anlık olarak yapay gazın gücü verilmiştir.

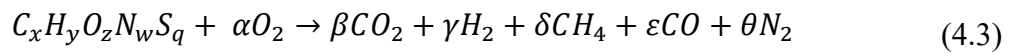
Çizelge 4.4: Proses aşamalarına göre enerji potansiyeli değerleri.

Gazlaştırma Ajanı	Toplam Enerji Potansiyeli (MJ)	Gazlaştırma Gücü (kW)
Saf O ₂	149,44	9,84
Hava ve O ₂	778,32	18,8
O ₂ ve H ₂ O	7	6,48
Hava, O ₂ ve H ₂ O	53,87	16,03
Hava ve H ₂ O	9,67	16,12
H ₂ O	54,37	7,55
Toplam	1052,66	

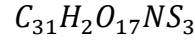
Proses 7’de kullanılan kömür kütlesinin enerji potansiyeli 2649,582 MJ’dür. Gazlaştırma işlemi sonucunda 1052,66 MJ enerji potansiyeli bulunan yapay gaz açığa çıkmıştır. Proses sonucunda toplam %39,7 verimle bir gazlaştırma yapılmıştır.

4.3 Gazlaştırma İşlemi Karbon Dengesi

Bölüm 4.1 ve 4.2’de kömürün enerji potansiyeline göre gazlaştırmanın verimi hesaplanmıştır. Bu bölümde kömürün elementel analizine göre içerisinde bulunan C (karbon) oranına ve gazlaştırma işlemi sonucunda açığa çıkan karbon miktarına bağlı olarak gazlaştırma işleminin verimi hesaplanmıştır.



Denklem 4.3 gazlaştırma ajanı olarak O₂ (oksijen) kullanılması işlemi için gazlaştırma reaksiyonunu ifade etmektedir. Burada Dresden Teknik Üni. yapılan kömür analizine göre kuru numunede kömür bileşeni aşağıdaki gibi oluşmaktadır;



Bu bölümde 6 ve 7 numaralı proses için yapay gaz bileşiminden C (karbon) içeriği hesaplanmıştır.

6 numaralı proseste yapay gaz debisi, sıcaklığı ve bileşimi dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda 13,865 kg C (karbon) açığa çıktığı hesaplanmıştır. Proseste başlangıç kömür kütlesi 93 kg olduğu düşünüldüğünde Çizelge 2.1'de gösterildiği gibi kuru numunede ağırlıkça %54,23 karbon içeren kömür numunesinde yaklaşık 50,43 kg C (karbon) olduğu hesaplanmıştır. Buna göre %27,5 verimle karbon dönüşümü sağlanmıştır. Karbon dönüşümünde yanıcı gaz (CO,CH₄) oranı ise %11 olarak hesaplanmıştır. Proseste gazlaştırma verimi ise %17,3 olarak hesaplanmıştır.

7 numaralı proseste yapay gaz debisi, sıcaklığı, içeriği dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda 39,344 kg C (karbon) açığa çıktığı hesaplanmıştır. Proseste başlangıç kömür kütlesi 169 kg olduğu düşünüldüğünde yaklaşık 91,65 kg C (karbon) olduğu hesaplanmıştır. Buna göre %42,9 verimle karbon dönüşümünün sağlandığı sonucuna ulaşılabilir. Bölüm 4.2'de enerji potansiyeli hesabına göre kömürün gazlaşma verimi %39,7 olarak hesaplanmıştır.

5. PROSES DEĞERLENDİRME

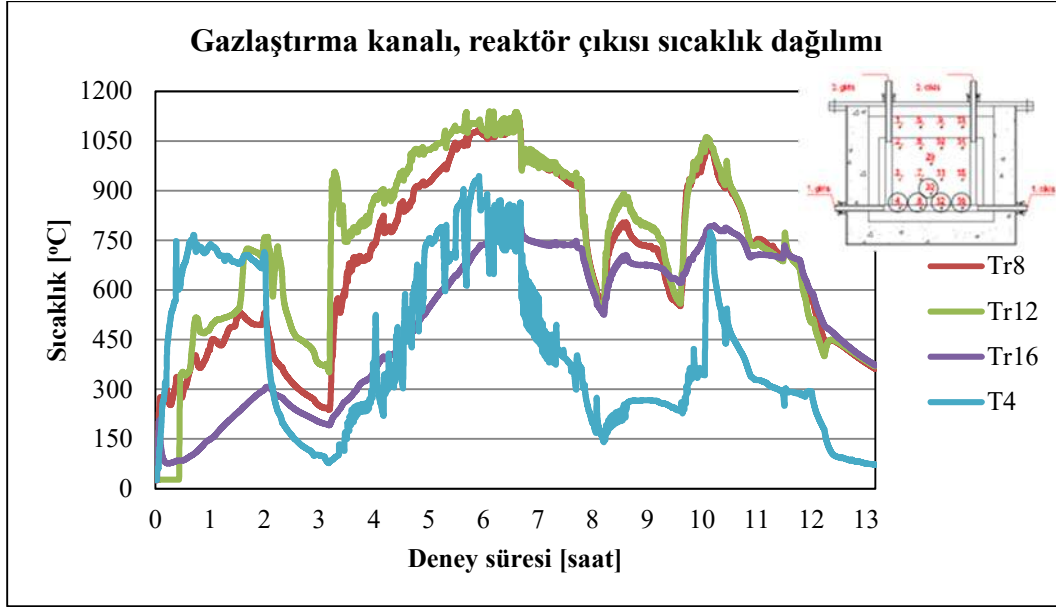
TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında yapılan deneylerde %16,4-37,6 arasında değişen verimlerde gazlaştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hem işlemin ilerlemesi aşamaları hem ölçme sistemi hem de proses sonrası değerlendirme aşamalarında belirli zorluklar yaşanmıştır. İşlemin ilerlemesi aşamasında reaktör içerisindeki sıcaklıkların 1000 °C değerinin üzerine çıkması, oluşan kavitasyon nedeniyle kömürde çökmelerin meydana gelmesi ve bu sebeple termoelemanlarda kırılmalar yaşanmıştır. Ayrıca gazlaştırma ajanı beslemelerinde sürekli debinin sağlanması noktasında sıkıntılar yaşanmıştır. Ölçme aşamasında özellikle yapay gaz debi ölçümlerinde orifis çapının yapay gaz debisinin değişkenliğine tam olarak cevap verememesi, gaz kromatografi cihazına örnekleme alınırken yeterli akışın oluşturulmasında sorunlar yaşanmıştır. Proses sonrası aşamada ise kömür bloğu içerisinde oluşan kavitenin çökmelere bağlı olarak tespit edilmesinde zorluklar yaşanmıştır.

Deneyleerde yaşanan bu zorluklar özellikle yapay gaz bileşimi tespit edilirken yaşanan zorluklar portatif gaz analizörü (MRU Syngas Varioplus) ile hat üzerinde yapılan ölçümler sayesinde aşılabılmıştır. Ayrıca gaz kromatografi ölçümlerinde oluşan süre farkı, gaz kromatografi analizi yaklaşık 20-25 dk, aşılarak anlık olarak gaz bileşimi tespit edilebilmiştir. Proses esnasında termoelemanların hasar görerek işlev göremez hale gelmesi ise yedek termoelemanların düzeneğe eklenmesi ile aşılabılmıştır.

Proses sonrasında reaktör içerisinde kalan kömür parçaları ve kül gazlaştırma işleminin nasıl ilerlediğinin takip edilmesinde önem arz etmektedir.

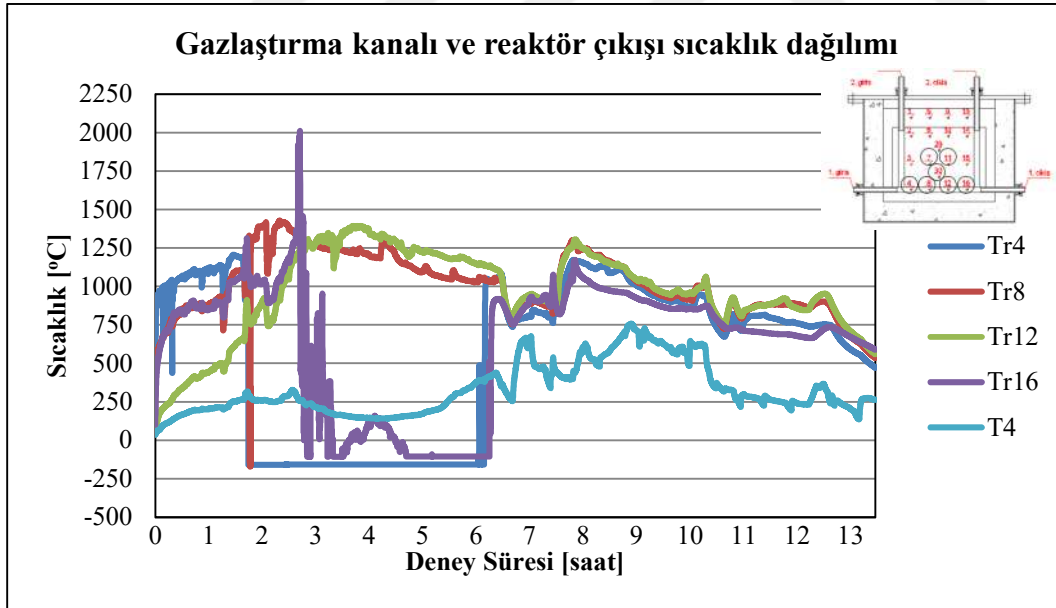
3 numaralı proses;

Gazlaştırma verimi %22,2 olarak hesaplanmıştır. Proseste sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 3.1'de ve Şekil 3.6'da verilmiştir. Gazlaştırma kanalında sıcaklık 1100 °C mertebesine ulaşmıştır.



4 numaralı proses;

Gazlaştırma verimi %32,3 olarak hesaplanmıştır. Gazlaştırma kanalında sıcaklık 1400 °C mertebesine ulaşmıştır. Proses esnasında Tr4, Tr8 ve Tr16’da hata tespit edilmiş ilerleyen aşamada düzeltilmiştir.



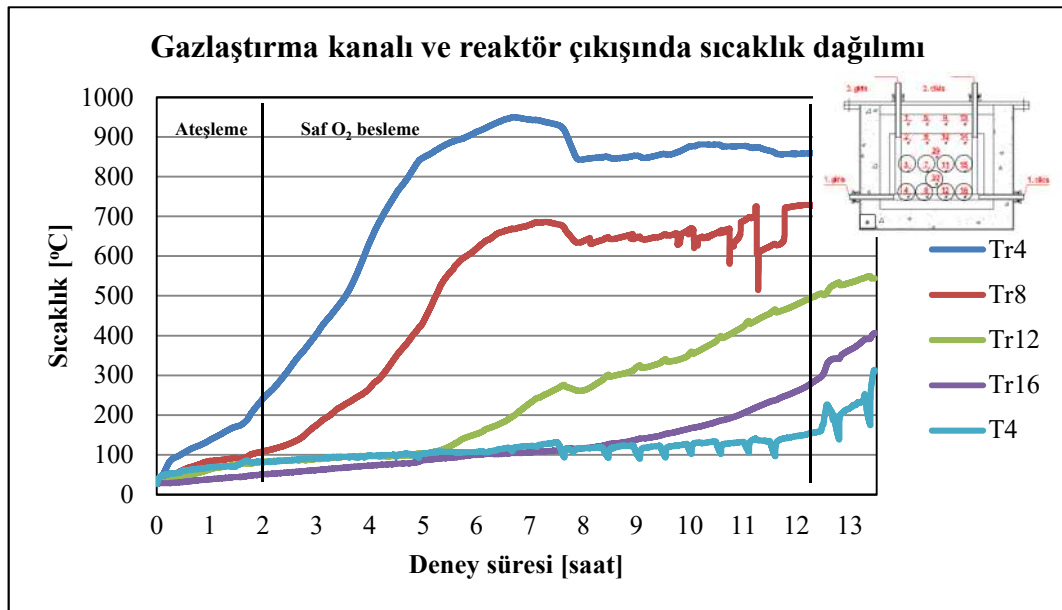
Proses sonrasında düzenek içerisinde Şekil 5.3’te gösterilen sinterleşmiş kömür parçaları çıkarılmıştır. Sinterleşme yüzeylerinde kavitenin ilerleyemeyerek durduğu ve işlemin tamamlandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.3: 4 numaralı proses sinterleşmiş kömür numuneleri.

5 numaralı proses;

Gazlaştırma verimi %36,3 olarak hesaplanmıştır. Gazlaştırma kanalında sıcaklık 950 °C mertebesine ulaşmıştır.



Şekil 5.4: 5 numaralı proses sıcaklık değerleri.

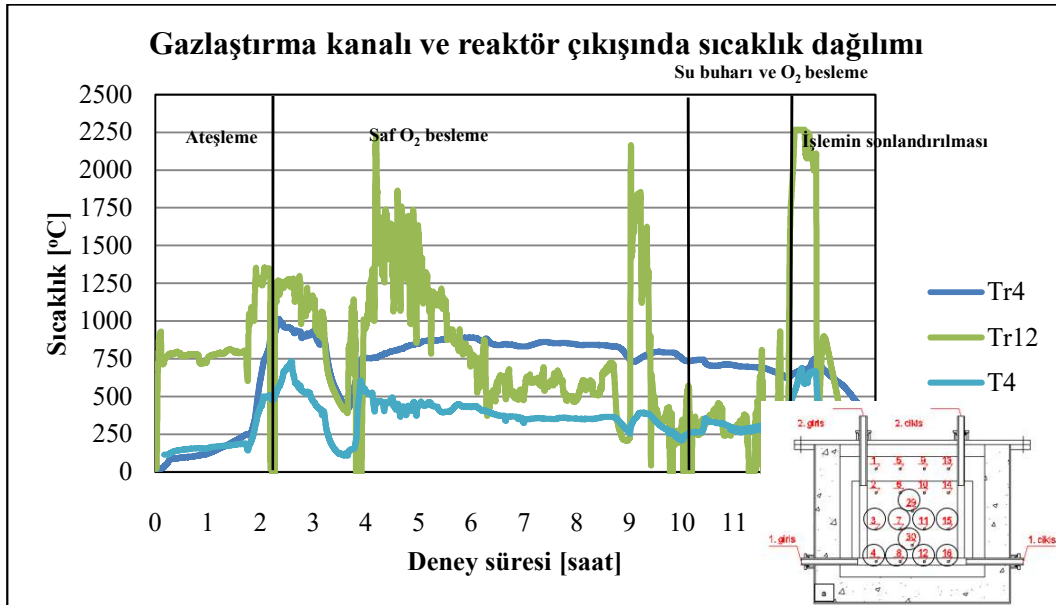
Reaktör içerisinde çıkarılan numunelerde sinterleşmiş yapı gözlemlenmemiştir. Şekil 5.5'te görüldüğü gibi yapışmış yapılar görülmüştür.

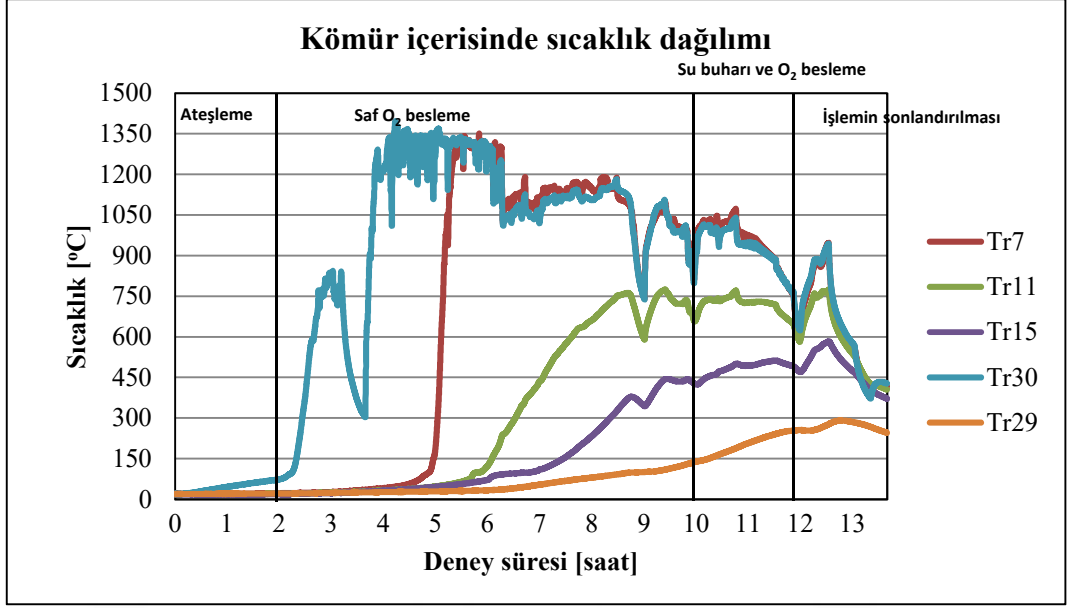


Şekil 5.5: 5 numaralı proses kömür numunesi.

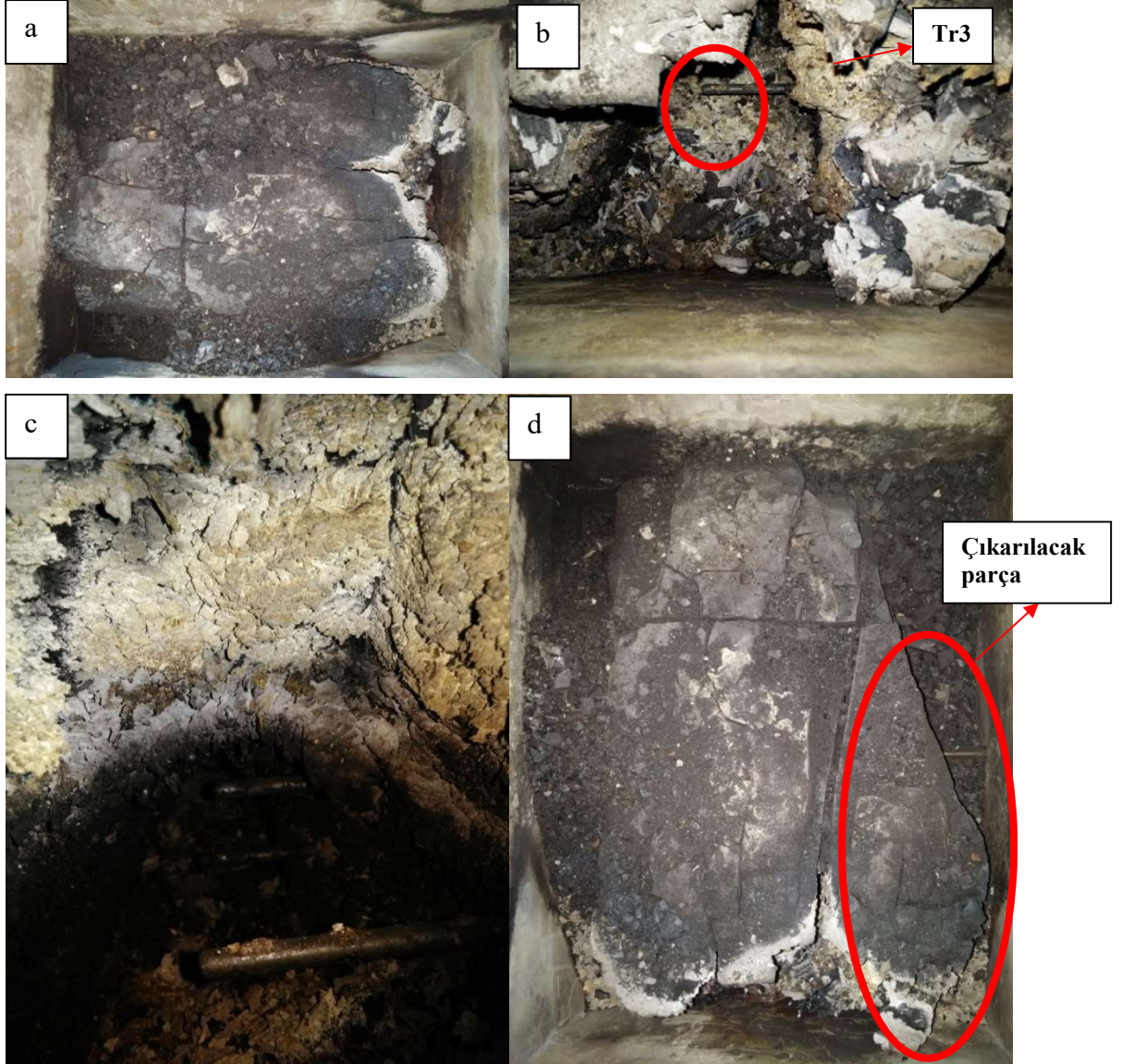
6 numaralı proses;

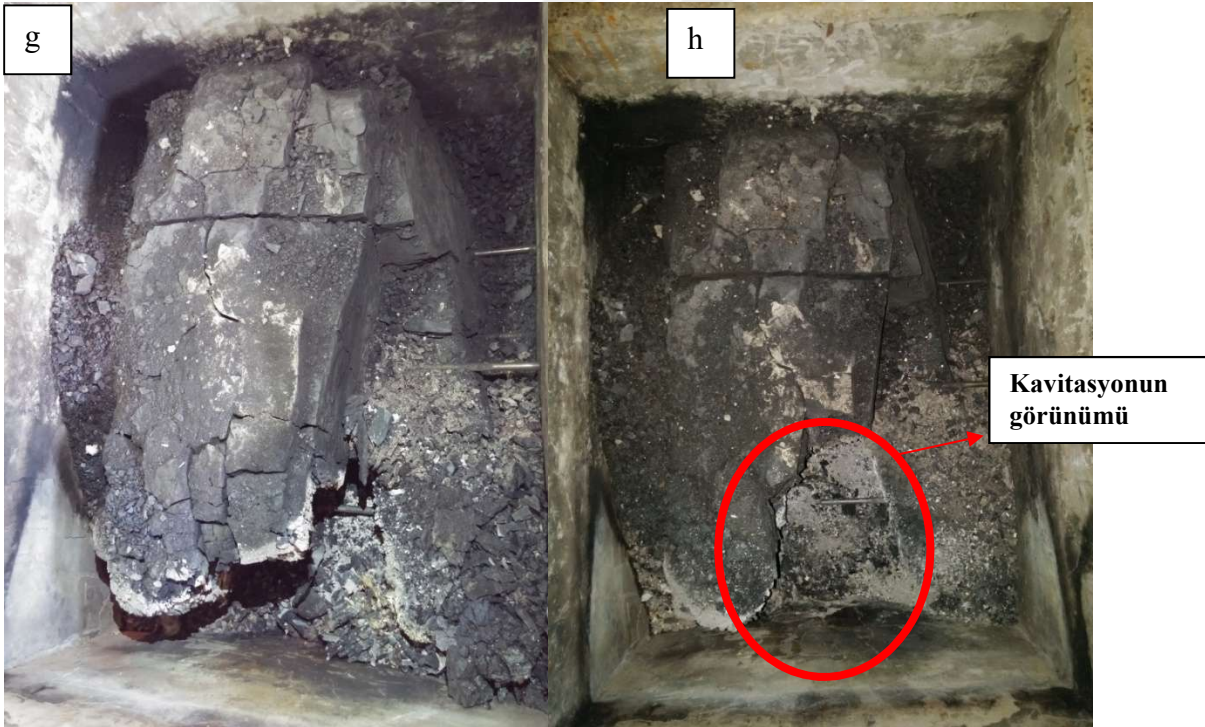
Gazlaştırma verimi %17,3 olarak hesaplanmıştır. Gazlaştırma kanalında sıcaklık 1750 °C mertebesine ulaşmıştır. Kömürün üst tarafında ise kavitenin büyümesine bağlı olarak 1350 °C mertebesinde sıcaklıklar gözlenmiştir. Şekil 5.7'de işlemin kavite görünümüleri açıklamalı olarak anlatılmıştır. Şekil 5.8'de de görüldüğü gibi proseste kavite duvarlarında sinterleşme görülmüştür. Proseste kömür kütesinin 5 numaralı işlemin 2 katı olması ve her iki proseste de tek bir kavitenin oluşturulması sebebiyle gazlaştırma verimi 5 numaralı işlemin yarısı olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi kavite oluşumu gazlaştırma verimi için en önemli parametredir.





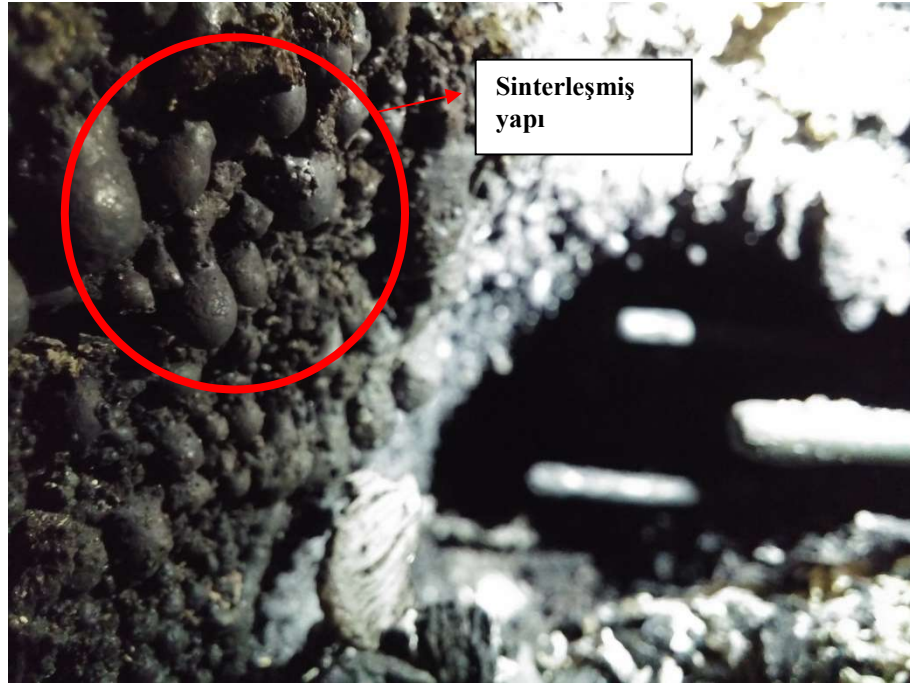
Şekil 5.6: 6 numaralı proses sıcaklık değerleri.







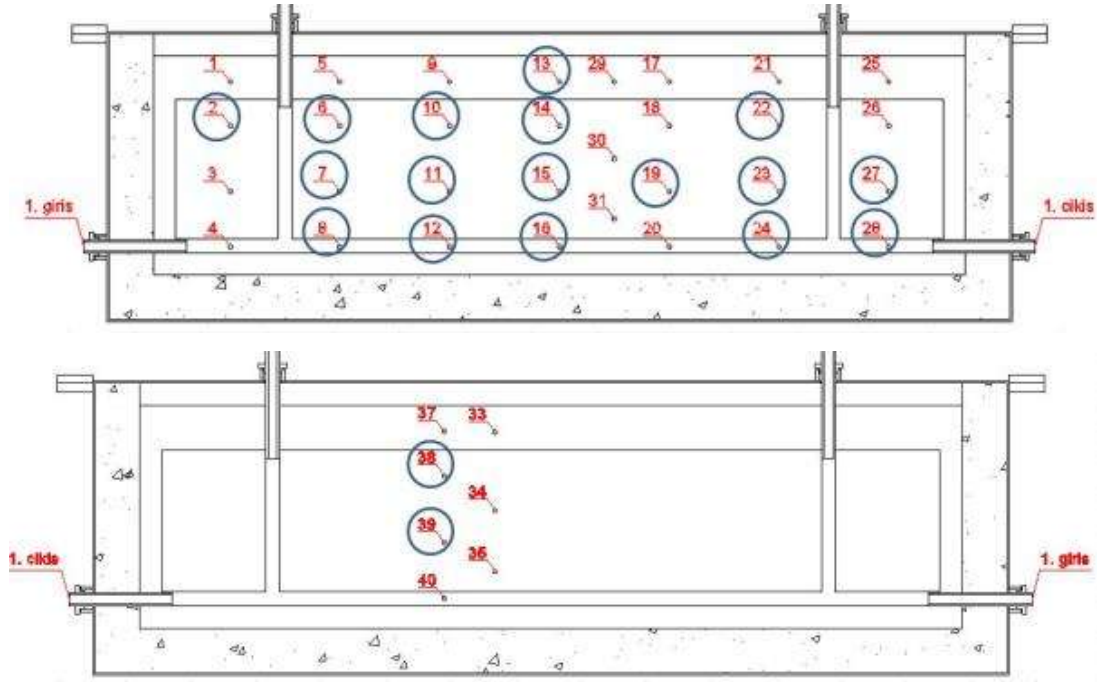
Şekil 5.7: a) Deney sonrası refrakter tuğla ve taş yününün kaldırılmış haldeki numunenin görünümü. b) Giriş bölümündeki çökmenin yakından görünümü ve Tr3. c) Oluşan kavitasyonun girişten görünümü ve Tr3,Tr7,Tr30. d) Çıkarılacak parçanın konumu. e) Parçanın çıkarılmış haldeki görünümü ve kavitasyonun varlığı. f) Tr4'ün görünümü. g) Numunenin 3 boyutlu görünümü. h) Kavitasyonun görünümü. ı) Kavitasyonun görünümü. i) Gazlaştırma kanalının çıkış bölümüne yakın yerdeki görünümü.



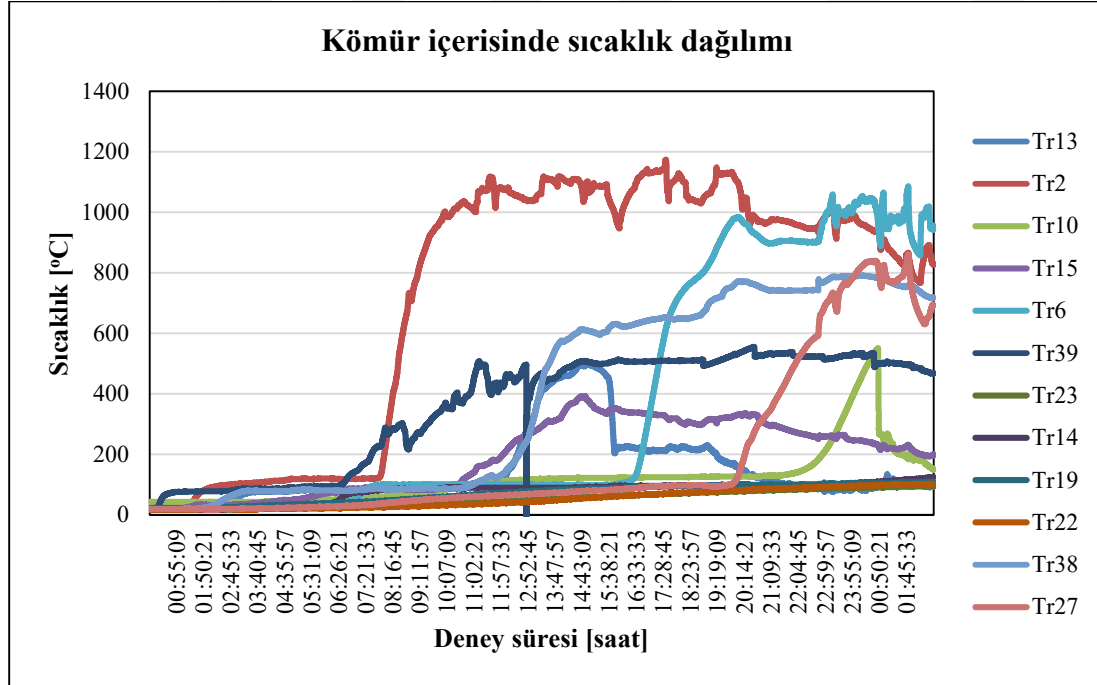
Şekil 5.8: Kavitasyon duvarında oluşan sinterleşme görünümü.

7 numaralı proses;

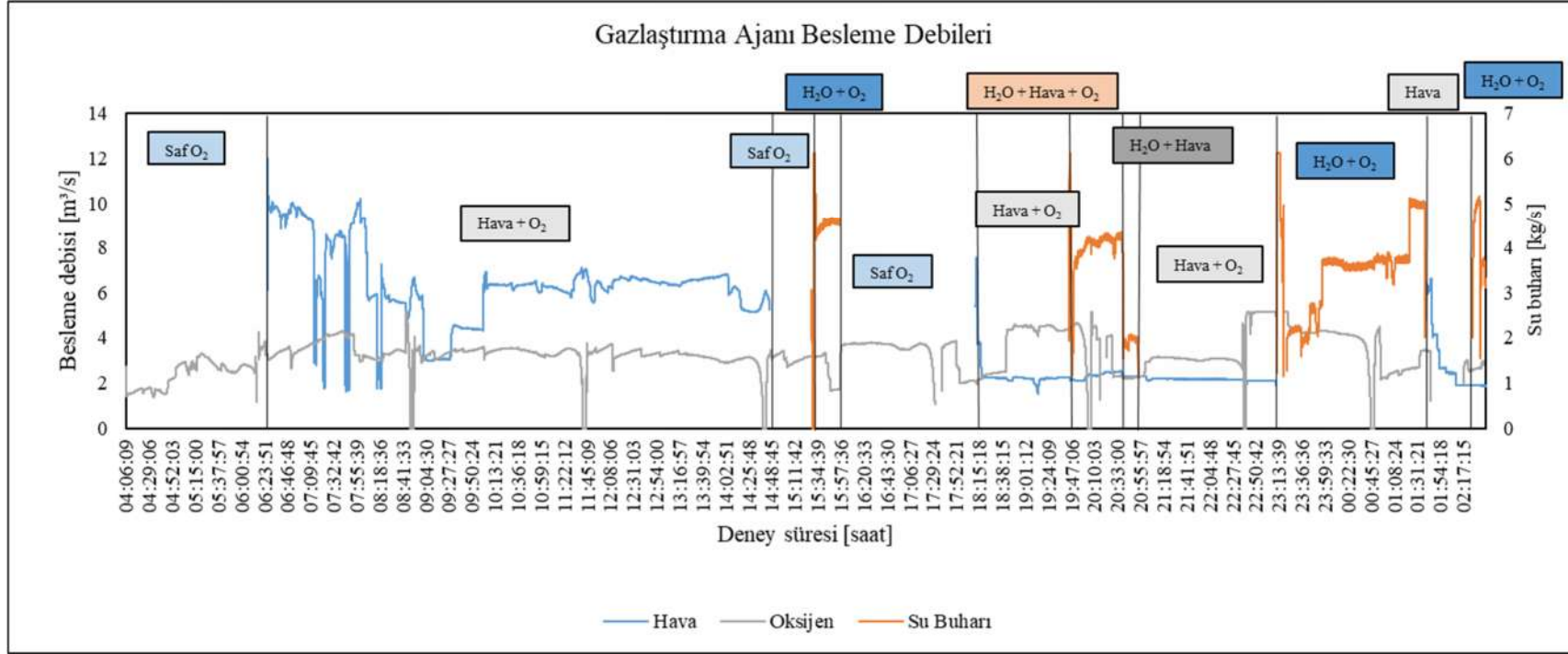
Gazlaştırma verimi %39,7 olarak hesaplanmıştır. Proseste kömür içerinden yapılan sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 5.9'da verilmiştir.



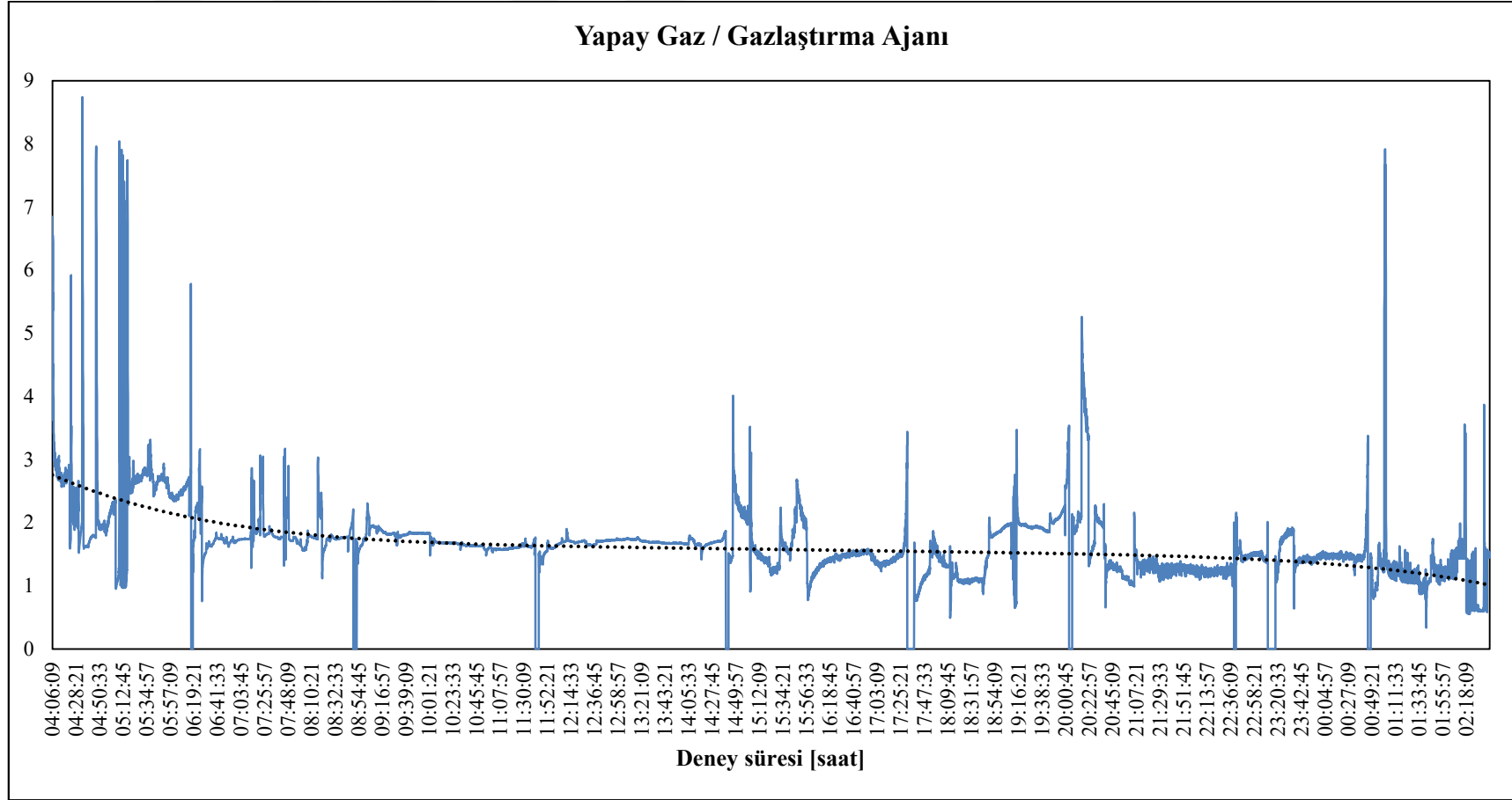
Şekil 5.9: Sıcaklık ölçümü alınan noktalar.



Şekil 5.10: 7 numaralı proses kömür içerisinde sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.11: 7 numaralı proses gazlaştırma ajanı besleme debileri.



Şekil 5.12: 7 numaralı proses gazlaştırma ajanı besleme debileri.



Şekil 5.13: a) Kaviteasyon görünümü. b) Kaviteasyon görünümü. c) Reaktör içerisindeki ikinci blok görünümü. d) Reaktör ön bölgesinden çıkarılan kömür ve kil parçalarının oluşturduğu yapının görünümü.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yeraltında kömür gazlaştırma işlemine etki eden parametrelerin yapay gaz enerji potansiyeli üzerindeki etkisi deneysel faaliyetlerin sonuçları karşılaştırılarak elde edilmiştir. Çizelge 6.1’de sonuçlar özetlenmiştir.

Buna göre sonuçlar;

1. İleri yanma metodu ile yapılan işlemlerde maksimum %39,7 gazlaştırma verimi elde edilmiştir.
2. Uzunluk-genişlik oranı birbirine yakın olan kömür bloklarında (4,5,6 numaralı işlemler) toplam enerji potansiyeli büyüklüğünde maksimum %10 mertebede farklılık göstermektedir. Uzunluk-genişlik oranı aynı olan (5-6 numaralı proses) işlemlerde %1,3’e kadar düşmektedir.
3. Uzunluk-genişlik oranı aynı olan (1,5) kömür bloklarında (5-6) kömür yüksekliğinin %50 mertebesinde farklı olması toplam enerji potansiyelinde etki etmemektedir. Ancak kömür kütlesinin farklı olmasına bağlı olarak gazlaştırma veriminde %36,3-%17,3 gibi çok büyük farklılıklar olmaktadır.
4. Uzunluk-genişlik oranı arttıkça (5-6-7 numaralı işlemler) gazlaştırma verimi artmaktadır.
5. 7 numaralı proses aşamaları değerlendirildiğinde (Çizelge 4.4) gazlaştırma ajanı olarak hava kullanıldığında gazlaştırma işleminde anlık olarak yapay gaz enerjisi (gazlaştırma gücü) saf oksijen kullanılarak yapılan aşamaya göre 1 kat daha fazladır.
6. Gazlaştırma ajanı olarak su buharı kullanıldığında enerji potansiyeli artmaktadır (Şekil 4.10).

Öneriler;

1. Gazlaştırma işleminde verimi artırmak için “Kontrollü Besleme Tepkime Noktası (CRIP)” metodu kullanılmalıdır.

2. Saf oksijen ile yapılan işlemlerde sinterleşme kontrolü yapılmalıdır. Gazlaştırma kanalı ve kömür bloğu üzerinde 1000 °C değerini aşmamaya özen gösterilmelidir.



Çizelge 6.1: TÜBİTAK 113M038 numaralı proje kapsamında yapılan proses özet tablosu.

Deney Kodu	Reaktör Boyutu		Gazlaştırma Ajanı			Kömür Bloğu		Kömür Enerji Potansiyeli (MJ)	Yapay Gaz Enerji Potansiyeli (MJ)	Gazlaştırma Verimi (%)
	Küçük Reaktör	Büyük Reaktör	Hava	Oksijen	Su Buharı	Boyut (cm)	Uzunluk/Genişlik			
1	x		x	-	-	55x40x23	1,38	70	1158,92	
2	x		-	x	-	62x41x30	1,51	85	1407,26	
3	x		x	x	-	62x41x20	1,51	50	827,8	174
4	x		x	x	x	52x38x22	1,37	45	745,02	228
5	x		-	x	x	52x34x25	1,53	45	745,02	256
6	x		-	x	x	60x40x40	1,5	93	1539,708	252,7
7		x	x	x	x	105x44x41	2,39	169	2797,964	1052,66

KAYNAKLAR

- [1] E. Burton et al., “Practices in Underground Coal Gasification,” 2004.
- [2] S. J. Friedmann and E. Burton, “LLNL Capabilities in Underground Coal Gasification,” 2006.
- [3] E. V. Dvornikova, *Environmental performance of underground coal gasification*. Elsevier Ltd., 2018.
- [4] A. Y. Klimenko, “Early ideas in underground coal gasification and their evolution,” *Energies*, vol. 2, no. 2, pp. 456–476, 2009.
- [5] A. W. Bhutto, A. A. Bazmi, and G. Zahedi, “Underground coal gasification: From fundamentals to applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, no. 1, pp. 189–214, 2013.
- [6] E. Shafirovich and A. Varma, “Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 17, pp. 7865–7875, 2009.
- [7] S. qin LIU, Y. yuan WANG, K. ZHAO, and N. YANG, “Enhanced-hydrogen gas production through underground gasification of lignite,” *Min. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 389–394, 2009.
- [8] S. Daggupati *et al.*, “Laboratory studies on combustion cavity growth in lignite coal blocks in the context of underground coal gasification,” *Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 2374–2386, 2010.
- [9] K. Stańczyk *et al.*, “Dynamic experimental simulation of hydrogen oriented underground gasification of lignite,” *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3307–3314, 2010.
- [10] K. Stańczyk *et al.*, “Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched air in a pilot scale ex situ reactor for underground gasification,” *Fuel*, vol. 90, no. 5, pp. 1953–1962, 2011.
- [11] L. Hongtao, C. Feng, P. Xia, Y. Kai, and L. Shuqin, “Method of oxygen-enriched two-stage underground coal gasification,” *Min. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 2, pp. 191–196, 2011.
- [12] J. Kačur, M. Durdán, M. Laciak, and P. Flegner, “Impact analysis of the oxidant in the process of underground coal gasification,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 51, no. 1, pp. 147–155, 2014.
- [13] F. Su, A. Hamanaka, K. Itakura, W. Zhang, and G. Deguchi, “Monitoring and evaluation of simulated underground coal gasification in an ex-situ experimental artificial coal seam system,” *Appl. Energy*, vol. 223, no. January, pp. 82–92, 2018.
- [14] Morgantown Energy Technology Center and United States. Department of Energy. Office of Scientific and Technical Information, “Hanna, Wyoming

- Underground Coal Gasification Data Base. Volume 1. General Information and Executive Summary,” *Hanna, Wyoming Undergr. Coal Gasif. Data Base*, p. 53, 1985.
- [15] W. R. Aiman *et al.*, “The Hoe Creek II Field Experiment On Underground Coal Gasification, Preliminary Results,” in *Combustion Institute/Western States Section, Spring Meeting, April 17-18, 1978, Boulder, Colorado, 1978*, no. February, pp. 1–6.
- [16] D. Gregg and T. Edgar, “Underground coal gasification,” *AIChE J.*, pp. 1–4, 1978.
- [17] M. S. Blinderman and R. M. Jones, “The Chinchilla IGCC Project to Date: Underground Coal Gasification and Environment,” *Gasif. Technol. Conf. San Fr. USA, Oct. 27-30*, p. 14, 2002.
- [18] **Url-1** < http://www.ai-ees.ca/media/6876/swan_hills.pdf >, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [19] **Url-2** < <http://swanhills-synfuels.com/about-us/history/> >, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [20] **Url-3** < <https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/presentations/UCG-09-16-08.pdf>>, alındığı tarih: 13.08.2014.
- [21] **Url-4** < http://www.zaman.com.tr/ekonomi_tki-calismalari-hizlandirdi-komurden-gaz-uretilecek_1142660.html > erişim tarihi: 16.03.2015.
- [22] **Url-5** < http://www.engineeringx.pitt.edu/uploadedFiles/Coal_Conference/P12-3%20-%20Mustafa%20Ziypak.pdf >, alındığı tarih: 16.03.2015.

EKLER

EK A: Tr12 Isıl iftinin Kalibrasyon Sertifikası



EK A

	TÜRKAK TÜRK AKREDİTASYON KURUMU TURKISH ACCREDITATION AGENCY tarafından akredite edilmiştir.		
PENTA OTOMASYON ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ltd. Şti.		Kalibrasyon TS EN ISO/IEC 17025 AB-0113-K	
Necatibey Cd. No:32 34425 Karaköy - İSTANBUL Tel: 0 212 243 63 47 (pbx) - Lab.Tel: 0 212 243 17 06 - Fax: 0 212 243 63 41 e-mail: info@pentaotomasyon.com.tr www.pentaotomasyon.com.tr		AB-0113-K	
Kalibrasyon Sertifikası Calibration Certificate		150857S1865	
		04 - 15	
Cihazın Sahibi / Adresi Customer / Adress	: İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ GÜMÜŞSUYU KAMPÜSÜ MAKİNA FAKÜLTESİ MAKİNA FAKÜLTESİ GÜMÜŞSUYU KAMPÜSÜ 34437 GÜMÜŞSUYU / İSTANBUL		
İstek Numarası Order Number	: 150857		
Makine / Cihaz Instrument / Device	: Göstergeli Sıcaklık Ölçer		
İmalatçı Manufacturer	: Gösterge: Enda / Prob: -		
Tip / Model Type / Model	: Gösterge: EOP41-101CTE-R2 / Prob: -		
Seri Numarası Serial Number	: Gösterge: 060530010140100005 / Prob: T-12		
Kalibrasyon Tarihi Date of Calibration	: 09.04.2015		
Sertifikanın Sayfa Sayısı Total Number of Pages	: 3		
<p>Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri gerçekleştiren ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. <i>This calibration certificate documents traceability to national standards, which realize unit of measurement according to the International System of Units (SI),</i> Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile Karşılıklı Tanınma Anlaşmasını imzalamıştır. <i>The Turkish Accreditation Agency (TURKAK) is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for the Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation (ILAC) for the Mutual recognition of calibration certificates.</i> Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metotları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. <i>Measurement results, expanded uncertainties and calibration methods are given on the following pages, which are part of this certificates.</i></p>			
Mühür Seal	Tarih Date	Kalibrasyonu Yapan Calibrated By	Laboratuvar Müdürü Head of Calibration Laboratory
	09.04.2015	Kıvanç MAYLI 	İrem EVCI 
<p>Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçersizdir. <i>This certificate shall not be reproduced other than in full except with the permission of the laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.</i></p>			
FRS02-05	Rev.No: 05	Rev.Tarihi: 27.11.2014	

Şekil A.1: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası-1

Makine / Cihaz / Instrument / Device

Cihazın Adı / Object	Göstergeli Sıcaklık Ölçer	İmalatçısı / Manufacturer	Gösterge: Enda / Prob: -
Model / Model	Gösterge: EOP41-101CTE-R2 / Prob: -	Seri No / Serial No	Gösterge: 060530010140100005 / Prob: T-12
Yer / Place	Laboratuvar	Kabul Tarihi / Accept Date	-
Ölçme Aralığı / Range	0 °C ile 1200 °C	Çözünürlük / Resolution	0,1

Gelecek Kalibrasyon Tarihi / Due To : -

Prosedür ve Çevre Şartları / Procedure and Environmental Conditions

Cihazın kalibrasyonu, PRS01.03 dokümanına göre ve 20 °C (±3) ile 51 %RH (±15) çevre şartlarında yapılmıştır.

The calibration is performed according to PRS01.03 document while 20 °C (±3) and 51 %RH (±15)

Referans Cihazlar

Reference Devices

Cihazın Adı / Device	Cihaz Kodu/Seri No / Device ID/SN	Sertifika No/Tarih No/Date	İzlenebilirlik / Traceability
Referans Termometre	REF.S03 / 12016091	2014.2.0035 / 09-14	YÜKAL
Sıcaklık Nem Ölçer	REF.S08 / 12055620	2014S003 / 01-14	PENTA

Fiziksel ve Fonksiyonel Kontrol / Physical and Functional Control

Cihazın fiziksel ve fonksiyonel kontrolünde, ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek herhangi bir eksiklik ve hasar gözlenmemiştir.

No damage observed on the object that affects measurement results by physically and functionally control.

Metot / Method

Ölçümler, Blok Kalibratör ve Referans Termometre kullanarak; referans ve test cihazının kararlı hale gelmesinden sonra alınmıştır.

Kalibrasyon karşılaştırma esasına göre yapılmıştır. / Measurements are performed using Block Calibrator and Reference Thermometer after stabilization of both devices. Calibration based on comparison method.

Ölçüm Sonuçları ve Ölçüm Belirsizliği / Measurement Results and Measurement Uncertainties

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği; standart belirsizliğin k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. / The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

	Referans Sıcaklık Değeri °C Reference Temperature	Test Termometre Değeri °C Test Temperature	Hata °C Error	Ölçüm Belirsizliği °C Measurement Uncertainty
1	50,8	50,0	-0,8	0,22
2*	200,7	200,0	-0,7	0,34
3	391,8	400,0	8,2	3,25
4	582,2	600,0	17,8	3,44
5	688,8	700,0	11,2	3,44
6	787,4	800,0	12,6	3,44

Açıklama / Notes

"*" ile işaretli olan parametre akreditasyon kapsamı dışındadır.

Şekil A.2: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası-2

Makine / Cihaz / Instrument / Device

Cihazın Adı / Object	Göstergeli Sıcaklık Ölçer	İmalatçısı / Manufacturer	Gösterge: Enda / Prob: -
Model / Model	Gösterge: EOP41-101CTE-R2 / Prob: -	Seri No / Serial No	Gösterge: 060530010140100005 / Prob: T-12
Yer / Place	Laboratuvar	Kabul Tarihi / Accept Date	-
Ölçme Aralığı / Range	0 °C ile 1200 °C	Çözünürlük / Resolution	0,1

Gelecek Kalibrasyon Tarihi / Due To : -

Prosedür ve Çevre Şartları / Procedure and Environmental Conditions

Cihazın kalibrasyonu, PRS01.03 dokümanına göre ve 20 °C (±3) ile 51 %RH (±15) çevre şartlarında yapılmıştır.
The calibration is performed according to PRS01.03 document while 20 °C (±3) and 51 %RH (±15)

Referans Cihazlar
Reference Devices

Cihazın Adı / Device	Cihaz Kodu/Seri No / Device ID/SN	Sertifika No/Tarih No/Date	İzlenebilirlik / Traceability
Referans Termometre	REF.S03 / 12016091	2014.2.0035 / 09-14	YÜKAL
Sıcaklık Nem Ölçer	REF.S08 / 12055620	2014S003 / 01-14	PENTA

Fiziksel ve Fonksiyonel Kontrol / Physical and Functional Control

Cihazın fiziksel ve fonksiyonel kontrolünde, ölçüm sonuçlarını etkileyebilecek herhangi bir eksiklik ve hasar gözlenmemiştir.
No damage observed on the object that affects measurement results by physically and functionally control.

Metot / Method

Ölçümler, Blok Kalibratör ve Referans Termometre kullanarak; referans ve test cihazının kararlı hale gelmesinden sonra alınmıştır.
Kalibrasyon karşılaştırma esasına göre yapılmıştır. / Measurements are performed using Block Calibrator and Reference Thermometer after stabilization of both devices. Calibration based on comparison method.

Ölçüm Sonuçları ve Ölçüm Belirsizliği / Measurement Results and Measurement Uncertainties

Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği; standart belirsizliğin k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. / The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

	Referans Sıcaklık Değeri °C Reference Temperature	Test Termometre Değeri °C Test Temperature	Hata °C Error	Ölçüm Belirsizliği °C Measurement Uncertainty
7	885,5	900,0	14,5	3,44
8	985,4	1000,0	14,6	3,95
9	1202,6	1200,0	-2,6	3,95

Açıklama / Notes

--

Şekil A.3: Tr12 Isıl çifti için kalibrasyon sertifikası-3

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Ünal ALTINTAŞ

Doğum Yeri ve Tarihi : Trabzon, 06.01.1990

E-Posta : altintasunal.90@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lise** : 2007, Çorum Fen Lisesi
- **Lisans** : 2013, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
Makina Mühendisliği, Malzeme ve İmalat Programı