

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YARI PİLOT ÖLÇEK YER ALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA DENEY
DÜZENİNDE MALKARA PİRİNÇÇEŞME KÖMÜR SAHASINA AİT BLOK
KÖMÜR ÖRNEKLERİNİN GAZLAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İrem TUNÇ

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YARI PİLOT ÖLÇEK YER ALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA DENEY
DÜZENEGİNDE MALKARA PİRİNÇÇEŞME KÖMÜR SAHASINA AİT BLOK
KÖMÜR ÖRNEKLERİNİN GAZLAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İrem TUNÇ
(506121018)**

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Kimya Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasancan OKUTAN

HAZİRAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121018 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İrem TUNÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YARI PİLOT ÖLÇEK YER ALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA DENEY DÜZENİNDE MALKARA PİRİNÇÇEŞME KÖMÜR SAHASINA AİT BLOK KÖMÜR ÖRNEKLERİNİN GAZLAŞTIRILMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hasancan OKUTAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüsnü ATAKÜL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Alper SARIOĞLAN
TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü

Teslim Tarihi : **19 Haziran 2015**
Savunma Tarihi : **30 Haziran 2015**

Sevgili aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince araştırmalarımın her aşamasında öneri ve yardımlarını benden esirgemeyerek bilgi ve deneyimi ile bana yol gösteren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hasancan OKUTAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarımın analiz kısmında yardımını esirgemeyen TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'nden Y. Müh. Yeliz DURAK ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel süreçlerde yanımda olan Y. Müh. Oğuz BÜYÜKŞİRİN, Ahmet YILDIZ ve Ünal ALTINTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca yardımı ve desteği ile bana güç veren Erdem AŞIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her daim yanımda olan, bugünlere gelmemde benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli AİLEME en derin duygularıyla teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Haziran 2015

İrem TUNÇ
(Kimya Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. YER ALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİ	3
2.1 Proses Teknolojisi	3
2.2 Tarihsel Gelişimi	4
2.3 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesinin Üstünlükleri ve Sakıncaları	8
2.3.1 Karbon dioksit tutma ve yakalama (CCS)	10
2.3.2 Su girişi	12
2.3.3 Çökme	13
2.4 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesinin Kimyası.....	14
2.5 Proses Değişkenleri	17
2.5.1 Gazlaştırma ajanları	17
2.5.2 Sıcaklığın etkisi	18
2.5.3 Isı kayıpları.....	19
2.5.4 Basınç etkisi	19
2.5.5 Oyuk büyümesi	20
2.6 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesi İçin Gerekli Jeolojik Koşullar.....	21
2.6.1 Kömürün özellikleri	21
2.6.1.1 Kömürleşme derecesi	21
2.6.1.2 Nem içeriği.....	22
2.6.1.3 Uçucu madde içeriği	22
2.6.1.4 Kül yüzdesi	23
2.6.1.5 Kükürt içeriği	23
2.6.1.6 Eser madde içeriği.....	24
2.6.1.7 Reaktivite	24
2.6.1.8 Çekme/Şişme	24
2.6.1.9 Geçirgenlik	24
2.6.2 Kömür yatağının jeolojisi.....	25
2.6.2.1 Kömür tabakasının kalınlığı.....	25
2.6.2.2 Damar derinliği	25
2.6.2.3 Kömür damarının eğimi	26
2.6.2.4 Yapıdaki şistler.....	27
2.6.2.5 Yer altı suyu	27
2.7 Kuyular Arası Bağlantı Yöntemleri	27
2.8 Saha Testleri ve Ticari Ölçekli Uygulamaları.....	30
2.8.1 Eski Sovyetler Birliği'ndeki uygulamalar.....	32

2.8.2	Amerika Birleşik Devletleri'ndeki uygulamalar	32
2.8.3	Avrupa Birliği'ndeki uygulamalar	34
2.8.4	Kanada'daki uygulamalar	35
2.8.5	Avustralya'daki uygulamalar	36
2.8.6	Güney Afrika'daki uygulamalar	39
2.8.7	Çin'deki uygulamalar	40
2.9	Proses Ekonomisi	40
2.9.1	Yeraltı kömür gazlaştırma proses ekonomisiyle ilgili yapılan çalışmalar	42
2.9.1.1	Gunn ve Boysen'in çalışmaları	42
2.9.1.2	Edgar'in çalışması	42
2.9.1.3	Buder ve arkadaşlarının çalışması	43
2.9.1.4	Moll'un çalışmaları	46
2.9.1.5	Shimada ve arkadaşlarının çalışması	47
2.9.1.6	Rembrant'ın çalışması	49
2.9.2	Yapay gazdan elektrik üretim maliyeti	50
2.9.3	Yeraltı kömür gazlaştırma prosesiyle kimyasal üretiminin ekonomisi ..	52
2.9.3.1	Metanol üretimi	52
2.9.3.2	Amonyak üretimi	54
2.9.3.3	Hidrojen üretimi	56
2.9.3.4	Sıvı yakıt üretimi	58
3.	TÜRKİYE'DEKİ YERALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİNE	
	UYGUN KÖMÜR YATAKLARININ SEÇİLMESİ	61
3.1	Yeraltı Kömür Gazlaştırma İçin Yer Seçimi ve Değerlendirilmesi	61
3.2	Yeraltı Kömür Gazlaştırma Prosesi İçin Kömür Yatağının Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve Kömür Yatağı Seçimi	62
3.2.1	Malkara-Pirinççeşme sahası 3 nolu damar ve özellikleri	65
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	69
4.1	Malkara Pirinççeşme Kömürünün Özellikleri	69
4.2	Kömür Numunesinin Hazırlanması	69
4.3	Kullanılan Cihazlar ve Analiz Yöntemleri	70
4.3.1	Kısa analiz	70
4.3.2	Elementel analiz	71
4.3.3	Kül ergime analizi	73
4.3.4	Isıl değer	75
4.3.5	Kömürdeki kükürt türlerinin tayini	76
4.4	Deney Düzeneği	77
4.4.1	Deney düzeneği ölçme sistemi tasarımı	81
4.4.2	Deney düzeneği ölçme sisteminin kalibrasyonu	82
4.4.3	Gaz kromatografi cihazı	83
4.5	Deneylerin Yapılışı	84
4.6	Gazlaştırma Deneyleri	85
4.6.1	Deney no:1	85
4.6.2	1 nolu deneyin sonuçları	88
4.6.3	Deney no:2	89
4.6.4	2 nolu deneyin sonuçları	94
5.	SONUÇLAR	101
	KAYNAKLAR	103
	EKLER	111
	ÖZGEÇMİŞ	115

KISALTMALAR

ASTM	: Test ve Materyaller İçin Amerikan Standardı (American Society For Testing and Materials)
Bpd	: Varil/gün (Barril per day)
CRIP	: Kontrollü Olarak Hareket Ettirilen Ateşleme Noktası (Controlled Retracting Injection Point)
CTL	: Kömür Sıvı Prosesi (Coal to Liquid)
FT	: Fischer-Tropsch
GTL	: Gaz Sıvı Prosesi (Gas to Liquid)
HUGE	: Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification for Europe
IGCC	: Birleştirilmiş Gazlaştırma Kombine Çevrimi
LLNL	: Lawrence Livermore National Laboratory
LVW	: Linked Vertical Well
MMSCF	: Million Standard Cubic Feet Per Day
P_o	: Gazlaştırma Bölgesindeki Basınç
P_H	: Kömür Yatağındaki Su Tabakasının Hidrostatik Basıncı
SNG	: Sentetik Doğal Gaz (Synthetic Natural Gas)
Tpd	: Ton/gün (Tone per day)
UCG	: Yer Altı Kömür Gazlaştırma (Underground Coal Gasification)
YKG	: Yer Altı Kömür Gazlaştırma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dünya'daki önemli YKG işletmelerinin özeti.....	31
Çizelge 2.2 : Damar derinliği/kalınlığının maliyete etkisi.....	42
Çizelge 2.3 : Tesislerin ürün kapasiteleri.	43
Çizelge 2.4 : YKG prosesi ile yüzey gazlaştırıcısında kullanılan tesis ekipmanlarının karşılaştırılması.....	44
Çizelge 2.5 : Yüzey tesisinin sermaye maliyeti(milyon dolar).....	45
Çizelge 2.6 : YKG saha tesisinin maliyeti (milyon dolar).	46
Çizelge 2.7 : Maliyet özeti (milyon dolar).....	46
Çizelge 2.8 : Farklı hammaddelerden üretilen yapay gazların maliyetleri.....	47
Çizelge 2.9 : Proses ekonomisini etkileyen faktörler ve faktörlerin maliyetleri	48
Çizelge 2.10: ELW ve CRIP teknikleriyle gerçekleştirilen YKG prosesinin yıllık maliyeti.	48
Çizelge 2.11: Metanol gazının üretim ekonomisi.....	54
Çizelge 2.12: Amonyak gazının üretim ekonomisi.	56
Çizelge 2.13: Kömürden sıvı yakıt üretim (CTL) tesisinin ekonomik analizi.	60
Çizelge 3.1 : Bazı bölgelerdeki maden yataklarımızın özellikleri.....	63
Çizelge 3.2 : Manisa-Soma-Eynez yatağının özellikleri.....	64
Çizelge 3.3 : Manisa-Soma-Işıklar yatağının özellikleri.....	64
Çizelge 4.1 : Malkara kömür numunesinin kısa analiz sonuçları.....	71
Çizelge 4.2 : Malkara kömür numunesinin elementer analiz sonuçları.....	73
Çizelge 4.3 : Malkara kömür numunesinin kül ergime analiz sonuçları.	75
Çizelge 4.4 : Malkara kömür numunesinin ısı değeri analiz sonuçları.....	76
Çizelge 4.5 : Malkara kömür numunesinin kükürt türleri analiz sonuçları.	77
Çizelge 4.6 : Oksijen debi ölçümünün karşılaştırması.	82
Çizelge 4.7 : Hava debi ölçümünün karşılaştırılması.	83
Çizelge 4.8 : Gaz örneklerinin analiz sonuçları.....	96
Çizelge 4.9 : Düzeltilmiş yapay gaz bileşimi ve ısı değeri.....	97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yeraltı kömür gazlaştırma prosesi.....	4
Şekil 2.2 : Betts tarafından önerilen yer altı gazlaştırma şeması.	5
Şekil 2.3 : YKG çalışmalarının kömür damar kalınlıkları ve maden derinlikleri	7
Şekil 2.4 : Sera gazı emisyonu.....	9
Şekil 2.5 : Karbondioksit tutma ve depolama sisteminin şematik görünümü.	11
Şekil 2.6 : Hidrostik basınca karşı gaz odasındaki basıncın gösterimi.	13
Şekil 2.7 : Oyuklarda meydana gelen çökme esnasındaki aşamalar.	14
Şekil 2.8 : Yer altı kömür gazlaştırması reaksiyon bölgelerinin şematik sunumu. ..	15
Şekil 2.9 : Buhar/Oksijen oranının yapay gaz bileşimine etkisi (hacimsel olarak).	18
Şekil 2.10: Sıcaklığın yapay gaz bileşimine etkisi.	19
Şekil 2.11: Oyuğun ileri ve geri uzunluğuyla, yüksekliğini ve genişliğini gösteren şematik çizim.....	20
Şekil 2.12: Oyuktaki sıcaklık konfigürasyonu.....	21
Şekil 2.13: YKG'deli ileri ve geri yanma tekniklerinin şematik görünümü. (a) Geri yanma (b) İleri yanma.	28
Şekil 2.14: CRIP tekniğinin şematik gösterimi.	29
Şekil 2.15: Dünya çapındaki UCG testlerinin dağılımını ve jeolojik karbon depolanması için potansiyeli gösteren harita.	30
Şekil 2.16: Yerostigaz tesisinin görünümü.....	32
Şekil 2.17: Swan Hills Synfuels YKG projesinin görünümü.	36
Şekil 2.18: Chinchilla'daki YKG tesisinin görünümü.....	37
Şekil 2.19: Chinchilla testi süresince gaz üretiminin dağılımı.	38
Şekil 2.20: Majuba YKG tesisi.	39
Şekil 2.21: Doğal gaz fiyatları ile yapay gaz fiyatlarının karşılaştırılması.....	50
Şekil 2.22: UCG-IGCC tesislerinin ekonomik performansı.....	51
Şekil 2.23: Güç üretimi için YKG maliyeti.....	52
Şekil 2.24: Metanol üretimi.	53
Şekil 2.25: Yapay gazdan elde edilen metanolün fiyatı.	54
Şekil 2.26: Yapay gazdan amonyak sentezi.	55
Şekil 2.27: Yapay gazdan üretilen amonyakın satış fiyatı.....	56
Şekil 2.28: YKG'den hidrojen üretiminin proses akış şeması.....	57
Şekil 2.29: Gazdan sıvı yakıt üretimi.	59
Şekil 3.1 : İnceleme alanını gösteren yer bulduru haritası.....	65
Şekil 3.2 : Kömür sahasının ve civarının damar mostra haritası.	66
Şekil 3.3 : Deneylerde kullanılmak üzere alınan numunelerin koordinat bilgileri..	66
Şekil 3.4 : 3 nolu damarın kesit görünümü.	68
Şekil 4.1 : Deneylerde kullanılan kömürün görüntüsü (a) Blok kömür. (b) Analize hazır hale gelmiş kömür.	70
Şekil 4.2 : Nem, uçucu ve kül analizini yapan cihazın görünümü.	71
Şekil 4.3 : C,H,N tayini yapan cihazın görünümü.	72
Şekil 4.4 : Kükürt tayini yapan cihazın görünümü.	73
Şekil 4.5 : Kül ergime analizi yapan cihazın görünümü.....	74

Şekil 4.6 : Kül ergime analizi yapan cihazın görünümü.	74
Şekil 4.7 : Isıl değer analizini yapan cihazın görünümü.	76
Şekil 4.8 : Yarı pilot ölçek yeraltı kömür gazlaştırma sisteminin şematik şekli.	78
Şekil 4.9 : Yarı pilot ölçek yeraltı kömür gazlaştırma deney düzeneğinin görünümü	79
Şekil 4.10: Reaktörün görünümü.	80
Şekil 4.11: SCADA sisteminin görünümü.	81
Şekil 4.12: Gaz kromatografi cihazı.	84
Şekil 4.13: Kömür bloğunun reaktöre yerleştirilmesi.	85
Şekil 4.14: Kömürün reaktör içerisindeki görünümü.	86
Şekil 4.15: Reaktör içinin görünümü.	86
Şekil 4.16: Hava beslemesine başlanmadan önceki SCADA görüntüsü.	87
Şekil 4.17: Deney sonrası reaktör içinin görünümü.	88
Şekil 4.18: 1 nolu deney: Hava ve yapay gaz debisinin zamana göre dağılımı.	88
Şekil 4.19: 1 nolu deney: Sıcaklık dağılımı.	89
Şekil 4.20: 2 nolu deneyde reaktöre yerleştirilen kum ve kömür bloğunun görünümü.	90
Şekil 4.21: 2 nolu deney : Reaktör içerisindeki kömürün görünümü.	90
Şekil 4.22: Gazlaştırma kanalının oluştuğunun görünümü.	91
Şekil 4.23: Reaktör içerisindeki görünümü. a)Refrakter tuğlaların dizilimi, b)Tuğlaların birleşim yerlerinin harç ile doldurulması, c)Taş yünü serilmesi, d) Sac ile örtülmesi.	92
Şekil 4.24: 2 nolu deney: Oksijen beslemesinin ardından yarım saat sonraki SCADA görüntüsü.	93
Şekil 4.25: 2 nolu deney: Deney esnasında gönderilen oksijen debisinin zamana bağlı grafiği.	94
Şekil 4.26: 2 nolu deney: Kömürün orta kısmındaki sıcaklık dağılımı.	95
Şekil 4.27: 2 nolu deney: Gazlaştırma kanalındaki sıcaklık dağılımı.	95
Şekil 4.28: 2 nolu deney: Yanabilir gaz bileşimlerinin zamana göre dağılımı.	98
Şekil 4.29: 2 nolu deney: CO ₂ , N ₂ ve O ₂ gazlarının zamana göre dağılımı.	99
Şekil 4.30: 2 nolu deney: Isıl değerlerin zamana göre dağılımı.	99
Şekil A. 1: Penta Otomasyon ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ve Ltd. Şirketi termoeleman sıcaklık kalibrasyon sertifikası.	108

YARI PİLOT ÖLÇEK YER ALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA DENEY DÜZENİNDE MALKARA PİRİNÇÇEŞME KÖMÜR SAHASINA AİT BLOK KÖMÜR ÖRNEKLERİNİN GAZLAŞTIRILMASI

ÖZET

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı, petrol ve doğalgaz kaynaklarının sınırlı olması, ayrıca petrol piyasasındaki belirsizlikler gerek ülkemizde gerekse dünyada kömürün enerji üretimindeki önemini arttırmaktadır. Özellikle ülkemiz açısından ele alınacak olursa birincil enerji tüketimimizdeki artışı karşılamak adına kömürün enerji üretimindeki payının artırılması gerekmektedir. Kömür kaynaklarının sadece %15'i geleneksel madencilik yöntemi ile çıkartılabilmektedir. Bununla birlikte geleneksel madenciliğin tehlikeli, zahmetli ve maliyetli olması kömürün yerinde gazlaştırılmasını gerekli kılmaktadır. Kömürün yerinde gazlaştırılması yeraltı kömür gazlaştırma işlemi olarak adlandırılmaktadır. Yeraltı kömür gazlaştırma prosesi düşük ısı değerlikli ve klasik madencilik ile değerlendirilemeyen kömürlerden yararlanmayı sağlamaktadır. Bu yöntemde jeolojik koşullar nedeniyle çıkarılamayan kömürler, kömür yatağında enjeksiyon ve üretim kuyusu olmak üzere iki sondaj kuyusu açılarak, enjeksiyon kuyusundan kömürün gazlaşmasını sağlayan gazlar (hava, oksijence zenginleştirilmiş hava, oksijen, su buharı) gönderilerek yerin altında yapay gaz (syngaz) oluşmakta ve bu gaz üretim kuyusuyla yüzeye ulaşmaktadır. Elde edilen yapay gazın ana bileşenlerini karbonmonoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), hidrojen (H₂), metan (CH₄) ve su buharı (H₂O) oluşturmaktadır. YKG prosesinde kömür yatağı reaktör görevi görürken, kömür yatağı etrafında bulunan yeraltı suları prostesteki su ihtiyacını karşılamaktadır. YKG prosesinin klasik madenciliğin yanında yüzey gazlaştırma işlemine göre de pek çok üstünlüğü bulunmaktadır. Özellikle yüzey gazlaştırıcısı kullanılmaması, kömür taşınım ve depolama giderlerinin bulunmaması, sermaye maliyetini çok ciddi ölçüde düşürmektedir. Oluşan kül ve katranın yerin altında kalması ise çevre kirliliği açısından fayda sağlamaktadır. Ayrıca günümüzün en büyük sorunu olan sera gazı salınımını azalttığı için temiz kömür teknolojilerinin bir parçası olarak kabul edilmektedir. Bunun yanı sıra karbondioksitin depolanmasında da YKG prosesindeki kuyuların ve kömürün gazlaşması sonucu oluşan oyukların kullanılması, karbondioksit tutma ve depolama (CCS) tekniğinde YKG prosesini yeni ve ucuz bir yöntem olarak karşımıza sunmaktadır.

Ticari açıdan ilk olarak 1930'lu yıllarda Eski Sovyetler birliğinde ele alınan YKG prosesi ileriki yıllarda başta Amerika, Avusturalya, Kanada, Güney Afrika, İngiltere ve Çin olmak üzere pek çok ülkede bu konuyla ilgili saha testleri gerçekleştirilmiştir. Ülkemiz açısından da düşük ısı değerli kömür rezervlerimizin değerlendirilmesi için YKG prosesinin ticari ölçekli işletmelerde uygulanmasının enerji açığımızın kapanmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir. Fakat ticari ölçekli denemelere geçilmeden önce başarılı laboratuvar ve saha denemeleri yapılmalıdır. Bu denemelerle elde edilen bilgiler sonucu YKG prosesi için optimum koşulların sağlanması mümkün olacaktır. Bu nedenle bu tez çalışmasında ülkemizde YKG prosesine uygun kömür yatakları belirlenmiş ve bu yataklardan Malkara Pirinççeşme Köyü 3 nolu damarına ait kömür blokları temin edilerek bu kömürlerden TÜBİTAK 1003 Projesi kapsamında

İTÜ Makine Fakültesi Yanma laboratuvarına kurulan bir deney sisteminde yapay gaz elde edilmesi amaçlanmıştır. Laboratuvar simülasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için öncelikle prosesin ilerleyişinin tam olarak anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle tezin 2. Bölümünde YKG prosesi ayrıntılı olarak incelenmiş, yeraltı kömür gazlaştırma prosesinin uygulandığı saha testlerinden ve önemli ticari ölçekli uygulamalardan bahsedilmiş ve proses ekonomisiyle ilgili çalışmalar ele alınmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde Türk linyit yataklarının yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygulanabilirliği araştırılmış ve bu tekniğin uygun olabileceği düşünülen kömür sahaları belirlenmiştir. Bu sahaların belirlenmesinde kömürün fiziksel ve jeolojik özellikleri ile yeraltı gazlaştırma prosesinin yapılacağı bölgenin özellikleri ve sahanın rezerv durumu dikkate alınmıştır. Yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygun bulunan sahalardan Trakya Malkara bölgesinde yer alan ve projemize destek veren Uysal Madencilik şirketine ait Malkara Pirinççeşme sahası seçilmiştir. Bu bölümde ayrıca Uysal Madencilik Şirketi açık ocak işletmesinin çalıştığı 3 nolu damarın özellikleri yer almaktadır.

Tezin dördüncü bölümünde Uysal Madencilik şirketinden temin edilen kömürlerin özellikleri yeraltı kömür gazlaştırma prosesi açısından büyük önem taşıdığı için, kömürün kısa, elementel ve ısı değer analizleri, kül ergime analizleri ve kükürt türleri tayini TÜBİTAK-MAM Yakıt Teknolojileri Bölümü'nde yapılmıştır. Kömür analizlerinin ardından yeraltı gazlaştırma deneylerinin yapılacağı deney düzeneği ve deneyin yapılışından bahsedilmiştir. Deneylere başlamadan önce hazırlık aşaması bulunmaktadır. Deneyler esnasında farklı çalışma koşulları uygulamak adına hava ve oksijen farklı debilerde ve farklı sürelerde verilmiş ve bu uygulamanın deneye etkisi incelenmiştir. Yapılan deneylerde sıcaklıklar 1000 °C'nin üzerine çıkmış, yanabilir gaz elde edilmiştir. Edilen bu gazın içeriğinin yaklaşık %37'sini CO, %26'sını H₂ ve %3,5'ini CH₄ oluştururken, gazın ısı değeri ise ortalama 9 MJ/m³'tür. Bu değerler literatürden elde edilen bilgilerle kıyaslandığında, benzer çalışma koşullarında gerçekleştirilen laboratuvar ve saha testlerinin sonuçlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

GASIFICATION OF COAL BLOCK SAMPLES OF PRINCCESME- MALKARA REGION IN SEMI-PILOT SCALE UCG TESTING APPARATUS

SUMMARY

The significance of coal in energy generation are becoming highly essential due to the fact that the energy demand in the world is increasing drastically and as proven statistically oil and natural gas reserves are depleted considerably. Coal is so abundant source for energy that it is expected to play an increasingly important role in energy generation in both Turkey and the rest of World. Especially, the energy generation share of coal must be increased significantly in order to be able to meet the primary energy consumption in Turkey.

Mining is the most conventional method of extracting coal, however it has been estimated that only 15% of the total coal resources can be converted into the energy generation in this manner. In addition to this, as conventional mining operations requiring more time, personnel and more expenses, gasification of coal in-situ, becomes more necessary. Hence, in-situ coal gasification is called as Underground Coal Gasification (UCG). UCG has been presented as an alternative technology making use of coal reserves cleanly and efficiently. Underground Coal Gasification is the process of in situ conversion of coal deposits to combustible gaseous products which subsequently can be used to produce heat, power or as a feedstock for chemical products such as hydrogen, methanol or synthetic natural gas. UCG could increase the coal resource available for utilization enormously by gasifying otherwise unmineable deep or thin coals under many different geological settings. In the UCG process coal reacts in situ with gasification agents (such as oxygen, air, steam or their mixture) and synthesis gas is produced. The synthesis gas consists of mainly hydrogen, carbon monoxide, carbon dioxide, methane and nitrogen.

UCG has got numerous advantages comparing to conventional mining as well as surface coal gasification, which is the other alternative method of gasification of coal, from economic, environmental, health and safety aspects. From economical point of view, the capital expenses of UCG plants would be reduced substantially comparing to the equivalent plant fed by surface gasifiers since there is no need to use gasifiers. In addition to that, the operation expenses are likely to be much lower because of the lack of coal mining, the absence of the coal transportation and storage expenditure and significantly reduced ash management facilities. Taking environmental aspects into account, UCG has no surface disposal of ash and coal tailings, has lower dust and water consumption, larger coal reserves exploitation as well as lower volatile organic components. In addition, It's claimed as a part of clean coal technology that It considerably decreases greenhouse gas effects. Besides this, using injection and production wells and cavities as a carbon dioxide storage reveal new and cost-effective method at carbon dioxide capture and storage activites. Third of all, the major motivational aspect of UCG involves increased worker health and safety by using UCG equipment and devices instead of sending coal worker to the mine. Comparing

to conventional mining techniques, UCG considerably reduces occupational accidents and deaths leading to reveal more safe working conditions.

The theoretical and experimental studies on the in situ techniques of coal gasification had been started by former Soviet Union in 1930s. On the following years, the number of other countries such as the United States, Australia, Canada, South Africa, The United Kingdom and China has carried out relevant studies taking oil and natural gas prices into consideration. Over the last few years, the number of activities throughout the world focusing on UCG has rapidly increased. It is highly foreseen that in order to resolve the lack of energy in Turkey, low calorific value lignite resource should be evaluated by the energy companies which are implementing the UCG method as the primary method of energy generation from coal. Before running the commercial scale UCG plants, related field and laboratory tests must be carried out successfully. With the aid of outcomes from successful tests, best operation condition for UCG process can be found out.

Therefore, the main motivation of the project is to implement UCG technique to Turkish Lignites, make some assessments and acquire outcomes whether it is viable or not. Within the scope of project so called TUBITAK 1003, coal blocks taken from the third seam of Pirinccesme/Malkara/Tekirdag has been analysed in such a way that a system, which UCG experiments can be carried out, has been designed in ITU Mechanical Faculty Combustion Laboratory. In order to carry out the simulation successfully, the progression of the process must be well understood. Hence, in chapter 2, UCG processes has been discussed in detail. In this chapter, chemical processes, the historical development and, advantage and disadvantage of UCG, linkage methods preferably LVW and CRIP methods, the field tests as well as commercial scale applications. This chapter also reviews studies about economics of underground coal gasification, the chemical characterization of coal seam and the most convenient geological condition for UCG process to be carried out. The Process variables of UCG has been summarized including gasification agent, temperature and pressure effects, cavity growth as well as heat loss.

Chapter 3 undertakes clearly the assessment of the viability of the Turkish Lignites with respect to UCG technique leading to determine precisely the most eligible coal regions. In order to be able to decide the most convenient coal regions, physical and geological characterization of the coal, the accessibility and transportation facilities of the coal region and the reserve limitation of the coal region have been taken into seriously consideration. Having done the previous studies, Princcesme/Malkara site which is owned by one of the private company namely Uysal Mining Co. has been chosen. Uysal Mining Co. located in Princcesme/Malkara has admitted to support this project due to the suitability of UCG technique within other coal sites. This chapter also explains in detail the fundamental characterization of the third seam in Princcesme/Malkara lignite site which is managed by Uysal Mining Co.

In chapter 4th of the thesis, the ultimate analysis, proximate analysis and calorific value analysis of the coal, ash melting analysis and sulphure types has been analysed in TUBITAK-MAM due to the highly significance to UCG technique. After analysing the characterization of the coal, in the last part of the fourth chapter of the thesis consists of the design of the testing apparatus where UCG experiments take place and experimental procedures of UCG runs. Before starting up the experiments, there is a preparation step which must be performed. During the experiments, various flow rates of air and oxygen has been injected in different time of run in order to find out the best

operation condition. Also, the effect of this implementation has been analysed. The results of the experiment have been figured out that temperatures in reactor exceed 1000 °C and syngas has been obtained. The approximate CO, H₂ and CH₄ contents in syngas were 37vol.%, 26vol.% and 3,5vol% respectively and the calorific value was 9 MJ/m³.

The results of experiment performed in the laboratory comparing with the results of relevant field and laboratory tests show us more proper results.

1. GİRİŞ

Yüksek orandaki elektrik ihtiyacı, artan petrol ve doğal gaz fiyatları, nükleer enerjinin kullanımının sınırlandırılması, kömür rezervlerinin çok miktarda bulunması ile kıyaslandığında kömürün dünya birincil enerji kaynakları içerisindeki payının geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Dünyada 10 trilyon tonun üzerinde kömür rezervi bulunmaktadır. Ülkemiz açısından ele alınacak olursa 2013 yılı itibariyle ülkemizde 1.3 milyar ton taş kömürü ve 13.9 milyar ton linyit olmak üzere toplam 15.2 milyar ton kömür rezervi bulunmaktadır [1].

Kömürün diğer yakıt tiplerine oranla fazla miktarda bulunması, ayrıca dünya enerji politikasının kömürün uzun yıllar boyunca ucuz kalacağı fikrini savunması, fakat kömürün kirli bir yakıt olduğu için kullanılamaması temiz kömür teknolojilerinin gelişmesine yol açmıştır. Temiz kömür teknolojisi, kömürün yanması sırasında, öncesinde ya da sonrasında kükürt ve azot oksitlerin uzaklaştırılmasıyla ya da kömürün gaz ya da sıvı bir yakıtı dönüştürülmesiyle gerçekleşmektedir. Kömür gazlaştırma temiz kömür teknolojilerinden biridir. Kömür gazlaştırma işlemi yüzeyde yapıldığı gibi yerinde de yapılabilmektedir.

Dünya genelinde ve ülkemizde diğer yakıt tiplerine kıyasla fazla miktarda kömür bulunmasına rağmen, dünyadaki kömürlerin yalnızca 6'da 1'i ekonomik açıdan kullanılabilir düzeydedir [2]. Bunun en büyük iki nedeni kömür yataklarının yerin çok derininde olması ve ısı değerleri bakımından düşük kalitede olmalarıdır. Linyitlerimizin ise yaklaşık %60'ı 1500kcal/kg'ın altında ve yaklaşık %7'si ise 3000 kcal/kg'ın üzerinde ısı değere sahiptir [3]. Bu oranlar göz önüne alındığında linyitlerimizin ısı değerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Ülkemiz ve diğer ülkeler açısından bu denli önemli miktarda kömür rezervlerine sahip olunmasına rağmen, bu linyitlerin düşük ısı değerli olmalarından dolayı ekonomik açıdan klasik madencilikle değerlendirilememektedir. Yeraltı kömür gazlaştırma prosesi bu tarz düşük ısı değere sahip ve klasik madencilikle değerlendirilemeyen kömürlerden yararlanmak için geliştirilen bir temiz kömür teknolojisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı yeraltı kömür gazlaştırma prosesini etkileyen faktörlerin belirlenip bu faktörler doğrultusunda yeraltı kömür gazlaştırma deneylerinin uygulanabileceği kömür sahalarının tespiti ve yer seçimi ve belirlenen sahalardan temin edilen kömür bloklarıyla, 1003 ARDEB TÜBİTAK Destekli proje kapsamında kurulan yarı pilot ölçek bir deney düzeneğinde gazlaştırma deneylerinin gerçekleştirilmesidir.

2. YER ALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİ

2.1 Proses Teknolojisi

Yeraltı kömür gazlaştırma (YKG) prosesi kalorifik değeri düşük olan veya klasik madencilik yöntemleriyle çıkarılamayan kömür yataklarındaki kömürlerin, oksijen (oksijen, zenginleştirilmiş hava, hava) ve buhar ile yanabilir bir gaz (yapay gaz) haline dönüştürülmesinde kullanılan bir yöntemdir. Yapay gaz (syngas) içeriğinin çoğu karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), hidrojen (H₂), ve metandan (CH₄) oluşmaktadır.

YKG’de kömürler yeraltında kömür damarında kuyu çiftleri vasıtasıyla gazlaştırılırlar. Öncelikle kömür yakıcı bir gaz ile gazlaştırılır ki birçok uygulamada gaz olarak propan-bütan kullanılmıştır [4,5,6]. Kuyu çiftlerinden ilki enjeksiyon kuyusu olarak adlandırılmaktadır. Bu kuyu; gazlaştırma için kullanılan gazlaştırma ajanları olan hava ve/veya oksijenin yüzeyden kömür yatağına doğru gönderilmesini sağlar. Kullanılan gazlaştırma ajanlarıyla tutuşturulan kömürün karşılaşması sonucunda gazlaşma reaksiyonu gerçekleşerek yapay gaz oluşumu sağlanır. Oluşan sıcak gazlar kömür damarı içerisinde üretim kuyusuna doğru ilerlemeye zorlanır ve yüksek basınç ile diğer kuyudan yüzeye çıkarılır ki bu kuyu üretim kuyusu olarak adlandırılmaktadır. Yüzeye çıkarılan gazlar ön temizlik aşamasından geçirildikten sonra kullanım maksadına göre işlemlere tabi tutulur. Gazlaştırma ajanlarının bileşimine göre sistemden, jeneratör gazı, su gazı, şehir gazı, sentez gazı veya kuvvet gazı elde edilebilir. Üretilen bu yapay gaz; endüstriyel ısınmada, elektrik üretiminde, kimyasal üretiminde ya da hidrojen üretimiyle doğalgaz ve dizel yakıtta kullanılabilir [7]. Üretilen gaz ısıl değerlerine göre üç ana grupta toplanmaktadır.

1. Düşük ısıl değerli (3.35-7.53 MJ/m³)
2. Orta ısıl değerli (7.53-15.07 MJ/m³)
3. Yüksek ısıl değerli (35.6 MJ/m³)

Düşük ve orta ısıl değerli gazların üretimi daha ekonomiktir. Ancak, ısıl değerlerinin düşük olması nedeni ile, aynı miktar enerji üretimi için gerekli dağıtım gideri, yüksek ısıl değerli gaza oranla daha fazla olmaktadır. Bu durum, düşük ve orta ısıl değerli

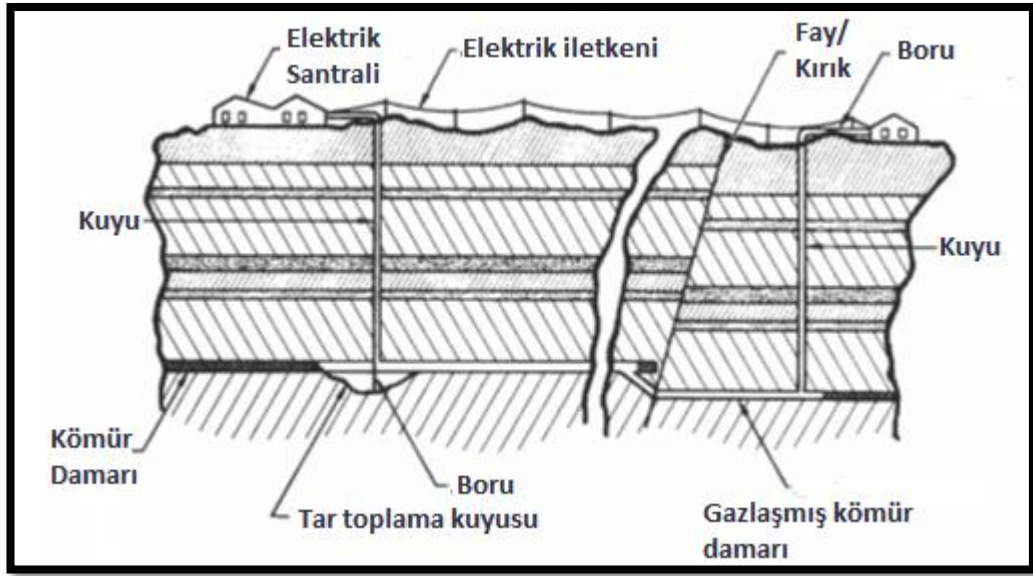
gazın üretildiği yerin hemen yakınında kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Şekil 2.1’de yer altı kömür gazlaştırma prosesi gösterilmektedir [8].



Şekil 2.1: Yeraltı kömür gazlaştırma prosesi [8].

2.2 Tarihsel Gelişimi

Yer altında depolanan katı yakıtların gazlaştırılması fikri ilk olarak 1868 yılında İngiltere’de Sir William Siemens tarafından ortaya atılmıştır. 1888 yılında ise periyodik tabloyu bulan Rus Bilimci Mendeleyev bu konu hakkındaki çalışmalarını yayımlamıştır. Büyük Britanya’da ilk patent 1909 yılında yayımlanan Amerikalı A.G. Betts’e aittir [9].



Şekil 2.2: Betts tarafından önerilen yer altı gazlaştırma şeması [9].

İlerleyen yıllarda, Sir William Ramsey, Betts'in fikrini ilerletmiş ve fikri geliştirerek yer altındaki ilk denemenin planlamalarını sonuçlandırmıştır. Böylece Ramsey 1912'de Durham'da (İngiltere) ilk saha testini gerçekleştirmiştir. Fakat o yıllarda 1. Dünya Savaşı'nın patlak vermesi ve Ramsey'in ölümünden dolayı saha testi yarıda kalmıştır. Ramsey'in yer altı kömür gazlaştırması ile ilgili konuşması o zamanlar Zürih'te sürgünde olan Lenin'in dikkatini çekmiştir. Sert maden işçiliğini(hard mining labor) ortadan kaldırmasından dolayı sosyalist toplumlar için büyük teknolojik yararları olacağı gerekçesiyle Lenin Mayıs 1913'te Pravda'da YKG ile ilgili bir makale yayınlamıştır[9]. Böylece 1928-1939 yılları arasında bu fikir Sovyetler Birliği'nde tekrar ele alınmış ve ilk yer altı testi Donets ve Moskova kömür havzalarında gerçekleştirilmiştir [10].

1933 yılından itibaren bu faaliyetler yeni bir kimlik altında bir devlet kuruluşu olan Potzemgas tarafından kontrol altına alınmış ve beş pilot tesis inşa edilmiştir [10].

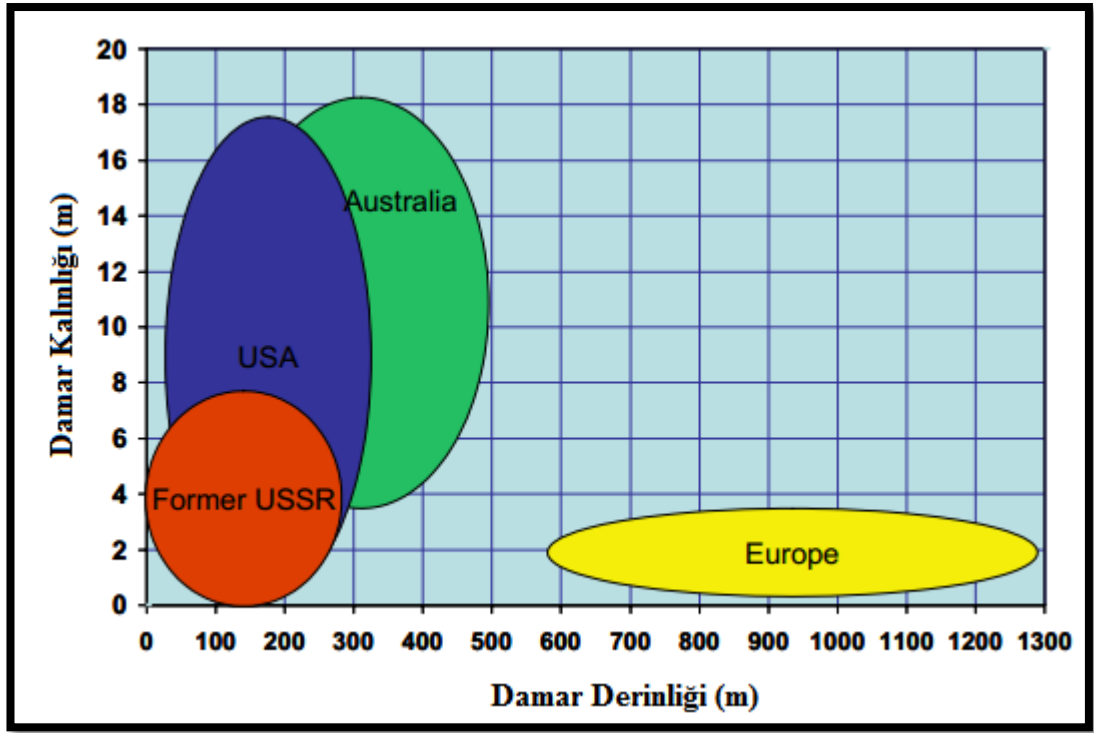
1938'de elde edilen sonuçlar Donets, Lower Moscow ve Siberian havzalarında endüstriyel kurumların inşa edilmesi için önemli bir karar aldırtmıştır [10].

2. Dünya Savaşı'ndan sonra enerji kıtlığı ve Sovyetler birliğinin harekete geçirdiği bu yeni teknolojinin başarılı sonuçları 1947-1950 yılları arasında İtalya, İngiltere, Fransa, Belçika ve Amerika'da YKG testlerinin yapılmasına yol açmıştır. Fakat bu testlerin hiçbirisi endüstriyel ölçekte gelişmeye yol açmamış bunun sonucunda 1950'ler ve 1960'lar boyunca batı ülkeleri petrol ve doğal gaz araştırmaya odaklanmıştır [10].

Doğu ülkelerinde ise bu program (YKG) daha da ilerletilmiş Sovyetler Birliği'nde ki çalışmalar devam ettirilmiş Shatsky, Angren ve Yuzhno-Abinsk'de YKG ile şehir elektriği üretilmiştir. Sovyetler Birliği'nde toplam 15 milyon ton kömür gazlaştırılmıştır [11]. Sovyetler Birliğinin dağılmasından sonra Özbekistan'daki tek ticari YKG tesisi Angren'deki Yerostigaz tesisinde halen yapay gaz üretimine devam etmektedir [12,13].

Amerika'da ilk YKG testleri Gorgas, Alabama'da Bureau of Mines ile Alabama Power Company ve Sinclair Coal Company'nin işbirliğiyle 1948'den 1962'ye kadar yürütülmüştür [14,15]. Fakat bu denemeler Rus teknolojisi hakkında bilgilerin yetersiz olmasından dolayı başarısızlıkla sonuçlanmıştır. İlerleyen yıllarda Rus teknolojisi hakkında gerekli çevirilerin yapılmasıyla önemli bilgiler elde edilmiştir[16,17,18,19,20]. Bu bilgilerin ışığında 1972-1977 yılları arasında ABD Enerji Bakanlığı önderliğinde Wyoming'de(Hanna) başarılı saha testleri gerçekleştirilmiştir. Bu durum ticari ölçekli çalışmaların hız kazanmasına yol açmıştır. 1976-1986 yılları arasında Wyoming'de(Hoe Creek), Texas'ta, Washington'da(WIDCO) bir çok saha testi yapılmıştır [6,21,22,23,24]. 1987 yılında ise Wyoming Rocky Mountain'de, LLNL tarafından geliştirilen CRIP tekniği kullanılarak deneme yapılmıştır. Bu deneme ABD'deki en başarılı denemedir ve yer altı sularının kirliliğini önlemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Testin başarılı olması ve operatörlerin ticari amonyak üretim tesisi planlama girişimlerine rağmen, petrol fiyatının düşmesiyle sponsor bulunamamış ve YKG tesisi kapatılmıştır [25].

Çok sayıda YKG testi Batı Avrupa'da da yapılmıştır. Avrupa'da yapılan çalışmaların diğer ülkelere göre en önemli farkı Şekil 2.3'te görüldüğü gibi kömür damarlarının ince olması ve kömür yataklarının çok derinde yer almasıdır(Amerika ve Sovyetler Birliği'ndeki kömür kalınlığı 300 m'den azdır) [26]. Bu nedenle Amerika ve Sovyetler Birliği'ndeki çalışmalarda kullanılan teknolojilerin Avrupa'daki kömür yataklarının gazlaştırılması için kullanılması projelerin başarısızlıkla sonuçlanmasına yol açmıştır.



Şekil 2.3: YKG çalışmalarının kömür damar kalınlıkları ve maden derinlikleri [26].

YKG ile ilgili önemli çalışmaların gerçekleştirildiği bir diğer ülke Avustralya'dır. Özellikle Cougar Energy, Carbon Energy ve Linc Energy YKG'yi ticari boyutlara taşıyan şirketlerdir. Yapılan önemli çalışmalardan biri Linc Energy ve Kanadalı bir şirket olan Ergo Exergy'nin iş birliğiyle yapmış oldukları Queensland(Chincilla) Avustralya'daki YKG tesisidir. Batı dünyasındaki ilk uzun dönemli YKG pilot tesisi olan Chincilla 1997'den 2003'e kadar devam etmiştir[27]. Bloodwood Creek Projesi ise yine Queensland Avustralya'da ticari boyutta olan bir diğer YKG tesisidir. Carbon Energy tarafından Ocak 2008'den beri başarıyla yüksek kalitede yapay gaz üretimi gerçekleştirilmektedir[28].

Güney Afrika'da elektrik üreticisi olan Eskom şirketi YKG teknolojisi ile ilgili çalışmalar yapmış, Ocak 2007'de Majuba'da başarılı saha testleri ile yapay gaz üretimine başlamıştır [28].

2008'de Swan Hills Synfuels, Alberta Kanada'daki pilot tesisinden yapay gaz üretmiştir. Deneme projesi 2011 yılı Ocak ayında sonlandırılmış ve ticari ölçekli uygulamaya geçilmesi kararlaştırılmıştır.

Çin YKG teknolojisini geliştiren bir lider olarak ortaya çıkmıştır. 1991 yılından bu yana 16 adet pilot tesiste yer altı gazlaştırma çalışmaları yürütülmektedir. Çin'deki bu

kapsamlı araştırmalara Pekin’deki China Üniversitesi destek vermektedir. Ticari gübre ve kimyasal üretimi için YKG’den üretilen yapay gaz hammadde olarak kullanılmaktadır. Çin’de yapay gaz yapısındaki hidrojen miktarını arttırmak ve buradan hidrojen eldesi için alternatif olarak hava ve buhar enjeksiyon sistemli YKG deneyleri yapılmaktadır [9]. Moğalistan Wulanchabu projesi Çin’deki en önemli projelerden biridir. Bu projede ENN Group Co. Ltd.(XinAo Group’un alt kuruluşu) şirketi 2007’de yapay gaz üretimine başlamıştır. 26 ayda 100 000 tondan fazla kömürü gazlaştırıp yapay gaz üretmiştir [28].

YKG teknolojisi üzerine çalışmalar Hindistan’ın batısı ve doğusunda yaygınlaşmıştır. Kasım 2006’da Asian Pacific Partnership gözetimi altında Hindistan Kolkata’da YKG ile ilgili bir çalıştay organize edilmiştir. Çalıştayın temel amacı Hindistan’daki YKG uygulamasını hızlandırmaktır.

Bugüne kadar yapılan araştırmalardan görüldüğü üzere, Eski Sovyetler Birliği’nin YKG üzerinde uzun yıllar süren araştırmalarının ve 40 yıldan fazla süren deneysel çalışmaların birikimi, bugün endüstrileşme adına tüm dünyada faydalanılmaktadır. Özellikle 1995 yılından itibaren dünyanın pek çok ülkesinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan gazlaştırma teknolojisi günümüzün en hızlı gelişen enerji teknolojilerinden birisi haline gelmiştir. The Underground Coal Gasification Partnership (UCGP) bugüne kadar dünya genelinde 15 milyon ton kömürden YKG çalışmalarıyla 20 milyar m³ yapay gaz üretildiğini tahmin etmektedir [29].

2025 yılına kadar yapılması öngörülen çalışmalar ise Amerika’da, İngiltere’de Vietnam’da, İskoçya’da ve Hindistan’da Ergo Exergy ve Linc Energy gibi birçok şirketin işbirliğiyle gerçekleştirilmesi planlanmıştır [30].

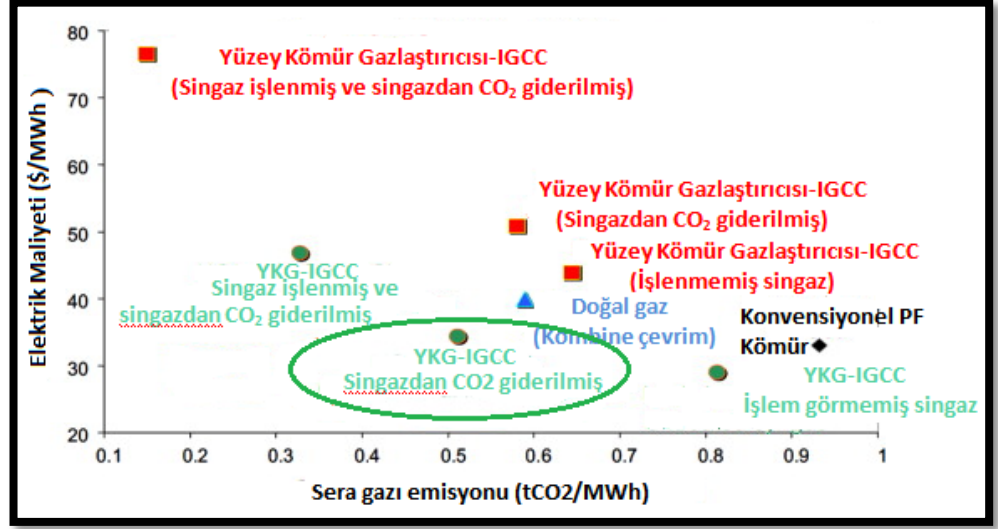
2.3 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesinin Üstünlükleri ve Sakıncaları

YKG tekniğinin yüzey gazlaştırma işlemine ve geleneksel madencilığe kıyasla pek çok üstünlüğü bulunmaktadır.

Bu tekniğin geleneksel madencilik yöntemine göre en önemli üstünlüğü çevre, insan sağlığı ve ekonomidir.

- CO₂ emisyonunu azaltması YKG’nin çevre açısından bizlere sağladığı en önemli özelliktir. Şekil 2.4’te görüldüğü gibi diğer tekniklerle kıyaslandığında

hem maliyet hem de CO₂ emisyonunun en az olmasından dolayı YKG büyük önem taşımaktadır [31].



Şekil 2.4: Sera gazı emisyonu [31].

- Çevre ile ilgili olarak diğer tekniklerle kıyaslanmaya devam edildiğinde YKG'nin diğer teknolojilere göre bir diğer üstünlüğü çevresel bir sorun olan kükürt ve azot oksit emisyonunu çok düşük seviyelere indirmesidir [31]. Ayrıca kömür içinde bulunan kükürt, oksijen eksikliğinden dolayı SO₂ şeklinde değil de H₂S yapısında oluşmaktadır.
- İnsan sağlığı açısından ele alınacak olunursa, YKG prosesinde kömür madenciliği yapılmadığı için insan faktörü söz konusu değildir. Böylece iş kazalarının en çok yaşandığı ve kötü sonuçların olduğu madencilik sektöründeki insan etkisinden söz edilemez.
- Diğer bir üstünlük yatırım masraflarıdır. YKG ile üretilen gazların maliyeti Lurgi gazlaştırıcısı ile üretilen gazın maliyetinden %25, doğalgazdan üretilen yapay gaz maliyetinden ise %50 daha düşüktür [32].
- Özellikle çok derinde bulunan ve düşük ısı değerli olan kömürlerin geleneksel madencilikle çıkarılmaları hiç ekonomik değildir. YKG bu kömürlerden yararlanmamızı sağlamaktadır [33].
- Verimlilik açısından karşılaştırılacak olunursa; yer üstü gazlaştırma verimliliği %40-42 iken yer altı gazlaştırmada verimlilik % 50-55 dolaylarındadır [34].

Yukarıda sayılan maddelerden de anlaşılacağı gibi YKG teknolojisi geleneksel madencilik ve yüzey gazlaştırma teknikleriyle kıyaslandığında çok sayıda çevre,

sağlık ve güvenlik avantajına sahiptir. Bunların dışında YKG bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar:

- Proses yeraltında gerçekleşip tüm atıklar yeraltında kaldığından yeraltı sularının kirlenmesi muhtemeldir [35].
- Yerin altında gazlaşma sonucu oluşan boşluk örtü tabakasını taşıyamayabilir, ki bu durumda çökmeye neden olur. Çökme ise gaz sızıntısına ya da yüzeyde kullanılan ekipmanların zarar görmesine neden olabilir [35,36]. Çökme ayrıca yüzey sularının akışını, sığ aküferleri ve alt yapıyı (boru hattı ve yollar) etkileyebilir. Yollar, nehirler, göller gibi yüzey özelliklerinin etrafına tamponlar tedarik edilerek çökme yönetilebilir. İki önemli tehlike olan çökme ve yer altı sularının kirliliğini önlemek için en iyi saha seçiminin yapılması ve operasyonun çok dikkatli bir şekilde yürütülmesi gerekmektedir.
- YKG’de dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise, üretilen gaz düşük ısı değerlikli olduğu için uzun mesafeli taşınım da ekonomik olmayacaktır. Bu nedenle ürün gazı pazarı prosesin gerçekleştiği sahanın yakınlarında olmalıdır [37].

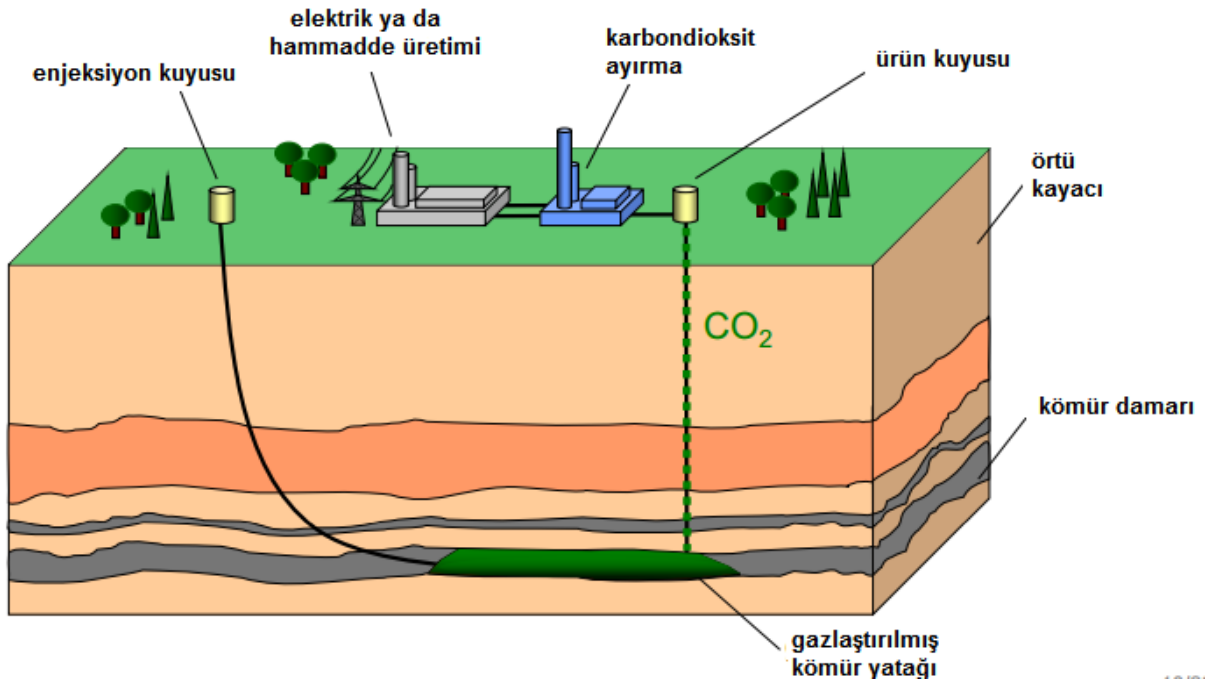
2.3.1 Karbon dioksit tutma ve yakalama (CCS)

Kömür petrol gibi fosil yakıtların kullanımı CO₂ emisyonu oluşturmaktadır. Özellikle enerji ihtiyacının artması bu tür yakıtlar sonucu çevreye salınan karbondioksit miktarını arttırmakta ve atmosferdeki CO₂ içeriğini olması gerekenden çok daha arttırmaktadır. Bu durum ise küresel ısınma ve iklim değişiklikleri gibi çevre sorunlarına yol açmaktadır. Küresel karbon salınımlarını bertaraf etme teknikleri arasında en yaygın teknik karbon tutma ve depolamadır(carbon capture and storage) ve CCS teknolojileri adı ile anılmaktadır. Kombine YKG-CCS projeleri ise aynı bölgede hem CO₂ depolama hem de kömürden entegre enerji dönüşümleri sunmaktadır. Uygun kömür yatakları için YKG-CCS teknolojisi uygulanarak konvansiyonel kömür santraline benzer bir maliyetle ayrıca %50 daha az sera gazı emisyonuyla elektrik üretilir. Maliyet fiyatlarının birbirine yakın olmasının sebebi CO₂’nin tutulmasının kolay olması ve diğer teknolojilerdeki gibi benzer sermaye yatırımlarının gerekmemesidir.

CO₂ yakalama için uygun teknoloji seçenekleri bulunmaktadır; fiziksel absorpsiyon, kimyasal absorpsiyon, membranla ayırma ve kriyojenik ayırma. Fiziksel absorpsiyon

prosesinde CO₂ metanol ya da glikol gibi bir çözücü içerisinde çözünür. Kimyasal absorpsiyon işleminde ise CO₂, metildietanolamin gibi kimyasal bir çözücüyle reaksiyona sokularak giderilir. Bu proseste CO₂'nin %85-90'ı (CO₂'nin kısmı basıncının oldukça yüksek olduğu) yanma öncesi yakalama işleminde tutulur. Membranla ayırma, fiziksel ve kimyasal absorpsiyona kıyasla daha az gelişmiş bir teknolojidir. Hali hazırdaki ticari ölçekli CCS teknolojilerinde kullanılamamaktadır. Kriyojenik ayırma, CO₂'i diğer gazlardan ayırmak için, CO₂'nin sıvılaştırılmasını esas almaktadır. Soğutma adımı için enerji gereksinimi yüksektir.

CO₂'i uygun şekilde depolama çözümleriyle ilgili ise birçok çalışma yapılmıştır. Tutulan CO₂ tükenmiş petrol ve gaz yataklarına depolanabildiği gibi yer altı kömür gazlaştırması boyunca kömür damarında oluşan boşluklarda da (oyuklarda) depolanabilmektedir (Şekil 2.5). Özellikle YKG'nin gerçekleştiği yaklaşık 700-800 m derinliklerdeki yüksek geçirgenliğe sahip bölgelerde CO₂'nin depolanması oldukça caziptir [29,38].



Şekil 2.5: Karbondioksit tutma ve depolama sisteminin şematik görünümü [28].

YKG oyuklarında CO₂ depolanmasının üç önemli avantajı bulunmaktadır. İlki bu boşlukların ciddi ölçüde bir kapasite teşkil etmesidir. YKG prosesinde kuyular arasında oldukça geniş oyuklar (5-8m çapında) oluşmaktadır. Varsayımda bulunulacak olursa tek bir gazlaşma prosesi ile 300m aralıklı düşey kuyular arasında 6000-15000

m³'lük bir boşluk oluşacaktır. Böylece yaklaşık 1700-4500 ton CO₂, bu boşluklarda depolanabilecektir.

Diğer bir avantajı ise kuyuların zaten oyuğun içine delinmiş olmasıdır. Gazlaşma işleminin düzgün bir şekilde yönetilmesi ile kuyularda her hangi bir zarar olmayacağından yer altına CO₂ gönderilmesi sırasında hem üretim hem de enjeksiyon kuyusunun kullanılmasını mümkün olacaktır. Çünkü kuyuların kazılmış olması depolama maliyetlerini önemli ölçüde azaltacaktır (%40-50 oranında).

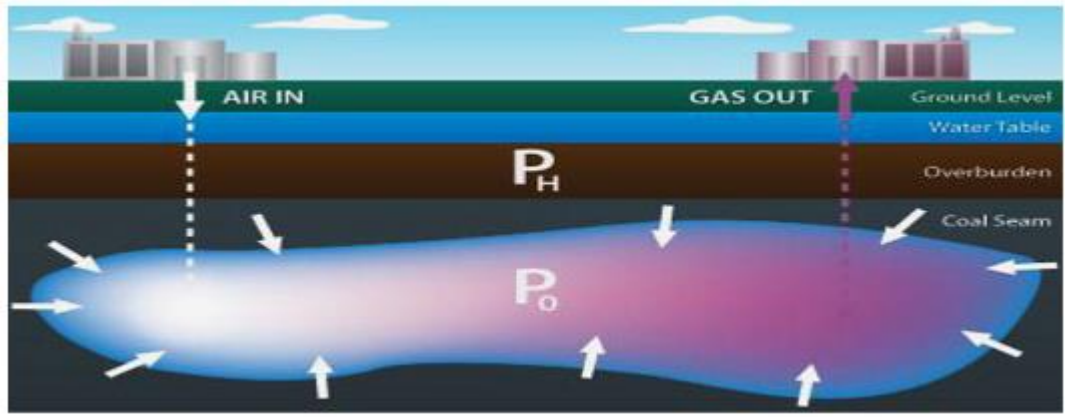
Son olarak kömürün fiziksel davranımı ayırmayı(sequestration) arttıracak yöndedir. Öncelikli CO₂ varlığında kömürler şişecek ve plastikleşecektir. Bu durumda kırıkları yok edecek ve poroziteyi azaltacaktır. İkinci olarak, organik minarel yüzeylere CO₂ 'nin adsorbe olması CO₂ sızıntısını immobilize edecektir. Son olarak kömür bölgesel mühürleme formasyonun altında kalıyorsa CO₂ ilk olarak oyuklardan ikinci olarak kömür matriksinden üçüncü olarak da örtü kayacından dolayı immobilize olur. Bu şekilde depolamanın sağlamaştırılması depolama riskini azaltacak ve depolamayı daha güvenli kılacaktır [9].

2.3.2 Su girişi

Kömür damarında ve etrafında bulunan yer altı sularının, hem gazlaştırma reaksiyonlarına hem de çevre kirliliğine oldukça büyük etkisi vardır.

Gazlaştırma reaksiyonları açısından ele alındığında, buhar/kok reaksiyonlarında yüzey suyunun enjeksiyonu gerekmeden gerekli su ihtiyacı doğal su girişlerinden sağlanır. Fakat fazla miktarda su sızıntısının/girişlerinin olması durumunda, endotermik gazlaşma reaksiyonları için gerekli olan ısıyı, su kendi buharlaşma ısısı olarak kullanır. Sovyetler ürün gazının düşmesine sebep olan fazla suyun uzaklaştırılması için sık sık drenaj kuyuları delmişlerdir. Su girişinin az olması durumunda ise buhar/kok reaksiyonunun oluşması için gerekli olan su miktarı ortamda bulunmaz. Her iki olumsuz durumda gazlaşma reaksiyonunun beklenildiği şekilde gerçekleşmesine izin vermez. Bu açıdan YKG sırasında su sızıntısını/girişini kontrol altında tutmak oldukça önem taşımaktadır. Bunun için su girişi modelleme çalışmaları yapılmıştır. Su sızıntısı ile ilgili ilk modelleme Champbell tarafından geliştirilmiştir. Yapılan diğer modelleme çalışmaları da bizlere çalışma stratejilerini söylemektedir. Su girişi üzerine yapılan çalışmalarla, su girişinin kontrolü için drenaj kuyularının delinmesi, basınç kontrolü ve hava besleme hızının ayarlanması dikkate alınmalıdır [39].

Yer altı sularının çevre kirliliğine neden olması açısından incelenecek olursa, bu kirlilik potansiyelini en aza indirmek için belli çalışmalar ortaya atılmıştır. Bunların çoğu oyuklardaki basınçla ilgili çalışmalardır [31,40]. Bu çalışmalarda işlem boyunca oluşturulan *basınç bariyerleri* ya da *basınç ceketi*, prosesi ve sızıntıları çevreler. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi operatörler gazlaştırma kanalındaki basıncın gazlaştırma bölgesini çevreleyen aküferlerin hidrostatik basıncından daha düşük olmasını sürdürmelidir ki yer altı suyunun akışı her daim gazlaştırma bölgesine doğru olsun. Böylece gazlaştırıcıdan çevresine doğru bir akış gerçekleşmez. Bu durum da değerli ürün gazlarının kaybını önlediği gibi yer altı kirliliğini de önler [31].



Şekil 2.6: Hidrostatik basınca karşı gaz odasındaki basıncın gösterimi [31].

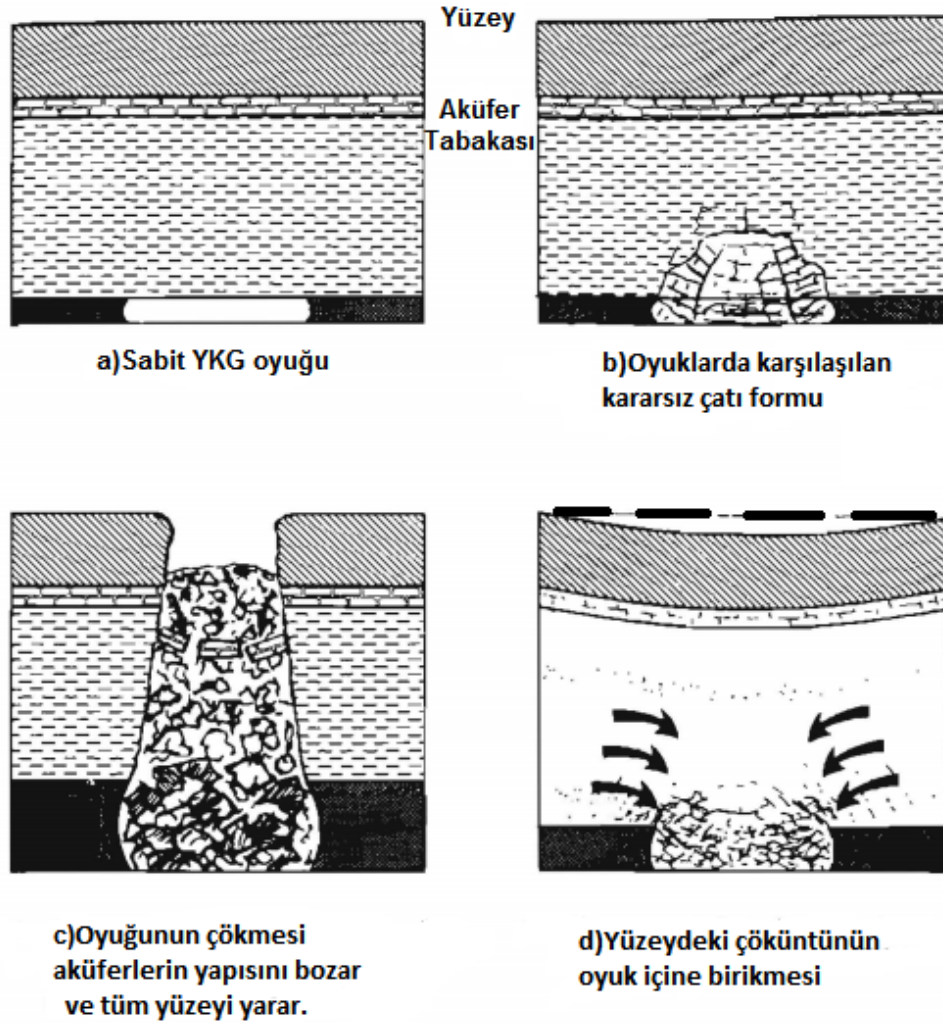
P_o : Gazlaştırma kanalındaki operasyon basıncı, P_H : Hidrostatik basınç

2.3.3 Çökme

Çökme yer altından bir kütlenin uzaklaştırılması üzerine yeryüzü tarafından yapılan düzenleme olarak tanımlanır. Yer altı madenciliğinde veya yer altı suyu ekstraksiyonunda da oldukça sık görülmektedir.

Çökmenin çevre üzerinde ve YKG prosesinin başarısı üzerine olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı çökme, YKG açısından son derece önemlidir. Çökmenin çevre üzerinde yaratabileceği olası sorunlar, ürün gazlarının yüzeye sızması, kaçan gazların aküferleri kirlletmesi ve aküferlerde oluşacak yapısal bozukluklardır. YKG prosesinin performansına olan etkileri ise, yüzeydeki ekipmanlara zarar vermesi, ürün ve enjeksiyon kuyularına zarar vermesi, sızan gazlardan dolayı yakındaki kömür damarlarını da tutuşturması, çökme sonucu oyukların molozlarla kaplanması ile gaz akışının değişmesi ve su girişini etkilemesi

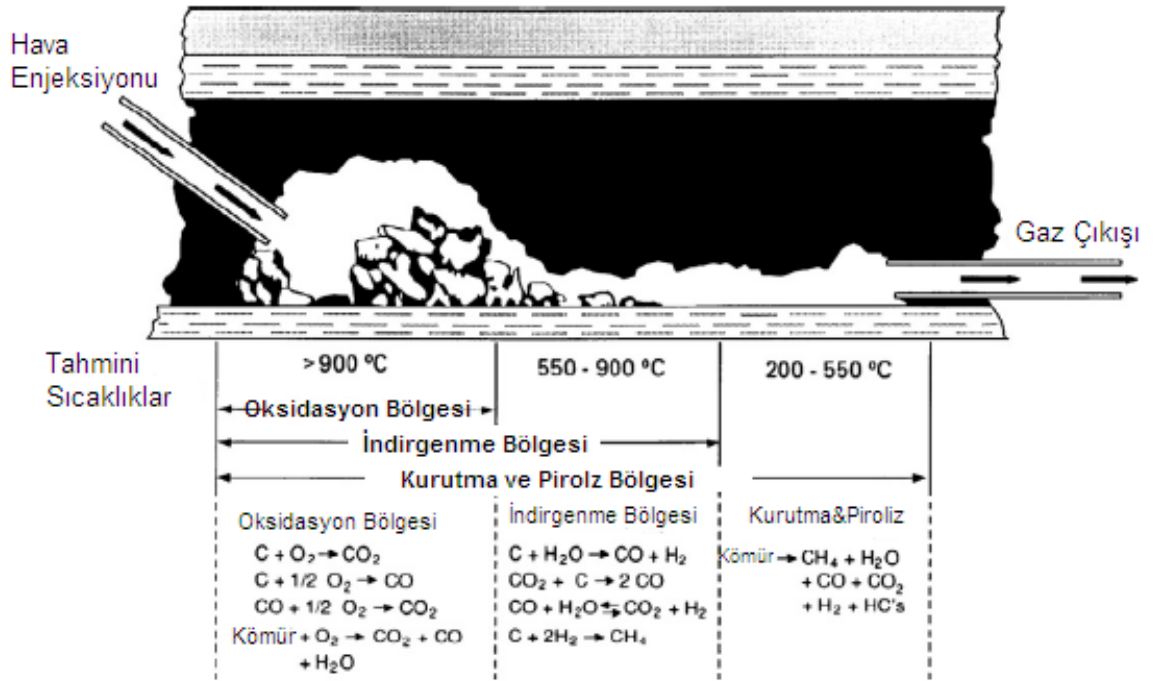
olarak sayılabilir [36]. Şekil 2.7’de çökme esnasında oyuklarda meydana gelen aşamalar görülmektedir [41].



Şekil 2.7: Oyuklarda meydana gelen çökme esnasındaki aşamalar [41].

2.4 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesinin Kimyası

Yer altı kömür gazlaştırma prosesinde kömürün fiziksel ve kimyasal özellikleri oldukça önemlidir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, tek boyutlu YKG modeli, ileri yanma boyunca oluşan farklı reaksiyon bölgelerinden meydana gelmektedir. Kömürün gazlaşması boyunca oluşan bu temel kimyasal reaksiyonlar oksidasyon, redüksiyon ve kurutma/piroliz’dir. Yeraltında ya da gazlaştırma reaktörlerinde gerçekleşen kömür gazlaştırma proseslerinin her ikisinde de bu reaksiyonlar gerçekleşmektedir.



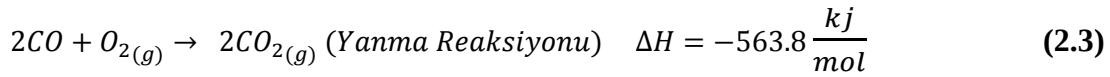
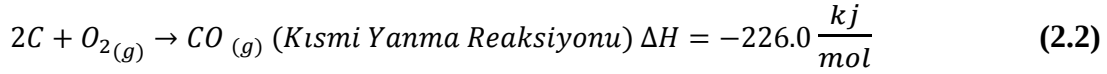
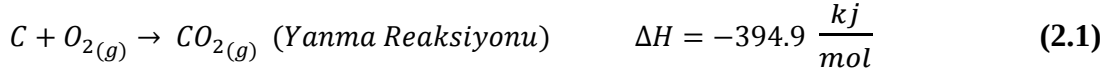
Şekil 2.8: Yer altı kömür gazlaştırması reaksiyon bölgelerinin şematik sunumu [44].

Şekil 2.8’de görüldüğü üzere YKG prosesleri bölgesel karakterlere sahiptir ve temel gazlaştırma reaksiyonları sınırlardaki hem katı yüzeyde hem de gaz fazında gerçekleşmektedir. Katı fazda çoğunlukla piroliz ve kurutma yer almaktadır. Termal bozunma sonucu gaz ürünler katı fazın gözeneklerine ve oyuklarına doğru ilerledikçe çeşitli homojen ve heterojen reaksiyonlar gerçekleşmektedir.

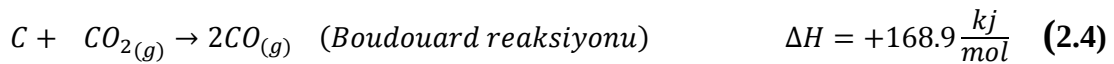
YKG prosesi öncelikle gazlaştırma bölgesi olarak adlandırılan bölgenin başlangıcında kömürün tutuşturulması ile başlar. Daha sonra sıcaklığın artmasıyla kömür kurur ve piroliz başlar. Piroliz oksijensiz yanmadır ve her iki yüzeydeki kömür gazlaştırmasında ürün gazının kompozisyonunun belirlenmesinde oldukça büyük rol oynamaktadır. Çünkü piroliz esnasında oluşan hidrojen, metan, karbon monoksit ve yüksek moleküllü diğer hidrokarbonlar düşük ısı değerli gaz ürünü zenginleştirebilirler [37].

Oksidasyon bölgesi kömür damarındaki piroliz sonucu akkor haline gelmiş kömür ile enjeksiyon kuyusundan gönderilen oksijenin reaksiyonundan oluşmaktadır. Gazlaştırma bölgesinde kömür yüzeyinde heterojen reaksiyonlar yer almaktadır. Reaksiyon hızları reaksiyon alanına ulaşabilirlikleri ve difüzyon tarafından belirlenir. Oksidasyon bölgesinde oluşan reaksiyonlar, kömürün katı, oksijenin ise gaz halinde bulunmasından dolayı farklı fazlarda gerçekleştiği için heterojen reaksiyonlar olarak

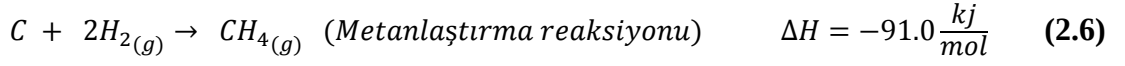
adlandırılmaktadır. Aşağıda oksidasyon bölgesinde gerçekleşen reaksiyonlar görülmektedir. Oksijen ve karbon reaksiyonu yanma reaksiyonu olduğu için ekzotermiktir ve bu reaksiyonlara ait 850 °C'deki reaksiyon ısıları reaksiyonlarla birlikte gösterilmiştir [42].



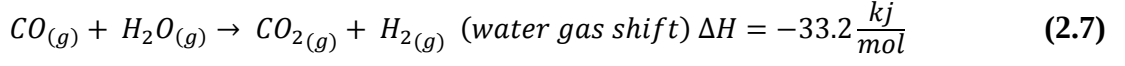
Oksijen, yanma reaksiyonlarında tükendiği için karbon ile oksijen reaksiyonu gazlaştırma kanalının ileriki bölgelerinde gerçekleşmez. Fakat kömürün kurutulması sonucu kömürden uzaklaştırılan nem yani buhar redüksiyon bölgesine doğru ilerleyerek (600 °C'den 900 °C'ye) oradaki sıcak karbonla reaksiyona girerek karbon monoksiti ve hidrojeni oluşturur. Bu reaksiyon karbon-buhar reaksiyonu olarak adlandırılır [28]. Reaksiyon sonucu oluşan hidrojen, önemli bir yakıt türüdür. Redüksiyon bölgesinde oluşan bir diğer reaksiyon Boudouard tepkimesidir. Oksidasyon sonucu oluşan karbondioksit sıcak kok ile karşılaştığında karbon monoksite indirgenir ve böylece redüksiyon bölgesindeki reaksiyonlar gerçekleşmiş olur. İndirgenme reaksiyonları endotermik reaksiyonlar oldukları için gerçekleşmeleri için ısıya ihtiyaç duyarlar. Bu ısı genellikle oksidasyon bölgesinde gerçekleşen ekzotermik reaksiyonların sonucunda oluşan ısıdan sağlandığı gibi bu ısının yetersiz olduğu durumlarda sisteme dışarıdan ısı verilebilir. Ayrıca gazlaştırma bölgesinde gaz fazında gerçekleşen homojen reaksiyonların oranları/hızları reaktanların sıcaklığı ve konsantrasyonu ile belirlenir [43]. Aşağıda, redüksiyon reaksiyonları, 850 °C'deki reaksiyon ısılarıyla birlikte görülmektedir.



Kömür hidrojenasyonunun ekzotermik reaksiyonu ise metan üretimine yol açar. Metanlaştırma reaksiyonu şu şekilde gösterilmektedir.



Gazlaştırma bölgesinin uzunluğu boyunca gaz fazında farklı homojen reaksiyonlar da oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda oluşan gazlaştırma tepkimesi bunlardan biridir.



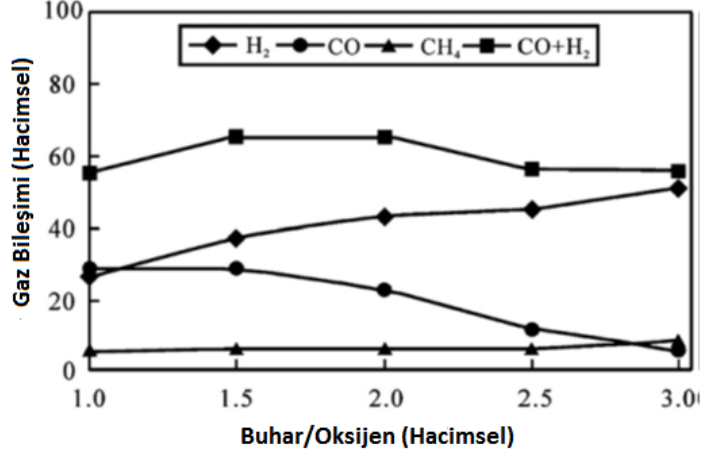
Görüldüğü gibi bu reaksiyonlar sonucunda elde etmesi amaçlanan sentez gazının dışında CO₂ ve CH₄ gazlarında oluşmaktadır. Oluşan gazların bileşimini etkileyen pek çok parametre bulunmaktadır. Gaz bileşimine etki eden faktörler bir sonraki bölümde incelenmiştir.

2.5 Proses Değişkenleri

Yer altı kömür gazlaştırılmasında elde edilen yanıcı gazın bileşimi ve ısı değeri yalnızca kömürün özelliklerinden ve kimyasal reaksiyonlardan etkilenmemektedir. Bunların dışında gazlaştırma ajanları, basınç ve sıcaklık etkisi, ısı kaybı, oyuk büyümesi ve kuyular arasındaki uzaklıktan da etkilenmektedir [44].

2.5.1 Gazlaştırma ajanları

Hava, buhar, buhar-oksijen gibi farklı ortamlar altındaki gazlaştırma sonucu oluşan ürün bileşimi ve ürünün ısı değeri farklılık göstermektedir. Örneğin gazlaştırma ajanı olarak hava kullanıldığında düşük ısı değerli yapay gaz elde edilir. Bunun nedeni ise havada bulunan azot gazının yapay gazı seyreltmesidir [45]. Diğer yandan buhar ya da buhar-oksijen bileşimleri kullanıldığında orta ısı değere sahip yapay gaz üretilir. Şekil 2.9'da buhar/oksijen oranının gaz bileşimine etkisi gösterilmiştir.



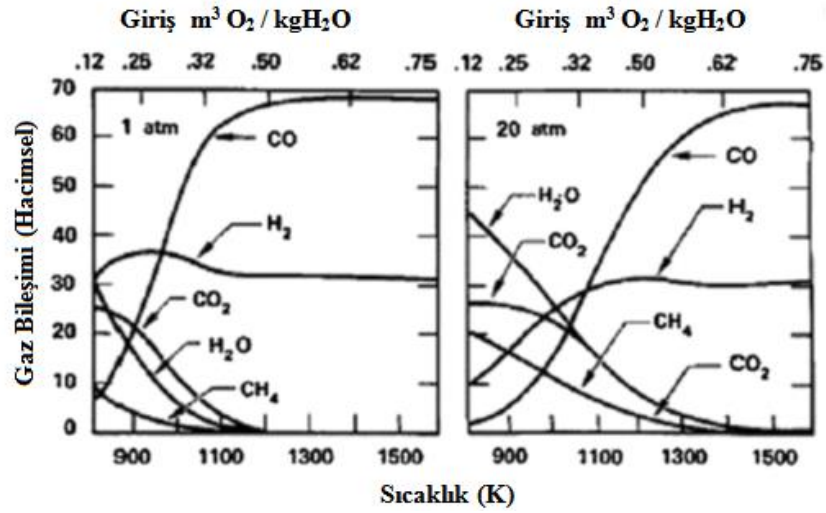
Şekil 2.9: Buhar/Oksijen oranının yapay gaz bileşimine etkisi (hacimsel olarak) [44].

Şekil 2.9’da görüldüğü gibi buhar/oksijen oranının artması H₂ miktarını artırırken, CO miktarını azaltmaktadır [44].

2.5.2 Sıcaklığın etkisi

Sıcaklık, yer altı kömür gazlaştırma proseslerinde sürekli ve sabit bir üretimde belirleyici bir faktördür. Sıcaklığın etkisi reaksiyonların endotermik ya da egzotermik olması açısından önemlidir. Örneğin heterojen su gazı tepkimesi ile boudouard tepkimelerinin endotermik oluşu; yüksek sıcaklıklarda dengedeki su buharı, CO₂ ve CH₄ miktarında azalmaya neden olur. Egzotermik bir reaksiyon olan hidrojenle gazlaştırmada ise sıcaklığın artışı metan oluşumunu azaltmaktadır [46].

Böylece sadece sıcaklık etkisi ele alındığında sıcaklığın düşmesi CO içeriği azalırken, CO₂, H₂O ve CH₄ içeriğini arttırdığı söylenebilir. Bu durum Şekil 2.10’da farklı basınç değerlerinde de gösterilmiştir [44].



Şekil 2.10: Sıcaklığın yapay gaz bileşimine etkisi [44].

2.5.3 Isı kayıpları

Bilindiği gibi kömür yatağından herhangi bir ısı kaybı olmadığı müddetçe en iyi kalitede gaz üretimi gerçekleşmekte ve yüksek gaz debisi elde edilmektedir. Kömür yatağındaki ısı kaybı miktarı YKG'nin simülasyonu için oldukça önemlidir [47]. Fakat yer altı kömür gazlaştırmasındaki ısı kaybının tahmini çok kolay değildir. Bunun nedeni en üst yüzeydeki zeminin yüzey çatlamasına maruz kalması durumunda, o bölgedeki zeminin oyuk sıcaklığına ulaşması için bir enerji sarfıyatı gerektirmesidir. Bunun önlenmesi için ise oyuğun tamamen kömür damarınının altında kalması istenmektedir. Bu durumda etraftaki tabakalara giden ısı kayıpları mümkün olduğu kadar azalacak ve ısı kayıpları ihmal edilebilecektir [44].

2.5.4 Basınç etkisi

Atmosferik basınçta elde edilen gazın kalorifik değeri gazlaştırma reaksiyonunun kinetik kısıtlamalarından dolayı oldukça düşüktür. Yüksek basınçta gerçekleşen gazlaştırma reaksiyonlarında ise ısı kaybı oluşmaktadır. Bu nedenle gazlaştırma sırasında optimum düşük basınçta çalışılması gaz sızıntısını minimuma indirmek için büyük önem taşımaktadır. Gaz kayıpları basıncın karesiyle arttığı bilinmektedir. Ayrıca Sovyetler Birliği'nde yapılan deneylerde 2.5 atm'den fazla basınçlarda çalışmadıkları da bilinmektedir [48,49,50].

Gazlaştırma reaksiyonlarında oluşan ürün gazlarının bileşimi açısından incelenecek olursa, basınç artışının yapay gaz bileşimindeki CH₄ içeriğini arttırdığı bilinmektedir.

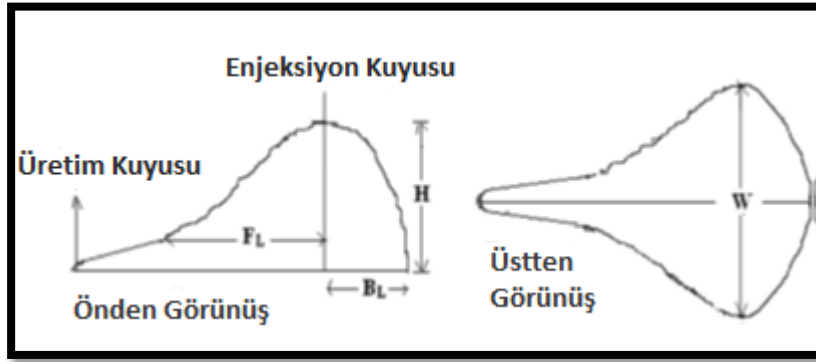
Özellikle Avrupa’da yapılan denemelerde çok yüksek basınçta çalışıldığı için ürün gazındaki metan içeriği yüksek çıkmıştır [26].

2.5.5 Oyuk büyümesi

YKG prosesinde reaksiyonun gerçekleştiği kısım oyuklardır. Oyuğun büyüme hızı ve şekli akış hızından(akış hızı arttıkça oyuk hacmi artar) işlem süresinden(işlem süresi arttıkça oyuk hacmi artar), iki kuyu arasındaki mesafeden(iki kuyu arasındaki uzaklık arttıkça oyuk hacmi azalır) etkilendiği gibi, reaktanların gaz akış modelini, kinetiğini ve sıcaklık profili gibi parametreleri etkiler [42,44]. Her hangi bir zamandaki oyuk boyutu kömür tüketim hızına bağlıdır ve oyuk şekli oyuk içindeki ideal olmayan akış modeline bağlıdır.

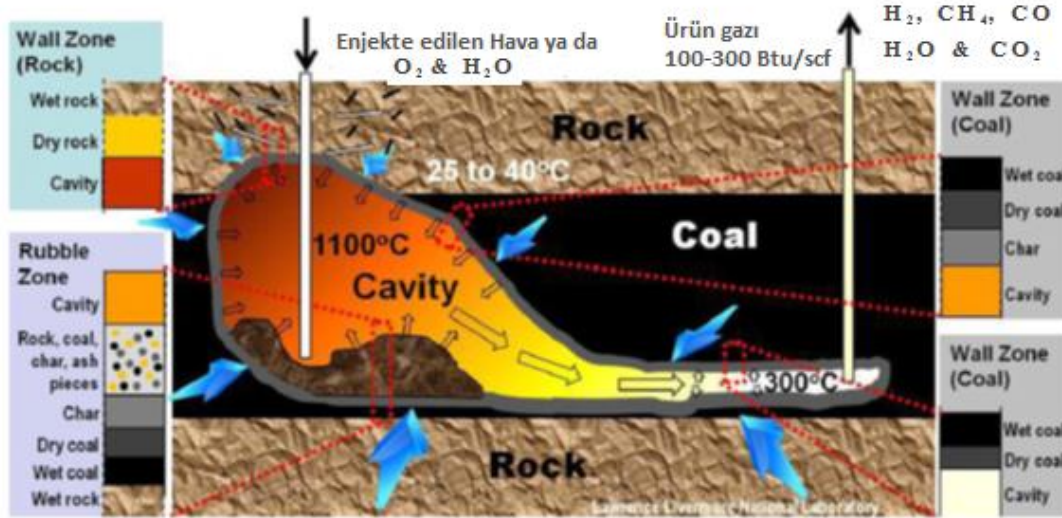
Şekil 2.11’de görüldüğü gibi enjeksiyon kuyusunun etrafındaki oyuğun şekli hemen hemen simetriktir. Oyuğun ön kısmındaki uzunluğu (enjeksiyon kuyusundan oyuğun son noktasına kadar ki kısım) enjeksiyon kuyusuna yakın olan kısma göre daha uzundur.

Oyuk hacmi kömür tüketimiyle birlikte giderek artar. Akış modeli düzensiz olduğunda oyuğun her üç yöndeki büyümesi düzensiz olmaktadır [44,51].



Şekil 2.11: Oyuğun ileri ve geri uzunluğuyla, yüksekliğini ve genişliğini gösteren şematik çizim [44].

Oyuğun her kısmında sıcaklık aynı değildir. Oyuğun tepesindeki sıcaklık 950-1000 °C arasında değişirken, oyuk tabanındaki sıcaklık 650-700 °C arasındadır [42,44]. Şekil 2.12’de bağlantılı düşey kuyular modülünün orta evreden son evreye geçiş basamağına(mid-to- late) kadar oyuğun sıcaklık değişimi gösterilmiştir [44].



Şekil 2.12: Oyuktaki sıcaklık konfigürasyonu [44].

2.6 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesi İçin Gerekli Jeolojik Koşullar

Kömürün yeraltında gazlaştırılmasında saha seçimi oldukça büyük bir önem taşımaktadır. Jeolojik etkenler, kömürün yer altında gazlaştırma işlemine başlanmadan önce incelenmeli sonrasında testlere başlanmalıdır. Jeolojik etkenler iki kısımda toplanmaktadır.

2.6.1 Kömürün özellikleri

Kömür özelliklerinin gazlaştırma üzerinde oldukça etkisi olduğu bilinmektedir. Bu özellikler kömürleşme derecesi (rank), uçucu madde, nem ve kükürt içeriği, kül miktarı, eser madde miktarı, reaktivite, çekme/şişme ve geçirgenlik olarak sayılabilir.

2.6.1.1 Kömürleşme derecesi

Kömürler öncelikle kalorifik değerleri olmak üzere, sabit karbon oranı, nem, uçucu madde ve kül içeriğine göre kömürleşme derecelerine (rank) ayrılmıştır. Genel bir sınıflandırma yapıldığında kömürler, Antrasit, Taşkömürü (Bitümlü Kömür), Alt Bitümlü Kömür ve Linyit olmak üzere 4 kısımda toplanmaktadır. Kömürleşme olayının ilk aşamasını temsil eden en düşük ranklı kömür linyit iken, kömürleşme olayının en son aşamasını temsil eden en yüksek ranklı kömür antrasittir [52].

Birçok bölgede alt bitümlü kömürler ve linyitler yüzey madenciliği ile sınırlandırılmıştır. 60 m'den daha derinde bulunan bu tarz kömürlerin çıkarılması ekonomik olmadığı için daha derindeki kömürlerden uzun yıllar

faydalanılamamaktaydı. YKG teknolojisinde ise bu sorun ortadan kalkacak ve daha derinlerde bulunan düşük kaliteli kömürlerden enerji üretimi sağlanabilecektir [53].

Yüksek ranklı kömürleri yeraltında gazlaştırmak düşük ranklı kömürlere göre çok daha zordur. Bunun iki önemli nedeni vardır. Bu unsurlar, reaktivite ve çekme/şişme'dir. Bitümlü kömürlerin hemen hepsi genellikle aglomerizasyona meğillidirler. Aglomera kömürler genellikle ısıtıldıklarında şişerler ve viskoz katran üretirler ki bu durum da gözenekli kanalların tıkanmasına neden olur. Yüksek ranklı kömürler daha az uçucu madde içerdiğinden daha zor tutuştukları ve reaksiyona girme eğilimleri daha az olduğu için daha az reaktiftirler [53].

2.6.1.2 Nem içeriği

Kömürde üç çeşit nem bulunmaktadır. Bunlar gözenek nemi, yüzey nemi ve molekül suyudur. Gözenek nemi bünye suyudur. Kömürleşme sırasında organik maddeden türeyen sudur. Kömüre fiziksel olarak bağlıdır. Yüzey suyu ise kömür yüzeyindeki boşlukları dolduran sudur. Son olarak molekül suyu ise kömüre kimyasal olarak bağlı olan sudur.

Kömür içerisindeki yüksek nem miktarı genellikle yüksek uçuculuk, yüksek reaktivite ve düşük rankla ilişkilendirilir ki bu özellikler YKG için aranan özelliklerdir [53]. Fakat nem oranının %40'ı geçmemesi beklenir. Çünkü nem oranı arttıkça gazın kalorifik değeri düşmektedir [54]. Bunların dışında kömür içerisindeki nem miktarı çok yüksek olduğunda, su endotermik gazlaştırma reaksiyonları için gerekli olan ısıyı kendi buharlaşması için kullanır. Bu durum da bu reaksiyonların gerçekleşmemesine yukarıda da belirtildiği gibi oluşması istenen karbon monoksitin oluşamamasına neden olur.

2.6.1.3 Uçucu madde içeriği

Kömürün oksijensiz ortamda ısıtılmasıyla, yanıcı ve yanıcı olmayan gazları içeren uçucu madde oluşmaktadır. Kömürleşme derecelerine göre kömür içerisindeki uçucu madde miktarı ve bileşimi değişmektedir. Kömürleşme derecesi arttıkça kömürdeki uçucu madde miktarının azaldığı bilinmektedir. Uçucu madde içeriği yüksek olan kömürlerin reaktivitesi yüksek olduğu için YKG açısından uygundur.

2.6.1.4 Kül yüzdesi

Kömür içerisinde %50'den fazla kül bulunması kömürün ısı değeri düşmesine neden olmaktadır. Bunun nedeni ısı enerjisinin büyük bir kısmının mineral maddelerden sağlanmasıdır. Ayrıca %60'tan yüksek külün mevcudiyeti YKG prosesini durdurulabilmektedir. Bu nedenle düşük kül içerikli kömürler tercih nedenidir [54].

2.6.1.5 Kükürt içeriği

Kömür içerisindeki kükürt organik, sülfütlere ait kükürt ve sülfatlara ait kükürt olmak üzere üç kökenli olabilmektedir. Kömürdeki organik kükürt, kömüre dönüşen bitkilerden kaynaklanmaktadır. Sülfütlere ve sülfatlara ait kükürt, kömürdeki mineral bileşenler arasında bulunan inorganik kükürttür. Kömürde sülfütlere ait en çok rastlanan kükürt pirit (FeS₂). Ayrıca piritte ait kükürt piridik kükürt olarak adlandırılmaktadır. Pirit dışında markasit (FeS₂), galen (PbS), sfalerit (Zn, Fe)S de bulunabilir. Sülfatlara ait kükürt örneği ise jipstir (CaSO₄.2H₂O) [52].

Sülfatlara ait kükürt miktarı önemsizken, organik kükürt ve sülfütlere ait kükürt, kömürdeki toplam kükürt miktarını önemli derecede etkiler. Ayrıca kömür içerisinde başka elementlerle bileşik oluşturmayan serbest halde kükürde rastlanılabilmektedir. Kömürdeki toplam kükürt

(ST) aşağıdaki formülle açıklanmaktadır.

$$ST = SO + SP \quad (2.8)$$

SO : Organik kükürt

SP : Piritte ait kükürt

SS : Sülfatlara ait kükürt

Kömür içerisindeki kükürt, çevre ve madencilik açısından oldukça önemlidir. Madencilik açısından bakıldığında, kömürde bulunan kükürt, kömürün kendiliğinden tutuşmasını kolaylaştırmaktadır. Bu şekilde kendiliğinden yanabilen kömürler kömür işletmeciliği açısından önemli sorunlar yaratmaktadır. Çevre açısından incelendiğinde ise, kömürler gazlaştırıldığında H₂S, yandığında ise SO₂ ve SO₃ gibi zararlı gazlar çevreye yayılmaktadır [3]. YKG açısından bakıldığında kömür içerisindeki kükürt büyük bir sorun teşkil etmektedir. Yüksek kükürt içerikli kömürlerin ısı değeri düşük olacağı gibi gazlaşma sonucu oluşan yapay gazdaki istenmeyen H₂S miktarı da yüksek olacaktır. Bu nedenle kömür içerisindeki kükürt içeriğinin düşük olması istenmektedir.

2.6.1.6 Eser madde içeriği

Kömürdeki eser madde elementlerinin (Ca, Mg, Al, Na, uranyum, germanyum) gazlaştırma reaksiyonunda kataliz etkisi gösterdiği bilinmektedir [53].

2.6.1.7 Reaktivite

Kömür reaktivitesi YKG için uygunluğu belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Kömürün kolayca tutuşabilmesi verimi oldukça etkiler. Düşük ranka sahip kömürler daha reaktif oldukları ve düşük sıcaklıklarda yüksek gazlaşma oranına sahip olduklarından YKG için daha uygundur [53].

2.6.1.8 Çekme/Şişme

YKG için kömür uygunluğunu belirleyen bir diğer parametre kömürün çekme/şişme davranımıdır. Çekme özelliği gösteren kömürler piroliz esnasında geçirgenliği arttırdığı için YKG’de tercih edilirler. Bunun tersine şişme özelliği gösteren kömürler gözenekleri doldurup geçirgenliği düşürdüğü için tercih edilmezler [53].

2.6.1.9 Geçirgenlik

Kömür damarındaki kömür porozitesi ve geçirgenliği, enjeksiyon ve üretim kuyuları arasındaki gaz akışını ve gazlaştırma kinetiğini etkilediği için proses akışında göz önüne alınması gereken önemli parametrelerden biridir. Daha porlu ve daha geçirgen yapı enjeksiyon ve üretim kuyuları arasında daha etkili bir bağlantı oluşturmakta ve oluşan ürün gazının taşınımının daha hızlı olmasını sağlamakta, böylece kömür gazlaşma oranının artmasına neden olmaktadır. Diğer bir yandan yüksek porozite ve geçirgenlik sisteme su girişinin ve ürün gaz kaçaklarının artmasına neden olmaktadır. Böylece su kirliliği riski artmaktadır. Bu nedenle araştırmacılar kömür geçirgenlik değerinin 50 ila 150 mD aralığında olmasını önermektedir [54].

Damar boyunca düşük basınçta yüksek akış hızını sürdürmek için kömür geçirgenliği çok önemlidir. Yüksek akış hızı gaz üretim oranını maximum yapar ve su sızmasının neden olduğu negatif etkileri iyileştirebilir. Düşük basınçlı operasyonlar gaz sızıntısını azaltır ayrıca yer altı sularının kirlenmesini minimuma indirir [55].

Geçirgenlik genellikle kömürleşme derecesiyle ilişkilidir ve geçirgenlik derinlik ve diğer iki yönde değişkenlik gösterir. Daha derinlerdeki kömürlerin yüksek basınçtan dolayı geçirgenliği daha düşüktür [53].

2.6.2 Kömür yatağının jeolojisi

2.6.2.1 Kömür tabakasının kalınlığı

Genellikle YKG prosesinde daha fazla kömürün gazlaşmasını sağladığı için kalın kömür damarları tercih edilmektedir. Ayrıca kalın kömür damarlarında ürün gazının ekstraksiyonu için daha az kuyu gerekmektedir. Fakat YKG prosesi için minimum kömür damar kalınlığıyla ilgili ortak bir görüş bulunmamaktadır. Ergo Exergy 0.5m kalınlıktaki kömür damarlarının YKG prosesinde kullanılabileceğini önerirken; Oliver ve Dana (1991) kömür kalınlığının 1,5m'den az olmaması gerektiğini savunmaktadır. Fakat 2m'den daha ince kömür damarlarında ürün gazının ısı değerinin azaldığı kanıtlanmıştır. Bunun nedeni oldukça fazla miktarda enerjinin kömürün etrafındaki kayalarla sızmasıdır [54].

Sharovic ve ark. (2009) ise damar kalınlığının 2-15m aralığında olması gerektiğini savunmaktadır [26]. Ayrıca kömür damarı boyunca kalınlık farkının %25'ten fazla olmaması gerektiğini önermektedir. Çünkü damar kalınlığındaki farklılıklar kuyuların delinmesinde sorunlar yaratabilmektedir [54].

2.6.2.2 Damar derinliği

Kömür derinliği YKG prosesini ilgilendiren önemli parametrelerden biridir. Genellikle daha derinlerdeki kömürler içme sularının kirlenme riskini, yüzey çökme sorununu ve gazlaşma prosesiyle havaya yayılan emisyon salınımını azaltmaktadır. Fakat şimdiye kadar YKG işletmelerinde farklı damar derinlikleri hedef alınmıştır. Eski Sovyetler Birliği'ndeki uygulamalarda ve Amerika'daki deneysel çalışmalarda derinlik, 30-350 m arasında değişkenlik gösterirken, Batı Avrupa'daki denemeler 600-1200m aralığındaki derinliklerde yürütülmüştür [54]. Burton ve ark. (2006) minimum damar derinliğinin 12m olması gerektiğini belirtirken, Oliver ve Dana (1991) optimum derinliğin 92m olması gerektiğini savunmuştur [9,54]. Bunun yanında sığ derinliğe sahip kömür yatakları yüzeydeki içme suyu kaynaklarına yakın olması nedeniyle YKG prosesinde tercih edilmemektedir. Ayrıca araştırmacılar kömür damarı ile kömür damarının üzerinde kalan aküfer arasındaki mesafenin damar yüksekliğinin 25 katı olmasını ve örtü tabakasız su katmanının kömür damarının 31m içerisinde olması gerektiğini önermektedir. Örtü tabakasız sulu katmanının kömür damarının 31m içerisinde olmasına dair verilen önerilere rağmen, su girişi gerek çevredeki aküferlerden, gerek doğrudan kömür damarına enjeksiyonu ile, gerekse kömür

içerisinde mevcut olan su ile gazlaştırma reaksiyonlarının sürdürülmesi için önem teşkil eder. Yüksek nem içerikli damarların kullanılmasıyla çevredeki su kaynaklarının kullanımı azalmaktadır [54].

Diğer bir açıdan ise çok derinde bulunan kömür yataklarının delinmesinde birçok problem açığa çıkmaktadır. 300m'den daha derinlerdeki kömürlerde delme maliyeti artmakta ve YKG prosesinin kontrolü zorlaşmaktadır. Ayrıca daha derinlerde basıncın artmasıyla gaz bileşiminde değişiklikler meydana gelmektedir. Daha derinlerdeki kömür damarlarından elde edilen gaz bileşiminin, elektrik üretimi için gaz türbinlerinde kullanılmasında gazın verimsiz olacağı ispatlanabilir. Ek olarak 460m'den daha derindeki kömür damarlarında YKG teknolojisinin uygulanması istenmemektedir. Bunun nedeni gaz akışını kısıtlayan yüksek litostatik basıncının oluşmasıdır [54].

Sığ kömürlerde gerçekleştirilen YKG proseslerinde karşılaşılan içme sularının ve yeraltı sularının kirliliğinin dışında bir diğer problem çökme sorunudur. Burton ve ark.(2006) çökme riskinin azaltılması için damar derinliğinin 200m'den fazla olması gerektiğini önermektedir [9].

Diğer yandan damar üzerindeki yapının sağlam olması örtü tabakasının ve yüzey sularının desteklenmesi için gereklidir. Fakat araştırmacılar çökme sorununun önlenmesi için damar üzerindeki sağlam kayacın 15m'den az olmaması gerektiğini tavsiye etmektedir. Ayrıca damar etrafında oldukça düşük gözenekli yapıya sahip kayaçların bulunması ürün gaz kaçaklarını önlemekte ve yeraltı sularının damara girişini önlemektedir [54].

2.6.2.3 Kömür damarının eğimi

Sury ve ark. (2004) YKG prosesinde düşük açılı kömür damarlarının tercih edilmesi gerektiğini belirtmektedir. En çok önerilen eğim açısı 0-20 derecedir [10]. Fakat YKG'nin çok eğimli damarlarda bile başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği bilinmektedir. Ergo Exergy damar eğim aralığını 0-70 derece olarak belirlemiştir. Fakat kömür damarındaki eğimin artmasıyla delme sırasında kullanılan ekipman ve malzemelerin hasar potansiyeli artmaktadır. Yinede düşük eğimli damarların kül ve suyu oksidasyon bölgesinden uzaklaştırılmasını sağladığından YKG için tercih edilmektedir [54].

2.6.2.4 Yapıdaki şistler

Kömür damarı içerisindeki kömürü lokal olarak çoklu tabakalara ayıran şistler; kil, kireçtaşı, kum taşı ve diğer kayaçların tabakasıdır. Şistlerin, ateşleme noktası, enjeksiyon veya ürün kuyusunun yakınında olması işletme problemlerine yol açabilir. Bu nedenle araştırmacılar tek bir şist kalınlığının 1m'den ince olması gerektiğini vurgulamaktadır. Bir metreden kalın şist, yapay gazın ısı değerinin düşmesine neden olur ve hatta gazlaştırma işlemini durdurabilir. Ayrıca şistin kömür damarının hacimsel olarak %20'sinden fazla kısmını oluşturması, yine gaz kalitesinin düşmesine ve YKG prosesinin ekonomik olarak uygun olmamasına neden olmaktadır [54].

2.6.2.5 Yer altı suyu

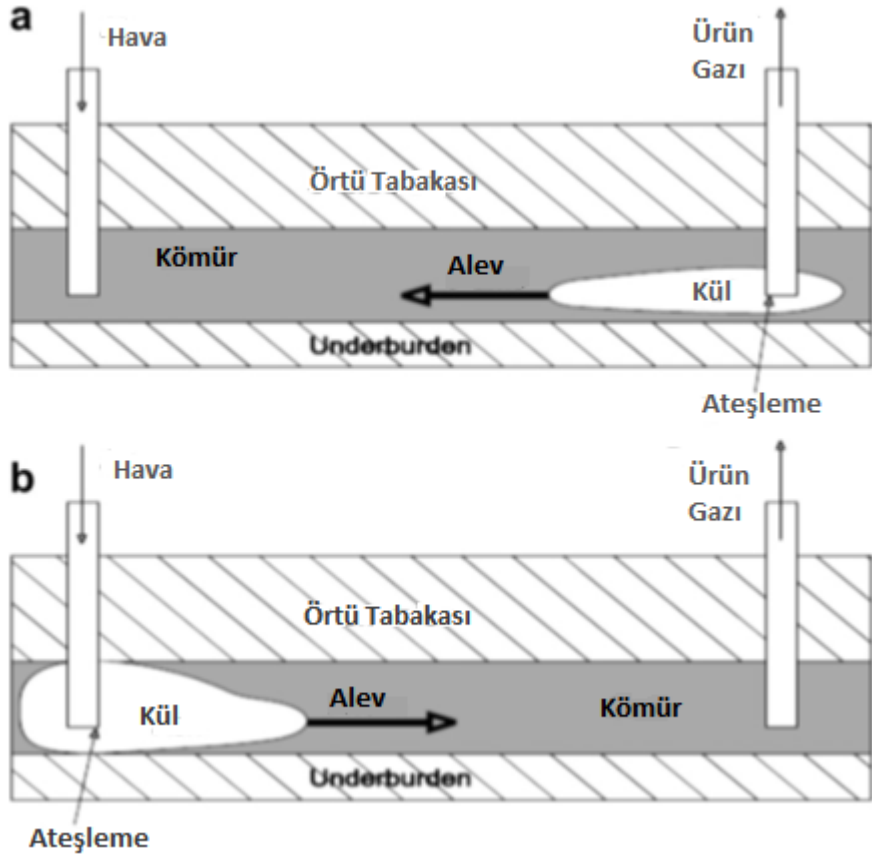
Kömür damarlarındaki ve etrafındaki sular çevre kirliliğini ve gazlaştırma reaksiyonunu oldukça etkilemektedir. Bu nedenle oldukça iyi bir araştırma yapılmalıdır [56].

2.7 Kuyular Arası Bağlantı Yöntemleri

Başarılı bir YKG tekniğindeki en kritik adım muhtemelen kömür damarlarının geçirgenliğinin artırılmasıdır. Bu adım bağlantı kurma (Linking) olarak adlandırılır ve genel olarak dört bağlantı tekniği bulunmaktadır. Bunlar yönlü delme, hidrolik parçalama, elektriksel bağlantı ve geri yanmadır [14,33,49]. Bu dört teknikten üzerinde en fazla çalışma yapılan ve üzerinde durulması gereken teknik geri yanmadır. Geri yanma, Eski Sovyetler Birliğinden itibaren bir çok ticari çalışmada ve pilot tesiste kullanılmıştır. İlk defa Podmoskovnaya tesisinde kullanılan geri yanma tekniği Sovyetler Birliği'nde; Yuzhno-Abinsk (Sibirya), Shatskaya, Podmoskovnaya (Moskova Bölgesi), Lisichansk (Ukrayna) ve Angren'de (Özbekistan), Sovyetler Birliğinin dışında; Hanna ve Hoe Creek'te (Amerika), Chinchilla (Avustralya) ve Majuba'da (Güney Afrika) kullanılmıştır [4,5,37,57,58,59]

Geri yanma tekniği, ileri yanma prosesinden önce kanalın geçirgenliğini arttırmak için ürün kuyusundan gönderilen yakıcı ile kömürün tutuşturulup alevin enjeksiyon kuyusuna doğru ilerlemesidir. Bu şekilde alevin ilerlediği alanda poroz bir kanal oluşur ve ileri yanma için gerekli geçirgenlik sağlanmış olur. Geri yanma da yanma öne havanın akış hızına ters yönde ilerler. Geri yanmanın en büyük dezavantajı alevin

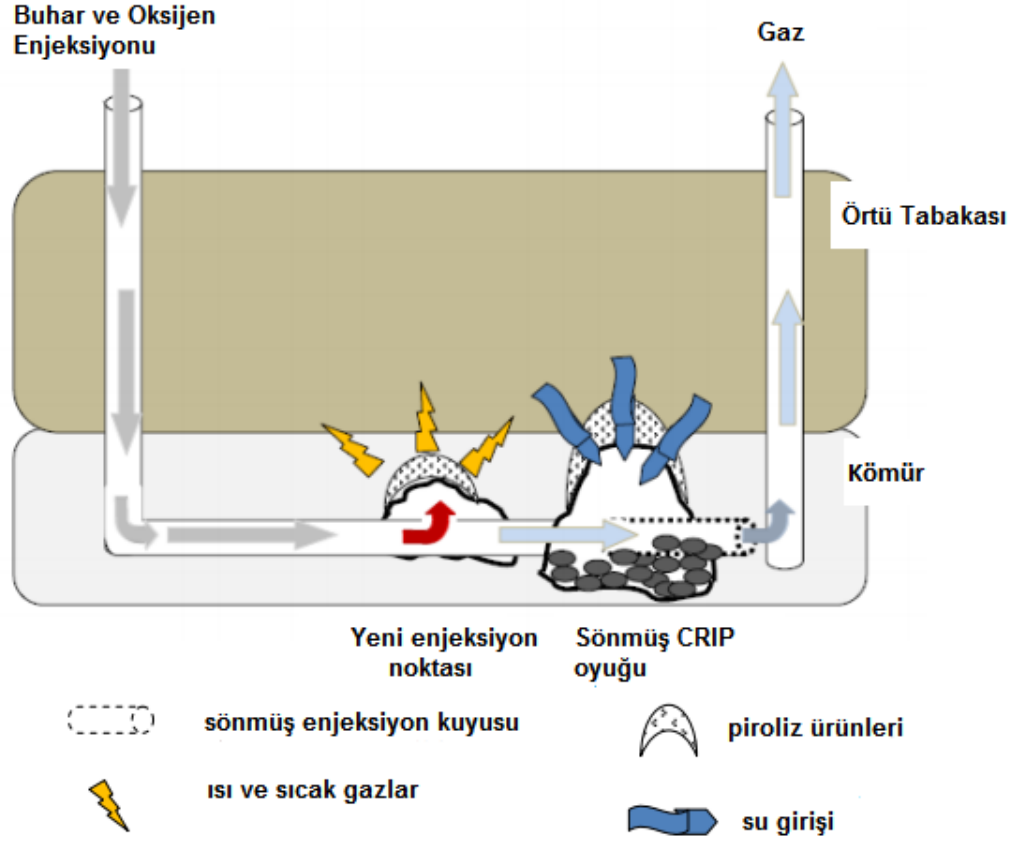
enjeksiyon kuyusuna doğru değil de farklı yönlerde ilerleyebilmesidir. Şekil 2.13'te geri ve ileri yanma tekniğinin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.13: YKG'deli ileri ve geri yanma tekniklerinin şematik görünümü. (a) Geri yanma (b) İleri yanma [44].

Yıllar içinde bağlantılı düşey kuyular (Linked Vertical Wells , LVW) ve kontrollü olarak hareket ettirilen ateşleme noktası prosesi (controlled-retraction injection point, CRIP) olmak üzere iki temel yöntem geliştirilmiştir. LVW ileri ve geri yanma tekniklerinin birlikte kullanıldığı bir yöntemdir. Saha denemelerinde örtü tabakasından ısı kayıpları meydana geldiği için ürün gazının kalitesinin azaldığı görülmektedir [60].

LVW tekniğine alternatif olarak CRIP tekniği Lawrence Livermore Laboratory araştırmacıları tarafından 1970'lerde geliştirilmiştir. CRIP yöntemi tek bir yatay ve düşey sondajdan oluşmaktadır. Şekil 2.14'te de görüldüğü gibi gazlaştırma, ürün kuyusunun yakınında başlar ve oluşan oyuk belli bir büyüklüğe geldikten sonra o bölge tükenir, daha sonra enjeksiyon noktası kontrollü bir şekilde geri doğru hareket ettirilerek enjeksiyon kuyusunun daha yakınında yeni bir oyuk oluşturulur. Bu işlem bütün kömür damarı sönene kadar devam eder [60].



Şekil 2.14: CRIP tekniğinin şematik gösterimi [61].

CRIP sisteminin diğer tekniklere göre bir çok üstünlüğü bulunmaktadır. Enjeksiyon noktasının damar içinde hareket edebilir olması bunların başında gelmektedir. Bu sayede tek bir enjeksiyon borusu ile geniş hacimli kömürlerde gazlaştırma işlemi yapılabilir. Enjeksiyon noktası istenilen yöne doğrusal yanma ya da gaz brülörünün kullanımı ile hareket edebilir. Diğer bir üstünlüğü, CRIP metodu yüksek basınç altında olmaya eğilimli olan ve geçirgenliği az olan, derinde bulunan (>300m) kömürlerin gazlaştırılmasında uygulanabilmektedir. Çünkü bu yöntem doğal geçirgenliğe sahip kömürler için uygundur. Örneğin CRIP yöntemi sayesinde Swan Hills projesindeki 1400 m derinlikteki kömürler başarıyla gazlaştırılmıştır. Oyuğun genişlemesi (maturasyonu) üretilen yapay gaz kalitesini düşürmektedir. CRIP yönteminin kullanılmasıyla bu sorun büyük ölçüde giderilmiştir. Çünkü enjeksiyon noktasının kontrol edilebilir olması her zaman taze kömürlere ulaşmayı mümkün kılacak böylece yeni oyuklar oluşacak ve kömürün yanmayan kısımları tepkimeye girecektir.

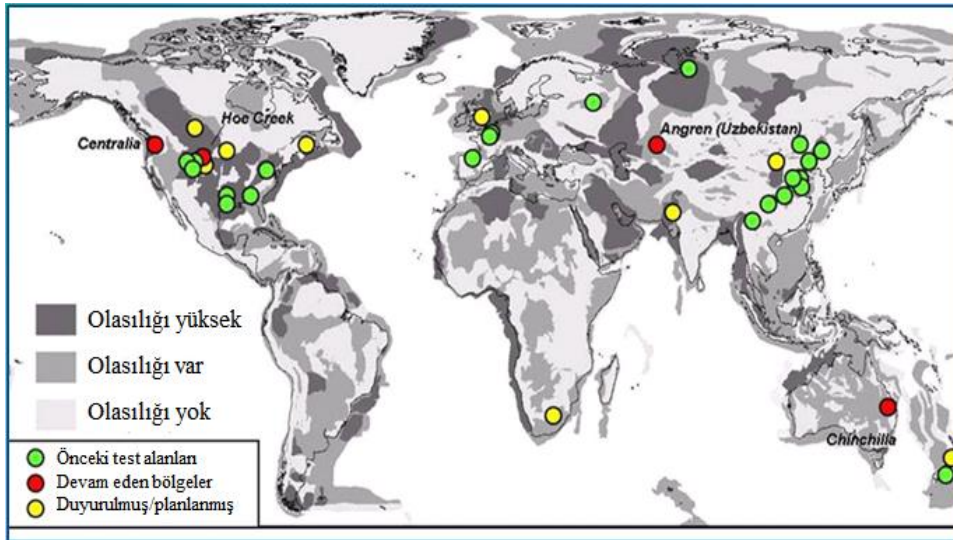
Gazlaştırma işlemi boyunca yanma bölgesi düşey yönde büyürken akış yönü ise bunun tersine bir şekilde yatay yönde ilerlemektedir. Enjeksiyon doğrusunu keserek ya da delerek üst kısımda yeni bir yer meydana gelir. CRIP tekniği daha az ısı kaybından dolayı daha kaliteli gaz üretir ayrıca YKG prosesinin toplam verimini artırır.

CRIP tekniği reaksiyon kanalı boyunca enjeksiyon noktasının kontrollü hareketi ile gözlenen yararlı etkilerine rağmen bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlar:

- Çatlak örtü katmanını üzerinden üretim kuyusuna doğru hareket eden gazın hidrolik direncinin artması
- Çatlak örtü tabakaları boyunca enjeksiyon noktası hareket ettikçe çevredeki kayalara verilen ısı kaybı sonucunda termal emisyon artışı
- Enjeksiyon noktasının etrafındaki gaz ürünün ulaşabildiği alanın 20-25 m'yi geçememesidir [31].

2.8 Saha Testleri ve Ticari Ölçekli Uygulamaları

Dünya genelinde yer altı kömür gazlaştırması yapan 50'den fazla pilot tesisi bulunmaktadır ve bunların 30'undan fazlası Amerika'dadır. Şekil 2.15'te dünya genelinde gerçekleştirilmiş, devam eden ya da gelecekte yapılması planlanan YKG çalışmaları görülmektedir [2,45].



Şekil 2.15: Dünya çapındaki UCG testlerinin dağılımını ve jeolojik karbon depolanması için potansiyeli gösteren harita [9].

Dünya'da gerçekleştirilen önemli pilot ölçek ve ticari ölçek YKG çalışmalarının özetleri ise Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Dünya'daki önemli YKG işletmelerinin özeti [62].

Ülke	Bölge	Yıl	Kömür Türü	Teknik	Enjeksiyon Gazı	Damar Derinliği(m)	Damar Kalınlığı(m)	Gazın Isıl Değeri (MJ/m ³)
Eski Sovyetler Birliği	<u>Lisichansk</u>	1935	Bit.	SDB	Hava	400	1	3.8
	<u>Podmoskovna</u>	1947	L	LVW	Hava	55	3	3.4
	<u>Yuzno-Abinskaja</u>	1955	Bit.	SDB	Hava	100	3	4.1
	<u>Angeskaja</u>	1961	L	LVW	Hava	150	9	3.4
ABD	<u>Hanna I</u>	1973	HVC	LVW	Hava	120	9	4.2
	<u>Hanna II</u>	1975	HVC	LVW	Hava	85	9	5.3
	<u>Hanna III</u>	1977	HVC	LVW	Hava	85	9	4.1
	<u>Hoe Creek I</u>	1976	HVC	LVW	Hava	40	8	3.6
	<u>Hoe Creek IIA</u>	1977	HVC	LVW	Hava	40	8	3.4
	<u>Hoe Creek IIB</u>	1977	HVC	LVW	O ₂ /H ₂ O	40	8	9.0
	<u>Hoe Creek IIIA</u>	1979	HVC	LVW	Hava	40	8	3.9
	<u>Hoe Creek IIIB</u>	1979	HVC	LVW	O ₂ /H ₂ O	40	8	6.9
	<u>Pricetown I</u>	1979	Bit.	LVW	Hava	270	2	6.1
	<u>Rawlins IA</u>	1979	SB	SDB	Hava	105	18	5.6
	<u>Rawlins IB</u>	1979	SB	SDB	O ₂ /H ₂ O	105	18	8.1
	<u>Centralia A</u>	1984	SBC	CRIP	O ₂ /H ₂ O	75	6	9.7
	<u>Centralia B</u>	1984	SBC	LVW	O ₂ /H ₂ O	75	6	8.4
	<u>Rocky Mountain IA</u>	1987	SB	CRIP	O ₂ /H ₂ O	110	7	9.5
	<u>Rocky Mountain IB</u>	1987	SB	LVW	O ₂ /H ₂ O	110	7	8.8
BM	<u>Newman-Spivey PS</u>	1949	SB	BH	Hava	75	1	1.4
Belçika	<u>Thulin</u>	1986	A	LVW	Hava	860	6	7.0
İspanya	<u>El Tremedal</u>	1997	SB	CRIP	O ₂ /H ₂ O	580	2	10.9
Avusturya	<u>Chinchilla</u>	2000	SB	LVW	Hava	140	10	6.6

Kömür Türü: L-linyit, SB-altbitümlü, SBC-altbitümlü C, Bit.-bitümlü, HVC-yüksek uçuculu bitümlü C, A-antrasit. **Teknik:** LVW-bağlantılı düşey kuyular, CRIP-kontrollü olarak hareket ettirilen ateşleme noktası prosesi, SDB-eğimli kömür yataklarının gazlaştırılması, BH- kuyu yöntemi.

Dünya üzerinde YKG ile ilgilenen ülkelerin önemli çalışmaları ve bu çalışmaları yürüten şirketlerinden aşağıda bahsedilmektedir.

2.8.1 Eski Sovyetler Birliği'ndeki uygulamalar

Eski Sovyetler Birliğinden kalan tek ticari tesis olan Yerostigaz, Angren'dedir. 1961 yılından beri faaliyette olan Yerostigazda YKG ile üretilen sentez gazı elektrik üretimi için kullanılmaktadır (Şekil 2.16). Angren'deki tesiste gazlaştırmak için 110-250 m derinliğinde 4-24 m kalınlığında, %11 kül ve %30 su içerikli linyit kullanılmıştır. 1961 yılında tekrardan başlatılan tesiste üretilen gaz ile 100 MW gücündeki termik santralden elektrik üretilmektedir. Projelerin çoğunda ince ve düşük kaliteli damarlardan düşük kaliteli yapay gaz üretilmiştir. Testlerdeki veriler hakkında bilgiler sınırlıdır fakat oksijen ve hava oranlarıyla havanın önceden ısıtıldığı bilinmektedir [63].



Şekil 2.16: Yerostigaz tesisinin görünümü [63].

2.8.2 Amerika Birleşik Devletleri'ndeki uygulamalar

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/m^3 ısı değerli gaz ürün elde edilmiştir. Hanna I 1973'den 1974'e kadar sürmüş ve 5.0 MJ/m^3 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 6.0MJ/m^3 ısı değerli gaz elde edilmiştir. Faz II ve Faz III üç ay sürmüştür. Faz II'de 6.7MJ/m^3 'lük, Faz III'de ise 5.4MJ/m^3 'lük gaz elde edilmiştir. Hanna III testi bir ay sürmüştür. Gazın ısı değeri 5.4MJ/m^3 'tür [4,5,64,65,66].

Yine 1970'lerde Hoe Creek'te 3 deneme yapılmıştır [21,22,23]. 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 (Explosive fracturing), tekniği kullanılarak 3.80MJ/m^3 ısı değerli gaz ürün elde edilmiştir. Hoe Creek II için ise geri yanma tekniği kullanılarak 4.03MJ/m^3 ısı değerlikli gaz üretilmiştir. Hoe Creek III testinde ise yatay sondaj ile geri yanma tekniği birlikte kullanılarak 8.09MJ/m^3 ısı değerlikli gaz ürün elde edilmiştir. Yapılan testler, önemli derecede yer altı sularının kirliliğine yol açmıştır [59,67].

1972-1989 yılları arasında Wyoming, Texas ve Washington'da çok sayıda deney yürütülmüştür [6,68,69,70]

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 varyasyonların yapay gaz kalitesine etkileri gözlemlenmiştir. Bu varyasyonların gaz kalitesini çok fazla değiştirmedeği görülmüştür. Bu deneme CRIP sisteminin ilk gerçek testidir ayrıca oyuk büyümesi de test edilmiştir. Oyukların şekil ve boyut modelleri üzerine çalışılmıştır [6,9].

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 destekleyici (sponsor) eksikliğinden dolayı ticari boyutlu çalışma planı iptal edilmiştir [63,71].

1980'lerin sonunda petrol fiyatlarının düşmesi ile Amerika'da YKG'ye olan ilgi azalmış ve çalışmalar durdurulmuştur. Fakat 2000'li yıllardan itibaren petrol fiyatlarının ve enerji ihtiyacının artması ABD'de YKG'yi tekrar gündeme getirmiştir.

Alaska's COOK Inlet Region Inc. Amerika'da 100MW kapasitesindeki YKG-Kombine Isı Güç Sistemleri(CHP) çevrim tesisinin inşasını sağlamıştır. 60m kalınlığındaki ve 200-300 m derinliğindeki kömür tabakalarının gazlaştırılmasını

planlamaktadır. Proje LLNL, Ergo Exergy ve US Department of Natural Resources ortaklığıyla başlatılmıştır.

American Energie Future 1979'dan 1995'e kadar YKG projelerinin geliştirildiği Wyoming'de geniş bir keşif sahası elde etmiştir. Şirket YKG gazlarından günde 8 milyon litre sıvı yakıt sentezi yapmayı planlamaktadır.

2.8.3 Avrupa Birliği'ndeki uygulamalar

Fransa'da ilk denemeler 1980-1981 yılları arasında Bruay ve Artois'te yürütülmüştür. (Damar derinliği:1170 m, damar kalınlığı:1.2 m'dir.) Enjeksiyon ve üretim kuyuları arasındaki uzaklık 65 m'dir. Kuyular arasındaki bağlantıyı kurmak için kullanılan suyla parçalama tekniği bu bağlantıyı sağlayacak yeterlilikte olmamıştır (basınç:50.7 MPa). Aynı şekilde geri yanma tekniği de enjeksiyon kuyusunun yakınındaki kömür kendiliğinden tutuştuğu için başarılı olmamıştır. Deneylerin başarısız olmasındaki temel neden kömürün kendi kendini ateşlemesi ve geri yanmadaki yüksek basınç için gerekli olan hidrolik bağlantının yetersiz olmasıdır. İkinci denemeler 1983'te La Haute Deule'de yürütülmüştür.(damar kalınlığı:1.8 m, damar derinliği:880m.) 60 metre aralıklar ile düşey iki kuyu delinmiştir. Suyla parçalama ve geri yakma teknikleri kullanılmış fakat denemeler tekrar başarısızlıkla sonuçlanmıştır.

Belçika- Almanya ortak proje çalışmasında YKG denemeleri Belçika Thulin yakınlarında yürütülmüştür. 1982'de dört kuyu delinmiş ve kuyular arasında geri yakma tekniğiyle bağlantılar kurulmaya çalışılmış fakat başarısız olunmuştur. 1984 yılında yapılan yeni girişimler de başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Sonraki girişimler, farklı bileşenlerde küçük bir gaz üretimiyle sonuçlanmıştır. Fakat kuyular arasındaki hidrolik rezistans çok yüksek kalmış bu durumda kuyular arasında düzgün bir bağlantı kurulamadığını göstermektedir.

1990'larda Avrupa Birliği YKG prosesi İspanya, Birleşik Krallık ve Belçika tarafından jeolojik uygunluğu ve kömür yatağının derinliğinden(550m) dolayı seçilen İspanya'da yürütülmüştür. 500 m'den daha derinlerde gazlaştırma işlemi için geliştirilen yönlü delme tekniği uygulanmıştır. Üç girişimde bulunulmuştur. İlki 9 gün sürmüş ve CO içeriği CO₂ içeriğine göre çok düşük olan bir gaz elde edilmiştir. İkinci girişim ise üç gün sürmüş burada elde edilen CO bileşimi CO₂ içeriğine göre yine çok düşük olmasına rağmen sonuçlar ilkine kıyasla daha iyi çıkmıştır. Üçüncü girişim boyunca

teknik aksaklıklardan dolayı bazı patlamalar gerçekleşmiş ve bu olay enjeksiyon kuyusuna zarar verdiği için denemeler sonlanmıştır.

1990'larda yapılan deneylerin dışında ayrıca ince kömür damarları için oyuk büyümesinin sayısal modellemeleri Belçika ve Hollanda'da geliştirilmiştir.

Birleşik Krallıkta Department of Trade and Industry Technology (DTI) YKG'yi kendi geniş kömür rezervlerini geliştirmek için gelecekteki potansiyel teknolojilerden biri olarak tanımlanmıştır. 2000 yılında DTI, The Coal Authority ile birlikte ön fizibilite çalışmalarını tamamlamışlardır. Sonrasında YKG için uygun saha seçimine başlanmış, detaylı çalışmalardan sonra kıyıya yakın bir alanda çalışmaya karar vermişlerdir [25].

Son zamanlarda Polonya ve birkaç Avrupa Birliği üyesi ülke tarafından Hydrogen Oriented Underground Coal Gasification (HUGE) projesi yürütülmektedir [72].

2.8.4 Kanada'daki uygulamalar

Kanada'daki Ergo Exergy şirketi YKG'yi geliştiren küçük fakat aktif bir şirkettir. Özbekistandaki Angren YKG tesisinde çalışmıştır. Avustralya'daki denemeleri tamamlamış ve Güney Afrika'daki YKG tesisinde çalışmıştır. Ergo Exergy kendilerine ait olan ϵ YKG teknolojisini kullanmaktadır. Birçok üniversite ve şirketle işbirliği yapmakta aynı zamanda bu kurum ve kuruluşlara destek vermektedir [73].

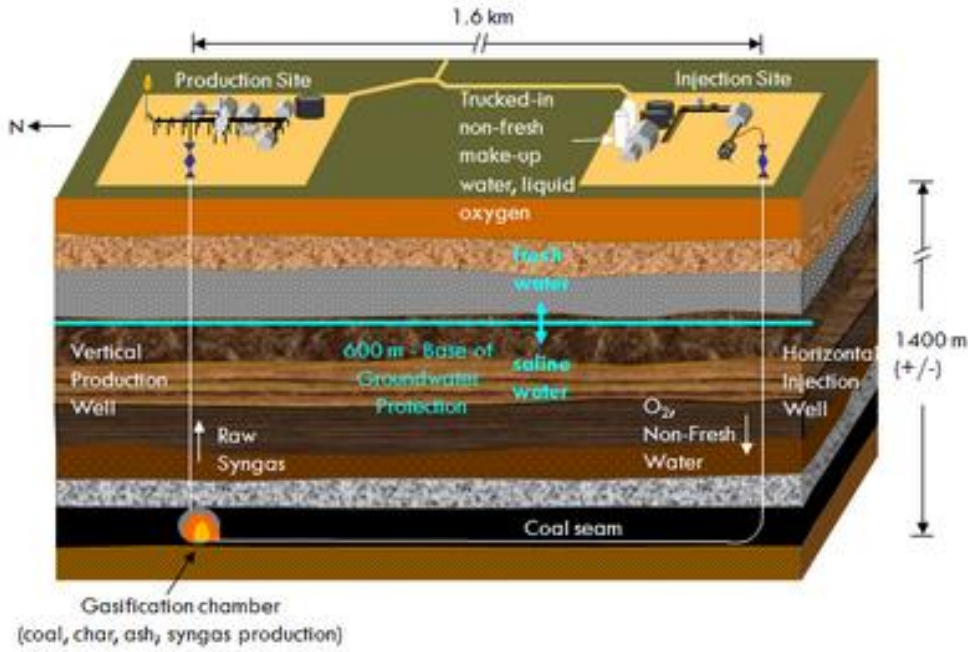
Ergo Exergy'nin direktörü Michael Blinderma Queensland Üniversitesinin araştırmacılarıyla YKG prosesinin modellenmesi için ortak çalışmalar yapmışlardır. Son zamanlarda geri yakma ve ileri yakma ile ilgili yeni modeller geliştirmişlerdir[26].

Kanada'da YKG teknoloji lisansına sahip olan bir diğer şirket Laurous Energy'dir. Alaska, Alberta ve Wyoming'te projeleri bulunmaktadır. Alberta'da yerel endüstriyel şirketler için hidrojen ve yakıt desteği yapan ticari bir proje geliştirmektedir [74].

Kanada'da (Alberta) gerçekleştirilen en önemli proje Swan Hills projesidir. Proje, hükümet tarafından desteklenmiştir. CCS ile teçhizatlandırılmış tesisten 300 MW'lık bir elektrik üretiminin gerçekleştirilmesi planlanmıştır. 2008 yılında başlayan deneme çalışmalarında 1400m 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

faliyete geçmesi planlanmaktadır. Şekil 2.17’de Swan Hills Synfuel deneme çalışmasının görünümü verilmiştir [75,76].

Prosesi işletebilmek için cavity basıncının, rezervuar basıncından daha düşük olması gerektiği, ayrıca basıncın 0’dan 4 MPa’a kadar olması sağlanmıştır. Sabit bir şekilde çalışabilmek için oksijen enjeksiyon oranı günde 3-30 ton aralığında tutulmuş ve su/oksijen kütle oranı da 2-3/1 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.17: Swan Hills Synfuels YKG projesinin görünümü [75].

2.8.5 Avustralya’daki uygulamalar

Günümüzdeki ticari YKG çalışmaları Avustralya’daki 3 şirket olan Cougar Energy, Linc Energy ve Carbon Energy tarafından geliştirilmektedir [77,78]

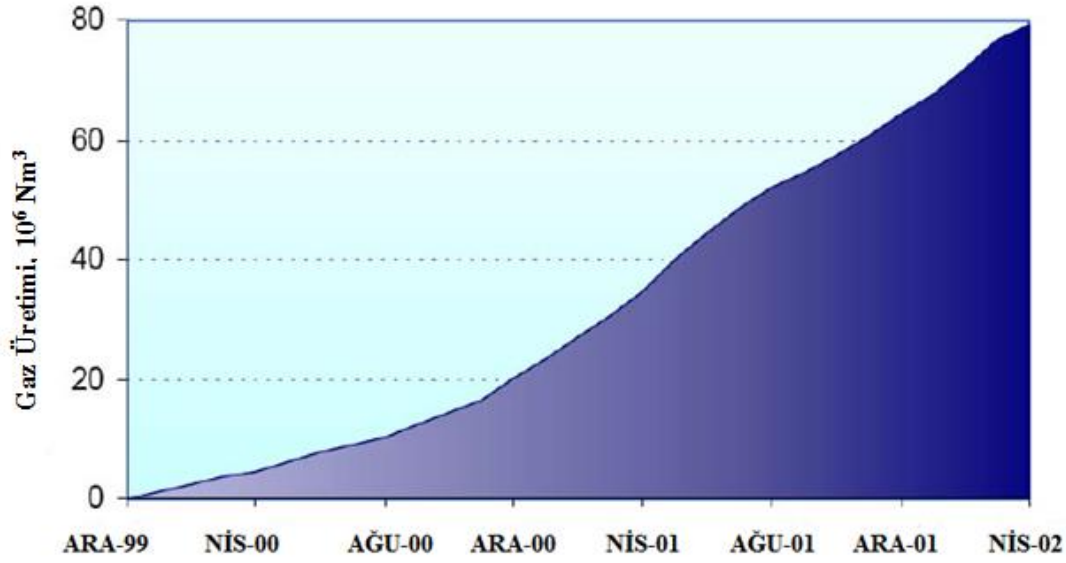
Cougar Energy’nin yönetim müdürü Dr. Len Walker 1982’den beri YKG’yi yakından takip etmektedir. 1996’da Ergo Exergy’den Dr. Michael Blinderman ile ortaklık kurmuş ve birlikte Chinchilla’da ki YKG denemelerini başlatmışlardır. Cougar Energy Ergo Exergy’nin YKG teknolojisini yakın zamanlardaki projelerde kullanmayı planlamaktadır. Cougar Energy Queensland’de bulunan Kingaroy şantiyesinde kaynak belirlemesi tamamlamış ve 400MW’lık kombine çevrim güç santrali projesi için şantiye karakterizyonunu üstlenmiştir. Victoria’da, Cougar Energy’nin planı; YKG uygulamalarında uygun olabilecek kayda değer yerleştirilmiş (ya da yerleşik) Victoria linyit birikintisinin (ya da çökeltisinin) var olup olmadığını belirlemektir[27].

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 enjeksiyon/ürün kuyusu ve 19 izleme kuyusu içermektedir. Şekil 2.18'de Chinchilla yer altı gazlaştırma tesisinin görünümü verilmiştir.



Şekil 2.18: Chinchilla'daki YKG tesisinin görünümü [27].

İlk kez Aralık 1999'da gaz üretimi başlamıştır. Sonrasında tesis gaz üretimini sürekli hale getirmiş max. kapasitesini $80.000\text{Nm}^3/\text{h}$ 'a çıkarmıştır (Bu rakam günde 675 ton kömürün gazlaştırıldığı anlamına gelmektedir). Şekil 2.19'da YKG süresince üretilen gaz miktarı gösterilmektedir [8]. 30 aylık süreçte kömür yatağının %95'i, toplam enerjinin %75 dönüşümü ile 35000 ton kömür gazlaştırılmıştır. Gazlaşma sonunda 300°C ve 10 bar basınçta düşük ısı değeri (4.5-5.7 MJ/m³) $80 \times 10^6 \text{ Nm}^3$ gaz ürün üretilmiştir [27].



Şekil 2.19: Chinchilla testi süresince gaz üretiminin dağılımı [27].

Batı dünyasındaki en uzun proje olan Chinchilla projesi başlangıçtan bitimine kadar başarılı bir çevre performansı sergilediğini fizibilite çalışmalarıyla ispatlamıştır. Her hangi bir yer altı suyu kirliliği ya da çevre sorunu bulunmamaktadır. Ayrıca proses sabit kalite ve miktarda gaz sağladığından yüksek verim ve tutarlılık göstermiştir. Üretilen yapay gaz ürün maliyeti Avustralya pazarındaki termal kömür maliyeti ile kıyaslandığında oldukça düşüktür. 2006'nın sonunda Linc Energy ve Ergo Exergy'nin ortaklığıyla proje sonlandırılmıştır [26,27].

Aralık 2006'da, Linc Energy Moskova'da ki Skochinsky Institutu of Mining ile ortaklık sözleşmesi imzalamıştır. Ekim 2007'de Linc Energy Özbekistan'daki Angren YKG sahasına sahip olan Yerostigaz'da (1964'den beri devamlı faaliyette olan) %73 oranında hisseye sahip olmuştur [79].

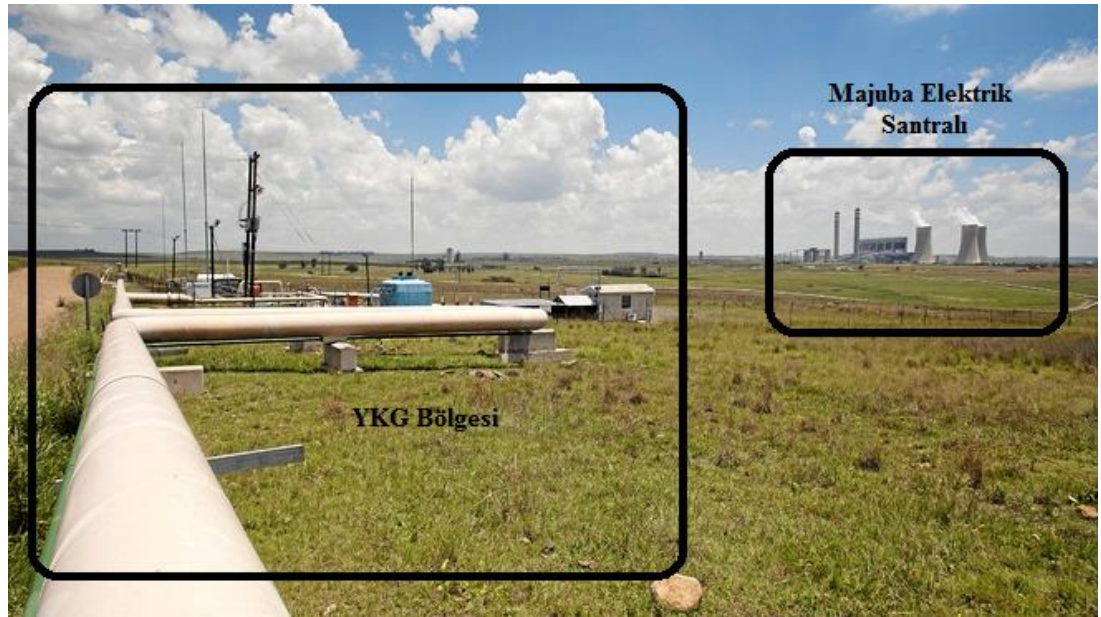
Rusya ve Özbekistan'da edindiği tecrübeli uzman ve çalışanlarla Linc Energy Avustralya ve diğer ülkelerdeki YKG çalışmalarını ilerletmeyi planlamıştır.

Carbon Energy CSIRO'da CRIP tekniğini kullanarak saha seçimi için model paketler, proses dizayn ve proses kontrolü geliştirmiştir. Carbon Energy Bloodwood Creek de büyük ölçekli denemeler planlamaktadır. Eylül 2008'de 850 m uzunluğundaki 2 paralel kuyu ve düşey tutuşturma kuyusu içeren yönlü delme programını başarıyla tamamlamışlardır [26]. Şubat 2012'de Carbon Energy Bloodwood Creek'teki YKG'den ticari elektrik şebekesine yapay gazdan güç üretimi ihraç eden ilk şirkettir. Şirket Çevre Kurumu'nun izni altında 1.5 MW sınırına kadar Ergon Energy şirketinin

yerel elektrik şebekesine başarıyla elektrik ihraç etmiştir. Carbon Energy Bloodwood projesiyle yapay gazdan üretilen elektriği kullanılmasını sağlayan ilk şirkettir. Ayrıca Bloodwood projesiyle kaliteli bir yapay gaz ($6.0-7.5 \text{ MJ/m}^3$) üretilmiştir [77].

2.8.6 Güney Afrika'daki uygulamalar

Ticari ölçekli uygulama projelerinden bir diğeri Güney Afrika'da Eskom şirketi tarafından 2001 yılında başlatılan projedir. Güney Afrika'daki kömür kaynaklarının 4'te 3'ü geleneksel madencilikle çıkarılamadığı için YKG, Güney Afrika için önemli bir teknolojidir. 2002 yılında yapılan önemli çalışmalardan sonra, 2003 yılında ön fizibilite çalışması yapılmış, 2005 yılında saha karakterizasyonu incelenmiş ve ilk kez 2007 yılında Majuba pilot tesisinden YKG sonucu elde edilen gazdan elektrik üretilmiştir. Şekil 2.20'de Majuba projesinde ki elektrik santrali ile YKG tesisinin görünümü verilmiştir [80].



Şekil 2.20: Majuba YKG tesisi [80].

Damar derinliği 280-300 m olan kömürlerden LVW tekniği kullanılarak gaz ürün elde edilmiştir. 2008 yılının sonuna kadar proje yaklaşık $15000 \text{ m}^3/\text{h}$ 'lik yanıcı gaz üretilmiştir. 20 aylık işlem boyunca 4950 ton kömür gazlaştırılmış, $22\,545\,000 \text{ Nm}^3$ 'lük gaz üretilmiştir. Ortalama verim %75'in üzerindedir ve gaz ürün debisi $4500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'tir. Kuyu çıkışındaki ortalama sıcaklık 168°C , max kuyu çıkış sıcaklığı ise 368°C 'dir. Ortalama su tüketimi 1 kilo kömür başına 0.58 litredir fakat bu rakam sabit gazlaştırma modunda iken artacaktır. 650 MW'lık güç santraline 3 MW'lık bir enerji

katkısında bulunmaktadır. Başarılı testlerle 2100 MW'lık elektrik santrali inşa edilmesi planlanmaktadır [26,71,80].

2.8.7 Çin'deki uygulamalar

Çin mühendislerinin YKG konusunda oldukça fazla sayıda patente sahip olması Çin'in yeraltında büyük bir YKG programına sahip olduğunu doğrulamaktadır. 1980'lerden beri Çin'de çok sayıda YKG denemesi gerçekleştirilmektedir. Çin Üniversitesi Maden Teknolojileri hidrojen üretimi için 1930'lu yılların başında Eski Sovyetler Birliğinin öne sürdüğü iki basamaklı YKG teknolojisini geliştirmiştir. Büyük ölçekli hidrojen üretimiyle ilgili deneyler Woniushan Xuzhou'da yürütülmüştür [26].

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 [81].

Çin ile Büyük Britanya arasında teknoloji transfer çalışmaları da devam etmektedir. YKG ile ilgili teknik bir merkez Pekin'de kurulmuştur ve Büyük Britanya ile bilgi alışverişi buradan gerçekleştirilmektedir [82].

2.9 Proses Ekonomisi

YKG'nin temel fizibilite çalışması ilk olarak Sovyetler Birliği'nde yapılmıştır. Sonraki yıllarda YKG prosesi ile ilgili önemli ekonomik çalışmalar, Edgar [83], Buder ve ark. [84], Garon [85], Moll [86], Edgar ve ark.[87], Moll [88], Davis [89], Gunn-Boysen [90], Mason [91], Krantz-Gunn [92], Shimada ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir. Gunn ve Boysen'e göre YKG prosesinin ekonomik analizi dört ayrı kategoride incelenmelidir. Bunlar; proses dinamiği analizi, ekipman dizaynı, maliyet bilgisi ve ekonomik analizlerdir.

Proses dinamiği; hava enjeksiyon oranı gibi işletim değişkenlerindeki değişime YKG prosesinin verdiği karşılığı belirler. Ayrıca proses dinamiği, çok sayıda üretim parametreleri arasında karşılıklı ilişki kurar. Örneğin ürün gazının ısı değerindeki azalma, prosesin ısı verimliliğindeki eş zamanlı azalmanın belirtisidir. YKG proses

dinamiği evresinin ilk aşaması saha test verileriyle birlikte madde ve enerji dengesi hesaplamalarını gerçekleştirmektedir.

Madde dengesi; giriş birimleri ıslak gazın üretim oranı, kuru gazın bileşimi ve hava enjeksiyon oranıdır. Gazdaki su buharının mol yüzdesi, kömür tüketim miktarı ve proseste kullanılan aküfer suları gibi bilinmeyen verileri çözmek için N_2 , H_2 ve C'nin atomik dengesi kullanılır.

Enerji dengesi hesaplamalarında ise, harcanan kömürün ısı değeri, üretilen kuru gaz ve sıvı ürünlerin ya da tarların tahmini ısı kayıpları hesaplanır.

YKG proses dinamiğini belirlemede kullanılan hassas değişkenler altı kısma ayrılmıştır.

- Kömür damarının derinliği
- Kömür damarının kalınlığı
- Kuyular arası mesafe
- Kuru gazın ısı değeri
- Hacimsel yanma süpürme verimi
- Gaz sızıntı oranı

Ekipman dizaynı; proses dinamiğine ek olarak, ticari ölçekli YKG prosesinin dizaynı, doğru proses ekonomisi için önemlidir. Genel olarak YKG prosesinde gerekli olan ekipmanlar: proses kuyuları, sondaj işlemi ve sondaj ekipmanları, kompresörler ve gerekli ekipmanlar, saha olanakları ve tesis personelidir.

Maliyet bilgisi; YKG prosesinin teklifi için önemli bir unsurdur. Bu unsur için gerekli maliyet öğeleri ise proses kuyuları, sondaj ve sondajla ilgili husular, gaz temizliğini içeren kompresyon tesisleri, tesis ihtiyaçları, personel ve kömür işletme ücretleridir.

Ekonomik analizler; ekipman ve personel gereksinimleri hesaplandıktan sonra yapılır. Ekonomik analizlerin hesaplanmasında kullanılan parametreler ise sermaye yatırımı, yıllık işletim giderleri, para akış hesaplaması, net kar ve brüt kazanç ve kirli gazın satış fiyatıdır. Sermaye yatırımı; başlangıçtaki sondaj maliyeti, kompresörler, gaz temizleme tesisleri, boru, boru aksesuarları, vanalar ve kontrol ekipmanları, tesis çalışanlarına ödenen maaşlardan oluşmaktadır. Yıllık işletim giderleri; YKG prosesinin ilerlemesinden dolayı gereken yeni proses kuyularının sondaj maliyeti, ilave boru ve aksesuarların maliyeti, personel maaşları, kömür işletim ücretleri, tesisin

bakım maliyeti, arazi vergisi ve sigortası ve amortisman payından meydana gelmektedir. Kirli gazın satış fiyatı; biriken yıllık kirli gaz üretim oranından ve brüt kazancından hesaplanmaktadır.

2.9.1 Yeraltı kömür gazlaştırma proses ekonomisiyle ilgili yapılan çalışmalar

2.9.1.1 Gunn ve Boysen'in çalışmaları

Çalışmalarında proses dinamiğinin analizini ele alan Gunn ve Boysen, proses dinamiğini etkileyen faktörler olarak, gazın ısı değeri, ürün gazının debisi, prosesin ısı verimliliği, kömür tüketim oranı, hava enjeksiyon oranı ve kuyu modüllerinin kullanım süresini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda proses ekonomisini etkileyen en önemli faktörün kömür yatağının kalınlığının yatak derinliğine oranı olduğunu belirtmişlerdir. Hassas değişkenler olan gaz kaçağı ve hacimsel yanma süpürme etkinliğinin ise gazın satış fiyatı üzerindeki küçük bir etkisi olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca gazın ısı değerinin ve kuyular arasındaki uzaklığın proses ekonomisini önemli şekilde etkilediğini belirtmişlerdir. Kuyular arasındaki mesafe azaldıkça maliyetlerin yükseldiği bilinmektedir. Çizelge 2.2'de 2 farklı kömür damarının kalınlığı ve derinliğiyle ilişkili gazın satış fiyatları yer almaktadır [90].

Çizelge 2.2: Damar derinliği/kalınlığının maliyete etkisi [90].

	I	II
Damar Kalınlığı (m)	9	3
Damar Derinliği (m)	90	300
Derinlik/Kalınlık oranı	10	100
Maliyet	1.24 Dolar/MMBtu	3.02 Dolar/ MMBtu

Çizelge 2.2'de de görüldüğü gibi damar kalınlığı arttıkça ve damar derinliği azaldıkça maliyet azalmaktadır.

2.9.1.2 Edgar'ın çalışması

1977 yılında Edgar'ın YKG ekonomisiyle ilgili yaptığı çalışmada Gunn ve Boysen gibi YKG prosesinin ekonomisinin öncelikle kömür damarının geri dönüşüm oranına ve prosesin ısı verimliliğine bağlı olduğunu belirtmiştir. Bunun yanında maliyeti etkileyen diğer faktörleri şu şekilde özetlemiştir [83].

- Kömürün doğal geçirgenliğinin yüksekliği önemli miktarda maliyet tasarrufu sağlayacaktır. Kömür geçirgenliğinin fazla oluşuyla kömür kırılmalarının önüne geçilebilecek ve kuyulardaki yoğunluk daha da azaltılabilirse delme maliyeti büyük ölçüde azalacaktır.
- Kalın damarlı kömürler veya birçok damardan oluşan kömürler yüksek enerji içeriği sağladığından sondaj maliyetinden tasarruf sağlanabilmekte ve gerekli işlem sahası da küçülmektedir. Diğer bir yandan ise çok kalın kömür damarları yerin derininde yer aldığı için derinlik başına delme maliyeti artacaktır.
- Ürün gazının toplam maliyetinin dörtte birini oluşturan yüzeydeki kömür proses ekipmanların ve gazlaştırıcıların kullanımına gerek kalmayacağından maliyetten tasarruf edilecektir.

Ayrıca Edgar, uygulanabilir YKG derinliğini, sondaj maliyetine ve sondaj teknolojisine bağlı olduğunu belirtmiş ve sondaj maliyetlerini 2000 feet'ten daha az olan uygulamalar ile sınırlandırılmasını öngörmüştür.

2.9.1.3 Buder ve arkadaşlarının çalışması

Buder ve arkadaşları [84] ise yaptıkları çalışmada büyük ölçekli YKG prosesinin ekonomisini etkileyen faktörleri ele almışlardır. Bunun yanında gazlaştırıcı ve YKG prosesinin ekonomik analizlerini de kıyaslamışlardır. Ayrıca ABD'nin doğusunda ve batısında yaptıkları deneylerde, kömür derinliği ve kalınlığının maliyete etkisini incelemişlerdir. Tesislerin üretim kapasiteleri Çizelge 2.3'te verilmiştir. Gazlaştırma ekonomisini etkileyen faktörler olan tesis ekipmanları ve çalışma sahaları ise Çizelge 2.4'te verilmiştir [84].

Çizelge 2.3: Tesislerin ürün kapasiteleri [84].

Tesisin Yerleşkesi	Gazlaştırıcı Tipi	Üretim Kapasitesi	
		Güç	Sentetik Doğal Gaz
Batı	Yüzey Gazlaştırıcısı	934 MWe	275 MM SCFD
	YKG	824 MWe	260 MM SCFD
Doğu	Yüzey Gazlaştırıcısı	934 MWe	275 MM SCFD
	YKG	824 MWe	260 MM SCFD

MMSCF: Million standard cubic feet per day

275 MM SCF $\approx$ 7.8 MM Nm³/day

Çizelge 2.4: YKG prosesi ile yüzey gazlaştırıcısında kullanılan tesis ekipmanlarının karşılaştırılması [84].

İstenen ürün	Tesis Ekipmanları	
	Gazlaştırıcı	YKG
Güç	Kömürün Hazırlanması	
	Kömür Gazlaştırma	YKG Sahası
	Külün Uzaklaştırılması	Gazın Saflaştırılması
	Gazın Saflaştırılması	Kükürt Giderimi
	Kükürt Giderimi	Kombine Çevrim Güç
	Kombine Çevrim Güç	Santrali
	Santrali	Yardımcı Birimler ve
Sentetik Doğalgaz	Yardımcı Birimler ve	Kompresyon
	Kompresyon	
	Kömür Hazırlanması	
	Kömür Gazlaştırma	YKG Sahası
	Külün Uzaklaştırılması	Gazın Saflaştırılması
	Gazın Saflaştırılması	Kükürt Giderimi
	Kükürt Giderimi	Kombine Çevrim Güç
Güç	Kombine Çevrim Güç	Santrali
	Santrali	Yardımcı Birimler ve
	Yardımcı Birimler ve	Kompresyon
	Kompresyon	
	Kömür Hazırlanması	
	Kömür Gazlaştırma	YKG Sahası
	Külün Uzaklaştırılması	Gazın Saflaştırılması
	Gazın Saflaştırılması	Kükürt Giderimi
	Kükürt Giderimi	Kombine Çevrim Güç
	Kombine Çevrim Güç	Santrali
	Santrali	Yardımcı Birimler ve
	Yardımcı Birimler ve	Kompresyon
	Kompresyon	

Çizelge 2.4'te görüldüğü üzere gazlaştırma ekipmanları açısından incelendiğinde yüzey gazlaştırıcısı kullanarak gerçekleştirilen kömür gazlaştırma prosesinde gerekli olan ekipman sayısı artmaktadır. Bu durum da direkt olarak işletim maliyetini arttırmaktadır. Ayrıca YKG prosesinde madencilik ya da kömür hazırlama gibi işlemlerin gerekmemesi, YKG maliyetini ciddi ölçüde düşürmektedir. Bir diğer önemli farklılık ise gazın temizlenmesi işleminde kullanılan ekipmanların boyutudur. YKG'nin üstünlükleri kısmında değinildiği gibi oluşan ürün gazında katran ve kül içeriğinin yüzey gazlaştırıcısına göre düşük olmasından dolayı daha küçük bir gaz temizleme ekipmanına ihtiyaç duyulması YKG maliyetini oldukça düşürmektedir. Yapılan birçok çalışmada, tüm bu sebeplerden dolayı YKG ile üretilen gazların maliyeti Lurgi gazlaştırıcısı ile üretilen gazın maliyetinden en az %25 daha düşük olduğu görülmüştür. [33,83,84].

Çizelge 2.4'te verilen kömür gazlaştırma ekipmanlarının maliyetleri sentetik doğal gaz ve güç üretimi için ayrı ayrı Çizelge 2.5'te hesaplanmıştır [84].

Çizelge 2.5: Yüzey tesisinin sermaye maliyeti(milyon dolar) [84].

Yüzeyde kullanılan ekipmanlar	Güç	
	Gazlaştırıcı	YKG
Tesis Ekipmanları		
Kömür elleçleme	23	-
Kömür gazlaştırma	231 ^a	-
Gazın saflaştırılması ve kükürt giderimi	58	70 ^a
Ham gaz kompresyonu	63	70
Kombine çevrim güç santrali	250	250
Diğer yardımcı birimler ve atıkların uzaklaştırılması	85 ^d	60 ^b
Toplam	710	450

Yüzeyde kullanılan ekipmanlar	Sentetik Doğal Gaz	
	Gazlaştırıcı	YKG
Tesis Ekipmanları		
Kömür elleçleme	45	-
Kömür gazlaştırma	373 ^a	-
Yapay gazın saflaştırılması ve metanlaştırma	400	420 ^a
Oksijen tesisi	190	190
Diğer yardımcı birimler ve atıkların uzaklaştırılması	152 ^d	150 ^b
Toplam	710	760

^a Aynı zamanda toz giderme maliyetini de içerdiğini gösterir.

^b Yoğuşma işlemi içerdiğini gösterir.

^c Kompresyon, sülfür giderimi, CO dönüşümü ve metanlaşmayı içerdiğini gösterir.

^d Kül gideriminin yüksek yüzdeye sahip olduğunu gösterir.

Bu tabloda yalnızca yüzeyde kullanılan ekipmanların fiyatları kıyaslanmıştır. YKG tesisinde yüzeydeki gaz temizleme elemanları dışında saha maliyetleri(sondaj,bağlantı vb.) de olduğu için YKG saha maliyetleri ayrı olarak Çizelge 2.6’da sentetik doğal gaz ve güç üretimi için verilmiştir [84].

Çizelge 2.6: YKG saha tesisinin maliyeti (milyon dolar) [84].

Ürün Yerleşke	Güç		Sentetik Doğalgaz	
	Batı	Doğu	Batı	Doğu
Sermaye Maliyeti	105	110	115	150
Yıllık İşletim Maliyeti				
Sondaj	15.4	78.2	27.4	139.2
Kömür işletme maliyeti	6.8	6.8	12.1	12.1
Boru sistemi (işçilik)	1.2	3.5	2.2	7.4
Bağlantı (işçilik)	2.2	-	4.0	-
Materyal	0.1	0.1	0.2	0.2
Sermayeyle İlgili (%18)	18.7	20.0	21.3	27.3
Toplam	44.4	108	67.2	186.2

Çizelge 2.6’da görüldüğü üzere YKG sahasının sermaye maliyetlerinin %60-70’inin boru harcamaları oluşturmaktadır. Ayrıca Batı ABD’deki işletim maliyetinin %35-40’ını sondaj maliyeti oluştururken, ABD’nin Doğusunda gerçekleştirilen çalışmalardaki sondaj işletim maliyetinin %72-72’ini oluşturmaktadır. Bu maliyet farklılığının kömür kalınlığından ve derinliğinden kaynaklandığı bilinmektedir.

Çizelge 2.7’de ise tüm sermaye ve işletim maliyetleri ile ürün gazının maliyet çalışmalarının özeti listelenmiştir. Tabloya göre batıdaki kömürlerden üretilen singazın maliyeti daha uygundur. Ayrıca doğudaki sondaj maliyetinin çok fazla oluşu YKG ve yüzey gazlaştırıcı arasındaki maliyet farkının kapanmasına yol açtığı görülmektedir.

Çizelge 2. 7: Maliyet özeti (milyon dolar) [84].

Ürün Yerleşke	Güç				Sentetik Doğalgaz			
	Batı		Doğu		Batı		Doğu	
Gazlaştırma Türü	Y.G	YKG	Y.G	YKG	Y.G.	YKG	Y.G	YKG
İşletme Maliyeti	710	555	710	560	1160	875	1160	910
Toplam Yıllık İşletme Maliyeti	290.2	238.3	238.3	230.1	389.8	280.8	469.5	399.8

*Y.G.: Yüzey Gazlaştırıcısı

2.9.1.4 Moll’un çalışmaları

Moll ise YKG ekonomisiyle ilgili yaptığı çalışmada Wyoming kömürlerinden düşük ısı değerli gazın işletim maliyetiyle gaz satış fiyatını araştırmıştır. Düşük ısı değerli gazın taşınımı pahalı olacağından sahada güç tesisi olduğunu varsaymış fakat maliyet hesaplamalarına güç tesisinin maliyetini katmamıştır. Düşük ısı değerli gazın sermaye

yatırımını, işletim maliyetini ve gazın satış fiyatını, farklı ürün hızlarında araştırmıştır [88].

500 MW gücündeki tesis için, gaz üretim hızı saatte 5 milyar Btu (166 Btu/Scf) olan çalışmada hava enjeksiyon kompresyon ve gazın saflaştırılma maliyetini içeren toplam sermaye yatırımını 128 Milyon Dolar olarak hesaplamış, kömürün işletilmesini, işçilik giderleri ve sondaj maliyetini içeren toplam işletim maliyetini ise 1 milyon Btu gaz ürün başına 0.93 Dolar olarak bulmuştur. Gazın satış fiyatını ise 1Milyon Btu başına 1.37 Dolar olarak belirlemiştir. Moll aynı hesaplamaları 50 MW güce sahip başka bir tesis içinde yapmıştır. Bu tesisin gaz üretim hızı saatte 500 milyon Btu olduğunda, toplam sermaye yatırımını 25 Milyon Dolar olarak bulunmuştur. Toplam işletim maliyeti ise 1 milyon Btu gaz ürün başına 1.33 Dolar olarak hesaplamış ve gazın satış fiyatını 1Milyon Btu başına 1.98 Dolar olarak belirlemiştir. Çalışmalar sonucunda büyük ölçekli tesiste üretilen gazın satış fiyatının daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni büyük ölçekli tesisin yatırım/kazanç oranının daha düşük olmasıdır [88].

Moll'un 1984 yılında yaptığı farklı bir çalışmada, YKG'den üretilen yapay gaz maliyeti ile diğer enerji türlerinden üretilen yapay gaz maliyetinin karşılaştırmıştır. Moll YKG ile elde edilen yapay gaz fiyatının özellikle doğalgaz ve petrolden üretilen yapay gaz maliyeti ile kıyaslandığında YKG'den elde edilen yapay gaz maliyetinin çok düşük olduğunu söylemiştir. Çizelge 2.8'de da maliyetler arasında ki bu farklılık görülmektedir [88].

Çizelge 2.8: Farklı hammaddelerden üretilen yapay gazların maliyetleri [88].

Hammadde Ülke	Yapay Gaz Maliyeti					
	Doğalgaz		Petrol		Kömür	
	ABD	Sudi Arabistan	Küsbe ABD	Kok ABD	Texaco ABD	YKG ABD
Hammadde Fiyatı (\$/milyon BTU)	4.00	1.00	3.50	1.00	1.75	0.10

2.9.1.5 Shimada ve arkadaşlarının çalışması

Proses ekonomisiyle ilgili bir başka çalışma Japonya'da yapılmıştır. 1960'lara kadar YKG ile ilgili hiçbir çalışma bulunmayan Japonya'da Shimada ve arkadaşları 1995 yılında Japonya'da belirlenen kömür sahasının yer altı kömür çalışması ile ilgili fizibilite çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada CRIP ve ELW teknikleri kullanılarak

yeraltında kömür gazlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma oyğunun kesit alanını iki farklı değer alarak bir çalışma yürütmüşlerdir. Birinci kabuldeki oyuk kesit alanını 10 m² iken, ikinci kabuldeki oyuk kesit alanı 20 m²'dir. Her iki kabul için de yıllık 100 000 ton kömür gazlaştırılacağı ve yılda 1.6*10⁸ Nm³ gaz üretimi gerçekleşeceğini varsaymışlardır. Japonlar yaptıkları bu gazlaştırma işleminde maliyeti etkileyen faktörler olarak; gazlaştırma için kullanılan teknikleri, gazlaştırma ajanının türünü, sondaj sayısını ve sondajın delinme yönünü göstermişlerdir. Çizelge 2.9'da yukarıda sayılan faktörlerin maliyetleri görülmektedir. Çizelge 2.10'da ise ELW ve CRIP teknikleriyle yapılan gazlaştırma prosesinin yıllık maliyeti hesaplanmıştır [56].

Çizelge 2.9: Proses ekonomisini etkileyen faktörler ve faktörlerin maliyetleri [56]

Kolon A	Kolon B
Yatay Sondaj	500,000 \$/sondaj
Dikey Sondaj	150,000 \$/sondaj
ELW Maliyeti (4 dikey sondaj+1yatay sondaj)	1,100,000 \$/Ünite
CRIP Maliyeti (1 dikey sondaj+1yatay sondaj)	650,000 \$/Ünite
Oksijen Maliyeti	1.0 \$/Nm ³ (30*10 ⁶ \$/yıl)
Buhar Maliyeti	0.05 \$/Nm ³ (3*10 ⁶ \$/yıl)
Tesisin Kurulum Maliyeti	2*10 ⁶ \$/yıl
İşletim Maliyeti (Elektrik, İşçilik vb.)	3*10 ⁶ \$/yıl

Çizelge 2.10: ELW ve CRIP teknikleriyle gerçekleştirilen YKG prosesinin yıllık maliyeti [56].

ELW		CRIP	
1. Kabul	2. Kabul	1. Kabul	2. Kabul
60*10⁶ \$	82*10⁶ \$	51*10⁶ \$	64*10⁶ \$

Çizelge 2.9'a bakıldığında öncelikle YKG esnasında kullanılan CRIP ve ELW tekniklerinin işlem maliyetine etkileri incelendiğinde, ELW tekniğinin birçok dikey sondajdan oluşmasından dolayı CRIP tekniğine kıyasla çok daha maliyetli olduğu

belirtilmiştir. Kullanılan gazlaştırma ajanları olan oksijen ve buharın gazlaşma maliyetine olan etkisi incelendiğinde ise oksijenin buhara göre çok daha pahalı bir gaz olmasından dolayı, oksijen kullanımının maliyeti arttırdığı söylenmiştir. Bunların yanında sondaj yönüne bağlı olarak, sondajın yatay şekilde delinmesinin, dikey şekilde delmeye göre maliyeti önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Çizelge 2.10’da ise her iki kabul için ELW ve CRIP tekniklerinin yıllık maliyetleri hesaplanmıştır. İkinci kabulde oyuk kesit alanı daha büyük olduğundan gerekli sondaj sayısı artmış ve bu durumda toplam maliyeti arttırmıştır. ELW ve CRIP tekniği açısından bakıldığında ise CRIP tekniğinin çok daha düşük maliyete sahip olduğu birkez daha görülmektedir. Ayrıca diğer başlıklı maliyet hesaplamasının işletim giderleri, tesisin kurulumu ve buhar maliyetini içermektedir.[50].

Tüm bu analizler sonucunda Japonya’da yapılan maliyet çalışmalarında maliyeti etkileyen en önemli iki faktörün sondaj ve oksijen maliyeti olduğu belirtilmiştir [56].

2.9.1.6 Rembrant’ın çalışması

2011 yılında YKG prosesinin ekonomisiyle ilgili yapılan çalışmalarda yapay gazın üretim maliyetleri, Rembrant tarafından özetlenmiştir. Yapılan çalışmada ilk olarak, maliyeti etkileyen faktörler ele alınmıştır. Bu temel fiziksel değişkenler bölüm 2.9’da ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Yapılan çalışmaya göre, teorik ve gerçek işlemlere dayalı hesaplamalar sonucunda üretilen yapay gazın maliyet aralığı, 1GJ(giga joule) yapay gaz başına 1\$ ile 8\$ aralığındadır.

Clean Coal’da Marc Mostade’nin tahminine göre 800m derinliğinde, 4-6m kalınlığında kömür yatağından 500 MW’lık YKG tabanlı santral için üretilen yapay gazın maliyeti 1GJ başına 2.5-4.5\$’dır. Bu maliyet aralığının gazlaştırma ajanı olarak hava ya da oksijen kullanımı sonucunda oluştuğunu vurgulanmıştır.

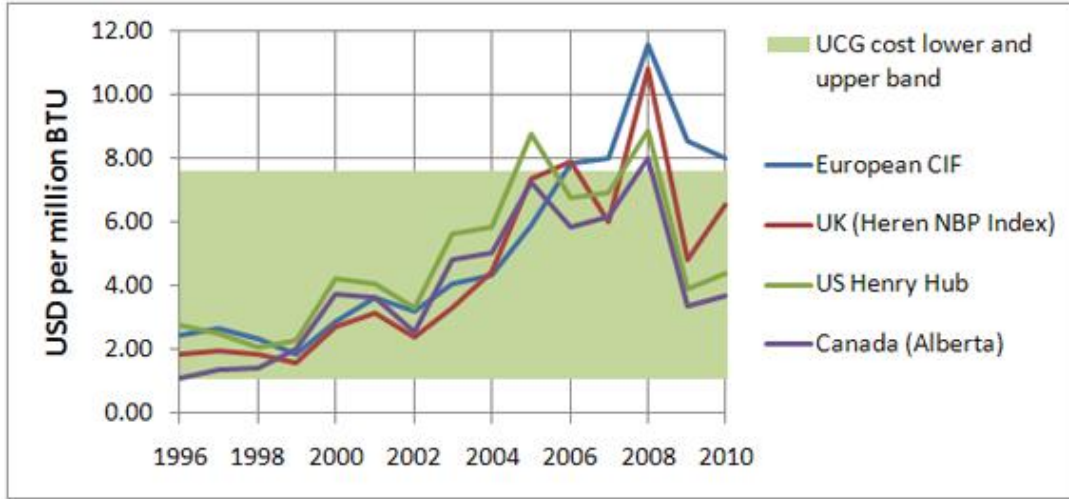
Çin’de ENN şirketi, pilot tesisinde 1m³ singazın üretim maliyetini 0.9 - 1.7 cent olarak belgelemiştir. Üretilen yapay gazın ısı değeri 9MJ/m³ gibi yüksek bir ısı değere sahip olduğunda ise yapay gaz maliyetinin 1GJ başına 1-1.9\$ olacağı hesaplamıştır.

2007 yılında GasTech, US Powder River Basin’de maliyet analiziyle ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada gazlaştırma ajanı olarak oksijen ve hava kullanmıştır. 1GJ yapay gazın maliyetini 1.5 - 2.4\$ olarak tahmin etmiştir.

2011 yılında, School of Public and Environmental Affairs of Indiana University’nin yaptığı çalışmada 200m ya da daha fazla derinliğe sahip, kalınlığı ise 2.5-3 m olan

İndiana'daki kömür damarının hava ya da zenginleştirilmiş hava kullanılarak gazlaştırılması sonucu oluşan yapay gazın maliyet aralığını, 1GJ başına 4.6 -7.7\$ olarak hesaplamıştır.

Şekil 2.21'de görüldüğü gibi ABD, AB ve Asya pazarındaki 1996-2010 yılları arasındaki doğal gaz fiyatları ile minimum ve max YKG maliyeti 1-8 cent olan 1GJ yapay gaz kıyaslanmıştır. (Şekilde maliyet BTU'ya çevrilmiştir.)



Şekil 2.21: Doğal gaz fiyatları ile yapay gaz fiyatlarının karşılaştırılması [93].

Şekilde görüldüğü gibi 2010 senesinde Avrupada'ki doğal gaz maliyeti, YKG ile elde edilen yapay gazdan daha maliyetlidir. Ayrıca doğal gaz fiyatının bugünlerde 2010 yılına nazaran çok daha yüksek olduğu düşünüldüğünde bu farkın arttığı söylenebilir [93].

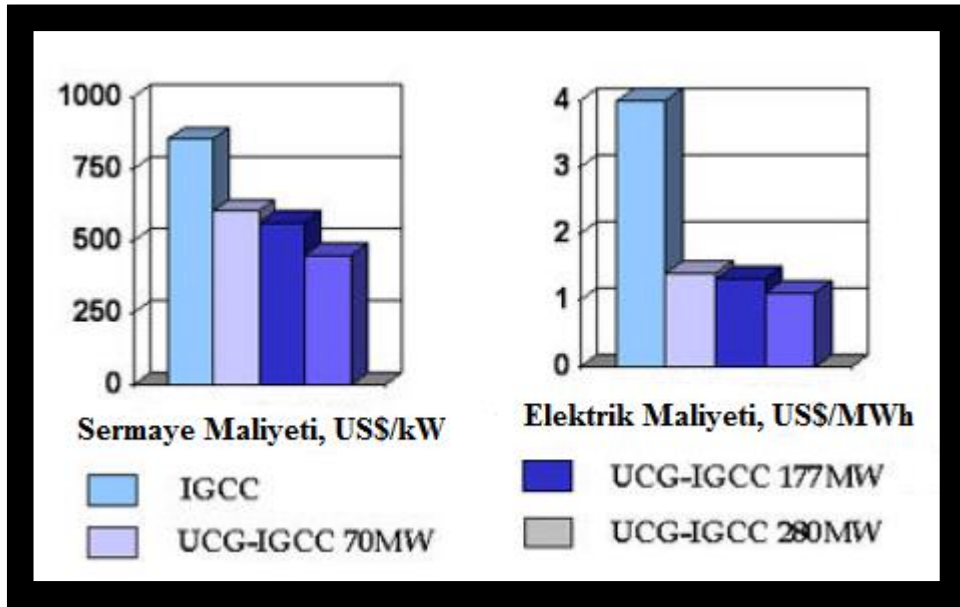
2.9.2 Yapay gazdan elektrik üretim maliyeti

Entegre Kombine Çevrim (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) tesisleri 1970'lerin başından beri faaliyet göstermektedir. 1990'larda inşa edilen IGCC tesislerin birkaçı ise ticari ölçeklidir. Konvansiyonel güç üretim teknolojisine kıyasla IGCC karbondioksit yakalamada daha verimli bir yöntemdir. Yapay gazdan elektrik üretilen IGCC ile yakıt hücreleri için hidrojen ve metan üretme olasılığında bulunmaktadır.

IGCC güç tesislerinde, hammadde olarak yapay gaz kullanılmaktadır. Bu gaz, gaz türbin jeneratörlerine güç vermek için kullanılır. Entegre tesis olarak adlandırılmasının sebebi ise tesisin kombine çevrimi için optimize edilmiş gazlaştırma ünitesinde yapay

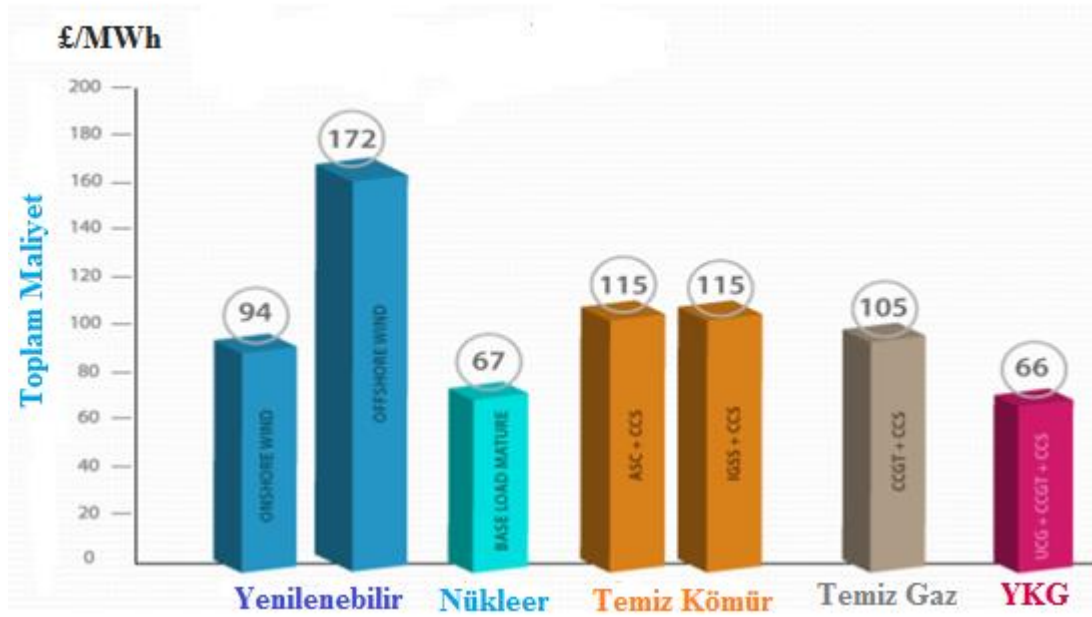
gazın üretilmesidir. Gazlaştırma ünitesinde üretilen ısı ile gaz soğutucu bölmelerinde, su buhar haline getirilir ve bu buhar, buhar türbinlerini çevirerek elektrik üretir. Buna ek olarak gazlaştırma sonucu oluşan yapay gaz temizlendikten sonra gaz türbinlerinde yakılmak suretiyle bir miktar daha enerji üretilir. Dolayısı ile gazlaştırma teknolojisi, normal güç santraline entegre edilmiş olup, buhar ve gaz türbinlerinden kombine bir şekilde enerji üretilmiş olur [94].

Ticari boyutlarda YKG teknolojisini uygulayan en başarılı ve en büyük şirket olarak faaliyet gösteren Ergo Exergy tarafından yayımlanan rakamlara dayalı çalışmada YKG tabanlı IGCC tesisini kurmak çok daha ucuzdur ve elektrik maliyeti de çok daha düşüktür. Şekil 2.22’de görüldüğü gibi Blinderman tarafından yayınlan raporda Chinchilla Projesinde sadece IGCC kullanımında toplam sermaye maliyeti 750\$/kW’tan fazla iken, YKG ile birlikte kullanıldığında bu maliyet azalmaktadır. Aynı durum kullanılan elektriğin maliyeti içinde geçerlidir [57].



Şekil 2.22: UCG-IGCC tesislerinin ekonomik performansı [27].

Ayrıca diğer enerji türleriyle kıyaslanmaya devam edildiğinde UCG Association kuruluşu, YKG'den üretilen güç üretim maliyetinin de çok daha az olduğu Şekil 2.23'te göstermiştir [27].



Şekil 2.23: Güç üretimi için YKG maliyeti [27].

2.9.3 Yeraltı kömür gazlaştırma prosesiyle kimyasal üretiminin ekonomisi

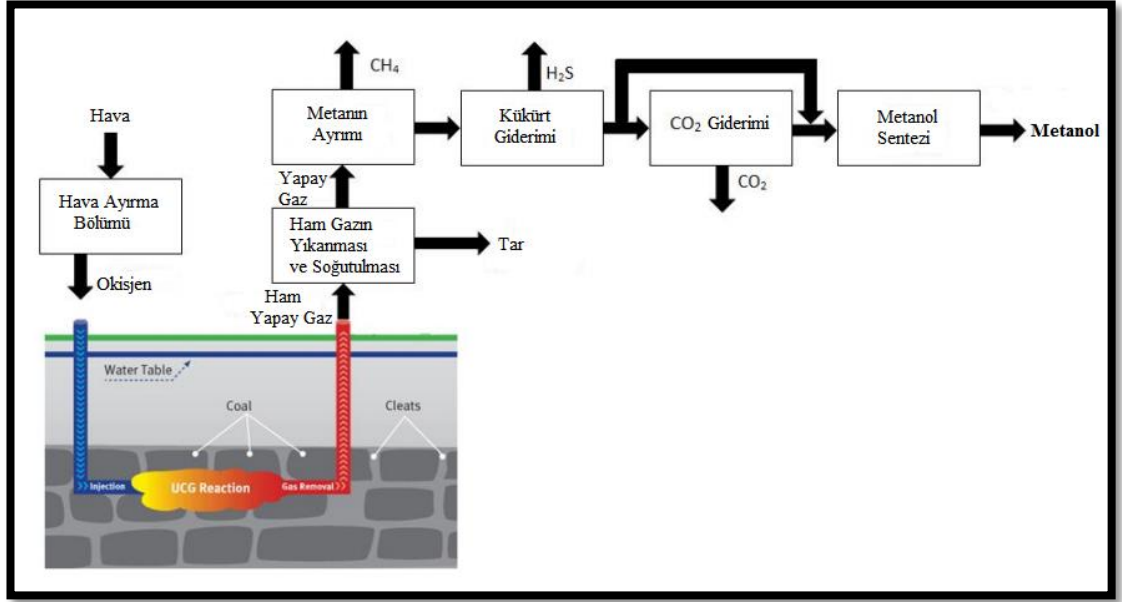
Kömürün gazlaştırılmasıyla elde edilen yapay gazdan metanol, amonyak, metan, hidrojen ve sıvı yakıt gibi pek çok kimyasal maddenin üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen yapay gaz önce içeriğindeki yabancı maddelerden arındırılmakta, daha sonra amaca göre H_2 /CO oranı ayarlanarak senteze geçilmektedir.

Sentez gazının ilk endüstriyel uygulaması 1913 yılında amonyak sentezi ile başlamış olup, yine bu yıllarda amonyak sentezi için gerekli olan hidrojen de yapay gazdan üretilmekteydi. Bu durum 1980 'li yıllara kadar devam etmiş, son 30 yılda ise yerini petrol ürünlerine bırakmıştır. Son zamanlarda ise yapay gaz sentezi için kömürün gazlaştırılması tekrar önem kazanmıştır [95]. Bunun bir nedeni petrol yataklarının kısıtlılığı iken diğer nedeni ise kömür gazlaştırma işleminin ekonomisidir. Özellikle, yüzey gazlaştırıcısına göre ekonomik açıdan üstünlük gösteren YKG prosesiyle yapay gaz üretimi önem taşımaktadır. Bu bölüm YKG'den elde edilen yapay gazdan kimyasal üretiminin ekonomisini içermektedir.

2.9.3.1 Metanol üretimi

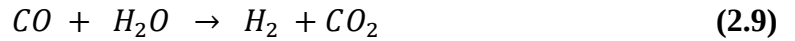
Sanayide hammadde olarak kullanılan metanol, doğal gaz, kömür veya atıkların hammadde olarak kullanıldığı prosesler yardımıyla üretilmektedir. Metanol üretiminde temel basamaklar sabit olup, sentez gazının elde edilmesi aşamasında farklılıklar bulunmaktadır. Metanol üretimi için gerekli yapay gazın eldesinin bir yolu

YKG prosesidir. Şekil 2.24'te YKG'den üretilen singazdan metanol eldesi gösterilmektedir.



Şekil 2.24: Metanol üretimi [8].

Şekil 2.24'te görüldüğü üzere YKG sonucu oluşan H_2 , CO , CH_4 , CO_2 ve H_2S içeren ham gaz soğutucudan geçer, böylece sıvı hidrokarbonlar ve su kondense olur, kalan gazın hidrojenle zenginleştirilmesi için zenginleştirme tesisine basılır. Burada 2900kPa'a sıkıştırılan gaz dönüşüm reaksiyonuna uğrar.



H_2/CO oranı 3.4 olduğunda CO_2 ve H_2S giderilerek saflaştırılan gaz boru hattındaki basınca sıkıştırılır. Metanol sentez tesisine gelen yapay gaz yaklaşık 10 000 kPa'a sıkıştırılır ve aşağıdaki reaksiyon gerçekleşerek metanol üretimi sağlanır.

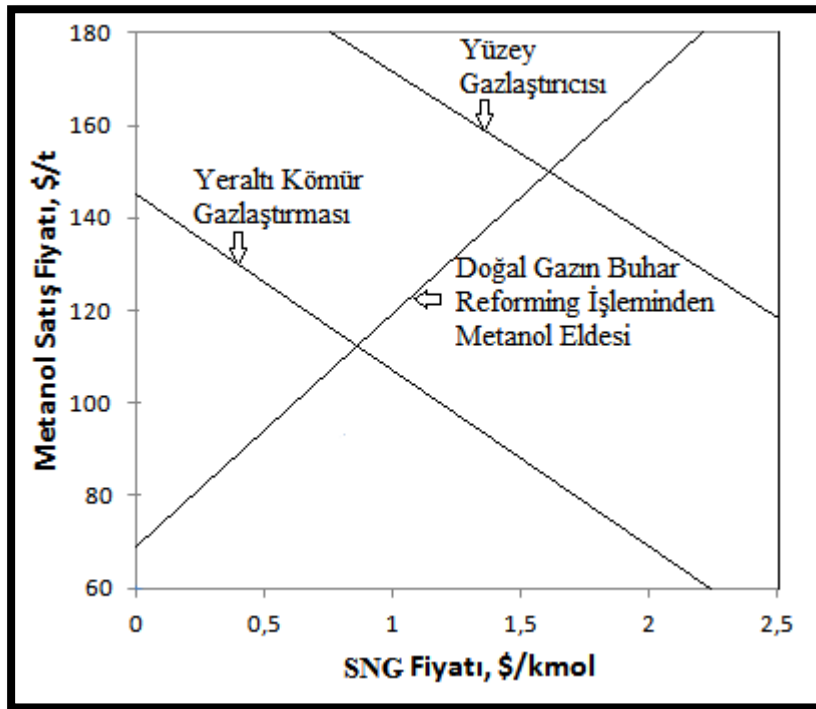


Bidlack ve ark yeraltında kömürün gazlatırılmasıyla üretilen yapay gazdan metanol üretiminin ekonomisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada yüzey gazlaştırıcısı ile YKG prosesinden ürettikleri yapay gazdan metanol eldesinin ekonomisini kıyaslamışlardır. Çizelge 2.11' de her iki yöntemle üretilen metanol gazının ekonomisi yer almaktadır [96].

Çizelge 2.11: Metanol gazının üretim ekonomisi [96].

Gaz Üretim Yöntemi	Yer altı	Yüzey
Gereken Toplam Sermaye	332 milyon \$	511 milyon \$
Sentez Gazının Satış Fiyatı	49 cent/kmol	81 cent/kmol

Çizelge 2.11’den de görüldüğü üzere yüzey gazlaştırıcısı kullanılarak üretilen SNG’nin eldesi daha maliyetlidir. Elde edilen bu sentetik doğal gazdan metanol eldesinin ekonomisi Şekil 2.25’te gösterilmektedir.



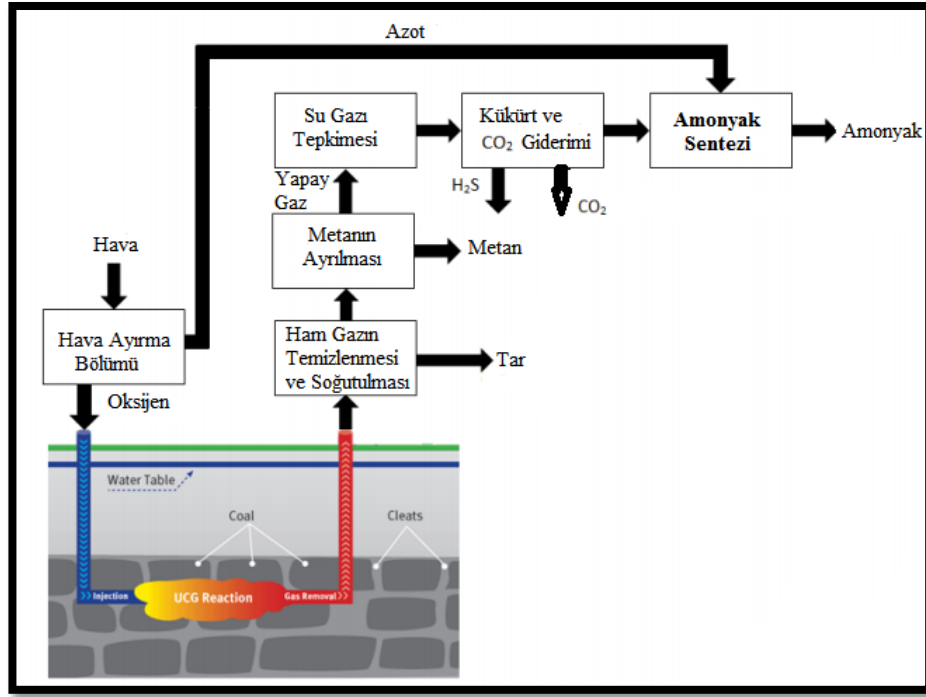
Şekil 2.25: Yapay gazdan elde edilen metanolün fiyatı [96].

Şekil 2.25’te görüldüğü üzere YKG’den elde edilen SNG’den üretilen metanolün fiyatı 122\$/ton iken, yüzey gazlaştırıcı ile üretilen yapay gazdan elde edilen metanolün fiyatı 172\$/ton’dur. Yani YKG ile üretilen yapay gazdan metanol eldesi 1 ton başına yaklaşık 50\$ daha ucuzdur.

2.9.3.2 Amonyak üretimi

Yapay gazdan üretilen bir diğer önemli madde amonyaktır. Kimyasal gübrenin ve nitrik asitin başlıca hammaddesi olduğu kadar, soğutucu ve temizleme aracı olarak da kullanılabilen amonyakın üretimi, endüstri işlemlerinin en önemlilerinden biridir. Metanol sentezine benzer olarak amonyak üretimi sentez döngüsünde

gerçekleşmektedir. Amonyak üretimi aşağıda gösterilen reaksiyona göre oluşmaktadır. YKG'den amonyak üretimi ise Şekil 2.26'da gösterilmiştir.



Şekil 2.26: Yapay gazdan amonyak sentezi [8].

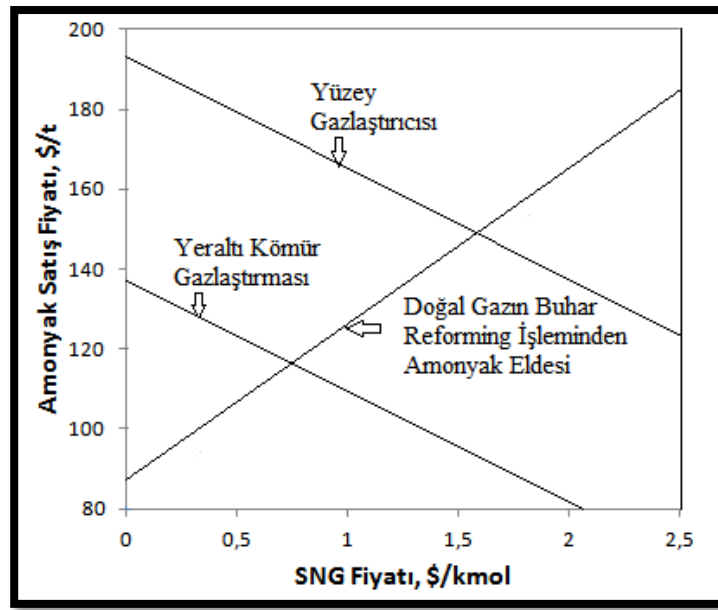
Bidlack ve arkadaşlarının yapay gazdan metanol ve amonyak üretiminin ekonomisiyle ilgili yaptığı çalışmada, YKG ve yüzey gazlaştırıcı kullanımından kaynaklanan ekonomik farklılıklar incelenmiştir. Metanol üretimine kıyasla amonyak üretimi için ek basamaklar gerekmektedir. Öncelikle karbon monoksitin tamamından faydalanıp H_2 üretmek için gaz dönüşüm reaksiyonuyla yapay gazın dönüşümü gerçekleşir. İkinci olarak amonyağı metandan ayırmak oldukça zor olduğu için, upgrading tesisinde metan kriyojenik olarak yapay gazdan ayrılır ve SNG olarak üretilmiş olur. Üçüncü olarak hava ayırma tesisinden elde edilen azot, sentez gazına eklenir. Son olarak eser miktardaki CO ve CO_2 yapay katalizörü bozar, böylece metanlaşma reaksiyonu ile bu bileşenler giderilir. Bu sayılan ek basamaklardan dolayı metanol üretimi için gerekli sermaye, amonyak üretimi için gereken sermayeden daha düşüktür [92]. Aşağıda yapay gazdan amonyak (Çizelge 2.12) üretiminin ekonomisi verimiştir [96].

Çizelge 2.12: Amonyak gazının üretim ekonomisi [96].

Gaz Üretim Yöntemi	Yer altı	Yüzey
Gereken Toplam Sermaye	347 milyon \$	520 milyon \$
Sentez Gazının Satış Fiyatı	35 cent/kmol	71 cent/kmol

Çizelge 2.11 ve 2.12’de toplam sermaye ekipmanlarını, saha ekipmanlarını, yüzey ekipmanlarını, dönüşüm reaksiyonunun gerçekleştiği kısmı, prosesi başlatma giderlerini ve işçilik giderlerini içermektedir. Amonyak ve metanol arasındaki toplam sermaye arasındaki farkın büyük bir nedeni dönüşüm reaksiyonunun gerçekleştiği tesistir.

Elde edilen bu yapay gazdan amonyak eldesinin ekonomisi Şekil 2.27’de gösterilmektedir [96].



Şekil 2.27: Yapay gazdan üretilen amonyağın satış fiyatı [96].

Şekilde görüldüğü üzere YKG prosesi ile amonyak üretimi 128 \$/t iken, yüzey gazlaştırıcıyla üretilen amonyağın fiyatı 172 \$/t’dir. Bu durumda yüzey gazlaştırıcısıyla üretilen amonyak bir ton başına 44 \$ daha maliyetlidir.

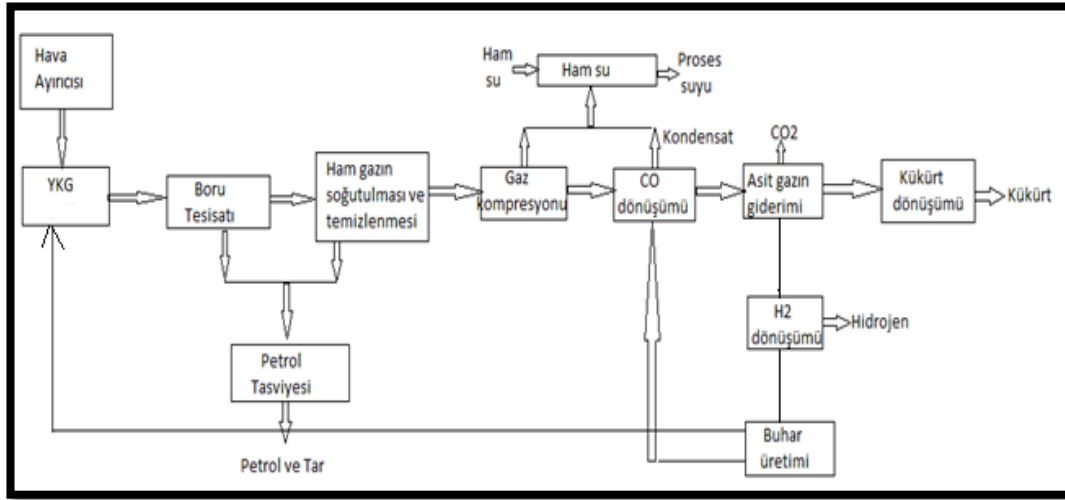
2.9.3.3 Hidrojen üretimi

Hidrojen teknolojisi temiz bir enerji kaynağı olması ve iklim değişikliğini önlemesi açısından önemli bir enerji kaynağıdır. Günümüzde de toplam Dünya hidrojen

üretiminin % 16'sı kömürün gazlaştırılması ile sağlanmakta olup, üretilen hidrojeninde % 59'u amonyak sentezinde tüketilmektedir [97].

Hidrojen üretiminin en etkili yöntemlerinden biri kömürün gazlaştırılmasıdır. Özellikle Çinliler son zamanlarda hidrojen üretimi sağlamak için YKG'den faydalanmaktadır.

YKG'den hidrojen üretiminin ekonomisi ile ilgili ilk çalışmalardan biri Edgar ve arkadaşlarının 1982 yılında yaptığı çalışmadır. Bu çalışmada Texas linyitlerinden YKG ile hidrojen üretiminin maliyetini incelemişlerdir. Texas linyitleri LVW tekniğiyle yeraltında gazlaştırılarak oluşan yapay gazdan hidrojen üretimi için yüzeyde bir tesis kurmuşlardır. Tesisin şeması Şekil 2.28'de görülmektedir [87].



Şekil 2.28: YKG'den hidrojen üretiminin proses akış şeması [87].

Şekil 2.28'de görüldüğü gibi YKG sonucu oluşan yapay gaz öncelikle soğutulup, kondense olan ürünler giderildikten sonra gaz 450 psia'ya basılmakta ve yapay gazın dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Asidik gazlar ise Seloxol Sistem ile uzaklatırılmaktadır. Bunun sonucunda %99.5 saflıkta hidrojen üretilmektedir.

Texas linyitlerin yer altı gazlaşması sonucu üretilen yapay gazdan hidrojen eldesinin işletim maliyetleri yüzey ve saha için iki ayrı kısımda incelenmiştir. Bu çalışma işletim maliyetlerini ham maddeleri, kimyasalları, suyu, katalizörleri, işletim için gerekli diğer materyalleri, iş gücü maliyetini ve idari başlıkları (administrative overhead) içerirken, vergileri, sermaye ve yatırım gelirini içermemektedir. Saha işletim maliyetleri, proses

kuyuları, kömür işletim giderleri, oksijen, buhar, proses suyu, iş gücü gibi maliyetlerden oluşmaktadır.

Yüzey tesisinin işletim ve sermaye yatırım maliyetleri ise, kullanılan ekipmanların (ham gazın soğutulup temizlendiği sistem, gaz kompresyon sistemi, kükürt giderimi sistemi, hidrojen dönüşüm sistemi vb.) maliyetlerinin toplamı olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu gazlaşma oranı 2000 TPD (tons per day) olan Texas linyitlerinden 8460 MMBTU/D olan hidrojenin toplam yüzey tesis maliyeti 58 milyon dolardır [87].

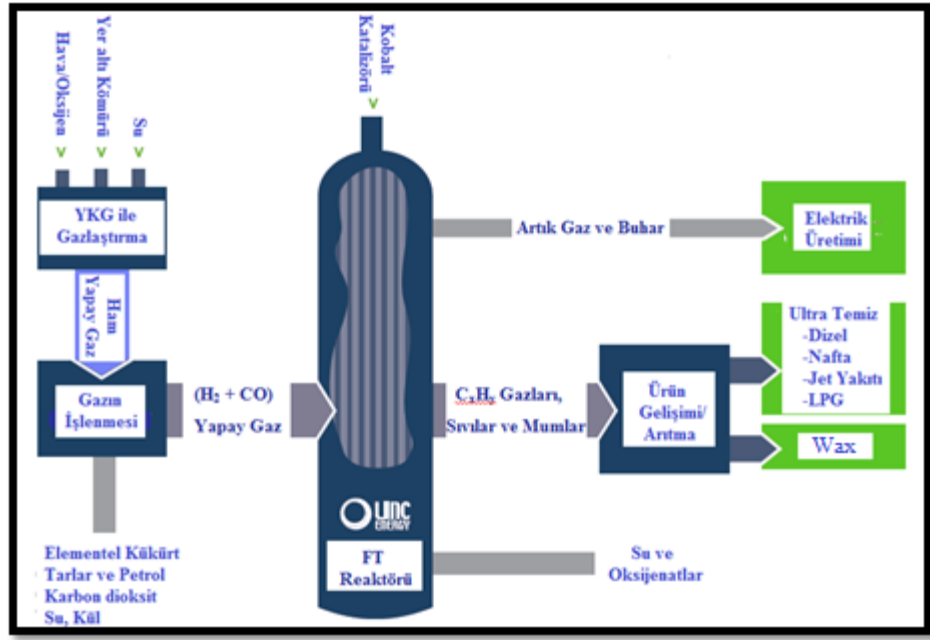
2.9.3.4 Sıvı yakıt üretimi

Kömürden elde edilen yapay gazdan sıvı yakıt üretimi (gas to liquid, GTL) uzun yıllardır kullanılan ispatlanmış bir teknolojidir. GTL prosesi, Fischer-Tropsch (FT) senteziyle yapay gazdaki karbon monoksit ve hidrojenin kimyasal dönüşümü olarak tanımlanır. FT sentezinin amacı ısı, basınç ve katalizör varlığında H_2 ve CO'nun reaksiyonu ile özellikle uzun zincirli alifatik sıvı hidrokarbonlar elde etmektir.

GTL prosesini yapan şirketlerden biri Linc Enerji'dir. Linc Enerji'ye göre GTL prosesi üç ana adımdan oluşmaktadır.

1. Gaz işlemi: Yapay gazdaki safsızlıkları gidermek ve FT sentezindeki uygun hidrojen karbon oranının (H_2/CO) aralığını belirlemektir.
2. FT sentezi: Katalitik dönüşümle syncrude üretmektir.
3. Ürünün işlenmesi ve arıtma: Gazların, hidrokarbonların ve vaksların (mumların) ayrıldığı ve nihai ürünün rafine edildiği kısımdır.

Şekil 2.29'da Linc Enerji'nin yapay gazdan dizel yakıt üretim modeli görülmektedir. Ayrıca şekilde görüldüğü gibi sıvı yakıtlar dışında, GTL prosesi elektrik kullanıcıları için oldukça önemlidir. FT reaktöründen çıkan atık buhar ve gazlar elektrik üretiminde ısı kaynağı olarak kullanılabilir [97].



Şekil 2.29: Gazdan sıvı yakıt üretimi [97].

YKG prosesi ile GTL prosesini kombinasyonu kömürden sıvı yakıt üretimi (coal to liquid, CTL) olarak adlandırılır. YKG'den elde edilen yapay gazdan FT prosesiyle sıvı yakıt üretilir. Tüm dünya açısından bakıldığında, hızla tükenen doğal gaz rezervleri ve uzun yıllar kullanılabilecek bol miktarda kömür bulunması, kömür gazlaştırma ve CTL prosesini, sıvı yakıt üretiminde sürdürülebilir bir çözüm olarak sunmaktadır. Özellikle doğal gaz kıtlığı çeken ve çok yüksek fiyata doğal gaz satın alan ülkelerde, kömür gazlaştırma prosesi ekonomik açıdan öne çıkmaktadır. Bu ülkelerden biri olan Asya'da CTL prosesinin ekonomisiyle ilgili bir durum çalışması yapılmıştır [98].

Bu çalışmada KBR şirketi TRIM teknolojisini FT ünitesine entegre etmiştir. CTL tesisinin ekonomik analizi Çizelge 2.13'te yer almaktadır [98].

Çizelge 2.13: Kömürden sıvı yakıt üretim (CTL) tesisinin ekonomik analizi [98].

CTL tesisinin ekonomik analizi	
Sıvı Yakıt Üretim Kapasitesi (Dizel+Nafta)	20,000 bpd
FT Dizel	14,671 bpd
Nafta	5,329 bpd
Basılan CO ₂	12,740 tpd
Kömür Maliyeti	20Dolar/ton=1.8Dolar/MMBTU
Elektrik Maliyeti	100 Dolar/MWh
Hava Ayırma Ünitesinde Kullanılan Oksijenin Maliyeti	Semaye Maliyenin %3.5
Yönetim	Semaye Maliyenin %0.5
Sermaye Yapısı Oranı (borç/özsermaye oranı)	%60 / %40
Finansman Maliyeti	%8
Kurumlar Vergisi Haddi	%25
Tesisin Kullanımı	330gün/yıl

Bpd:Barril per day (varil/gün)

Tpd:Tone per day (ton/gün)

KBR şirketinin Asya için yaptığı bu çalışmada ham petrolün varili 55-65 Dolar (2007'deki dolar fiyatı) olduğunda, CTL prosesi ham petrolün rafinesine göre ekonomik açıdan çok daha cazip olacağını tahmin etmişlerdir. Ham petrolün varil fiyatı bu aralıklarda olduğunda, ham petrolden elde dizelin fiyatı 2.41 \$/Galon iken, CTL'den elde edilen dizelin fiyatının 1.7 ile 2.0 \$/Galon aralığındadır. Bugünkü ham petrolün varil fiyatı yaklaşık 60\$'dır. Böylece günümüzde de CTL'den elde edilen dizelin galon fiyatının ham petrolden elde edilen dizelin fiyatından uygun olduğu söylenebilir.

3. TÜRKİYE’DEKİ YERALTI KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİNE UYGUN KÖMÜR YATAKLARININ SEÇİLMESİ

Türkiye’nin 13,4 milyar tonu görünür rezerv niteliğinde olmak üzere, toplam 13,9 milyar ton linyit rezervi bulunmakta olup bu linyitlerin yaklaşık %60’ı 1500kcal/kg’ın altında , yaklaşık %7’si ise 3000 kcal/kg’ın üzerinde ısı değere sahiptir [1,99]. Bu oranlar göz önüne alındığında linyitlerimizin ısı değeri oldukça düşük olduğu görülmektedir. Türkiye önemli ölçüde kömür rezervlerine sahip olmasına rağmen, bu rezervlerin düşük ısı değeri olmalarından dolayı ekonomik açıdan klasik madencilikle değerlendirilememektedir. Yeraltı kömür gazlaştırma tekniği ise bu kömürlerden yararlanabilmek için bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır. Bu bölümde yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygun olan kömür yataklarımız incelenmiştir.

3.1 Yeraltı Kömür Gazlaştırma İçin Yer Seçimi ve Değerlendirilmesi

Yeraltı kömür gazlaştırma (YKG) prosesi için saha seçimiyle ilgili kriterler kömürün fiziksel ve jeolojik özellikleri, rezerv durumu, bulunduğu bölgenin özelliği ve bölgeye ulaşım olarak sayılabilir. Kömürün fiziksel ve jeolojik özellikleri Bölüm 2.6.1 ve Bölüm 2.6.2’de verilmiştir. Bölgenin özellikleri açısından ele alınacak olunursa, bölge özelliği; çalışma koşulları, proses ekonomisi, proses verimi ve çevre kirliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Öncelikle bölgenin ulaşımının kolay ve düz bir alan olması gerekmektedir. Ekipman ve malzemelerin taşınımı ve kurulumu için bu önemli bir özelliktir. Proses verimliliği ve ekonomi açısından incelenecek olursa proses sonucu oluşan yapay gazın düşük ısı değeri olması durumunda, bu gazdan faydalanmak için kurulacak güç tesisinin bölgeye yakın olması istenir. Tesisin sahaya yakın olmaması durumunda, gazın taşınımının maliyeti, düşük ısı değeri gazdan elde edilecek gücün getirisinden fazla olacaktır. Çevre kirliliği açısından ele alındığında ise, yeraltı kömür gazlaştırma prosesi için oldukça önem taşıyan yeraltı suları dikkatle araştırılmalıdır. Proses sonucu açığa çıkan kül ve diğer atıkların yeraltı sularını kirletme riski olduğundan bölgenin yeraltı suyu açısından zengin olmaması gerekmektedir.

3.2 Yeraltı Kömür Gazlaştırma Prosesi İçin Kömür Yatağının Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve Kömür Yatağı Seçimi

Bir bölgenin yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygunluğunu değerlendirmek adına dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler kömürleşme derecesi, kömürün ısı değeri, kömürün kül ve nem içeriği, kömür yatağının derinliği, kömür yatağının kalınlığı, bölgeye ulaşım ve gazlaştırma sonucu oluşan yapay gazın taşıma işlemi gerekmeden bölgeye yakın bir sahada değerlendirilebilir olmasıdır.

MTA Türkiye Linyit Envanteri ve MTA raporları incelenerek [100,101], kömür kalınlığı 2m'nin altında olmayan, kömür damar derinliği 50 ile 460m arasında olan, kül içeriğinin %60'dan, nem içeriğinin ise %40'tan düşük olduğu ve ısı değeri 2000 kcal/kg'den yüksek olduğu bazı kömür yatakları belirlenmiştir. Ayrıca coğrafi açıdan incelenen sahaların ulaşım kolaylıkları ve rezerv miktarlarıyla birlikte değerlendirilmiştir. Bu çalışma sonucunda Kütahya-Seyitömer-Çobanköy, Kütahya-Tunçbilek-Ömerler, Muğla-Yatağan-Eskihisar, Manisa-Soma-Eynez, Manisa-Soma-Işıklar, Bolu-Göynük-Himmetoğlu, Bursa-Keles-Harmanalan, Tekirdağ-Saray-Edirköy ve Tekirdağ-Malkara-Pirinççeşme sahaları yeraltı kömür gazlaştırma prosesi için uygun sahalar olarak değerlendirilmektedir.

Ülkemizin en büyük linyit rezervlerinden biri olan Afşin-Elbistan ve Konya-Karapınar linyitlerimizin ısı değerleri 1300kcal/kg'dan düşüktür. Yer altı kömür gazlaştırma prosesi özellikle düşük ısı değerli kömürlere uygulanmasına rağmen; bu denli düşük ısı değerli kömürler, ekonomik fayda sağlamaya yetecek ölçüde ısı değere sahip yapay gaz(syngas) üretimine müsait olmadığı için bu linyit yataklarının yer altı kömür gazlaştırma prosesine uygun olmadığı düşünülmüştür.

Kütahya – Seyitömer - Çobanköy, Kütahya – Tunçbilek - Ömerler, Muğla - Yatağan-Eskihisar, Bolu-Göynük-Himmetoğlu, Bursa-Keles-Harmanalan, Tekirdağ-Saray-Edirköy ve Tekirdağ-Malkara-Pirinççeşme yataklarının özellikleri Çizelge 3.1'de, Manisa-Soma-Eynez yatağının özelliği Çizelge3.2'de, Manisa-Soma-Işıklar yatağının özellikleri ise Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.1: Bazı bölgelerdeki kömür yataklarımızın özellikleri [100,101].

Bölge	Kütahya- Seyitömer Çobanköy	Kütahya- Tunçbilek (Ömerler)	Muğla- Yatağan Eskihisar	Bolu- Göynük Himmetoğlu	Bursa- Keles Harmanalan	Tekirdağ- Saray Edirköy	Tekirdağ- Malkara Pirinççeşme
Kömür Sınıfı	Linyit	Linyit	Linyit	Linyit	Linyit	Linyit	Linyit
Görünür Rezerv (mton)	153	283	37	37.2	17.6	635	
Nem %	40.8	15	39	30.9	38	43.6	27.2
Kül %	8.8	27	14.2	11.7	19.8	13.9	17.7
Kükürt %	3	2.63	1.8	1.4	1.94	4.9	1.5
Sabit Karbon %	25	31.5	19.4	29	19.3	19.4	29.5
Uçucu Madde %	25.5	26.6	27.3	28.5	22.9	23.1	25.7
Kül Erime Sıc. (°C)	1211	1059	1310	1289	1280	1440	1340
Koklaştırma Özelliği	Siyah Toz Halinde	Siyah Toz Halinde	Siyah Toz Halinde	Siyah Toz Halinde	Siyah Toz Halinde	Siyah Toz Halinde	Siyah Toz Halinde
Alt Isıl Değeri (kcal/kg)	2850	3615	2556	2757	2357	2099	3245
Yatak Derinliği (m)							
Min.	Mostra	Mostra	Mostra	Mostra		5.0	
Genel	-	-	42.0	100.0	50.0	60.0	53
Max.	150.0	828.0	109.0	290.0	160.0	120.0	
Yatak Kalınlığı (m)							
Min.	1.5	0.9	1.20	-	8	0.3	
Genel	36.8		10.2	5.1	20	2.60	3.28
Max.	15.7	14.8	18.1	10.2	39	4.0	
Kömür Yayılım Alanı (km ²)	35	23	8.9	7.8	3	6.9	
Coğrafi Özellik							
Rakım(m)	1300	860	950	720	1050	140	250
Sahaya Ulaşım	Asfalt Yol	Asfalt Yol	Asfalt Yol	Asfalt Yol	Asfalt Yol	Asfalt Yol	Asfalt Yol

Çizelge 3.2: Manisa-Soma-Eynez kömür yatağının özellikleri [100,101].

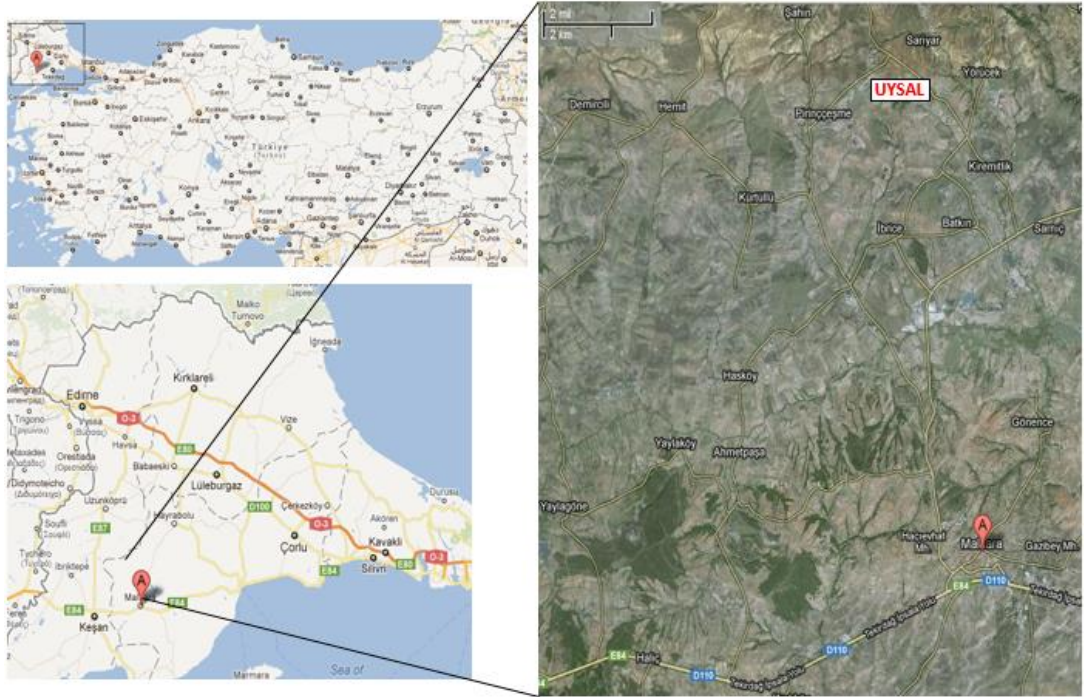
Manisa-Soma-Eynez			KP ₁	KM ₃	KM ₂	Üst Damar
Kömür Sınıfı	Linyit	Yatak Derinliği (m)				
Görünür Rezerv (mton)	380.6	Min.				21.8
Nem %	13.6	Genel				150
Kül %	13.4	Max.				498.9
Kükürt %	0.8	Yatak Kalınlığı (m)				
Sabit Karbon %	40.1	Min.	0.75	0.35	0.3	
Uçucu Madde %	32.9	Genel	3.0	3.5	15.0	
Kül Erime Sıcaklığı (°C)	1340	Max.	8.86	7.75	30.6	
		Kömür Yayılım Alanı (km ²)	:16			
Koklaştırma Özelliği	Siyah Toz Halinde	Coğrafi Özellik				
		Rakım	:175			
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	4931	Sahaya Ulaşım	:Asfalt Yol			

Çizelge 3.3:Manisa-Soma-Işıklar kömür yatağının özellikleri [100,101].

Manisa-Soma-Işıklar			KM ₂	KM ₃	KP ₁
Kömür Sınıfı	Linyit	Yatak Derinliği (m)			
Görünür Rezerv (mton)	40	Min.	18.5	9.6	40.5
Nem %	11.2	Genel	205.9	208.6	188.7
Kül %	24.3	Max.	535	426	420.8
Kükürt %	0.7	Yatak Kalınlığı (m)			
Sabit Karbon %	31.5	Min.	2	1	2.9
Uçucu Madde %	33.1	Genel	17.2	6.2	7.4
Kül Erime Sıcaklığı (°C)	1375	Max.	57	10	12.7
		Kömür Yayılım Alanı (km ²)	:50		
Koklaştırma Özelliği	Siyah Toz Halinde	Coğrafi Özellik			
		Rakım	:175		
Alt Isıl Değer (kcal/kg)	3989	Sahaya Ulaşım	:Asfalt Yol		

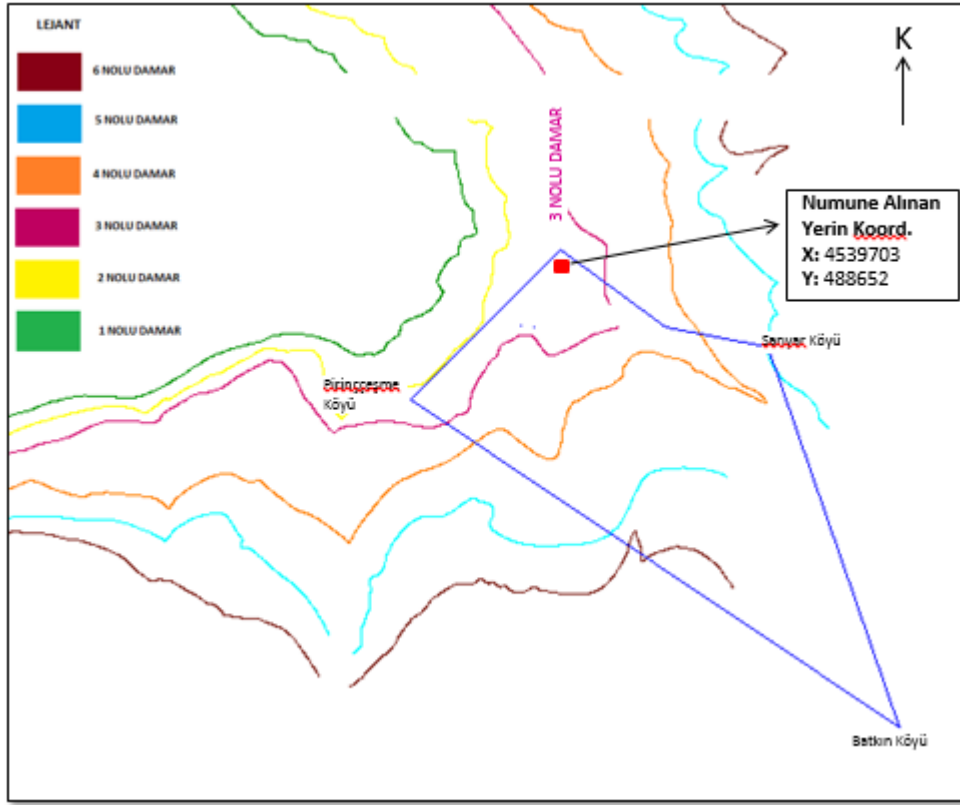
3.2.1 Malkara-Pirinççeşme sahası 3 nolu damar ve özellikleri

Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te yer altı kömür gazlaştırma prosesinin uygulanabileceği linyit rezervleri verilmiştir. Proje çalışmalarımızda yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygun bulunan bu sahalardan Trakya Malkara bölgesinde yeralan ve projemize destek veren Uysal Madencilik şirketine ait Malkara Pirinççeşme sahası seçilmiştir. Tekirdağ ilinin 57 km batısında yer alan Malkara İlçesi'nin Pirinççeşme köyü Uysal Madencilik firmasının konumu Şekil 3.1'de verilmiştir.



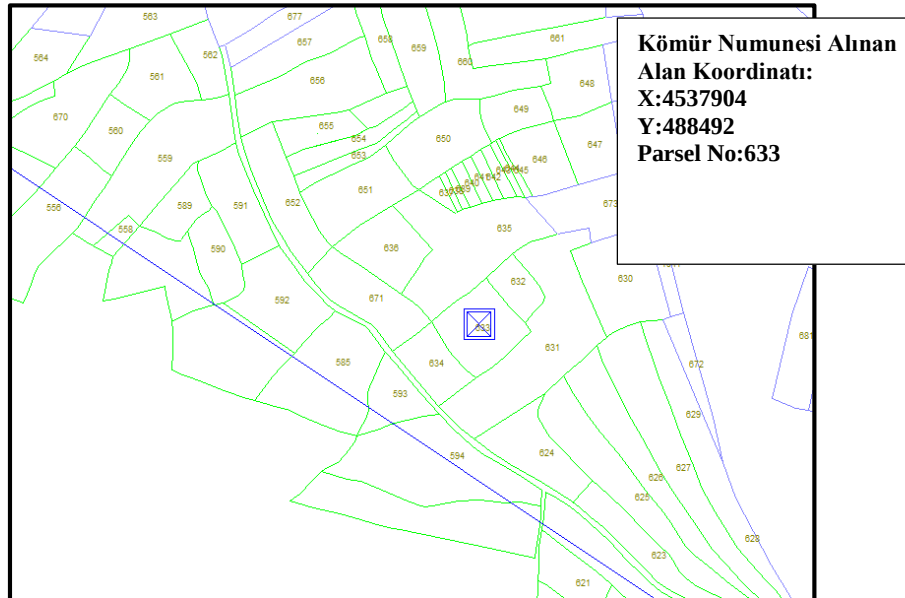
Şekil 3.1: İnceleme alanını gösteren yer buldurular haritası.

Malkara yöresinde yer alan kömürler Trakya Tersiyer havzasının güneyinde yer alıp çok sayıda damarlar halinde bulunmaktadır. Malkara Pirinççeşme sahası Şekil 3.2'de görüldüğü gibi 6 damardan oluşmakta olup, Uysal Madencilik Şirketi açık ocak işletmesinde 3 nolu damarda çalışmaktadır.



Şekil 3.2: Kömür sahasının ve civarının damar mostra haritası.

Uysal Madencilik firmasından YKG deneylerinde kullanılmak üzere temin edilen kömür numuneleri reaktör boyutlarına uygun olacak şekilde seçilmiştir. Şekil 3.3'te gazlaştırma deneylerinde kullanılmak üzere alınan numunelerin koordinat bilgileri verilmiştir.

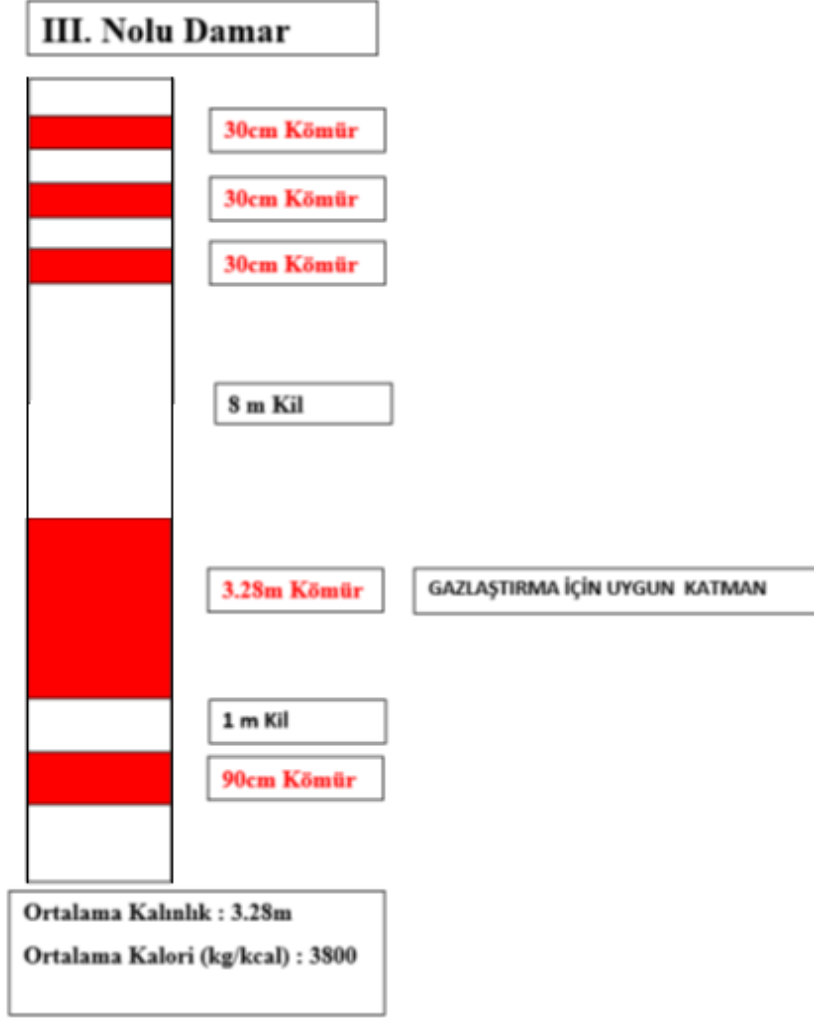


Şekil 3.3: Deneylerde kullanılmak üzere alınan numunelerin koordinat bilgileri.

Malkara Pirineşme sahası Oligosen yaşlı olup, Danişmen formasyonu içinde oluşmuştur. Ruhsat sahasında yapılan sondajlardan ve önceki yıllarda çalışan panolardan edinilen bilgilere göre kömür damarının geometrisi belirlenmiştir. Saha, üst bantlar, orta(ana) damar ve alt(tek) damar olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Üst bantlar, sahanın üst seviyelerindeki 5-7 metrelik zonda olup, kalınlığı 10-25 cm arasında değişen üç ayrı kömür katı şeklindedir. Bu kısım işletilememektedir. Orta damar ise 2-3 metrelik killi kömür (5-10 cm kömür bantlı) den sonra 10-20 cm kalınlığında kömür bantı, 10-20cm kara kesme 40-50 cm kömür bandı, 25-30 cm kil ve 20-25 cm kömür bandından oluşmaktadır. Bu damardaki kömür bantları işletilmektedir. Toplamda 3-4m kömür stambının 1-1.5m'lik kömür bandı işletilebilmektedir. Son olarak sondajların hepsinde gözlenmeyen ve orta kat ile aralarında 1-7 metre arası değişen kalınlıkta kilden sonra 70-90 cm arası kalınlıkta kömür damarından oluşan alt damar bulunmaktadır.

3 nolu damarın özellikleri aşağıdaki gibidir ve Şekil 3.4'te şematize hali görölmektedir.

- Damar derinliği ortalaması 53 metre olup,
- Damar kalınlığı ortalaması 3,28 metredir. Tüm karotlu sondajlardan edinilen bilgilere göre 3 Nolu Damar ortalama 3,28m kalınlığa sahiptir. Bu değer 3 Nolu damarın yalnızca orta seviyesine aittir.



Şekil 3.4: 3 nolu damarın kesit görünümü.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

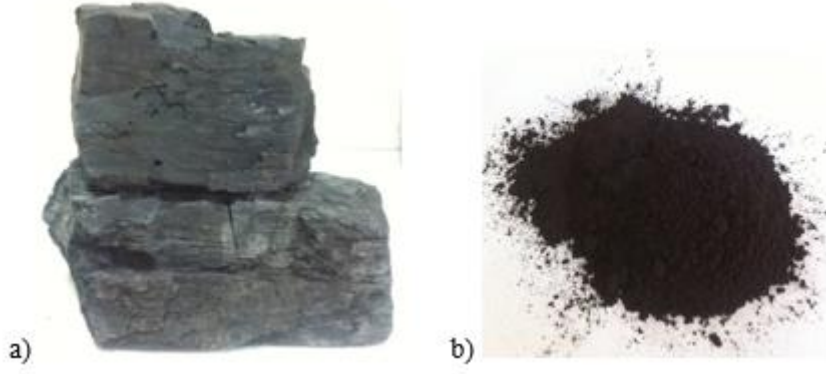
4.1 Malkara Pirinççeşme Kömürünün Özellikleri

Tezin üçüncü bölümünde ülkemizdeki yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygun kömür yatakları belirlenmiş ve bu kömür yataklarından projemize destek vermeyi kabul eden Malkara Pirinççeşme Köyü 3nolu damarını işleten Uysal Madencilik Şirketi'nden kömür blokları temin edilmiştir. Öncelikle temin edilen kömürlerin analizleri TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde gerçekleştirilmiş, ardından İTÜ Makine Fakültesi Yanma Laboratuvarında kurulan sistemde gazlaştırma deneyleri için kullanılmıştır.

4.2 Kömür Numunesinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan linyit numunesi Malkara ilçesinin Pirinççeşme köyündeki Uysal Madencilik firmasının işletme alanındaki 3 nolu damardan alınmıştır.

Analiz için alınan kömür numunesi çeneli bir kırıcıda kırılıp elenerek 250 μm 'nun altına indirilmiştir. Elekten geçen kömürlere dörtleme tekniği uygulanmıştır. Dörtleme tekniğinde numune, bir tepsi üzerine serilip 4 eşit kısma bölünür, karşılıklı kısımlar alınıp, başka bir tarafa konur. Kalan numune miktarına göre işlem tekrar ettirilir ya da kömür örneği alınmış olur. Yapılan işlemin ardından kalan numune miktarı (750 g-1kg) fazla olmadığı için işlem tekrar ettirilmemiştir. Bu numune tartıda tartılıp 500 g'ı alınıp 40 °C'ye ayarlı NÜVE marka etüvde kaybettiği nem stabil duruma ulaşana kadar bekletilmiştir. Yaklaşık bir gün bekletildikten sonra etüvden çıkarılan kömür tekrar tartılarak kaybedilen su miktarı (yüzey nemi) bulunmuştur. Yüzey nemini kaybeden kömür, öğütücü değirmende 0,250 μm 'a indirilmiştir. Öğütülen kömür yaklaşık 100 g'lık kavanozlara konup analize hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.1.a'da Uysal Madencilikten temin edilen kömürün Şekil 4.1.b'de ise analizlere hazır hale getirilmiş kömür örneği verilmiştir.



Şekil 4.1: Deneylerde kullanılan kömürün görüntüsü (a) Blok kömür. (b) Analize hazır hale gelmiş kömür.

4.3 Kullanılan Cihazlar ve Analiz Yöntemleri

Kömürün özelliklerinin belirlenmesi ve yer altında gazlaştırması için uygunluğu ancak standart kömür analizlerinin bilinmesi ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle hazırlanan kömür numunelerinin ısı değer ölçümleri, kısa ve elementel analizleri ASTM standartlarına uygun olarak TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

4.3.1 Kısa analiz

Numunenin nem, uçucu madde, sabit karbon ve kül tayini, aynı numune ile Şekil 4.2’de gösterilen LECO TGA-701 Thermogravimetric Analyser cihazında, ASTM D 7582-2012 standart test metodu uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Analizde yaklaşık 1 gr kömür numunesi kullanılmıştır. Bu kömür numunesi ağırlığı ölçülen krozelere yerleştirilmiştir. Krozelerin cihaz içerisindeki hareketi kuru hava ile mümkün olmaktadır. Kuru hava dışında analiz için %99.5 saflıkta azot ve oksijen gazı kullanılmaktadır. Nem tayini 107 °C’de gerçekleşmektedir. Nem tayini esnasında krozenin kapakları açıktır.

Nem tayinin yapılmasından sonra numunedeki uçucu madde miktarının belirlenmesi için krozelerin kapakları kapatılarak ortamdaki azot gazı geçirilmiştir. Fırın sıcaklığı 107 °C’den 950 °C’ye ulaştığında yaklaşık yedi dakika bu sıcaklıkta kalır. Bu sürenin sonunda numunedeki uçucu madde miktarı cihaz tarafından okunmuştur.

Uçucu madde tayinini takiben kül tayini yapılmaktadır. Fırın sıcaklığı 950 °C’den 600 °C’ye indirilir ve krozelerin kapakları kaldırılır. Numunedeki kül miktarının analizi için fırın atmosferi oksijen gazına çevrilir. Bir saat boyunca sıcaklık 600 °C’den yaklaşık 750 °C’ye çıkartılır. Numuneler ve kroze sabit ağırlığa ulaşınca kadar deney

devam eder ve kül miktarı da bu şekilde belirlemiş olur. Numunenin nem, uçucu ve kül miktarları Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.2: Nem, uçucu ve kül analizini yapan cihazın görünümü.

Çizelge 4. 1: Malkara kömür numunesinin kısa analiz sonuçları.

	Analiz	Orjinal Numunede	Havada Kuru Numunede	Kuru Numunede
	Nem	25,17	15,27	-
Kısa Analiz (%)	Kül	17,95	20,33	23,99
	Uçucu Madde	28,74	32,55	38,41
	Sabit Karbon	28,14	31,86	37,60

4.3.2 Elementel analiz

Numunenin elementel analizinde Şekil 4.3’te görülen TruSpec CHN model elementel analiz cihazı kullanılarak ve ASTM D-5373-14 standart test metodu ile C,H,N içerikleri belirlenmiştir. C,H,N,S ve kuru baz da kül içerikleri toplamı 100’den çıkarılarak elementel oksijen içeriği hesaplanmıştır.

Karbon, hidrojen ve azot tayini için aynı kömür numunesi kullanılırken, kükürt tayini için farklı bir numune ve cihaz kullanılmaktadır.

Karbon, hidrojen ve azot tayininde; bir analiz döngüsü 3 aşamada gerçekleşmektedir: sürüklenme, yanma ve analiz. Sürüklenme aşamasında örnek yükleme anında içeri dolan atmosferik gazların ortamdan uzaklaştırılması sağlanır. Balast hacmi (yanma gazlarının toplandığı hacim) ve gaz hatları da sürükleyici gaz ile temizlenir. Yanma aşamasında örnek sıcak fırının (950 °C) içine bırakılır, hızlı ve tam yanmanın sağlanması için ortama oksijen ilavesi yapılır. Yanma ürünleri, daha iyi oksidasyonun sağlanması ve partikül uzaklaştırılması için ikinci fırından (850°C) geçirilir. Yanma ürünleri toplama haznesinde toplanır. Analiz aşamasında numunenin yakılması için oksijen fırının içine dolar. Yanma işleminin ardından, karbon miktarı için CO₂ dedektörü ile CO₂; hidrojen miktarı için H₂O dedektörü ile H₂O; azot için ise NO_x miktarı ölçülür.



Şekil 4.3 : C,H,N tayini yapan cihazın görünümü.

Numunenin elementel analizinin sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Kükürt tayininde; Şekil 4.4’te görülen LECO TruSpec S cihazı kullanılmıştır. ASTM D 4239-2014 standart test metodu uygulanarak numunedeki toplam kükürt miktarı saptanmıştır. Kükürt tayini cihazın fırın kısmında yüksek sıcaklığa dayanıklı seramik tüp içerisinde, yüksek sıcaklıkta yakma yöntemi ile yapılır. Belirli bir kütledeki(0,2

gr) kömür numunesi oksijen akımında en az 1350 °C sıcaklıktaki seramik tüp fırında yakılır. Oluşan kükürt dioksit emisyonları infrared absorpsiyon yöntemi ile tayin edilmiştir. Numunenin kükürt miktarı Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.4: Kükürt tayini yapan cihazın görünümü.

Çizelge 4.2: Malkara kömür numunesinin elementer analiz sonuçları.

Madde	Kuru Numunede (%ağ.)
C (Karbon)	57,02
H (Hidrojen)	3,99
N (Azot)	1,44
S (Kükürt)	5,41
Kül	23,99
Oksijen	8,15

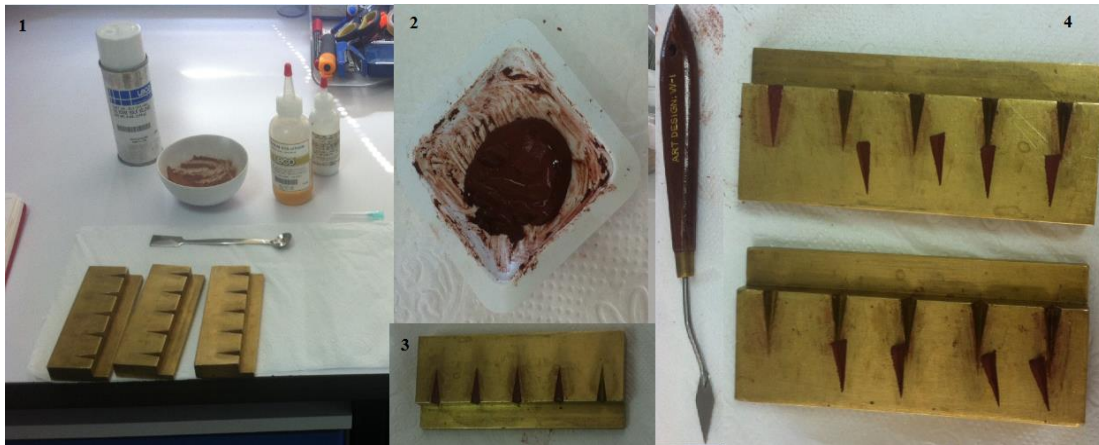
4.3.3 Kül ergime analizi

Kül deformasyon, yumuşama, yarı küreselleşme ve ergime sıcaklıkları, ASTM D 1857/D 1857 M-04’e göre Şekil 4.5’te görülen LECO AF-700 cihazı kullanılarak TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde yapılmıştır.



Şekil 4.5: Kül ergime analizi yapan cihazın görünümü.

Öncelikle kömür Fisher coal analyzer cihazında 750 °C’de yakılır. İşlem dört saat sürer ve kömür kül haline gelir. İşlem sonrasında kül 75 µm’luk elekten elenir ve 800°C’de bir saat boyunca tekrar yakılır. Bir saatin ardından kül soğumaya bırakılır. Soğuma işleminin ardından piramit yapımına geçilir. Piramit yapımının aşamaları Şekil 4.6’da verilmiştir. Piramidin yapımı için dextrin solüsyonu ile piramit kalıbı kullanılır. Dextrin solüsyonu ile kül belli oranlarda karıştırılarak hamur kıvamında bir madde elde edilir. Hamur piramit kalıbına düzgün bir şekilde yerleştirildikten sonra kurumaya bırakılır. Kuruma işlemin ardından piramit şeklindeki hamur krozeye tutkalla sabitlenerek 400 °C’deki analiz cihazına yerleştirilir.



Şekil 4.6: Kül ergime analizi yapan cihazın görünümü.

Sıcaklığın artmasıyla piramitin sırasıyla deformasyon, yumuşama, yarı küreselleşme ve ergime sıcaklıkları cihaz tarafından okunur. Kül ergime analiziyle elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3: Malkara kömür numunesinin kül ergime analiz sonuçları.

Sıcaklıklar	Analiz Sonuçları (°C)
IDT (İlk Deformasyon Sıcaklığı)	1196
ST (Yumuşama Sıcaklığı)	1230
HT (Yarıküre Sıcaklığı)	1313
FT (Erime Sıcaklığı)	1404

Çizelge 4.3'ten görüleceği üzere deneylerde kullanılan kömürün kül ergime sıcaklığı 1404 °C'dir.

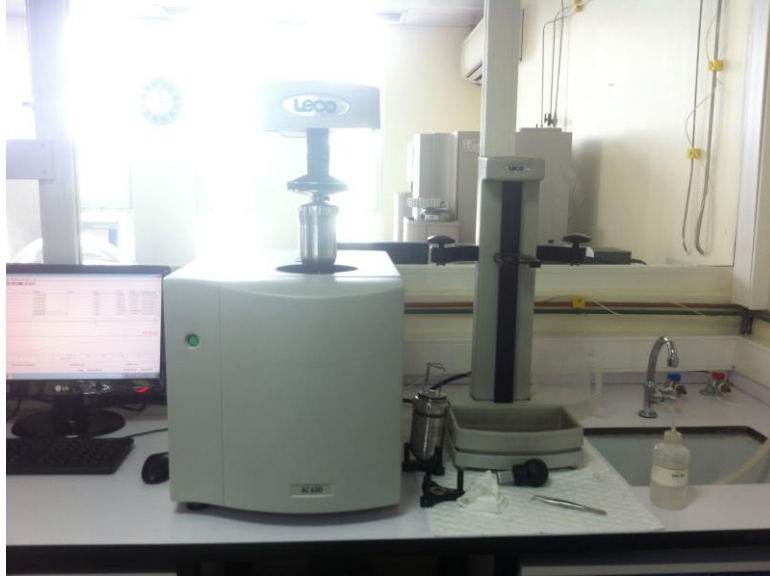
4.3.4 Isıl değer

Kömürün ısı değeri, kömürün yaşına, türüne ve yapısındaki yanmayan maddelerin miktarına bağlıdır. Kalorimetre cihazında gerçekleşen, yakma ile saptanan yanma ısisına üst ısı değeri; numunenin neminden kaynaklanan suyun buharlaşma gizli ısisının üst ısı değerden çıkarılması ile elde edilen ısı değeri alt ısı değeri denilmektedir.

Numunenin ısı değeri analizi, ASTM D 5865 standardına göre Şekil 4.7'de görülen LECO AC-600 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu metod da tartımı yapılmış numune (1 gr) standart koşullarda, elektrikli ısıtma ile sıcaklığın sağlandığı bir kalorimetre bombasında, 30 bar atmosfer altında oksijenli ortamda yakılmıştır. Yanma sonucu ortaya çıkan ısının kalorimetre kabındaki miktarı bilinen suyun sıcaklık derecesinin artımına ve sistemin ortalama gerçek ısı sığasına göre ısı değeri tayin edilmiştir. Yanma ısisı, yanma işleminden önce, yanma işlemi anında ve yanma işleminden sonraki sıcaklığın izlenmesi ve bunlara termo-kimyasal ve ısı değişimi düzeltmelerinin uygulanması ile hesaplanır. Orjinal bazda üst ısı değeri cihaz tarafından otomatik olarak verilir. Alt ısı değeri ise yakıtın hidrojen içeriği ve nem miktarları kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$\text{Alt ısı değeri}^* \left(\frac{J}{g} \right) = \text{Üst ısı değeri}^* - 206 \times \text{Hidrojen}^* (\%) \quad (4.1)$$

*Tüm veriler kuru bazdadır.



Şekil 4.7: Isıl değer analizini yapan cihazın görünümü.

Numunenin ısı değer analiz sonuçları Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4: Malkara kömür numunesinin ısı değer analiz sonuçları.

	Analiz	Orjinal Numunede	Havada Kuru Numunede	Kuru Numunede
Isıl Değer kcal/kg	Alt Isıl Değer	3602	4151	4998
	Üst Isıl Değer	3894	4409	5203

4.3.5 Kömürdeki kükürt türlerinin tayini

Kömür içerisinde genellikle üç tür kükürt bulunmaktadır. Bunlar sülfat, pridik ve organik kükürttür. Bunların ikisi olan pridik ve organik kükürt, toplam kükürdün büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Kömürdeki bu kükürt türlerinin tayini ASTM D 2492 standardına göre yapılmaktadır. Bu analiz ile kömürdeki sülfat ve pridik kükürt miktarı bulunurken, organik kükürt miktarı toplam kükürt farkından hesaplanarak bulunur.

$$\text{Organik kükürt} = \text{Toplam kükürt} - (\text{Sülfat} + \text{Pritik kükürt}) \quad (4.1)$$

Bu metod da sülfat ve pritik kükürdün HCl ve HNO₃’deki farklı çözünürlüklerini baz alarak kükürt çeşitlerinin miktarları hesaplanır. Sülfat ve pritik kükürt HNO₃’de çözünürken, sadece sülfat seyreltik HCl çözeltisinde çözünmektedir. Bu nedenle kömürdeki sülfat kükürdünün tayini için HCl çözeltisi kullanılmaktadır. Analizde kömür numunesi HCl çözeltisine eklendikten sonra filtreden geçirilir ve çözünmeyip

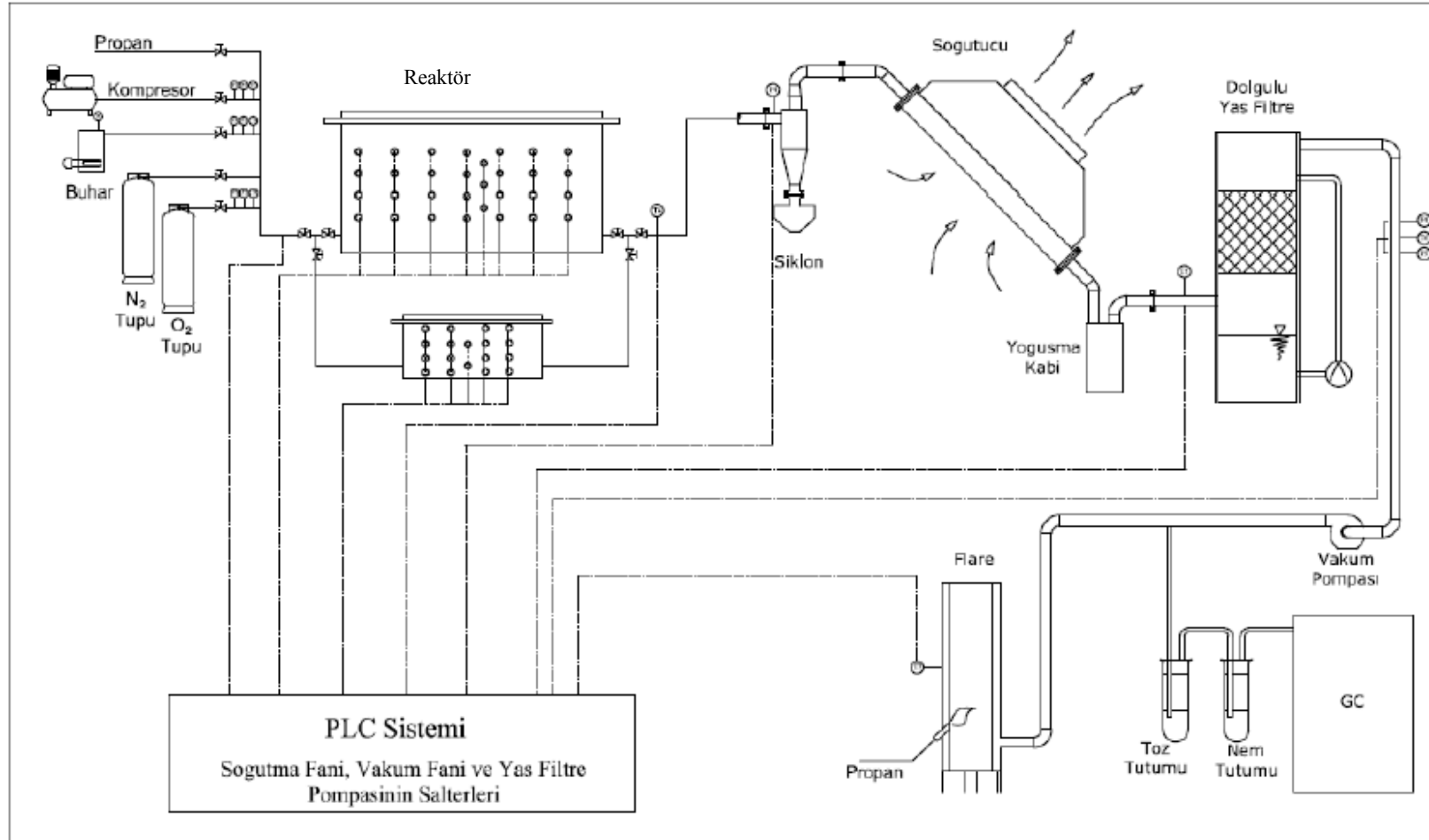
filtre üstünde kalan kısım piritik kükürt tayininde kullanılırken, çözünen kısımdaki sülfat kükürdü gravimetrik olarak belirlenir. Piritik kükürt tayininde ise HCl çözeltisinde çözünmeyen kömür numunesi HNO₃'de çözündürülür. Tekrar filtre edilir, çözünmeyen kısım atılır. Kalan çözelti kısmındaki demir iyonlarından piritik kükürt miktarına geçilir. Kömür içerisindeki kükürt türlerinin analiz sonuçları Çizelge 4.5'teki gibidir.

Çizelge 4.5: Malkara kömür numunesinin kükürt türleri analiz sonuçları.

Analizler	Kuru Numunede (%ağ.)
Sülfat Kükürdü	0,113
Piritik Kükürt	2,520
Toplam kükürt	5,41
Organik kükürt	2.777

4.4 Deney Düzenegi

Yeraltı gazlaştırma prosesinin deney düzeneginin akış şeması Şekil 4.8'de, İTÜ Makine Fakültesi Yanma Laboratuvarı'na kurulan sistemin görünümü ise Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kullanılan ekipmanlar sırasıyla, gazlaştırma ajanlarının girişi-reaktör-siklon-ısı değiştirici-H₂S yıkama kolonu-vakum pompası ve flare'dir. Sıcaklık gazlaştırma için çok önemlidir. Bu nedenle deney düzeneginin belirli bölgelerine(gazlaştırma kanalı, kömür bloğu, örtü tabakası ve bazı ekipmanlardan sonra) termo elemanlar yerleştirilmiştir. Ayrıca basınç ölçümü için basınç transmitteri, debi ölçümü için ise debi metreler kullanılmıştır. Bu noktalardan alınan verilerin takip edileceği bir SCADA sistemi tasarlanmıştır.

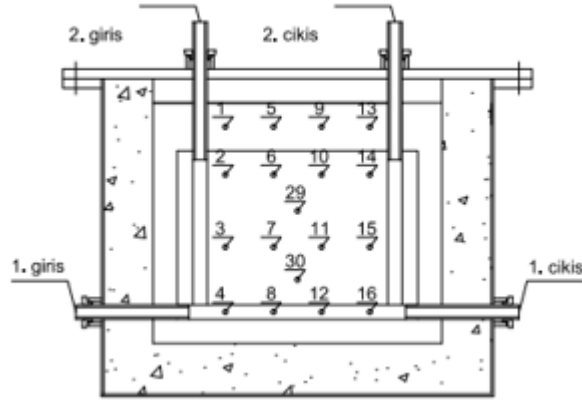


Şekil 4.8: Yarı pilot ölçek yeraltı kömür gazlaştırma sisteminin şematik şekli.



Şekil 4.9: Yarı pilot ölçek yeraltı kömür gazlaştırma deney düzeneğinin görünümü.

Gazlaştırlacak olan kömürlerin boyutları 0.35x0.35x0.5 m olarak seçilmiş ve kömür boyutuna uygun bir reaktör tasarlanmıştır. Seçilen reaktörün boyutları refrakter malzeminin kalınlığı da hesap edilerek 0,70 x 0,70 x 0,85m olarak seçilmiştir. Reaktör duvarları sıcaklığa dayanıklı ve ısı iletim katsayısı düşük refrakter beton ile kaplanmıştır. Gazlaştırma reaktörünün görünümü Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10'da ayrıca reaktör üzerine yerleştirilen termoelemanların numaraları da belirtilmiştir.



Şekil 4.10 : Reaktörün görünümü.

Gazlaştırma ajanı olarak kullanılacak buhar üretici, oksijen tüpü ve blower reaktörün yakınına konuşturulmuştur. Hava ve gaz karışımının(buhar+oksijen) enjeksiyon kuyusuna bağlantısı valf ve borularla sağlanmıştır. Gazlaşma sonucu üretim kuyusundan toplanan yapay gazdaki tozun tutulması için temin edilen siklon reaktörden sonraki kısımda yer almaktadır. Siklondan geçen yapay gazın sıcaklığını düşürmek için deney sisteminde siklondan sonra bir ısı değiştirici yer almaktadır. Isı değiştirici çıkışında soğuyan yapay gazdaki kükürt bileşiğinin giderilmesi ve yapay gazın temizlenmesi için H₂S soğurucu bulunmaktadır. Temizlenen gazın bileşiminin belirlenmesi için gaz kromatografi cihazı kullanılmıştır. Gazın sistem boyunca ilerlemesini sağlamak ve gaz kayıplarını önlemek için sistemin negatif basınç altında çalıştırılması gerekmektedir. Bu da vakum pompası ile sağlanmaktadır. Prosesin son aşaması olarak ise elde edilen yapay gaz temizleme ünitesinden geçirilip örnekleme alındıktan sonra flare'da gazın tam yanması gerçekleştirilerek atmosfere atılması sağlanmaktadır.

4.4.1 Deney düzeneği ölçme sistemi tasarımı

Yukarıda özellikleri belirtilen cihazların tasarımı ve temini ile yeraltı kömür gazlaştırma deneyleri yapılarak ölçümü sağlanan büyüklükler aşağıda yer almaktadır.

- Kömürdeki, örtü tabakasındaki, gazlaştırma kanalındaki sıcaklık
- Reaktördeki basınç
- Gazlaştırma ajanlarının ve yapay gazın basıncı
- Gazlaştırma ajanlarının ve yapay gazın debisi
- Yapay gazın bileşimi
- Yapay gazın kalorifik değeri

Sıcaklık gazlaştırma için çok önemlidir. Bu nedenle deney düzeneğinin belirli bölgelerine termo elemanlar yerleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinin dışında deney sisteminde çeşitli noktalarda basınç ölçümü ve debi ölçümü yapılmaktadır.

Deney süresince sıcaklık ve basınç ölçümleri sürekli olarak SCADA sistemden takip edilmektedir. SCADA sisteminin görünümü Şekil 4.11’de verilmiştir. SCADA sisteminde termo elemanların sıcaklık değeri, basınç transmitterlerindeki değeri ve basınç farklarının okunmasının yanında buhar üreticindeki buhar basıncı değeri de okunmaktadır. Ayrıca kontrol paneli ile vakum pompası, soğutma fanı, buhar üretici, kompresör ve su pompası kontrol edilmektedir.



Şekil 4.11: SCADA sisteminin görünümü.

4.4.2 Deney düzeneği ölçme sisteminin kalibrasyonu

Deney ölçme sisteminin doğruluğuna emin olmak için, deneylere başlamadan önce ölçüm cihazlarının kalibrasyonu gerçekleştirilmelidir. Bu nedenle termoelemanlar ve hava ile oksijen debileri kalibre edilmiştir. Termoelemanların kalibrasyonu, akreditasyon sürecini tamamlamış bulunan Penta Otomasyon ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. ve Ltd. Şirketinden temin edilmiş 50cm x 40cm x 20cm (boy x yükseklik x en) boyutlarında bir fırın kullanılarak, reaktör üzerindeki Tr12 termoelemanıyla gerçekleştirilmiştir. Bu şirkete ait kalibrasyon sertifikası EK A'da verilmiştir. Kullanılan fırının kendine ait bir termo elemanı ve kalibre edilecek termoelemanların girişini sağlayacak silindirik kısımlar bulunmaktadır. Kalibrasyon işleminde belli sıcaklığa ayarlanan fırın, ayarlanan sıcaklığa ulaştığında ve diğer termoelemanın gösterdiği sıcaklık stabil hale geldiğinde termoelemanlar arasında kıyaslama yapılmıştır. T12 termoelemanı, fırın termoelemanına göre ayarlanmıştır.

Böylece kalibrasyonu gerçekleştirilen Tr12 termoelemanı ile reaktör üzerindeki bütün termoelemanların kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.

Hava ve oksijen debisinin kalibrasyonu için SCADA'dan okunan fark basınç değerinde 100litre gazın gaz sayacından ne kadar sürede geçtiği okunarak debi değerine geçilmiştir. Hesaplama ile elde edilen değerler doğalgaz sayacı kullanılarak elde edilen değerler ile kıyaslanarak kalibrasyon gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.6'da oksijen debi değerlerinin kıyaslaması görülmektedir. Oksijen için yapılan doğrulama işleminde debi arasında görülen %15'lik farkın doğalgazın yoğunluğunun oksijenin yoğunluğundan farklı olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Çizelge 4.7'de görüldüğü üzere hava için çıkan sonuçların farklı olması ise, kullanılan orifis çaplarından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.6: Oksijen debi ölçümünün karşılaştırması.

Oksijen			
Doğalgaz Sayacı İle Okunan Debi		SCADA'da Okunan Basınç Farkı	SCADA'da Okunan Debi Değeri
l/s	m ³ /h	Pa	m ³ /h
0,9	3,4	110	2,7
1,2	4,5	215	3,7
1,4	5,2	320	4,5
1,7	6,0	410	5,1
1,8	6,7	530	5,7
2,1	7,6	730	6,7

Çizelge 4.7: Hava debi ölçümünün karşılaştırılması.

Hava			
Doğalgaz Sayacı İle Okunan Debi	SCADA'da Okunan Basınç Farkı	SCADA'da Okunan Debi Değeri	
l/s	m ³ /h	Pa	m ³ /h
1,7	6,0	50	2,0
2,1	7,7	100	2,8
2,5	9,0	150	3,4
2,9	10,3	200	3,9
3,1	11,2	250	4,4
3,3	12,0	300	4,8
4,3	15,6	500	6,2
5,5	20,0	925	8,3

4.4.3 Gaz kromatografi cihazı

Reaktör içerisinde gerçekleşecek gazlaştırma reaksiyonları sonucu oluşan yapay gazın bileşimi gaz kromatografi sistemi ile tespit edilmektedir. Gaz bileşimin belirlenmesinin ardından gerekli hesaplamalarla yapay gazın kalorifik değeri bulunabilmektedir. Temizleme ünitesinden geçirilen yapay gaz, gaz kromatografi cihazına ulaşmadan önce gaz içerisinde bulunabilecek asidik bileşiklerin cihaza zarar vermesini engellemek adına yıkama şişesinden geçirilerek ön temizleme işlemine tabi tutulur.

Deney düzeneğinde Agilent 7890B modeli bir gaz kromatografi cihazı kullanılmaktadır. Kullanılan gaz kromatografisi kapiler kolon ve ısı iletkenlik dedektörüne (TCD) sahip olup, taşıyıcı gaz olarak helyum gazı, valf hareketi için ise azot gazı kullanılmaktadır. Şekil 4.12’de gaz kromatografi cihazının görseli mevcuttur.

Her gazlaştırma deneyi öncesinde gaz kromatografi cihazı referans gaz ile kalibre edilmiştir. Kullanılan referans gazın bileşimi literatürden elde edilen bilgiler ışığında belirlenmiştir. Referans gazın bileşiminde %15 CO, %20 H₂, %8 CH₄, %20 CO₂, %2 O₂ ve %35 N₂ bulunmaktadır.



Şekil 4.12: Gaz kromatografi cihazı.

4.5 Deneylerin Yapılışı

Düzensiz bir şekle sahip kömür bloğu deneysel çalışmalardan önce istenilen ölçülere getirilmesi için tıraşlanmış ve gerekli boyutlara ulaştırılmıştır. Bir vinç ve halat yardımıyla blok kömür reaktöre yerleştirilmiştir. Reaktöre yerleştirilen kömürün önceden belirlenen alanlarına noktalar açılmış ve bu noktalara termo elemanlar yerleştirilmiştir. Adyabatik koşulların sağlanması için kömür bloğunun üzerine refrakter tuğla serilmiş ve taş yünüyle örtülmüştür. Daha sonra reaktör kapağı kapatılarak reaktör, deneyler için hazır hale getirilmiştir. Reaktör işlem için hazır hale geldikten sonra kömürün tutuşmasını sağlamak için gazlaştırma kanalına propan-bütan gönderilmiştir. Gazlaştırma kanalındaki ateşleme prosesi online sıcaklık ölçümleriyle kontrol edilmiştir. Ateşlemenin gerçekleşmesiyle sisteme oksijen beslenmeye başlanmıştır. Oyuk belli bir büyüklüğe gelene kadar sadece yanma gerçekleşmiş ve oksijen beslemesi devam etmiştir.

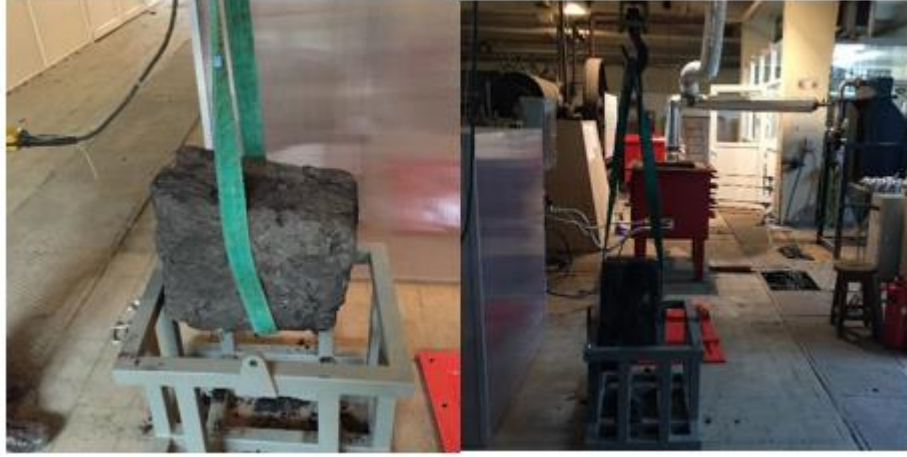
Deney süresince sıcaklık ve basınç ölçümleri sürekli olarak SCADA sistemden takip edilmiştir. Sıcaklık ölçümleri ve basınç ölçümleri termo eleman ve basınç transmitterleri kullanılarak ölçülmüştür. Belirlenen bölgelerdeki debiler ise sistem tarafından kontrol mekanizmasına bir denklem tanıtılarak basınç farkından faydalanılarak hesaplanmıştır. Siklondan geçirilen, soğutulan ve temizlenen gazın

bileşimi ise gaz kromatografi cihazı yardımıyla monitörden izlenmiştir. Deney sonucu oluşan katranlar ve sıvı fraksiyonlar ise toplama kabında toplanmıştır.

4.6 Gazlaştırma Deneyleri

4.6.1 Deney no:1

Reaktörün boyutlarına uygun olarak seçilen kömür bloğu Şekil 4.13'te görüldüğü üzere halat yardımıyla reaktör içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 4.13: Kömür bloğunun reaktöre yerleştirilmesi.

Kömürün yerleştirilmesi esnasında kömür bloğunda parçalanmalar meydana gelmiş, bunun üzerine kömür parçaları aralarında minimum boşluk olacak şekilde birleştirilerek reaktöre yerleştirilmiştir. Reaktöre yerleştirilen kömürün görünümü Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14: Kömürün reaktör içerisindeki görünümü.

Reaktör içerisindeki adyabatik koşulların sağlanması adına kömürün üzeri toprak ile örtülmüştür. Son olarak ısı kaybını engellemek için toprağın üzeri taş yünü ile örtülerek reaktör kapağı kapatılmıştır. Deneyde kullanılan reaktör içinin görünümü Şekil 4.15’te verilmiştir.



Şekil 4.15 : Reaktör içinin görünümü.

Reaktördeki işlemler bitirildikten sonra, SCADA üzerinden vakum pompası, su pompası ve soğutma fanı çalıştırılmıştır. Yıkama kolonundaki, kostik besleme tankı ve su tankındaki pH ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin ardından, flare’daki pilot alev yakılarak flaredaki sıcaklığın yükseltilmesi amaçlanmıştır. Aynı sırada gazlaştırma elemanlarının reaktörle bağlantı noktası sökülerek LPG beslenmeye başlanmıştır. Yaklaşık 2 saat boyunca beslenen LPG’nin ardından SCADA sisteminden okunan kömür sıcaklığı ortalama 100 °C’yi gösterdiğinde ateşlemenin

gerçekleştiği varsayılp LPG beslemesi kesilmiş ve gazlaştırma elemanlarının bağlantısı yapılmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: Hava beslemesine başlanmadan önceki SCADA görüntüsü.

Bu esnada sisteme $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 'lik bir debiyle hava beslenmeye başlanmıştır. Deney başlangıcında vakum frekansı 20 hertz iken flaredan çıkan gaz pilot alev ile yakılamadan atmosfere salındığı fark edilmiş, bu nedenle vakum frekansı 15 hertze indirilerek bu problem çözülmüştür. Deney esnasında belirli periyotlarda yıkama kolonundan örnek alınarak pH ölçümü yapılmış, pH'nın 8'in altına düştüğü görüldüğünde kostik besleme tankına NaOH eklemesi yapılmıştır. Hava beslemesi yapılmaya başlandıktan yaklaşık 3 saat sonra hava debisi $4 \text{ m}^3/\text{h}$ 'e, vakum frekansı ise tekrar 20 hertz'e çıkarılmıştır.

Hava beslemesinin yapılmaya başlamasından yaklaşık dört saat sonra flare'a pilot alev gönderilmeden ürün gazının yandığı fark edilmiş, böylece gazlaşmanın başladığı ve belli bir bileşimde yapay gazın üretildiği yaklaşık üç saat gözlenmiştir. Aynı zamanda SCADA'dan termo elemanların gösterdiği sıcaklık değerleri incelenmiştir. Sıcaklıkların yaklaşık 900°C 'ye ulaştığı okunmuştur.

Hava beslemesine başladıktan yaklaşık 6 saat sonra $4 \text{ m}^3/\text{h}$ ile gönderilen hava debisinin reaktörde kalan kömür miktarına göre fazla olduğu flaredaki alevin sönmesiyle fark edilmiştir. Böylece hava debisi tekrar $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 'e düşürülmüştür. Çıkan gaz miktarı azaldıkça hava debisi önce $2.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 'e sonra da $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 'e getirilmiştir. Bu esnada sıcaklıklar düşmeye başlamış ve flare'dan bir gaz çıkışı gözlemlenmemiştir. Reaktörde yanacak madde olup olmadığını anlamak için hava debisi tekrar $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 'in

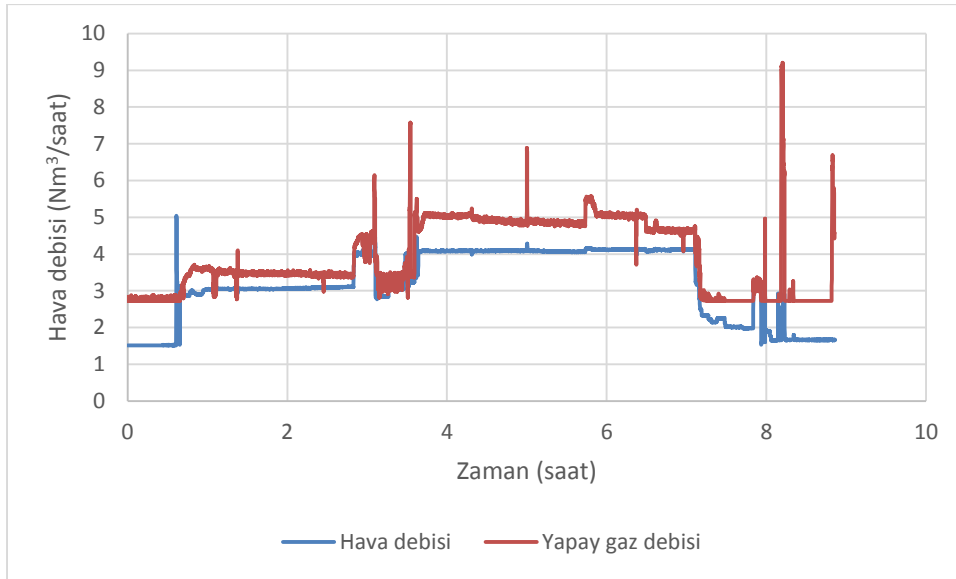
üzerine çıkarılmış, fakat flare'dan herhangi bir gaz çıkışı görülmeyince deney sonlandırılmıştır. Deney sonucu kalan kömürlerin görünümü Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17: Deney sonrası reaktör içinin görünümü.

4.6.2 1 nolu deneyin sonuçları

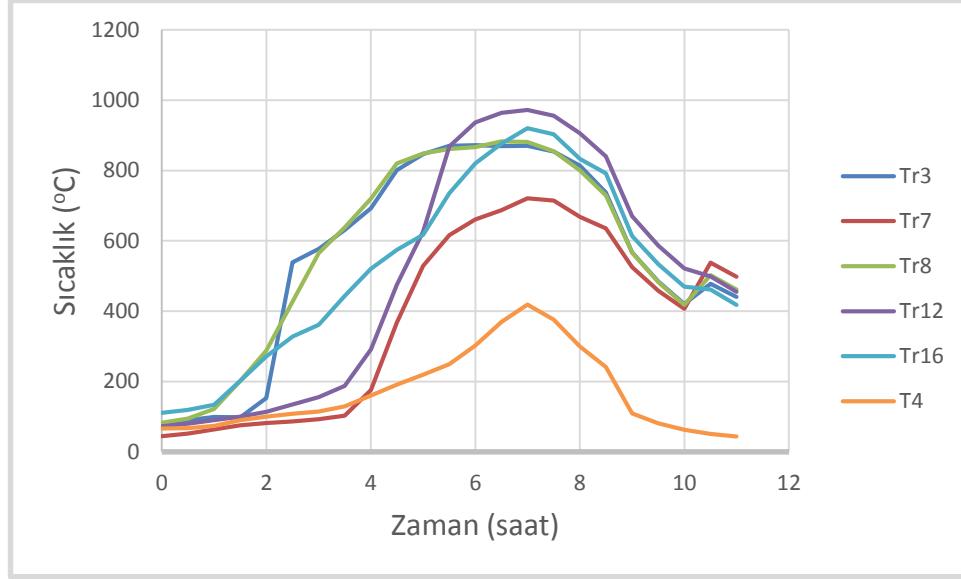
Birinci deney sonucunda sisteme beslenen hava debisinin ve üretilen gaz debisinin zamana karşı grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18: 1 nolu deney: Hava ve yapay gaz debisinin zamana göre dağılımı.

Grafikten görüleceği üzere deneyin ikinci saatinde sisteme 3 m³/saat ile hava beslemesi yapılmaya başlanmıştır. Deneyin dördüncü saatinde debi 4 m³/saat'e çıkarılmış, deneyin sekizinci saatinde ise sisteme gönderilen hava oranının reaktör içerisinde kalan kömür miktarına göre fazla olduğu tespit edilmiş ve hava debisi 3 m³/saat'e indirilmiştir. Deneyin 10. saatinde hava beslemesi kesilmiştir. Grafikten görüleceği üzere çıkan gaz debisi beslenen hava debisinin yaklaşık birbuçuk katıdır.

1 nolu deneye ait reaktör içerisindeki (Tr3, Tr7, Tr8, Tr12, Tr16) ve reaktör çıkışındaki (T4) termo elemanların zamana göre sıcaklık dağılımı Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19: 1 nolu deney: Sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.19’dan görüleceği üzere deneyin 8. saatinde termoelemanların gösterdiği sıcaklıklar 1000 °C’ye ulaşmıştır. Ayrıca termo elemanların sıcaklık dağılımları benzer davranış göstermiştir.

4.6.3 Deney no:2

Deney için 62cm x 41cm x 30cm (uzunluk x en x yükseklik) boyutlarında kömür bloğu seçilmiştir. Blok kömürün ağırlığı 85 kg’dır. Blok kömür reaktöre yerleştirilmeden önce reaktörün tabanına yaklaşık 2 cm yüksekliğinde kum doldurulmuştur. Kumun doldurulmasının ardından kömür bloğu reaktöre yerleştirilmiştir. Şekil 4.20’de reaktöre doldurulan kum tabakasının ve reaktördeki kömür bloğunun görünümü verilmiştir.



Şekil 4.20: 2 nolu deneyde reaktöre yerleştirilen kum ve kömür bloğunun görünümü.

Blok kömürün reaktöre yerleştirilmesinden sonra kömür ve reaktör duvarları arasında kalan kısımlar irili ufaklı kömür parçalarıyla doldurulmuş, kalan boş kısımlar ise toz kömürlerle kapatılmıştır (Şekil 4.21). Reaktör içerisindeki toplam kömür miktarı 100 kg'a ulaşmıştır.



Şekil 4.21: 2 nolu deney : Reaktör içerisindeki kömürün görünümü.

İki nolu deneyde bir nolu deneyden farklı olarak bir gazlaştırma kanalı oluşturulmuştur. Şekil 4.22'de görüldüğü gibi tek bir kanalın oluştuğuna emin olmak için, gazlaştırma kanalının bir ucundan gönderilen tahta parçası diğer uçtan çıkarılarak gazlaşma kanalının oluştuğu belirlenmiştir. (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 : Gazlaştırma kanalının oluştuğunun görünümü.

Sıcaklık ölçümü için reaktör üzerindeki Tr3, Tr4, Tr7, Tr11, Tr12 ve Tr15 noktaları açılmış, bu noktalardan Tr4 ve Tr12 gazlaştırma kanalına denk gelirken, Tr3, Tr7, Tr11 ve Tr15 kömür bloğunun orta kısmına denk gelmiştir.

Bir nolu deneyde yeterli adyabatik koşulların sağlanamaması ve ısı kayıplarının meydana gelmesi sonucu iki nolu deneyde iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle kömür bloğunun üzerine boşluk kalmayacak şekilde refrakter tuğlalar yerleştirilmiş, ayrıca hazırlanan harç tuğlalar arasındaki boşluklara doldurulmuştur. Ek olarak refrakter tuğlanın yerleştirilmesinin ardından tuğlaların üzerine taş yünü serilmiş, taş yününün üzeri ise sac ile örtülmüştür (Şekil 4.23). Böylece iki nolu deneyde ısı kayıpları minimize edilmeye çalışılmıştır. Son olarak reaktör kapağı kapatılarak reaktör deney için hazır hale getirilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.23: Reaktör içersinin görünümü. a)Refrakter tuğlaların dizilimi, b)Tuğlaların birleşim yerlerinin harç ile doldurulması, c)Taş yünü serilmesi, d) Sac ile örtülmesi.

Reaktör deney için hazır hale getirildikten sonra öncelikle yıkama kolonuna kostik beslemesi yapılarak pH:12'ye getirilmiş, ardından flare'daki alev yakılmış ve SCADA sisteminden vakum pompası, su pompası ve fan çalıştırılmıştır. Önceki denemelerde elde edilen deneyim sonucunda kömürün tutuşması için 2 saat boyunca reaktöre propan bütan beslemesi yapılmıştır. İki nolu deneyde bir nolu deneyden farklı olarak kömürün gazlaştırılması için sisteme hava yerine saf oksijen beslenmiş. Deneyin başlangıcında $1,67\text{m}^3/\text{h}$ 'lik debi ile oksijen enjekte edilmeye başlanmıştır. Oksijen beslemesiyle birlikte sıcaklıklar yükselmeye başlamıştır (Şekil 4.24).



Şekil 4.24: 2 nolu deney: Oksijen beslemesinin ardından yarım saat sonraki SCADA görüntüsü.

Deney esnasında yarım saat aralıklarla yıkama kolonundan örnekler alınmış, bu ölçümlerle pH'nın düştüğü görülmüş ve kostik beslemesi yapılmıştır. Oksijen beslemesinin ardından yaklaşık bir saat sonra yanabilir gazın oluştuğu flaredaki alevin oluşumuyla saptanmıştır. Yanabilir gazın oluşmasıyla, flare'a giden gazdan gaz analizör cihazı ile örnekler alınıp gazın bileşimi ölçülmüştür. Oluşan gazdaki oksijen yüzdesinin fazla olduğu saptanmış, bu nedenle oksijen debisi 1,2 m³/saat'e düşürülmüştür. Reaktöre beslenen oksijen debisinin iğne vana ile kontrol edilmemesi ve vakum pompasının güçlü çalışmasından dolayı ayarlanan debi miktarı sabit kalmamış, sürekli olarak artış göstermiştir. Bu nedenle oksijen debisi SCADA sisteminden sürekli olarak kontrol edilmiş ve düşük seviyelerde tutulmaya çalışılmıştır. Gazlaşmanın ilerleyip oyuğun büyümesiyle, gaz analizör cihazı yardımı ile beslenen oksijen debisinin yeterli olmadığı tespit edilmiş ve oksijen debisi 2 m³/saat'e çıkarılmıştır. İki buçuk saatlik oksijen beslemesinin ardından, kömür içerisinde yerleştirilen Tr3 nolu termometreden okunan sıcaklıkların 1200 °C'yi aştığı ve sıcaklık artışının Tr7 ve Tr11'de de artış gösterdiği görülmüştür. Sıcaklıkların kömür bloğunun sağ tarafına doğru ilerlediğinin görülmesiyle, oluşan yapay gaz, gaz kromatografi cihazına gönderilmiş ve örnek alımı yarım saat aralıklarla devam ettirilmiştir.

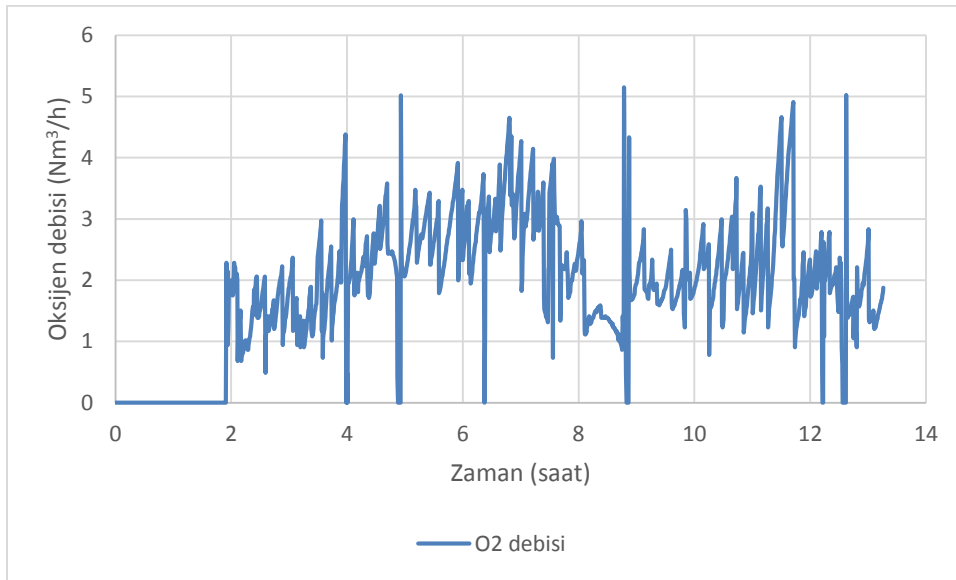
Gazlaşmanın ilerlemesi ve cavitynin büyümesiyle oksijen debisi arttırılmaya başlanmıştır ve yaklaşık 4 saatlik bir oksijen beslemesinin ardında debi 3,5 m³/saat'e

çıkarılmıştır. Debinin arttırılmasıyla sıcaklıklarında doğru orantılı olarak arttığı, Tr3 ve Tr7'deki sıcaklıkların 1200 °C'yi aştığı gözlenmiştir.

Yaklaşık beş buçuk saatlik oksijen beslemesinin ardından oksijen debisi 2 m³/saat'e düşürülmüştür. İlerleyen süreçte oksijen debisi azaltılmaya devam edilmiş ve 1m³/saat'e düşürülmüştür. Bu esnada belirli periyotlarla gaz kromatograf cihazından ölçüm alınmaya devam edilmiştir. Deneyin başlatılmasından 13 saat sonra flare'daki alevin sönmesiyle deney sonlandırılmıştır.

4.6.4 2 nolu deneyin sonuçları

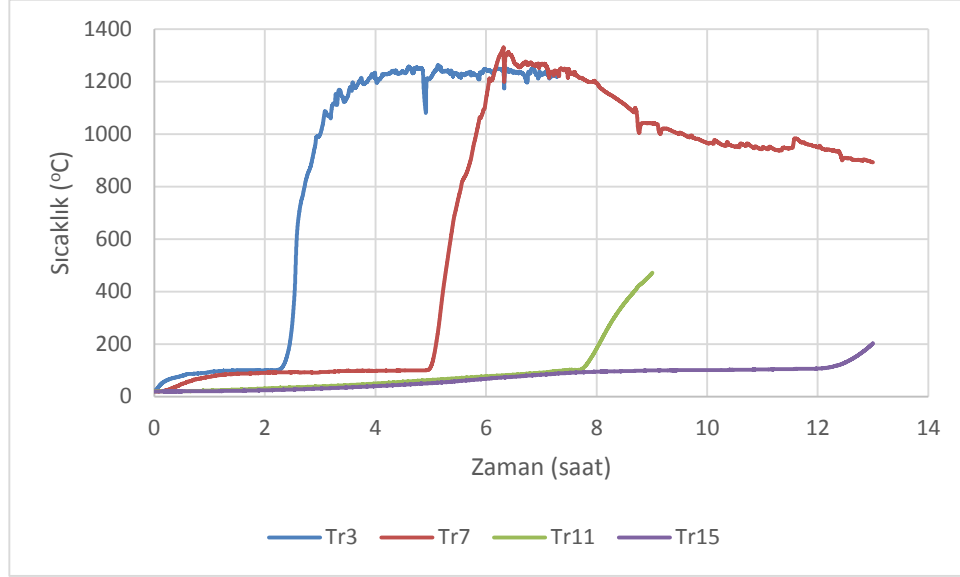
Deney esnasındaki reaktöre gönderilen oksijen debisinin zamana göre grafiği Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25: 2 nolu deney: Deney esnasında gönderilen oksijen debisinin zamana bağlı grafiği.

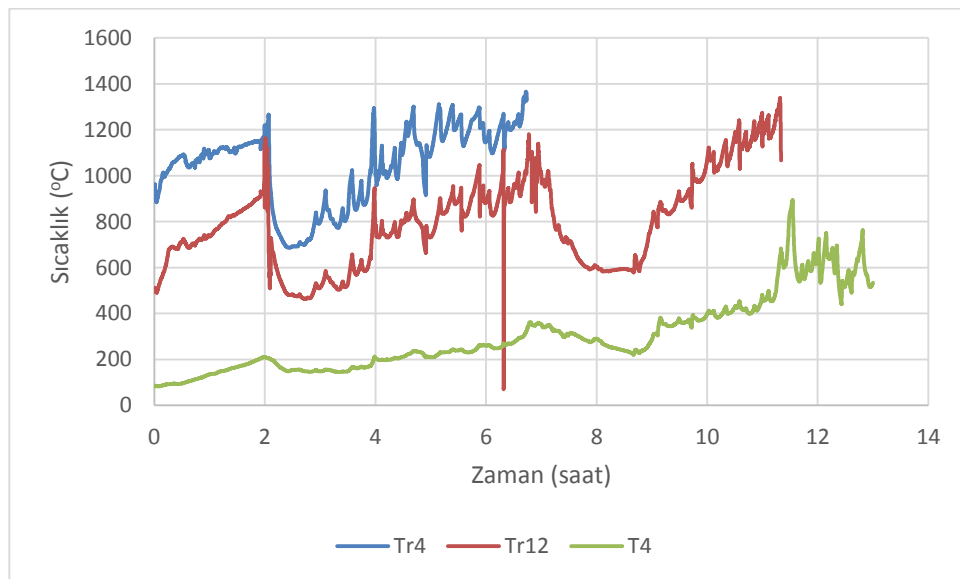
Şekil 4.25'den görüldüğü üzere deneyin 2. ve 8. saatleri arasında oksijen debisi belirli artırımlarla reaktöre gönderilmiştir. Maksimum oksijen debisi 3,5m³/saat'e ayarlanmıştır. Deneyin 8.saatinin ardından oksijen debisi azaltılarak 2m³/saat'te tutulmaya çalışılmıştır. Fakat şekilden görüldüğü üzere beslenen oksijen miktarı değişken bir yapıdadır. İki nolu deneyin yapılışında bahsedildiği üzere gerek reaktöre oksijen beslemesinde iğne vananın kullanılmaması gerekse deney sistemindeki vakum pompasının çok güçlü çalışması belirlenen miktarda oksijenin sisteme beslenememesine yol açmıştır.

Şekil 4.26’da kömürün orta kısmına yerleştirilen termo elemanların, Şekil 4.27’de ise gazlaştırma kanalına denk gelen termo elemanların zamana bağlı sıcaklık dağılımları görülmektedir.



Şekil 4.26: 2 nolu deney: Kömürün orta kısmındaki sıcaklık dağılımı.

Grafikten görüleceği üzere Tr3 ve Tr7 termoelemanlarında düzgün bir sıcaklık artışı izlenmiş ve gazlaşmanın ilerlediği tespit edilmiştir. Fakat Tr11 termoelemanında bu trend görülememektedir. 400 °C’den sonra Tr11’de okunan sıcaklıklar negatife inmiştir ve termoelemanın doğru sıcaklıkları okuyamadığı anlaşılmıştır. Deney sonrasında reaktörün kapağının açılmasıyla Tr11 termoelemanının kırıldığı görülmüştür.



Şekil 4.27: 2 nolu deney: Gazlaştırma kanalındaki sıcaklık dağılımı.

Şekil 4.27’de 2 nolu deneydeki gazlaştırma kanalına yerleştirilen Tr4 ve Tr12 termoelemanı ile, reaktör çıkışındaki gazın sıcaklığının(T4) zamana bağlı grafiği verilmiştir. Tr4 ve Tr12’deki termoelemanların sıcaklığının 1200 °C’lerin üzerine çıkması ile doğru ölçüm yapamamışlar ve negatif değerlere inmişlerdir. Bu nedenle grafik üzerinde sadece ölçüm alınabilen zamanlara kadar termoelemanların sıcaklık değerleri bulunmaktadır. Grafikten görüleceği üzere deneyin 8. saatinde sıcaklıklarda bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni ise Şekil 4.25’te gözlemlenen oksijen debisinin kısılmasıdır. Dolayısıyla sıcaklıkların beslenen oksijen miktarıyla doğru orantılı olarak değişim gösterdiği grafiklerle belirlenmiştir.

Deneyin başlatılmasından yaklaşık dört saat sonra gaz kromatografî cihazına gaz örnekleri gönderilmeye başlanmıştır. Bu gaz örnekleri yaklaşık yarım saat aralıklarla alınmış ve deneyin sonlandırılmasına kadar devam etmiştir. Alınan gaz örneklerinin analiz sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8: Gaz örneklerinin analiz sonuçları.

ZAMAN (Dak.)	H₂ (%)	O₂ (%)	N₂ (%)	CO (%)	CH₄ (%)	CO₂ (%)
270	20,3	3,9	11,3	29,4	3,0	31,8
315	24,6	1,5	3,4	31,1	3,3	35,8
340	23,8	3,4	6,1	34,2	3,2	29,1
365	23,4	3,2	5,9	34,8	3,1	29,5
400	24,0	4,3	7,5	35,3	3,0	25,8
425	24,8	6,9	11,6	36,6	3,0	17,1
480	22,7	2,7	5,2	30,6	3,0	35,7
520	24,8	5,9	9,8	33,6	3,0	22,9
550	24,8	4,2	7,3	28,7	3,2	31,8
585	21,9	3,3	5,7	26,0	3,0	40,1
635	20,5	7,2	15,7	24,4	3,4	28,7
705	19,1	5,6	12,6	24,7	4,3	33,7
740	20,7	6,2	12,7	28,0	3,0	29,2
770	16,8	16,1	31,4	30,26	2,0	3,4

Çizelge 4.8’den görüleceği üzere üretilen yapay gaz içeriğini H₂, CO, CH₄, CO₂, O₂ ve N₂ oluşturmaktadır. Fakat deney öncesinde yapay gaz içeriğinde O₂ ve N₂

bulunması beklenmemiştir. Oksijenin bulunma sebebi, oksijenin sisteme beslenmesi sırasında iğne vananın kullanılmaması sebebiyle beslenen oksijen miktarının kontrol edilememesi olarak düşünülmüştür. Reaktöre belirlenen debi miktarından fazla oksijenin beslenmesi sonucu oksijenin tamamının reaksiyona girmeden gazlaştırma kanalından çıkması sonucunda yapay gazda oksijen bileşimine rastlanmıştır. Yapay gaz içerisindeki azot bileşiğinin bulunması ise havadan kaynaklanmaktadır. Reaktörde hava kaçaklarının olması yapay gaz içerisinde azot gazının varlığına işaretler. Bu belirlenmelerin sonucunda oksijen ve azotsuz yapay gaz içeriği ve bu gazın ısı değeri Çizelge 4.9’da belirlenmiştir.

Çizelge 4.9: Düzeltilmiş yapay gaz bileşimi ve ısı değeri.

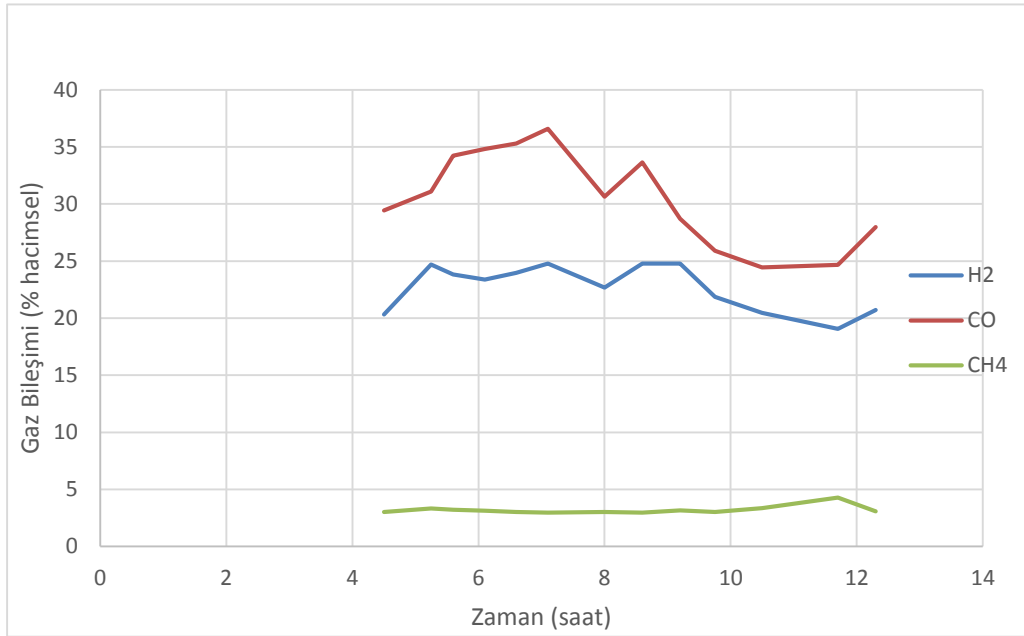
ZAMAN (Dak.)	H₂ (%)	CO (%)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	Isıl Değer MJ/m³
270	23,9	34,7	3,5	37,5	8,8
315	25,9	32,7	3,5	37,6	8,8
340	26,3	37,9	3,5	32,1	9,5
365	25,7	38,3	3,4	32,4	9,5
400	27,2	40,0	3,4	29,2	9,8
425	30,4	44,9	3,7	21,0	11,0
480	24,6	33,2	3,2	38,7	8,6
520	29,4	39,8	3,6	27,2	10,0
550	28,0	32,0	3,6	35,9	9,0
585	24,0	28,6	3,3	44,0	8,0
635	26,6	31,6	4,4	37,2	9,1
705	23,3	30,2	5,2	41,2	8,8
740	25,5	34,5	3,7	35,7	9
770	32,0	57,0	3,8	6,5	12,8

Çizelge 4.9’den görüleceği üzere gaz bileşenlerinde stabil değerler elde edilmiştir. CH₄ içeriği yaklaşık %3,5 iken, CO ve H₂ içerikleri sırasıyla %35-40 ve %25-30 aralığındadır. Bu sonuçlar neticesinde de oluşan gazın kaliteli ve yanabilir bir gaz olduğu görülmektedir. Oluşan yapay gazın ısı değeri ise yine Çizelge 4.9’den görüleceği üzere ortalama 9 MJ/m³’tür. Isıl değer bulunmasında kullanılan hesaplama ise “Isıtma + Klima Tekniği El Kitabı”nda yer alan yanabilir gazlar olan

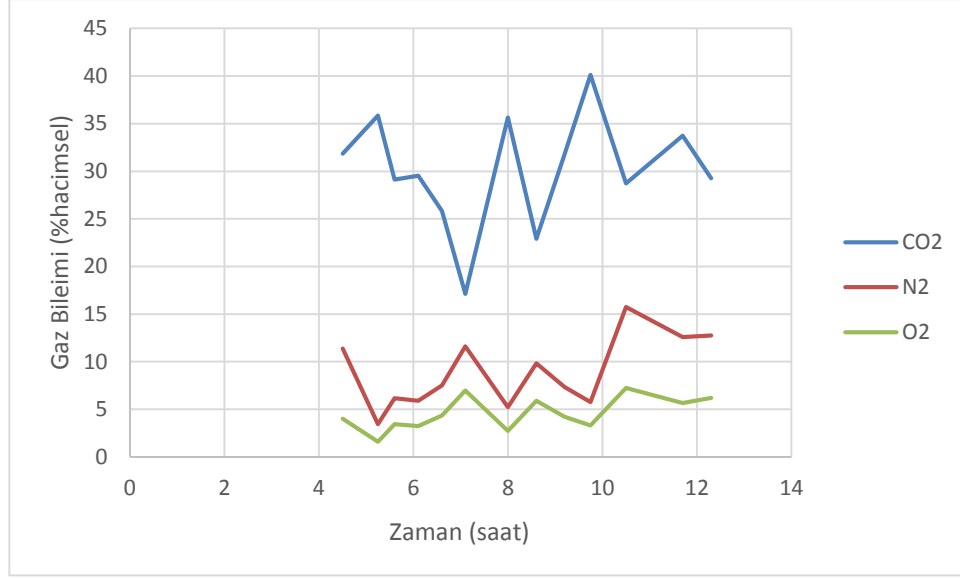
CO, H₂ ve CH₄'ün ısıl değerlerinin gaz kromatografi cihazından elde edilen hacimsel yüzdeleri ile çarpılması sonucu elde edilmiştir [102].

Gazın bileşimi ve ısıl değeri ile ilgili değerler, literatürden elde edilen bilgilerle kıyaslandığında, benzer çalışma koşullarında gerçekleştirilen laboratuvar ve saha testlerinin sonuçlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [42,51,62,103,104,105,106,107,108].

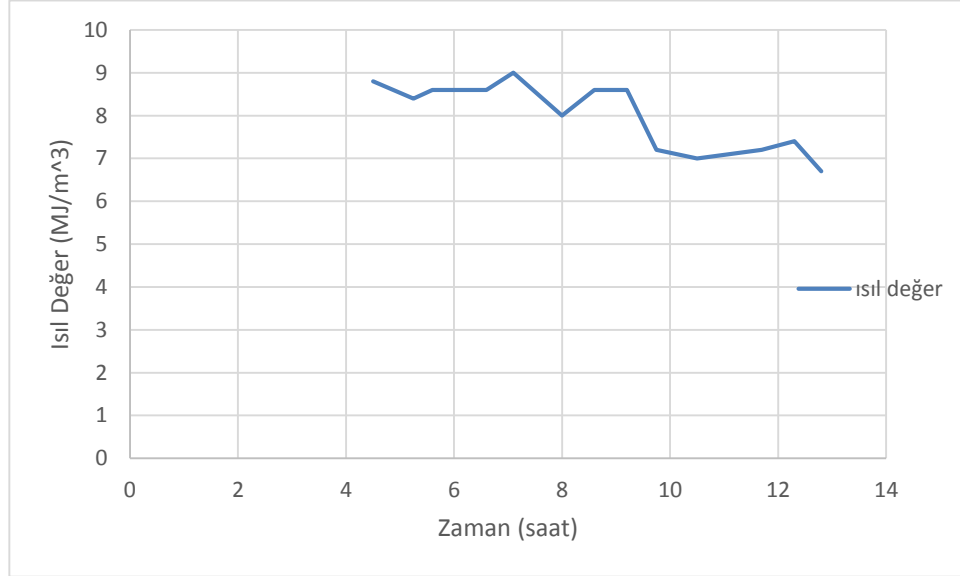
Gaz kromatografi cihazından elde edilen yanabilir gaz bileşenlerinin (CO, H₂, CH₄) zamana bağlı grafiği Şekil 4.28'de, yapay gaz bileşimindeki CO₂, N₂ ve O₂ gazlarının zamana bağlı grafiği Şekil 4.29'da, oluşan gazın ısıl değerinin zamana bağlı grafiği ise Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.28: 2 nolu deney: Yanabilir gaz bileşimlerinin zamana göre dağılımı.



Şekil 4.29: 2 nolu deney: CO₂, N₂ ve O₂ gazlarının zamana göre dağılımı.



Şekil 4.30: 2 nolu deney: Isıl değerlerin zamana göre dağılımı.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında düşük ısı değerli, klasik madencilik yöntemi ile çıkarılması ekonomik olmayan kömür rezervlerinden yararlanılmasında alternatif temiz kömür teknolojisi olan yeraltı kömür gazlaştırma prosesi ele alınmış, bu prosesin uygulanabileceği Türk linyit sahaları belirlenmiş ve yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygun olduğu tespit edilen sahalardan birisi olan Malakara Pirinççeşme linyit madeninden temin edilen kömür blokları TÜBİTAK Projesi kapsamında tasarlanan yarı pilot ölçek bir deney sisteminde gazlaştırılmıştır. Özellikle kömürlerimizin %60'ının düşük ısı değerli olmasının yanı sıra, kömürlerimizin uçuculuğunun yüksek olması, kolay tutuşmaları, hızlı bir şekilde reaksiyona girme eğilimlerinin bulunması ve reaktif olmaları nedeniyle yeraltı kömür gazlaştırma prosesinin, linyitlerimizden verimli ve ekonomik bir şekilde yararlanmasında potansiyel bir çözüm olacağı sonucuna varılmıştır. Yeraltı kömür gazlaştırma prosesinin verimli ve ekonomik bir teknoloji olmasının yanında kömür kullanımında meydana gelen çevresel sorunlar da azaltılmaktadır. Bilhassa teknolojinin gelişmesiyle artan enerji ihtiyacını karşılamak için fosil yakıtların kullanılması sonucu oluşan ve günümüzün en büyük çevre sorunu olan CO₂ salınımını en aza indirmektedir. Ayrıca karbondioksitin depolanmasında kömürün yeraltında gazlaşması sonucu oluşan alanlar depo alanı olarak kullanılabilmekte ve bu durum hem çevresel hem de ekonomik bir katkı sağlamaktadır. Bu anlamda sera etkisinin azaltılmasında yeraltı kömür gazlaştırma ve karbon tutma ve yakalama tekniklerinin birlikte kullanımının günümüzün ve geleceğin en büyük çevre sorununun çözülmesinde büyük katkı sağlayacağı anlaşılmaktadır.

Çevresel, ekonomik ve teknik açıdan yarar sağlayacak olan yer altı kömür gazlaştırma prosesi için uygun kömür sahalarının seçiminde dikkate alınması gereken faktörler tezin 2. Bölümünde belirtildiği gibi, kömürleşme derecesi, kül, nem, uçucu madde ve kükürt oranı, kömür porozitesi, kömür yatağının geçirgenliği, çökme ve yer altı suları, kömür damar derinliği, kömür damar kalınlığı, kömür damar eğimi, şist yapısı, kömür rezerv miktarı ve bölgeye ulaşım olarak sınıflandırılmıştır. Bu faktörler göz önüne alınarak, tezin üçüncü bölümünde kömür damar kalınlığı 2m'nin altında olmayan, kömür damar derinliği 50 ila 460m arasında olan, kül içeriğinin %60'dan, nem içeriğinin ise %40'tan düşük olduğu ve ısı değerinin 2000 kcal/kg'den fazla olduğu

ülkemiz kömür yatakları belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda Kütahya-Seyitömer-Çobanköy, Kütahya-Tunçbilek-Ömerler, Muğla-Yatağan-Eskihisar, Manisa-Soma-Eynez, Manisa-Soma-Işıklar, Bolu-Göynük-Himmetoğlu, Bursa-Keles-Harmanalan, Tekirdağ-Saray-Edirköy ve Tekirdağ-Malkara-Pirinççeşme sahalarının bu kriterlere uygun olduğu, böylece yeraltı kömür gazlaştırma prosesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Trakya Tersiyer havzasının güneyinde yer alan ve çok sayıda damarlar halinde bulunan Malkara yöresinin Pirinççeşme sahası altı damardan oluşmakta olup, temin edilen kömürler 3 nolu damara aittir. 3 nolu damarın derinlik ortalaması 53 metre olup, damar kalınlığı ortalaması 328 santimetredir. Yeraltı kömür gazlaştırma prosesine uygun olan Malkara Pirinççeşme kömürlerinin ticari ölçekli uygulamalarına geçilmeden önce başarılı saha denemeleri yapılarak proses için optimum koşullar belirlenmelidir. Fakat saha testlerinin pahalı olması nedeniyle öncelikle laboratuvar çalışmaların gerçekleştirilmesi daha faydalı olacaktır. Bu kapsamda gerçek koşulları sağlamak adına deneylerde kullanılacak Malkara Pirinççeşme kömürleri, Uysal Madencilik şirketinden blok şeklinde temin edilmiştir.

Türkiye’de ilk defa çalışma konusu olan yeraltı kömür gazlaştırma prosesi üzerine gerçek ortam koşullarına uygun olacak şekilde tasarlanan deney düzeneğinde Malkara Pirinççeşme sahasına ait blok kömürler gazlaştırılmıştır. Kısıtlı yapılan gazlaştırma deneylerinin ilkinde gazlaştırma ajanı olarak hava, ikincisinde ise saf oksijen kullanılmıştır. Gerek hava gerekse saf oksijen ile gerçekleştirilen gazlaştırma deneyleri sonucunda:

- Sıcaklıklar 1000 °C’nin üzerine çıkmış,
- Beslenen hava ve oksijen debisinin artışıyla doğru orantılı olarak sıcaklıklar yükselmiş,
- Yanabilir gaz bileşimi yüksek bir gaz elde edilmiştir.

Saf oksijenle yapılan gazlaştırma deneyinde saatte ortalama 7 m³ yapay gaz elde edilmiş, elde edilen bu gazın içeriğinin %37’sini CO, %26’sini H₂ ve %3,5’ini CH₄ oluştururken, gazın ısı değeri ise ortalama 9 MJ/m³ olarak tespit edilmiştir. Bu değerler literatürden elde edilen bilgilerle kıyaslandığında, benzer çalışma koşullarında gerçekleştirilen laboratuvar ve saha testlerinin sonuçlarından daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Url-1 <http://www.tki.gov.tr/Dosyalar/Dosya/Sekt%C3%B6r%20Raporu%202013.pdf> >, alındığı tarih, 02.12.2014.
- [2] **Walter K.** (2007). Fire in the hole. Science & Technology Review-Published by Lawrence Livermore National Laboratory.
- [3] **Ersin, M.** (2006), Türkiye’de Linyit Kömürlerinin Enerji Kaynağı Olarak Önemi, (Yüksek Lisans Tezi), İÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Schrider, L.A., Pasini III, J.** (1973). Underground Gasification of Coal-Pilot Test, Hanna Wyoming, Fifth Synthetic Pipeline Gas Symp., Chicago
- [5] **Campbell, G.C., Brandenburg, C.F. Boyd, R.M.** (1974). Preliminary Evaluation of Underground Coal Gasification At Hanna Wyoming, U.S. Dep. Of Interior, Bureau of Mines Technical Progress Rept., TPR 82
- [6] **Hill, R.W., Thorness, C.B.** (1983). The Large Block Experiments in Underground Coal Gasification, AIChE Symp. Series, 226, Vol.79
- [7] **Shackley, S., Mander, S., Reiche, A.** (2006). Public perceptions of underground coal gasification in the United Kingdom. Energy Policy 2006;34(18), doi:10.1016/j.enpol.2005.07.010
- [8] **Saliyeva, S.,** (2014), Economic Analysis of Underground Coal Gasification End Product Market: Australian Case Study, The 12th European Gasification Conference.
- [9] **Burton E, Friedmann J, Upadhye R.** (2006). Best practices in underground coal gasification. Lawrence Livermore National Laboratory.
- [10] Economic Commission For Europe Coal Committee, (1976). Report of The Symposium on Gasification And Liquefaction of Coal, Düsseldorf.
- [11] **Sury, M., White, M., Kirton, J., Carr, P.** (2004). Roland Woodbridge Review of Environmental Issues of Underground Coal Gasification. Report No. COAL R272 DTI/Pub URN 04/1880
- [12] **Klimenko, A. Y.** (2009). Early Ideas in Underground Coal Gasification and Their Evolution, Energies2(2): 456-476.
- [13] Url-2 <<http://www.ucgassociation.org/index.php?option=comcontent&view=article&id=162&Itemid=413>>, alındığı tarih, 22.05.2014.
- [14] **Gregg, D.W., Edgar, T.F.** (1978). Underground Coal Gasification, AIChE Journal, Vol.24, No.5
- [15] **Stephens, D.R.** (1979). The Private Sector Involvement in UCG, Lawrence Livermore Lab., UCRL-82673
- [16] **Predvoditelev, A.S.** (1947). Gas Formation During The Combustion of Coal In The Bed, Izvestiya An SSSR, Otdeleniye Tekhnicheskikh. Namk,

No.10 (English transl. : Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-TRANS-11154.)

- [17] **Shvnakova, E.K.** (1958), Cost Benefits of Underground Coal Gasification of Brown Coal with Thermal Preparation of The Coal Bed, Podzemnaya Gazifikatsiya Uglei, No.4 (English transl. : Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-TRANS-1132.)
- [18] **Silin, A.I., Bogoroditskii, K.F., Kongnov, V.I.** (1960). Role of Ground Water and Other Natural factors in the Underground Coal Gasification of Coal-With The Lisichansk Facility and the One Outside Moscow As Examples Trudy Laboratory Gidrogeologicheskikh Problem Im. F.P. Savarenskogo, Vol.23 (English transl. : Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-TRANS-10894.)
- [19] **Kllimentov, P.P.** (1963). Influence of Ground Water on the Process of Underground Gasification of Coal Deposits, Izv. Geologiya i radvezka, Lab., UCRL-TRANS-10869.
- [20] **Kalashnikou, P.I., Khvoinskaya, R.S.** (1967). Water Balances of Underground Gasifier, Gazou, Trudy, No.2 (English transl. : Lawrence Livermore Laboratory, UCRL-TRANS-11145.)
- [21] **Moody, M.M.** (1978). Interpretations of Field Hydraulic Tests In Explosion-Fractured Coal: Hoe Creek, Site Characterization To Experiment No.1, Lawrence Livermore Laboratory, UCL-52438
- [22] **Thorness , C.B., Cena, R.J. Aiman, W.R., Hill, R.W., Stephens, D.R.** (1978). Hoe Creek NO.2: UCG Experiment With Air and Oxygen /Steam Injection Periods, SPE 7512, presented at 53rd. Annual Fall Meeting of SPE-AIME, Houston.
- [23] **Hill, R.W., Thorness, C.B. Cena, R.J., Aiman, W.R., Stephens,** (1980), Results From the Third LLL UCG Experiment at Hoe Creek, Proc. of the Sixth Underground Coal Conversion Symp., Shangri-La.
- [24] **Edgar, T.F.** (1976). Research and Development on Underground Coal Gasification of Texas Lignite, AIChE Symp., Morgantown.
- [25] **Url-3** <<http://www.groundtruthtrekking.org/Documents/UCG/UCG-KZamzow-2010.pdf>>, alındığı tarih, 10.04.2014.
- [26] **Shafirovich, E. and Varma, A.** (2009). Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status, Ind. Eng. Chem. Res. 2009, 48, 7865-7875.
- [27] **Blinderman, M. S., Jones, R. M.** (2002). The Chinchilla IGCC Project to Date: Underground Coal Gasification and Environment, Gasification Technologies Conference, San Francisco, USA.
- [28] **Neville, A.** (2011), Underground Coal Gasification: Another Clean Coal Option. Power;155(7)
- [29] **Roddy, D. J., Younger, P.L.** (2010). Underground coal gasification with CCS: a pathway to decarbonising industry, Energy & Environmental Science, doi: 10.1039/b921197g.

- [30] **Vulfovich, Kreynin E.** (2012). An analysis of new generation coal gasification projects, Moscow 117420, Russia. International Journal of Mining Science and Technology;22 doi:10.1016/j.ijmst.2012.01.012.
- [31] **Imran^a, M., Kumar^a, D., Kumar^b, N., Qayyuma, A., Saeeda, A., Bhattia, M.S.** (2014). Environmental concerns of underground coal gasification. Renewable and Sustainable Energy Reviews;31 doi:10.1016/j.rser.2013.12.024
- ^a Underground Coal Gasification Project Thar, Islamkot, Pakistan
^b Institute of Chemistry, University of São Paulo, São Paulo, Brazil
- [32] **Burwell, E.L.** (1984). Potential of Underground Coal Gasification, CEP
- [33] **Krantz, W. B., Gunn, R.D.** (1983). Underground Coal Gasification : The state of the Art, AIChE Symposium Series 226, Vol. 79
- [34] **van Heek, K.H.** (2000). Progress of coal science in the 20th century. Fuel;79(1) doi:10.1016/S0016-2361(99)00190-8
- [35] U.S. Department of Energy, (1979). Underground Coal Conversion Program Description, DOE/ET-0100, UC-90C, Washington, D.C
- [36] **Krantz, W.B., Gunn, R.D.** (1983). Modelling of The UCG Process: Part III-Subsidence, AIChE Symp. Series, 226, Vol.79
- [37] **Okutan, F.F.** (1985). Yeraltı Kömür Gazlaştırma Prosesinin Nümerik ve Laboratuar Simulasyonu Geri ve İleri Yanma Teknikleri, (Doktora Tezi), İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [38] **Taner, A.C.,** Karbon Yakalama ve Depolama (Carbon Capture and Storage) CCS Teknolojisi Kapsamında Son Yapılan Küresel Bilimsel Araştırma ve Geliştirme (ARGE) Faaliyetleri. Fizik Mühendisleri Odası Yayınları, Faydalı Bilgiler.
- Url-5** <http://www.fmo.org.tr/_yayinlar/faydali-bilgiler/>, alındığı tarih, 10.04.2014.
- [39] **Krantz, W.B., Gunn, R.D.** (1983). Modelling The UCG Process: Part II-Water Influx, AIChE Symp. Series, 226, Vol.79
- [40] **Url-6** <<http://www.google.com/patents/US4448252>>, alındığı tarih, 10.04.2014.
- [41] **Url-7** <<http://www.saveballona.org/gasoilfields/SubsidenceGC.pdf> >, alındığı tarih, 10.04.2014.
- [42] **Stanczyk K., Kapusta K., Wiatowski M., Swiadrowski J., Smolinski A. & Rogut J.** (2012). Experimental simulation of hard coal underground gasification for hydrogen production. Fuel,91(1)
- [43] **Skafa, P.V.** (1958). Zonal Characteristics of The Process of Gasification of A Coal Seam In A Channel, Podzemneya Gazifikatsiya Uglei, No.1
- [44] **Bhutto, W. A., Bazmi, A. A., Zahedi, G.** (2013). Underground Coal Gasification: From Fundamentals to Applications, Progress in Energy and Combustion Science 39 (2013) 189-214.
- [45] **Url-8** <http://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/51238cd02c93b89_ek.pdf?dergi=JEOLQJ%DD%20M%DCHEND%DDSL%DD%D0%DD%20DERG%DD%DD>, alındığı tarih, 10.04.2014.

- [46] **Url-9** <<http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/c513ea4fbdaa7a1ek.pdf>>, alındığı tarih, 10.04.2014.
- [47] **Bell, G.J., Gunn, R.D.** (1980). Adiabatic Coal Gasification Tube Experiments Forward Combustion, Proc. of the Sixth Underground Coal Conversion Symp., Shangri-La.
- [48] **Yang LH.** (2008). A review of the factors influencing the physicochemical characteristics of underground coal gasification. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2008;30(11):1038e49.
- [49] **Dossey, J. L.** (1976). Underground Coal Gasification Technology in the USSR, Sandia Laboratories, Albuquerque
- [50] **Krein, G.F., Miringof, N.S.** (1965). Combined Method of Linking Boreholes at the Shatskii Podzemgaz Station, Gazov, Trudy. , No.1
- [51] **Daggupati S, Mandapati RN, Mahajani SM, Ganesh A, Mathur DK, Sharma R. K., et al.** (2010). Laboratory studies on combustion cavity growth in lignite coal blocks in the context of underground coal gasification. Energy 2010;35:2374–86.
- [52] **Ünalın, G.** (2010). Kömür Jeolojisi, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- [53] U.S. Department of Energy, (1978). Underground Coal Conversion Program, Volume III Resources, DOE/ET-0008/3, UC-90C, Washington, D.C
- [54] **Mastalerz, M., Droloniak, A., Parke, M., Rupp, J.** (2011), Site Evaluation Of Subsidence Risk, Hydrology and Characterization of Indiana Coals For UCG
- [55] **Ekim, R.** (2011). Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesinin Türk Kömür Yataklarına Uygulanabilirliği ve Maliyet Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [56] **Shimada, S., Ohga, K., Tamari, A and Ishii, E.** (1995). Underground Coal Gasification-How Much Does It Cost?(Case Study in Japan) MinChem'95, The Fifth Symposium on Mining Chemistry Istanbul, Turkey.
- [57] **Blinderman, M. S., Klimenko, A. Y., Saulov, D. N.** (2007). Forward and Reverse Combustion Linking in Underground Coal Gasification, Ergo Exergy Technologies Inc, Canada, Energy 33 (2008) 446-454.
- [58] **Kotowski, M. D.** (1976). Theoretical Aspects of Reverse Combustion in the Underground Gasification of Coal, M.S.C. Thesis, Univ. Of Wyoming, Laramie
- [59] **Thorness, C.B., Creighton, J.R.** (1983). Review of UCG Field Experiments at Hoe Creek, AIChE Symp. Series. 226, Vol.79
- [60] **Sarraf¹, A., Mmbaga*, J.P., Gupta and Hayes¹, R.E.** Modeling Cavity Growth during Underground Coal Gasification. in: Proceedings of the 2011 COMSOL Conference in Boston.
- ¹University of Alberta,
- * 7th Floor ECERF Building, Edmonton, AB CANADA

http://www.comsol.com/paper/download/83903/shirazi_paper.pdf

- [61] **Url-10** <<http://www.groundtruthtrekking.org/Documents/UCG/UCG-KZamzow-2010.pdf> > alındığı tarih, 10.04.2014.
- [62] **Kacur, J., Durdan, M., Laciak, M., Flegner P.** (2014). Impact analysis of the oxidant in the process of underground coal gasification, Measurement;51 doi:10.1016/j.measurement.2014.01.036
- [63] **Url-11** < <http://www.ucgassociation.org/index.php?option=comcontent&view=article&id=162&Itemid=413> > alındığı tarih, 10.04.2014.
- [64] **Fischer, D.D., Boysen, J.E., Gunn, R.D.** (1976). Energy Balance for the Second Underground Coal Gasification Experiment Hanna, Wyoming, Trans. SPE-AIME, Vol. 262
- [65] **Bartke, T.C., Dockter, L., Sterner, T.E., Virgona, J.E., Wojdac, L.F.** (1978) Status Report on the Hanna III and Hanna IV UCG Experiments, Proc. of the Fourth Underground Coal Conversion Conference, Steamboat.
- [66] **Bartke, T.C., Dockter, L., Sterner, T.E., Virgona, J.E.** (1978). Status of the Fourth UCG Experiment at Hanna Wyoming, SPE 7510, Presented at 53rd. Annual Fall Meeting of SPE-AIME, Houston
- [67] **Burwell, E.L.** (1980). The Department of Energy Underground Coal Conversion Program, Accomplishments and Strategy, Proc. Sixth Underground Coal Conversion Symp., Afton.
- [68] **Edgar, T.F.** (1983). Research and Development on Underground Gasification of Texas Lignite, AIChE Symp. Series, 226, Vol.79
- [69] **Martin, J.W., Liberatore A.J.** (1980). A Successful UCG Field Test in a Thin Seam Swelling Eastern Bituminous Coal, Proc. of the Sixth Underground Coal Conversion Symp., Shangri-La.
- [70] **Singleton, A.H., Noll, W.L., Allen, J.M.** (1980) Summary Report of the Rawlins Test 1 for Gasification of Steeply Dipping Coal Beds, Proc. of the Sixth Underground Coal Conversion, Shangri-La.
- [71] **Moorhouse, J., Huot, M., McCulloch, M.** (2010). Underground Coal Gasification: Environmental Risks and Benefits, A Preliminary Review by the Pembina Institute, Canada.
- [72] **Url-12** <<http://huge.gig.eu/en/About-Project.html> >, alındığı tarih: 13.08.2014.
- [73] **Url-13** <<http://ergoenergy.com/>, alındığı tarih: 20.03.2014.
- [74] **Url-14** <<http://laurusenergy.com> ,alındığı tarih: 20.03.2014.
- [75] **Url-15** <http://www.ai-ees.ca/media/6876/swan_hills.pdf>, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [76] **Url-16** <<http://swanhills-synfuels.com/about-us/history/>>, alındığı tarih: 12.07.2014.
- [77] **Url-17** <<http://carbonenergy.com>>, alındığı tarih: 20.03.2014.
- [78] **Url-18** <<http://www.lincenergy.com/>>,alındığı tarih: 20.03.2014.
- [79] **Url-19** <http://www.lincenergy.com/data/media_news_articles/presentation-09-09-24.pdf>, alındığı tarih: 20.03.2014.

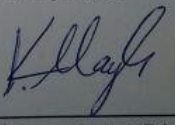
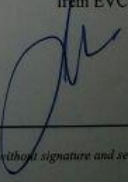
- [80] **Url-20** < http://www.eskom.co.za/Whatweredoing/ElectricityGeneration/UCG/Documents/EU_SA_BilateralUCGPresentation.pdf>, alındığı tarih: 13.08.2014.
- [81] **Url-21** <<https://www.purdue.edu/discoverypark/energy/assets/pdfs/cctr/presentations/UCG-09-16-08.pdf> >, alındığı tarih: 13.08.2014.
- [82] **Url-22** < <http://ucgengineering.com/currentdevelopments2.html>>, alındığı tarih: 13.08.2014.
- [83] **Edgar, T.F.** (1977). Technical, Economic and Environmental Evaluation of In Situ Coal Gasification, In Situ, L(1).
- [84] **Buder, M.K., McCone, A.I., Fischer, R.A., Terichow, O.N.** (1976). Factors Influencing the Economics of Large-Scale In Situ Coal Gasification Operations, Proceedings of the Second Annual Underground Coal Gasification Symposium, Morgantown.
- [85] **Garon, A.M.** (1976). An Economic Evaluation of Underground Coal Gasification, Proceedings of the Second Annual Underground Coal Gasification Symposium, Morgantown.
- [86] **Moll, A.J.** (1976). The Economics of Underground Coal Gasification, Proceedings of the Second Annual Underground Coal Gasification Symposium, Morgantown.
- [87] **Edgar, T.F., Massey, N.A., Glatzer, B.H.** (1981). Estimated Costs of Methanol, Hydrogen and Syngas From In Situ Coal Gasification of Texas Lignite, Proceedings of the Seventh Underground Coal Conversion Symposium, Fallen Leaf Lake.
- [88] **Moll, A.J.** (1984). UCG-Derived Synthesis Gas: An Economic Comparison, Proceedings of the Tenth Annual Underground Coal Gasification Symposium.
- [89] **Davis, B.E., Lindley, P.A.** (1984). Critical economic parameters for Underground Coal Gasification, Proceedings of the Tenth Annual Underground Coal Gasification Symposium.
- [90] **Gun, R.D., Boysen, J.E.** (1987). The Role of Field and Laboratory Data and Mathematical Models in Reducing The Uncertainty Economic Studies, Proceedings Fourth Annual Underground Coal Gasification Symposium, Steamboat Springs.
- [91] **Mason, R.Z., Siegel, M. M., Barone, S. P. and Gash, B. W.** (1987). An Economic Evaluation of UCG of WESTERN Subbituminous Coal, Proceedings of the Thirteenth Annual Underground Coal Gasification Symposium.
- [92] **Krantz, W.B., Gunn, R.D.** (1981). An Overview of Underground Coal Gasification-A Comparison of Modeling Studies With Field Test Data, *Proceedings of the 64th Canadian Chemical Conference*, Halifax, Nova Scotia, pp. 468-475.
- [93] **Url-23** < <http://www.theoil drum.com/node/8184> >, alındığı tarih: 05.08.2014.
- [94] **Pana, C.** (2009). Review of Underground Coal Gasification with Reference to Alberta's Potential, ERCB/AGS Open File Report 2009-10.

- [95] **Url-24** < http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/e4ceef65add6cf2_ek.pdf>, alındığı tarih:22.07.2014.
- [96] **Bidlack, D.L., and Arscott, R.L.** (1976). Economics of Marketing Synthesis Gas Produced by Underground Coal Gasification , Proceedings of the Second Annual Underground Coal Gasification Symposium, Morgantown.
- [97] **Url-25** < http://www.lincenergy.com/data/info_sheets/GTL2_explained_TPR.pdf>, alındığı tarih 07.07.2014.
- [98] **Url-26** <<http://www.kbr.com/Newsroom/Publications/Articles/Economics-of-Coal-to-Liquids-Plant-in-Asia.pdf>>, alındığı tarih 22.07.2014.
- [99] **Ersin, M.** (2006), Türkiye’de Linyit Kömürlerinin Enerji Kaynağı Olarak Önemi, (Yüksek Lisans Tezi), İÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [100] Türkiye Linyit Envanteri, MTA Genel Yayın No: 196, 2010
- [101] Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, ISBN: 6595-46-9, Mart 2003.
- [102] **Schramek, R.** (2003), Isıtma+Klima Tekniği El Kitabı, TTMD yayını 97/98.
- [103] **Stanczyk, K., Howaniec, N., Smolinski A., Swiadrowski, J., Kapusta, K., M. Wiatowski, M., Grabowski, J., Rogut, J. (2010).** Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched air in a pilot scale ex situ reactor for underground gasification, Fuel, 90 (2011) 1953–1962.
- [104] **Glaser, R.R., Johnson, L.A.** (1986). Physical Simulation Of Underground Coal Gasification In An Eastern Bituminous Coal, Proceedings of the Tenth Annual Underground Coal Gasification Symposium.
- [105] **Bhaskaran, S., Ganesh, A., Mahajani, S., Aghalayam, P., Sapr, R.K., Mathur, D.K.** (2012), Comparison between two types of Indian coals for the feasibility of Underground Coal Gasification through laboratory scale experiments, Fuel 113 (2013) 837–843.
- [106] **Yang, L.** (2003), Study of the model experiment of blinding-hole UCG, Fuel Processing Technology 82 (2003) 11 – 25.
- [107] **Greenfield, M.** (1980), UCG Studies In Large Block Simulator, Proceedings of the Sixth Underground Coal Conversion Symposium.
- [108] **Kostur, K., Blistanova, M.** (2009), The Research Of underground Coal Gasification In Laboratory Conditions, Petroleum & Coal 51 (1), 1-7, 2009.

EKLER

EK A : Penta Otomasyon ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ve Ltd. Şirketi
termoeleman sıcaklık kalibrasyon sertifikası

EK A

		TÜRKAK TÜRK AKKREDİTASYON KURUMU TURKISH ACCREDITATION AGENCY tarafından akredite edilmiştir.			
PENTA OTOMASYON ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ltd. Şti.					
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					
Kalibrasyon Sertifikası Calibration Certificate				AB-0113-K 150857S1865 04 - 15	
Cihazın Sahibi / Adresi Customer / Address	:	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			
Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde (SI) tanımlanmış birimleri gerçekleştiren ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliği belgeler. This calibration certificate documents traceability to national standards, which realize unit of measurement according to the International System of Units (SI). Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınması konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile Karşılıklı Tanınma Anlaşmasını imzalamıştır. The Turkish Accreditation Agency (TÜRKAK) 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. Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. Measurement results, expanded uncertainties and calibration methods are given on the following pages, which are part of this certificates.					
Mühür Seal	Tarih Date	Kalibrasyonu Yapan Calibrated By	Laboratuvar Müdürü Head of Calibration Laboratory		
	09.04.2015	Kıvanç MAYLI 	İrtem EVCI 		
Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen kopyalanıp çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürlü sertifikalar geçersizdir. 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.					
FR502-05		Rev.No: 05		Rev.Tarihi: 27.11.2014	

Şekil A.1: Penta Otomasyon ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ve Ltd. Şirketi termoeleman sıcaklık kalibrasyon sertifikası.

Sayfa / Page: 2/3

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: 060530010140100003 / 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 (devam): Penta Otomasyon ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ve Ltd. Şirketi termoeleman sıcaklık kalibrasyon sertifikası.

Sayfa / Page: 3/3

Makine / Cihaz / Instrument / Device

Cihazın Adı / Object	Gösterge Sıcaklık Ölçer	İmalatçısı / Manufacturer	Gösterge: Enda / Prob: -
Model / Model	Gösterge: EOP41-101CTE-R2 / Prob: -	Seri No / Serial No	Gösterge: 060330010140100005 / 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 (devam): Penta Otomasyon ve Endüstriyel Ürünler San. Tic. Ve Ltd. Şirketi termoeleman sıcaklık kalibrasyon sertifikası.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İrem TUNÇ

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul/14.05.1990

Adres: Yıldırım Mah. Latife Sk. No:5 Daire:3 Bayrampaşa/İstanbul

E-Posta: irem-tunc@hotmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi

Mesleki Deneyim :

TÜBİTAK Yurtiçi Yüksek Lisans Bursiyerliği (2013-2015)