DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİ VE TÜRKİYE KÖMÜRLERİNDE KÖMÜR ÖZELLİKLERİ AÇISINDAN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Volkan CEBECİ

Mayıs, 2016
İZMİR

KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİ VE TÜRKİYE KÖMÜRLERİNDE KÖMÜR ÖZELLİKLERİ AÇISINDAN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Cevher Hazırlama Programı

Volkan CEBECİ

Mayıs, 2016
İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

VOLKAN CEBECİ, tarafından **DOÇ. DR. UFUK MALAYOĞLU** yönetiminde hazırlanan **"KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİ VE TÜRKİYE KÖMÜRLERİNDE KÖMÜR ÖZELLİKLERİ AÇISINDAN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ufuk MALAYOĞLU

Yönetici

Prof. Dr. Vedat Arslan

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Serhan Küçükali

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım süresince ileri görüşlülüğü ile bana yol gösterici olan, her türlü konuda yardımcı olup, bilgi ve deneyimlerini aktaran danışmanım Sayın Doç. Dr. Ufuk MALAYOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında desteklerini esirgemeyen, çalışanı olduğum Yeni Çeltek Kömür ve Madencilik A.Ş.'nin Genel Müdürü Sayın Dr. Osman COŞKUN'a, çalışma arkadaşım olarak bana her zaman bilgilerini aktaran ve tez konumda destek olan Yüksek Jeoloji Mühendisi İsmail ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez konum ile ilgili araştırmalarımda bana yardımcı olan, TKİ Genel Müdür Yardımcısı ve aynı zamanda şirketimin Yönetim Kurulu Üyesi Sayın Mustafa ÖZDİNGİŞ'e, TKİ Etüt Proje ve Ar-Ge birimleri yöneticilerine, personeline ayrı ayrı teşekkür ederim.

Uzun soluklu tez çalışmam süresince desteğini her zaman hissettiğim eşim Tuğba CEBECİ'ye hoşgörü ve yardımları için çok teşekkür ederim.

Volkan CEBECİ

KÖMÜR GAZLAŞTIRMA PROSESİ VE TÜRKİYE KÖMÜRLERİNDE KÖMÜR ÖZELLİKLERİ AÇISINDAN UYGULANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Gazlaştırma prosesi temel olarak karbon içerikli kömür, petrol, biyokütle ve katı atıklar gibi hidrokarbonlu yakıtların piroliz, kısmi oksidasyon ve karbonun hidrojenlenmesi ile karbon monoksit, hidrojen, metan gibi gazların elde edilmesidir. Gazlaştırma işleminin gerçekleştiği reaktörlere gazlaştırıcı, oluşan ürüne sentez gazı denilmektedir. Bu çalışmada, yer altı ve yer üstü olmak üzere tüm kömür gazlaştırma proseslerinin tarihsel süreci, uygulamaları, kimyasal özellikleri, yakıt karakteristik özellikleri ve sentez gaz ürün özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Gazlaştırma teknolojileri için gerekli kriterler açıklanarak Türkiye kömürlerinin gazlaştırma prosesinde kullanılabilecek kömür tipi ve özelliklerine uygunlukları araştırılmıştır. Ayrıca yerli kömürlerimiz için önceden yapılmış gazlaştırma çalışmaları, deneyler araştırılmış ve derlenen sonuçlar aktarılmıştır.

Çoğunlukla yüksek nem, kül, kükürt içeren ve düşük ısıl değerli Türkiye kömürlerinin gazlaştırma prosesleriyle değerlendirilmesinin uygun bir metot olabileceği ve bu sayede yerli kaynaklarımızın daha etkin kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kömür gazlaştırma, yeraltı kömür gazlaştırma, sentez gazı, gazlaştırıcılar, Türkiye kömürleri, temiz kömür teknolojileri.

COAL GASIFICATION PROCESS AND TO INVESTIGATE THE APPLICABILITY IN TERMS OF COAL PROPERTIES IN TURKEY COAL

ABSTRACT

Gasification process essentially carbon-containing coal, oil, biomass, and waste such as hydrocarbon content fuels is to produce gas such as hydrogen, methane carbon monoxide by pyrolysis, partial oxidation and hydrogenation. Called a gasifier reactor of the gasification process to take place and the resulting product is called synthesis gas. In this study, is given information about the historical overview, applications, chemical properties, the characteristics of fuel and synthesis gas product of all coal gasification processes including underground coal gasification. The criteria for the type and characteristics of the coal gasification technologies are explained for suitable properties of Turkey's coals which can be used. Also background studies and experiments about gasification have researched and compiled the results were described.

The assessment of Turkey's coals that generally have high humidity, ash, sulphur and low heating value for gasification process has been shown to be a suitable method therefore it has seen our domestic resources can be used more effectively.

Keywords: Coal gasification, underground coal gasification, synthesis gas, gasifiers, Turkish coals, clean coal technology.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU ii
TEŞEKKÜR iii
ÖZ iv
ABSTRACT v
ŞEKİLLER LİSTESİ xii
TABLOLAR LİSTESİ xv

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

1.1 Giriş ve Araştırmanın Amacı 1

BÖLÜM İKİ - KÖMÜR GAZLAŞTIRMA 3

2.1 Kömür Gazlaştırma Prosesinin Tarihi 4
2.2 Gazlaştırmanın Fiziksel, Kimyasal Mekanizmaları ve Reaksiyonları 8
2.2.1 Gazlaştırmanın Kimyası 8
2.2.1.1 Kurutma 11
2.2.1.2 Piroliz 12
2.2.1.3 Yanma 16
2.2.1.4 Gazlaşma 17
2.2.2 Gazlaşma İçin Gerekli Isının Sağlanması 18
2.2.3 Kömürlerin Gazlaştırılmasındaki Temel Tepkimeler 19
2.2.4 Tepkimelerde Termodinamik Denge 23
2.2.5 Gazlaşmanın Termodinamik ve Kinetik İncelenmesi 25
2.2.5.1 Gazlaşma Tepkime Kinetiği 26
2.2.5.2 Reaksiyon Hızı 28
2.2.5.3 Katı Kütle Değişimi ile Reaksiyon Hızı 31
2.2.5.4 Gazlaştırmanın Termodinamik Olarak Modellenmesi 32
2.2.5.4.1 Hammaddeler 33
2.2.5.4.2 Kütle Denkliği 34

2.2.5.4.3 Termodinamik Modelden Çıkarımlar 35
2.2.6 Kokların Gazlaştırılmasına Katalizörün Etkisi 40
2.3 Gazlaştırma Ürünleri ve Sentez Gazı Kullanım Alanları 40
2.3.1 Gazlaştırma Ürünleri 40
2.3.1.1 Düşük Isıl Değerli Gaz 42
2.3.1.2 Orta Isıl Değerli Gaz 42
2.3.1.3 Yüksek Isıl Değerli Gaz 43
2.3.1.4 Diğer Ürünler 43
2.3.2 Gazlaştırma Ajan Seçimi Karşılaştırılması 43
2.3.3 Sentez Gazının Kullanım Alanları 45
2.3.3.1 Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim (IGCC) ve Enerji Üretimi .. 46
2.3.3.2 Sentez Gazından Kimyasal ve Hidrojen Üretimi 49
2.3.3.3 Sentez Gazından Sentetik Yakıt Üretimi 50
2.3.4 Sentez Gazı Kirleticileri ve Temizleme Prosesleri 51
2.3.4.1 Ham Sentez Gazının Temizlenmesi 52
2.4 Kömürlerin Sınıflandırılması 57
2.4.1 Kömürün Oluşumu ve Kömürleşme 57
2.4.2 Kömürün Derecesi ve Sınıflandırılması 59
2.4.3 Kömürün Petrografik Özellikleri 62
2.4.3.1 Kömürün Organik Bileşenleri 63
2.4.3.1.1 Makroskobik Bileşenler 63
2.4.3.1.2 Mikroskobik Bileşenler 63
2.4.3.2 Kömürün Mineral Bileşenleri 65
2.4.4.3 Kömür Petrografisinin Kömür Kullanımında İncelenmesi 65
2.4.4 Kömür Kullanımında Teknolojik Testler 66

BÖLÜM ÜÇ - GAZLAŞTIRMA PROSESLERİ 68

3.1 Yer Üstü Kömür Gazlaştırma Prosesleri 68
3.1.1 Gazlaştırıcılar 70
3.1.1.1 Sabit/Hareketli Yataklı Gazlaştırıcı 70
3.1.1.2 Akışkan Yataklı Gazlaştırıcı 73

3.1.1.3 Sürüklemeli Akışlı Gazlaştırıcı 78
3.1.1.4 Gazlaştırıcı Proseslerin Özelliklerinin Karşılaştırılması 81
3.1.2 Proses Koşullarının Optimizasyonu 83
3.2 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesleri 88
3.2.1 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Yöntemi Temel Prensipleri 89
3.2.1.1 Bağlantılı Düşey Kuyular Prosesi 94
3.2.1.2 Kontrollü Olarak Hareket Ettirilen Ateşleme Noktası Prosesi 96
3.2.2 Yer Altı Proses Koşullarının Optimizasyonu 100

BÖLÜM DÖRT - TÜRKİYE KÖMÜRLERİNİN GAZLAŞTIRMA PROSESLERİNE UYGUNLUKLARININ İNCELENMESİ 105

4.1 Kömür Karakteristik Özelliklerinin Yer Üstü Gazlaştırma Proseslerine Etkileri 106
4.1.1 Kömür Seçimi ve Karakteristikleri 107
4.1.1.1 Organik Bileşenlerin Gazlaştırma Prosesine Etkileri 107
4.1.1.1.1 Isıl Güç 107
4.1.1.1.2 Kısa Analiz 108
4.1.1.1.3 Elementel ve Kükürt Analizi 110
4.1.1.1.4 Tane Boyut Dağılımı 110
4.1.1.1.5 Termal ve Mekanik Parçalanma 111
4.1.1.1.6 Katran, Hafif Yağlar, Sıvı Üretimi Fischer ve Gray-King Testleri 112
4.1.1.1.7 Kekleşme Eğilimi ve Serbest Şişme İndisi 112
4.1.1.1.8 Reaktivite 114
4.1.1.1.9 Çar Yüzey Alanı ve Boşluk Boyutu 115
4.1.1.1.10 Petrografik Özellikler 116
4.1.1.2 İnorganik Bileşenlerin Gazlaştırma Prosesine Etkileri 118
4.1.1.2.1 Kül İçeriği 118
4.1.1.2.2 Kül Ergime Sıcaklıkları 119
4.1.1.2.3 Kül Viskositesi ve Kritik Viskosite Sıcaklığı (Tcv) 122
4.1.1.2.4 Kükürt ve Klor İçeriği 122

4.1.1.2.5 Öğütülebilirlik İndisi (HGI) 123
4.1.2 Türkiye Kömür Özelliklerinin Gazlaştırma Prosesine Uygunluklarının Karşılaştırılması 123
4.1.2.1 Türkiye Kömürlerinin Özellikleri 125
4.1.2.2 Türkiye Kömürlerinin Yer Üstü Gazlaştırma Prosesine Uygunlukları 129
4.1.3 Türkiye Kömürleri İçin Yapılmış Yer Üstü Gazlaştırma Çalışmaları ... 134
4.2 Kömür ve Kömür Yatağı Karakteristik Özelliklerinin Yer Altı Gazlaştırma Proseslerine Etkileri 142
4.2.1 Yer Altı Kömür Damarı Seçimi 142
4.2.1.1 Kömür Yataklarının Karakteristik Özelliklerinin Etkileri 144
4.2.1.1.1 Kömürleşme Derecesi (Rank) 144
4.2.1.1.2 Kömür Damarının Kalınlığı 146
4.2.1.1.3 Kömür Damarının Derinliği 147
4.2.1.1.4 Kömür Damarının Eğimi 148
4.2.1.1.5 Tabakaların Yapısı 148
4.2.1.1.6 Kömür Damarının Geçirgenlik ve Boşluk Özellikleri 148
4.2.1.1.7 Nem İçeriği 148
4.2.1.1.8 Hidrojeoloji ve Akiferlerin Yakınlığı 149
4.2.1.1.9 Rezerv Miktarı 149
4.2.1.1.10 Altyapı Uygunluğu 150
4.2.1.1.11 Kömür Yatağı Metan Varlığı 151
4.2.2 Türkiye Derin Kömür Yatakları Özelliklerinin Yer Altı Gazlaştırma Prosesine Uygunluklarının Karşılaştırılması 151
4.2.2.1 Türkiye Derin Kömür Yataklarının Özellikleri 153
4.2.2.2 Türkiye Derin Kömür Yataklarının Yer Altı Gazlaştırma Prosesine Uygunlukları 153
4.2.3 Türkiye Kömürleri İçin Yapılmış Yer Altı Gazlaştırma Çalışmaları 156

BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR 159

KAYNAKLAR 160

EKLER..... 172

EK-1: Adana-Tufanbeyli Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 172
EK-2: Bursa-Keles Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi..... 173
EK-3: Çanakkale-Çan Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi. 174
EK-4: Konya-Ilgın Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi..... 175
EK-5: Kütahya-Tunçbilek Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 176
EK-6: Manisa-Soma Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi ... 177
EK-7: Tekirdağ-Saray Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 178
EK-8: Bolu-Göynük Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi ... 179
EK-9: Çorum-Dodurga Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 180
EK-10: Bingöl-Karlıova Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 181
EK-11: Eskişehir-Alpu Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 182
EK-12: Kırklareli-Vize Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 183
EK-13: Kahramanmaraş-Elbistan Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi..... 184
EK-14: Ankara-Beypazarı Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 185
EK-15: Tekirdağ-Çerkezköy Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi..... 186
EK-16: Konya-Karapınar Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 187
EK-17: Isparta-Şarkikaraağaç Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi..... 188

EK-18: Denizli-Çardak Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 189
EK-19: Amasya-Merzifon Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 190
EK-20: Sivas-Kangal Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi .. 191
EK-21: Kütahya-Seyitömer Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 192
EK-22: Muğla-Milas Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi .. 193
EK-23: Muğla-Yatağan Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 194
EK-24: Bursa-Orhaneli Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi 195
EK-25: Afyonkarahisar-Dinar Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi..... 196
EK-26: Zonguldak-Karadon Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi..... 197
EK-27: Şırnak-Silopi Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi .. 198

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 1850 tarihli Baltimore Bayard Sokak gazlaştırma tesisinin çizimi..... 5
Şekil 2.2 Dolmabahçe Gazhanesi günümüzde İnönü Stadyumunun yerinde 6
Şekil 2.3 Gazlaştırmanın temel döngüsü..... 9
Şekil 2.4 Gaz ürünlerin reaksiyonlarında oksijen-kömür oranı diyagramı 10
Şekil 2.5 Gazlaştırma proses safhaları 11
Şekil 2.6 Kurutma, piroliz, homojen ve heterojen tepkimeleri safhaları 15
Şekil 2.7 Kömür gazlaştırma aşamaları ve ürünleri 16
Şekil 2.8 Zıt akışlı sabit yataklı bir gazlaştırıcıda katı yakıtın yaşadığı dönüşüm..... 18
Şekil 2.9 Ototermik ve allotermik gazlaştırma 19
Şekil 2.10 Kömür gazlaşma transfer mekanizması 26
Şekil 2.11 Gazlaştırma reaksiyonlarındaki basamaklar 27
Şekil 2.12 Gazlaşma hızının sıcaklığa bağlılığı 29
Şekil 2.13 Karbonun H_2O, H_2 ve CO_2 ile gazlaştırılmasında tepkime hızının basınca bağlılığı..... 31
Şekil 2.14 Hammadde karakteristikleri Van Krevelen diyagramı 33
Şekil 2.15 1000 ºC'de basıncın sentez gazı bileşimi üzerine etkisi 36
Şekil 2.16 30 bar basınç altında sentez gazı bileşimi üzerine sıcaklığın etkisi..... 37
Şekil 2.17 Saf karbon için gazlaştırma ayakizi 38
Şekil 2.18 Gazlaştırma yöntemleri ve ürünleri 41
Şekil 2.19 Gazlaştırıcılı kombine çevrim santrallerinin sistem yapısı..... 46
Şekil 2.20 Yeni nesil çoklu-üretim gazlaştırıcılı kombine çevrim santral tesisi..... 44
Şekil 2.21 Kömür gaz verimleri..... 49
Şekil 2.22 Kömür gazlaştırma uygulamaları ürünleri..... 50
Şekil 2.23 Seramik bariyerli filtre tipleri 54
Şekil 2.24 Partikül temizlemede kullanılan seramik filtrenin şematik gösterimi 54
Şekil 2.25 Nakso, Japonya sıcak gaz temizleme ünitesi şeması 56
Şekil 2.26 Hümik organik maddenin gömülmesiyle oluşan kömürleşme 58
Şekil 2.27 Kömürleşme derecesi artarken uçucu madde miktarı azalır..... 59

Şekil 2.28 Kömürün temel içerikleri 62
Şekil 2.29 Optik mikroskop görüntüsü 66
Şekil 3.1 Gazlaştırma reaktörü tipleri 69
Şekil 3.2 Sabit yataklı gazlaştırıcı prosesi ve sıcaklıkları, kuru küllü gazlaştırıcı 71
Şekil 3.3 British Gaz Lurgi gazlaştırıcısı 72
Şekil 3.4 Akışkan yatak davranışlarının sıvı ile açıklanması 74
Şekil 3.5 Akışkan yataklı gazlaştırıcı prosesi ve sıcaklıkları 75
Şekil 3.6 Akışkan yataklı transport tipi gazlaştırıcı prosesi ve sıcaklıkları 77
Şekil 3.7 U-Gas gazlaştırıcısı 79
Şekil 3.8 Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı prosesleri ve sıcaklıkları 79
Şekil 3.9 Conoco Philips E-Gas gazlaştırıcısı 80
Şekil 3.10 Denge gaz bileşimi, sıcaklık ve basıncın etkisi 84
Şekil 3.11 Özbekistan, Angren 100 MW YKG enerji tesisi ve Güney Afrika, Majuba Mpumalanga (2x140) 280 MW YKG enerji tesisi 88
Şekil 3.12 Yer altı gazlaştırma prosesi şeması ve reaksiyon bölgeleri 91
Şekil 3.13 Tipik gazlaştırma oyuğu, kömür cephesi, kayaç bölgesi ve kalıntı bölgesi kesit gösterimi 92
Şekil 3.14 Gazlaştırma oyuğunun tamamlanmış durumdaki profili 93
Şekil 3.15 Bağlantılı düşey kuyular prosesi 95
Şekli 3.16 YKG kontrollü hareket ettirilen ateşleme noktası (CRIP) prosesi şeması. 96
Şekil 3.17 CRIP tekniğinin kademeli uygulanması 97
Şekli 3.18 Yönlendirilmiş sondaj ile kuyuların bağlanması 98
Şekil 3.19 Manyetik işaretçi analizi 99
Şekil 3.20 Manyetik işaretçi ile doğrultu verilmesi 99
Şekil 3.21 Üç boyutta sondajın iz verileri 100
Şekil 3.22 YKG işleminde damar kalınlığının su miktarına göre etkisi 102
Şekil 3.23 Yer altındaki gazlaştırma boşluğu ile su tabakasının basınçları 104
Şekil 4.1 Türkiye'nin önemli kömür havzaları ve sahaları 125
Şekil 4.2 Tersiyer sınırlar içerisinde AID'in dağılım kestirimleri 128
Şekil 4.3 Tersiyer sınırlar içerisinde külün dağılım kestirimleri 128
Şekil 4.4 Tersiyer sınırlar içerisinde nemin dağılım kestirimleri 129
Şekil 4.5 Soma gazlaştırma ve gaz temizleme pilot tesisi 135

Şekil 4.6 TKİ-Tunçbilek kömür gazlaştırma ve gaz temizleme pilot tesisi 137
Şekil 4.7 Tunçbilek gazlaştırma pilot tesisi 138
Şekil 4.8 Dünya'da YKG uygulamalarının derinlik ve kalınlık verileri 147
Şekil 4.9 Kaynak, rezerv ve görünür rezerv kestirim şeması 150
Şekil 4.10 Yer altı gazlaştırma deney reaktörü 157
Şekil 4.11 Farklı kömür yataklarının sentez gazı bileşim etkisi 158

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Gazlaştırma teknolojisinin tarihi periyot tablosu 7
Tablo 2.2 1500 ºC'de farklı ürünler ve sentez gazı bileşimleri 36
Tablo 2.3 Fischer-Tropsch prosesi hidrokarbon isimleri ve karbon aralıkları 51
Tablo 2.4 Kömürlerin ASTM sınıflandırması 60
Tablo 2.5 Uluslararası Genel Kömür Sınıflandırılması 60
Tablo 2.6 Çeşitli kömürleşme derecelerinde kömür özellikleri 61
Tablo 2.7 Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri 61
Tablo 2.8 Farklı yakıtların C, H, O miktarları 62
Tablo 2.9 Farklı kömürleşme dereceli kömürlere ait kimyasal analiz sonuçları 63
Tablo 2.10 Maseral grupların atomik H/C ve O/C oranları 64
Tablo 3.1 Gazlaştırıcı proseslerinin kategorize edilmiş karakteristik özellikleri 82
Tablo 4.1 Kömür özellikleri ve kısa açıklamaları 107
Tablo 4.2 Kömür karakteristikleri gazlaştırma teknolojileri uygunluk parametreleri 124
Tablo 4.3 Türkiye linyit sahaları ve rezerv miktarları 126
Tablo 4.4 Ünlü ve diğer. (2015) linyit gazlaştırma deney sonuçları özeti 140
Tablo 4.5 Çan, Tunçbilek, Ilgın sabit yataklı gazlaştırma deney sonuçları özeti 141
Tablo 4.6 YKG yer seçimi için gerekli kriterlerin derecelendirilmiş özet tablosu 143
Tablo 4.7 Kömür kesiti uygunluk sınıflandırması 145
Tablo 4.8 Yer altı kömür gazlaştırma prosesi kömür yatağı uygunluk parametreleri 152

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

1.1 Giriş ve Araştırmanın Amacı

İnsanlık tarihi açısından kömür kullanımının teknolojik olarak gelişmesi yeniçağların olgunlaşmasına ve insanlığın gelişmesine sebep olmuştur. Kömürden buhar eldesi ile enerji kazanımının sanayi çağını başlatması, kömür pili sayesinde ampulün icadı gibi birçok büyük adımın aracısı kömür olmuştur. Katı fosil yakıt olan kömür elektrik enerjisi ve ısınma amaçlı kullanımının yanı sıra çeşitli sektörler için amonyak, gübre, kauçuk, boya, plastik vb. gibi ürünlerin temeli olan kimyasal hammaddelerin üretiminde de kullanılmaktadır. Petrolün bulunması ile kömürün kullanım alanları azalmış birçok alanda yerini petrol ve petrol ürünleri almıştır. Ancak tarihi süreç içerisinde çeşitli sebeplerle petrol arzındaki dalgalanmalar sayesinde zaman zaman kömür kullanımı parlatılmış ve kömürün önemi hatırlanmıştır. Nitekim petrolü olan ülkeler ve miktarları sınırlıdır. Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde petrol kaynakları bakımından şimdilik yetersizdir ve dışarıya bağımlıdır. Günümüzdeki küresel manadaki gelişmeler, ekonomik parametrelerin dışında stratejik olarak yerli kaynaklarımızın ülkemiz için çok önemli olduğunu göstermiştir. Rezerv açısından zengin diyebileceğimiz linyit kömür yataklarımızın önemi artmasına karşın ısıl güç, kül, nem ve kükürt miktarları açısından zorlayıcıdır. Zorlayıcı olan şartlar geleneksel metotlar içerisinde ekonomik olarak etkendir ancak alternatif kullanım teknolojileri için aynı şekilde zorlayıcıdır yahut ekonomik değildir kelimesini kullanamayız. Bu bağlamda yerli kömürlerimizin yeni teknolojiler ile kullanımının incelenmesi için gerçekleştirdiğim tez çalışmam yerli kaynaklarımızın değerlendirilmesi düşüncesinden doğmuştur.

Kömürlerin gazlaştırılması prosesinde yerli kömür özelliklerimizin olumlu kısaslarda olabileceği düşünülerek yaptığım çalışmamda, gazlaştırma proses özellikleri ve bunlara uygun kömür özellikleri araştırılmış ve yerli kömürlerimize uygunlukları incelenmiştir. Kömür gazlaştırma prosesi kömür rezervlerimizin büyük kısmını oluşturan linyit kömürlerinin kullanımı için umut verici bir seçenek olabilir.

Gazlaştırma işlemi ile üretilen sentez gazı sayesinde (CO, H_2 ve diğer.) elektrik üretimi, sıvı yakıt üretimi, hidrojen üretimi, sentetik doğal gaz üretimi ve değerli kimyasal ürünlerin üretimleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca sentez gazı ile elektrik üretimi için gerekli olan Entegre Kömür Gazlaştırma Kombine Çevrim (IGCC) santralleri ile daha verimli kömür kullanımı sağlanıp aynı zamanda sera gazı salınımları ve partikül emisyonlarının azalması da sağlanabilir. Kömürün yatağında gazlaştırılmasını içeren temiz kömür teknolojileri sınıfında bulunan yer altı kömür gazlaştırma prosesi ile yer altı iş kazası risklerini ortadan kaldırarak, ekonomik olmayan derin kömür yataklarımızdan sentez gazı elde edilebilir.

Bu tez konusunu çalışmamdaki diğer bir sebep ise çoklu disiplinli olan madencilik sektörünün alternatif kömür kullanım teknolojileri ve uygulamaları kapsamında, gazlaştırma konusu ile ilgilendiğini vurgulamak ve bu konunun madencilik kolu olarak gelişmelere katkı koymaktır.

BÖLÜM İKİ
KÖMÜR GAZLAŞTIRMA

Katı yakıtların organik kısımlarının bazı gaz ve buharlar yardımıyla gaz ürünlere dönüştürülmesine "gazlaştırma", elde edilen ürüne sentez gazı denir. Gazlaştırma sürecinde katı ve gaz fazların oluşturduğu heterojen tepkimeler mevcuttur. Gazlaştırıcı olarak su buharı, hava, H_2, CO_2, O_2, ya da bunların karışımları kullanılır (Bozkurt, 2005; Gafur, 2006). Sentetik doğal gaz üretiminde, elektrik üretiminde ve kimyasal maddelerin üretiminde kullanılan kömür gazlaştırma prosesi yer üstü ve yer altı gazlaştırması olarak iki şekilde yapılmaktadır (Ünalan, 2010).

Kömür gazlaştırma prosesi, kömürün doğrudan yakılması yerine (kısmi oksidasyon), termokimyasal bir yöntem ile kimyasal bileşenlerine ayrılması işlemidir. Gazlaştırma prosesinde kullanılacak hammadde sadece kömürle sınırlı değildir. Petrokok gibi petrol kökenli ürünler, biyokütle ve atıklar da gazlaştırma işlemine tabi tutulabilir (Ünver ve diğer., 2010). Bunlar yalnız başlarına veya kömür karışımları ile de değerlendirilebilmektedir. Doğalgazdan sentez gazı eldesi ile kimyasal üretimi yaygın olmakla beraber doğalgaz kombine çevrim santralleri de mevcuttur.

Kömürün gazlaştırılması, kömürün elektrik, hidrojen ve diğer enerji ürünlerine dönüştürülmesinde kullanılan en temiz ve birden çok amaca hizmet eden yöntemlerden biridir. Bir gazlaştırıcıda, kömür yüksek basınç ve sıcaklıklarda, ortamda buhar varken, kontrollü miktarlardaki hava ve oksijene maruz bırakılır. Molekül yapısı parçalanan kömür karbon monoksit, hidrojen ve diğer bileşenlerine ayrıştırılır. Esas olarak hidrojen (H_2) ve karbon monoksitten (CO) meydana gelen bu gaza sentez gazı (*syngas*) denir. Gazdaki diğer bileşenler, hammaddenin türüne ve gazlaştırıcının koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir (Ünver ve diğer., 2010). Üretilen sentez gazı ağırlıklı olarak CO ve H_2'den oluşur. Sentez gazı bileşimi yaklaşık olarak hacimce % 50 CO, % 40 H_2, % 10 CO_2, CH_4, NH_3, HCI, HF, N_2, H_2S şeklindedir. Günümüzde bu gaz için syngas (sentez gazı) terimi

kullanılmaktadır. Synthetic (sentetik) gaz ile karıştırmamak gerekir SNG, sentetik gaz ürünlerden doğalgaz kalitesinde metan gazı eldesidir (Ünalan, 2010).

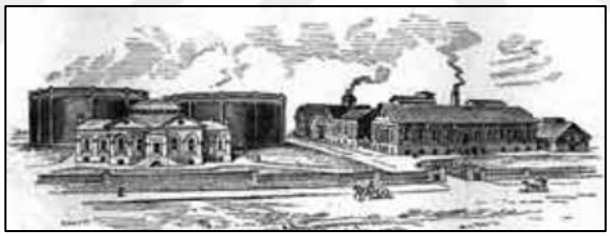
Kömür gazlaştırma teknolojileri dünya üzerinde gerek enerji gerekse kimyasal madde üretimi amacıyla etkin olarak kullanılmaktadır. Gazlaştırma ile elde edilen sentez gazından Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim (IGCC) enerji üretim santrallerinde yüksek verimle elektrik üretiminde yararlanılmakta, katalitik dönüşüm ile de hidrojen, metanol, amonyak, metan, etanol, propanol, dimetileter, etilen, propilen, asetik asit, aseton, metil etil keton, sentetik benzin, sentetik dizel gibi sıvı hidrokarbonlar ve organik kimyasal maddeleri, alifatik hidrokarbonlar ve daha bir çok farklı türde kimyasal madde üretilebilmektedir (Tolay, Yamankaradeniz, Daradimos, Hirschfelder, ve Vostan, 2008).

2.1 Kömür Gazlaştırma Prosesinin Tarihi

Kömürden gaz elde edilmesinin keşfi, yazılı kayıt olarak doğrulanmamışsa da 1600'lü yılların başlarına kadar gitmektedir. 1609 yılında, Belçikalı kimyager, Jan Van Helmont, ısıtıldığı zaman kömürden gaz çıkışı olduğunu gözlemlemiştir (Miller, 2005). 1684 yılında, Yorkshire, İngiltere'den John Clayton, taş kömürünü damıtarak balon içerisinde gaz toplamıştır (Ünalan, 2010). 1792 yılında, İskoçyalı Mühendis William Murdock, damıtma kazanı kullanıp hava yokluğunda taş kömürünü ısıtmış, kömürden gaz ve kok dönüşümü sağlayarak kömür gazlaştırma alanına ticari öncülük etmiştir (Liu, Cui, ve Fletcher, 2010; Miller, 2005). Kömür gazlaştırma 1812 yılında, Londra'da "Light and Coke Company" adlı şirket ile sokak aydınlatılmasında kullanılması için ticari bir proses haline gelmiştir (Higman ve Burgt, 2008; Liu ve diğer., 2010). Şekil 2.1'de 1850 tarihli Baltimore Bayard Sokak gazlaştırma tesisinin çizimi gösterilmektedir. En eski ve önemli proses tasarımı K. W. Siemens tarafından İngiltere'de tasarlanmıştır. 1860 yılından beri uygulamalarda kullanılmaktadır (Ateşok, 2009; Tolay ve diğer., 2008). Üretilen gazlara kömür gazı, şehir gazı, aydınlatma gazı gibi çeşitli isimler verilmiştir (Miller, 2005). Akışkan yakma sistemleri (brülör) yardımı ile ısıya dönüştürülüp tesise beslenebilir bağlamındaki ilk bilimsel çalışmalara ilham kaynağı kömür gazlaştırma prosesidir. Bu işlem 1900'lü

yıllarda Nobel Ödülü alan Fransız kimyacı Paul Sabatier tarafından geliştirilen, CO_2 ve H_2'nin uygun reaksiyon koşullarının (katalizör, sıcaklık, basınç vb.) sağlandığı bir reaktörden geçirilerek metanın üretilmesidir (Yılmazoğlu, 2012).

Kömürün yer altında gazlaştırılması ise ilk olarak İngiltere'de, 1868 yılında K.W. Siemens tarafından ortaya atılmıştır (Tolay ve diğer., 2008; Kavuşan, 1986). Yaklaşık 20 yıl sonra Rus bilim adamı Dmitriy Mendelevev bu konudaki araştırmalarını yayınlamıştır. Yer altı kömür gazlaştırma prosesi için ilk patenti Amerikalı bilim adamı Beets 1909 yılında almıştır. İlk uygulama 1912 yılında İngiliz bilim adamı William Ramsey tarafından County Durham'da yapılmıştır. Birinci Dünya Savaşı bu alandaki çalışmaların uzun süre aksamasına neden olmuştur. 1930 yıllarında Rusya'da ikinci önemli uygulama başlamış ve İkinci Dünya Savaşı nedeniyle bazı aksamalar olmasına rağmen bu tesis 1950 yılından günümüze kadar gelmiştir (Burton, Friedman, ve Upadhye, 2007; Dzimba, 2011; Ekim, 2011; Kavuşan, 1986; Klimenko, 2009).



Şekil 2.1 1850 tarihli Baltimore Bayard Sokak gazlaştırma tesisinin çizimi (Breault, 2010)

Ülkemizde ise gazlaştırma prosesinin ilk uygulaması Dolmabahçe Sarayı yanında kurulan Dolmabahçe Gazhanesi'nde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2). Yaz kış oturulması planlanan büyük boyutlardaki sarayın aydınlatma ve ısıtma problemini çözmek için sarayın inşaatıyla birlikte sarayın yapıldığı yerin hemen arkasında Nişantaşı'na doğru uzanan vadiye son derece stratejik bir havagazı fabrikası devlet eliyle Hazîne-i Hâssa-i Hümâyun tarafından inşa ettirilmiştir. Saraya yakın olduğu için yapı Dolmabahçe Gazhanesi adıyla tanınmıştır. Dolmabahçe Gazhanesi'nin inşası sarayla birlikte 1853 yılında tamamlanmıştır. Kırım Savaşı'nın sona ermesi ve Paris antlaşmasının imzalanması akabinde saray ve eklentileri 7 Haziran 1856

tarihinde resmi bir törenle kullanıma açılmış ve sarayın aydınlatılması için gerekli havagazı Osmanlı Devleti sınırları içinde ilk defa burada üretilmiştir. Ayrıca Dolmabahçe Gazhanesinin üretim fazlası havagazı ile 1856 yılında Beyoğlu bölgesine havagazı verilmeye başlanmış, havagazı ile İstanbul'da ilk defa cadde-sokak aydınlatması İstiklal Caddesi (Cadde-i Kebir) aydınlatılarak gerçekleştirilmiştir (Nayır, 2012).

İstanbul Dolmabahçe gazhanesi 1853 yılında, Yedikule gazhanesi 1880 yılında, Kadıköy gazhanesi 1891yılında, Ankara-Maltepe havagazı fabrikası 1929 yılında hizmete açılmıştır (Ünalan, 2010).



Şekil 2.2 Dolmabahçe Gazhanesi günümüzde İnönü Stayumunun yerinde (İmageshack, 2015).

Sentez gazı üretimi için düşük kalorili ve yüksek küllü kömürlerin uygulandığı Winkler gazlaştırıcısı ile gazlaştırma prosesi Amerika Birleşik Devletleri dışında ilk defa 1950 yılında Almanya, Türkiye, S.S.C.B, Bulgaristan, Yugoslavya ve Hindistan'da başarılı şekilde uygulanmıştır. Ticari olarak gübre fabrikasında Winkler gazlaştırıcılar Türkiye/Kütahya'da 1974 yılına kadar başarıyla çalıştırılmıştır.

Tasarım kapasitesi 24,000 m³/sa olan tesis % 73,7 karbon, % 50 kül içerikli kömürlerde % 130 kapasite ile çalışmıştır. Ayrıca Kütahya'daki fabrikada Koppers-Totzek gazlaştırıcısı da 74 μm altı boyutlarında, % 2-8 nem içerikli kömür beslemesi ile kullanılmıştır (Schobert, 1995). Gazlaştırma teknolojisinin bugüne kadar geçirdiği önemli değişimler ve tarihleri Tablo 2.1'de listelenmiştir (Mathew, 2013).

Tablo 2.1 Gazlaştırma teknolojisinin tarihi periyot tablosu (Mathew, 2013)

1700	Yılı öncesi temel yakıt odun ve odun kömürü
1700-1750	Endüstriyel devrim, kömür yakıtı kullanımı
1800-1900	Kömür pirolizi, şehir gazı arzı, su gazı arzı, metan üretimi
1912	Yer altı kömür gazlaştırma uygulamasının başlaması
1920	Kriyojenik hava ayrıştırma, sıvılaşmış havayı komponentlerine ayırma (hava, oksijen değişimi)
1926	Winkler akışkan yataklı gazlaştırıcı
1931	Lurgi hareketli yataklı gazlaştırıcı
1940	Koppers-Totzek sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı Kimya endüstrisinde hidrojen üretimi
1950'ler	Texaco and Shell hidrokarbon gazlaştırmanın gelişimi, F-T sıvı (Fischer-Tropsch) yakıt üretimi, Sasol projesi, yer altı kömür gazlaştırma uygulamasının gelişmesi
1970'ler	Petrol krizi
1973	Texaco kömür gazlaştırma için şlam beslemeli prosesler geliştirmesi
1974	Shell and Koppers-Totzek basınçlı gazlaştırma gelişimi
1981	Yüksek ısılı Winkler gazlaştırıcı gelişimi
1984	Lurgi (British) cüruflu gazlaştırma, ilk kömür IGCC uygulamaları
1999'lar	Shell/Krupp-Uhde basınçlı sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı geliştirilmesi (PRENFLO), Kömür IGCC yaygınlaşması
2007	A-IGCC/A-IGFC teknolojisinin başlaması (Japonya)

2.2 Gazlaştırmanın Fiziksel, Kimyasal Mekanizmaları ve Reaksiyonları

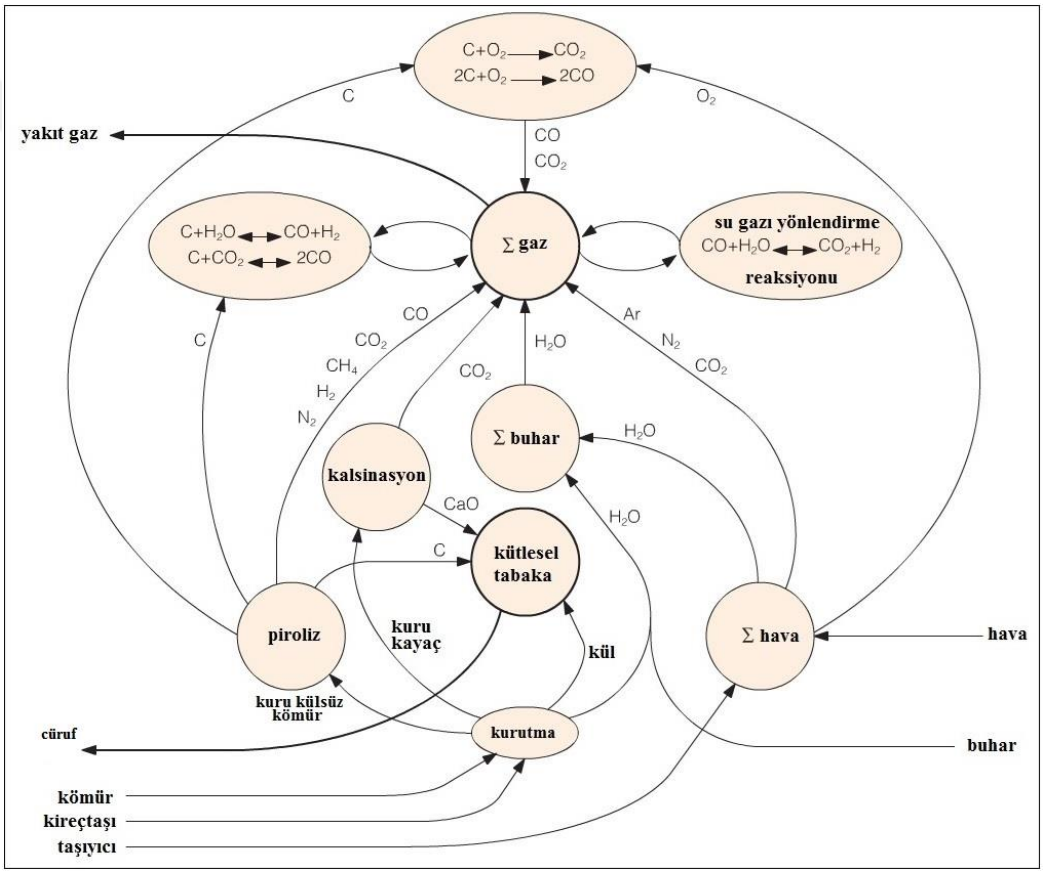
2.2.1 Gazlaştırmanın Kimyası

Katı bir yakıt, içerisinde su, hafif gazlar, yoğuşabilen ağır hidrokarbonlar, kül (mineraller, çeşitli metaller ve elementler) ve bu maddelere barınma alanı sağlayan katı karbon bulunduran bir yapı olarak göz önüne alınabilir. Bu yapı hammadde olacak biyokütle ve kömür için farklılık göstermekle birlikte kendi hemcinsleri içerisinde önemli ölçüde farklılık gösterir (Kaya, 2009).

Kömürlerin gazlaştırılmasıyla elde edilen gazların bileşim ve miktarı, kömürün tepkime yeteneğine, kullanılan gazların cinsine ve uygulanan gazlaştırma işlemine (basınç, sıcaklık, kömür cinsi ve gazın akış yönleri) bağlıdır. Bu adımda ele geçen ham gaz, çeşitli oranda CO (karbon monoksit), CH_4 (metan), H_2 (hidrojen), CO_2 (karbondioksit), su buharı ve N_2 (azot) içerir. Kullanılan kömürdeki kükürdün önemli bir kısmı da H_2S (hidrojen sülfür) ve COS (karbonil sülfür) halinde ham gaz içinde bulunur (Canel, 1986).

Kömür gazlaştırma işlemi temel olarak piroliz ve gazlaştırma olarak iki bölümde temellendirilmiştir (Adams ve diğer., 2009; Lau, 2014). Gazlaştırıcının tasarımına bakılmaksızın, kullanışlı gaz elde edebilmek için gerçekleşmesi zorunlu olan iki aşamadan birincisi olan pirolizde, 600 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yakıtın içindeki uçucu bileşenler ayrılır. Pirolizin buharlaşmayan yan ürününe çar (gazı alınmış katı) adı verilir. Çar genel olarak sabit karbon ve külden oluşur. İkinci aşama olan gazlaştırmada, pirolizden kalan karbon, buhar veya hidrojen ile reaksiyona girer ya da hava veya saf oksijen ile yanar. Hava ya da oksijenin kullanıldığı oksidasyon reaksiyonları, endotermik reaksiyonlarda gereken ısı enerjisini sağlar. Böylece dışarıdan bir enerji takviyesi gerekmez. Endüstriyel gazlaştırma prosesi, 700 °C'nin üzerindeki sıcaklılarda, kullanılan yönteme bağlı olarak gazlaştırma sıcaklığı 1200 °C'ye kadar çıkarılarak gerçekleştirilebilir. Gazlaştırma kullanılan ortama göre, havada gazlaştırma, oksijenli ortamda gazlaştırma, buhar ortamında gazlaştırma "reforming" ve karbondioksit ortamında gazlaştırma olarak sınıflandırılmaktadır. Hava ortamında gazlaştırma ürünleri yüksek oranlarda azot gazı içerirler (Klein,

2002; Maki, 2010). Bu süreçte elde edilen ürünlerin mol olarak yüzdesi; % 15-30 CO, % 11-20 H_2, % 4-15 CO_2, % 0,5'ten az CH_4 ve % 45-60 N_2'tur. Şekil 2.3'te gazlaştırmanın temel döngüsü gösterilmiştir (Adams ve diğer., 2009). Oksijen ortamında gazlaştırma da ise ürünler daha yüksek enerjili (2866 Kcal/Nm³), CO ve H_2 gibi daha değerli gazlardan oluşurlar. Oksijen veya havanın farklı miktarlarda karışımı olan buhar ortamında gazlaştırmada H_2/CO oranı daha yüksektir ve metan, metanol, hidrojen gazı, nafta, basit aromatik bileşikler gibi değerli ürünler yüksek oranda elde edilirler (Maki, 2010).

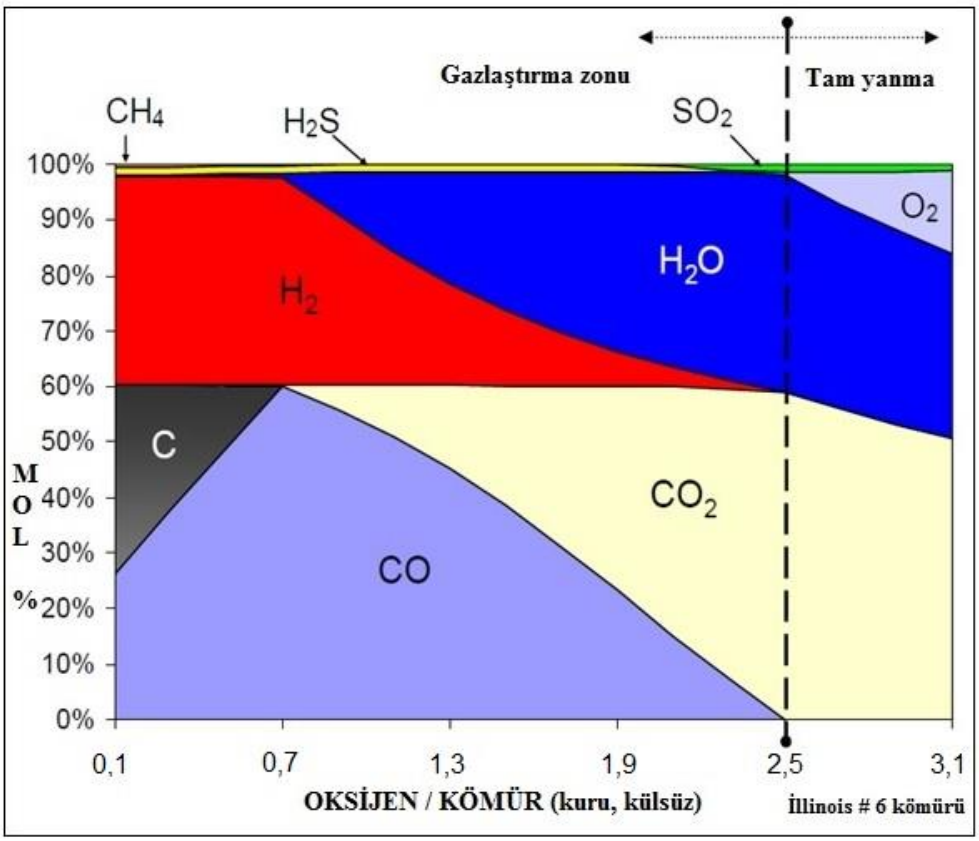


Şekil 2.3 Gazlaştırmanın temel döngüsü (Adams ve diğer., 2009)

Gazlaştırma işlemi, farklı sıcaklık ortamında gerçekleşen fizikokimyasal prosestir ve dört safhaya ayrılır; kurutma, piroliz, yanma ve indirgenme. Kurutma 150 ºC <, piroliz 150-700 ºC, yanma 700-1500 ºC, indirgeme (gazlaştırma) 800-1100 ºC sıcaklıklarında gerçekleşir. Şekil 2.5'te gazlaştırma aşamaları ürünleri ile

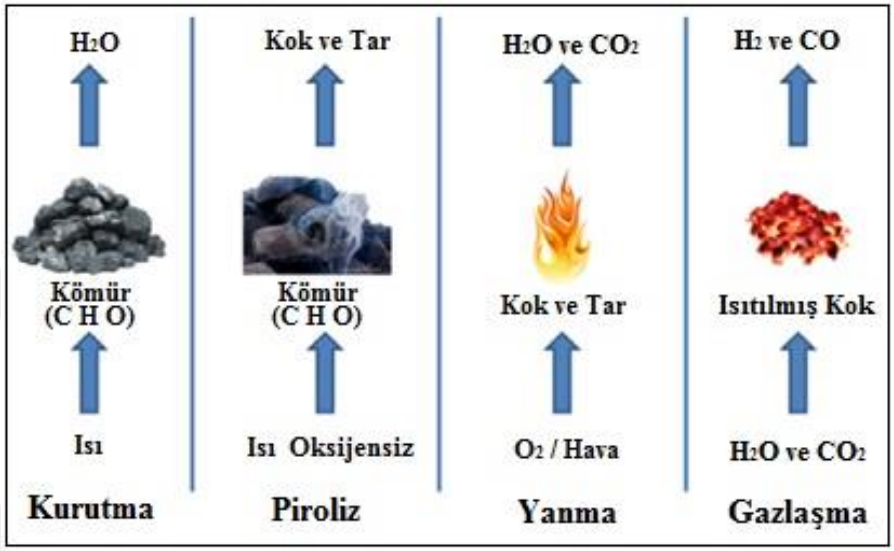
gösterilmiştir. Bu süreçlerden kurutma, piroliz ve gazlaşma ekzotermik yanmadan sağlanan ısıyı tüketir (Basu, 2006; Maki 2010).

Gazlaştırma yanıcı malzemenin kısmen oksitlenmiş olduğu ya da kısmen yandığı bir işlemdir. Gazlaştırma ürünü olan sentez gazı yanıcı bir gazdır. Gazlaştırma tam yerine kısmi oksijen gerektirdiğinden gazlaştırma işlemleri oksijence zayıf bir ortamda yürütülmektedir. Şekil 2.4'te (Wang, Means, Shekhawat, Berry, ve Massoudi, 2015) görüldüğü gibi, stokiyometrik olarak tam yanma için gerekli oksijen-kömür (O/C) oranı 2,5'tir. Bu oran neredeyse kömür gazlaştırma için gerekli oksijen-kömür oranının 4 katıdır. Yanma sisteminde verilen hava miktarının kömürün tam yanması için gerken teorik hava miktarına oranına denge oranı (ER, *equivalent ratio)* denir. Gazlaştırma işlemi için kömürün tam yanması gereken hava miktarından daha az miktarda hava verilmelidir (Tarakçıoğlu, 2015).



Şekil 2.4 Gaz ürünlerin reaksiyonlarında oksijen-kömür oranı diyagramı (Wang ve diğer., 2015)

Katı bir yakıtın içeriği ne olursa olsun gazlaştırıcı içerisine girdiği andan itibaren yaşadığı değişimler benzerdir. Kuruma, piroliz, yanma ve gazlaşma olarak sınıflandırabileceğimiz bu değişimlerin ne şekilde gerçekleşeceği katı yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olduğu kadar gazlaştırıcının çalışma koşullarına (sıcaklık, basınç, yakıtı çevreleyen ortamın bileşimi) ve hidrodinamik yapısına da bağlıdır (Kaya, 2009).



Şekil 2.5 Gazlaştırma proses safhaları (Asim ve Siddiqui, 2014)

2.2.1.1 Kurutma

Katı yakıtın ısınması sürecindeki ilk safhada katı yakıt bünyesindeki sıvı su buhar haline geçerek katı parçacığı terk eder. Atmosferik basınçta, ortam sıcaklığı ile 107 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Kuruma safhası katı parçacığı saran atmosfer, ilgili sıcaklık ve basınçta suya doyma noktasına gelmediği sürece tüm su buharlaşana kadar devam eder (Kaya, 2009).

Suyun katı parçacıktan ayrılma süreci farklı mekanizmalarla ve değişken bir kuruma hızı profili ile gerçekleşir. Bu süreç temel olarak üç aşamaya ayrılabilir; İlk aşamada parçacığın sıcaklığı son derece hızlı bir şekilde artar. Suyun ilk olarak ayrılmaya başladığı bu süreçte kuruma hızı belirgin bir şekilde artar ve 2. aşamadaki kuruma hızı değerine ulaşılır. İkinci aşama, suyun katı yüzeyinde toplandığı ve

buharlaşmanın yüzeyden gerçekleştiği aşamadır. Katı parçacık yeterince ıslaksa, su bir şekilde sıvı olarak yüzeye taşınır ve yüzeyde ince bir tabaka oluşturur. Bu aşamada kuruma, katı parçacığın yapısından bağımsız olarak çevresel koşulların belirlediği bir hızda gerçekleşir. Yüzey ıslak kaldığı ve çevresel koşullar değişmediği sürece bu aşamadaki kuruma hızı sabit kalır. Katı yüzeyindeki su derişimi ile çevreleyen ortamdaki su derişimi arasındaki derişim farklılığı ve sisteme yeni giren katı yüzeyi ile çevre ortam arasındaki sıcaklık farklılığı bu aşamadaki kuruma hızının yüksek olmasını sağlar. Üçüncü aşamada, suyun katıdan ayrılması yüzeyin altındaki buharlaşma ile gerçekleşir. Yüzeydeki sıvı su tabakası bittiği zaman ısı geçişi, yüzeyin altındaki gözeneklerdeki suyun buharlaşmasına neden olur. Buharlaşan su, katı parçacığın tabakaları arasından yüzeye ulaşarak katı parçacıktan ayrılır. Bu nedenle katı parçacık içerisindeki ısı ve kütle geçişi dirençleri kuruma hızını önemli ölçüde etkiler ve kuruma tabakasının kalınlığı arttıkça kuruma hızı düşer (Kaya, 2009).

2.2.1.2 Piroliz

Bu aşamada büyük moleküller küçük moleküllere ayırılır. Piroliz yakıtın kimyasal dönüşümünün ilk adımını gerçekleştirir (Maki, 2010). Katı parçacık içerisinde bulunan H_2, CH_4, CO, CO_2, H_2O gibi hafif gazlar ile ağır organik ve inorganik moleküllerden oluşan katran gaz ya da sıvı (buğu halinde) olarak katı parçacıktan ayrılır. Yaklaşık 117 ºC ile 1027 ºC sıcaklıklar arasında gerçekleşmesi mümkündür. Isı alan kuru kömürün uçucuları gaz olarak kaybetmesi ile katı olan kok (çar) ürün açığa çıkar (Kaya, 2009).

Kömür tanecilerinin 350-800 ºC'ye ısıtılması sonucunda taneciklerde bulunan uçucu gazlar kömürü terk eder. Kömür tanelerinin büyüklüğü, reaksiyon sıcaklığı v.b. diğer etkiler uçucu gazların uzaklaştırılması reaksiyon hızını etkiler. Isı, kömüre yavaş verilirse önce piroliz ve daha sonra gazlaşma reaksiyonları meydana gelir. Bu geçen sürede gazlaşma ürünleri birleşerek uzun zincirli yapıları meydana getirir. Buna karşın, ısı kömüre hızlı olarak verilirse gazlaşma ve piroliz reaksiyonları eş

zamanlı olarak meydana gelir ve daha temiz sentetik gaz elde edilebilir (Yılmazoğlu, 2012).

Piroliz evresinde ilk ve en basit adım kömür partiküllerinin ısınmasıyla uçucuların uzaklaşmasıdır bu sebeple adımın gerçekleşme hızı sonraki adımları etkilediğinden, büyük önem taşır. Uçucuların uzaklaşması, düşük sıcaklıklarda (350-800 ºC) ve kömür partiküllerinin ısınmasıyla paralel bir şekilde gerçekleşir. Kömür partiküllerinin ısınma hızı bu adımın gerçekleşme şeklini etkiler. Bu hız sadece ısınma hızına değil, aynı zamanda partikül boyutuna ve su gazı reaksiyonu ile gazlaşma hızına da bağlıdır. Eğer ısınma yavaş ise, piroliz reaksiyonları yaklaşık 350 ºC'de başlar. Partikül dışındaki uçucu madde yoğunluğu hızlıca artar ve gazlaşma işlemi uçucular tamamen uzaklaştıktan sonra başlar. Ancak ısınma hızlı ise, piroliz ile gazlaştırma aynı anda gerçekleşir ve yüksek uçucu madde yoğunluğu oluşmamış olur (Higman ve Burgt, 2008).

Piroliz ürünlerin içerikleri; H_2O, H_2, N_2, O_2, CO_2, CO, CH_4, H_2S, NH_3, C_2H_6 ve az miktarda ayrışmamış hidrokarbonlar, asetilen, olefin, aromatikler ve katrandır. (Liu ve diğer., 2010).

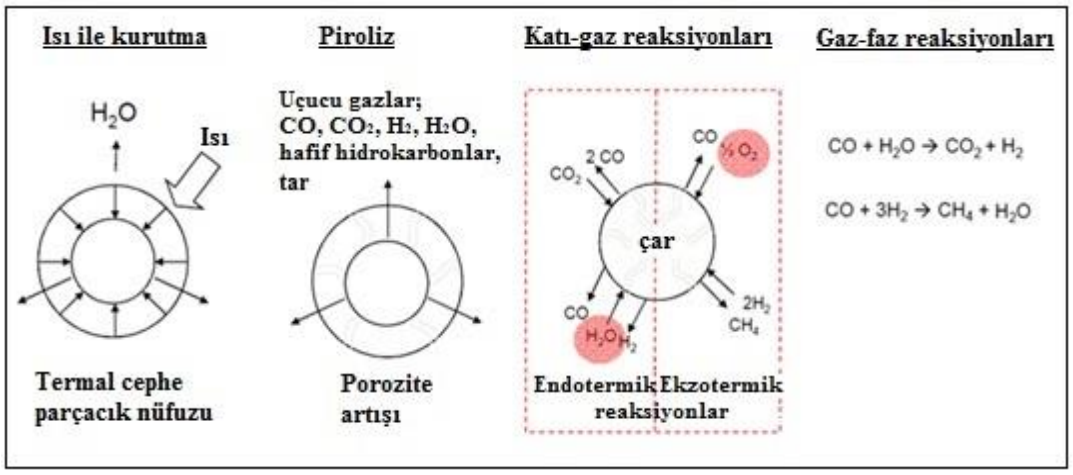
Çok sayıda bileşik çeşidiyle çok sayıda reaksiyonu bünyesinde barındıran piroliz, son derece karmaşık bir süreçtir. Fakat bu sürecin şu temel adımlardan oluştuğu kabul edilir (Kaya, 2009);

- Isınma, parçacık gözenekleri içerisindeki gazların genleşmesine neden olur ve gözenekler genleşen bu gazları barındıramaz hale gelir.
- Büyük organik moleküller parçalanırlar. Oluşan daha küçük yapılara metaplast denir.
- Metaplast moleküller çapraz bağlarla yeniden polimerize olurlar.
- Gaz ve sıvı bileşenler (buhar) birbirlerini destekleyerek yüzeye taşınırlar. Yüzeye taşınma esnasında sıvı bileşenlerin bir miktarı koklaşma neticesinde katı içerisinde kalır. Ayrıca taşınma esnasında gaz ve sıvıların birbirleriyle ve yüzeyle olan reaksiyonları devam eder.

Piroliz sonucu daha gözenekli bir yapıya kavuşan katı taneler 800 °C'nin üzerinde karbondioksit ile reaksiyona girerler. Kömür pirolizi gazlaştırıcıda diğer reaksiyonlardan önce veya aynı zamanda olur. Pirolizin hızı ve gaz ürünlerin bileşiminin bağlı olduğu faktörler; ısıtma hızı, ulaşılan son bozunma sıcaklığı, buhar ve karbondioksitin akış hızı, basınç, kömür tanecik boyutu ve kömür tipidir (Yaşyerli, 1992).

Piroliz esnasında salınan gazların yanma reaksiyonları açısından önemi büyüktür. Çünkü alevlenme özellikleri yüksek olan bu gazlar ve sıvılar (buğu) parçacık etrafında yanan bir tabaka oluşmasını sağlar ve bu tabaka ile katı yüzey arasındaki ısı transferi katı yakıtın tutuşmasını kolaylaştırır. Bu nedenle uçucu madde oranı yüksek olan kömürlerin yanma karakteristikleri iyi olur (Kaya, 2009).

Gazlaştırıcı sistem içerisinde gerçekleşen yanma reaksiyonlarının parçacık yüzeyinde (heterojen reaksiyonlar) ve parçacık dışında (homojen reaksiyonlar) gerçekleştiği ve oksijeni bitirdiği varsayılabileceği için piroliz reaksiyonlarının oksijensiz ortamda gerçekleştiği düşünülür. Oksijensiz ortamda piroliz gerçekleşirken, kok bünyesinden hidrojen tüketir. Çünkü hidrojen, piroliz esnasında çeşitli bileşikler arasında moleküler bağlar kurar, piroliz ürünlerinin miktarını arttırır ve kokun mümkün olduğunca grafit (saf katı karbon) haline indirgenmesine yardımcı olur. Piroliz esnasında katıdan ayrılan uçucu miktarı ve bileşimi kurumada olduğu gibi yakıtın kimyasal ve fiziksel özelliklerine, yakıtı çevreleyen ortamın bileşimine, sıcaklığına ve basıncına bağlıdır (Kaya, 2009). Şekil 2.6'da kurutma, piroliz ile homojen ve heterojen tepkimelerinin çizimi gözterilmiştir (Van Dyk, 2014).



Şekil 2.6 Kurutma, piroliz, homojen ve heterojen tepkimeleri safhaları (Van Dyk, 2014)

Parçacıkların sisteme girdikten sonraki ısınma hızı da piroliz ürünlerini etkileyen bir faktördür. Artan sıcaklıklar piroliz ürünlerinin miktarında artışa sebep olur. Farklı sıcaklıklar farklı bileşiklerin salınım oranını hızlandırır. Ayrıca toplam salım oranı her yakıt için farklı sıcaklıklarda en üst düzeye çıkar. Örneğin tipik bir linyitte yaklaşık 427 °C civarında piroliz ürünü salımı en üst düzeye çıkar. Artan basınç uçucu maddelerin katı yapı içerisinde kalma süresini arttırır ve bu da daha fazla polimerizasyon reaksiyonu gerçekleşmesine sebep olur. Polimerize olmuş yapılar gözenekleri tıkar veya doldurur. Bu da piroliz ürünlerinin salınımını yavaşlatır ve basınç etkisi yüksek basınçlarda çalışan gazlaştırıcılarda önem kazanır (Kaya, 2009). Şekil 2.7'de Kömür gazlaştırma aşamaları ve çıkan ürünleri gösterilmiştir (Liu, 2010).

Piroliz için ısınma eğer çok yavaş gerçekleşirse, yani parçacığın sisteme girdiği bölgenin sıcaklığı düşükse, ilgili sıcaklıklarda piroliz ürünlerinin ve kokun gazlaşma reaksiyonları çok yavaştır ve gazlaşma reaksiyonlarının neredeyse piroliz ürünleri tamamıyla salındıktan sonra gerçekleşmeye başladığı varsayılabilir. Eğer bu esnada piroliz ürünleri gazlaşma ve yanma reaksiyonlarına yetecek kadar bir süre gazlaştırıcı içinde kalamazsa, sistemden dışarıya değişikliğe uğramadan çıkar. Bu nedenle bazı gazlaştırıcılarda (örneğin zıt akışlı sabit yatak) piroliz ürünlerinin miktarı ve bileşimi çıkan gaz bileşimini önemli ölçüde etkiler. Eğer ısınma çok hızlı gerçekleşirse, piroliz ve gazlaşma reaksiyonları aynı zamanda gerçekleşir ve piroliz ürünlerinin

miktarının artması gazlaşma ve hatta yanma reaksiyonları nedeniyle mümkün olmaz. Ürünler homojen gaz reaksiyonları neticesinde başka bileşiklere dönüşür. Bununla birlikte artan ısınma hızı, piroliz esnasında gerçeklesen salım miktarını da bir ölçüde arttırır (Kaya, 2009).



Şekil 2.7 Kömür gazlaştırma aşamaları ve ürünleri (Liu, 2010)

2.2.1.3 Yanma

Gazlaştırıcı içerisinde gerçekleşen kuruma, piroliz ve gazlaşma reaksiyonlarının çoğu endotermiktir ve gerçekleşebilmeleri için ya dışarıdan bir ısı kaynağı ile desteklenmelidirler ya da bu ısı, içeri beslenecek bir miktar oksijen ile gerçekleşecek yanma reaksiyonları ile elde edilmelidir (Higman ve Burgt, 2008).

Kömür uçucularının uzaklaşması işlemi sonunda hidrokarbon sıvılar, CH_4, CO, CO_2, H_2, H_2O, HCN gibi bileşenler içeren gazlar ve katran gibi çeşitli türler oluşur. Farklı türlerden oluşan ürün, kömür partikülünü çevreleyen oksidant ile reaksiyona girer. Oksidantın ne kadarlık kısmının tüketileceği, oluşan uçucuların miktarına bağlıdır. Uçucuların yanması üzerine pek fazla kinetik veri bulunmamaktadır. Ancak homojen gaz faz reaksiyonlar içeren bu aşama, kütle transfer sınırlamalarının önemli rol oynadığı heterojen çar gazlaştırma aşamasından çok daha hızlıdır (Higman ve Burgt, 2008).

Yanma reaksiyonları son derece hızlı ve neredeyse tamamlanmış reaksiyonlar olduğu için gazlaştırıcı içerisine gönderilen O_2'nin bu reaksiyonlarda tamamına yakınının harcandığı varsayılabilir. Bu reaksiyonların pek çok gazlaştırıcıda en çok gerçekleştiği bölge O_2'nin sisteme beslendiği bölgedir. Bu nedenle bu bölgelerde yüksek bir sıcaklık profili gözlenebilir (Kaya, 2009). Reaksiyonlar gereğince karbon

ve hidrojen okside olarak ısı enerjisi açığa çıkarırlar. Bu reaksiyonlar sıcaklığın dışarıya verildiği ekzotermik reaksiyonlardır. Bunlar sırasıyla karbondioksit ve su buharına dönüşürler. Yanma sonucu yanmayan inorganik minerallerin bulunduğu kül de açığa çıkmaktadır (Maki, 2010).

2.2.1.4 Gazlaşma

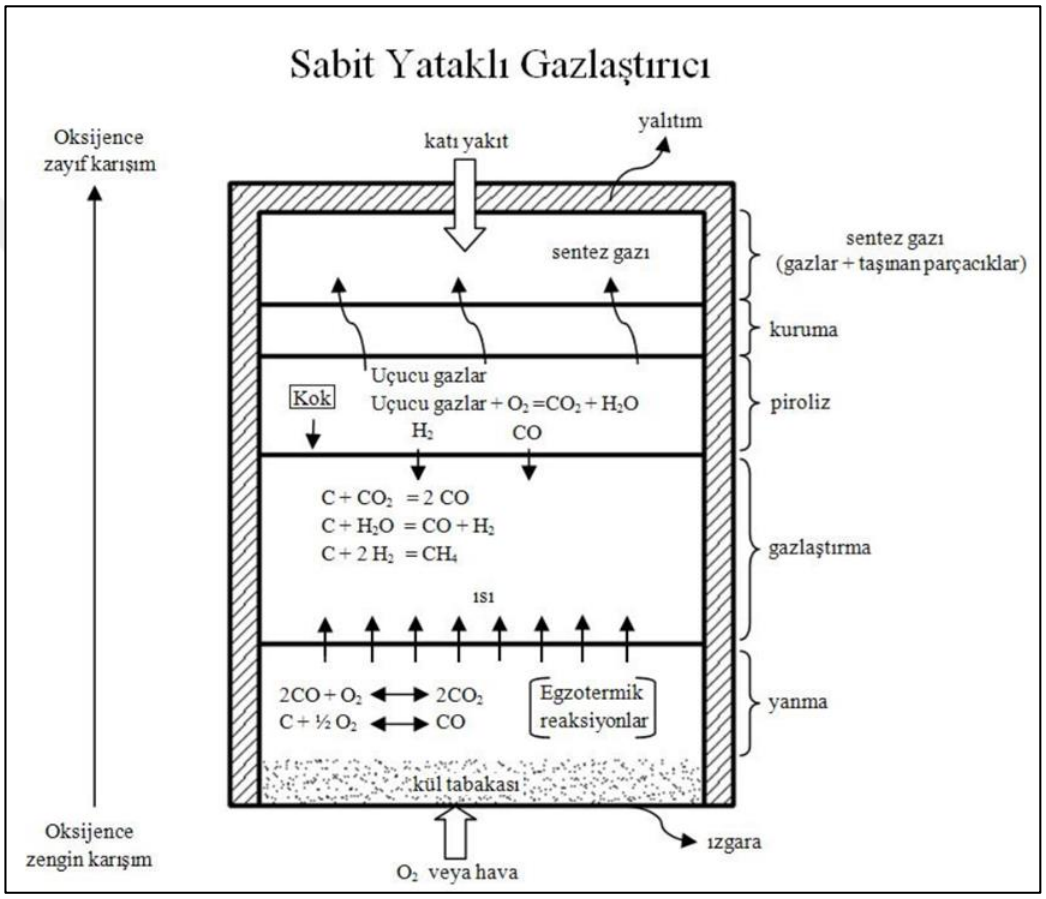
Gazlaşma (indirgeme), katı yakıtın kısmen ya da tamamen gaza dönüşmesi demektir. Dönüşüm ısıl etkiyle veya kimyasal reaksiyonlarla gerçekleşebildiği gibi her ikisi ilede gerçekleşebilir. Bu kapsamda değerlendirildiği zaman piroliz ve heterojen (katı ile gaz arasında gerçekleşen) yanma reaksiyonları da gazlaşma olarak değerlendirilebilir. Fakat ısı bilimi literatüründe gazlaşma reaksiyonları oksijen dışındaki gazlarla gerçekleştirilen reaksiyonları ifade eder. Yanma bu nedenle ayrı bir aşama olarak değerlendirilmiştir. Gazlaşma reaksiyonları heterojen ve homojen reaksiyonlar ayrımıyla iki şekilde açıklanmıştır. Homojen reaksiyonlar her ne kadar gaz–gaz reaksiyonları ise de heterojen reaksiyonların devamı gibi değerlendirilir (Kaya, 2009).

Gazlaştırma, en yavaş reaksiyonların yer aldığı aşama olduğu için dönüşüm hızını belirleyen aşamadır. Karbon içeren heterojen reaksiyonlar su gazı, Boudouard ve hidrojenasyon reaksiyonlarıdır (Higman ve Burgt, 2008).

Oluşan karbondioksit ve su, reaksiyonları gereğince indirgenme reaksiyonunda doğal olarak karbon monoksit (CO) ve hidrojene (H_2) dönüşürler. Oluşan gazlar yanıcı gazdır ve üründeki (çar) partikül madde konsantrasyonu azalmıştır. Nem oranı kritik seviyeyi aştıkça gazın kalorifik değeri düşmektedir. Ayrıca hacimsel olarak yanabilirgaz olan CO miktarı düşerken CO_2 miktarı da artmaktadır (Maki, 2010).

Gazlaştırıcılar sözü edilen değişimlerin aynı anda gerçekleştiği sistemlerdir fakat bazı gazlaştırıcılarda sistemin hidrodinamik yapısı, değişimlerin gerçekleştiği bölgeleri belirgin olarak ayırabilir. Katı yakıt parçacığı, kütlesine ve yapısına bağlı olarak ya tüm bölgelerden geçebilir ya da sadece bazı bölgelerdeki değişimlerden

etkilenir. Örneğin zıt akışlı sabit yataklarda bölgesel ayrımdan söz edilebilir ancak dolaşımlı akışkan yataklarda bu şekilde bir bölgesel ayrım yapmak doğru değildir. Şekil 2.8'de katı yakıtın bölgesel ayrımlarının söz konusu olduğu, zıt akışlı sabit bir yatak içerisine girdiği andan itibaren yaşadığı dönüşümler şematik olarak gösterilmektedir (Kaya, 2009). Gazlaştırıcılar ilerideki bölümlerde detaylı açıklanacaktır.

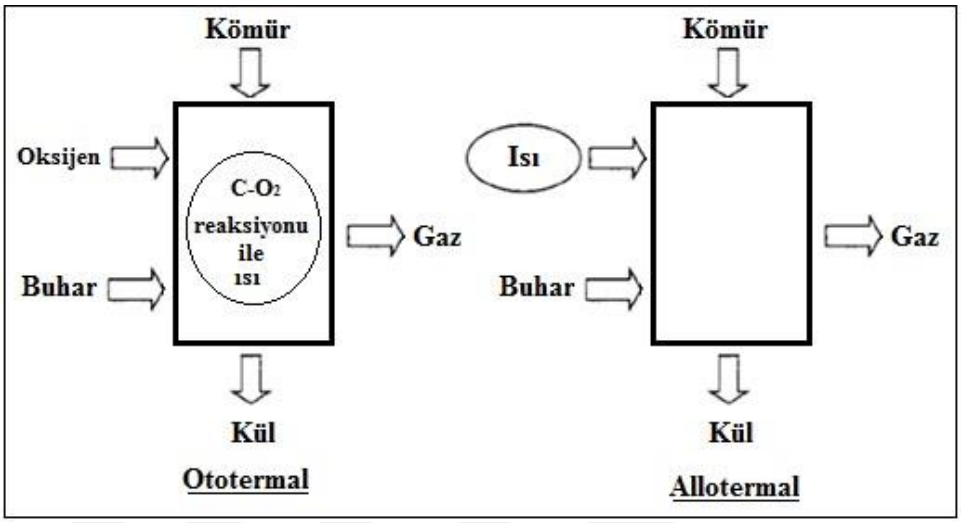


Şekil 2.8 Zıt akışlı sabit yataklı bir gazlaştırıcı katı yakıtın yaşadığı dönüşüm (Kaya, 2009)

2.2.2 Gazlaşma İçin Gerekli Isının Sağlanması

Gazlaştırma sırasındaki endotermik tepkimeler için gerekli ısı iki şekilde sağlanır. Birincisi, tepkime odası ya da tepkime karışımına bir ısı değiştirici ya da ön ısıtıcı ile ısı dolaylı olarak iletilir. Bu tip gazlaştırma işlemine "allotermik gazlaştırma" denir. İkincisi ise, tepkime ısısı tepkime odasında (reaktör içinde) oluşturulur. "Ototermik gazlaştırma" denilen bu yöntemde gazlaştırıcı olarak su buharı ya da CO_2'in yanında

bir miktar oksijen kullanılır (Şekil 2.9). Böylece karbonun CO ya da CO_2'e yanmasında oluşan yanma ısısı, gazlaştırma işlemi için gereken ısıyı sağlar (Canel, 1986; Kabe, Ishihara, Qian, Sutrisna, ve Kabe, 2004).



Şekil 2.9 Ototermik ve allotermik gazlaştırma (Kabe ve diğer., 2004)

2.2.3 Kömürlerin Gazlaştırılmasındaki Temel Tepkimeler

Katı karbon gazlaştırma prosesi süresince karbon, kömür veya çar (kok) formunda olabilir. Temel kimyasal tepkimeler, karbon, karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen, su (ya da su buharı) ve metan içerir. Aşağıda reaksiyonları açıklanan temel tepkimeler yanma tepkimeleri, heterojen gazlaşma tepkimeleri, homojen gazlaşma tepkimeleri ve ısıl bozunma tepkimeleridir (Gafur, 2006; Higman ve Burgt, 2008; Kaya, 2009). Yanma tepkimelerinden kısmi yanma (2.1), karbonun az miktarda oksijen ile reaksiyona girmesi ve karbon monoksit üretilmesidir.

$$C\,(k) + \tfrac{1}{2}\,O_2\,(g) \rightarrow CO\,(g) + Isı \qquad -111\ MJ/Kmol \qquad (2.1)$$

Tam yanma (2.2), karbonun oksijen ile reaksiyonu ve karbondioksit üretilmesidir.

$$C\,(k) + O_2\,(g) \rightarrow CO_2\,(g) + Isı \qquad -283\ MJ/Kmol \qquad (2.2)$$

$$H_2\ (g) + ½\ O_2\ (g) \rightarrow\ H_2O\ (g) + Isı \quad -242\ MJ/Kmol \qquad (2.3)$$

Heterojen gazlaşma tepkimelerinden Boudouard reaksiyonu (2.4), karbon ve karbondioksitin reaksiyonu sonucu karbon monoksit üretimidir.

$$C\ (k) + CO_2\ (g) + Isı \leftrightarrow 2CO\ (g) \qquad +172\ MJ/Kmol \qquad (2.4)$$

Su gazı (buharla gazlaştırma) reaksiyonu (2.5), karbon ve su buharının reaksiyonu sonucu hidrojen ve karbon monoksit üretimidir.

$$C\ (k) + H_2O\ (g)\ + Isı \leftrightarrow CO\ (g) + H_2\ (g) \quad +131\ MJ/Kmol \qquad (2.5)$$

Hidrojenle gazlaştırma (hidrogazifikasyon) reaksiyonları (2.6), karbon ve hidrojen reaksiyonundan metan üretimidir.

$$C\ (k) + 2\ H_2\ (g) \leftrightarrow CH_4\ (g) + Isı \qquad -75\ MJ/Kmol \qquad (2.6)$$

Yukarıdaki heterojen gazlaşma tepkimeleri kokun gazlaşma reaksiyonları olarak adlandırılır ve karbon dönüşüm oranını (çıkan gaz içerisindeki toplam karbon miktarının sisteme giren katı kütledeki miktara oranı) önemli ölçüde etkileyen reaksiyonlardır. Pek çok gazlaştırıcı için çalışma sıcaklıkları ve parçacıkların sistemde dolaşım süreleri bu reaksiyonların önemli ölçüde ilerlemesi için yeterli değildir. Kuruma ve piroliz reaksiyonlarının aksine heterojen gazlaşma reaksiyonları yavaş olmaları nedeniyle katı parçacığın sistemde ulaştığı her noktada gerçekleşirler. Heterojen reaksiyonları yavaşlatan sadece kinetik sınırlamalar değildir. Yukarıdaki gösterilen reaksiyonlarla ve piroliz reaksiyonları ile miktarı artan CO ve H_2, Le Chateliers prensibi gereği, buharla gazlaştırma ve Boudouard reaksiyonlarının sağa doğru ilerlemesini engeller. H_2 miktarındaki artış hidrojenle gazlaştırma reaksiyonunu sağa doğru tahrik etse de bu reaksiyonun hızı diğer benzer hızdaki iki reaksiyona göre çok daha azdır (Kaya, 2009).

Heterojen gazlaşma reaksiyonlarının ilerleme kabiliyeti kömürün reaktivitesi ile ilgilidir. Reaktivite, kömürün gözenek yapısı, iç ve yüzey bölgelerinin kimyasal ve fiziksel yapısı, karbon kafesinin kristal yapısı, kömür içerisinde bulunan küldeki katalitik etkili bileşenler gibi pek çok etkene bağlıdır. Düşük seviyeli kömürlerde (% C < % 80) reaktivite, katalitik özellik gösteren Ca, Fe, Na ve K gibi metallerle önemli ölçüde etkilenirken, yüksek seviyeli kömürlerde toplam yüzey alanı reaktivite üzerinde daha fazla etkilidir. Bu nedenle kül içeriğinin etkisi linyit gazlaştırma işlemlerinde göz ardı edilmemelidir (Kaya, 2009).

Serbest oksijenle temel olarak tamamen gerçekleşen reaksiyonlar olan (2.1), (2.2) ve (2.3)'ün sentez gazı bileşiminin tahmin edilmesinde dikkate alınmasına gerek yoktur ve (2.4), (2.5) ve (2.6) numaralı üç heterojen (katı ve gaz faz) reaksiyonu sentez gazı bileşimi tahmini için yeterlidir. Genellikle karbon çevriminin tamamlanmış olduğu göz önüne alınır. Bu durumda; (2.4) ve (2.5) denklemleri aşağıdaki belitilen homojen gaz reaksiyonlarına indirgenebilir (Higman ve Burgt, 2008).

Homojen gazlaşma (gaz-gaz) tepkimeleri su gazı yönlendirme ve metanasyon reaksiyonlarıdır (Gafur, 2006; Klein, 2002; Higman ve Burgt, 2008). Su gazı yönlendirme (water-gas shift) reaksiyonu (2.7), karbon monoksit ile su buharı reaksiyonu ve karbondioksit ile hidrojen üretilmesidir.

$$CO\,(g) + H_2O\,(g) \leftrightarrow CO_2\,(g) + H_2\,(g) + \text{Isı} \quad -41\ \text{MJ/Kmol} \qquad (2.7)$$

Metanasyon (metanlaştırma) reaksiyonları (2.8), metan ile su buharı reaksiyonu ve hidrojen ile karbon monoksit üretilmesidir.

$$CH_4\,(g) + H_2O\,(g) \leftrightarrow CO\,(g) + 3\,H_2\,(g) \quad +206\ \text{MJ/Kmol} \qquad (2.8)$$

(2.4) reaksiyonundan mol ve ısı etkisi ile (2.7) reaksiyonu elde edilir; benzer şekilde (2.5) reaksiyonundan (2.6) çıkarılarak (2.8) reaksiyonu elde edilir. Böylece (2.7) ve (2.8) reaksiyonları (2.4), (2.5) ve (2.6) reaksiyonlarında bulunur; ancak tersi

durum geçerli değildir. Üç bağımsız denklem her zaman iki denklemden daha fazla bilgi içerir. (2.1), (2.4), (2.5) ve (2.6) reaksiyonları karbonlu ve hidrokarbon yakıtların gazlaştırılmasını dört yoldan açıklar. Reaksiyon (2.4), saf karbonun O_2/CO_2 karışımı ile gazlaştırılmasında, saf CO üretimi açısından önemlidir. Reaksiyon (2.5) su gazı prosesinde önemli bir rol oynar. Reaksiyon (2.6) tüm hidrojen ile gazlaştırma süreçlerinin temelini oluşturur. Ancak çoğu gazlaştırma prosesi (2.1) reaksiyonu (kısmi oksidasyon) ve (2.5) (su gazı) reaksiyonlarının dengesine dayanır (Higman ve Burgt, 2008).

Gaz–gaz reaksiyonları katı–gaz reaksiyonlarına göre daha hızlı ilerler ve gazlaştırıcı çıkısına yakın bölgelerde de gerçekleşmeye devam edecekleri için çıkan gaz bileşimi üzerinde önemli ölçüde etkilidirler. Bu nedenle stokiyometrik kimyasal denge modellerinde çıkan gazı tahmin etmek için kurulan denklemlerde yer almaları son derece önemlidir. Heterojen reaksiyonlar özellikle düşük sıcaklıklarda ilerleyemedikleri için, dengeye ulaştıkları varsayımı, tahminlerde büyük hatalara sebep olabilir. Bunun yerine heterojen reaksiyonları karbon dönüşüm oranını tahmin etmek için kullanılıp, bir sonraki kademede bu oran göz önünde bulundurularak homojen reaksiyonlar ile denge anı bileşimi tahmini yapılabilir. Homojen reaksiyonlara hem kokun gazlaşma reaksiyonları sonucunda oluşan gazlar hem de piroliz ürünleri katılır. Diğer ağır piroliz ürünlerinin gerçekleştireceği homojen reaksiyonlar (termal parçalanma ve/veya hidro-parçalanma) ise kinetik sınırlamalar ile karşı karşıyadır. Bu nedenle, artan sıcaklıklarda ağır moleküllerin parçalanma reaksiyonları hızlanır. Katalitik etkilerin de bu parçalanma reaksiyonları üzerindeki etkisi önemlidir (Kaya 2009).

Isıl bozunma reaksiyonları, hidrokarbonların sıcaklıkla parçalanması ve karbon, karbon monoksit, hidrojen ve metan üretilmesidir. Kömürü kapsayan, karbon ve hidrojen içeren yakıtlar için net reaksiyon (2.9) şöyledir (Higman ve Burgt, 2008);

$$CnHm + n/2\ O_2 \leftrightarrow n\ CO + m/2\ H_2 \qquad (2.9)$$

Saf metan gibi gazlar için; m=4 ve n=1, m/n=4, petrol için; m/n∽2, m=2 ve n=1, kömür için, m/n∽1, m=1 ve n=1 kat sayıları alınır.

Gazlaşma tepkimeleri ısıl bozunma ile başlar ve oluşan ürünler (CO_2, CH_4, doymuş ve doymamış hidrokarbonlar) gazlaştırma boyunca birbirleriyle tekrar etkileşirler (Bozkurt, 2005; Canel, 1986). Gazlaştırma sıcaklıkları her durumda çok yüksek olacağı için termodinamik olarak da pratikte olduğu gibi metan dışındaki hidrokarbonlar kayda değer miktarlarda bulunamazlar (Higman ve Burgt, 2008).

2.2.4 Tepkimelerde Termodinamik Denge

Reaksiyon (2.4)'ten (2.8)'e kadar olan tüm denklemler çift yönlü reaksiyonlardır. İleri ve geri yönlü reaksiyonlar aynı anda ve farklı hızlarda gerçekleşir. Herhangi bir sıcaklık derecesi için reaksiyon hızları, reaksiyonu istenilen yöne yönlendiren reaktantların miktarıyla orantılıdır. CO değişim reaksiyonunda (2.7); ileri yönlü reaksiyon hızı r_f, birim hacimdeki CO ve H_2O molar konsantrasyonlarıyla orantılıdır, ya da;

$$r_f = k_f \cdot [CO] \cdot [H_2O]$$

Burada, oran sabiti k_f, sıcaklığa bağlıdır. Aynı şekilde ters yönlü reaksiyon için;

$$r_r = k_r \cdot [CO_2] \cdot [H_2]$$

Bu iki reaksiyon hızı, bir süre içerisinde ortak değere erişme eğilimindedirler ve gaz bileşimi bir dengeye ulaşır. Bu durumda;

$$K_p = \frac{k_f}{k_r} = \frac{[CO_2] \cdot [H_2]}{[CO] \cdot [H_2O]}$$

Burada K_p, CO değişim reaksiyonu için sıcaklığa bağlı denge sabitidir. İdeal gaz durumunda aşağıdaki (2.10) denklem geçerlidir;

$$K_p = \frac{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}}{p_{CO} \cdot p_{H_2O}} = \frac{v_{CO_2} \cdot v_{H_2}}{v_{CO} \cdot v_{H_2O}} \quad (2.10)$$

Burada p_{CO} kısmi basınç ve v_{CO} gaz içerisindeki CO'in mol kesridir ve p_{CO}/p olarak da gösterilebilir. Benzer şekilde, diğer reaksiyonların denge sabiti şöyle açıklanabilir (Higman ve Burgt, 2008);

Boudouard reaksiyonu (2.4) için;

$$K_p = \frac{p^2{}_{CO}}{p_{CO_2}} = \frac{(v_{CO})^2}{v_{CO_2}} \cdot p \quad (2.11)$$

Su gazı reaksiyonu (2.5) için;

$$K_p = \frac{p_{CO} \cdot p_{H_2}}{p_{H_2O}} = \frac{v_{CO} \cdot v_{H_2}}{v_{H_2O}} \cdot p \quad (2.12)$$

Metanasyon reaksiyonu (2.6) için;

$$K_p = \frac{p_{CH_4}}{p_{H_2}} = \frac{V_{CH_4}}{v^2{}_{H_2}} \cdot \frac{1}{P} \quad (2.13)$$

Metan-buhar reforming (buradaki p toplam mutlak gaz basıncıdır) reaksiyonu (2.8) için;

$$K_p = \frac{p_{CO} \cdot p^3{}_{H_2}}{p_{CH_4} \cdot p_{H_2O}} = \frac{v_{CO} \cdot v^3{}_{H_2}}{V_{CH_4} \cdot v_{H_2O}} \cdot p^2 \quad (2.14)$$

Denge sabitlerinin sıcaklığa bağlılığı temel verilerden çıkarılabilir, ancak genellikle şu şekilde bir ilişkiyle açıklanır;

$$\ln(K_{p,T}) = \ln(K_{p,T0}) + f(T) \quad (2.15)$$

Burada T, Kelvin türünden mutlak sıcaklıktır ve (2.10)-…-(2.13) eşitliklerinin reaksiyonların dengeye ulaştığı varsayılarak, sentez gazının içerdiği gaz bileşenlerin bağıl konsantrasyonunu hesaplarken kullanılır. Burada gazların, ideal gaz olduğu

varsayılmış ve fugasite hesaba katılmamıştır. Birçok proses 30-70 bar aralığında çalışmasına rağmen, bileşenlerin kritik sıcaklıklarından çok yüksek olan proses sıcaklığı sebebiyle bu varsayım doğrulanır. Bu hesaplamaların 200-250 ºC gibi düşük sıcaklıklarda çalışan su gazı yönlendirme reaksiyonunda (2.7) temel tasarımlar için yeterince kesin sonuçlar verdiği unutulmamalıdır (Higman ve Burgt, 2008).

Denge verilerinin sonucunda sıcaklık ve basınç arttıkça CH_4 oluşumu azalır. Basınç azaltılır ve sıcaklık arttırılır ise CO ve H_2 oluşumu artar. Maksimum CO ve H_2 konsantrasyonu atmosferik basınçta ve 800-1000 °C sıcaklık aralığında meydana gelebilir. CO_2 konsatrasyonu basınç arttıkça artar, sıcaklık arttıkça hızla azalır. Tepkin gazların (reaktöre giriş gazları) oksijen-buhar karışım oranı azaltılırsa H_2 ve CH_4 oluşumu artar bu sırada artan oksijen-buhar oranı CO ve CO_2 oluşumunu arttıracaktır. Bu nedenlerle gazlaştırıcıların sıcaklıkları ve basınçları istenen ürünlerin (CH_4, H_2 ve CO) maksimum konsantrasyonu için ayarlanabilir. Optimum operasyon şartları için diğer unsurlar olan gazlaştırma kinetiği, katalizör etkileri ve mekanizması gibi faktörlerinde tepkimelere etkileri dikkate alınmak zorundadır (Liu ve diğer., 2010).

Çoğu yakıt karbon, hidrojen ve oksijen dışında ek bileşenler de içerir. Gazlaştırma sonucunda yakıtta bulunan sülfür; H_2S (hidrojen sülfür) ve COS'e (karboksil sülfür) dönüşür. Azot ise; elementel azot, NH_3 (amonyak) ve HCN'e (hidrosiyanik asit) dönüşür. Genellikle yakıtta bulunan sülfür ve azotun miktarı oldukça azdır ve içeriği hidrojen ile karbon monoksitten oluşan, asıl sentez gazı bileşimi üzerindeki etkisi göz ardı edilebilir. Yine de çevresel emisyonlar, gaz temizleme, katalizör zehirlenmesi gibi sebeplerden dolayı sülfür ve azot içeren gaz bileşenlerinin değerlendirilmesi gerekmektedir (Higman ve Burgt, 2008).

2.2.5 Gazlaşmanın Termodinamik ve Kinetik İncelenmesi

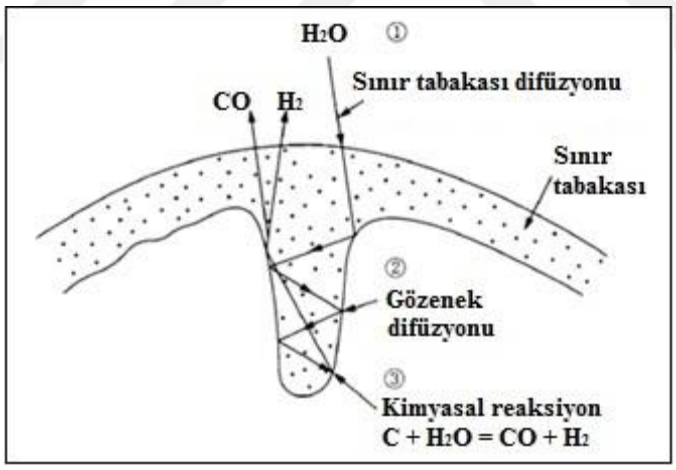
Termodinamik açıdan, hidrojenle gazlaştırmada basıncın artması dengeyi metan lehine çevirirken, sıcaklığın artışı dengedeki metanı azaltır. Metanlaştırma tepkimesinde ise basıncın artmasıyla dengedeki su buharı ve metan miktarı artar.

Hidrojen ile gazlaştırma tepkimesinin ekzotermik, heterojen su gazı tepkimesi ile Boudouard tepkimelerinin endotermik oluşu; yüksek sıcaklıklarda dengedeki su buharı, CO_2 ve CH_4 miktarında azalmaya neden olur. Kimyasal dengenin kurulma hızı ve hıza etkileyen taşıma olaylarını tepkime kinetiği inceler (Bozkurt, 2005).

2.2.5.1 Gazlaşma Tepkime Kinetiği

Kömürün gazlaştırılmasında karşılaşılan üç önemli taşıma basamağı vardır. Tepkime koşullarında bu basamaklardan en yavaş olanı tepkime hızını belirler. (Bozkurt, 2005; Kabe ve diğer., 2004). Şekil 2.10'da gösterilen bu ana basamaklar şöyle sıralanır;

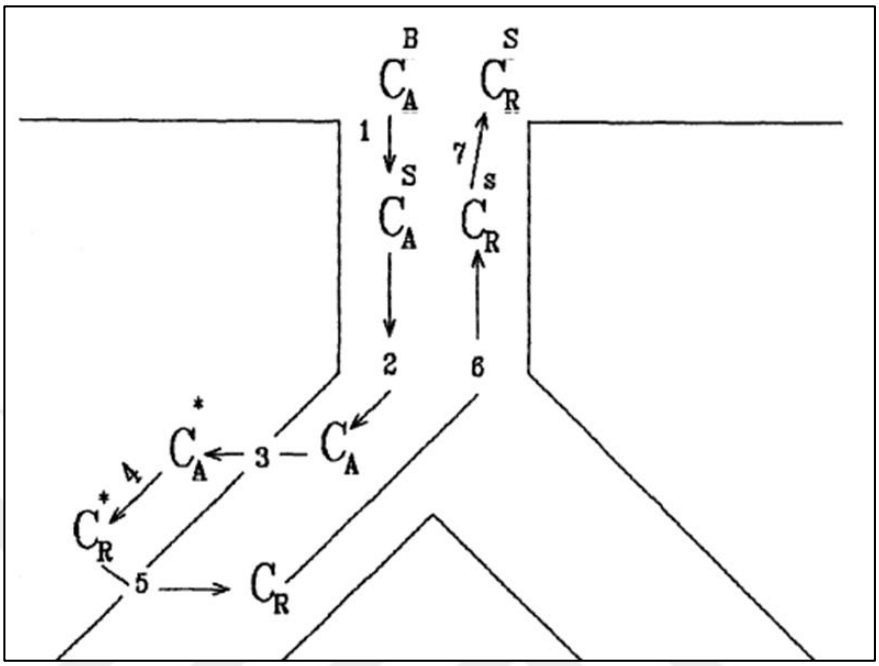
1) Gazlaştırıcının kömür yüzeyinde oluşan hidrodinamik sınır filmi içine difüzyonu
2) Gözenek içine difüzyon
3) Gözenek yüzeylerindeki kimyasal tepkime



Şekil 2.10 Kömür gazlaşma transfer mekanizması (Kabe ve diğer., 2004)

Bell, Towler, ve Fan (2011) ile Yaşyerli (1992), bu taşıma basamaklarının nasıl gerçekleştiğini yedi aşamada şu şekilde açıklamıştır; Gaz-katı reaksiyonlarındaki kimyasal işlem katının yüzeyinde oluşur. Gözenekli katı partikülün yüzey alanının büyük kısmının gazlaştırma koşulları altında tanenin içinde olması reaktanların gözenekli partikül içine doğru difüzyon yolu ile taşınmalarını gerektirmektedir.

Gazlaştırma işleminin gözeneklerde nasıl gerçekleştiği Şekil 2.11'de şematik olarak verilmiştir (Yaşyerli, 1992).



Şekil 2.11 Gazlaştırma reaksiyonlarındaki basamaklar (Yaşyerli, 1992)

Bu yedi aşamada gerçekleşen durumlar;

1. Kömür partikül dış yüzeyine, ana akımdan A,B,... reaktanlarının taşınımı.
2. Gözeneklerin içinde reaktanların difüzyonu.
3. Aktif yüzeyde reaktanların adsorbsiyonu.
4. Adsorblanmış moleküller ve karbon arasında yüzey reaksiyonu.
5. Ürünlerin desorbsiyonu, R,S,..
6. Gözenek içinde ürünlerin taşınımı.
7. Partikül yüzeyinden ana akım gazına ürünlerin taşınımı

1, 3, 4, 5, 7 aşamaları seri proseslerdir. Genel bir hız ifadesi içinde birleştirilebildiği gibi ayrı olarak da incelenebilirler. Bu basamaklardan herhangi biri diğerinden çok daha yavaş ise bu basamak hız belirleyendir (Bell ve diğer., 2011; Yaşyerli, 1992).

2.2.5.2 Reaksiyon Hızı

Gazlaştırmanın kinetiği incelenirken zincir reaksiyonda en yavaş gerçekleşen reaksiyonların bilinmesi gerekir. Tüm gazlaştırma reaksiyonlarında karbon içeren heterojen reaksiyonlar en yavaş basamağı oluşturur. Su gazı reaksiyonu, Boudouard reaksiyonu ve hidrogasifikasyon reaksiyonu bu en yavaş basamağı oluşturan reaksiyonlardır (Yılmazoğlu, 2012).

Grafit ve kokların gazlaştırılmasında ileri sürülen modeller ve deneysel verilere göre gazlaşma kinetiği söyle özetlenebilir; 1000 ºC'den daha düşük sıcaklıklardaki gazlaşma hızı (Şekil 2.12'de 1.bölge) gazlaştırıcının derişimine göre birinci derecedendir (Bozkurt, 2005).

$$n^0 = \frac{dn}{dt} = k.F.c \tag{2.16}$$

Burada, F katının iç ve dış yüzey alanları toplamı, k tepkime hız sabiti ve c gazlaştırıcı derişimidir. Arrhenius eşitliğine göre;

$$k = k_0 \cdot e^{-EA/RT} \tag{2.17}$$

olarak yazılabilir (EA: Kimyasal tepkimenin aktifleşme enerjisi, R: İdeal gaz sabiti, ko: Arrhenius sabiti). (2.16) ve (2.17) eşitlikleri, verilen sıcaklık aralığındaki gazlaşma hızının kimyasal tepkime ile belirlendiği durumlar için geçerlidir. Bu sırada gazın dış ortamdaki cg derişimi, gözenek içindeki c derişimine eşittir. Gözeneklerin kullanılma derecesi η=1'dir. (2.16) eşitliği 1000 ºC'nin üzerindeki sıcaklıklarda geçersizdir. (2.17) eşitliğine göre sıcaklığın artmasıyla tepkime hızı üstel şekilde çok hızlı artarken, difüzyon katsayısı yalnızca D~T1 ve D~T2 seklinde artar. Gözenekler içindeki gazlaştırıcı maddenin tüketilme hızı, difüzyonla içeriye taşınma hızından daha büyük olur. Yüksek sıcaklıklarda, katı içindeki gazlaştırıcı derişiminin azalması katının tanecik büyüklüğü ile artar. Gözenek içine yeterli gaz difüzlenemediğinden gözenek iç yüzeyinin kullanılma derecesi $\eta < 1$ olur. Gözeneklerin şekli, gözenek

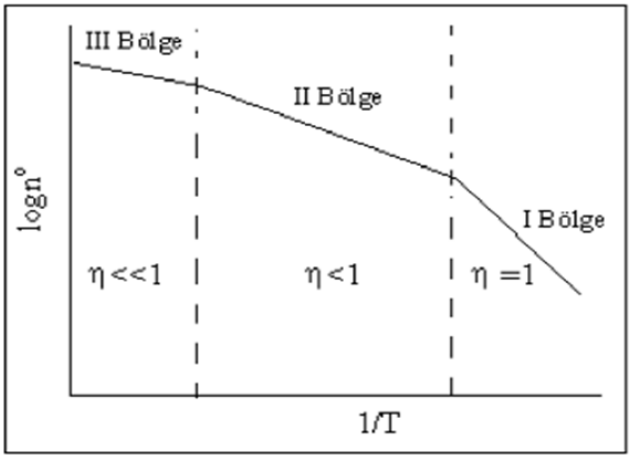
içindeki derişim ve ikinci Fick yasasına uyan difüzyon olayı dikkate alınarak gazlaşma hızı;

$$n^0 = F \cdot c \cdot (\sqrt{2r} \cdot \sqrt{d}) \cdot (\sqrt{k} \cdot D) \quad (2.18)$$

eşitliği ile verilebilir. Görüldüğü gibi gazlaşma hızına F yüzey, k hız sabiti, d tanecik çapı, r gözenek yarıçapı ve D difüzyon katsayısı etki etmektedir. Eşitlikte k hız sabiti karekök içinde olduğundan, ikinci bölgenin aktifleşme enerjisi 1. bölgenin yarısına eşit olur. 1300 ºC'nin üzerindeki sıcaklıklarda (3. bölge), kömürün dışında bulunan δ kalınlığındaki hidrodinamik sınır tabakasından içeri difüzyon zorlaşır. Tepkime hızını en yavaş basamak olan difüzyon hızı belirler bu bölgede difüzyon katsayısının sıcaklığa bağlılığı küçük olduğundan tepkime hızı sıcaklıktan bağımsızdır ve;

$$n^0 = D \cdot O \cdot c/\delta \quad (2.19)$$

eşitliği ile verilebilir. Burada O kömürün dış yüzey alanı, δ ise ısı iletimi ölçümlerinden hesaplanabilen sınır tabakası kalınlığıdır. Gazlaşma hızının logaritması mutlak sıcaklığın tersine karşı grafiğe geçirilirse, gazlaşma hızını karakterize eden üç ayrı sıcaklık bölgesi görülür. Şekil 2.12'de gazlaşma hızının sıcaklığa bağlılığı görülmektedir (Bozkurt, 2005).



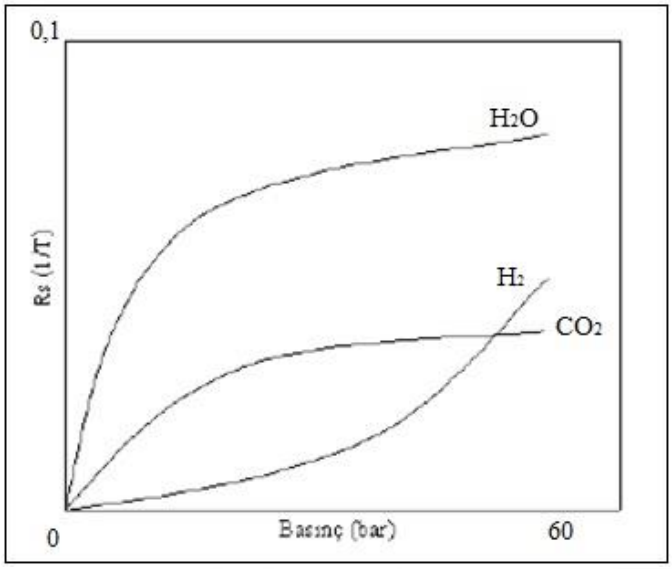
Şekil 2.12 Gazlaşma hızının sıcaklığa bağlılığı (Bozkurt, 2005)

Birinci bölgede gazlaşma hızını kimyasal reaksiyon belirler. Aktifleşme enerjisi Ea'ya bağlı olarak doğrunun eğimi büyüktür. İkinci bölgede aktifleşme enerjisi, dolayısıyla eğim yarıya düşmüştür. Üçüncü bölgede etkin olan k hız sabiti değil, D difüzyon katsayısıdır. Bu faktörün sıcaklıkla değişimi çok az olduğu için, gazlaşma hızı da sıcaklıkla fazla değişmez (Koç, 2006).

Uygulamada ikinci ve üçüncü bölgeler çok önemlidir. Örneğin, sabit yataklı bir reaktörde koktan su gazı üretiminde uygulanan sıcaklık aralığında gözenek içine difüzyon (ikinci bölge) önem kazanırken, katı yakıtların teknik koşullarda yakılmasında oksijenin gaz/katı ara yüzeyinde oluşan sınır tabakasından difüzyonu (üçüncü bölge) yanma hızını belirler. Özet olarak, düşük sıcaklıklarda gazlaşma tepkimeleri kömürün tüm yüzeyinde cereyan ederken en çok gözenek içlerinde gazlaşma görülür. Sıcaklık artışıyla difüzyon yüzünden tepkimelerin ağırlık noktası taşıma gözenekleri boyunca dışarı doğru kayar. Çok yüksek sıcaklıklarda ise gazlaşma kömürün dış yüzeyinde olur. Kimyasal tepkimeleri kinetik açıdan incelerken önemli olan bir başka faktör ise tepkime derecesidir. Tepkime derecesi, girenlerin cinsi ve bileşimine göre 0,75-1 arasında değişir. Tepkime yalnız gözeneklerin içerisinde cereyan ederse derecesi 0,75 dolayında olur (Bozkurt, 2005).

Şekil 2.12'de gazlaşma hızının sıcaklığa bağlılık grafiğinde, katı yüzeyi ile reaksiyona giren tipik bir gaz davranışı gösterilmektedir. Nispeten düşük sıcaklıklarda, grafiğin sağ tarafı, yüzey reaksiyonu en düşük seviyededir ve reaksiyonun tüm hızını kontrol eder. Reaksiyon sıcaklığı arttıkça, yüzey reaksiyon hızı hızla artar taki yüzey reaksiyonun geçerli olmadığı, zayıfladığı seviyeye kadar. Daha sonra hız sınırlayıcı adım kütle transfer hızı (3.bölge) olur. Kütle transfer hızı yüzey reaksiyon hızı ile karşılaştırıldığında sıcaklıkla bağımlılığı zayıftır (Bell ve diğer., 2011).

Laboratuvarda belirli katalizörler kullanılarak yapılan deneylerde tepkimenin sıfırıncı dereceden yürümesi, tepkime hızının yüzeyin katalizörle kaplanmasına bağlı olduğunu gösterir. Karbonun su buharı, H_2 ve CO_2 ile gazlaştırılmasında kısmi basınçların tepkime hızına etkisi Şekil 13'de görülmektedir (Bozkurt, 2005).



Şekil 2.13 Karbonun H_2O, H_2 ve CO_2 ile gazlaştırılmasında tepkime hızının basınca bağlılığı (Bozkurt, 2005)

Langmuir-Hinshelwood eşitliği kullanılarak yapılan hesaplamalara göre su buharı ve CO_2 ile gazlaştırmada 15 barın üzerindeki hız sabit bir değere yaklaşırken, H_2 ile gazlaştırmada basınçla doğrusal olarak artmaktadır (Bozkurt, 2005).

2.2.5.3 Katı Kütle Değişimi İle Reaksiyon Hızı

Katı kütle değişimindeki reaksiyon hızı heterojen katalizin aksine, gazlaştırma anında, zaman ile katının ağırlığının değişmesidir. Gazlaşma hızı termo-gravimetrik analiz (TGA) cihazı ile ölçülür. Gazlaştırma hızı şu formül ile hesaplanır;

$$r = -\left(\frac{1}{w}\frac{dw}{dt}\right) \tag{2.20}$$

r = reaksiyon hızı, zaman başına fraksiyonel kütle değişimi

w = kütle ağırlığı

t = zaman

Kütle ağırlığı zamana göre değiştiği için, reaksiyon hızı fraksiyonel ağırlık kaybının hızı olarak ifade edilir (Bell ve diğer., 2011).

2.2.5.4 Gazlaştırmanın Termodinamik Olarak Modellenmesi

Gazlaştırma modellenmesinin uygulanma amaçları; gaz bileşiminin hesaplanması, beslenen her birim yakıt için gereken oksijen ve/veya buhar ve/veya ısının bağıl miktarlarının hesaplanması, ürün gazın yanma ısısı formundaki enerjinin optimizasyonu ya da alternatif olarak birim yakıt beslemesi başına düşen sentez gazı üretiminin optimizasyonu ve proses kontrolü için limit değerlerin sağlanmasıdır (Higman ve Burgt, 2008).

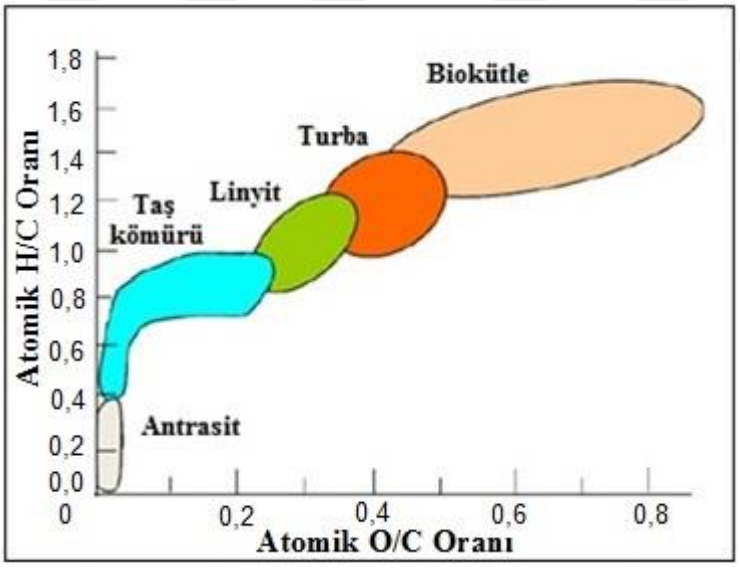
Gazlaştırma koşullarını içeren hesaplamalar termodinamik, kütle ve enerji dengesi ile sıcaklık, basınç ve harici ısı gereksinimi gibi proses koşullarına dayanır. Tüm bu hesaplamalarda elementel bileşimin ve besleme akımının sıcaklığının bilinmesi gereklidir. Kömür için hem kaba analizler (sabit karbon, uçucu madde, nem, kül), hem de detaylı analizler (elementel, külden ayrı olarak) bilinmelidir (Higman ve Burgt, 2008).

Gazlaştırmada, pek çok farklı reaksiyondan yararlanılır, bunlardan bazıları ekzotermik bazıları ise endotermiktir. Hemen hemen bütün durumlarda istenilen çalışma sıcaklığı endotermik ve ekzotermik reaksiyonlarla mantıklı şekillerde ayarlanılarak elde edilir. Yakıtın oksijen ile reaksiyonu her zaman tam ve ekzotermiktir, ancak buhar veya karbondioksit ile olan tepkime her zaman endotermiktir ve termodinamik sınırlamalardan dolayı hiçbir zaman tam değildir (Higman ve Burgt, 2008).

Gazlaştırıcılarda oksijen ve buhar, sıcaklığı kontrol etmek amacıyla da kullanılmaktadır, burada buharın rolü yönlendirici gibidir. Sıcaklığı düzenlemenin diğer bazı yöntemleri, oksijene nitrojen ya da karbondioksit eklemek veya gazlaştırma reaktöründen ısıyı dolaylı olarak çekmektir. Her durumda gazlaştırılacak yakıt karbon içerir. Yakıcı ya da gazlaştırıcı ajanlar, oksijen içeriği olan bir gaz, buhar, karbondioksit veya bunların belirli karışımlarıdır. Dolayısıyla, yakıcı/gazlaştırıcı her zaman serbest ya da örneğin buhardaki gibi bir formda bulunan oksijen içerir (Higman ve Burgt, 2008).

Bir gazlaştırma modelinin kalitesi, kullanılan temel termodinamik veriye bağlıdır. Kütle ve sıcaklık dengesinin tutarlılığını sağlamak için veri setini minimumla sınırlamak ve diğer tüm verileri buradan üretmek çok önemlidir. Kuru ve külsüz kömür için sıcaklığa bağlı özgül ısıyı veren formüldeki varsayılan katsayılar saf katı karbona dayalıdır. Kül-sıcaklık bağıntısı için, özgül ısının sıcaklıkla değişimini veren formüldeki varsayılan katsayılar ortalama küle bağlıdır ve kül ergime ısısı hesaba katılmıştır. Ergime noktasını düşürmek için kül veya eritken (flaks) eklendiği durumlar karbonat içeriyorsa, bozunma ısısının hesaba katılması gerekebilir. Bunu yapmanın en kolay yolu, gereken ısıyı hesaplamak ve bunu gazlaştırıcıdan ısı kaybı olarak hesaplamalarda kullanmaktır (Higman ve Burgt, 2008).

2.2.5.4.1 Hammaddeler. Gazlaştırmada kullanılan hammadeler doğal gazdan, ağır petrol atıkları ve kömüre kadar değişebilir. Ayrıca, atıklar ve biyokütle de hammadde olarak kullanılabilir. Doğru hesaplamalar yapabilmek için hammaddenin elementel bileşimi ve yakıt oluşum ısısı bilinmelidir (Higman ve Burgt, 2008).



Şekil 2.14 Hammadde karakteristikleri Van Krevelen diyagramı (Syed, Janajreh, ve Ghenai, 2012)

Kömürleşme aşamalarının bir kısmını içeren Van Krevelen diyagramı ince taneli sedimanter kayalar içinde bulunabilen kerojenlerin, atomik H/C ve O/C oranlarını gösteren bir diyagramdır ve farklı hammaddelerin aynı bu oranlara göre uygun bölgelere yerleştirilmiştir hali Şekil 2.14'te gösterilmiştir.

Standart yakıt oluşum ısısı, yanma ısısı ve yakıtın külsüz elementel bileşimiyle hesaplanabilir. Yakıtta bulunan kül hesaplamalarda genellikle etkisiz olarak değerlendirilir. Yakıtın yanma ısısından, yakıtta bulunan bazı elementlerin (pratikte karbon, hidrojen ve sülfür) yanma ısısı çıkartılarak, standart oluşum ısısı elde edilir. Eğer ölçülmüş değerler bulunmuyorsa, yakıtın yanma ısısı, kaba ve detaylı analizler ile hesaplanabilir. Ölçülmüş değerler bulunuyorsa ölçülmüş değerlerle, hesaplanmış verilerin birbiriyle uyumunun kontrol edilmesi önerilir. Eğer iki hesaplama arasındaki sapma % 2-3'ten fazla ise kömür ve ağır petrol yakıtları için hesaplanmış verilerin kullanılması önerilir. Doğal gaz için her zaman hesaplanmış yanma ısısı kullanılmalıdır. Hesaplanması en zor yakıtlar biyokütle ve atık hammaddedir, hesaplanmış ve ölçülmüş değerler arasında % 5'ten fazla sapma olabilir. Bu durumda ölçülmüş verilerin dikkatle incelenmesi önerilir (Higman ve Burgt, 2008).

2.2.5.4.2 Kütle Denkliği. Kükürt, azot, argon, kül gibi element ve bileşiklerin varlığı yok sayılırsa, hemen hemen tüm gazlaştırma proseslerine kütle denkliği için şu eşitlikler uygulanabilir; karbon dengesi, hidrojen dengesi, oksijen dengesi, Dalton denkliği, ısı dengesi, reaksiyon sabitleri.

Hem heterojen hem de homojen reaksiyonlar için reaksiyon denklemi seçilirken, reaksiyon setindeki ilgili bileşenlerin mevcut bulunması önemlidir. Heterojen durumda (2.5) ve (2.6) reaksiyonları, (2.7) ve (2.8) reaksiyonları ile değişebilir. Homojen durumda ise (2.8) reaksiyonu CO_2 reforming reaksiyonu (2.21) ile değişebilir. Metan-karbondioksit reforming reaksiyonu**;**

$$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2CO + 2H_2 \quad +247 \text{ MJ/ kmol } CH_4 \qquad (2.21)$$

Saf karbon, oksijen ve karbondioksit oksidasyon ortamında gazlaştırıldığında hidrojen dengesi, (2.5) ve (2.6) denklemleri dikkate alınmaz. Uygulamada, kömür ve ağır petrol gibi yakıtlar kükürt, azot, kül, oksijen ve argon içerebilir. Bu da madde dengelerinin şu denklemlerle genişletilmesini gerektirir; kükürt dengesi, azot dengesi, kül dengesi, argon dengesi. Bu ek elementlerin ısı dengesi bakımından da değerlendirilmesi gerekir (Higman ve Burgt, 2008).

Kükürt, azot ve diğerlerini başlangıç aşamasında hesaba katmadan, heterojen durum için sekiz, homojen durum için ise yedi değişkenin matematiksel olarak çözümlenebilecek şekilde tanımlanması gerekmektedir. Gazlaştırmada, CO_2, CO, H_2, CH_4 ve H_2O için sentez gazındaki bileşen fraksiyonları hemen hemen her zaman kullanılan beş değişkendir. Geri kalan heterojen durumdaki üç değişken ve homojen durumdaki iki değişken aşağıdaki listeden seçilebilir (Higman ve Burgt, 2008);

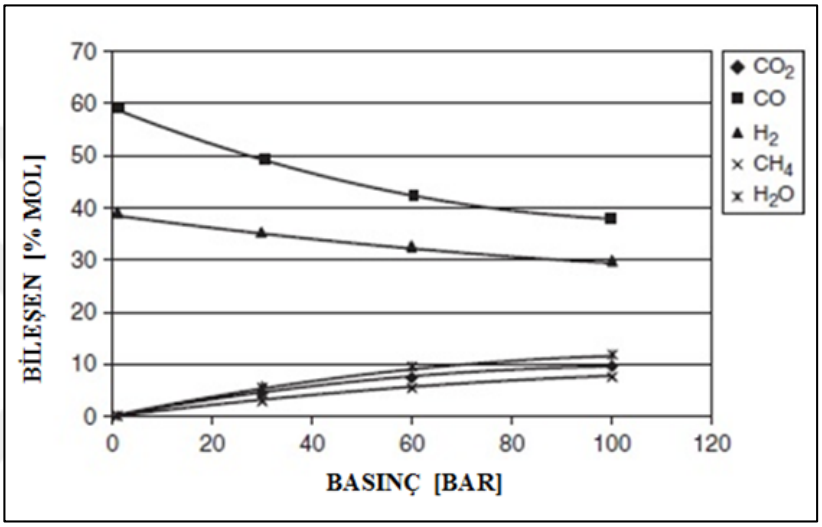
- Her kmol ürün gaz için kullanılan yakıt
- Her kmol ürün gaz için kullanılan oksidant (çoğunlukla su buharı)
- Her kmol ürün gaz için kullanılan gazlaştırıcı ajan (çoğunlukla buhar)
- Gazlaştırıcı reaktörün ısı kaybı veya gazlaştırma için gerekli ısı
- Gazlaştırma sıcaklığı

2.2.5.4.3 Termodinamik Modelden Çıkarımlar. Basınç altında gazlaştırmanın önemli bir avantajı vardır, pratikte tüm modern prosesler en az 10 bar'dan 100 bar'a kadar yükselen basınç değerlerinde gerçekleştirilir. Bunun sebebi sıkıştırma enerjisinden ve gerekli ekipman boyutundan tasarruftur. Sıkıştırma enerjisinden tasarrufun önemi 45 bar'da 100,000 Nm^3/sa ham sentez gazı için gerekli enerjiyi (Higman ve Burgt, 2008);

- Atmosferik basınç (5 bar) civarında basınç altında gazlaştırma ve sentez gazını sıkıştırarak ya da;
- Hammadeleri 55 bar'a sıkıştırarak (sistemde basınç düşüşü mümkündür) ve yüksek basınçta gazlaştırma durumlarında elde edilen değerlerin kıyaslanmasıyla anlaşılabilir.

Hesaplamalar için petrol hammadde olarak kullanılır, bu sayede ikinci durumdaki yakıt basıncının yükseltilmesi enerjisi gözlemlenebilir. Ayrıca iki durumda da ayrılmış hava ünitesinde atmosferik basınçta oksijenin mevcut olduğu varsayılmıştır. Enerji makinelerdeki şaft enerjisi olarak verilmiştir. İki durumdaki oksidant su buharının entalpi farkı ihmal edilmiştir. Gazlaştırıcıdaki basınç genellikle prosese uyumlu olarak seçilir. Sentez gazı 20 bar basınca ihtiyaç duyduğu kombine çevrim güç istasyonunun türbininde kullanıldığında, gazlaştırıcı basıncı belirtilenden daha yüksek bir basınçta çalışabilir. Bunun sebebi gazlaştırıcı ve gaz türbini arasında

oluşabilecek basınç kaybının göz önüne alınmış olmasıdır. Düzenlemelerde ürün sentez gazı ($CO+H_2$) ve bu gazın ısıl değerinin farklı gazlaştırma basınçlarında bir miktar farklı olacağı hesaba katılmalıdır. Gaz bileşiminin 1000 ºC'de basınçla değişiminin Şekil 2.15'te verilmiştir. Bu grafikte sentez gazdaki metan ve CO_2 içeriğinin basınçla birlikte arttığı görülmektedir. Tablo 2.2'de 1500 ºC sıcaklıktaki veriler incelenirse, yüksek sıcaklıkta gaz bileşiminin basınçla değişiminin ihmal edilebilir olduğu görülür (Higman ve Burgt, 2008).



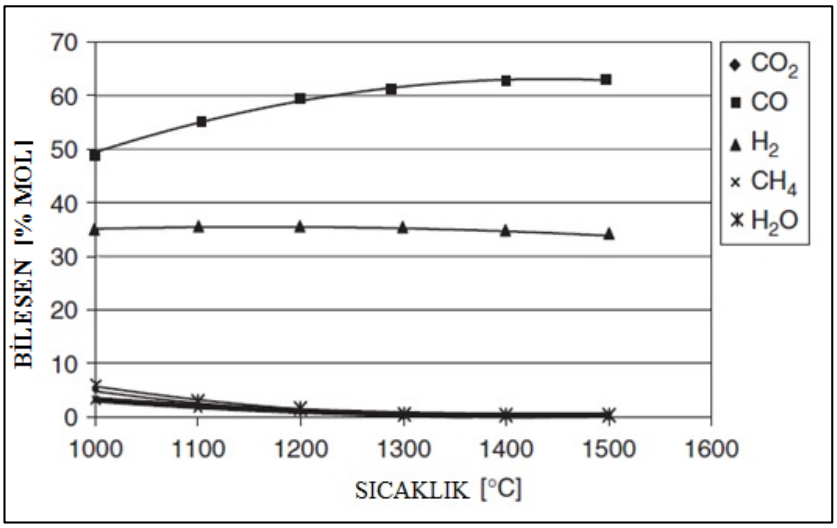
Şekil 2.15 1000 ºC'de basıncın sentez gazı bileşimi üzerine etkisi (Higman ve Burgt, 2008)

Tablo 2.2 1500 ºC'de farklı ürünler ve sentez gazı bileşimleri (Higman ve Burgt, 2008)

1500 °C sabit sıcaklık ve çeşitli basınçlardaki sentez gaz kompozisyonları					
		1 bar	30 bar	60 bar	100 bar
CO_2	mol %	0,00	0,11	0,21	0,34
CO	mol %	63,42	63,23	63,14	62,88
H_2	mol %	34,37	33,99	33,53	33,07
CH_4	mol %	0,01	0,27	0,52	0,85
H_2O	mol %	0,01	0,21	0,41	0,67
Diğer	mol %	2,19	2,19	2,19	2,19
Toplam	mol %	100	100	100	100
(H_2+CO) / giren	mol/mol	8,61	8,52	8,45	8,36
AID / giren	MJ/mol	2,31	2,31	2,32	2,32
O_2 / (H_2+CO)	mol/mol	0,27	0,27	0,27	0,27
O_2 / AID	mol/MJ	0,99	0,99	0,98	0,97

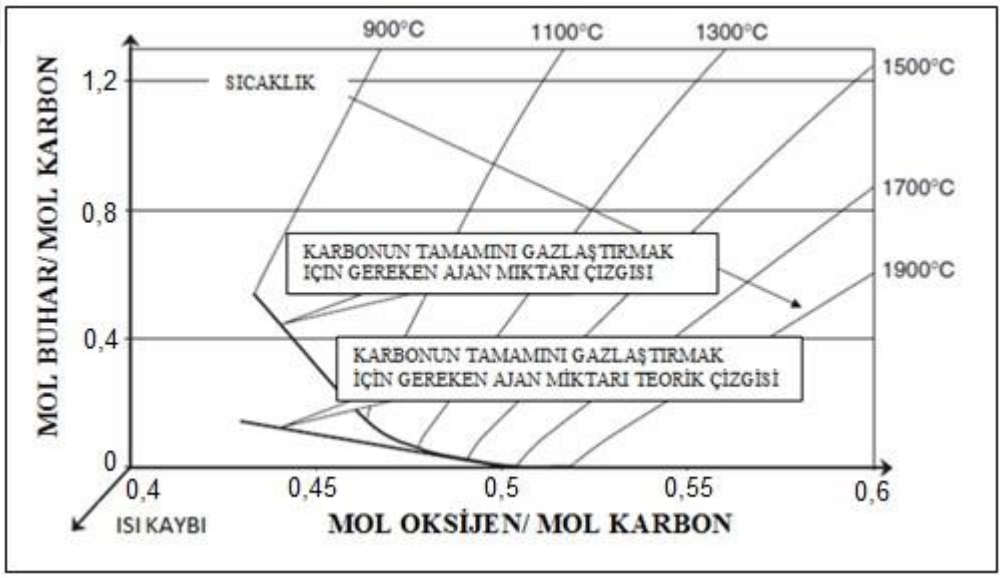
Sıcaklık genellikle kömürün külünün özelliklerine göre seçilir (akışkan yataklar ve kuru-kül sürüklemeli yatak gazlaştırıcılar için külün yumuşama noktasının altı ve eriyik gazlaştırıcılar için ergime noktasının üzeri). Ergime noktası yüksek kömürler için, kömür beslemesine eritken madde eklemek kül ergime noktasını düşürmesi açısından avantaj sağlamaktadır. Yüksek derecelerde gazlaştırma, oksijen tüketimini arttırır ve verimliliği düşürür. Süreç kontrol amacıyla, yakıt ile oksijen ve/veya buharın birbirine oranlarının bilindiği durumlarda sıcaklık derecesi hesaplanabilir. Bu yöntem, cüruflu gazlaştırıcılarda sıcaklığın çok zor ölçülebilmesi ve ölçülen değerin güvenilir olmaması bakımından önemlidir. Çoğu modern gazlaştırma süreci 30 bar veya daha yüksek basınçta ve 1300 ºC'den yüksek sıcaklıkta çalışır. Bunun sebebi düşük metan içerikli sentez gaz üretebilmektir. Katalizörlerin gazlaştırma ortamında sınırlı kullanımının olmasından dolayı, bu derece yüksek sıcaklık gereklidir. Katalizör kullanımı temiz gazlaştırma ortamı ile belirleyicidir. (Higman ve Burgt, 2008).

Şekil 2.16'da sıcaklığın artmasıyla gazın CO bakımından zenginleştiği gözterilmiştir. H_2+CO ürünleri, 1200-1300 ºC arasında maksimum (önemli bir değişim gözlenmiyor) değerine ulaşır.



Şekil 2.16 30 bar basınç altında sentez gazı bileşimi üzerine sıcaklığın etkisi (Higman ve Burgt, 2008)

Herhangi bir hammadenin (kömür, petrol, atık, biyokütle, gaz olabilir) gazlaştırılmasını tam olarak anlayabilmek için yakıtın gazlaştırılma karakteristiğinin hesaplanması önemlidir. Bu sayede reaktörde neler olduğu anlaşılabilir ve reaksiyon koşulları optimize edilebilir. Yakıt gazlaştırmanın karakteristiklerini, gazlaştırma reaktörünün ve belirli reaktant oranlarının (kömür, oksijen ve buhar) her biri ile sabit sıcaklık ve bileşim için, özgül ısı kayıplarını karşılaştıran yakıt ayakizi grafikleri en iyi şekilde sunar. Ordinat ekseni boyunca, 100 kg yakıt beslemesine karşı harcanan su buharı, 100 kg yakıt beslemesi için harcanan oksijen ise apsis ekseni boyunca uzanır. Şekil 2.17'de saf katı karbon kullanılarak bir örnek verilmiştir (Higman ve Burgt, 2008).



Şekil 2.17 Saf karbon için gazlaştırma ayakizi (Higman ve Burgt, 2008)

Şekil 2.17'in sol alt köşesindeki düz çizgi kömürü gazlaştırmak için gereken minimum gazlaştırıcı ajan (oksijen ve buhar) miktarını göstermektedir (gazda H_2O, CO_2 ve CH_4'ün mevcut olmadığı varsayılmıştır). Termodinamik olarak bu mümkün değildir. Tüm karbonu gazlaştırmaya yeterli miktarda oksijen ve buharın eklenmesi ise eğri çizgi ile gösterilmiştir. Bu çizginin düşük sıcaklık kısmı akışkan yatak gazlaştırıcılar için tipiktir. Düz çizgiden ayrılma, buharın bir kısmının termodinamik sebepler dolayısıyla henüz dönüşmemiş olduğunu; ayrıca CO_2 ve CH_4 içeriğinin arttığını gösterir. 1500 ºC civarı sıcaklıkların olduğu, kuru kömür beslemeli

sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılarda, düz çizgi ve termodinamik denge çizgisi neredeyse birbirine dokunacak hale gelir (Higman ve Burgt, 2008).

İzoterm yaratmak için, buhardan ürün gaza dönüşme oranı gazlaştırmanın tamamlanması için belirtilen minimum gerekli sıcaklıklık değerinin üzerinde sabittir. Hesaplamalarda üç heterojen eşitlik yerine (Boudouard, su gazı ve hidrogazifikasyon) CO değişim (su gazı yönlendirme) ve metan-buhar reforming eşitliklerinin denge sabitleri kullanılmalıdır. Buhardan ürün gaz oluşum oranı bilindiği için, eşitlik ve değişkenlerin sayısı aynı kalır ve algoritma çözülebilir (Higman ve Burgt, 2008).

Heterojen reaksiyon varsayımıyla gazlaştırıcı için hesaplama yapıldığında, gerekli olan oksidant miktarı bazen negatif çıkabilir. Bunun sebebi yakıtın ve/veya yakıcının kül, su, buhar veya nitrojen formunda çok fazla oksitleyici içermesi sebebiyle istenilen sıcaklığın elde edilebilmesi için, yakıttaki tüm karbonun gazlaştırılmasına gerekenden daha fazla oksijen tüketimine ihtiyaç duyulması olabilir. Hesaplamalarda algoritma, oksidant miktarını azaltmaya çalışır ve sadece oksidant değeri negatif olduğunda matematiksel olarak geçerli bir sonuca ulaşılabilir. Çözüm, oksidant değerini sıfıra çekmektir. Sonuç üç heterojen gazlaştırma denge sabiti yerine, CO yönlendirme ve buhar-metan oluşturma reaksiyonlarındaki iki denge sabiti kullanılarak bulunur. Bu durumla karşılaşılabilecek örnekler;

- Sürüklemeli akışlı cüruflu gazlaştırıcıya, kurutulmamış düşük kaliteli kömür beslenmesi,
- Sürüklemeli akışlı cüruflu gazlaştırıcıya kömür/su şlam beslenmesi,
- Sürüklemeli-akış gazlaştırıcıda gazlaştırıcı ajan olarak hava kullanılması.

Kazanlarda olduğu gibi gazlaştırıcı ajanın gerekli olmadığı durumlarda proses kontrolü oldukça kolay bir hal alır, üç yerine iki akışın kontrol edilmesi yeterlidir (Higman ve Burgt, 2008).

2.2.6 Kokların Gazlaştırılmasına Katalizörün Etkisi

Kullanılan kömürün mineral maddesinin bileşimi ve miktarı, üretilen kokun kalitesini etkileyen kül ve kükürt içeriklerini belirleyici rol oynadığı için önemlidir. Koklaşabilen kömürlerin inorganik bileşenleri, karbonizasyon ürünlerinin verimlerini ve reaktifliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Kömürlerin katalizörsüz ve katalizörlü olarak CO_2 ile gazlaştırılmasını incelemek için yapılan çalışmalarda katalizörlerin gazlaşma hızını attırdığı gözlemlenmiştir. Kokun içerdiği inorganik bileşenlerin bazıları da katalizör etkisi göstermektedir. Bazı minerallerin etkisiyle, yüksek sıcaklık koklarının oksitleyici gazlarla olan tepkimelerinin hızlanmasının, reaktivitenin değişmesinden kaynaklandığı bilinmektedir. Ancak, reaktivitede gözlenen bu etkilerin, kokun, yakma sistemlerindeki yanma özelliğini tam olarak yansıttığı kanıtlanamamıştır (Koç, 2006).

Karbondioksit ve kömür reaksiyonu katalitik olmayan bir gaz-katı reaksiyonu olarak değerlendirilmekle beraber mineral maddelerin katalitik olarak reaksiyon hızını arttırdığı ifade edilmektedir (Yaşyerli, 1992).

Kullanılan katalizörlerin cinsi, miktarı ve benzeri faktörler ürün verimini değiştirmektedir. Gazlaştırmada kullanılan katalizörleri beş ana grupta toplayabiliriz bunlar; alkali metal tuzları, alkali metal oksitler, kömürde bulunan mineral maddeler ve uçucular, geçiş metalleri, diğer oksit ve tuzları, ötektik tuz karışımları (Bozkurt, 2005).

2.3 Gazlaştırma Ürünleri ve Sentez Gazı Kullanım Alanları

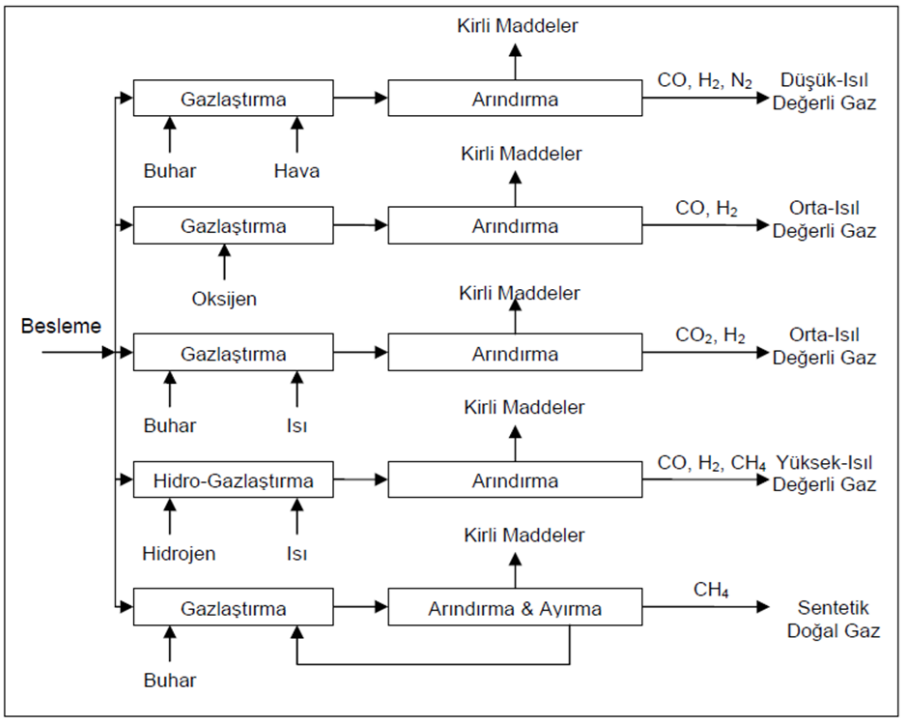
2.3.1 Gazlaştırma Ürünleri

Gazlaştırma prosesleri sonucu üretilmiş olan sentez gazı ürünleri ısıl değerine bağlı olarak üç grupta şu şekilde sınıflandırılır (Ateşok, 2009; Koç, 2006; Lee, Speight, ve Loyalka, 2007; Pişkin, 1991; Simbeck, 1993);

1. Düşük ısıl değerli ürün; 800-1800 Kcal/m³ değerleri arasında düşük ısıl gücü olup nitrojen, karbon monoksit, hidrojen ve bazı diğer gazların karışımından oluşan gazdır.

2. Orta ısıl değerli ürün; 1800-3600 Kcal/m³ değerleri arasında ısıl gücü olup ağırlıklı olarak karbon monoksit ve hidrojen içeren, bir miktar metan ve karbon dioksit bulunduran ve çeşitli diğer gazların karışımından oluşan gazdır.

3. Yüksek ısıl değerli ürün; 8500 Kcal/m³ değeri civarında olup esasen metandan oluşan gazdır. Sentetik doğalgaz (SNG) olarakta adlandırılır.



Şekil 2.18 Gazlaştırma yöntemleri ve ürünleri (Liu ve diğer., 2010)

Gazlaştırıcılarda üretilen ortalama gaz kompozisyon aralığı (hacimce %, kuru) şu şekildedir (Lau, 2014); H_2 % 20-50, CO % 20-65, CO_2 % 3-35, CH_4 % 0-12, H_2S % 0,1-1, COS % 0-0,1, NH_3+HCN % 0-0,1, katran ağırlıkça % 0-10. Şekil 2.18'de temel gazlaştırma ürün ve yöntemleri, kullanılan gazlaştırma ajanlarıyla birlikte gösterilmektedir (Liu ve diğer., 2010).

2.3.1.1 Düşük Isıl Değerli Gaz

Düşük ısıl değerli gaz üretiminde gazlaştırıcı ajan olarak hava kullanılır. Nitrojen ya da azot içeren gaz bileşimi istenmediği durumlarda hava yerine saf oksijen kullanılır. Ürünün düşük ısıl güç vermesi sebebiyle, yeraltı madenciğili ya da pahalı teknikler kullanılması gereken durumlarda ekonomik olmayabilir. Bu gibi şartlarda yer altı kömür gazlaştırma metodu ekonomik olabilir (Lee ve diğer., 2007).

Esas iki ana yanıcı gaz olan hidrojen ve karbon monoksit oranı, H_2/CO, 2/3 ile 3/2 değer aralıklarında oluşur. Ayrıca metan varlığı gaz ısıl değerine hissedilebilir katkı sağlayabilir. Gaz içeriğinde az miktarda bulunan içerikler içinde en önemlisi olan hidrojen sülfürdür ve miktarı besleme kömüründeki kükürt içeriği ile orantılıdır. (Luque ve Speight, 2014)

2.3.1.2 Orta Isıl Değerli Gaz

Orta ısıl değerli gaz üretiminde, hava yerine saf oksijen gazlaştırıcı ajan olarak kullanılırken bu sayede farkedilir ısı artışı olur. 1800-3600 Kcal/Nm^3 değerleri arasında değişen ısıl gücü olan, ağırlıklı olarak karbon monoksit ve hidrojen içeren, bir miktar da karbon dioksit ve metan içeren gaz ürün oluşur. Çok yönlü kullanılabilen bu ürün birincil olarak metanol sentezi, Fischer-Tropsch sentezi ile ağır hidrokarbon (benzin) üretimi ve çeşitli sentetik kimyasal üretimleri için tercih edilir. Ayrıca buhar üretimi için ya da bir gaz türbini çalıştırmak için doğrudan yakıt olarak kullanılabilir. H_2/CO oranı çeşitli varyasyonlarda olabilir, 2/3 oranından (karbon monoksitçe zengin), 3/1'den (hidrojence zengin) daha yüksek olan miktarlara kadar değişebilir. (Lee ve diğer., 2007; Luque ve Speight, 2014).

Düşük ve orta ısıl değerli gazların üretimi daha ekonomiktir. Ancak, ısıl değerlerinin düşük olması sebebiyle aynı miktar enerji üretimi için gerekli dağıtım gideri, yüksek ısıl değerli gaza oranla daha fazladır. Bu durum, düşük ve orta ısıl değerli gazın üretildiği yerin hemen yakınında kullanılmasını zorunlu kılar (Pişkin, 1991).

Gazlaştırma bölgesindeki yüksek sıcaklık sayesinde cüruf sıvı halde gelir. Bazı yakıtların gazlaştırılmasından oluşan katran, kısmen gaz ürünle sürüklenerek boruların kirlenmesine neden olur. Bu tür gazlar bazı brülör tiplerinde kullanılamaz. Katran çok değerli organik bileşikler içeren bir üründür. Organik kimya sanayi'nde büyük öneme sahip naftalin, antrasen, fenol ve türevleri gibi önemli hammaddeler üretilir (Koç, 2006).

2.3.1.3 Yüksek Isıl Değerli Gaz

Yüksek ısıl değerli gaz ağırlıkça saf metan (% 95<) içerir ve ısıl değer 8500 Kcal/Nm^3 değerlere kadar yükselir. Doğalgaz ile uyumludur ve sentetik doğalgaz (SNG) olarak kullanılır (Lee ve diğer., 2007; Luque ve Speight, 2014).

2.3.1.4 Diğer Ürünler

Ayrıca eskiden adı geçen şu an kullanılmayan ürün serilerinin isimlendirmeleri şunlardır (Luque ve Speight, 2014); jeneratör gazı (hava gazı), su gazı, şehir gazı ve sentetik doğalgaz. Düşük ısıl değerli jeneratör gazı sabit yataklı gazlaştırıcıda hava+buhar ajanları ile elde edilen gazdır. Hacimce gaz kompozisyonu şöyledir; % 28 CO, % 55 N_2, % 12 H_2, % 5 CH_4 ve az mktarda CO_2. Orta ısıl değerli su gazı kızgın kömür içinden su buharı geçirilmesiyle elde edilir. Su gazı, yüksek alev sıcaklığını gerektiren durumlarda amonyak, metanol ve sentetik benzin üretiminde sentez gazı olarak kullanılmaktadır Hacimce gaz kompozisyonu şöyledir; % 50 H_2, % 40 CO, düşük miktarda N_2 ve CO_2. Orta ısıl değerli şehir gazı kömürün yüksek sıcaklık koklaştırılmasıyla elde edilir. Bileşimi yaklaşık % 55 H_2, % 27 CH_4, % 6 CO, % 10 N_2 ve % 2 CO_2'dir ve ısıl değeri yüksektir.

2.3.2 Gazlaştırma Ajan Seçimi Karşılaştırılması

Gazlaştırma prosesinde en sık kullanılan gazlaştırma ajanı buhardır. Kullanılan buhar gazlaştırıcıdaki basınç koşullarında doygun buhar özelliği taşıyacak minimum sıcaklıkta olmalıdır, aksi takdirde gazlaştırıcıda su buharı yoğuşacaktır. Genellikle

kızgın buhar (300-400 ºC) kullanılır. 40 bar'dan yüksek basınçlarda kızgın buhar kullanımı zorunludur, çünkü aksi durumda ıslak buhar oluşur ve yoğuşma gerçekleşir. Karbondioksitin gazlaştırma ajanı olarak ticari kullanımı nadirdir. Bazı tesisler, bunu sentez gazın H_2/CO oranını ayarlamak için kullanır, burada ürün karbon monoksit (CO) bakımından zengin sentez gazıdır (Higman ve Burgt, 2008).

Geleneksel gazlaştırma süreçlerinde, endotermik gazlaştırma reaksiyonlarının gerektirdiği enerji ihtiyacı yakıtın oksijenle verdiği ekzotermik reaksiyonlar ile sağlanır (Basu, 2006). Su buharı ile gazlaştırma reaksiyonların gerektirdiği enerji, kömürün oksijen ile olan reaksiyonları tarafından karşılandığı gazlaştırma proseslerinde, sisteme beslenen kömürün bir kısmı su buharlı gazlaştırma reaksiyonlarına dahil olmadan harcanmış olur (Basu, 2006; Higman ve Burgt, 2008).

Oksijenin havadan sağlandığı sistemlerde, havadaki N_2'nin reaksiyon ortamına dahil olması, ürün sentez gazında NH_3 (amonyak, % 10-15) ve HCN (hidroklorik asit, % 0,6-5,7) yüksek miktarda istenmeyen bileşenleri oluşturur. Proseste faydalı bir rolü olmadan, moleküler formda ürün akımında yer alan N_2 gazı, proses sonunda elde edilmek istenilen gazların konsantrasyonlarını düşüreceği gibi sentez gazının ısıl değerinin de düşmesine sebep olmaktadır (Vural, 2014).

Su buharlı gazlaştırmada, kömürden üretilen sentez gazındaki H_2 konsantrasyonu arttırılır. Gazlaştırma reaksiyonlarının gerçekleşmesi için gereken enerji, harici ısıtma ile sağlanarak sistemdeki tek gazlaştırma ajanı olarak su buharı kullanılabilir. Bu oksijensiz/havasız gazlaştırma ortamında, tam yanma ve kısmi yanma (2.1-2.3) reaksiyonları gerçekleşmez. Ağırlıklı olarak su gazı (2.4) ve su gazı yönlendirme (2.7) reaksiyonlarının ve ortam sıcaklığına bağlı olarak da Bouduard (2.5) ve metan oluşum (2.6) reaksiyonlarının gerçekleşmesi beklenir. Ortam sıcaklığı metan oluşumu için uygun olan düşük sıcaklıklarda seyrederse, aynı ortamda yeterli su buharı varlığında buhar-metan reforming (2.8) reaksiyonunun da gerçekleşmesi beklenir. Su buharlı gazlaştırma sürecindeki endotermik reaksiyonlar için gereken enerjiyi harici bir kaynak sağlayabilirse, su buharı ajan olarak yeterli olabilir (Higman ve Burgt, 2008).

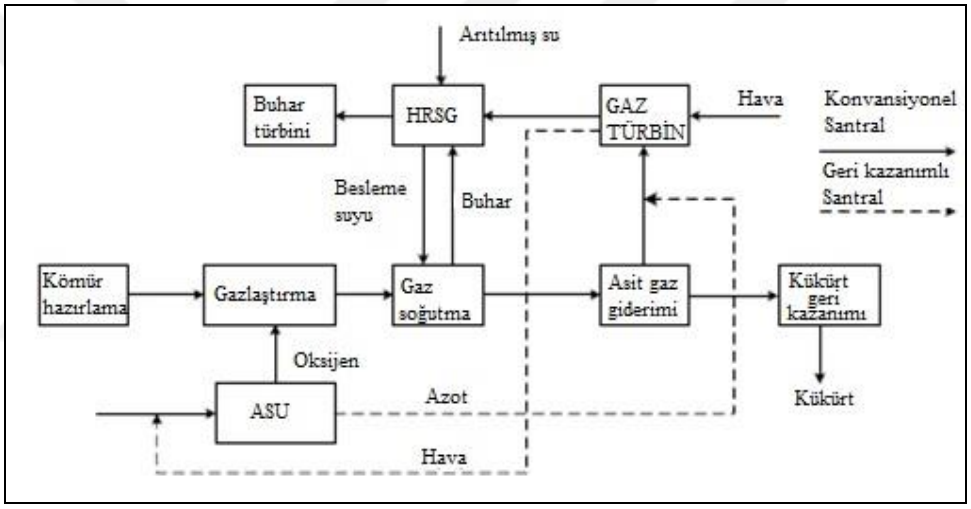
Su buharlı gazlaştırma işleminde, kimya, petrokimya ve enerji endüstrileri başta olmak üzere birçok endüstride kullanılmakta olan, geleceğin enerji taşıyıcısı olarak önem taşıyan hidrojen üretimi için büyük önem taşıyan Su gazı yönlendirme reaksiyonu (2.7) baskındır ve ürün sentez gazdaki H_2 konsantrasyonu diğer yöntemlerle üretilen konsantrasyon değerlerinden yüksektir. Temel gazlaştırma reaksiyonları göz önüne alındığında, gazlaştırma sürecinde gazlaştırıcı ajan/ oksitleyici olarak yalnızca su buharının kullanılması, sentez gazındaki H_2 oranını arttırıcı yönde etki göstermektedir ve bu artış yalnızca havadan gelen N_2'nin eksilmesinden dolayıdır. Düşük sıcaklıkta (600-650 ºC) H_2 ve CH_4 oranlarının artışı gözlenirken, CO ve CO_2 oranlarının düşüşünün gözlenmesi, bu durumun süreçte gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sebebiyle oluştuğunu gösterir. Havadan gelmesi beklenen azot ve hava/oksijen ile tam yanma reaksiyonu sonucu oluşan su tamamen süreçten elimine edilmiş olur. Sentez gazında istenilen ürünlerin konsantrasyonu ve dolayısıyla ısıl değer artar. Ortamda serbest oksijen bulunmayacağından dolayı yanma reaksiyonu ürünleri olan SOx ve NOx kirleticileri oluşmayacaktır. Süreçte yalnızca yakıttan gelebilecek azot bulunacaktır ve bu durumda oluşabilecek NH_3 gibi kirleticilerin konsantrasyonu azalacaktır (maksimum % 1,5). Diğer gazlaştırma ajanlarının kullanıldığı geleneksel gazlaştırma yöntemlerinde dezavantaj olarak görünen hammaddenin nem içeriği gazlaştırma prosesinde negatif etki yaratmaz dolayısıyla su buharlı gazlaştırmada hammaddenin içerdiği nemin uzaklaştırılması gerekmez (Vural, 2014).

2.3.3 Sentez Gazının Kullanım Alanları

Gazlaştırma süreci sonunda alınan ürün, sentez gazı, endüstride kimyasal, akaryakıt, enerji üretim süreçlerinde kullanılan bir ara ürün niteliğindedir. Sentez gazının kullanılacağı alana göre, gereksinim duyulan sentez gazı bileşimi değişiklik gösterir, bu nedenle de farklı bileşimde gaz ürün üretimine yönelik sürecin yönetilmesi gereklidir (Higman ve Burgt, 2008).

2.3.3.1 Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrim (IGCC) ve Enerji Üretimi

Gazlaştırıcı ünitesinin kombine çevrim santrallerine entegrasyonu ile gazlaştırıcılı kombine çevrim santralleri elde edilir. Konvansiyonel kombine çevrim santrallerine ek olarak gazlaştırıcı, oksidant seçimine göre hava ayrıştırma ünitesi ve gaz temizleme sistemleri santrale ilave edilir. Gazlaştırma ile katı ya da sıvı yakıtlardan sentez gazı elde edilerek gaz türbinlerine verilir. Gazlaştırma ile yakıtın içindeki kükürt, yanma öncesinde temizlendiği için desülfirürizasyona gerek kalmaz (Yılmazoğlu, 2012). Şekil 2.19'da gazlaştırıcılı kombine çevrim santralleri'nin sistem yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.19 Gazlaştırıcılı kombine çevrim santrallerinin sistem yapısı (Yılmazoğlu, 2012)

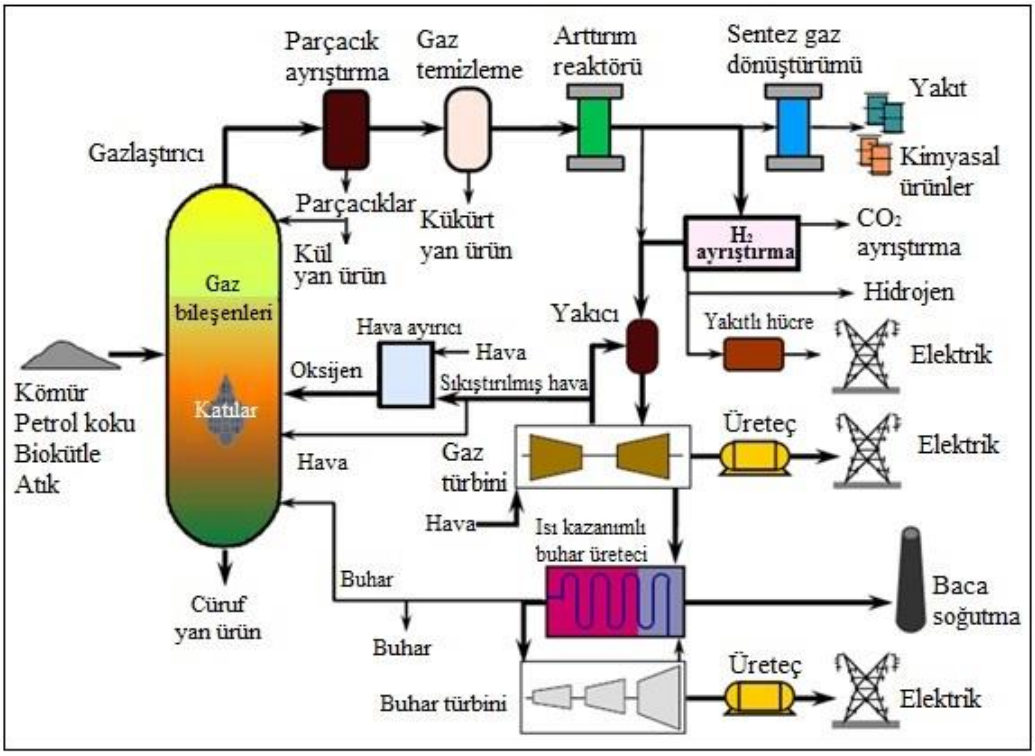
Gazlaştırma oksijen ya da hava ortamında yapılabildiği gibi oksijenle gazlaştırma belirli bir güç kapasitesinin üzerindeki santrallerde daha uygun sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, hava ayrıştırma ünitesi de sisteme ilave edilmiştir. Hava ayrıştırma ünitesinde elde edilen oksijen gazlaştırıcıya verilirken diğer elde edilen azot, temiz sentez gaz ile karıştırılarak gaz türbininde yanma odası sıcaklık kontrolü sağlanır ya da kuru beslemeli santrallerde transfer gazı olarak kullanılır. Gaz türbini kompresöründen alınan hava, hava ayrıştırma ünitesine de beslenebilir ve bu sıkıştırılmış hava, ayrıştırma ünitesinin kompresörlerinin iç tüketimini azaltır. Oksidant olarak oksijenin kullanıldığı sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcıda hava ayrıştırma ünitesinde sıcaklık düşmektedir. Sentez gazın temizlenmesi sırasında da

gaz sıcaklığı tekrar düşürülerek elde edilen temiz sentez gazı yakıt olarak kullanılır (Yılmazoğlu, 2012).

Kömürün yakılmasıyla elektrik enerjisi üretilen konvensiyonel güç santrallerinde verim % 30-35 civarında iken gaz yakılmasıyla enerji üretilen güç santrallerinde verim açık çevrimlerde % 35-43, kombine çevrimlerde ise % 50-60 arasında değişkenlik göstermektedir (Higman ve Burgt, 2008).

Kömüre dayalı enerji santrallerinde, gazlaştırmanın iki yararı vardır. Bunlar prosesin sunduğu verimlilik ve çevresel uygunluk kriterleridir. Buradaki verimliliğin sebebi üst düzey kombine çevrimlerde sentez gazı, gaz türbinde yakılarak kullanılabilirliğidir. Türbinden ayrılan sıcak gaz konvansiyonel su buharı çevriminde buhar üretmek için kullanılır. Gaz ateşlemenin son model kombine çevrimdeki verimliliği % 59 civarındadir, gazlaştırma verimi ise % 81,4'tür; bu iki durumun sonucu olarak toplam verimlilik % 48'dir. Aynı şekilde kömürün doğrudan yakılarak kullanılmasının verimi ise % 45'tir. Toplam proses verimliliği bakımından gazlaştırmanın uygunluğu için basit bir hesaplamayla, kömür gazlaştırma veriminin (KGV) % 76,3'ten büyük olması gerektiği görülür (Higman ve Burgt, 2008). Şekil 2.20'de yeni jenerasyon çoklu üretim sistemi gösterilmiştir. En yeni sistemlerin bir arada entegre olarak gösterildiği şemada gazlaştırıcılı kombine çevrim santralleri'nin yüksek verimliliğe sebep olan sentez gazı yakma türbin sistemi de gösterilmiştir (Breault, 2010).

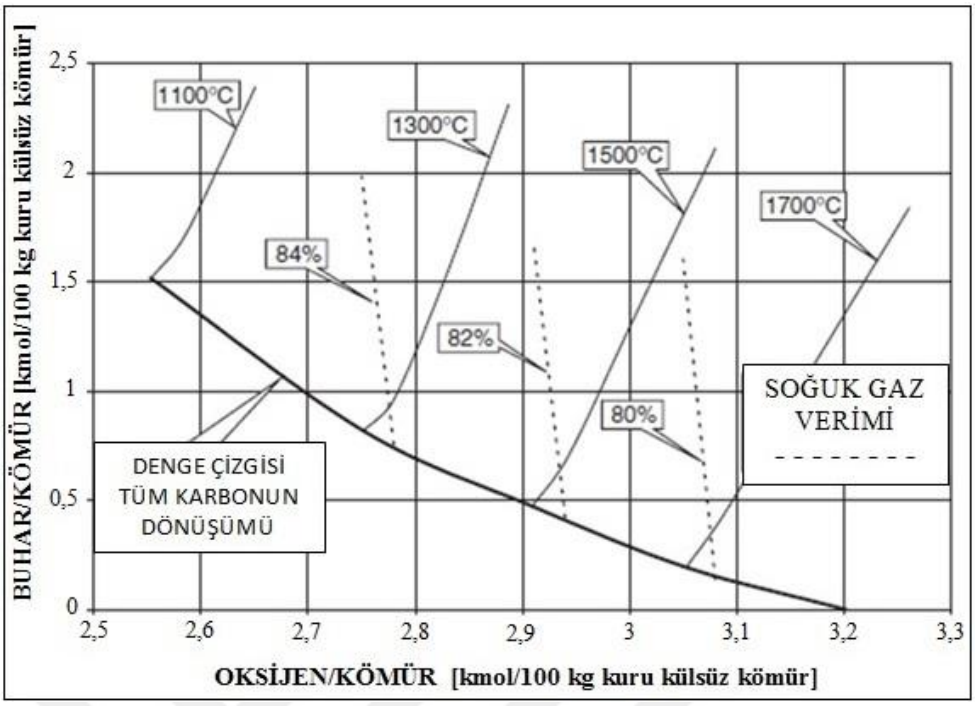
Gazlaştırmaya dayalı enerji santralleri, konvansiyonel kömür yakmaya dayalı enerji santralleri ile, kükürtlü bileşikler içeren zararlı gaz emisyonları karşılaştırıldığında, çevresel ve ekonomik açıdan daha uygun olduğu görülmektedir. Modern yakma teknolojilerinin kullanıldığı güç santrallerinde verim % 40'ın üzerine çıkmasına rağmen bu teknolojilerdeki en büyük problem CO_2 emisyonunun yüksek olmasıdır (Higman ve Burgt, 2008).



Şekil 2.20 Yeni nesil çoklu-üretim gazlaştırıcılı kombine çevrim santral tesisi (Breault, 2010)

Gaz yakıt uygulamalarında, gazlaştırma sıcaklığı olabildiğince düşük olmalıdır. Bu sayede en yüksek kömür gazlaştırma verimi ve en düşük oksijen tüketimi gerçekleşir. Şekil 2.21'de, gazlaştırma verim kuşakları gösterilmektedir. Ergime noktaları belirli kömürler için çalışma sınırları genişletebilir olsa da gazlaştırıcılarda sıcaklık her zaman için kömürün kül-ergitme karakteristiği tarafından belirlenir. Tüm gazlaştırıcılar için diğer bir dikkat edilmesi gereken nokta da kömürün reaktifliğidir. Bunun sebebi çalışma sıcaklığı, gazlaştırıcı hacmi ile üretilen iş arasındaki ilişkiyi, diğer bir deyişle gereken alıkonma süresini belirler (Higman ve Burgt, 2008).

Genellikle, düşük kaliteli kömürler için 1400 ºC'nin, yüksek kaliteli kömürler için ise 1450 ºC nin altındaki sıcaklıklar pratikte uygun değildir. Çalışma koşullarının heterojen reaksiyonlar için termodinamik dengeye olabildiğince yakın olması gerekir (Higman ve Burgt, 2008).



Şekil 2.21 Kömür gaz verimleri (Higman ve Burgt, 2008)

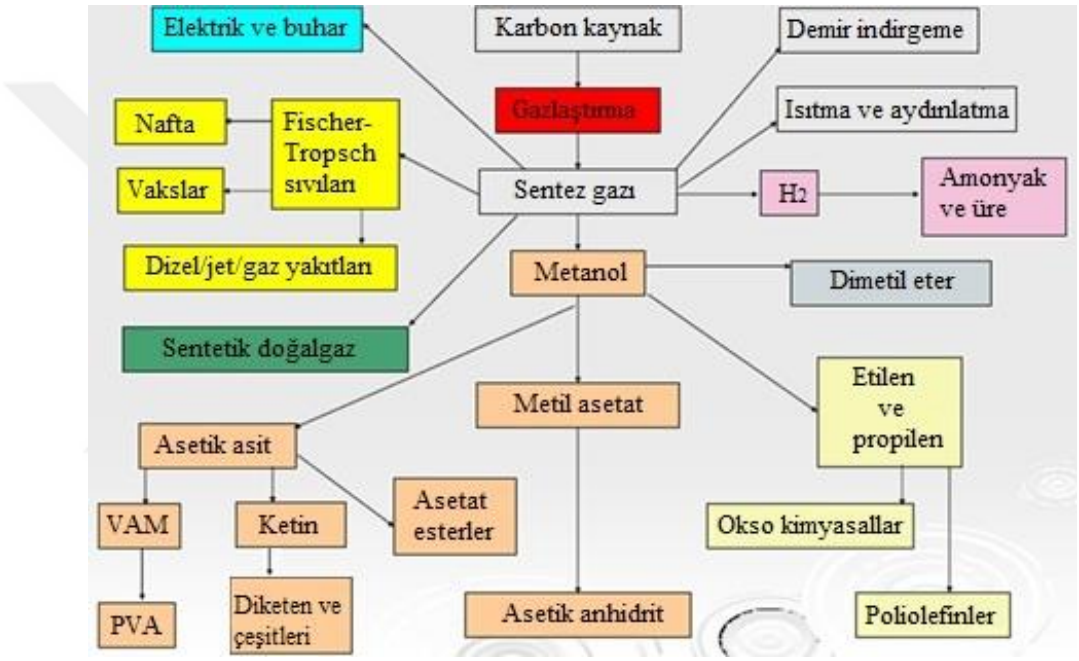
2.3.3.2 Sentez Gazından Kimyasal ve Hidrojen Üretimi

Sentez gaz uygulamaları için birim hammadde başına düşen H_2+CO mol sayısı optimize edilmelidir. Asıl amaç sentez gazında CO miktarını arttırmak yönünde olmalıdır. Çalışılacak düşük sıcaklıklarda karbon, CO yerine CH_4 ve CO_2'e dönüşür. Bu durumda, ortama daha fazla su buharı beslenerek ve ortam sıcaklığı yükseltilerek, daha fazla CO değişim reaksiyonunun oluşması sağlanabilir (Higman ve Burgt, 2008).

Sentez gazı, H_2 ve CO içeriğinden dolayı kimya endüstrisinde bazı kimyasalların üretimi için oldukça önemlidir. Bu kimyasallardan amonyak, dünya çapında üretilen kimyasal ürünler arasında üretim hacmi olarak birinci sırada yer almaktadır. Amonyak üretiminin yaklaşık % 90'lık kısmı doğal gazın buhar reforming prosesine dayanmaktadır. Diğer % 10'luk kısım ise kömürün gazlaştırılması sonucunda oluşan sentez gazı üretiminden elde edilmektedir. Yılda yaklaşık 3,3 milyon ton metanol (dünya üretiminin % 9'u), kömür ve petrol atıklarının gazlaştırılması ile

üretilmektedir (Higman ve Burgt, 2008). Şekil 2.22'de kömür gazlaştırma prosesleri ile üretilen sentez gazından elde edilen uç ürünler ilgili grupları ile gösterilmektedir.

Kömür gazlaştırma veya kömürün kısmi oksidasyonu, hidrojen üretimi için diğer bir mümkün olan teknolojidir. Günümüzde dünya hidrojen üretiminin % 18'i kömürden sağlanmaktadır. Doğalgazdan elde edilen hidrojene göre daha fazla maliyetli olmasına rağmen, kömürü çıkartma-taşıma maliyetleri daha düşüktür (ve kömür uçucu değildir) ve kaynak miktarı daha fazladır (Yüksel, 2010).



Şekil 2.22 Kömür gazlaştırma uygulamaları ürünleri (Luque ve Speight, 2014)

2.3.3.3 Sentez Gazından Sentetik Yakıt Üretimi

Yakıtlar kullanım koşullarına ve uygulanabilirliğine göre farklı yakıt türlerine dönüştürülmektedir. Kullanım alanına göre kömürden sıvı yakıtlar ya da sentetik doğal gaz üretilebilmektedir. Kömürün gazlaştırılması ile elde edilen sentez gazı Fisher-Tropsh (F-T) yöntemi ile sıvı hidrokarbon yakıtlara dönüştürülmektedir. Güney Afrika'da bulunan Sasol kompleksinde Fisher-Tropsh (FTS) yöntemi ile kömürden sıvı yakıt üretimi uygulanmıştır (Higman ve Burgt, 2008). Sentez gazı hidrojen kaynağı olarak kullanılmaktadır ve Fisher-Tropsh sentezi sayesinde üretilen

çeşitli hidrokarbonların, isimleri genel karbon oranları ile Tablo 2.3'te verilmiştir (Luque ve Speigth, 2014).

Tablo 2.3 Fischer-Tropsch prosesi hidrokarbon isimleri ve karbon aralıkları (Luque ve Speigth, 2014)

Karbon sayısı aralıkları	Genel isimlendirme
C1-C2	SNG (Sentetik doğalgaz)
C3-C4	LPG (Sıvılaştırılmış petrol gazı)
C5-C7	Hafif petrol
C8-C10	Ağır petrol
C11-C17	Orta damıtma ürünleri, kerosen, dizel
C18-C30	Yumuşak vaks
C31-C60	Sert vaks

2.3.4 Sentez Gazı Kirleticileri ve Temizleme Prosesleri

Kömür gazlaştırma ürünleri farklı gaz kompozisyonlarıyla birden çok çeşit içerdiğinden üretilecek ürünün çalışma koşulları önceden belirlenmiştir. Kömür içindeki sülfür oksijenle yahut hidrojenle enerjisini bırakmak için tepkimeye girecektir ve sülfür oksit ya da hidrojen sülfür oluşturacaktır. Yanma odasındaki havada bulunan azot, azot oksit oluşturacaktır (Ay, 2011).

Reaksiyonlar sonunda elde edilen sentez gaz karışımında istenmeyen bileşiklerin temizlenerek, yanmaya ya da kimyasal üretimine uygun hale getirilmelidir. Partiküller, sülfür ya da klor bileşikleri ve katran uzaklaştırılmalıdır. Kükürt bileşikleri kimyasal üretim amaçlı gazlaştırma ünitelerinde katalizör zehirlenmesine neden olurken, güç santrallerinde baca gazından atılması halinde asit yağmurları ile çevreye büyük zarar verir. Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen işlemlerde yakıttaki kükürt bileşiklerinin tamamı H_2S ve COS bileşiklerine dönüşür. Gazlaştırma reaksiyonlarında ham sentez gazı içindeki kükürt içerikli bileşenlerin % 93-96'sı H_2S, geri kalanı ise COS formundadır. Gazlaşma reaksiyonu sonunda azot içeren

HCN (hidrosiyanik asit) ve NH_3 bileşikleri oluşur. Yanma reaksiyonlarında yakıttaki azot, HCN formuna dönüşür. Su buharı ile reaksiyon sonucu NHx bileşikleri meydana gelir. Daha sonra yanma ortamında bulunan oksijen ile reaksiyon gerçekleşir ve NO ile N_2 gazı oluşur. Civa ve arsenik zehirleyici etkisi nedeni ile dikkate alınması gereken diğer bileşiklerdir. (Yılmazoğlu, 2012).

Sentez gazındaki hidrojen sülfür ve diğer saf olmayan maddeleri uzaklaştırmak için çeşitli temizleme teknolojileri kullanılır. Ham sentez gazı arıtma aşamasından önce soğutulur. Katran ve su soğutma işleminde uzaklaştırılır. Partikül maddeler sıcak ortamda uzaklaştırılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Enerji Dairesi (DOE) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından belirlenen temiz kömür kullanımı için emisyon hedef değerleri; kükürt'ün en az % 99'unun elimine edilmesi, civanın en az % 90'ının elemine edilmesi, NOx< 0.05 lb/MBtu, partiküller < 0.005 lb/MBtu. Türkiye'deki çevre hedef değerleri ise şöyledir; SO_2 < 400 µg/m³, NOx < 300 µg/m³, partiküller < 300 µg/m³ (Ünver ve diğer., 2010).

2.3.4.1 Ham Sentez Gazının Temizlenmesi

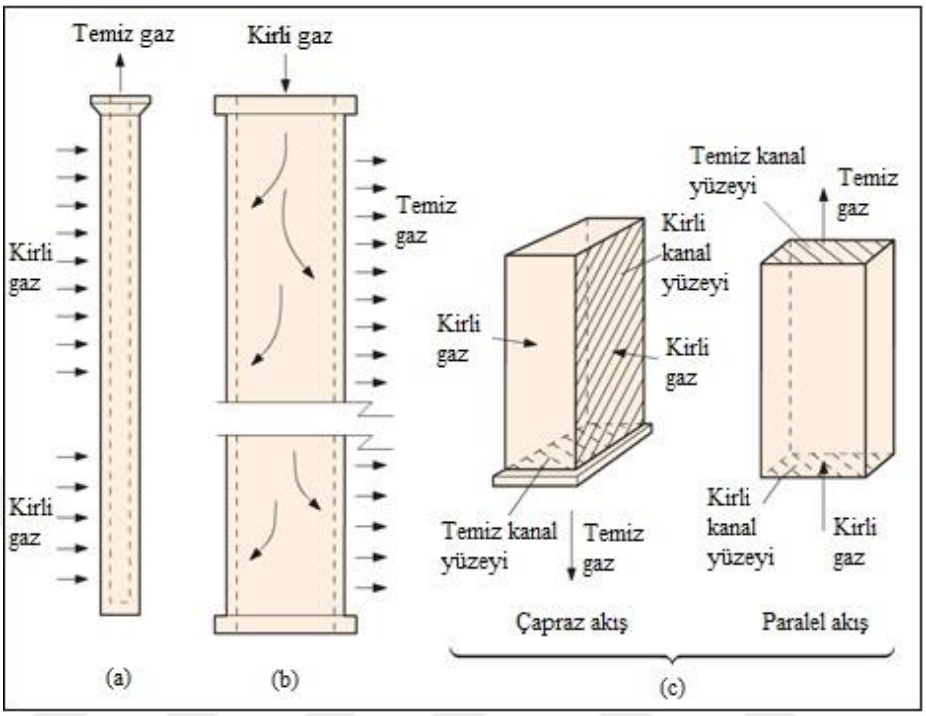
Üretilen sentez gazının sıcaklığı gazlaştırıcı tipine göre farklılık gösterir. Sentez gazı, sabit yataklı gazlaştırıcılarda yaklaşık 550ºC'de, akışkan yataklı gazlaştırıcılarda yaklaşık 900ºC ve sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda yaklaşık 1600ºC'de sistemden çıkar. Sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda kül eriyik halde dışarı alındığı için sentez gazına karışmış haldeki kül yapışkan özellik gösterir bunu engellemek için kül yaklaşık 900ºC'ye soğutulur. Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda külün çevrimi için siklon olsa bile sonrasında sentez gazı içinde bir miktar erozyona sebebiyet veren kül bulunabilir. Ayrıca besleme malzemesine kireçtaşının da eklenmesi siklon sonrasında reaksiyona girmemiş CaO ile CO_2'in reaksiyona girmesine yol açabilir. $CaCO_3$ oluşumu siklon sonrasında olursa soğutucu yüzeylerinde kirlenmeye neden olarak soğutucu performansını azaltır (Yılmazoğlu, 2012).

Gazlaştırıcının tipine bağlı olarak, elde edilen sentez gazı 1500 ºC'ye kadar yükselen sıcaklıklarda olabilir. Gazı soğutmak amacıyla, su ve kimyasal yolla söndürme işleminden, radyant ve konvektif tip soğutuculardan ya da gaz sirkülasyonundan yaralanılmaktadır. Gazlaştırıcı tiplerine göre söndürme ve soğutma işleminde çeşitli uygulamalar mevcuttur. Sentez gazının soğutulması normal olarak proseste ısı kaybına neden olan ve verimi düşüren bir işlemdir. Bu nedenle sistemdeki sentez gazı soğutucularından elde edilen ısı (buhar) enerjisi tekrar sistemdeki buhar çevrimine geri verilmektedir (Ünver ve diğer., 2010).

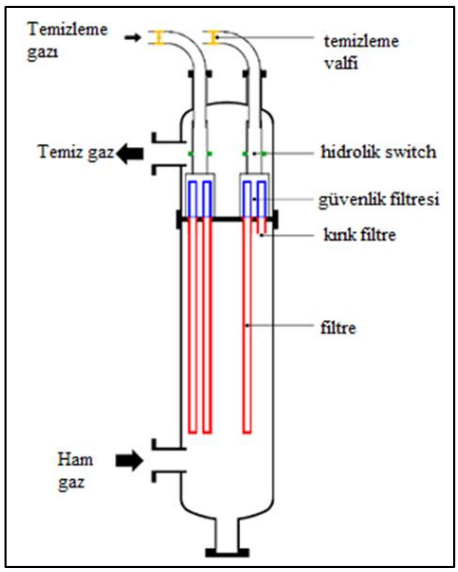
Sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılarda sentez gazı radyant sentez gaz soğutucuları, su ile yıkama, gaz ile yıkama ve kimyasal ile yıkama yöntemleri ile soğutulabilir. Radyant soğutucular, maliyet ve işletme yönünden pahalı ve bakımları zor olan ekipmanlardır. Su ile yıkama yönteminde sentez gaza verilen su, sentez gazın duyulur ısısı ile buharlaştırılarak gaz sıcaklığı düşürülür ve buhar elde edilir. Burada elde edilen buhar, CO yükseltgenme (*shift*) reaksiyonunda kullanılabilir. Bu durumda sentez gazı içindeki H_2/CO oranı artacaktır. Kimyasal yıkama işleminde sentez gazı kömür su karışımının ön ısıtılmasında kullanılır. Bu yöntem ile sentez gazı sıcaklığı 400ºC'ye kadar düşürülebilir. Genel olarak, su ile yıkama sistemleri ucuz, verimleri daha düşük; gaz ile yıkama sistemleri ise pahalı ama daha verimli sistemlerdir (Yılmazoğlu, 2012).

Üretilen sıcak ham gazın içinde kurum ve uçucu kül bulunmaktadır. Bu partiküller yüksek sıcaklıklı ısı geri kazanım sisteminin girişinde bulunan seramik veya metalden yapılmış, mum tipi filtrelerle ya da soğutma sistemlerinin çıkışında bulunan su ile yıkayıcı kulelerde tutulur. Seramik bariyerli filtre tiplerinin isimleri ve şeması Şekil 2.23'te verilmiştir. Mum tipi filtreler partikül maddeyi kuru olarak uzaklaştırdıklarından daha avantajlıdır. Yıkayıcı kulelerde su ile yıkanmasında eser miktardaki klorür uzaklaştırılmış olur ancak bu uygulamadan sonra susuzlaştırma yapmak gereklidir. Partikül temizlemede kullanılan seramik filtre presibinin şematik gösterimi Şekil 2.24'te aktarılmıştır. Klorür hidroliz sürecinde katalizörleri zehirleyebilir ve takip eden ekipman için metalürjik sorunlara neden olabilir. Bu

nedenle proseste kuru filtreler kullanılsa bile klorürler ve amonyak gibi safsızlıkları uzaklaştırmak için genellikle yıkayıcı kule de bulunur (Ünver ve diğer., 2010).



Şekil 2.23 Seramik bariyerli filtre tipleri; a) mum, b) tüp, c) kanal akışlı (Adams ve diğer., 2009)



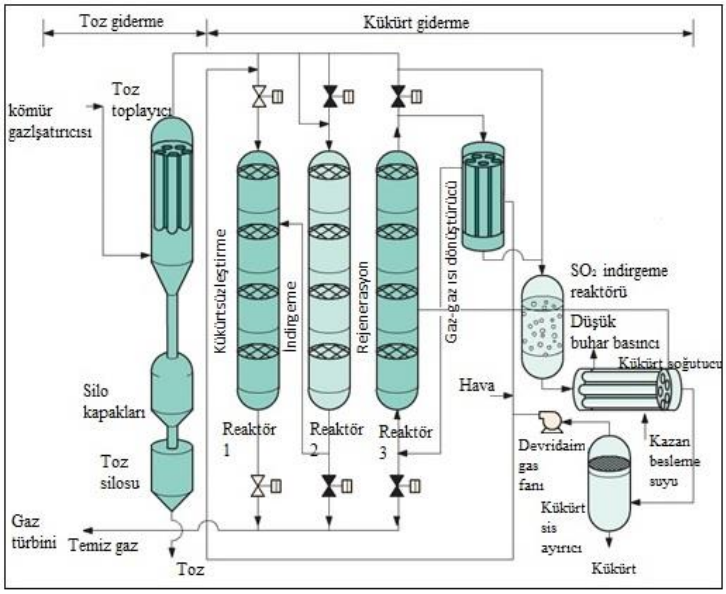
Şekil 2.24 Partikül temizlemede kullanılan seramik filtrenin şematik gösterimi (Yılmazoğlu, 2012)

Asit-gaz giderimi santral ve kimyasal üretim uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Absorpsiyon (fiziksel ya da kimyasal), adsorpsiyon (fiziksel ya da kimyasal), membran, kimyasal dönüştürme yöntemleri ile asit gaz giderimi sağlanır. Asit gazların uzaklaştırılması için kimyasal çözücülerin kullanımında, asit gazlarla amin bileşikleri arasından oluşan kimyasal bağ yoluyla asit gazların uzaklaştırılmasına amin prosesi denir. Sentez gazının temizlenmesinde en yaygın olarak kullanılan kimyasal çözücü, metildietanolamin (MDEA) çözeltisidir. MDEA, amin bileşikleri arasında en az korozif, bozunmaya karşı en dirençli ve H_2S/CO_2 seçimliliği en yüksek olan bileşiktir. Çeşitli deneysel ve ticari IGCC ünitelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu proseste, temizlenecek gaz dolgulu ya da tepsili kuleye verilerek ters akışlı çözücü ile temas eder. Temizlenen gaz, kulenin tepesinden alınırken, asit gazlarla zenginleşmiş olan çözücü rejenerasyona gönderilir. Çözücü ile kimyasal bağ oluşturan asit gazları ayırmak amacıyla rejenerasyon sırasında ısı vermek gerekir. Atık gaz, ihtiva ettiği kükürtlü bileşikleri uzaklaştırmak için kükürt geri kazanım tesisine gönderilir. Asit gaz giderme işlemi ile CO_2 ve H_2S elde edilir. H_2S zehirli olması nedeni ile atmosfere salınamaz. Kükürtün geri kazanımı, elementel ya da sülfirik asit olarak sağlanabilir. Claus işlemi kükürtün elementel olarak geri kazanımı için bir yöntemdir. Günümüzde iki kademeli gerçekleştirilen bu işlemde H_2S'in üçte birlik kısmı oksijen ile reaksiyona sokulur. Bu reaksiyondan elde edilen SO_2 geri kalan üçte ikilik kısımla reaksiyona sokularak su ve elementel kükürt elde edilir (Yılmazoğlu, 2012).

Sentez gazı temizlenmesinde kullanılan fiziksel yıkama işlemine Rectisol, Selexol ve Purisol örnektir. Fiziksel çözücülerden en yaygınları Selexol ve Rextisol'dur. Selexol H_2S için CO_2'e göre önemli ölçüde selektiftir. Lurgi firması tarafından geliştirilen Rectisol, dünyada gaz temizlemede yaygın olarak kullanılan fiziksel çözücülerden biri olup, kükürtün yüksek oranda arıtımını sağlamaktadır. Rectisol aynı zamanda sentez gazından istenen farklı bileşiklerin elde edilmesine olanak sağlayan esnek bir prosestir. Hidrojen, karbon monoksit, amonyak ve metanol gibi ürün kombinasyonlarının elde edilmesi için uygundur. Soğuk metanol, eser miktardaki metalik bileşenlerin de uzaklaştırılmasını sağlar. Gazda civa bulunuyorsa,

civanın arıtılması için Rectisol ünitesi öncesinde bir karbon yatağı ünitesi koymak gerekir (Ünver ve diğer., 2010).

Kimyasal çözücüler ile fiziksel çözücülerin avantajlı özelliklerin bir araya getirmek amacıyla hibrid çözücüler üretilmiştir. Piyasada, Sulfinol, Flexsorb PS ve Ucarsol LE gibi çeşitli isimler altında hibrid çözücüler bulunmaktadır. Asit gazların uzaklaştırılması (AGR) prosesinin seçimi; oldukça kompleks olup, standartlaşmış bir yapılandırması yoktur. Proses tasarımını etkileyen çok sayıda faktör vardır. Bunlar arasında, temizlenecek sentez gazının akış hızı, bileşimi, basıncı ve sıcaklığı, asidik gaz konsatrasyonu, kükürt uzaklaştırma oranı, tesisin tümünden çıkan SO_2 ve NOx emisyonları gibi kriterler bulunur. Ayrıca esas olarak kullanılacak ürün çeşidi için örneğin elektrik üretimi, metanol üretimi, Fischer Tropsch sentezi koşullarında gerekli kriterler tasarımı etkiler (kükürt miktarının 0.1 ppm'den az olması şartları). Karbondioksitin ne ölçüde uzaklaştırılacağı ya da karbon tutma ve depolama prosesi için ne düzeyde ayrıştırılacağı asit uzaklaştırma (AGR) prosesiyle tasarlanır ve işletme maliyetlerini etkileyecek çözücülerin rejenerasyonu, resirkülasyonu ve soğutma sistemlerini de içerir (Ünver ve diğer., 2010). Şekil 2.25'te 200 ton/gün kapasiteli Nakso, Japonya'da geliştirilmiş sıcak gaz temizle sistemi akım şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.25 Nakso, Japonya sıcak gaz temizleme ünitesi şeması (Adams ve diğer., 2009)

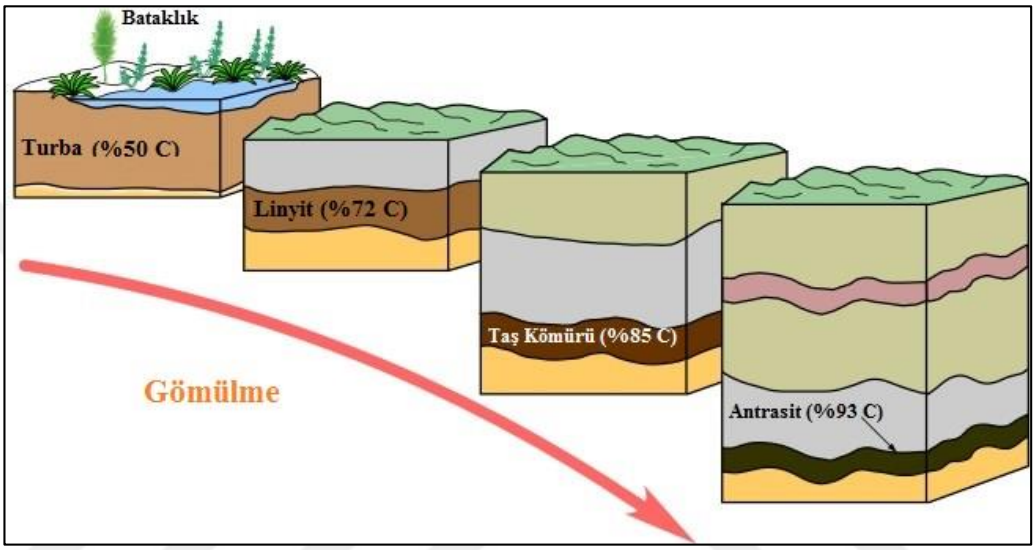
2.4 Kömürlerin Sınıflandırılması

2.4.1 Kömürün Oluşumu ve Kömürleşme

Kömür, içinde bulunan bitkinin türüne (organik kompozisyon), başkalaşım ve kömürleşme derecesine (kömürleşme aşaması) ve içeriğinin saflık (mineral madde miktarı) oranına göre farklık göstermektedir. Bitkisel atıkların kömür oluşumuna dair iki temel teori vardır. Birincisi ve en fazla kabul göreni kömürün bulunduğu yerde oluştuğudur. Yani bitkinin gelişip, öldüğü yerde (otokton) kömürleşmesidir. Birçok kömür tortulunun başlangıcı suyun neredeyse hareketsiz olduğu ve bitki atıklarının bulunduğu yerde kalın turba bataklıkları ile oluşur. Bitkilerin bataklığın dibine batmaya ve mikrobiyolojik olaylarla turbalaşmaya ayak uydurduğu zaman, bitkileşme hızı da birçok değişim için artmaktadır. Belli bir süre sonra, bu bataklıklar dibe batmaya başlar ve üzeri çöküntü tortulları ile kaplanır. Böylece yeni bir kömür yatağı oluşur. Bu döngü devam ettikçe, (yüz binlerce yılda) yeni kömür yatakları oluşur. Bu tortullaşma ve birikme döngülerini sıcaklık, zaman ve uygulanan kuvvete bağlı olarak diyagnetik (biyolojik) ya da tektonik (jeolojik) olaylar takip eder. Kömürün oluşumu bu yolla açıklanabilirken, bazı tortullaşmalar bu yolla kolayca ifade edilememektedir. Bazı kömürlerin su tarafından taşınan bitkisel atıkların birikmesiyle oluştuğu görülmektedir. Bu teoriye göre yabancı kökenli (allokton) bitki parçaları su akışları ile yer değiştirir ve deniz ya da göl tabanında tortullaşır ve daha sonra sert kaya oluşturacak şekilde sıkışırlar (Yüksel, 2010).

Zamanla gömülen organik madde ve onunla birlikte bulunan diğer çökeller havzanın türü, çökelim süresi ve hızına bağlı olarak belli süre boyunca giderek artan yer sıcaklığı ile litostatik basıncın etkisi altında diyajenez, katajenez, metajenez, olarak adlandırılan aşamalardan geçer. Bu aşamalarda çökellerin ve bu çökeller içindeki organik madenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde önemli değişiklikler olur. Örneğin kara kökenli büyük bitki kalıntıları (hümik organik madde) önce bakterilerin etkisiyle yüzeyde turbaya daha sonra gömülerek, yer sıcaklığının etkisiyle ve sırasıyla linyit, alt bitümlü kömür, taş kömürü ve antrasite dönüşür (Şekil 2.26). Cansız organik maddenin turbaya dönüşmesine turbalaşma denir. Turbanın sırasıyla linyit, alt bitümlü kömür, taş kömürü ve antrasite dönüşmesine ise

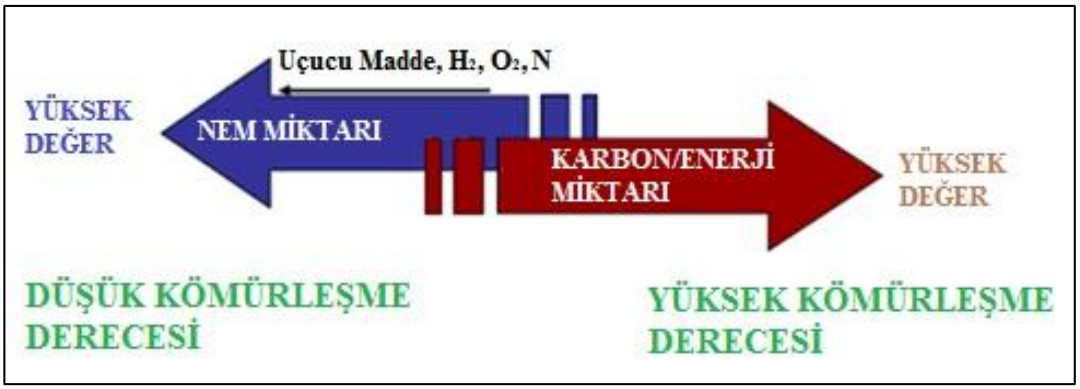
kömürleşme veya kömür metamorfizması, eometamorfizma, organik metamorfizma, termal alterasyon gibi değişik isimler verilmektedir. Linyit, alt bitümlü kömür, taş kömürü ve antrasit sözcükleri organik maddenin kömürleşme derecesini (rank) ifade etmektedir. Linyit düşük ranklı, buna karşın antrasit yüksek ranklı bir kömürdür. Ayrıca linyit ve alt bitümlü kömür diyajenez, taş kömürü katajenez, antrasit ise metajenez aşamalarını temsil eder (Ünalan, 2010).



Şekil 2.26 Hümik organik maddenin gömülmesiyle oluşan kömürleşme (Ulaval, 2015; Ünalan, 2010)

Kömürleşmenin paralelinde organik maddeden, uçucu madde olarak adlandırılan CO_2, CH_4, H_2O, N_2 gibi gazlar ve sıvı hidrokarbonlar türer. Bu ürünlerin türemesinden dolayı organik madde miktarı azalırken mineral madde oranında artış meydana gelir. Organik maddenin yeraltında kömürleşmesine neden olan ya da neden olduğu öne sürülen etkenler şunlardır; litostatik basınç (jeostatik basınç), tektonik basınç, jeolojik zaman, yer sıcaklığı (Ünalan, 2010).

Şekil 2.27'da şematize edilmiş kömürleşme süreci sonucu olarak, nem yüzdesi azalır, uçucu madde miktarı azalır, element bileşimi değişir (karbon oranı artar, hidrojen ve oksijen oranları azalır), kalorifik gücü (ısıl gücü) artar, vitrinitin yansıtma derecesi (ışık yansıtma derecesi) artar (Ünalan, 2010).



Şekil 2.27 Kömürleşme derecesi artarken uçucu madde miktarı azalır (Bowen, Irwin, ve Canchi, 2007)

2.4.2 Kömürün Derecesi ve Sınıflandırılması

Kömürleşme derecesi farklılıkları, kömürü oluşturan bitkilerin türü, biyokimyasal olarak bozunma dereceleri, metamorfik aşama, sıcaklık ve basıncın miktarı, etkime süresi ve jeolojik yapının özelliği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Kömürleşme derecesi, Amerikan standartlarına göre (ASTM) kömür içindeki uçucu madde miktarı ve yanma sırasında açığa çıkan ısı miktarına bağlı olarak belirlenir (Tablo 2.4). En düşük sınıfta yer alan linyitler ve alt bitümlü kömürler, kalorifik değerleri en az olan kömürlerdir. Bitümlü (taş kömürü) kömürler metalurjik veya koklaşabilir kömürlerdir. Bitümlü kömürlerde derece artarken uçucu madde azalır (Şekil 2.27). Yani yüksek uçuculu kömürler en düşük, düşük uçuculu kömürler de en yüksek derece ve reflektans değerlerine sahiptir (Koç, 2006).

Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) tarafından genel bir sınıflama yapılmıştır. Tablo 2.5'de gösterilen bu sınıflamada; ısıl değer, uçucu madde içeriği, sabit karbon miktarı, koklaşma ve kekleşme özellikleri temel alınarak sert ve kahverengi kömürler olarak iki farklı sınıfa ayrılmıştır. Sert kömürler; ıslak ve külsüz bazda 5700 Kcal/kg'ın üzerinde ısıl değerdedir. Uçucu madde içeriği, ısıl değer ve koklaşma özelliklerine göre alt sınıflara ayrılır. Kahverengi kömürler; ıslak ve külsüz bazda 5700 Kcal/kg'ın altında ısıl değere sahiptir. Toplam nem içeriği ve ısıl değere göre alt sınıflara ayrılır. Tablo 2.6 ve 2.7'de ISO Kömür Sınıflandırılması ve kömür özellikleri gösterilmiştir (Koç, 2006).

Tablo 2.4 Kömürlerin ASTM sınıflandırması (kuru külsüz baz) (Devlet Planlama Teşkilatı [DPT], 2001)

ANA SINIFLAR	ALT SINIFLAR	Sabit Karbon Sınırları (%)		Uçucu Madde Sınırları (%)		Isı Değeri (Kcal/Kg)	
SINIF	ALT GRUP	> =	<	>	< =	> =	<
ANTRASİT	1. Meta-antrasit	98			2	7780	
	2. Antrasit	92	98	2		7780	
	3. Semi-antrasit	86	92	8	14	7780	
BİTÜMLÜ KÖMÜRLER	1. Düşük uçuculu	78	86	14	22	7780	
	2. Orta uçuculu	69	78	22	31	7780	
	3. Yük. uçucu-A		69	31		7780	
	4. Yük. uçucu-B		69	31		7220	7780
	5. Yük. uçucu-C		69	31		5835	7220
ALT BİTÜMLÜ KÖMÜRLER	1. Alt bitümlü A		69	31		5835	6390
	2. Alt bitümlü B		69	31		5275	5835
	3. Alt bitümlü C		69	31		4610	5275
LİNYİT	1. Linyit A		69	31		3500	4610
	2. Linyit B		69	31			3500

Tablo 2.5 Uluslararası Genel Kömür Sınıflandırılması (Koç, 2006)

A. SERT KÖMÜRLER	B. KAHVERENGİ KÖMÜRLER
KOKLAŞABİLİR KÖMÜRLER Yüksek fırında kok üretimine uygun kalitede **KOKLAŞMAYAN KÖMÜRLER** Bitümlü Kömürler Antrasit	**ALT BİTÜMLÜ KÖMÜRLER** 4165-5700 Kcal/kg arasında ısıl değerde olup topaklaşma özelliği göstermez **LİNYİT** 4165 Kcal/kg değerin altında ısıl değerde olup topaklaşma özelliği göstermez

Tablo 2.6 Çeşitli kömürleşme derecelerinde kömür özellikleri (Koç, 2006)

Rank (kömürleşme derecesi)	Uçucu madde içeriği % kütle (ıslak-külsüz)	Karbon içeriği % kütle (ıslak-külsüz)	Isıl değer Kcal-kg (külsüz)	Nem içeriği % kütle
1. LİNYİT	44-69	62-76	3500-4600	30-52
2. ALT BİTÜMLÜ	40-52	71-80	4600-6300	12-30
3. BİTÜMLÜ				
a) Yük. uçucu-C	29-50	76-86	5800-7000	2-15
b) Yük. uçucu-B				
c) Yük. uçucu-A	31-49	78-88	7000	1-5
d) Orta uçucu	22-31	86-91	7000	1-5
e) Düşük uçucu	14-22	86-91	7000	1-5
4. ANTRASİT	2-14		7000	1-5

Tablo 2.7 Genel sınıflandırmada yer alan kömürlerin tanıtıcı özellikleri (Koç, 2006)

LİNYİT	ALT BİTÜMLÜ KÖMÜRLER	BİTÜMLÜ KÖMÜRLER	ANTRASİT
Kahverengi	Siyah	Koyu siyah	Parlak siyah
Kırılgan, çabuk toza haline ufalanma	Oksidasyonla veya kurutma sonucunda ince parçalar ve toz haline ufalanma	Bloksu kırılma	Merceksi kırılma
Masif, odunsu veya uniform kilsi doku	Masif	Bantlı ve kompakt	Sert ve dayanıklı
Isıl değeri; 4600 Kcal/kg'ın altında	Isıl değeri; 4600-6300 Kcal/kg arasında	Isıl değeri; 5300-7700 Kcal/kg arasında	Isıl değeri; 7000 Kcal/kg'ın üzerinde
Uçucu madde miktarı ve nem içeriği yüksek	Uçucu madde ve nem içerikleri bitümlü kömürlerden daha yüksek	Uçucu madde miktarı ve nem içeriği düşük	Uçucu madde ve nem içerikleri düşük
Düşük sabit karbon içeriği	Sabit karbon içeriği bitümlü kömürlerden düşük	Sabit karbon içeriği yüksek	Sabit karbon içeriği yüksek

2.4.3 Kömürün Petrografik Özellikleri

Kömürün karmaşık moleküler yapısının iskeletini karbon oluşturur. Karbonlara doğrudan veya dolaylı olarak oksijen, hidrojen, kükürt ve azot atomları bağlanır. Temel elementlerden karbon, hidrojen ve oksijenin kömürleşme derecesine göre değişimi Tablo 2.8'de verilmiştir. Kömürleşme derecesi arttıkça karbon yüzdesi artar, oksijen yüzdesi ve hidrojen karbon oranı azalır.

Tablo 2.8 Farklı yakıtların C, H, O miktarları (Koç, 2006)

% Kuru Temel	C	H	O	H/C (Aromatik)
Odun	50	6,3	42,7	1,5
Turba	57	5,2	36,8	1,1
Linyit	65	4,0	30,0	0,7
Altbitümlü kömür	79	5,5	14,0	0,8
Bitümlü kömür	88	5,3	5,0	0,7
Antrasit	94	2,9	1,9	0,4

Kömür karbon, hidrojen ve farklı oranlarda element içeren, kristallenmeyen ve tam olarak çözünmeyen katı bir hidrokarbondur. Yapısında inorganik ve organik bileşenler bir arada bulunmaktadır. Şekil 2.28'de kömürün temel içeriği şemalandırılmıştır. Kömürün kompleks organik yapısı polimerik özelliktedir ve makromoleküllerden oluşmuştur. Aromatik yığınların oluşturduğu makromoleküller, yapılarında molekülleri ve bunları çapraz bağlarla birbirine bağlayan eterik, metilenik ve sülfür gruplarını bulundurur (Koç, 2006).



Şekil 2.28 Kömürün temel içerikleri (Bowen ve diğer., 2007)

Kömürün elementel yapısı, kimyasal analiz yapılarak elde edilir. Tablo 2.9' da, farklı kömürleşme derecelerindeki kömürlere ait analiz sonuçları verilmiştir. Kömürde iki tane ana element bulunmaktadır. Bu elementler karbon ve hidrojendir. Bu iki elementin dışında, oksijen, azot, kükürt gibi heteroatomlar ve kömürün mineral madde içeriğinde bulunan metaller bulunmaktadır (Sönmez, 2006).

Tablo 2.9 Farklı kömürleşme dereceleli kömürlere ait kimyasal analiz sonuçları (Sönmez, 2006)

	Element % ağırlık (kuru külsüz baz)				
ÖRNEK	C	H	O	N	S
Meta-antrasit	97,9	0,2	1,7	0,2	-
Antrasit	92,8	2,7	2,9	1,0	0,6
Semi-antrasit	90,5	3,9	3,4	1,5	0,7
Düşük uçuculu	90,8	4,6	3,3	0,7	0,6
Orta uçuculu	89,1	5,0	3,6	1,7	0,6
Yük. uçucu-A	84,9	5,6	6,9	1,6	1,0
Yük. uçucu-B	81,9	5,1	10,5	1,9	0,6
Yük. uçucu-C	77,3	4,9	14,3	1,2	2,3
Alt bitümlü A	78,5	5,3	13,9	1,5	0,8
Alt bitümlü B	72,3	4,7	21,0	1,7	0,3
Alt bitümlü C	70,6	4,8	23,3	0,7	0,6
Linyit A	70,6	4,7	23,4	0,7	0,6

2.4.3.1 Kömürün Organik Bileşenleri

Kömürün organik bileşenleri makroskobik bileşenler (gözle görülebilen) ve mikroskobik bileşenler (mikroskop altında görülebilen) olarak iki gruba ayrılır (Ünalan, 2010).

2.4.3.1.1 Makroskobik Bileşenler. Doğada en çok bulunan otokton (hümik) kömürler gözle ayırt edilebilecek şekilde bir kısmı parlak, bir kısmı parlak veya mat, katmanlanmaya paralel konumlanan bantlardan diğer adıyla litotiplerden oluşur. Litotipler hümik kömürlerin makroskobik bileşenleridir. 4 çeşit litotip, vitren, klaren, düren, füzen olarak adlandırılmıştır (Ünalan, 2010).

2.4.3.1.2 Mikroskobik Bileşenler. Mikroskopta görülebilen küçüklükteki kömürleşmiş organik madde parçalarına maseral denilmektedir. İnorganik kayaları

oluşturan minerallerin karşılığı kömürü oluşturan maserallerdir. Maseraller, çeşitli bitkilerin değişik kesimlerinin kömürleşmiş şekli olduğu için her birinin görüntüsü, rengi, H/C, O/C oranları, yoğunlukları, flüoresans özellikleri ve ışığı yansıtma özellikleri farklıdır (Ünalan, 2010).

Maserallerin sınıflandırmasındaki üç temel parametre görünüş, kimyasal bileşen ve optik özelliklerdir. Bileşenlerin kökeni kömürün oluştuğu bitki kalıntılarının özel yapısına bakılarak bulunabilir. Üç maseral grup vardır, bunlar vitrinit, eksinit (liptinit) ve inertinittir. Bunlar daha sonra alt başlıklara ayrılabilir. Vitrinit türü maseraller odunsal dokuların humuslaşması ile elde edilir ve atık hücre yapılarına sahip olabilir. Vitrinit diğer maserallerden daha fazla oksijen içerir. Eksinit türü maseraller bitki reçinelerinden, sporlardan, kutikulalardan ve alg atıklarından oluşur. Eksinit türü maseraller diğer maserallerden daha fazla hidrojen barındırır. İnertinit türü maseraller çoğunlukla odunsal dokulardan, bitkisel parçalanmalardan veya mantarsal atıklardan oluşur (Yüksel, 2010).

Kömür içindeki maseral gruplarının miktarı ve oranı farklı kömür damarlarında hatta aynı damarlarda alttan üste değişebilir. Maseral gruplarının yoğunlukları da birbirinden farklıdır. Liptinit en hafif olan gruptur sırasıyla vitrinit ve inertinit izler. Bir inertinit maserali olan füzinit, karbon bakımından en zengin olan maseraldir ve yoğunluğu >1,5 g/cm³'tür. Üç maseral grubunun öğütülebilirlikleri de farklıdır. Füzinit en kolay öğütülebilen maseraldir. Liptinit ise en zor öğütülen maseraldir. Vitrinit bakımından zengin kömürler parlak siyah renkli ve konkoidal kırılmalıdır. İnertinit yoğunluk olarak mat siyah renkli, kolay ufalanabilir ve tozlu kömürlerdir. Üç maseral grubunun H/C ve O/C oranları Tablo 2.10'da verilmiştir (Ünalan, 2010).

Tablo 2.10 Maseral grupların atomik H/C ve O/C oranları (Ünalan, 2010)

MASERAL GRUP	**H/C**	**O/C**
Vitrinit	0,4-0,9	0,10-0,33
Liptinit (Rezinit)	1,33-1,55	0,03-0,11
İnertinit (Füzinit)	0,5	~0,13

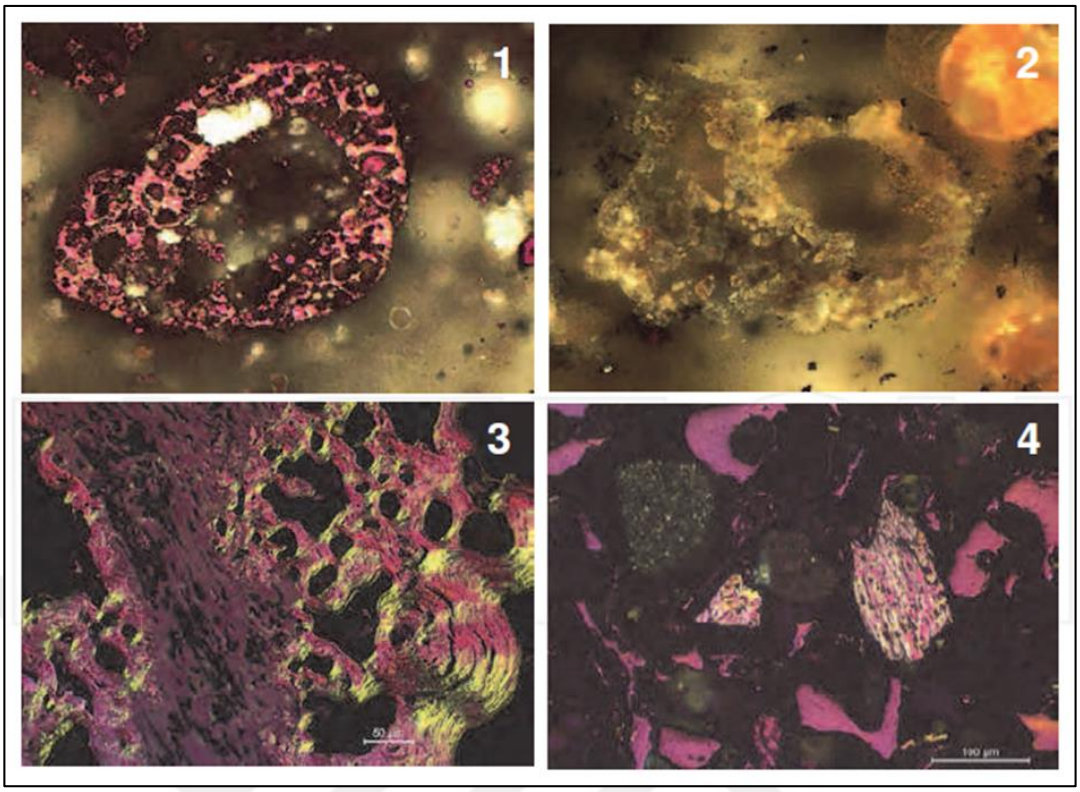
2.4.3.2 Kömürün Mineral Bileşenleri

Kömürün mineral madde miktarı kömürün kalitesini belirlemektedir. Mineral madde miktarı yüksek olan kömürler düşük kaliteli olarak nitelendirilir. Değişik kömürler için 120 çeşit mineral saptanmıştır. Periyodik tabloda bulunan 92 elementten 76'sı kömür içerisinde bulunabilmektedir. Bir kısmı iz element şeklindedir ve miktarları tonda gram (ppm) olarak ifade edilir (Ünalan, 2010).

2.4.3.3 Kömür Petrografisinin Kömür Kullanımında İncelenmesi

Katı yakıt kaynağı olan kömürün fiziko-kimyasal özellikleri üç bağımsız parametre olan kömür tipi (organik kompozisyon), kalite (mineral madde içeriği) ve rankı (kömürleşme derecesi) ile ilintilidir. Kömür kalitesi bu faktörlerin bir fonksiyonudur. Teknolojik kömür kullanımlarında bu fonksiyonların tayini önemlidir. Örneğin kömürün yanması esnasında kömürün ısıl değeri ve yanma karakteristiklerini etkilemesi sebebiyle kömürün rankı belirleyicidir. Farklı maseral gurplarının yanması farklı sıcaklıklarda ve hızlarda olması sebebiyle, maseral kompozisyonuda yanma özellekleri için belirleyicidir. İnorganik içerik de kömürün temel ısınma hızını etkilediğinden belirleyici parametrelerde yer alır. Kömür özellikleri olan kalorifik değer, öğütülebilirlik, tutuşma, kül gibi parametrelerde yanma için önemli unsurlardır. Kömür yanmasındaki önemli bir sorun da uçucu kül oluşmasıdır (Şekil 2.29). Uçucu küllerin özellikleri yanma koşullarına, kömürün organik kompozisyonuna ve mineral madde içeriğine bağlıdır. Organik petroloji kullanılarak, kül özelliklerini ve kompozisyonunu kontrol sayesinde uçucu küller yeniden kullanılabilir (Suarez-Ruiz, 2012).

Diğer bir örnekte gazlaştırma prosesinde; kömürleşme derecesi hidrojen/oksijen oranını, gazlaştırıcı performansını ve çar morfolojisini etkiler. Çar morfolojisi ilk olarak maseral ve mikrolitotip kompozisyonu ile belirlenebilir. Çünkü bu özellikler oksijence zengin ya da fakir ortamlarda artan sıcaklıklara maruz kalarak çeşitlenmiştir (Suarez-Ruiz, 2012).



Şekil 2.29 Optik mikroskop görüntüsü, 1,2) Pülvarize taş kömürünün yanması esnasında uçucu küller; soldaki görüntü yanmamış karbon, sağdaki görüntü inorganik partiküller, 3) Metalurjik kok, 4) Taş kömürü gazlaştırması artığı (Suarez-Ruiz, 2012)

2.4.4 Kömür Kullanımında Teknolojik Testler

Endüstriyel kullanım için kömürün özellikleri çeşitli analizler ve testler ile belirlenmelidir. Kömür özelliklerini belirlemek için klasik ve rutin olarak uygulanan kimyasal analizler şunlardır; kısa analiz (nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içerikleri), element analizi (C, H, N, S ve O içerikleri) ve ısıl değer (kalorifik güç). Bu analizler ISO ve ASTM standartları ile sabitlenmiştir. Diğer kömür kalite parametrelerinin belirlendiği çeşitli özel tahliller ise şunlardır (Suarez-Ruiz, 2012); Hardgrove Öğütülebilirlik Testi (HGI), kömürün ince toz haline kolay öğütülebilirliğini gösterir (Suarez-Ruiz, 2012). Kazanlara beslenecek olan kömürün öğütülüp pülvarize hale gelerek yakıldığı için öğütülebilirlik özelliğinin bilinmesi önemlidir. 50 gram ağırlığında belirli bir boyuta indirilmiş olan kömür, Hardgrove öğütücüsü ile belli bir süre öğütülür, öğütülen kömür 75 mikronluk elekten geçirilerek miktarı ölçülür. Ölçülen miktar Hardgrove öğütülebilirlik indeksine

(HGI) dönüştürülür. HGI değerleri 20-120 arasında değişmektedir. HGI değeri 50'den yüksek olan kömürler göreceli olarak yumuşak ve kolay öğütülebilen kömürlerdir. HGI değeri50'den düşük olanlar ise sert ve öğütülmesi zor olan kömürlerdir (Ünalan, 2010).

Kül Ergime Sıcaklığı (AFT) testi, yüksek sıcaklıklarda kömür külü artıklarının davranışını gösterir (Suarez-Ruiz, 2012). Kazanlarda yanma sıcaklığına ve kömürün mineral içeriğine bağlı olarak kül ergir. Soğuma ile beraber sert camsı bir cürufa (slag) dönüşür. Cürüf istenmeyen bir madde olması sebebiyle kömürün kül ergime sıcaklığı bilinmelidir (Ünalan, 2010). Serbest Şişme Testi (FSI, CSN), serbest şişme testi kömürün küçük potada, havasız ortamda, ısıtıldığı zaman artan hacmin ölçülmesidir (Suarez-Ruiz, 2012). Kömürün koklaşmaya uygun olup olmadığının ölçüldüğü testte serbest şişme indeksi (FSI) 0'dan 9'a kadar değişmektedir. FSI değeri düşük olan kömürler (3 ten düşük) az koklaşan veya koklaşmaya uygun olmayan kömürlerdir. Değeri 3-6 arası olan kömürler orta derece koklaşır. 7'den büyük olanlar koklaşmaya çok uygun kömürlerdir (Ünalan, 2010). Roga Testi, kömürün kekleşme özellikleri hakkında bilgi sağlar (Suarez-Ruiz, 2012).

Gray-King (G) testi, kömürün koklaşma özelliğinin belirlenmesinde kullanılır. Koklaştırılmış belli özelliklerdeki numune önceden hazırlanmış standart örneklerle karşılaştırılır ve Gray-King indeksi bulunur. A, B, C, D, E, F, G harfleri ile ifade edilir. A, B, C tipi koklarda kömür taneleri birbirine fazla yapışmamıştır ve koklaşma söz konusu değildir. D, E, F tipi koklarda kömür parçaları kaynamış ama hacim küçülmüştür. G tipinde ise serttir ve taneleri kaynamıştır (Ünalan, 2010). Fischer Testi, ısıtma yoluyla herhangi bir katı yakıttan elde edilebilecek katran + sıvı + gaz gibi ürünlerin yüzdelerini bulmaya yarayan testtir (Ünalan, 2010).

Ayrıca Gieseler plastometresi ve Audibert-Arnu dilatomer testleri kömürün özel koşullardaki davranışı hakkında bilgi verir. Gieseler plastometresi kömürün akışkanlığını Audibert-Arnu dilatometresi büzülme ve genleşmeyi ölçer (Suarez-Ruiz, 2012).

BÖLÜM ÜÇ
GAZLAŞTIRMA PROSESLERİ

Kömür gazlaştırma prosesi yer üstü ve yer altı kömür gazlaştırması (YKG) olarak iki ana grupta sınıflandırılır (Ekim, 2011; Ünalan, 2010). Ticari olarak yaygın uygulanan yer üstü gazlaştırma teknolojisinde sentez gaz ürünü, kömürden gazlaştırma reaktörleri (gazlaştırıcılar) kullanılarak üretilir. Bu proseste kömür klasik madencilik ile bulunduğu kömür yatağından çıkartılır, zenginleştirme ve boyut küçültme gibi ön işlemlerden geçirilir ve gazlaştırma tesislerinde gazlaştırılır. Bu teknolojide gazlaştırıcılar ve yan tesisler yapılması gerektiğinden yatırım tutarı yeraltında gazlaştırmaya göre daha yüksektir. İkinci yöntem olan yer altı gazlaştırma yönteminde ise kömür, bulunduğu yatakta, üretim yapılıp yer üstüne çıkarılmadan gazlaştırılır (Ekim, 2011). Kömürün yer altında gazlaştırılması yöntemi, "temiz kömür teknolojileri" kapsamında yer almaktadır (Ünalan, 2010). Yer altındaki jeolojik yapı, gazlaşma reaksiyonları için gazlaştırıcı reaktör gibi kullanılmaktadır.

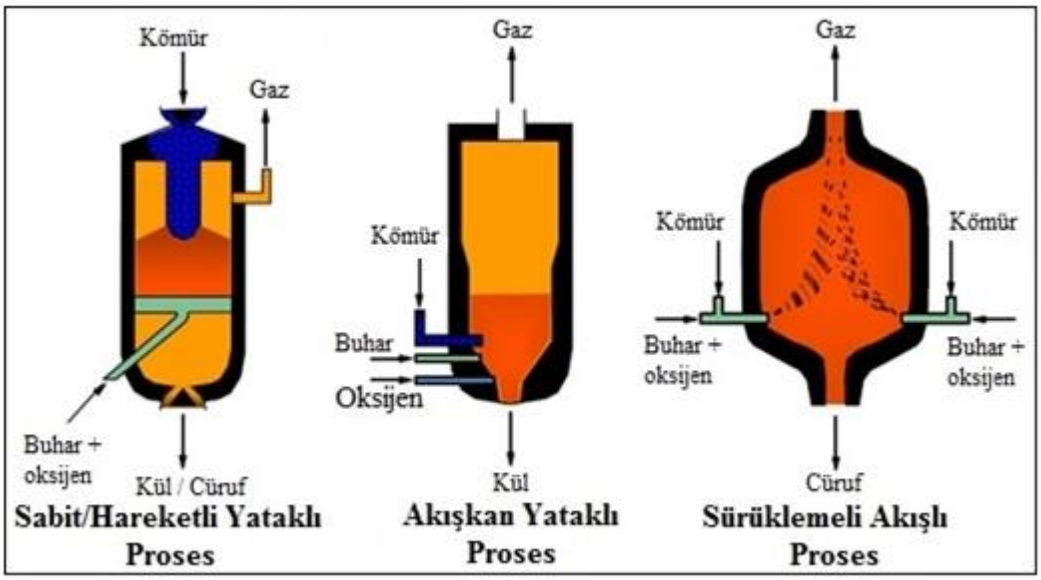
3.1 Yer Üstü Kömür Gazlaştırma Prosesleri

Gazlaştırma işlemini gerçekleştirmek için çok farklı tipte gazlaştırıcı reaktörler ticari olarak üretilmiştir ve karakteristik özellikleri ile birbirinden ayrılır. Gazlaştırıcılar şu şekillerde sınıflandırılabilirler (Gafur, 2006; İzgi, 2011);

- Gazlaştırıcıda kullanılan reaktan ajana göre göre; hava, oksijen, buhar, hidrojen gazı ve bunların birbirleriyle belirli oranlarda karışımı kullanılan gazlaştırıcılar.
- Isı kaynağına göre; oto-termal ve allo-termal gazlaştırıcılar.
- Gazlaştırma basıncına göre; atmosferik ve basınçlı gazlaştırıcılar.
- Tane boyu büyüklüğüne göre; çok ince, orta ve iri tane boyutlu.
- Gaz ürün kullanım alanına göre; sentez gaz, sentetik doğal gaz, hidrojen kaynağı ve gaz yakıtı, düşük, orta ısıl değerli ve güç santrali için).
- Gelişmişlik düzeyin göre; araştırma aşamasındaki proses, pilot ölçekteki proses, küçük ölçekteki proses, ticari ölçekteki proses ve gelişim aşamasındaki proses.

- Gazlaştırma sistemi akış geometrisine ve yatak tipine göre; sabit yatak, akışkan yatak, sürüklemeli akışlı ve eriyik yatak.

Farklı amaçlar için yaygın olarak kullanılan ve genel kabul gören gazlaştırıcı reaktörleri genel olarak üç ana sınıfa ayrılır. Bunlar (Şekil 3.1); sabit/hareketli yataklı gazlaştırıcılar (*fixed/moving bed gasifiers*), akışkan yataklı gazlaştırıcılar (*fluidizied bed gasifiers*) ve sürüklemeli akışlı (*entrained flow gasifiers*) gazlaştırıcılardır (Bell ve diğer, 2011; Higman ve Burgt, 2008; Lau, 2014; Miller, 2005; Rezaiyan ve Cheremisinoff, 2005; Wagner, 2008; Yılmazoğlu, 2012).



Şekil 3.1 Gazlaştırma reaktörü tipleri (Lau, 2014)

Yer üstü gazlaştırma prosesleri içerisinde, yaygın olmamakla beraber, günümüzde uygulama ve geliştirme çalışmaları devam eden diğer prosesler şunlardır; güneş ve nükleer enerjili gazlaştırma prosesi (Ateşok,2009; Gafur, 2006), plazma, eriyik yataklı, katalitik gazlaştırma prosesleri (Lau, 2014 ve 2015a). Güneş enerjisi ile gazlaştırma prosesi hibrit güneş/katı yakıt endotermik prosesidir ve katı yakıt kimyasal hidrojen üretim kaynağıdır, toplanan güneş enerjisi ise proses sıcaklığı için kullanılan enerji kaynağıdır (Trommer, 2006).

Yer üstü gazlaştırma tesislerinde gazlaştırıcı reaktörler dışındaki yardımcı sistemler de önemlidir. Besleme sistemleri, ısı geri kazanımı, ince tanecik geri kazanımı, siklonlar, sentez gazın saflaştırılması ve temizlenmesi, atık suyun arıtılması ve su ihtiyacının giderilmesi (besleme ya da soğutma için) gibi yardımcı tesisler gazlaştırıcılar ile beraber tasarlanır (Lau, 2014).

3.1.1 Gazlaştırıcılar

Gazlaştırıcı tipleri işletme parametrelerine göre farklılık gösterir. Kömür tipi ve özellikleri, besleme tipi ve boyutu, işletme sıcaklıkları, basınçları, istenen ürün çeşitleri, ürün gazın kompozisyonu ve sıcaklığı, reaktan ajan gereksinimi (oksijen, buhar), kapasite gibi parametreler gazlaştırıcı tipi seçimi kararında etkilidir (Trommer, 2006; Yılmazoğlu, 2012).

Her tip gazlaştırıcı için uygulamalarda gaz kalitesi, kararlılık, verim ve basınç kaybı gibi dikkat edilmesi zorunlu olan konuların değişkenliği yakıt özellikleri ile alakalıdır. Bunların en önemlileri; enerji içeriği, nem içeriği, uçucu madde miktarı, mineral madde içeriği-kül ergime eğilimi, kül kimyasal kompozisyonu ve reaktifliği, yakıtın reaktifliği, besleme boyut dağılımı, besleme yığın yoğunluğu, yakıtın çar eğilimidir (Luque ve Speight, 2014).

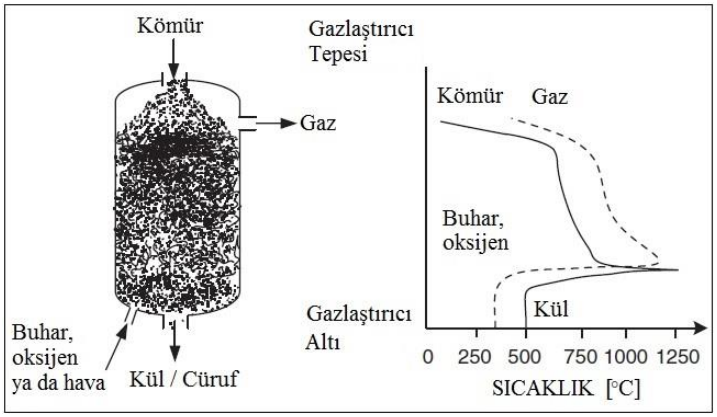
3.1.1.1 Sabit/Hareketli Yataklı Gazlaştırıcı

Hareketli-sabit yataklı gazlaştırıcısında kömür, gazlaştırıcıya tepeden yüklenmektedir ve yerçekiminin etkisi ile gazlaşarak aşağı doğru iner. Buhar ve oksijen ise aşağıdan yukarıya doğru verilerek gazlaştırma işlemi sağlanır (Higman ve Burgt, 2008; Yılmazoğlu, 2012). Oksijen tüketimi azdır buna karşın, piroliz ürünleri (hidrokarbon, tar ve su) elde edilen sentez gazın içinde bulunur. Şekil 2.8'de zıt akışlı–sabit yataklı bir gazlaştırıcı içerisinde katı yakıtın yaşadığı dönüşüm gösterilmiştir. Ürün sentez gazı için temizleme sistemi gereklidir. Yakıt beslemesi yukarıdan yapılırken aşağı inen kül dönen bir ızgara üzerinden gazlaştırıcı tabanından uzaklaştırılır. Tipik çıkış gaz sıcaklığı hareketli-sabit yataklı

gazlaştırıcılar için 425 ve 650 ºC arasındadır (Higman ve Burgt, 2008). Sentez gazının reaktörden bu çıkış sıcaklığı düşüktür ve geniş boyut dağılımlı (5-50 mm) kömür parçaları ile çalışmaya elverişlidir (Lau, 2014; Wagner, 2008; Yılmazoğlu, 2012).

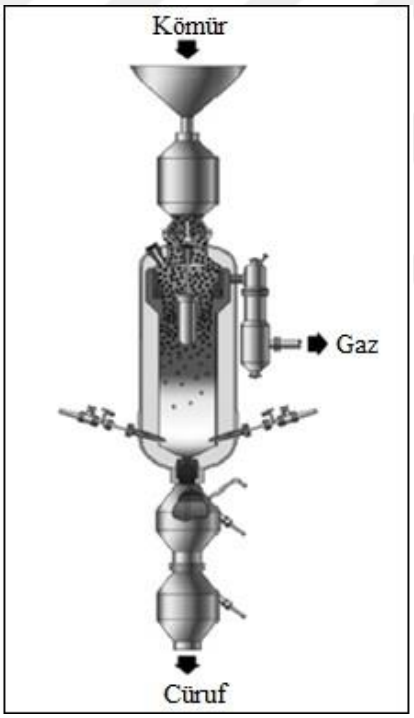
Gaz oldukça düşük hızla yukarı doğru yükselmektedir. Çok düşük hızla bile bir miktar uçucu kül ve kömür parçacıkları gazla birlikte sürüklenmektedirler. Sabit yatak gazlaştırma sistemlerinde kömür, kok, reaktif gazlar ve ürünlerin akışı, zıt akım ilkesine göre gerçekleştiği için ısı transferi çok iyi gerçekleşmektedir. Örneğin, çıkan kül gelen gazları ve çıkan ürünler de gelen kömürü ısıtmaktadır. Ayrıca, yatağa doğru hareket eden kömür parçacıklarının burada sürelerinin uzun oluşu, yüksek karbon dönüşüm verimlerine neden olmaktadır. Isı ile şişmeyen veya çok az şişen turba, linyit, antrasit ve koklar bu yöntemle gazlaştırılabilir (Koç, 2006).

Malzeme kalış süresi (alıkonma) sabit yataklı gazlaştırıcıda 60 dakikayı bulmaktadır bu sayede iri karbon partiküllerinin de tam karbon dönüşümü tamamlanmış olur. Buhar varlığında, düşük sıcaklıkta yüksek soğuk gaz verimi elde edilir. Yüksek termal verimlilik sayesinde diğerlerine nazaran daha düşük miktarda oksitleyici ajan kullanılır (Wagner, 2008; Zhu, ve Frey, 2010). Şekil 3.2'de sabit yataklı gazlaştırıcı ve reaktör bölgelerine denk sıcaklık profili gösterilmiştir (Higman ve Burgt, 2008).



Şekil 3.2 Sabit yataklı gazlaştırıcı prosesi ve sıcaklıkları, kuru küllü gazlaştırıcı (Higman ve Burgt, 2008)

Atmosferik basınçta gerçekleşen antrasit ya da kok gazlaştırma işleminde kullanılan hareketli-sabit yakıtlı gazlaştırıcıdan düşük ve orta ısıl değerli gaz ürün elde edilir. Su gazı üretimi süreksiz bir prosestir ve reaktör kesikli çalıştırılır. Buhar kızdırılmış, kor halde olan kokun üzerine verilerek H_2 ve CO oluşumu sağlanır. Öncelikle kok yatağı 1300 ºC'ye kadar ısıtılır ve hava akışı kesilerek buhar önce aşağıdan yukarıya doğru, sonra yukarıdan aşağıya doğru reaktörün içinden geçirilerek sentez gazı üretimi sağlanır. Su gazı reaksiyonu endotermik bir reaksiyon olup buharın iki yönlü hareketi ile ortam ısının optimum kullanılması sağlanır. Yatak sıcaklığı 900 ºC'ye düştüğü zaman buhar akışı durdurulur ve çevrim tekrarlanır. Gaz temizleme işleminden sonra elde edilen sentez gazı amonyak ve metanol üretiminde kullanılabilir (Higman ve Burgt, 2008).



Şekil 3.3 British Gaz Lurgi gazlaştırıcısı (Bell ve diğer., 2011)

Ticari boyutta, orijinali Lurgi gazlaştırıcısından geliştirilen, yaygın kullanılan iki tip sabit yataklı gazlaştırıcılar şunlardır (Breault, 2010; Higman ve Burgt, 2008); Sasol-Lurgi Kuru Küllü gazlaştırıcı, British Gas Lurgi (BGL) cüruflu gazlaştırıcı (Şekil 3.3). Yanma reaksiyon aşamaları sıcaklık bölgesi, kuru küllü gazlaştırıcı ortamında (1000 ºC civarı), cüruflu gazlaştırıcıya göre (2000 ºC civarı) daha

düşüktür. Bu sebeple kuru küllü sistem (Sasol-Lurgi), reaktifliği yüksek besleme için daha uygundur, örneğin linyit kömürleri gibi.

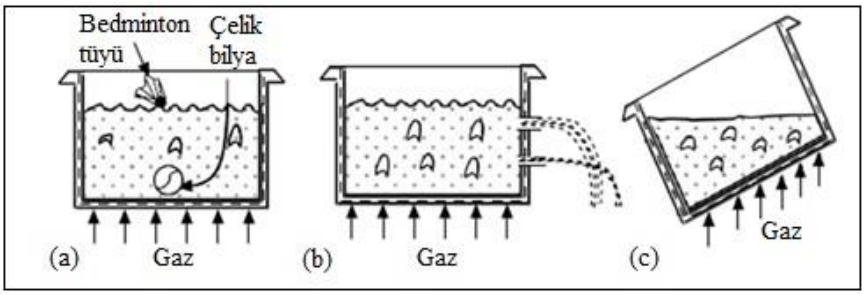
Sabit-hareketli yataklı gazlaştırıcıların temel karakteristik özellikleri şunlardır (Miller, 2005; Simbeck, Korens, Biasca, Vejtasa, ve Dickenson, 1993);

- Düşük miktarda oksitleyici ajan ihtiyacı.
- Kekleşmiş kömür uzaklaştırmanın ihtiyaç duyulan tasarımda yapılması.
- Isıl güç içeren hidrokarbon sıvıların yüksek termal-soğuk gaz verimi ile çalışması.
- İnce taneli besleme için sınırlı çalışma koşulları.
- Diğer tip gazlaştırıcılara kıyasla yüksek metan üretimi.
- Tar, yağ gibi hidrokarbon sıvısı üretimi.
- Kekleşen kömürün uzaklaştırılması için özel aparat ihtiyacı.

3.1.1.2 Akışkan Yataklı Gazlaştırıcı

Akışkan bir yatakta, yer çekimi ile çekilen akışkanlaştırılmış parçacıklar, yukarı doğru akış ile hareket eden gazın sürtünme kuvveti ile dengelenirler. Bu partiküller askıda kalmış olurlar. Akışkan yatağın sıvı ile benzer özelliklerini gösteren durumu Şekil 3.4'te verilmiştir ve açıklaması şu şekildedir (Basu, 2006);

1. Herhangi bir yükseklikte statik basınç, bu seviyenin üzerinde, her enine-kesit birim yatak alanındaki katıların ağırlığına eşittir.
2. Kütle yoğunluğu yatağın yoğunluğundan fazla ise batacak, hafif ise yüzecektir. Örneğin yatak yüzeyinde bedminton tüyü yüzerken, çelik bilya gömülür (Şekil 3.4a).
3. Yataktaki katılar bir kaptaki sıvı gibi alttaki ya da yandaki deliklerden drene edilebilir (Şekil 3.4b). Katı maddelerin akış akımı bir kaptan su fışkırmasına benzer.
4. Yatak yüzeyi, yatay seviyesi ortam fiziki olarak eğilse bile seviyesini korur. Ayrıca yataklanma kabın şeklini alır (Şekil 3.4c).
5. Parçacıklar çok iyi karışır ve ısıtıldığı zaman sıcaklık homojen olarak yayılır.

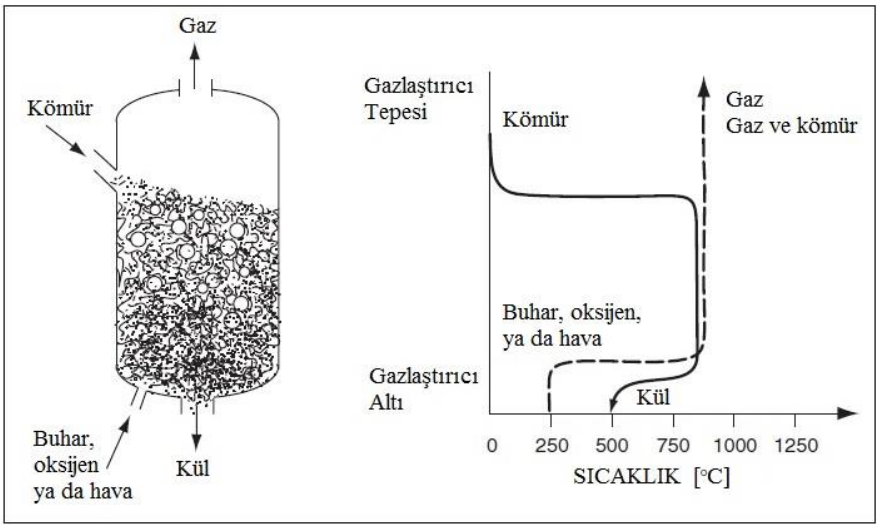


Şekil 3.4 Akışkan yatak davranışlarının sıvı ile açıklanması (Basu, 2006)

Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda akışkan yatağın özelliğinden dolayı kömür ve oksijen arasında iyi bir karışım elde edilir (Şekil 3.5). Bu karışımın sonucunda ısı ve kütle transferi artar. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar düşük kaliteli linyit ve biyokütlenin gazlaştırılması için daha uygundur. Buhar ve hava reaktan ajan olarak kullanılır ve akışkanlaşma ortamı sağlamak için iki koldan yatağa beslenir. Kül ise vidalı taşıma sistemi ile uzaklaştırılır. Yatak malzemesinin boyut ve tip seçimi kullanılacak yakıt tipine göre değişir. Düşük kül içerikli yakıtlarda kum, yüksek sülfür içerikli kömürlerde kireçtaşı ve yüksek kül içerikli kömürlerde ise kömürün külü yatak malzemesi olarak kullanılabilir (Yılmazoğlu, 2012).

Akışkan yataklı gazlaştırıcıdaki siklon tasarımı sayesinde ham sentez gazındaki çar ve kül içerikli partiküller geri sisteme, reaksiyon bölgesine döndürülür (Higman ve Burgt, 2008; Zhu, ve Frey, 2010). Akışkan yataklı sistem tasarımında kül ergime sıcaklığı yatak sıcaklığını belirler, yatak malzemesinin kekleşerek akışkanlaşmayı bozmaması için kül ergime sıcaklığının altında çalıştırılmalıdır. Tipik çalışma sıcaklığı genellikle 900 ve 1050 ºC arasında, külünün ergime sıcaklığı altındadır (Higman ve Burgt, 2008; Zhu, ve Frey, 2010; Yılmazoğlu, 2012).

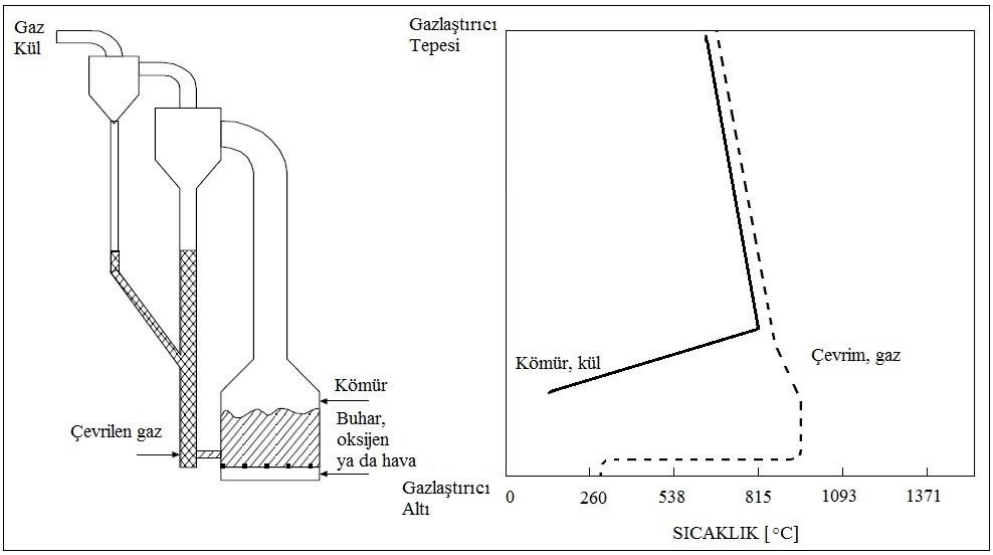
Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda öğütülmüş kömür kullanılmaktadır. Kömür yukarı doğru çıkan gazlar içinde akışkan yatakta yüksek bir verimle tepkimeye girmektedir. Gazla sürüklenen uçucu kül ve kömür parçacıklarının miktarı, sabit yataktakilere oranla daha yüksektir (Koç, 2006).



Şekil 3.5 Akışkan yataklı gazlaştırıcı prosesi ve sıcaklıkları (Higman ve Burgt, 2008)

Akışkan yatakta gazlaştırma, aslında kum ya da kül gibi yanıcı olmayan bir ortamda meydana geldiğinden yatağa verilen kömürün çok küllü olması gazlaştırmayı olumsuz etkilemez. Böylece, yüksek kül ve rutubet içeren, ısıl gücü 1200 Kcal/kg değerine kadar düşen düşük kaliteli kömürler de bu sistemde gazlaştırılabilmektedir. Isıtıldığında az ya da orta miktarda şişme özelliği gösteren küçük tanecikli (1-8 mm) kömürler bu yöntemle gazlaştırılabilir (Koç, 2006).

Transport tipi gazlaştırıcı (Şekil 3.6) akışkan yataklı gazlaştırıcı tipi sayılır (Higman ve Burgt, 2008). Hibrit gazlaştırıcı olarak isimlendirenler var ise de (Breault, 2010; Lau, 2015a) kendisine benzer olan kabarcıklı akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı hidrodinamiklerinden daha karmaşıktır. Bu tip gazlaştırıcıda gaz ve kömür aynı yerden beslenir ve yüksek hızlı gaz, katıları yukarıya doğru taşır. Cüruf çıkışı olmayan gazlaştırıcı, kullanımı ve yanması zor olan düşük dereceli kömür beslemesine uygundur. KBR (*Kellogg Brown & Root*) markasının petrol endüstrisinde kullandığı katalitik kırılma teknolojisinin geliştirilmesiyle oluşturulmuş KBR Transport gazlaştırıcısının gaz-katı teması, türbülans ortamı çok iyi gerçekleşir ve çok düşük kütle transfer direnci mevcuttur (Breault, 2010).



Şekil 3.6 Akışkan yataklı transport tipi gazlaştırıcı prosesi ve sıcaklıkları (Breault, 2010)

Akışkan yataklı gazlaştırıcılar gaz-katı temas farklılıklarına göre şu iki tipe ayrılırlar (Basu, 2006);

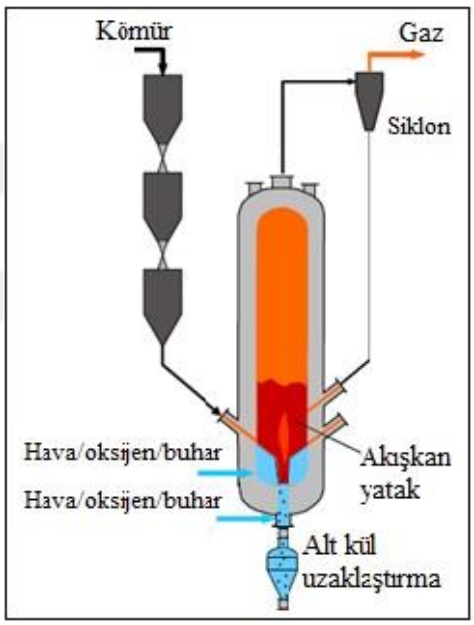
1. Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcı (*BFBG*)
2. Dolaşımlı akışkan yataklı gazlaştırıcı (*CFBG*)

Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcılar, iyi bir sıcaklık kontrolü, yüksek dönüşüm oranı, iyi bir ayrışma potansiyeli, katalitik işlemlerin mümkün olması, hammadde miktarı, nem içeriği ve partikül boyutlandırılması parametrelerine toleranslı gazlaştırıcılardır. Kabarcıklı akışkan yataklarda gaz hızı, yatak içindeki katı parçacıkların yükselmesi için yeterli hızda olmalıdır. Böylece yatak genişler ve köpüren bir sıvı izlenimini bırakır. Gaz hızı türbülanslı bir şekilde gazlaştırıcı içinde artarken katı maddelerden oluşan yatak büyümeye devam eder ve sonunda gitgide artan miktarda malzemenin dışarı taşma oranı artar (Deveci, 2007). Bu tip gazlaştırıcılarda, hava ile birlikte akışkan yatağı oluşturan katı parçacıklar yatak sıcaklığını dengede tutar, bu sayede kül ergime sıcaklığı altındaki sıcaklık seviyesi korunmuş olur (İzgi, 2011).

Dolaşımlı akışkan yataklı gazlaştırıcılarda ise yatak materyali, gazlaştırma kanalıyla bir siklon arasında sirküle edilir (Şekil 3.7). Böylece yatak materyali ile birlikte sürüklenen gazlar siklondan geçerken külden ve partiküllerden arınarak

gazlaştırıcıdan çıkar. Kül siklonun alt tarafındaki ızgarada ayrılırken, yakıt partikülleri yatak materyali ile birlikte gazlaştırma kanalına geri döner (İzgi, 2011).

Ticari boyutta, yaygın kullanılan akışkan yataklı gazlaştırıcı şunlardır (Breault, 2010; Lau, 2014; Higman ve Burgt, 2008); HT Winkler, U-Gas (Şekil 3.7), Kellogg Rust Westinghouse (KRW). Ayrıca akışkan yataklı gazlaştırıcılar sınıfında sayılan ancak kendine has dinamikleri olan KBR-Transport gazlaştırıcısı, yeni geliştirilen gazlaştırıcılardandır ve IGCC (560 MWe IGCC, 2 × 1, Mississippi Power Company, A.B.D.) santrallerinde kullanılmaktadır (Breault, 2010).



Şekil 3.7 U-Gas gazlaştırıcısı (Breault, 2010)

Akışkan yataklı gazlaştırıcıların temel karakteristik özellikleri şunlardır (Miller, 2005; Simbeck ve diğer, 1993);

- Kabul edilebilir geniş besleme katı materyalleri (katı atık, yüksek küllü kömür).
- Tek biçimli (*uniform*) sıcaklık.
- İhtiyaca göre oksijen ve buhar ajan oranlarının ayarlanabilmesi.
- Geniş kapsamlı çar geri dönüşümü.
- Orta derecede oksitleyici ajan gereksinimleri.
- Daha az zift ve yağ üretimi.

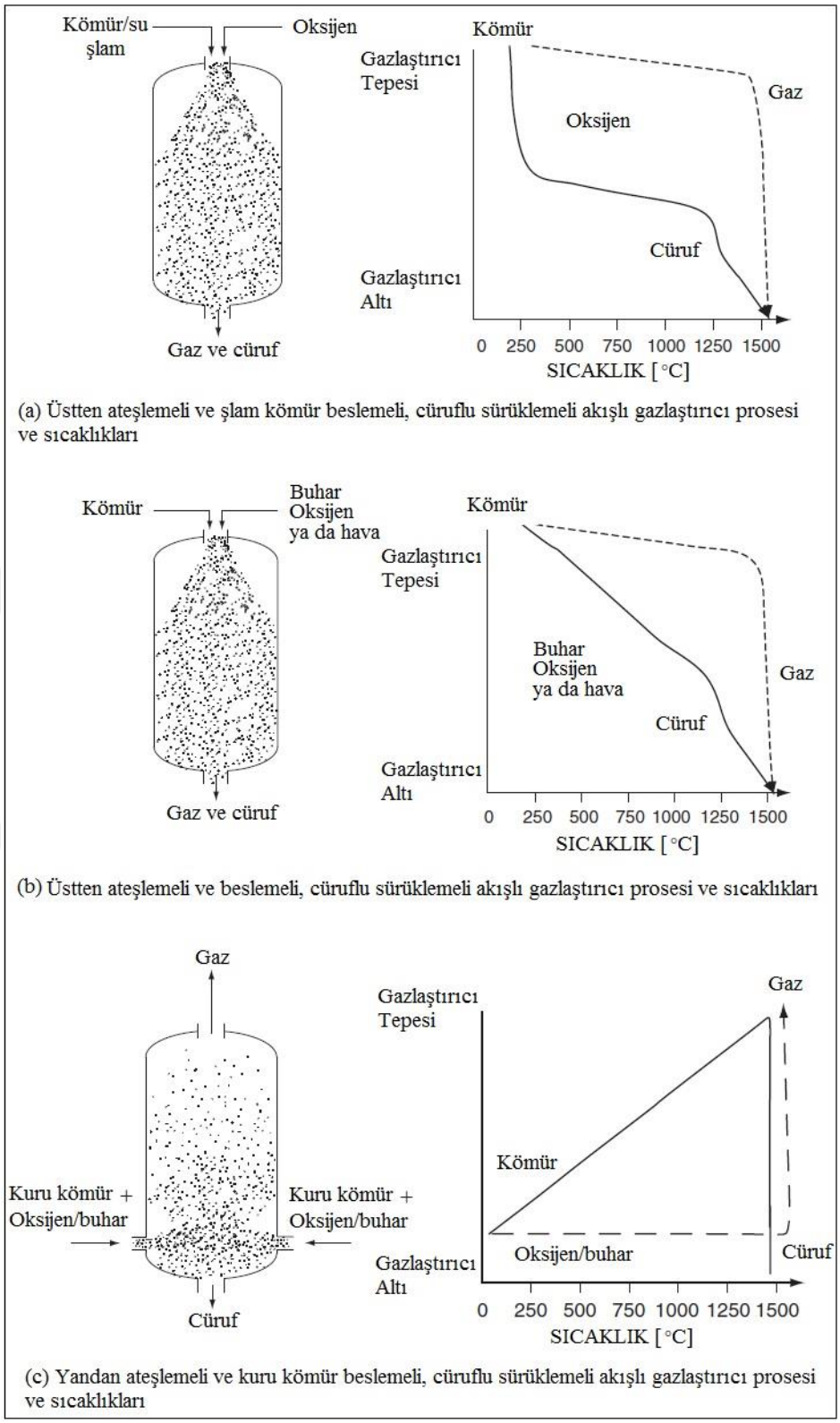
3.1.1.3 Sürüklemeli Akışlı Gazlaştırıcı

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılara kömür ve oksijen aynı yönlü olarak beslenir. Kömür taneciklerinin ortalama boyutu 100 μm veya daha azdır ve bu taneciklerin reaktör içinde kalma süreleri de birkaç saniyedir. Bu tip gazlaştırıcıların en büyük avantajı yakıt esnekliği olması ve sıcaklığın yüksek olması ile katran oluşumunun olmamasıdır (Yılmazoğlu, 2012). Şekil 3.8'de farklı tip sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar ve sıcaklık profilleri gösterilmiştir.

Bu tip gazlaştırıcılarda çok ince öğütülmüş (0-100μm) kömür, su buharı ve O_2 ile karışmış biçimde gazlaşma odasına püskürtülür. Burada katının hızı gaza göre çok daha çabuk azaldığı için gaz ile katı tanecikler arasında büyük bir bağıl hız farkı oluşur. Katının gaza dönüşme hızı artar. Bu yöntemde kömürün ve gazın reaktör içinde kalış süresi bir saniye kadar olduğundan diğer yöntemlere göre daha küçük gazlaşma odası yeterlidir. Bu yöntemde 1300 ºC'nin üzerindeki sıcaklıklarda gazlaştırma yapılabilmektedir. Bu yöntem her cins kömür ve kokun gazlaştırılmasında kullanılabilir (Koç, 2006).

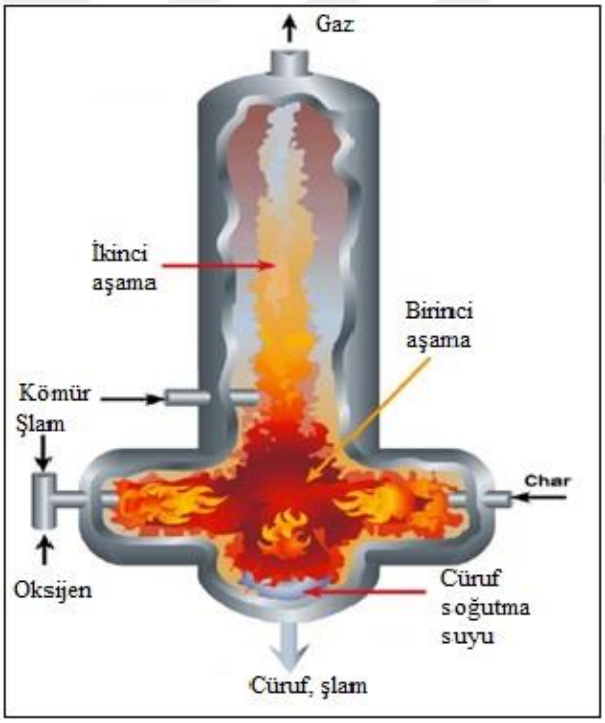
Sürüklemeli akışlı tip gazlaştırıcı içinde daha küçük boyutlu yakıt kullanılması nedeni ile işletme giderlerinde yakıtın öğütülmesi de önemli yer tutar. Sürüklenmeli akışlı gazlaştırıcılar günümüzde özellikle entegre gazlaştırma kombine çevrim santrallerinde kullanılmaktadır. Gazlaştırıcı basıncının 20-70 bar arasında değiştiği bu sistemlerde reaktör sıcaklığı 1400 ºC'nin üzerindedir (Yılmazoğlu, 2012).

Ticari boyutta, yaygın kullanılan temel akışkan yataklı gazlaştırıcılar şunlardır (Breault, 2010; Lau, 2014; Higman ve Burgt, 2008); General Electric (eski Texaco) gazlaştırıcısı, Conoco-Philips E-Gas gazlaştırıcıları, Koppers-Totzek, Shell, Prenflo, Mutsubishi Heavy Industry (MHI), Aerojet Rocketdyne, Siemens, ECUST, GSP.



Şekil 3.8 Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı prosesleri ve sıcaklıkları (Higman ve Burgt, 2008)

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar şlam beslemeli ya da kuru beslemeli olarak çalıştırılabilirler. Şlam beslemeli tipleri, kuru olanlara göre daha yüksek basınç ortamına sahiptir çünkü kuru besleme için kullanılan kapaklı besleme bunkeri şlam besleme için kullanılan şlam pompasına nazaran düşük basınçlı kalır. Basınçlı şlam besleme sayesinde yüksek kapasiteli sentez gazı üretimi mümkün olur. Ancak şlam içindeki su, buharlaşma için ısıya ihtiyacını çalışma sıcaklığından kullanır buda soğuk gaz verimini proses sınır seviyesine getirebilir (Zhu, ve Frey, 2010). Şlam beslemeli sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar şunlardır; GE (eski Texaco), Conoco-Philips E-Gas (Şekil 3.9). Kuru tip beslemeli sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılardan Shell, şlama beslemeye göre daha yüksek çalışma sıcaklığı ve yüksek karbon çevrim verimi mevcuttur. Ancak kuru besleme teknolojisi basınç limitleri sebebiyle düşük çalışma basıncına sahiptir (Higman ve Burgt, 2008; Zhu, ve Frey, 2010).



Şekil 3.9 Conoco Philips E-Gas gazlaştırıcısı (Breault, 2010)

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcıların temel karakteristik özellikleri şunlardır (Miller, 2005; Simbeck ve diğer., 1993);

- Düşük ısıl değerli ve yüksek küllü, kekleşen kömürler gibi kullanılamayan kömürlerin kullanılması. İhtiyaca göre düşük küllü kömürlerin kullanılması.

- Tek biçimli (uniform) sıcaklık.
- Gazlaştırıcıda çok kısa yakıt duruş süresi.
- Çok ince ve homojen katı yakıt gerekliliği.
- Diğerlerine oranla yüksek reaktan ajan ihtiyacı.
- Ham ürün gaz sıcaklık hassasiyeti için geniş seçenek.
- Yüksek sıcaklıklı cüruflaştırma işlemleri.
- Ham gazda cüruf sürüklenmesi (yüksek karbon çevirimi).
- İnce taneli, kekleşme özelliği gösteren kömürlerin, kömür derecesine bakılmaksızın verimli gazlaştırma yeteneği.

3.1.1.4 Gazlaştırıcı Proseslerin Özelliklerinin Karşılaştırılması

Gazlaştırıcıların çalışmasını etkileyen; reaktörlerin dinamikleri, sıcaklık, basınç, beslenen kömür ve istenen ürün gibi parametreler, her uygulama sahasında kullanılan gazlaştırıcı markaların proses optimizasyonunda kendi dengelerini yaratmaktadır. Bu sebeplerden kendine özel olan her uygulamada küçük farklılıklar mevcuttur. Ticari gazlaştırıcı uygulamalardaki bu sebepten dolayı kendine has olan parametrelerin çeşitlilikler ufakta olsa göze çarpmaktadır. Tablo 3. 1'deki verilerde üç farklı gazlaştırıcı tipi için, en çok karşılaşılan, genel karakterleri referansları ile birlikte gösterilmiştir.

Sabit-hareketli yataklı gazlaştırıcı parametrelerinde 5-50 mm, gibi büyük tane boyut değerleri görülür. İri taneciklerin istenmesinin sebebi büyük alanda hareket eden kömür parçacıkları, aşağı doğru hareket ederken gaz yukarı doğru hareket eder bu esnada gaz en kolay yolu ve iri parçacıkları tercih eder. Eğer tanecikler ince olur ve bir tarafta toplanırsa gaz diğer taraftan çıkar. Bu durumda karbon dönüşümü verimsiz kalır. Akışkan yataklı gazlaştırıcı da ise daha ince tanecikleri gaz etrafında toplayabilir ve iri tanecikler ile gaz hareketlerini akışkan yatakta kontrol altına alabilirsiniz. Sürüklemeli akışlı reaktörde gaz çok yüksek hızda hareket eder. Tane büyüklükleri genellikle 100 μm ila 200 μm arasındadır. Bu sayede hızlı hareket eden gazın içerilere taşınması sağlanır, reaksiyon süresi kısalır, eğer iri parçacıklar olsaydı gaz hareket etmezdi bu sebeple bu tür gazlaştırıcıların beslemesinde ince taneciklerin

kullanılması gereklidir. Sıcaklık profillerindeki farklar ise yakıtın cinsine göre etkilenirler. Kömürün ergime ısının altında çalışılması gereken akışkan yataklı reaktörde sıcaklık yükselir ise kekleşmeden dolayı yapışkan parçacıklar oluşur. Akışkan ortamda karşımı sağlayan kabarcıklar yetersiz kaldığında yerel sıcaklık artışları da aynı etkiyi yapar ve yapışkan malzeme prosesi sekteye uğratır (Lau, 2015b).

Tablo 3.1 Gazlaştırıcı proseslerinin kategorize edilmiş karakteristik özellikleri

Gazlaştırıcı Parametreleri	**Sabit-Hareketli Yatak**	**Akışkan Yatak**	**Sürüklemeli Akışlı Yatak**
Gazlaştıcı örnekleri	Lurgi, British Gas Lurgi	HT Winkler, KRW, U-Gas	GE, C-Philips E-Gas, Shell, Prenflo, MHI, Rocketdyne, Siemens, ECUST
Sıcaklık (ºC)	1000-1500	900 - 1100	1400 +
Basınç (atm)	1 - 10	10 - 30	30 - 80
Besleme boyutu (mm)	5 - 50	< 10	< 0,2
Alıkonma süresi	1 - 2 sa	30 - 60 dk	1 - 10 sn
Besleme nemi	Kuru 2 % Şlam 10 %	< 55%	Kuru / Şlam geniş aralık
Besleme esnekliği	Çok ince malzeme ile uyumsuz	Reaktif ve düşük kül ergime sıcaklığı olan, yüksek küllü kömür kullanılabilmesi	Geniş besleme tipi imkanı
Beslenen malzemeler	Linyit, reaktif bitümlü kömür, antrasit, petkok, atık	Linyit, reaktif bitümlü kömür, antrasit,kok, biokütle,atık	Linyit, reaktif bitümlü kömür, antrasit,petkok
Oksitleyici / oksitleyici miktarı	Hava ya da oksijen/düşük	Hava ya da oksijen/orta	Hava ya da oksijen/yüksek
Karbon dönüşüm verimi	99 %	97 %	> 98 %
Kül Atımı	Cüruflu ya da cürufsuz	Cürufsuz	Cüruflu
O_2/kömür	0,14 - 0,81	0,25 - 0,97	0,28 - 1,17
Buhar/kömür	0,28 - 3,09	0,11 - 1,93	0,10 - 1,20

3.1.2 Proses Koşullarının Optimizasyonu

Kuru kömür beslemeli sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı 1500 ºC sıcaklıkta çalışmakta ve oksijen tüketimi oldukça yüksek olmaktadır, ancak yine de gazlaştırıcı ajan eklemesine ihtiyaç vardır. Buradaki zorluk, minimuma yakın miktarda gazlaştırıcı ajan kullanılması gereğidir, bu sayede her birim ürün gaz başına düşen pahalı oksijen miktarı azalır. Ayrıca kullanılan oksijen miktarı azaldıkça, daha çok buhar ihtiyacı doğar. Oksijen buhardan daha pahalı olduğu için bu durum kabul edilebilir. Ancak bu tür gazlaştırıcı için ilgili gazlaştırma reaksiyonlarına (reaksiyon 2.1, 2.5) baktığımızda bu durumun daha büyük bir avantajı olduğu görülür. Isı dengesi gazlaştırmanın büyük kısmının (2.1) reaksiyonu ile gerçekleşmesini gerektirir, ancak gazlaştırılabilen her karbon buharla (2.5) gazlaştırılmalıdır (Higman ve Burgt, 2008).

Proses koşullarını optimize etmek için, öncelikle heterojen durum için denklemler (Boudouard, su gazı ve hidrogazifikasyon reaksiyonları) çözülür. Bu sayede her mol sentez gaz için gereken minimum oksijen miktarı elde edilmiş olur. Daha sonra, gerçek değerlere yaklaşmak için, CO_2 içeriği bir miktar arttırılmış gaz ile hesaplamalar homojen duruma göre yapılır. Bu daha sonraki çalışmalar için "referans ayar noktası" olarak kabul edilir (Higman ve Burgt, 2008).

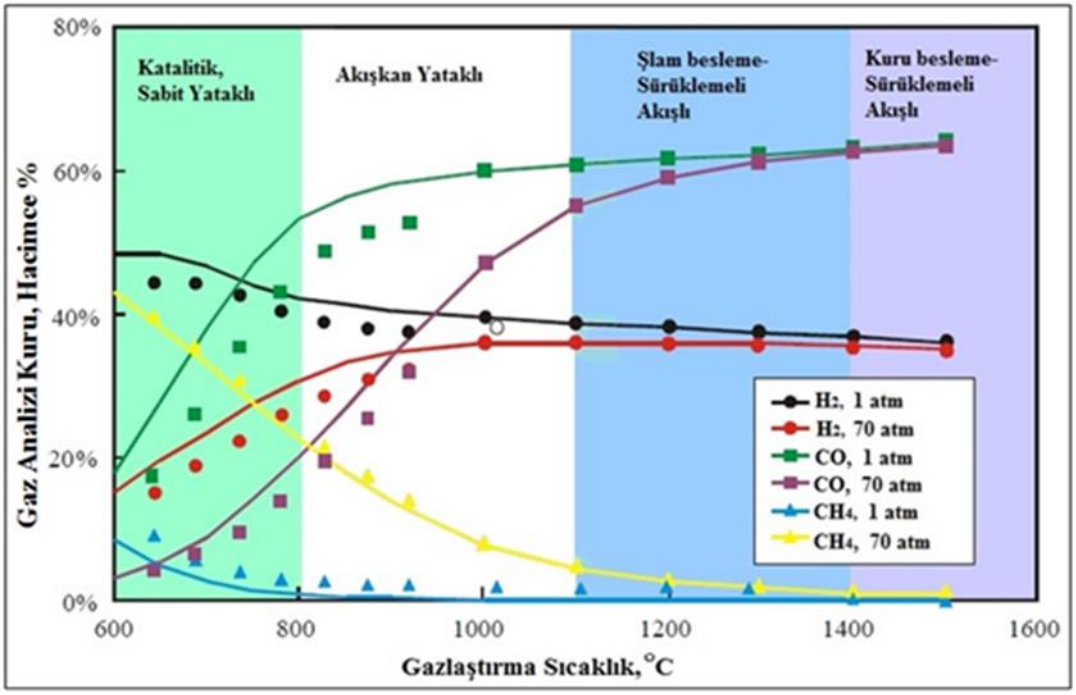
Bir kömür gazlaştırma süreci aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Koç, 2006);

1. Mümkün olduğu kadar çok katı yakıt için uygun olmalıdır. Süreç, bu katı yakıtların koklaşma özelliği, uçucu madde içeriği, aktivitesi, kül içeriği, kül yapısı, kekleşme ve çeşitli sıcaklıklarda mekanik dayanıklılığı gibi özelliklerden bağımsız olmalıdır.
2. Üretilen sentez gazı H_2 ve CO ağırlıklı olmalıdır, sentetik doğalgaz ise CH_4 ağırlıklı olmalıdır.
3. Kömürdeki yanabilen organik bileşiklerin tamamen gaza dönüşmesi istenir.
4. Süreçler, teknik olarak basit, güvenli, kullanımda esnek ve az bakım gerektirecek biçimde olmalıdır.

5. Üretilen gaz, üretimde kullanılan hammaddelere oranla, şimdi veya ileride rekabet edebilecek kalite ve fiyatta olmalıdır.

6. Çevreyi olumsuz biçimde etkileyecek maddeler oluşmamalıdır. Yan ürünler kullanılabilir özellikte olmalıdır.

Şekil 3.10 farklı tip gazlaştırıcıların dengede gaz bileşimi örnek verilerini içermektedir. Bu çalışmada % 95 karbon tüketimi, metanasyon ve su gazı yükseltme reaksiyonu tamamlanmış, buhar ile gazlaştırma yapılmıştır (Lau, 2015b). Örnek olarak gazlaştırma sürecindeki ve gaz akışındaki metanın konsantrasyonu verisinde görülen; yüksek basınç olduğu zaman, düşük basınca göre sistemde daha yüksek metan konsantrasyonu içermesidir. Aynı zamanda düşük sıcaklık profili olan gazlaştırıcılar da metan konsantrasyonunun daha yüksek olduğu görülür. Sonuç olarak metan üretimi arzu edildiğinde düşük sıcaklıkta ve yüksek basınçta çalışmak gerekir.



Şekil 3.10 Denge gaz bileşimi, sıcaklık ve basıncın etkisi (Lau, 2015b)

Veriler incelendiğinde yüksek sıcaklıklarda % 40 H_2 ve % 60 CO gaz kapasitesinin 1 atm basınçta ve 70 atm basınçta neredeyse birbirinin aynı olduğunu

görülür. % CO içeriği yüksek basınç ortamında, sıcaklığın düşmesi ile hızla düşer. 70 atm yüksek basınçta ve düşük sıcaklıkta (600 ºC) metan maksimum (% 44) değerine çıkarken CO miktarı çok azalmaktadır. 1 atm basınçta sıcaklık azalırken H_2 konsantrasyonu artar ancak 70 atm basınçta sıcaklık azalırken H_2 miktarı azalır, CH_4 miktarı artar. Dengedeki gaz bileşimleri gazlaştırıcıların mekaniklerine, sıcaklık ve basınçlarına bağlıdır (Lau, 2015b).

Kömür entegre gazlaştırma kombine çevrim santrallerin temel ekipmanı gazlaştırıcılardır. Gazlaştırıcıların tasarımında ise etken olan birçok parametre vardır. Genel olarak bu etkenler; basıncın etkisi, kömürün basınçlandırılması, kömür tane büyüklüğü, kömür kurutma, reaktör tasarımı, yakıcılar, sentez gazı soğutma ve arıtma işlemi, partikül giderme, sıcaklık kontrolü, ham sentez gazındaki eser bileşenlerin etkisi, oksidant seçimi ve malzemelerin korozyona karşı gösterdikleri direnç (Yılmazoğlu, 2012).

Denge oranı (ER), gazlaşmayı sağlayan oksitleyici içeriğindeki oksijen ile kömürün tam yanması için gerekli stokiyometrik oksijen içeriğine oranı olarak tanımlanır. Bu oran, gazlaşma reaksiyonlarını, tar oluşumunu, gaz ısıl değerini etkiler. Bu değer 1 veya 1 değerinden büyük olduğunda yanma gerçekleşmektedir. Gazlaştırıcı içerisindeki sıcaklıkla birlikte ER oranı, kalma zamanı, yakıtın enerji değeri, reaktör izolasyonu gibi etkiler ile birlikte gazlaşma özelliklerini etkilemektedirler. Gazlaşma esnasında yakıtın karbon dönüşümü sıcaklık ve ER oranı ile değişmektedir. Bu değerin 0,25-0,35 arasında olması, geniş kapasiteli ticari ölçekli gazlaştırma tesislerinde çar dönüşümünün en yüksek olduğu orandır. ER değerini düşük olması, karbon dönüşümünü de azaltmakta, yüksek tar oluşumuna neden olmaktadır. ER değerinin yükselmesi ise sentez gazının ısıl değerini düşürmektedir (Tarakçıoğlu, 2015).

Kömür gazlaştırıcılı kombine çevrim santrallerinde kullanılan gazlaştırıcı basıncı 20-40 bar arasında değişirken, amonyak, metanol üretimi gibi işlemler için 50-200 bar basınçta çalışan gazlaştırıcılar tasarlanmalıdır. Basıncın artması ile daha kompakt tasarımlar elde edilir ve ilk yatırım maliyeti azaltılabilir. Gazlaştırıcı basıncının

artması, gazlaştırıcı girdilerinin basınçlandırılması ile sağlanır. Bu ise oksijenin de yüksek basınçta reaktöre verilmesi anlamına gelir. Oksijeni basınçlandırmak için kompresörler kullanıldığında santral iç tüketimi artacaktır. Oksijeni sıvı olarak pompalamak içinse soğutma yapılması gerekir ki, bu yöntem de santral iç tükemini arttırır (Yılmazoğlu, 2012).

Gazlaştırma süreci için sıkça kullanılan bir kaç kriter vardır. En sık karşılaşılanlar, soğuk gaz verimliliği ve karbon dönüşümüdür. Soğuk gaz verimi kömür ısıl değerinin ürün gaza dönüşüm verimidir ve reaktör verimini ifade eder (Higman ve Burgt, 2008).

$$Soğuk\ Gaz\ Verimi\ (\%) = \frac{Ürün\ Gaz\ Isıl\ Değeri\ (MW)}{Hammadde\ Isıl\ Değeri\ (MW)} \times 100 \qquad (3.1)$$

Burada, ısıl değerlerin, alt ısıl değerlere mi, üst değerlere mi dayandırıldığının netleştirilmesi önemlidir.

$$\underset{Dönüşümü}{Karbon}\ (\%) = \left(1 - \frac{Gazlaştırma\ Kalıntısındaki\ Karbon\ Miktarı,\left[\frac{kmol}{h}\right]}{Yakıtta\ Bulunan\ Karbon\ Miktarı,\left[\frac{kmol}{h}\right]}\right) \times 100 \qquad (3.2)$$

Bu kriterlerin farklı gazlaştırma sistemlerinde sıkça kullanılmalarına karşın, iki yöntemin de sadece proses verimliliği ve gaz kalitesi ile ilgili sınırlı bilgi sunması dolayısıyla, çıkan sonuçların detaylı bir şekilde yorumlanması gerekmektedir. Yüksek metan içerikli gaz üreten (bu sayede yüksek soğuk gaz verimi yüksek olan) yüksek ısıl güç proses uygulamalarında uygun bir tercih olsa bile, sentez gaz uygulamaları için optimum tercih olmayabilir. Sentez gazı uygulamalarında H_2 + CO miktar değeri, proses tercihi için daha iyi bir yönlendirme sunar (Higman ve Burgt, 2008).

Kömür gazlaştırma işlemi ile üretim yapılırken maliyetlerin kabul edilebilir düzeylerde tutulması gereklidir. Gazlaştırıcı tesisi minimum duruş prensibiyle çalıştırılmadır. Yedek birimler kurulabilir fakat ek maliyetleri getirmektedir. Bu

amaçla gazlaştırıcılarda en çok sorun çıkaran enjektör, refraktör ve ısıl çiftler gibi elemanların kullanım süreleri uzatılmalıdır. Yüksek basınç ve sıcaklıklarda yaklaşık 2-6 ay arası ömrü olan enjektörlerin en az 12 ay çalışacak düzeye getirilmeleri gerekmektedir. Refraktör malzemeleri 3 seneyi aşkın bir süre dayanacak düzeyde olmalıdır. Arzu edilen karbon dönüşüm oranını yakalayabilmek için kimi zaman son derece sert koşullarda çalıştırılan gazlaştırıcılarda bu donanımlar yaklaşık 18 ayda bir yenilenmektedir ve her yenileme yaklaşık 3 hafta sürmektedir. Korozyon ve ısıl gerilme etkilerinden dolayı ısıl çiftler de yaklaşık 30-45 günde kullanılamaz hale gelmektedir. Bu sürenin en az 12 ay olması gerekmektedir (Kaya, 2009).

Gerektiğinde farklı karakterlerdeki kömürler beslenebilmeli ancak her yakıtın, en uygun gazlaştırma koşullarının bilinmesi gereklidir (Kaya, 2009). Ancak kömür değişimi sonucunda kül kompozisyonu da değişir, bu değişim aşağı akış yönlü prosesleri etkiler ve cürufun akışında değişiklere sebep olur. Cüruf hareketleri sistemde gaz-katı fazı, gazlaştırıcı duvar yapısı, akışkan dinamikleri ve operasyon şartları gibi özellikleri etkiler (Wang ve Massoudi, 2013).

Günümüz gaz temizleme teknolojileri, bir IGCC tesisin toplam maliyetinin % 12-15'ini oluşturmaktadır. Gelecekte çevresel düzenlemelere uygun temizleme yapabilen daha uygun bir maliyetle inşa edilebilecek ve de daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek sistemlere ihtiyaç vardır. Ayrıca kullanılan emicilerin de daha az enerji kullanımıyla yeniden yapılandırılabilmesi beklenmektedir (Kaya, 2009).

IGCC tesislerde kullanılan hava ayrıştırma birimlerinde, alışılageldik olarak kryojenik ayrıştırma (hava-oksijen ayrımı) yapılmaktadır. Bu yatırım, tesis maliyetinin yaklaşık % 12-15'ini oluşturmakla birlikte santralin ürettiği gücün de % 10'una yakınını tüketmektedir. Havayı ayrıştırmak için zar teknolojisinin kullanımı hem ilk yatırım maliyetini azaltacak hem de genel verimin artmasını sağlayacaktır. Ayrıca zar teknolojisi ile kurulacak bir ASU ünitesi daha basit ve küçük bir yapıya sahip olacaktır (Kaya, 2009).

3.2 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Prosesleri

Yer altı kömür gazlaştırma (YKG) prosesi, ekonomik ve jeolojik koşullar nedeniyle klasik madencilik yöntemleri ile çıkartılması zor olan ya da mümkün olmayan, kömür yataklarında yapılan bir gazlaştırma prosesidir. Yer altındaki kömür damarının hava, oksijence zenginleştirilmiş hava, oksijen, su buharı veya bunların beraber kullanılarak sentez gazına dönüştürülmesidir. Kömür yatağı bir kimyasal reaktör (gazlaştırıcı) gibi hareket ederek kömürün bulunduğu yerde gazlaştırılmasını sağlar (Bell ve diğer., 2011; Budak, 2014; Ekim, 2011; Lee ve diğer, 2007; Özer, 2011).

YKG prosesinde üretilebilir kaynak hesaplamalarına dahil edilmeyen dik damarlı, düşük dereceli, özellikle derin ve üretilemeyen kömür yataklarından yararlanarak enerji, kimyasal hammadde ve yakıt üretilebilir (Bhutto, Bazmi, ve Zahedi, 2013; Özer, 2011). Şekil 3.11'de Özbekistan ve Güney Afrika ülkelerindeki YKG tesisleri gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Özbekistan, Angren 100 MW YKG enerji tesisi (sol) (Sajjad ve Rasul, 2014) ve Güney Afrika, Mpumalanga Majuba (2x140) 280 MW YKG enerji tesisi (sağ) (Gross ve Van der Riet, 2011)

Yer altı kömür gazlaştırma prosesi klasik madencilik yöntemleri ile değerlendirilemeyen bitümlü, alt bitümlü ve linyit tipindeki kömür ve bitümlü şist rezervleri için kullanılan bir metottur (Budak, 2014; Özer, 2011). Bu proses antrasitten linyite hemen hemen bütün kömür çeşitlerine uygulanabilir ancak düşük dereceli, linyit kömürleri ve alt bitümlü kömürlerde daha iyi çalışmaktadır. Çünkü

ısınma esnasında uçucuların çıkışı ile artan büzülme sayesinde geçirgenlik artar ve kuyular arası bağlantı sağlanır. Uçucu madde ile kül içeriğindeki safsızlıkların katalizör etkisi prosesi olumlu etkiler (Burton ve diğer., 2007; Couch, 2009). Yüksek dereceli kömürler mikro boşluklar içerirken, düşük dereceli kömürler genellikle makro boşluklar içerir (Couch, 2009; Dzimba, 2011).

YKG prosesi, yer üstü gazlaştırma prosesine göre, gazlaştırıcı ünite kurulmaması dolayısıyla daha düşük ilk yatırım maliyeti, yüzeye kömür taşıma ve atık maliyeti olmaması, kömür nakliye maliyetlerinin olmaması ve su ihtiyacının yer altı kömür damarından karşılanabiliyor olması gibi birçok avantajlar içermektedir. Ayrıca herhangi bir yer altı madencilik faaliyeti yoktur, böylece yer altında insanın fiilen çalışması ve yüksek risklere maruz kalınması söz konusu değildir. Bunlara ek olarak geri kalan boşluklar yer altı karbondioksit depolanması için uygun olabilmektedir (Shafirovich ve Varma, 2009; Özer, 2011).

YKG sonucu elde edilen gazın içeriği yüzey gazlaştırması sonucu elde edilen sentez gazı içeriğine benzerdir. Kömürün bulunduğu yerde gazlaştırıldığı için gazlaştırıcı çıkışından elde edilen gaza göre daha düşük miktarda kükürt, civa ve kül içeriğine sahiptir. Bu sayede kükürt, azot oksit ve civa emisyonlarının kontrol altına alınabilmesi mümkün olmaktadır. Emisyonların azalmasına yardımcı olan bu proses, yakılması halinde yüksek kül ve kükürt içeriği dolayısıyla çevreye daha fazla zararlı olabilecek düşük dereceli kömürlerin yerinde değerlendirilip gazlaştırılması ile en az çevre zararı oluşturur. Gazlaştırma sonrası oluşan boşlukta CO_2'in depolanması "Karbon Yakalama ve Depolama" ile aynı metotları içermektedir (Budak, 2014; Özer, 2011).

3.2.1 Yer Altı Kömür Gazlaştırma Yöntemi Temel Prensipleri

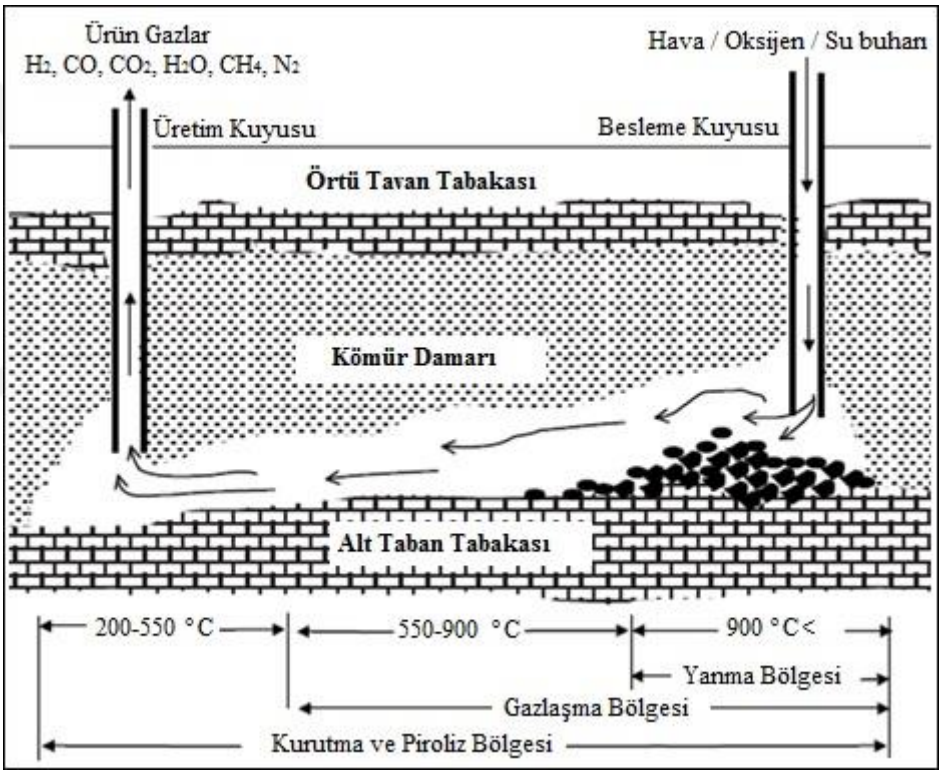
Yer altı gazlaştırma prosesinde en önemli işlem sondajlardır. Sondaj işlemindeki ilk adım besleme ve ürün kuyularının açılmasıdır. Besleme (enjeksiyon) kuyusundan hava, oksijen ya da buhar gibi gazlaştırıcı ajan verilir, ürün kuyusundan ise gazlaştırılan ürünler alınır (Bhutto ve diğer, 2013; Ökten ve Okutan, 1991). Gazın

yatak içerisinde kolayca ilerleyebilmesi için kuyular arasında bağlantı kurulmalıdır. Genel olarak iki adet sondaj tekniği uygulanmaktadır. Bu tekniklerden birincisi; bağlantılı düşey kuyular tekniği (ELW), ikincisi; kontrollü olarak hareket ettirilen ateşleme noktası (CRIP) tekniğidir (Budak, 2014; Couch, 2009; Özer, 2011). Kuyuların işlevi zaman zaman değiştirilebilir ve üretim kuyusu besleme, besleme kuyusu da üretim kuyusu olarak kullanılabilir (Özer, 2011). Hiçbir üretim uygulaması yapılmamış, el değmemiş kömür damarına yapılan bu uygulamalar dışında uzun ayak, kısa ayak, oda topuk, yöntemleriyle eskiden işletilmiş ve terk edilmiş yer altı kömür madenlerine de kanal gazlaştırma uygulanabilmektedir, bu uygulama "Yer Altı Yüzey Gazlaştırma" (*undersurface gasification*) olarak da isimlendirilmektedir (Couch, 2009).

Kömürün yaşına, bileşimine, jeolojik yapısına ve doğal geçirgenliğine bağlı olarak üretilen gazın yüzeye taşınması bazen yeterli olmaz. Kömür yatağının doğal geçirgenliği besleme havasının ve gaz ürünlerin geçişini sağlayacak yeterlilikte olmayabilir. Bunun için gazlaştırma işleminde en önemli ve en kritik adım besleme ve üretim kuyuları arasındaki kömür yatağının doğal geçirgenliğini arttırmaktır. Ayrıca, kömürün gazlaştırılması esnasında çıkan su buharı ve yüksek moleküllü tarlar soğuk bölgeye doğru ilerlediğinden burada yoğunlaşmaya başlayarak yatağın geçirgenliğini daha da azaltırlar. Bu nedenle yatağın geçirgenliği arttırmak için gazlaştırma prosesine başlamadan önce, iki kuyu arasında bağlantı kurulabilmesi için farklı yöntemlere başvurulmaktadır (Budak, 2014; Ökten ve Okutan, 1991; Özer, 2011). Kömür yatağının geçirgenliğini arttırmak kuyular arasındaki bağlantıyı sağlamak amacıyla kullanılan yöntemler şunlardır (Bhutto ve diğer, 2013; Budak, 2014); geri yakma (*reverse combustion*), ileri yakma (*forward combustion*), yönlendirilmiş sondaj (*directional drilling*), su ile parçalama (*hydrofracturing*), elektriksel bağlantı ile parçalama (*electrolinking*), patlayıcılarla suni yarıklar oluşturma (*explosive*). Bu yöntemlerin birbirine göre üstünlükleri ve sakıncaları bulunmaktadır (Özer, 2011).

Şekil 3.12'de yer altı kömür gazlaştırma prosesi şematik olarak gösterilmektedir. Besleme kuyusundan gerekli hava beslendikten sonra kömür yatağı propan tipi veya

başka tür yakıcılarla tutuşturulur. Oluşan sıcak gazlar, kömür tabakası içerisinde ileri doğru (üretim kuyusuna doğru) hareket eder. Kuruma, gazlaşma ve piroliz için gerekli ısı üretilir. Üretilen ısıyla yapıda bulunan su buharlaşır, kömür tabakası kurur ve daha gözenekli bir yapıya kavuşur. Kuruyan kömür sıcaklığın da etkisiyle piroliz aşaması sonucunda yapısındaki uçucu bileşenlerden ayrılarak, kuru ağırlığının yaklaşık % 40-50'sini kaybeder. Gazlaşma bölgesinde, kömür yatağındaki karbon ile havadaki oksijen arasında yanma-kısmi yanma reaksiyonları gerçekleşmektedir. Yanma sonucunda kömür yatağının sıcaklığı 900-1450 °C'ye kadar yükselmektedir (Budak, 2014).



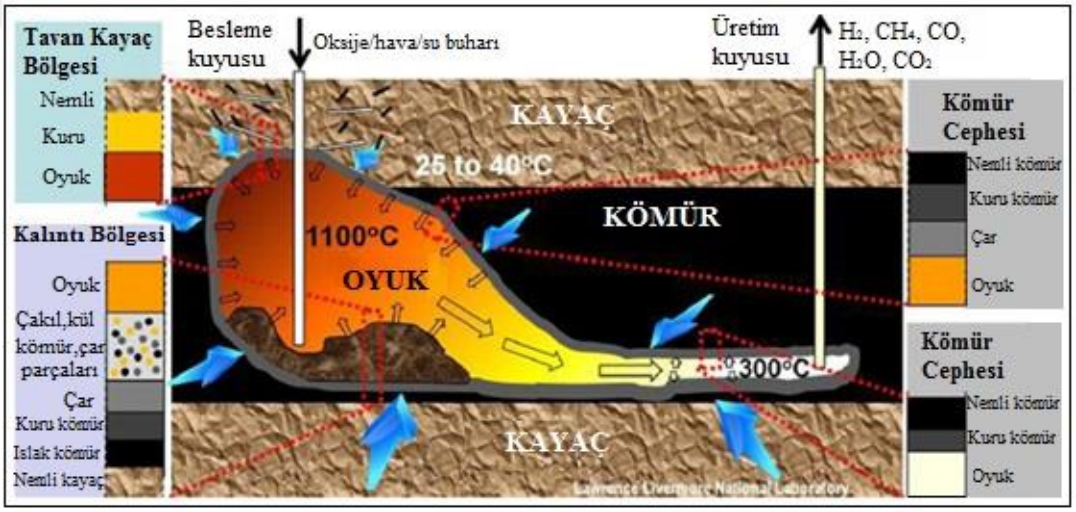
Şekil 3.12 Yer altı gazlaştırma prosesi şeması ve reaksiyon bölgeleri (Lee ve diğer., 2007)

Yanma sonucunda açığa çıkan H_2O ve CO_2 gazları yüksek sıcaklığın etkisiyle CO ve H_2 gazlarına indirgenmektedir. Uçucu bileşenlerinden ayrılmış gözenekli yapıya ulaşan kömür bir diğer adıyla çar, sisteme beslenen saf hava, oksijen veya su buharı ile reaksiyona sokularak; CO, CH_4, H_2, ve hidrokarbonca zengin yanabilir, sentez gazı üretilir (Ökten ve Okutan, 1991; Budak, 2014). İndirgenme bölgesinde

gerçekleşen endotermik reaksiyonlar sonucunda kömür yatağının sıcaklığı 600-1000 °C'ye kadar düşmektedir (Budak, 2014).

YKG işlemi sırasında kullanılan su buharı yer altı sularından elde edilebildiği gibi, kömür damarı içerisinde var olan sudan veya yüzeyden kömür damarına besleme yoluyla verilecek sudan elde edilebilir (Özer, 2011).

Üretim kuyusundan yüzeye alınan gaz ön temizleme işlemlerinden geçirildikten sonra kullanım amacına göre bir sonraki prosese gönderilir (Budak, 2014; Ökten ve Okutan, 1991).



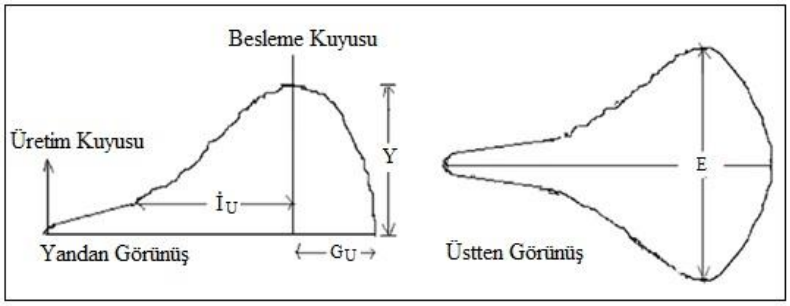
Şekil 3.13 Tipik gazlaştırma oyuğu, kömür cephesi, kayaç bölgesi ve kalıntı bölgesi kesit gösterimi (Bhutto ve diğer., 2013)

Yer altında gazlaştırma reaksiyonları gerçekleşirken, kömür, çar, kül, moloz, çakıl ve boşluktan oluşan bir oyuk meydana gelir (Şekil 3.13). Gazlaştırma oyuğunun şekli ve büyüklüğü gazlaştırma prosesinin güvenliği ve stabilitesi için oldukça önemlidir. Oyuğun büyüme hızı ve şekli prosese beslenen hava, saf oksijen ya da su buharının akış hızına, prosesin işlem süresine ve iki kuyu arasındaki mesafeye bağlıdır. Kömür tabakası tutuşturulduktan sonra hava beslemesi ile yanma reaksiyonu başlatılır bu süreçte gazlaştırma oyuğu hızlı bir şekilde kömür yatağının altından örtü tabakasına doğru genişler. Sisteme su buharının verilmesi hava miktarının azaltılmasıyla

gazlaştırma reaksiyonları başlar ve oyuk küçülerek ilerlemeye devam eder. Besleme yapılan kuyunun etrafında daha geniş daha yüksek bir oyuk oluşur, ürün gazın tahliye edildiği kuyuda ise genişlik ve yükseklik azalır (Budak, 2014).

Şekil 3.13'te gazlaştırma oyuğunun şeması ve proses esnasındaki yapılar gösterilmektedir. Büyültülerek şeklin yan tarafına taşınmış olan ve şekildeki renklere bağlı kalarak verilen şemalarla bölgelerde gerçekleşen aşamalar verilmiştir.

Gazlaştırma oyuğuna üstten bakıldığı takdirde koni şeklinde bir yapısının olduğu Şekil 3.14'te görülmektedir. Oyuğun tavan kısmında sıcaklık 900-1000 °C iken tabana doğru sıcaklık 650-700 °C civarına kadar düşmektedir (Budak, 2014).



Şekil 3.14 Gazlaştırma oyuğunun tamamlanmış durumdaki profili [ileri uzunluğu (İU), geri uzunluğu (GU), eni (E) ve yüksekliği (Y)] (Bhutto ve diğer., 2013)

Bütün avantajlarının yanında yer altı kömür gazlaştırma işleminde en önemli çevresel problemler su kirliliğinin oluşması ve yüzeyde tasman oluşmasıdır. Bu tehlikeler iyi bir saha seçimi ve işlemin kontrollü yönetilmesi ile en aza indirilebilir (Budak, 2014). İyi bir saha seçimi için yatağın litoloji, hidrojeoloji ve tektonik koşulları, etrafı çevreleyen kayaçların jeomekanik özellikleri, kömür damarı ve kömür damarının geçirgenliği, kalitesi ve diğer özelliklerinin bilinmesi gerekir. İşlem süresince üretilen sentez gazının miktarı, kalitesi ve içeriğini etkileyen sıcaklık, basınç ve beslenen oksitleyicilerin miktarının sürekli kontrol altında bulundurulması gerekmektedir (Özer, 2011).

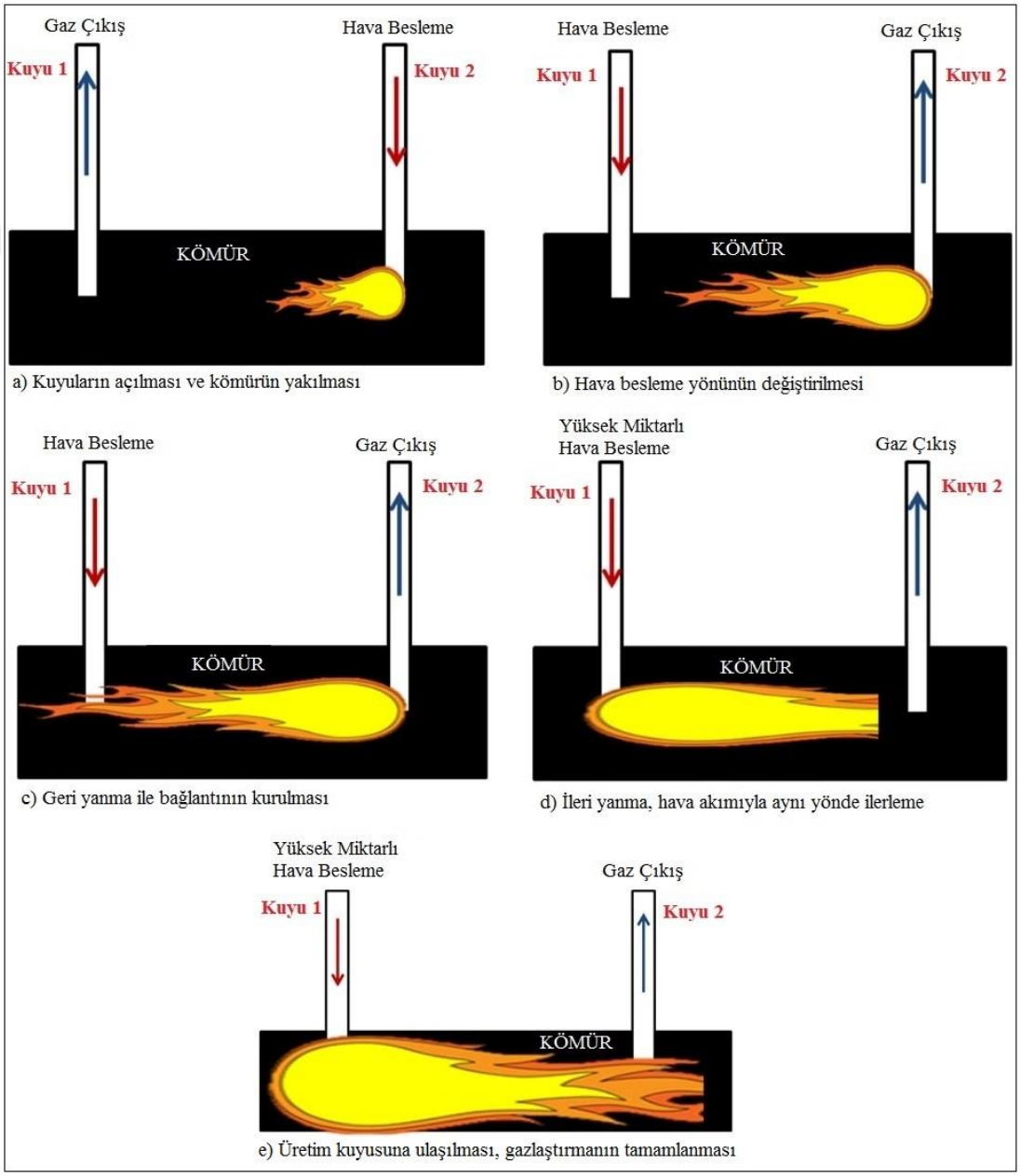
3.2.1.1 Bağlantılı Düşey Kuyular Prosesi

Bağlantılı düşey kuyular prosesi (ELW, *Establishing Underground Linkages Wells*) geri ve ileri yanma tekniklerinin bir arada uygulanıp kuyular arası bağlantı kurularak tamamlanan gazlaştırma işlemidir. Ayrıca "*Ergo Exergy*" (*εUCG*) ya da "LVW" (*Linkage Vertical Wells*) olarak adlandırılabilmektedir (Couch, 2009).

Şekil 3.15'de aşamalarıyla şematik olarak gösterilmiş olan bağlantılı düşey kuyular tekniğinde sondaj ile düşey olarak iki adet kuyu açılır. Sondaj ile açılmış iki kuyu arasında bağlantıyı sağlamak üzere Şekil 3.15.a'da gösterilen 2 numaralı kuyudan yüksek basınçlı hava veya oksijen beslemesi yapılarak kömür tutuşturulur. Sonra hava akımının yönü değiştirilerek, yüksek basınçlı hava diğer (1 numaralı) kuyudan damara verilir (Şekil 3.15.b), böylece geri yanma ile yanma önünün hava kaynağına doğru ilerlemesi sağlanır. Bu anda düşük sıcaklıkta gerçekleşen karbonizasyon sonucu, damar içinde bağlantı yolları oluşur ve kuyular arası yaklaşık 1 m çapında, bir veya birkaç dar bağlantı yolu meydana gelir. Yakma cephesi 1 numaralı besleme kuyusuna ulaşmış olur (Şekil 3.15.c). Bu teknik yer altı kömür gazlaştırma prosesinin ilk adımı olarak uygulanır, bu uygulama ile maden yatağının geçirgenliği arttırılmaktadır. Kuyular arası bağlantı sağlanıp geçirgenlik arttırıldıktan sonra besleme kuyusu olmuş olan 1 numaralı kuyudan yüksek miktarda düşük basınçlı hava ve oksijen basılarak ileri yanma tekniği ile yanma yönünün istikameti değiştirip gaz akımıyla aynı yönde ilerlemesi sağlanır (Şekil 3.15.d). Şekil 3.15.e'de son aşaması gösterilen teknikte yanma önü damar kalınlığınca ilerler ve yanma önü üretim (2 numaralı) kuyusuna ulaştığı zaman gazlaştırma prosesi sonlanmış olur (Budak, 2014; Hyder, 2012; Ökten ve Okutan, 1991).

Geri yakma prosesinde yakma cephesi havanın akışına ters yönde ilerler. Yakma cephesi hızı ileri yakma prosesine göre daha yüksektir. Geri yakma, sadece bir karbonizasyon işlemidir ve bu yöntemle kömür gazlaştırılmaz. Proses sıcaklığı 600-650 °C civarındadır. Bu sıcaklık ileri yakma prosesinin sıcaklığı ile kıyaslandığında çok düşüktür. İleri yakma prosesinde de besleme ve üretim kuyuları arasındaki bağlantı kurulduktan sonra gazlaştırma işleminin gerçekleştirilmesi ileri yakma

tekniği ile yapılmaktadır. Geri yakma prosesine karşılık ileri yakma prosesinde yüksek miktarda düşük basınçlı hava bu sefer diğer kuyudan basılır, yakma cephesi havanın akış yönüyle aynı yöndedir. İleri yakma tam bir gazlaştırma işlemidir ve kömür yatağının bir kısmında tamamen yanma sağlanmaktadır (Budak, 2014; Hyder, 2012).

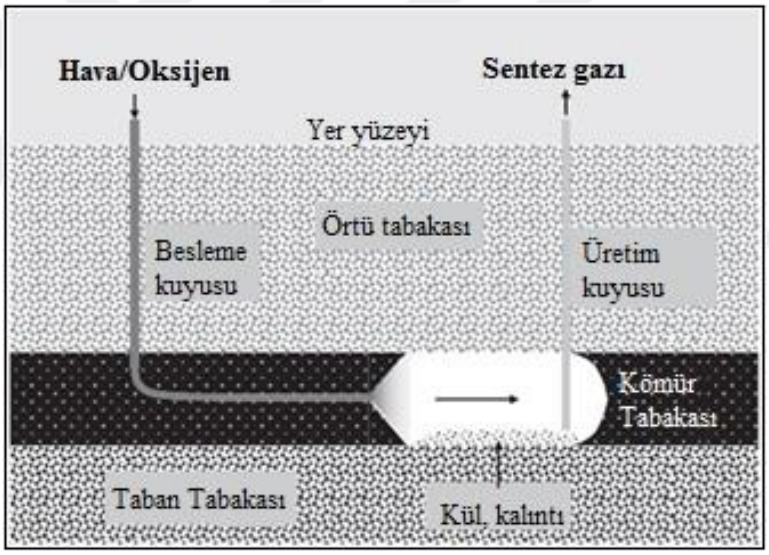


Şekil 3.15 Bağlantılı düşey kuyular prosesi (Hyder, 2012)

3.2.1.2 Kontrollü Olarak Hareket Ettirilen Ateşleme Noktası Prosesi

Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı (LLNL) tarafından geliştirilen YKG yöntemi 20 yılı aşkın bir süredir yer altı kömür yataklarından sentez gazı elde edebilmek için kullanılmaktadır (Couch, 2009; Özer, 2011).

Kontrollü olarak hareket ettirilen ateşleme noktası (CRIP, *Continuous Retraction Injection Point*) uygulamasında üretim kuyusu dikey açılır. Besleme kuyusu ise üretim kuyusuyla bağlantı oluşturacak şekilde yönlendirilmiş sondaj teknikleriyle açılır ve kontrollü olarak ateşleme uç noktası geri hareket ettirilir (Burton ve diğer., 2007; Bell ve diğer., 2011; Couch, 2009; Özer, 2011). Şekil 3.16'da CRIP uygulamasının şematik olarak görünümü verilmektedir (Bell ve diğer., 2011).

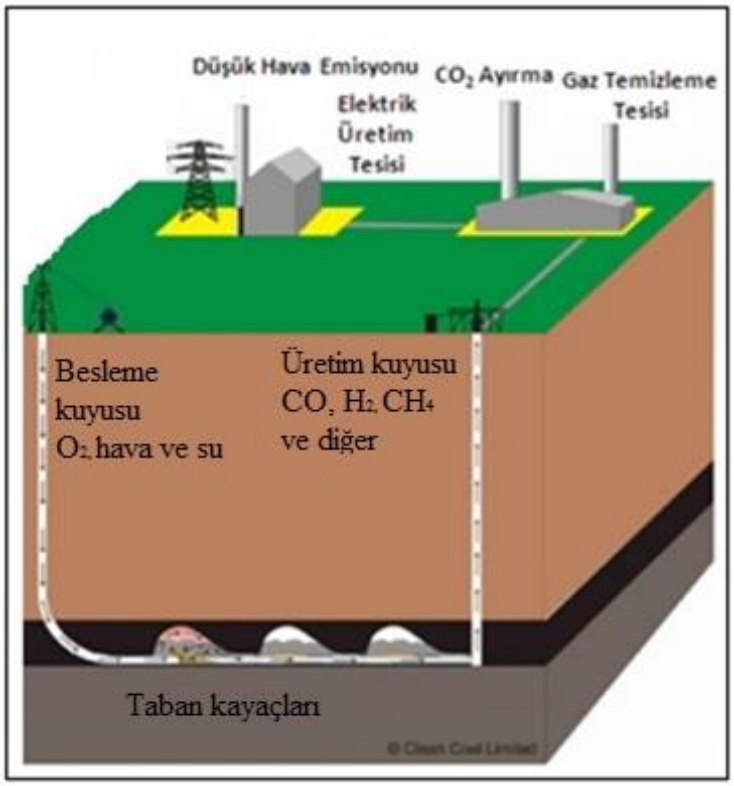


Şekli 3.16 YKG kontrollü hareket ettirilen ateşleme noktası (CRIP) prosesi şeması (Bell ve diğer., 2009)

Bu yöntemde gazlaştırma işlemi; kömür damarını yatay geçmeye yarayan yönlendirilmiş sondaj teknolojisi kullanılarak, eğimli yahut yatay kömür damarı boyunca açılan kanalın sonunda başlatılır. Buradaki kömür tüketildikten sonra bir boşluk oluşur, oluşan bu boşluk moloz ve külle dolmaya ve işlem verimliği azalmaya başlar. Kömür tüketildiği zaman işlem durdurulur ve besleme noktası geriye alınır. Geri alma işlemi kömür damarının derinliğine, kalınlığına ve gazlaştırılan boşluğun

büyüklüğüne bağlı olarak ayarlanır. Kuyuların ve boruların tasarımına bağlı olarak bu işlem defalarca tekrarlanır. Özetle CRIP işlemi yanmayı kontrol etmek amaçlı oksijen ve buharın beslendiği noktanın geriye alınması işlemidir. Böylece gazlaştırma işleminin kontrolü sağlanır (Özer, 2011). Yönlendirilmiş bir adet besleme kuyusu varken tasarıma göre geri çekilme aşamasında birden fazla üretim kuyusu kullanılabilir (Burton ve diğer., 2007). Diğer bir seçenek ise aynı üretim kuyusuna farklı noktadan kömür damarına paralel yönlendirilmiş ikinci bir besleme kuyusu (paralel CRIP) açılmasıdır (Couch, 2009).

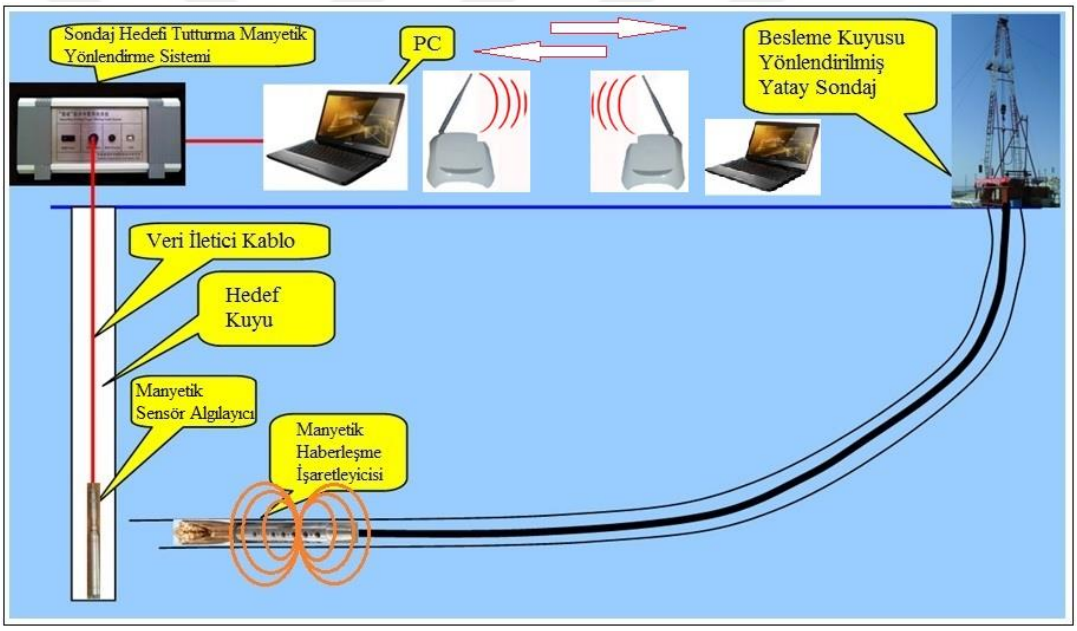
ELW metotta tek bir gazlaştırma oyuğu meydana gelirken, CRIP metodunda ateşleme noktasının hareket ettirilmesi neticesinde birden fazla oyuk meydana gelmektedir (Şekil 3.17). Böylece proses süresince kömürün yanmayan kısımları tepkimeye girerek üretilen sentez gazının kalitesi arttırılır. CRIP yöntemi ile daha kaliteli sentez gazı elde edilirken, ELW yöntemine kıyasla daha az ısı kaybı yaşandığı için yer altı kömür gazlaştırma prosesinin verimliliği artar (Budak, 2014).



Şekil 3.17 CRIP tekniğinin kademeli uygulanması (Özer, 2011)

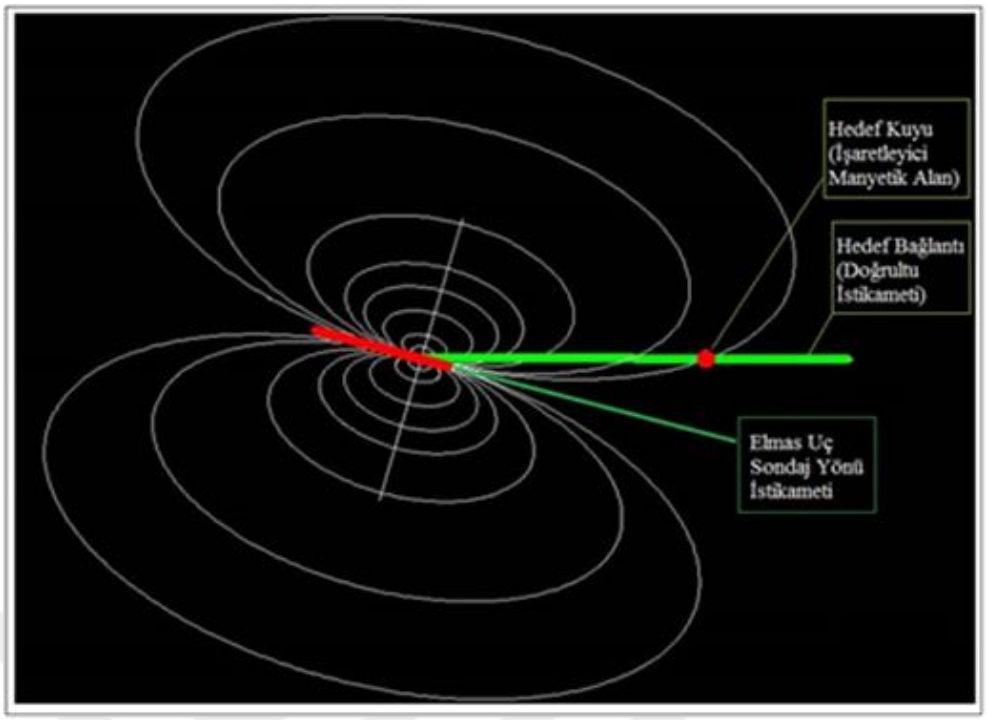
CIRP prosesi ile yer altı gazlaştırma için üretim kuyusuna, besleme kuyusunun kömür damarı içerisinde ilerleyip bağlanması gereklidir. Bu bağlantı kurulurken yönlendirilmiş sondaj tekniği ile kullanılan yüksek manyetik alan yayan ve bu verileri toplayan gereçler kullanılır (Couch, 2009).

Şekil 3.18'de tarif edilen yönlendirilmiş sondaj tekniği uygulanırken bir adet üretim kuyusu dik olarak delinir ve bu kuyuyla bağlantı yapacak şekilde yatay besleme kuyusu yönlendirilir. Bu yönlendirmenin yapılabilmesi için matkabın arka kısmına yüksek manyetik alan şiddetli işaretçi monte edilir. Hedef kuyuya ise manyetik algılayıcı sarkıtılır. Konumu belirli üretim kuyusuna bağlantı için konumu belirlenmiş matkap yönü, kuyuların haberleşmesi ile yönlendirilir (Hanyue, 2015).

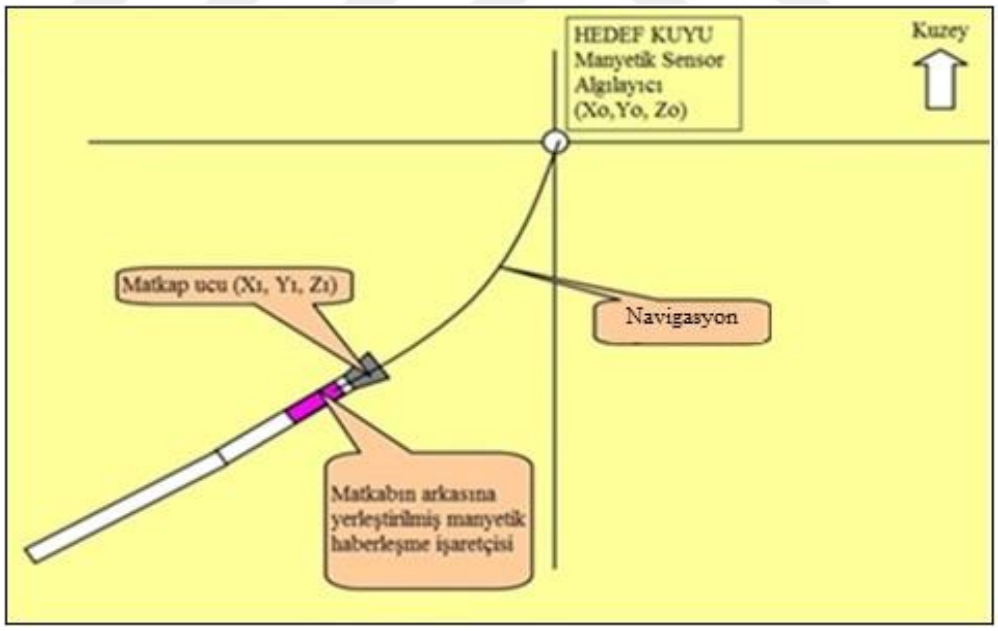


Şekli 3.18 Yönlendirilmiş sondaj ile kuyuların bağlanması (Hanyue, 2015)

Üç boyutlu doğrultular üzerinde manyetik alan kullanılarak konum ve istikamet saptanır. Şekil 3. 19'da gösterildiği gibi, manyetik işaretçi matkap ile manyetik hedef kuyunun sapma açısı tespit edilir. Tespit edilen doğrultular Şekil 3.20'de gösterildiği gibi analitik düzlemde işlenir. Doğrultunun olması gerektiği yöne doğru düzeltilmesi için navigasyon izi belirlenir ve doğru yönlendirme yapılır (Hanyue, 2015).



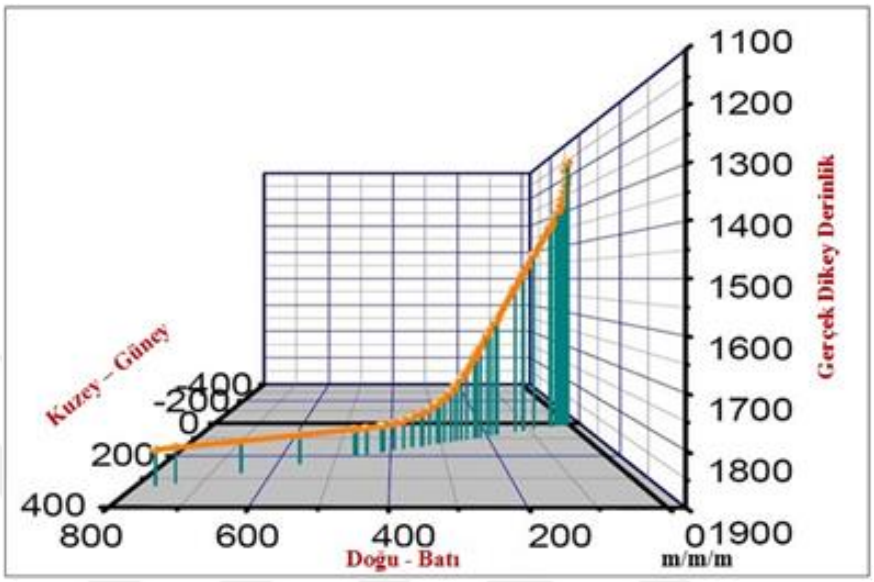
Şekil 3.19 Manyetik işaretçi analizi (Hanyue, 2015)



Şekil 3.20 Manyetik işaretçi ile doğrultu verilmesi (Hanyue, 2015)

Şekil 3.21'de yönlendirilmiş sondaj tekniği ile bağlantı kurulan derin bir sondajın X,Y,Z doğrultularında metre bazında izlenmesi gösterilmiştir (Hanyue, 2015).

Matkap arkasına monteli manyetik işaretçi ile oluşturulan bu veriler sayesinde matkapta yer alan saptırma sistemiyle zamanında ve doğru istikametli yönlendirme yapılır (Couch, 2009).



Şekil 3.21 Üç boyutta sondajın iz verileri (Hanyue, 2015)

Yönlendirilmiş sondaj teknikleri yer altı kömür gazlaştırma dışında, kömür damarı metan (CBM, coal bed methane) üretimi, doğalgaz ve petrol operasyonları, tuz, potasyum, trona gibi çeşitli mineral üretimi (çözelti madenciliği) faaliyetlerinde kullanılmaktadır. Türkiye'de şu anda Eti Soda Trona işletmesinde çözelti madenciliği uygulamaları, yönlendirilmiş sondaj tekniği ile manyetik algılayıcı sistem kullanılıp, kuyuların bağlantısı gerçekleştirilerek sürdürülmektedir (Hanyue, 2015).

3.2.2 Yer Altı Proses Koşullarının Optimizasyonu

Kömür gazlaşma reaksiyonları ve mekanizmaları Bölüm 2.2'de, sentez gaz özelikleri Bölüm 2.3'te, gazlaştırıcı özellikleri ve optimizasyon koşulları Bölüm 3.1.'de anlatılmıştır. Gazlaştırıcı reaktör özelliği gösteren yer altı gazlaştırma yönteminde de bu değinilen durumlar aynen gerçekleşir. Ancak yer altının jeolojik yapısı gereği gerçekleşen mekanizmalar ve yer üstü gazlaştırıcılardaki gibi müdahele

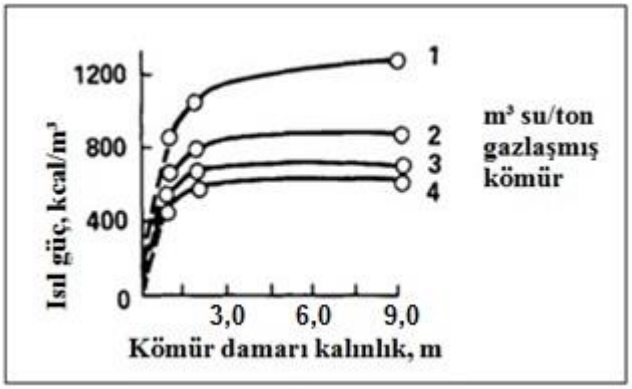
edemediğimiz, limitli müdahele edebildiğimiz bir takım yapısal özellikli yeni parametreler yer altı gazlaştırma proseslerine dahil olmaktadır. Bell ve diğer. (2011), gazlaştırıcılara kıyasla konvensiyonel yer üstü gazlaştırıcılardan farklı olarak yer altı prosesinde geçirimli kömür duvarı mevcut olduğunu belirtmiştir. Sentez gazının yer altından üretilmesinde optimum çalışma koşullarını sağlamak için uyarlanabilen veriler genellikle; belli bir miktar basınç, sıcaklık, gaz akış hızı ve üretim ile besleme kuyusundaki gaz kompozisyonlarıdır.

Bahsedilen limitli müdahalelerden dolayı yer altı gazlaştırma prosesinde iyi bir saha seçimi yapılmalıdır. Bunun için yatağın litoloji, hidrojeoloji ve tektonik koşulları, etrafı çevreleyen kayaçların jeomekanik özellikleri, kömür damarının tipi, kompozisyonu, kalitesi, nem içeriği ve kömür damarının porozitesi ile geçirgenliği gibi özelliklerin bilinmesi gerekir. İşlem süresince üretilen sentez gazının miktarını, kalitesini ve içeriğini etkileyen sıcaklık, basınç ve beslenen oksitleyicilerin miktarı sürekli kontrol altında bulundurulmalıdır (Hyder, 2012; Sajjad ve Rasul, 2014; Özer, 2011).

Yanma cephesinin ilerleyebilmesi; kömürün, boşluk yapısı (porozitesi), geçirgenliği (permeabilitesi), su içeriği, uçucu madde miktarı, külün karakter ve biçimine, tavan ve taban kayaçların ısı iletkenlik katsayılarına, bileşimine ve yanma reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı karşısındaki fiziksel ve kimyasal değişim özelliklerine bağlıdır. Porozitesi ve geçirgenliği düşük kömürlerde, yer altındaki patlatmalarla bu özellik arttırılabilir. Orta derecedeki nem oranı, yanma reaksiyonu esnasında etkin bir rol oynar. Yüksek nem gereken ısının buharlaşma ısısına dönüşmesine ve böylece tutuşma sıcaklığının düşmesine neden olur. Bu durum yanma cephesinin boğulmasına sebep olur. Uçucu maddece zengin kömürlerde ise yanma cephesinin kontrolü zor olacaktır, dolayısıyla birçok teknik yöntemlerin uygulanması zorunlu olarak gazın maliyeti artar (Kavuşan, 1986).

Tavan ve taban kayaçlarının ısı iletkenlik katsayısının yüksek oluşları, ısının dağılımının düzenli oluşunu sağlarken, yanma cephesi ötesinde kömür damarının ön ısıtılmasını sağlar. Yanma cephesi ve gerisinde, tavan kayaçlarının kısmen veya

tamamen sinterleşmeleri, daha kompakt bir duruma dönüşmelerini sağlar ve bu sayede göçük oluşumu engellenir. Aksi durumlarda yanma cephesi oluşabilecek göçükler nedeniyle boğulacak ve istenmeyen reaksiyonlar sonucu istenmeyen gazlar ortaya çıkacaktır (Kavuşan, 1986).



Şekil 3.22 YKG işleminde damar kalınlığının su miktarına göre etkisi (Shafirovich ve Varma, 2009)

Diğer bir önemli parametre kömür damarının kalınlığıdır. Damar kalınlığı azaldıkça sentez gazdaki ısıl kazanım değeri çevresel faktörlerle düşmektedir. Şekil 3.22'de yer altı kömür gazlaştırma tesisinde, kömür damar kalınlığının su miktarına göre ısıl güç değişim grafiği gösterilmektedir (Shafirovich ve Varma, 2009). Grafikte görüldüğü üzere 2 m kalınlıktan sonra grafik yataya yakındır yani kalınlığın bu orandan sonra artışı ısıl değerde değişiklik göstermemektedir. Ancak su içeriğinin artması ısıl gücü azaltmaktadır. YKG prosesinde hava ya da oksijen beslemesi kullanılabilir. Hava ile düşük ısıl güç içerikli sentez gazı, oksijen ile yüksek ısıl güç içerikli sentez gazı üretilir ancak oksijenli proses daha yüksek maliyetlidir (Higman ve Burgt, 2008). Tasarım yapılırken çevresel etkenlere bağlı ısıl kayıplar ve artacak oksijen girdisi hesapları göz önünde bulundurulmalıdır.

Gazlaştırma yapılacak kömür damarının yeryüzünden itibaren bulunduğu derinlik ile artan litostatik basıncın etkisiyle, kömür derinlerde daha plastik hale gelir ve daha az geçirgenliğe sahip olur. Bu nedenle besleme pompaj basıncının yüksek olması ve geçirgenliğin artırması zorunludur. Özellikle ilk yakma ve yanma cephesinin geliştirilerek, besleme ve üretim sondaj kuyuları arasındaki bağlantının sağlanması

aşamasında geçirgenlik özelliği, önde gelen ve yenilmesi zorunlu problemdir (Kavuşan, 1986).

Yer altı gazlaştırma prosesi için basınç tek başına tasarımı yapılabilen bir değişken değildir. Buna karşılık, kömür damarının bulunduğu derinliğin artışı ile artan hidrostatik basınca bağlı bir fonksiyondur. Kömür damar derinliğinin artması ile artan gazlaştırma basınç artışı sayesinde gazlaştırma hızı artar (Bell ve diğer., 2011).

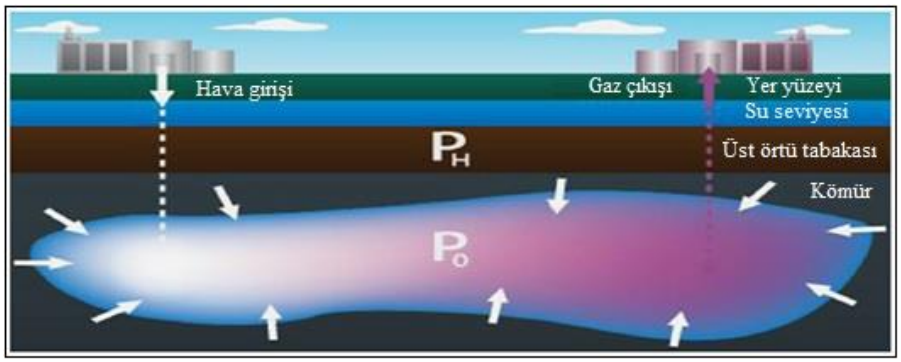
Derinliğin ve basıncın artması ile verimlilik faktörünün artışının iki sebebi vardır. Birincisi gazlaştırma oyuğuna akan suyun buharlaşması için kayda değer bir ısı miktarı gereklidir. Suyun buharlaşması için gereken ısı miktarı, basıncın artması ile düşer. İkincisi ise basıncın artması sebebiyle tersinir olan metanasyon tepkimesinin (2.8) artışı ve sentez gazdaki metan içeriğinin artışıdır (Bell ve diğer., 2011).

YKG işleminde termal verimlilik formülü (3.3)'de (Bell ve diğer., 2011), gazlaştırma proses verimliliği Formülü (3.4)'te (Budak, 2014) belirtilmiştir.

$$YKG\ termal\ verim = \frac{Sentez\ gazın\ kimyasal\ enerjisi}{Kömür\ damarının\ ısıl\ enerjisi} \tag{3.3}$$

$$YKG\ proses\ verimi = \frac{Gazlaştırılmış\ kömür\ miktarı}{Sahadaki\ kömür\ rezervi} \tag{3.4}$$

Yer altı kömür gazlaştırma prosesi uygulanırken damarın hidrojeolojisinin bilinmesi önemlidir. Aşırı su içeriği, prosesi ekonomik olmaktan çıkarabilmekte ve ayrıca yer altı sularına sızıntı ile tehlikeli çevre hasarlarına sebebiyet verebilmektedir (Higman ve Burgt, 2008). Yer altındaki su kaynaklarının korunması için dikkat edilecek en önemli husus, gazlaştırma bölgesindeki basınçtır. Şekil 3.23'te gösterilen gazlaştırma bölgesindeki basınç, kömür yatağında bulunan suyun hidrostatik basıncından daha az olmalıdır. Böylelikle gazlaştırma sonucunda oluşan gazlar su tabakasına geçiş yapamaz (Imran ve diğer., 2014; Budak, 2014).



Şekil 3.23 Yer altındaki gazlaştırma boşluğu ile su tabakasının basınçları (PH; hidrostatik basınç, PO; gazlaştırma boşluğundaki operasyon basıncı) (Imran ve diğer., 2014)

Yer altı kömür gazlaştırma prosesinin ekonomik analizine etki eden faktörler ise aşağıdaki gibidir (Budak, 2014);

1. Kömür yatağının derinliği ve kalınlığı.
2. Gazlaştırma oyuğunun kesit alanı.
3. Üretilen sentez gazının ısıl değeri.
4. Sentez gazının üretim miktarı.
5. Sisteme beslenen hava ve su buharı miktarı.
6. Gazlaştırma prosesinin verimi.
7. Prosesin termal verimliliği.
8. Gazlaştırma bölgesinin ilerleme hızı.

Ekonomik analizi etkileyen en büyük faktörlerden biri üretilen sentez gazının ısıl değeri, bir diğeri ise gazlaştırma oyuğunun kesit alanıdır. Yatırım maliyetini en fazla etkileyen gazlaştırma oyuğunun kesit alanı, satış fiyatını etkileyen ise üretilen gazın ısıl değeridir. Sondajlama dışında proje fizibilitesine etki eden bir diğer etken oksijen tüketim miktarıdır. Maliyet hesabı birim ısıl değer başına hesaplandığı için sentez gazının ısıl değerinin artması maliyeti azaltan bir etkendir. Oksijen tüketiminin, su buharı tüketim fiyatına göre iki kat maliyetli olması sebebiyle sisteme ne kadar az oksijen beslenir ve su buharı ile birlikte kullanılırsa sentez gazının maliyeti o kadar düşük olacaktır. Projenin toplam üretim maliyetini oluşturan etkenlere; sondaj maliyeti ve gaz temizleme ünitesi gibi diğer yardımcı ünitelerin maliyetleri de eklenir (Budak, 2014).

BÖLÜM DÖRT
TÜRKİYE KÖMÜRLERİNİN GAZLAŞTIRMA PROSESLERİNE UYGUNLUKLARININ İNCELENMESİ

Kömür özelliklerinin gazlaştırma prosesi ve gazlaştırıcı tasarımı üzerine en etkili olan parametler; nem, kül, uçucu madde, sabit karbon içeriği, reaktivite, kül ergime karakteristikleri ve tane boyut dağılımıdır (Miller, 2005). Gazlaştırma prosesi üzerinde besleme tipinin değiştirilemez etkileri, fiziksel proses parametrelerinin ise belli ölçülerde değiştirilebilir tesirleri vardır. Örnek olarak, kömürün reaktivitesi genellikle kömürleşme derecesinin artması ile azalır. Tane boyutu azaldıkça, kömür ile reaksiyona giren gazların temas alanı artar bu durum daha hızlı reaksiyon sağlayabilmenin sebebidir. Orta ve düşük dereceli kömürler için reaktivite, boşluk hacminin (gözeneklilik) ve yüzey alanının artması ile artış gösterir ama kömür ağırlıkça % 85 ve üzeri karbon içeriğine sahipse bu gözeneklilik tesiri reaktiviteyi etkilemez. Yani yüksek dereceli kömürde çok minik kalan boşluk ebatlarından dolayı reaksiyon difüzyon kontrollüdür (Basu, 2006; Luque ve Speight, 2014). Bir gazlaştırıcı sistemin belirlenmiş operasyonel tasarım karakteristikleri, gazlaştırıcı içerisinde üretilmiş çarın reaktivitesi ile etkilenir (Luque ve Speight, 2014).

Gazlaştırıcıların anlatıldığı Bölüm 3.1'de belirtildiği gibi günümüzde birden fazla gazlaştırma teknolojisi vardır. Bunların arasından seçilmesi gereken teknolojiye etkili olan faktörler; kömürün cinsi, maliyeti ve bulunabilirliği, tesisin kullanım yeri ve çevresel etkiler, boyut gereksinimleri, enerji üretim hızı, amortisman, sentez gaz ısıl değeri, gaz ürün standartlarına uygunluğu ve nihai ürünün özellikleridir. Kömür seçimi bunlar içinde esnekliği en az olan faktördür. Bundan dolayı seçilecek teknolojinin kullanılacak kömür özelliklerine uygun olması gereklidir (Collot, 2005).

Ticari olarak gazlaştırma teknolojisi sunan kuruluşlar tarafından gazlaştırma prosesinin uygunluğunun belirlenmesi için ilk aşamada, ilgili kömüre ait numunelerin karakterizasyon analizleri ve reaktiflik test sonuçları değerlendirilir (Lau, 2014). Analiz sonuçlarına göre kömüre uygulanabilir proses seçimleri yapılarak alternatifler değerlendirilir. Ürün isteğine göre enerji üretimine ve/veya

kimyasal üretime uygun potansiyel gazlaştırma prosesi seçilir. Yer altı gazlaştırma prosesi için bu analizlerin yanı sıra laboratuvar ölçekte benzer ortam yaratılması için tasarlanmış temsili reaktörlerde denemeler yapılır ve sonrasında yerinde pilot kuyu çalışmaları yapılır. Yer üstü gazlaştırma tesisleri için gerekli durumlarda ilgili kömür ocağında yahut başka merkezlerde pilot ölçekte gazlaştırıcı denemeleri yapılır. Önceki mevcut bilgiler ile hazırlık sermayesi ve işletme maliyetleri tahminleri yapılır. Çalışmamın bu bölümünde gazlaştırmaya uygun kömür seçimi için gereken kriterler belirlenmiş ve Türkiye'deki kömür özellikleriyle gazlaştırma proses teknolojileri irdelenerek, kömür karakteristiklerinin gazlaştırma proseslerine uygunlukları değerlendirilmiştir. Uygunluk değerlendirmesinin yanı sıra yukarıda sıralanan aşamalar doğrultusunda Türkiye'de gerçekleşmiş olan gazlaştırma faaliyetleri, Türkiye kömürleri için yapılmış gazlaştırma prosesine uygunluk çalışmaları, kömürlerin teknolojik çalışmaları, gazlaştırma akademik çalışmaları, Türkiye'deki pilot ölçekli çalışmalar ve ticari amaçlı faaliyetler de incelenmiştir.

4.1 Kömür Karakteristik Özelliklerinin Yer Üstü Gazlaştırma Proseslerine Etkileri

Gazlaştırma prosesleri için tipik olarak, en çok bakılan kömür özellikleri elementel kompozisyon (organik ve inorganik), yüzey özellikleri ve gözeneklilik ile yapısal reaktivitedir. Ancak kömür özelliklerinin önemi, farklı gazlaştırıcı tasarımlarına bağlı olarak değişecektir. Her tip gazlaştırıcı için uygulamalarda gaz kalitesi, kararlılık, verim ve basınç kaybı gibi dikkat edilmesi zorunlu olan konuların değişkenliği yakıt özellikleri ile alakalıdır (Luque ve Speight, 2014; Miller, 2005; Wagner, 2008). Örneğin, sabit yataklı gazlaştırıcıda kekleşme ve aglomerasyon karakteristikleri önem kazanır. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılarda öğütülebilirlik indisi, kömürün pulvarize hale gelmesi ve tane boyut dağılımının şlam karışımına uygunluğu açısından önem kazanır. Cüruflu proseslerde düşük kül içerikli kömür varlığı ve düşük ergime sıcaklığı cüruf akışını sürdürmek için önemlidir. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar için yüksek reaktiviteli kömürler gereklidir ve çar dönüşümü diğerlerine nispeten düşük sıcaklıklarda verimli gerçekleşmelidir (Wagner, 2008).

4.1.1 Kömür Seçimi ve Karakteristikleri

Gazlaştırma prosesinde kömür özelliklerinin uygunluklarının belirlenmesi için bazı analizlerin değerlendirilmesi gereklidir. Bu analizler, kısa analiz, elementel ve kükürt analizi, tane boyut dağılımı, termal ve mekanik parçalanma (atmosferik basınçta), Fischer/Gray-King analizleri (tar ya da yakıt üretimi için), kekleşme eğilimi (şişme indisi), reaktivite, çarın yüzey alanı ile boşluk boyutlarının analizleri ve petrografik özelliklerin belirlenmesidir (Luque ve Speight, 2014; Wagner, 2008). Petrografik özellikler, vitrinit reflektansı ile kömür derecesi, maseral, mikro litotipi ve mineral grup analizi, ayrışma derecesi ve çar morfolojisidir. Tablo 4.1'de kömür özelliklerinin kısa açıklamaları aktarılmıştır (Luque ve Speight, 2014).

Tablo 4.1 Kömür özellikleri ve kısa açıklamaları (Luque ve Speight, 2014)

İŞLEM	NETİCE
Kalorifik değer	Enerji üretimi potansiyeli
Kömür derecesinin sınıflandırılması	Kömür davranışının madencilik, hazırlama ve kullanım için kestirimi
Kömür külü	Verilen bir sıcaklıkta üretilen kül miktarı
Denge nemi	Kömürün nem tutma kapasitesi (Doğal kömür yatak nemi)
Sülfür formu	Organik ve inorganik sülfür formları (pirit, sülfat)
Major ve minor elementler	Major ve minor elementlerin tanımlanması
Kısa analiz	Nem, uçucu madde, kül ve sabit karbon miktarının belirlenmesi
Maseral analizi	Kömür maseralleşmesinin tipleri ve miktarları
Toplam nem	İçsel nemin ve diğer nemlerin belirlenmesi
İz elementler	İz elementlerin tanımlanması
Elementer analiz	Karbon, hidrojen, nitrojen, oksijen, sülfür ve kül miktarları
Uçucu madde	Çıkan gaz ürünler

4.1.1.1 Organik Bileşenlerin Gazlaştırma Prosesine Etkileri

4.1.1.1.1 Isıl Güç. Kalorifik ısıl güç değeri kömürün doğrudan enerji içeriğinin bir göstergesidir. Bu nedenle kömür gazlaştırma tesisinde, kömürün uygunluğunu gösteren en önemli özelliktir (Luque ve Speight, 2014). Bir yakıtın ısıl gücü birim ağırlığındaki yakıttan, tam yanma koşulu ile elde edilen ısı miktarı olup, Kcal/kg, Kj/kg, Btu/lb (British Thermal Unit/libre) şeklinde ifade edilir. Yakıtın ısıl değerinin belirlenmesinde yoğuşma (kondanzasyon) ısısına bağlı olarak Alt Isıl Değer (AID)

ve Üst Isıl Değer (ÜID) olarak iki çeşit ısıl güç rakamı üretilir. Kalorimetre içinde yanma sırasında su buharı oluşur ve buharın yoğunlaşması ek bir ısı yayar. Yoğuşma ısısı denen bu ısıyı ekleyerek elde edilen kalorifik güce Üst Isıl Değer, yoğuşma ısısının dikkate alınmadığı kalorifik güce Alt Isıl Değer (Net Kalorifik Değer) denir. Uygulamalarda AID daha yaygın olarak kullanılır (Ünalan, 2010).

Gazlaştırma için seçilecek kömürün ısıl değeri, prosesin ekonomik parametreleri ile beraber irdelenir ve maliyetler açısından bir sınır değer proje ile belirlenir. Türkiye'deki kömürler ile gazlaştırma denemelerini gerçekleştiren TKİ kurumunun kömür seçim çalışmaları için belirlenen limit 2000 Kcal/kg alt ısıl değerdir (Z. Olgun, kişisel iletişim, 23 Kasım 2015).

4.1.1.1.2 Kısa Analiz. Kısa analiz nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon miktarlarının atmosferik basınç altında belirlenmesidir. Gazlaştırıcı basıncı, her ne kadar uçucuları uzun bir süre parçacık içinde tutsa dahi dolaylı olarak kısa analiz gazlaştırıcı performansı için bilgiler verir. Çeşitli kömür tipleri ile yapılan denemelerde sıcaklık artışıyla diğerlerine göre daha reaktif davranan kömürler olmuştur (Wagner, 2008).

Isıtma sürecinde, kömürden çıkan gaz, katran/yağ ve bozunma suyunun tümüne uçucu madde denmektedir. Gaz halinde çıkan uçucu madde CO, CO_2, H_2O, H_2, hafif hidrokarbonlar ve eser miktarda azotlu bileşikler içermektedir. Kömürün ısıl parçalanması sırasında, kimyasal yapısındaki yan zincirlerle, aromatik olmayan kimyasal grupların parçalanarak yapıdan ayrıldıkları kabul edilmektedir. Bunun sonucunda, geride kalan kısmın aromatikliği ve buna bağlı olarak karbon içeriği artar (Bozkurt, 2005).

Gazlaştırıcı içindeki katı yakıtın, çar dönüşüm tepkimesi onun uçucu madde içeriğine bağlıdır. Yüksek uçucu madde içeriğine sahip olan yakıtlar daha reaktiftir ve çarın gaza dönüşümü daha kolay gerçekleşmektedir. Yüksek kömürleşme dereceli kömürler düşük dereceli kömürlere göre daha düşük uçucu madde miktarına sahiptir ve reaktiviteleri daha düşüktür, bu sebeple piroliz ana ürünü çardır. Yüksek dereceli

kömürlerin gazlaştırıcı içinde verimli kullanılabilmesi için en önemli husus çar verimidir (Basu, 2006).

Sabit karbon, nemi ve uçucu maddeleri uzaklaştıktan sonra kalan çarın ana bileşenidir. Fiziksel ve kimyasal varyasyonları değişebilen sabit karbon gazlaştırıcı performansı açısından önemlidir. Yoğunluk, yapısal bünye (katı-gaz tepkimesine elverişliliği), ufalanma/sertlik ve reaktivite başlıca özellikler orijinal kömüre bağlıdır ancak basınç, kömürün ısıtılma hızı ve final sıcaklığı da sabit karbon yapısını etkiler (Bozkurt, 2005; Miller, 2005).

Kömürdeki ortalama H/C oranının artışı ile basınç altında hafif karbonlar daha fazla miktarda oluşur ve çar gözenekleri içinde gaz halindeki uçucu madde ikincil tepkimelerinde artışına sebep olur. Bu sebeplerle uçucu madde çıkışı azalabilir (Wagner, 2008).

Kömürler, kömürleşme derecelerine göre farklı oranda rutubet içerirler. Herhangi bir nemlendirme veya kurutma uygulanmamışsa, ocak çıkışı taş kömürü % 1-3, sert linyitler % 20-30, yumuşak linyitler % 40-60 ve turbalar ise % 60'ın üzerinde rutubet içerirler (Bozkurt, 2005). Kömürün rutubet içeriği limit değeri gazlaştırıcı için aştığı durumlarda bir ön kurutma gereklidir. Hareketli yataklı gazlaştırıcılarda yüksek oranda rutubet içeriği, gazlaştırma için verilen su buharına yardımcı olmaktadır. Fakat bu durumda sisteme ısı verilmesi gereklidir (Bozkurt, 2005; Miller, 2005).

Yığın özgül ağırlığı, birim hacim başına düşen ağırlık olarak tanımlanır. Yüksek özgül ağırlık birim hacim başına daha yüksek enerji anlamına gelir. Yakıtın aynı durma süresi karşılığı reaktör boyutları azalır. Düşük özgül ağırlıklı yakıt karşısında yerçekimi etkisizleştiği zaman akış problemleri, düşen gaz sıcaklıkları ve çarın indirgeme bölgesinde yanması gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılabilir (Cortés ve diğer., 2009)

4.1.1.1.3 Elementel ve Kükürt Analizi. Kömürlerin içerdiği C, H, N, S ve O miktarları elementel analiz ile tespit edilir. C/H miktarları, hem organik hem de inorganik yapıda bulunduğundan gazlaştırma tahminlerinde zorluk yaratır. Toplam kükürt analizleri (piritik kükürt, sülfat, organik kükürt) ayrıca bu pakette belirlenir. Gazlaştırma esnasında, toplam dönüşebilir kükürt varlığı genellikle H_2S olarak ham gaz ile çıkar ve daha sonra bu H_2S gaz temizleme ünitesinde uzaklaştırılır. Kükürt formları analizi ayrışma ya da aşındırma konularının tayini için kullanılır (Wagner, 2008). Kükürt etkisine "Kükürt ve Klor İçeriği" başlığı altında değinilmiştir.

Hammaddenin yakıt oranı (FR, *fuel ratio*) uçucu madde miktarına düşen sabit karbon oranıdır (C/Uçucu madde). Yakıt oranı ve O/C oranı yüksek olan kömürler yüksek karbon dönüşüm hızı ve reaktiflik gösterirler (Mastalerz, Drobniak, Rupp, ve Shaffer, 2005).

Gazlaştırma prosesinde C/H oranının spesifik limitleri yoktur ancak sentez kalitesine etkisi vardır. Eğer diğer tüm şartları eşit olan kömür beslemeleri arasından C/H oranı yüksek olanı tercih edilirse düşük H_2/CO oranlı sentez gazı elde edilir. Bu durum istenen sentez gaz ürününe bağlı olarak uygulanabilir (Higman ve Burgt, 2008).

4.1.1.1.4 Tane Boyut Dağılımı. Gazlaştırma ortamına beslenen hammaddenin parçacık boyutu; ürün gazı oluşturan bileşenleri, bunların konsantrasyonlarını belirleyen kütle ve enerji transfer koşullarını etkiler (Higman ve Burgt, 2008).

Aşırı büyük boyutlu taneler kömürün reaktifliğini azaltır, ilk çalıştırma problemlerine, düşük gaz kalitesine ve ekipman içinde taşınma problemlerine yol açar. İri boyut yukarı doğru akışlı reaktörlerde kanallaşma problemlerine sebep olabilir. Aşırı ince tanelerde tozuma ile gaz akış problemlerine, basınç ve sıcaklık kayıplarına sebep olabilir. Gazlaştırıcının katı-gaz teması ile belirlenmiş optimum tane boyut aralığının dışına çıkılmaması esastır. Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda partikül büyüklüğü ve yoğunluğu akışkan davranışını etkiler. İnce parçacıklar tutulup tekrar gazlaştırıcıya döndürülüp yeniden sisteme eklenir (Lau, 2014).

Gazlaştırıcı için gerekli tane boyut dağılımda ihtiyaca göre belirli boyut değerlerine müsaade edilir. Sabit yataklı gazlaştırıcılar 5-80 mm parçacık boyut aralıklarına uygundur ve 6 mm altındaki ince malzeme varlığı operasyon sürekliliğini bozup basınç düşmesine sebep olabilir. Gazlaştırıcı yatağındaki geçirgenlik katılar ile gazlar arasındaki kütle ve ısı transferi için çok önemlidir. Basınç düşüş tahminlerinde parçacık boyut dağılımına dayalı "Ergün Denklemi" en doğru yaklaşımı verir (Wagner, 2008).

Kömürün gazlaştırılmasında reaksiyon hızı kütle transferine bağlıdır. Partikül büyüklüğü de kütle transferini dolayısıyla yakıtın reaksiyon bölgesinde kalma süresini etkiler. Partikül çapının 0,1 mm'den küçük olduğu durumlarda kalma süresi 1-10 s dolaylarındadır. Ortalama partikül çapının 1 mm olduğu durumda ve 10 mm'den büyük olduğu durumda kalma süresi sırasıyla 100-1000 s ve 1000-10000 s dolaylarındadır. Reaksiyon süresi doğrudan gazlaştırıcı tasarımı ve tipi ile ilgilidir (Yılmazoğlu, 2012). "Çar Yüzey Alanı ve Boşluk Boyutu" başlığı altında fiziksel yapının etkisi anlatılmıştır.

4.1.1.1.5 Termal ve Mekanik Parçalanma. Aşırı ince parçacıklar hareketli yataklı ve akışkan yataklı gazlaştırıcıda geçirgenliğe olumsuz etki yaparak sentez gaz üretimini düşürürler. Bu sebeplerden dolayı kömürün parçalanma, ufalanma özellikleri bilinmelidir (Lau, 2014). Termal parçalanma önceden boyutları belirlenmiş bir kap içinde, gazlaştırma sıcaklığına ısıtılıp, inert gaz kullanılarak oluşturulan ortamda kömür parçacık değişikliği hesaplanarak ölçülür. Piroliz öncesi ve sonrası parçacık boyut değişimine bakılır. Boyut dağılımdaki azalmanın yüzdesi Sauter çapı ile değerlendirilir ve küçük yüzdeli boyutta azalmalar, daha iyi termal denge verir. Termal parçalanma daha çok kömür içindeki nemden etkilenir, diğer faktörler oksidasyon ve aşınmadır (Wagner, 2008).

Mekanik parçalanma Micum test (aşınma testi) tamburu ile hesaplanır (Wagner, 2008). Reaktördeki reaksiyonlar sonrası gazların geçişinin kolay olabilmesi için tozlaşma oranının düşük olması istenir. Micum tambur testi (M40, M10) ölçüleri belirli olan bir tambur içinde, belirli bir devirde, belirli zaman içerisindeki çalıştırılır.

40 mm elek üstü nunume ağırlığına oranlarak M40 (danayım indisi), elek altı 10 mm elekten geçirilerek, elek altı miktarın numune miktarına oranı M10 (tozlanma indisi) belirlenir (Bulut, 2010). Sonuçlar Sauter ortalama çap değişikliği (Ergün indisi) ile hesaplanır (Wagner, 2008).

4.1.1.1.6 Katran, Hafif Yağlar, Sıvı Üretimi Fischer ve Gray-King Testleri. Piroliz esnasında sıvı ürünlerin kompozisyonu genel olarak kömürün derecesine, petrografik kompozisyonuna, uçucusuzlaştırma kinetiklerine ve operasyon sıcaklığına bağlıdır. Laboratuvar ölçeğinde hafif yağlar tipik olarak Fischer testi ve koklaşma özelliklerini veren Gray-King testi ile belirlenir. Kömürün katran, hafif yağlar üretirken meğil ettiği çar oranı, sıvı hidrokarbon, su ve diğer gazlara dönüşümleri hesaplanır (Wagner, 2008).

4.1.1.1.7 Kekleşme Eğilimi ve Serbest Şişme İndisi. Bazı tip kömürler ısıtılıp, uçucu madde kaybına uğrarken kekleşme ve şişme gibi özellikler gösterirler. Uçucu madde içeriği yüksek olan bazı bitümlü kömürler bu özelliklere sahiptir. Kömür tanecikleri sadece yumuşayıp birbirlerine yapışmakla kalmayıp, şişerek kekleşirler. Aynı miktarda uçucu madde içerdikleri halde, aynı koşullarda, orijinal şekillerini koruyan ve kekleşmeyen kömürler vardır. Böyle kömürlerde, sadece bir kısım tanecikler arasında zayıf bir kekleşme olur. Bazı tip kömürlerde rutubet ve uçucu maddelerini kaybedince parçalanıp ufalanırlar. Yukarıda tanımlanan bu üç tip kömür sırayla, iyi kekleşen, az kekleşen ve kekleşmeyen kömür tipleri olarak bilinir (Bozkurt, 2005).

Kekleşen kömür, ısıtıldığı zaman plastiklik ya da yumuşama özellikleri gösterir. Bu özellik kömürün vitrinit içeriğine, kömürleşme derecesine, inorganik içeriğine, uçucusuzlaştırma özelliğine, yüzey özeliklerinin oksidasyon ve şekil değişimine bağlıdır. Yatak üzerinde kekleşme meydana geldiği zaman tane boyut dağılımı, geçirgenlik ve basınç düşüşü bakımından prosesi olumsuz etkileyecektir (Wagner, 2008).

Aglomerasyon (plastiklik) oluştuğu zaman şişme özelliği olmayan tanecikleri karıştırmak suretiyle plastiklik hızlıca giderilebilir. Piroliz altında, vitrinit erir ve şişer, inertinit erimez ve kütlesinden sadece küçük bir kısım kaybeder, liptinit erir ancak şişme ya da aglomerasyon yapmaz, kütlesinin büyük bir kısmını kaybeder. (Wagner, 2008).

Gazlaştırılmak istenen kömürün kekleşme özelliği kullanılacak gazlaştırıcının tasarımını etkiler. Kekleşen kömürlerin gazlaştırılması ancak özel olarak tasarlanmış gazlaştırıcılarda mümkün olabilir. Sabit yataklı gazlaştırıcılar kekleşme indisi (FSI) 3'den az olan kömürlerle sınırlıdır. Karıştırıcılı hareketli yataklı gazlaştırıcı sistemleri için bu sınır 9'a kadar çıkabilmektedir. Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda yüksek kekleşme eğilimindeki kömürler aglomerasyona ve zayıf yataklanmaya sebep olabilirler. Bu gibi durumlarda ön işlem yapılarak (kısmi oksitleme) uçucuların azaltılması ile kekleşme etkisi azaltılır. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar kekleşme eğiliminden etkilenmez. Bu nedenlerle gazlaştırıcı tasarımının kullanılacak kömürün kekleşme özelliği göz önünde tutulur. En çok hareketli yataklı ve akışkan yataklı gazlaştırıcılar için kullanılan analizlerden olan serbest şişme indisi, kömürün ısındığı zaman birbirine yapışıp yapışmadığını gösterir. Bitümlü kömürler için kullanılan serbest şişme indisi alt bitümlü ya da linyit kömürleri için sıfırdır. Gazlaştırıcılarda sıcaklık profillerinden dolayı, sıcaklık yükseldiği zaman kütlenin yapışkan olduğu bir aşamaya geçilir yani büyük bir kek gibi olur ve kekleşme süreci gerçekleşir. Bu sebeple serbest şişme indisi kekleşme eğilimini göstermiş olur (Lau, 2014).

Kömürdeki pirit içeriğinin sodyum silikatın yanı sıra akışkan yataklı gazlaştırma esnasında aglomerasyona sebep olduğuna inanılmaktadır. Bu yüzden yüksek alkali içeriğe sahip kömür ile çalışılırken çalışma sıcaklığının dikkatli kontrolü gereklidir. Düşük şişme indisli (kekleşmesi düşük olan) kömürler yatağın aglomerasyonunu önlemek için tercih edilebilir. Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda yüksek kükürt içeriğine daha fazla toleransla yaklaşılabilir ve sorbent kullanılarak kısmen (% 90) kükürt yatakta muhafaza edilebilir (Collot, 2005).

4.1.1.1.8 Reaktivite. Kömürlerin gazlaşma reaktifliklerini belirlemek için azot/buhar karışımı kullanılan ortamda, farklı sıcaklıklarda, TGA (termo-gravimetrik analiz) testleri yapılır. TGA analiz sonuçları ile kütle kaybı hızı, uçucusuzlaştırıldıktan sonra karbon dönüşüm oranları izlenerek reaktiflik gözlenir. TGA sonuçları gazlaşma hızı hesaplamalarında kullanırken, PTGA (basınçlı termo-gravimetrik analiz) tasarlanan ortam (basınç, sıcaklık) için bağıl reaktifliği belirler. Örneğin maksimum 1050 ºC sıcaklığa kadar yükselen durumlarda uçucusuzlaştırma aşaması sonrası karbon dönüşüm oranları % 90 ve üzeri ise çok reaktif olan kömür için gazlaştırma reaktöründe yüksek sıcaklık gerekmediği, bu sıcaklıklarda kekleşme tehlikesinin olmayacağı bu nedenle akışkan yataklı prosese ve kuru-külsüz sabit yataklı prosese uygun olabileceği gibi gözlemler yapılabilir (Lau, 2014).

Kömürün reaktivitesi gazlaştırıcı sıcaklık profili, gazlaştırıcı tasarımı ve gazlaştırıcı performansı açısından önemlidir. Kömürlerin reaktivitesi kömürleşme derecesi arttıkça azalmaktadır. Düşük kömürleşme dereceli nispeten genç kömürler genellikle yüksek reaktivite ve yüksek karbon dönüşümü gösterirler. Yüksek Ca içerikli Yeni Zelanda kömürlerinde yapılan çalışmalar sonucunda, katalizör görevi gören alkali element içeriğinin çarın gazlaşma reaktivitesini arttırdığı tespit edilmiştir. Alkali ve toprak alkali metallerin ve bunların oksitlerinin katalitik etkide bulunması, kömürün sadece maseral bileşimi ile reaktivite tahmininin zor olduğunu, ayrıca bununla birlikte ısı, basınç ve zaman etkenlerinin de bir sonucu olduğunu gösterir (Tarakçıoğlu, 2015).

Reaktivite bağlamındaki, çarın buhar ile tepkimesiyle karbon dönüşüm hızı özelliği, çarın kimyasal yapısı, fiziksel yapısı (boşluk miktarı, yüzey ve aktif yüzey alanları) ve katalizör etkisi (mineral içeriği) ile kontrol edilir (Yılmazoğlu, 2012; Wagner, 2008). Düşük kaliteli olan genç kömürlerin özgül yüzey alanları diğerlerine göre daha büyük olduğu için reaktiviteleri yüksektir (Yılmazoğlu, 2012).

Vitrinit en yüksek gazlaşma reaktivitesi olan maseraldir, inertinit 15 bar basınç değerleri üzerinde kalma süresi ile ve artan basınçla gazlaşması ile bilinir. Liptinit ise gazlaşma öncesi piroliz edilir. Kömür çar reaktivite ölçümünün belirlenmesi için

uluslararası kabul görmüş standart bir yöntem yoktur. Örneğin gazlaşma reaksiyonu reaktivite tahmini için, Sasol-Lurgi sabit yataklı gazlaştırıcıda bekleme oranın belirlenmesi, CO_2 reaktivite hızının kabul edilebilir olup olmadığına termo-gravimetrik analiz tekniği ile bakılmıştır. Akışkan yataklı gazlaştırıcıların tipik sıcaklıkları 800 ila 1050 ºC aralıklarındadır. Kömür çarının bu sıcaklıkta minimum karbon kalması için kömür reaktifliğinin yüksek olması gereklidir. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılarda ise reaktif kömürler genellikle düşük sıcaklıklarda gazlaşırlar, soğuk gaz verimini arttırırlar ve ayrıca düşük reaktiviteli hammadde karışımlarında yüksek sıcaklık ihtiyacını karşılayarak yeterli karbon dönüşüm verimliliği sağlarlar (Wagner, 2008).

Kömürün reaktivitesi ve çar yüzeyindeki aktif yerlerin sayısı arasında bir ilişki vardır, bu duruma yakıt olarak jeolojik yaşın yanı sıra morfolojik karakteristiklerde tesir eder. İndirgeme bölgesinde üretilmiş çarın tane boyutu ve gözenekliliği indirgeme (gazlaşma) için uygun yüzey alanı oluşturmasının yanı sıra indirgeme reaksiyonlarının hızı, reaktör tasarımı ile kolaylaştırılır (Luque ve Speight, 2014).

Kömürlerin reaktiviteleri buhar ve düşük hidrojen içeriğiyle farklılaşır. Reaktif kömürler ya da kömürlerin çarları, buhar tesiriyle daha hızlı ve sürekli sıcaklık düşmesiyle daha az derecede reaktif olur. Reaktivitenin yüksek olmasının üç önemli etkisi vardır. Birincisi metan oluşumuna olumlu katkı sağlar. İkincisi oksijen ihtiyacını azaltır. Üçüncüsü cüruflaşmaya uğramadan, kullanılan birim hacim oksijen veya havaya karşılık daha az buhar kullanılır (Miller, 2005).

Yüksek reaktiviteli kömürler, gazlaştırıcıda orta sıcaklıklarda yüksek karbon dönüşümü sağlayarak tüm sistem verimliliğini arttırır. Gazlaştırma şartları altında kömür çarının reaktivitesi gazlaştırıcı boyut ve tasarımının önemli bir belirleyicisidir. Çar karbon dönüşümü ve gazlaştırıcı içinde ihtiyaç olan oksijen miktarı için çar reaktivitesi önemli etkenlerdendir (Collot, 2005).

Laboratuvar ölçekli bir çalışmada altı Avustralya kömürünün basınçlı termo-gravimetrik analiz (PTGA) cihazı kullanılarak reaktiviteleri incelenmiştir. Sonuçlar

sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar ile mukayese edilmiş, sonuçta çar reaktivite değişiminin etkisi en yüksek, hava üflemeli MHI gazlaştırıcısında, en düşük etki ise Shell gazlaştırıcısında olduğu görülmüş. Bu farklılıkların sebebi fiziksel özelliklerin yanı sıra kimyasal değişiklikler, kömür derecesi olarak görülmüştür. Sabit karbon, uçucu madde veya spesifik enerjisi ile ilgili ilişki bulunmayan değişim sebebi, inorganik bileşenlerin katalizör olarak hareket ederek kömür reaktivitesi üzerine küçük etkilere sahip olabileceği üzerine açıklanmıştır (Collot, 2005).

Reaktifliği etkileyen etkenler tam olarak açıklanamamıştır. Genel olarak uçucu madde içeriğinin yüksek olması, uçucusuzlaştırma hızının yüksek olması, oksijen içeriğinin yüksek olması, kül kompozisyonunun katalizör etkisi ve gözeneklilik miktarının uygun olması reaktifliği arttırdığına inanılmaktadır (Lau, 2014).

4.1.1.1.9 Çar Yüzey Alanı ve Boşluk Boyutu. Kömürün gazlaşma hızı, reaksiyon gazların parçacık içine nüfuzu, karbon atomlarına teması ve katı parçacıktaki gaz difüzyonu gibi yapılar sayesinde yönlendirilir. Katı-gaz reaksiyonları sadece reaktif yüzey alanı ile ortaya çıkar ve minik boşluklarda reaktivite gerçekleşmeyebilir. Çar gözeneklilik derecesi (makro gözenek > 50 nm, mezo gözenek 2-50 nm, mikro gözenek < 2 nm) göz önüne alınması gereken önemli bir karakteristik özelliktir. Vitrinilert genellikle uçucusuzlaştırma sırasında şişer, mezo ve mikro gözenekler yüksek boşluklu yapılara dönüşür. İnertinit çar genellikle vitrinitten daha az reaktiftir bu yüzden mikro boşluklu çar yapısı gerektiği zamanlarda ihtiyaca göre daha cazip kömür tipi olabilir. Araştırma sonuçlarına göre, CO_2 molekülleri çarın yüzeyinde reaksiyona girerken buhar molekülleri ise tercihen iç gözenek yapısında tepkimeye girerler. Farklı maseral tipleri farklı çar tipleri meydana getirir, bu yüzden çarların farklı ajanlar kullanılarak en iyi gazlaştırma reaksiyonları ve yanma karakteristikleri belirlenmelidir (Wagner, 2008).

4.1.1.1.10 Petrografik Özellikler. Petrografi, kömür ve karbonun çar yapısına geçme evresinin izlenmesini sağlar bu sayede karbon dönüşüm işlemi esnasındaki değişim tespit edilebilir. Maseral içeriği çar formasyonunun belirlenmesinde en önemli etkendir. Diğer etkenler ise kömür oluşum süreçlerindeki sıcaklık, basınç,

zaman ve parçacık boyutudur. (Wagner, 2008). Petrografik özellik ve kömürleşme derecesi konularına Bölüm 2.4'te detaylı değinilmiştir.

Kömür tipinin belirlenmesi için vitrinit reflektans analizi uygulanır (linyit, alt bitümlü, bitümlü, kok, antrasit). Çar morfolojisi oluşumu büyük derecede kömürleşmeyi etkiler ve kömürleşme derecesi etkeni olan H/O oranı gazlaştırıcı performansını etkiler (Wagner, 2008).

Maseral analizi, mikro litoloji ve mineral grup analizlerinin bileşimi yeni kömür kullanımı çalışmalarında faal olarak kullanılan kaynakları karşılaştırma yapma olanağı sunar. Gazlaştırma esnasındaki performans ya da kimyasal analizlerdeki her türlü anomalileri, harmanlama reçetelerini, organik ve inorganik birleşmeleri, majör mineral gruplarını karşılaştırma olanağı sağlar (Wagner, 2008).

Ayrışma derecesi (Weathering Index Analysis, WIA), kömür ve kömür karışımlarının ayrışma (oksidasyon) derecelerinin miktarlarını ve niteliklerini belirler. Bir dizi çalışmalarda, inertinitçe zengin kömürler ile yüksek içşel nem içerikleri arasındaki bağ incelenmiştir ve sonucunda ham sentez gazında ince tanecikli taşınmadan dolayı artış gözlemlenmiştir. Yüksek nem içeriği sayesinde oluşan çatlakların, inertinit parçacıkların içinde yüzey alanını artırdığı belirlenmiştir. Bu tespitin gösterdiği üzere, yüksek nem içerikli kömürler yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında kuruyarak yarattıkları boşluklarda daha çok buhar akımı sağlamaktadır. Sentez gazı üretim hızındaki artışın sebebi bu boşluklar sayesindeki artan yüzey alanı ile reaksiyonun artışı olarak raporlanmaktadır (Wagner, 2008).

Çar morfolojisinin (şekli, boyutu, kalınlığı, boşluk oranı, reflektansı) kömürün yakılması ve gazlaştırılması üzerinde önemli etkileri vardır. Oksijenli yahut oksijensiz ortamlarda artan sıcaklıklara maruz bırakılarak, maseral davranışının izlediği karakteristik yol ile son haldeki çar morfolojisinin belirlenmesi kömürün ana özelliklerinin bilinmesi açısından önemlidir. Gazlaşma (indirgeme) oluşumu çarın yüzey karakteri ile ilgilidir (Wagner, 2008).

4.1.1.2 İnorganik Bileşenlerin Gazlaştırma Prosesine Etkileri

Mineral madde dönüşümü ve cüruf oluşumu direk kömürün özellikleri ile ilgilidir ve belirli bir gazlaştırma prosesi için hammadde uygunluğunu etkiler. Bu sebep ile minerallerin kimyası ve etkileşimleri önceden bilinmelidir. Mineral maddenin gazlaşma esnasındaki davranışlarının tespiti, kül ya da cüruf özelliklerinin (akma, boyut, bileşimi) bilinmesi, dönüşüm hızı, reaktörün kül yatağının boyutları, kül ya da cüruf uzaklaştırma ekipmanlarının yapısal tahmini için gereklidir. Gerçekleştirilmesi gereken temel analizler şunlardır; kül içeriği, kül oksit analizinin fonksiyonu olan kül bileşimi, kül ergime özellikleri ve öğütülebilirlik indisi (Wagner, 2008).

Kömür içeriğinde birçok elemente rastlamak mümkündür. Kömürde bulunan elementlerden bazıları şunlardır; As, B, Ba, Be, Br, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cs, Cu, Eu, F, Ge, Hf, Hg, La, Mn, Mo, Ni Pb, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Sr, Th, Ti, U, V, W. Genellikle elementel analiz sonucunda milyonda gram olarak ifade edilen miktarlar çevre şartları açısından önemlidir (Yılmazoğlu, 2012).

4.1.1.2.1 Kül İçeriği. Kömür içinde bulunan inorganik maddeler, gazlaştırma esnasında oksitlenerek ya da parçalanarak geride genellikle oksitlerden oluşan bir artık bırakırlar. Bu artığa "kömürün külü" külün oluşmasına neden olan inorganik maddelere de "kömürün mineral madde içeriği" adı verilir. Yüksek kül içerikli kömürler gazlaştırma sırasında sorunlara neden olur. Kül içeriği arttıkça kömürün ısıl değeri, yanıcı gazlaştırılacak madde miktarları azalmakta; buna bağlı olarak gazlaştırma verimi düşmektedir. Kül içerik artışı kömürün gazlaşması güçleştirmekte, belirli bir kül oranından sonra engellemektedir. Fazla kül, reaktörlerin kapasitesinin düşmesine neden olur. Farklı tip kömürlerin kül içerikleri % 1'den % 50'ye kadar değişebilir. Kül giderme işlemi ile bu miktar azaltılabilir. Kül, sabit yataklı sistemlerde indirgenme bölgesi altında, yakıt yatağının tabanında biriktirilir. Şayet erimemişse, mekanik olarak uzaklaştırılır. Erimişse, sıvı halde dışarı alınmaktadır. Hareketli yataklarda kül, her zaman sıvı tortu olarak uzaklaştırılır. Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda kül, yakıtla karışık olduğundan özel bir sorun yaratmaktadır. Yakıtı ve külü birbirinden ayırmak gerekmektedir. Hareketli

ve akışkan yataklı sistemlerde, külün ayrılması karbonun kül içinde kalması halinde büyük miktarlarda karbon kaybına neden olabilir. Kül, içerik bakımından asit veya baz karakterli olabilir (Bozkurt, 2005).

Mineraller, taş kömürlerinin reaktivitesi üzerinde katalitik etkiye sebep olabilir ancak linyitler üzerindeki katalitik etkisi daha belirgindir. Ca, K ve Na içeren minerallerin çar reaksiyon hızını arttırarak katalizör etkisi yarattığı ve bu minerallerin maseral ile birleşmelerinin çarın boşluk hacmini geliştirdiği belirlenmiştir. Si ve Al bileşikleri çar yüzeyindeki karbon ile reaktan gaz arasında teması kestiği için gazlaştırma reaksiyonlarını engelleme eğilimindedir. Kömür hammaddesinin kül içerik bilgisi uygulamalar için ekonomik ve pratik bilgiler verir. Örneğin belirli bir sürüklemeli akışlı gazlaştırıcıya, diğer bir kömüre göre nispeten yüksek kül miktarı olan bir kömür beslediğiniz zaman gazlaştırıcı için oksijen miktarında artış gerçekleşir, cürufta ısı kaybı ve kazanım kaybı yaşanır, hacim kaybı meydana gelir sonuçta verimlilikte düşme olur (Wagner, 2008). Ayrıca ticari gazlaştırıcılardaki tükenmiş refrakterlerde yapılan analizlerin sonucunda, kömür cürufunda SiO_2, CaO, demir oksit içeren bazı bileşikler krom refrakter malzemelere derinlemesine nüfuz ederek çatlak oluşumuna sebep olduğu ve bu sayede malzeme kaybına yol açtığı açıklanmıştr (Collot, 2005).

Mineral madde içeriğinin katalitik etkisi, kullanılan kömür tipine bağlı olarak çeşitli etkilere sahiptir. Bazı karşılaştırmalar sonucunda kül içeriğinin artışı ile çar dönüşümünün arttığı görülmüştür. Örnek olarak, Ba, Co, Cr, Mn ve V gibi uçucu olmayan iz element davranışı endüstriyel gazlaştırıcıda izlenmiş ve sonuç olarak gazlaşma prosesi esnasında element konsantrasyonları farklı bileşiklere değişmiştir. Bu, muhtemel belirli minerallerin gazlaşma esnasında katalitik etkiye neden olabildiği sonucunu doğurmuştur (Van Der Merwe, 2011).

4.1.1.2.2 Kül Ergime Sıcaklıkları. Asit/baz oranı kül ergime davranışları ile bağlantılı en sık kullanılan parametredir. Ancak kül ergime davranış karakteristiklerini tam olarak belirlemek zordur çünkü kömür külü bölgesel olarak farklı içeriklerde olur ve farklı kimyasal davranışlar gösterir. Kömür külü

bileşimindeki Ca ve Fe içeriği kül ergime davranışı için gösterge olabilir. Yüksek Ca, Fe içeriğinin cüruf yapıcı flaks etkisi göstermesinden dolayı kül ergime sıcaklığı düşük olur. Bu kömürlerin akışkan yataklı gazlaştırıcılarda kullanımında yapışma, aglomerasyon eğilimi yüksek olur ve ısı iletimlerinde sorunlara yol açar (Collot, 2005; Wagner, 2008). Kül ergime sıcaklığı verisi (AFT), gazlaştırma esnasında mineral madde dönüşümü sonucu gerçekleşen kül aglomerasyonu, klinkerleşme ve cüruf davranışı hakkında rehber olarak kullanılmaktadır. Kül cüruflaşması sabit yataklı gazlaştırıcı içinde bölgesel kanallaşmalara, basınç kaybına ve istikrarsız gazlaştırıcı operasyonuna sebep olur. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılarda ise cüruf atım sistemine ve bu sistemin bakımına ihtiyaç duyulur (Wagner, 2008).

Cüruflu gazlaştırıcılarda kül, gazlaştırıcı duvarından aşağıya akar ve erimiş cüruf olarak atılır. Bu yüzden cüruflu gazlaştırıcılarda kullanılmak için seçilen kömürlerin gazlaştırıcının çalışma sıcaklığının altında bir kül füzyon sıcaklığına sahip olması gerekir. Kömürün kül ergime sıcaklığının, küllerin kimyasal bileşimi (asidite) ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmiştir (Tarakçıoğlu, 2015).

Gazlaştırıcı tasarımı yapılırken kül analizi, kimyasal bileşimi ve sıcaklığa göre davranışları tamamen incelenmelidir. 1993 yılında 26 kömürde yapılan araştırmada kül ergime sıcaklığını belirlemek için külün (asidite) kimyasal bileşiminin bir fonksiyonu olarak bir yöntem (4.1) geliştirilmiştir (Collot, 2005). Asiditenin tanımı şu şekildedir;

$$Asidite = \frac{SiO^2 + AI_2O_3}{Fe^2O^3 + CaO + MgO + Na^2O + K_2O} \quad (4.1)$$

Asidite yöntemi doğrulaması için MHI teknolojisi tarafından oksitleyici koşullarda cüruf üreten pilot gazlaştırma tesisi yapılmış ve üretilen cüruflar analiz edilerek asidite yöntemi ile elde edilen kül ergime sıcaklığı sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda kül kompozisyonu (asidite) ile kül ergime sıcaklığı arasında doğrulayıcı bağlılığı ve bu ikisi arasında ilişkiyi veren denklem (4.2)'de verilmiştir. Tf; Kül ergime sıcaklığı, X; asidite olan denklem şu şekildedir;

$$Tf = 27.7931 * X + 1236.89 \quad (4.2)$$

Bu asidite yöntemi, daha sonra kömür harmanlama miktarları ve buna göre eklenecek flaks (ertiken madde) miktarını belirlemek için kömür külü ergime sıcaklığının tahmini için kullanılmış, elde edilen sonuçlar flaks ilavesi için yapılan asidite tahminlerinin hassas olduğunu göstermiştir. Flaks eklendiği zaman, minör oksitlerin önemli ölçüde kül ergime sıcaklığı üzerine etkisinin azalması ile bu durum açıklanmıştır (Collot, 2005). Denklemde görüldüğü üzere silika ve alümina miktarı kül ergime noktasını yükseltirken, kalsiyum, demir, sodyum, potasyum ve magnezyum miktarı ise düşürmektedir.

Sabit yataklı gazlaştırıcılarda, yanma bölgesinin en yüksek sıcaklığının küllerin ergime sıcaklığının altında olması gerekmektedir. Bunun için sisteme daha fazla hava ve buhar verilmesi gerekmektedir. Küllerin ergime sıcaklığı ne kadar küçük olursa, kullanılması gereken buhar, oksijen ve hava miktarları da o kadar az olur. Kömür ne kadar aktif ise buhar karbonla o kadar düşük sıcaklıklarda ve hızlı endotermik reaksiyon vermektedir (Bozkurt, 2005).

Cürufsüz gazlaştırıcılarda maksimum çalışma sıcaklığı kül ergime sıcaklıkları tarafından belirlenir ve bu tip gazlaştırıcılarda yüksek ergime sıcaklık özelliği tercih edilir. Cüruflu sistemlerde ise bu özellik aranmaz (Lau, 2014).

Kül ergime ve yumuşama sıcaklıkları, redükleyici koşullarda oksidatif koşullara oranla daha düşüktür bu sebeple redükleyici ve inert ortamlarda kül ergime sıcaklığı tayini yapılmalıdır. Türkiye'nin farklı kömür tiplerinin küllerinin ergime sıcaklıkları ile bileşimleri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve külün Na_2O, K_20, CaO ve MgO içeriklerinin artmasının, erime sıcaklığında düşüşe neden olduğu saptanmıştır (Tarakçıoğlu, 2015).

Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda oluşan H_2S, COS gibi kirletici gazlar, kireç taşı ve dolomit kullanılarak kalsiyum ve/veya demir sülfit şeklinde yatakta tutulmaktadır. Tutma etkinliği % 90 civarındadır. Yüksek kükürt içerikli kömürlerde yatak içerisine

eklenen kireç taşı, katı miktarını artırarak maliyeti arttırır. Tutma işlemi; kömür külü kimyasında alkalinin bulunmasından olumsuz etkilenebilir. Kalsinasyon yolu ile sorbent aktivasyonunun sağlanabilmesi için 870 °C veya daha fazla sıcaklık gerekir. Bu sıcaklıkta alkalilerin akışkan yatakta birikmesi muhtemeldir. Dolayısıyla yüksek alkali oranına sahip kömürlerin gazlaşmasında, karbon dönüşümünün yüksek seviyeye çıktığı sıcaklıkların kontrol edilesi gerekir (Tarakçıoğlu, 2015).

4.1.1.2.3 Kül Viskositesi ve Kritik Viskosite Sıcaklığı (Tcv). Kül bileşimine bağlı olan kül viskozitesi, curüflü gazlaştırıcılarda en kritik faktörlerden biridir. İki tip cüruf davranışı vardır. Tip 1, camsı davranış sergileyenidir. Bu tip cürufun soğuma ile viskositesi artar, öngörülebilir ve süreklidir. Tip 2 ise, soğuma esnasında kristalin davranış sergiler ve bunun sonucunda akış, Newton yasalarına aykırı hareket eder ve artan cürufun viskositesi hızla kritik viskosite sıcaklığının (Tcv, kritik viskosite sıcaklığı) altına iner. Bu sebeplerden dolayı viskosite modelleri, cüruflu kömür gazlaştırma proseslerinin kömür külü davranışlarını tahmin etmek için geliştirilmiştir. Bu modeller operasyon parametrelerinin (kömür seçimi, harmanlama, flaks ihtiyacı) optimum şartları oluşturması, stabil proses şartlarını yaratmak ve işletim maliyetlerini azaltmak için gereklidir. Kristalin davranış gösteren cüruf söz konusu ise, operasyon güvenliği için minimum gazlaştırıcı operasyon sıcaklığı ile çalışılmalıdır. Kritik viskosite sıcaklığı külün kompozisyonuna bağlıdır (SiO_2/Al_2O_3). Kül ergime sıcaklığı düşük olan kömürlerin uygulama çözümleri için sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılarda çeşitli kömürlerin harmanları, flaks eklemesi ile birlikte kullanılabilir (Collot, 2005).

4.1.1.2.4 Kükürt ve Klor İçeriği. Gazlaştırma esnasında kömür içeriğindeki kükürt, H_2S gazına dönüşür. H_2S içeren gazlar sentez gazı soğutuculardа yüksek korozif etki yapar ve ısı değişim sistemlerine zarar vererek ısı kaybına sebep olur. Bu yıkıcı etki kükürt uzaklaştırma ve kazanım sistemlerinde maliyet artışına sebep olur (Collot, 2005).

Tipik bir kömürde kükürt içeriği % 1 ila 7 arasında değişebilir. Düşük sülfür içeriği, gaz temizleme biriminde düşük H_2S/CO_2 oranı verir ve bu durum kükürt geri

kazanım devresinin tasarımında belirleyici olabilir (Higman ve Burgt, 2008). Yüksek kükürt ve klor içerik problemleri tasarım ile çözülebilse de kükürt miktarının % 3,5 ve klor miktarının % 0,4 değerlerini aşmaması tercih edilir (Mastelerz ve diğer., 2005).

Gazlaştırıcı için dikkat edilmesi gereken elementlerden biri de klor'dur. Klor, 350-800 ºC arasında erir ve ham sentez gazın soğutulduğu soğutucuların üzerini kaplayarak (yapışma, *fouling*) ısı transferini kötü etkiler. HCI (hidroklorik asit) oluşumu ya da NH_4CI (amonyum klorür) oluşması gerçekleşerek korozyon tesiri artar. Bunun sonucunda, sentez gazın soğutucudan çıkış sıcaklığı artar ve gaz temizleme ünitesi çalışmayabilir (Yılmazoğlu, 2012).

4.1.1.2.5 Öğütülebilirlik İndisi (HGI). Öğütülebilirlik indisi olan HGI, kömürler arasında öğütülebilirlik ve boyut dağılımı karşılaştırmasında kullanılır. Şlam kömür beslemeli gazlaştırıcılarda dikkate alınan önemli bir özelliktir. Eğer iri boyut dağılımı kullanılırsa yüksek katı içerikli şlam oluşturulur ancak iri parçalar küçük boyut dağılımına oranla daha düşük gazlaşma dönüşümü sağlarlar (Collot, 2005). Öğütülebilirlik indisi öğütme maliyetleri ve zorlukları ile ilgili bilgi verir. Örnek olarak zor öğütülen bir kömürün gazlaştırıcıya beslenmesi ve maliyetleri tüm sistemi bağlar (Lau, 2014; Higman ve Burgt, 2008). Öğütülebilirlik özellikleri dışında kömürün sertlik derecesi gazlaştırma için etkisiz bir parametredir (Wagner, 2008).

4.1.2 Türkiye Kömür Özelliklerinin Gazlaştırma Prosesine Uygunluklarının Karşılaştırılması

Gazlaştırıcı sistemlerin belirtilen teknolojik parametre farklılıkları sebebiyle Türkiye kömürlerinin karakteristik özellikleri ile gazlaştırma teknolojilerine uygunlukları Bölüm 3'te açıklanan üç farklı tip gazlaştırıcı teknolojisi kriterleri doğrultusunda yapılmıştır. "Kömür seçimi" başlığı altında detaylandırılan kömür özelliklerinin teknolojik olarak uygunluklarının karşılaştırılabilmesi için kriterler Tablo 4.2'de derlenmiştir.

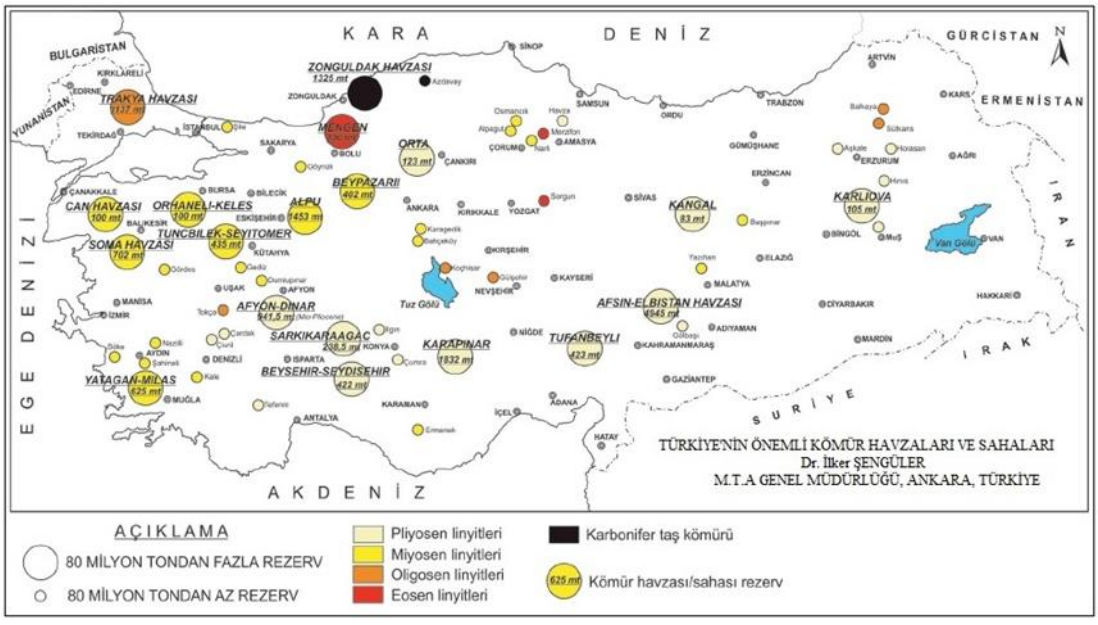
Tablo 4.2 Kömür karakteristiklerinin gazlaştırma teknolojileri uygunluk parametreleri

Parametreler	**Sabit- Hareketli Yatak**	**Akışkan Yatak**	**Sürüklemeli Akışlı Yatak**
Nem miktarı (% ağırlıkça, orj. baz)	Kuru 2 % Şlam 10 %	< 55 %	Geniş aralıklı
Kalorifik değer (alt ısıl değer, orj. baz)	Tercih edilen 2000 kcal/kg <	Tercih edilen 2000 kcal/kg < Min 1200 kcal/kg	Tercih edilen 2000 kcal/kg <
Uçucu miktarı (% ağırlıkça, orj. baz)	Yüksek uçucu	Yüksek uçucu	Yüksek uçucu
Kül miktarı (% ağırlıkça, orj. baz)	< 35 %	< 40 %	< 25 %
Kül bileşimi (Major min. %, kuru baz) (Minor XRD, %)	Düşük Fe_2O_3, SO_3 ve sodyum silikalar Düşük alkali içeriği	Düşük alkali içeriği (aglomerasyon istenmediği sınır durumlarda)	Düşük alkali içeriği (aglomerasyon istenmediği sınır durumlarda)
Kül ergime sıcaklığı (AFT), T sıcaklık (°C)	Kuru kül T < AFT Cüruflu T > AFT	T < AFT AFT > 1100 °C	T > AFT AFT < 1400 °C
Yakıt oranı (sabit karbon/uçucu, % ağırlıkça orj. baz)	Yüksek yakıt oranı	Yüksek yakıt oranı	Yüksek yakıt oranı
O/C oranı (% elementer)	Yüksek oran Yüksek vitrinit	Yüksek oran Yüksek vitrinit	Yüksek oran Yüksek vitrinit
Reaktivite (Major min. %, kuru baz) (Minor XRD, %)	Kuru küllü için; Yüksek reaktivite,vitrinit oranı, uçucu ,Na, K, Ca (katalizör takviyesi için) Cüruflu; geniş aralıklı	Yüksek reaktivite, vitrinit oranı, uçucu miktarı. Yüksek Na, K, Ca ile katalizör takviyesi	Geniş aralıklı
Kükürt miktarı (% orj. Baz) Klor miktarı (%, kuru baz)	Düşük miktarlı tercih edilir genellikle, kükür (S) < 3,5 % sınır klor (CI) < 0,4 %	Düşük miktarlı tercih edilir genellikle, kükür (S) < 3,5 % sınır klor (CI) < 0,4 %	Düşük miktarlı tercih edilir genellikle, kükür (S) < 3,5 % sınır klor (CI) < 0,4 %
Tane boyu dağılımı	5-80 mm	< 10 mm	< 0,2 mm
Maseral (petrografik analiz, %)	Genellikle yüksek vitrinit (düşük gözenek aranınca yüksek inertinit)	Genellikle yüksek vitrinit (düşük gözenek aranınca yüksek inertinit)	Genellikle yüksek vitrinit (düşük gözenek aranınca yüksek inertinit)
Öğütülebilirlik (ASTM-D-409-71) Parçalanma	Düşük HGI < 50 Parçalanma istenmez	Orta HGI 40 - 80 Parçalanma istenmez	Yüksek 50 < HGI (kolay öğütme) Parçalanma önemsiz

Gazlaştırma prosesinde gerekli olan kömür karakteristiklerinin teknolojik uygunluk potansiyellerinin incelenmesinde Tablo 4.2 tüm kömür sahaları için kullanılabilir. Türkiye kömürlerinin uygunluklarının araştırılması çalışmam kapsamında kaynak rezerv miktarları yüksek olan, Türkiye kömürlerinin çoğunluğunu kapsayan bazı sahalar incelenmiştir. Elde edilen veriler kapsamında incelenmiş olan Türk kömür özelliklerinin gazlaştırma proseslerine uygunlukları çalışmamda da belirtildiği üzere ilk aşama olan uygun kömür bilgilerini içermektedir. Herhangi bir gazlaştırma projesi oluşturmak için kömür karakteristik bilgilerinin ışığında analizler, denemeler ve fizibilite çalışmaları yapmak ticari kapsamdaki aşamalar için gereklidir.

4.1.2.1 Türkiye Kömürlerinin Özellikleri

Ülkemizde en önemli taşkömürü rezervleri Zonguldak havzasındadır ve bugüne kadar 1200 m derinlik seviyesine kadar yapılmış rezerv çalışmaları sonucu 1.3 milyar ton rezerv belirlenmiştir. Görünür rezerv miktarı ise 506 milyon ton olarak kabul edilmektedir (Türkiye Taşkömürü Kurumu, [TTK] 2015). Gazlaştırma prosesine uygunlukları açısından Zonguldak Karadon taş kömürü incelemesi EK-26'da analizi ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.1 Türkiye'nin önemli kömür havzaları ve sahaları (Şengüler, 2015)

Türkiye'de linyit yatakları, Alpid evresinde dağ oluşumu sayesinde dağlar arasına sıkışan sediman havzaların içinde gelişmiştir. Miyosen ve Pliyosen yaşlı linyit yatakları Eosen ve Oligosen yaşlı linyit yataklarına kıyasla daha yüksek rezerv kapasitesine sahiptir (Şengüler ve diğer., 2015). Şekil 4.1'de Türkiye kömür havzaları ve sahaları gösterilmiştir. Ülkemizde linyit ve alt bitümlü kömürleri birkaç istisna saha dışında Tersiyer dönemde oluşmuştur (Tuncalı ve diğer., 2002).

Tablo 4.3 Türkiye linyit sahaları ve rezerv miktarları (Şengüler ve diğer., 2015)

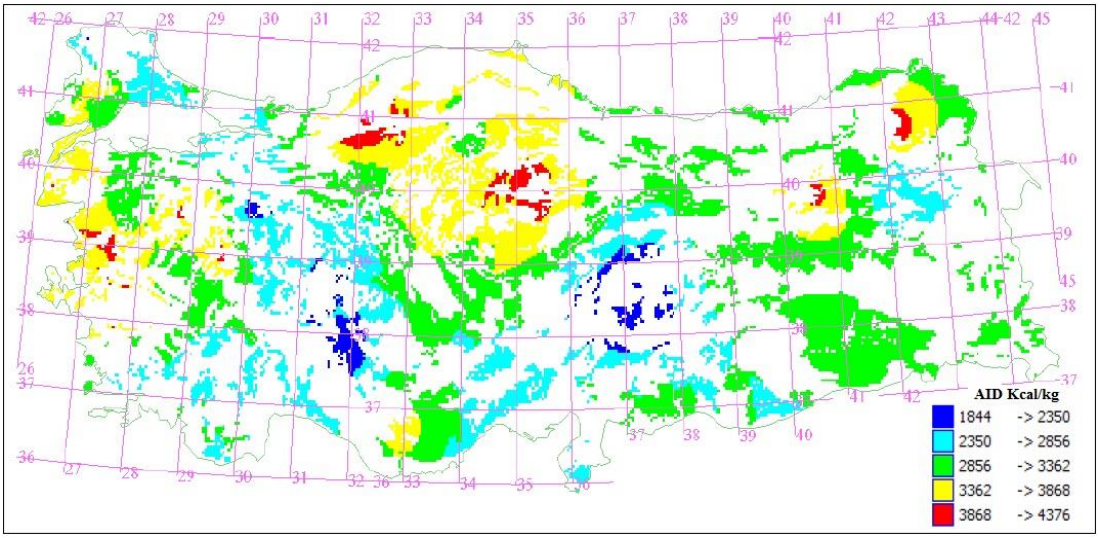
Linyit Sahaları	**Rezerv (x 1,000,000 metrik ton)**	**Linyit Sahaları**	**Rezerv (x 1,000,000 metrik ton)**
Adana-Tufanbeyli	323,3	Isparta-Sarkikarağaç	238,5
Bursa-Keles	68,5	Denizli-Çardak	25,6
Çanakkale-Çan	73	Denizli-Civril	7,5
Konya-Ilgın	19,8	Konya-Ilgın	30,5
Kütahya-Tunçbilek	256,5	Amasya-Merzifon	9,2
Manisa-Soma	704,1	Malatya-Yazıhan	17,5
Tekirdağ-Saray	283,4	MTA	
Bolu-Göynük	37,8	Sivas-Kangal	98,5
Çorum-Dodurga	22,6	Kütahya-Seyitömer	180,5
Bingol-Karlıova	103,6	Muğla-Milas	249,5
Eskişehir-Alpu	1453,2	Muğla-Yatağan	155
Kırklareli-Vize	139,4	Bursa-Orhaneli	36,5
Diğer TKİ	68,8	Afyon-Dinar	941,5
TKİ		Diğer Özel	2302,1
Afşin-Elbistan	4831	ÖZEL	
Çayırhan-Beypazarı	425,9	TOPLAM TÜRKİYE	15510
Tekirdağ-Çerkezköy	214	TKİ: Türkiye Kömür İşletmeleri EÜAŞ: Elektrik Üretim A.Ş. MTA: Maden Tetkik ve Arama Özel: Özel sektör firmaları	
İstanbul-Çatalca	280		
Konya-Karapınar	1832		
EÜAŞ			

Türkiye linyit sahaları rezerv miktarı Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Türkiye'deki toplam linyit rezervi 15,5 milyar ton civarındadır ve bunları çoğunlukla düşük kalorifik değerli linyit yatakları oluşturur. Toplam linyit rezervinin % 90'lık kısmı

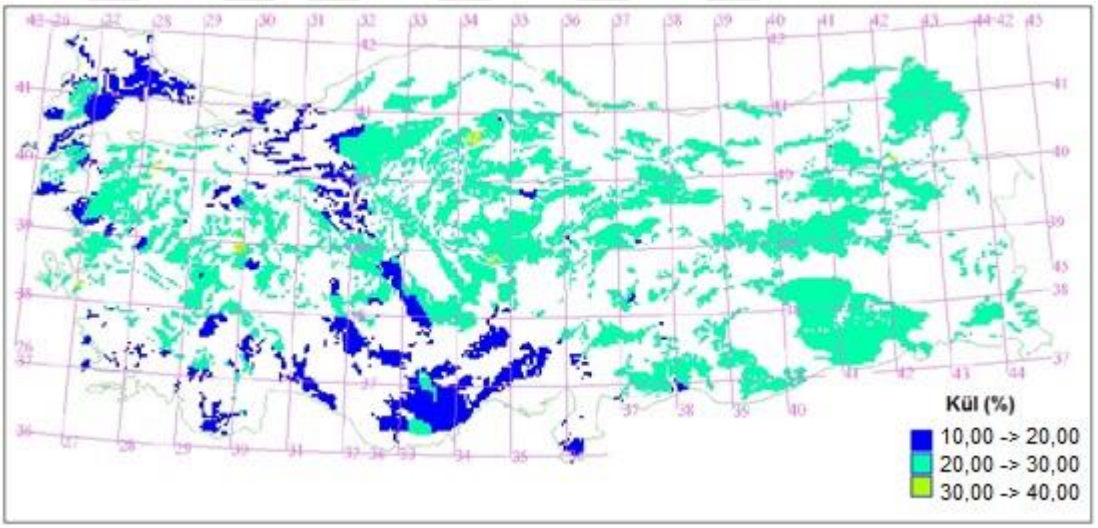
düşük kalorifik değer, yüksek nem, yüksek kül ve yüksek toplam kükürt içeriklidir. Bu özellik Türk linyitlerinin elektrik üretimi için termik santraller gibi güç santrallerinde kullanımını uygun hale getirir (Şengüler ve diğer., 2015).

Tez çalışmam doğrultusunda kömür uygunluklarının incelenmesi tabloda belirtilmiş olan sahalara uygulanmıştır. Denizli Çivril düşük rezerv miktarı sebebiyle, Malatya Yazıhan ve İstanbul Çatalca sahası veri yetersizliği sebebiyle incelenmemiştir. Tablodaki incelenen sahalara karşılık gelen rezerv miktarı; 15,5 milyar tondan incelenmeyen 2,7 milyar tonluk kısmını çıkardığımızda kalan, 12,8 milyar tondur. Bu linyit ve alt bitümlü sahaların analiz verileri ve gazlaştırma prosesi kömür uygunluk karşılaştırması Tablo 4.2 kriterleri kullanılarak ekler (EK1-….-EK25) kısmında aktarılmıştır. Türkiye kömürleri rezerv tablosunda (Tablo 4.3) "Diğer" kısmını oluşturan küçük ölçekli linyit ve alt bitümlü sahaların toplamını içeren yaklaşık 2,4 milyar tonluk miktar ayrı ayrı incelenmemiştir ancak bu sahalar içinden yapılmış olan gazlaştırma denemeleri ayrıca "Türkiye Kömürleri İçin Yapılmış Yer Üstü Gazlaştırma Çalışmaları" başlığı altında aktarılmıştır.

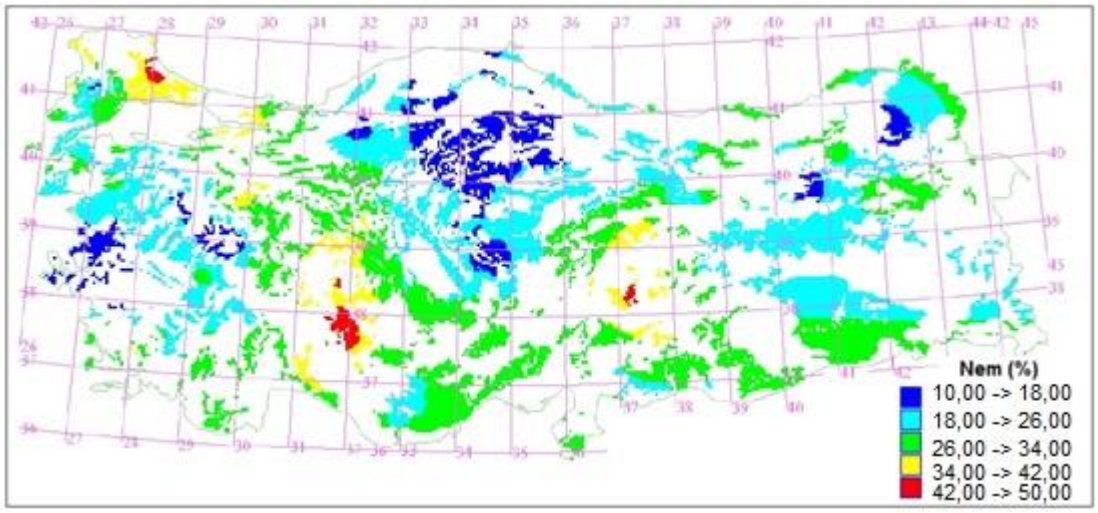
Atalay (2011), Türkiye Tersiyer dönemi kömürlerinin jeoistatistiksel açıdan incelemiş ve Tüm tersiyer sahalardaki kömür dağılımının ortalamasız krigleme yöntemi ile kestirimini yapmıştır. Çalışmasında kullandığı analiz verileri, MTA kurumunun yapmış olduğu Türkiye Tersiyer Kömürlerinin Kimyasal ve Teknolojik Özellikleri kitabı, Tuncalı ve diğer. (2002), tarafından aktarılmış 187 adet sahaya ait olan verilerdir. Kestirim sonuçları havzaların tamamının, kömürlerinin varlığı var sayımına göre yapılmıştır hali hazırda görünür tespit edilmiş 15.5 milyar tona karşılık bir hesaplama sonucu değildir. Bu varsayım kestirimene göre tersiyer kömürlerin % 99'u 2000 Kcal/kg ile 4000 Kcal/kg arasında kalmakta ve düşük bir oran ise 4000 Kcal/kg'ın üstüne çıkmaktadır. Kül içeriğinin % 10 ile % 40 arasında olma oranı % 97,42'dir. Nem içeriğinin % 15 ile % 25 arasında olma oranı % 94'tür. Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te Türkiye tersiyer sahalarının AID, nem ve kül miktarı analizlerinin tamamının var sayımana göre kestirim verileri Türkiye haritası üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Tersiyer sınırlar içerisinde AID'in dağılım kestirimleri (Atalay, 2011)



Şekil 4.3 Tersiyer sınırlar içerisinde külün dağılım kestirimleri (Atalay, 2011)



Şekil 4.4 Tersiyer sınırlar içerisinde nemin dağılım kestirimleri (Atalay, 2011)

Ülkemizde Güneydoğu Anadolu bölgesinde, Şırnak ve Silopi yörelerinde bulunan asfaltitler genellikle bölgede ısınma amaçlı kullanılmaktadır. 12 filon halinde bulunan asfaltit rezervleri yaklaşık 82 milyon tondur (Kavak, Connan, Erik, ve Yalçın, 2015). Gazlaştırma prosesine uygunlukları açısından Şırnak asfaltitlerinin incelemesi EK-27'de analizi ile birlikte verilmiştir.

4.1.2.2 Türkiye Kömürlerinin Yer Üstü Gazlaştırma Prosesine Uygunlukları

Türkiye kömürlerinin toplam kömür rezerv miktarı olan 16,9 milyar tonluk miktarın % 90'dan fazlasını oluşturan linyit ve alt bitümlü kömürlerinin (Tersiyer), yer üstü ve yer altı gazlaştırma prosesleri için kömürleşme derecesi, reaktivitesi, maseral yapıları, nem miktarı, kül ergime özellikleri, gözeneklilik özellikleri, yüksek uçucu içeriği gibi sebeplerle belli sınır limitleri içerisinde uyumlu olduğu önceki bölümlerde aktarılmıştır. Tersiyer kömürlerinin Türkiye çapında 187 sahadan yapılmış olan jeoistatistiksel kestirim verilerine göre; % 99'u 2000 Kcal/kg ile 4000 Kcal/kg kalori değerleri arasında, % 97,42'si % 10 ile % 40 kül miktarı arasında ve % 94'ü % 15 ile % 25 nem içeriği değerleri arasında olma olasılığındadır (Atalay, 2011). Temur, Orhan, ve Deli (2007), Türkiye Tersiyer kömürlerinin analik ortalama değer olarak % 24,88 kül, % 34 uçucu madde, % 3,49 toplam kükürt miktarı içerdiğini aktarmıştır. Linyit kömürlerinin 8,3 milyar tonajlı 2001 yılı verilerine göre

alt ısıl değer aralıkları şöyledir (Hepbaşlı, 2010); % 3,16'sı 1000 Kcal/kg değerin altında, % 65,58'i 1000-2000 Kcal/kg değer arasında, % 24,34'ü 2000-3000 Kcal-kg değer arasında, % 5,12'si 3000-4000 Kcal/kg değer arasında, % 1,8'i 4000 Kcal/kg değerden yüksektir. Bu oranlar gazlaştırma prosesleri kriterleri tablosundan (Tablo 4.2) görüleceği gibi tercih edilen değerler doğrultusunda umut vericidir. Uygunluk incelemesi için genel verilerin dışında sahaların bireysel detaylı incelenmesi gereklidir. Bunun için linyit rezervinin 12,8 milyar tonluk kısmına denk gelen 25 adet linyit sahasınının analiz değerleri ve kömür damarı özellikleri EK1-…-EK 25'te referansları ile verilmiştir [Baknz., Adana-Tufanbeyli (EK-1), Bursa-Keles (EK-2), Çanakkale-Çan (EK-3), Konya-Ilgın (EK-4), Kütahya-Tunçbilek (EK-5), Manisa-Soma (EK-6), Tekirdağ-Saray (EK-7), Bolu-Göynük (EK-8), Çorum-Dodurga (EK-9), Bingöl-Karlıova (EK-10), Eskişehir-Alpu (EK-11), Kırklareli-Vize (EK-12), Kahramanmaraş-Elbistan (EK-13), Ankara-Beypazarı (EK-14), Tekirdağ-Çerkezköy (EK-15), Konya-Karapınar (EK-16), Isparta-Şarkikaraağaç (EK-17), Denizli-Çardak (EK-18), Amasya-Merzifon (EK-19), Sivas-Kangal (EK-20), Kütahya-Seyitömer (EK-21), Muğla-Milas (EK-22), Muğla-Yatağan (EK-23), Bursa-Orhaneli (EK-24), Afyonkarahisar-Dinar (EK-25)]. Taş kömürü rezervinin 131 milyonluk kısmına gelen Zonguldak-Karadon taş kömür sahasının (Bknz., EK-26) ve asfaltit kömürlerini temsilen Şırnak-Silopi sahasının (Bknz., EK-27) analiz değerleri ve kömür damarı özellikleri EK-26 ve EK-27'de gösterilmiştir. Tüm sahaların verilerinin aktarıldığı eklerde ayrıca gazlaştırma proseslerine uygunlukları, önceden verilmiş olan yer üstü gazlaştırma parametreleri tablosu (Tablo 4.2) ve yer altı gazlaştırma parametreleri tablosu (Tablo 4.8) kriterleri ile değerlendirilmiştir. Sahaların eklerinde kömür özellikleri, analiz sonuçları ve proses uygunluk karşılaştırma verileri aktarılmıştır. Sahaların yer üstü gazlaştırma uygunluk inceleme sonuçları değerlendirilmiştir. Değerlendirme yapılırken herbir proses teknolojisi için değişmez kömür kriterlerinin tamamının o teknolojiye uygun olması baz alınmıştır. Değiştirilebilir olan boyut, öğütme gibi kıstaslara dikkat çekilmiştir. Yer altı gazlaştırma uygunluklarının inceleme sonuçları ise "Türkiye Derin Kömür Yataklarının Yer Altı Gazlaştırma Prosesine Uygunlukları" başlığı altında değerlendirilmiştir.

Adana-Tufanbeyli kömürlerinin kalori değerleri akışkan yataklı gazlaştırıcılar için alt sınır değere yaklaşmış olsa bile ergime sıcaklığı akışkan yataklı gazlaştırıcı çalışma sıcaklığından düşük olduğu için mevcut şartlarda gazlaştırma için uygunsuzdur. Kalori limitleri açısından diğer tip gazlaştırıcılar için de uyumsuzdur.

Bursa-Keles kömürleri yüksek nem içeriği sebebiyle ve kolay öğütülme ile gelen tozlaşma riski sebebiyle sabit-hareketli yataklı gazlaştırıcılara uyumsuzdur. Akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar için inceleme kriterleri bu proseslere uygundur.

Çanakkale-Çan kömürünün akışkan yataklı gazlaştırıcılarda kullanımı için kükürt miktarı dışında tüm kriterler limitler içerisindedir. Yüksek kükürt miktarı sentez gaz temizleme kapasitesini ve maliyetlerini etkilediğinden bu özellikler dikkate alınmalıdır.

Konya-Ilgın kömürlerinin akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar için inceleme değerleri uygundur ancak zor öğütülme değerleri sebebiyle boyut küçültme işlemi ve maliyetleri göz önüne alınmalıdır.

Kütahya-Tunçbilek kömürü gazlaştırma proseslerinden akışkan yataklı gazlaştırıcı reaktörleri için düşük ergime sıcaklığı özelliği sebebiyle uyumsuzdur. Sabit-hareketli yataklı gazlaştırıcılar için nem miktarı yüksektir. Kurutma işlemi ile nem giderilebilir. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar için diğer tüm kriterler uygunken sadece öğütme indisi değeri limit dışındadır. Öğütme maliyetinin önem kazandığı bu durum ile kurutma maliyetinin oluşturacağı durum kıyaslanırsa kurutma işlemi zor ve maliyetli olduğundan sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı prosesi Tunçbilek kömürlerinin gazlaştırılması için daha uygun gözükmektedir.

Manisa-Soma kömür gazlaştırması için akışkan yataklı gazlaştırıcılar ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar kömür kıstaslarına uygundur. Sürüklemeli akışlı sistem için öğütme maliyeti dikkate alınmalıdır.

Tekirdağ-Saray kömürleri için nispeten yüksek öğütme ve gaz temizleme maliyetleri göz önüne alınarak akışkan yataklı gazlaştırıcılar uygundur.

Bolu-Göynük kömürlerinin gazlaştırma ölçütleri akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar için uyumludur. İki teknolojik seçenek içinde öğütme maliyeti dikkate alınmalıdır.

Çorum-Dodurga kömürleri için üç tip gazlaştırıcı teknolojisi kıstaslar için uygundur. Akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı sistemler için öğütme maliyeti önemlidir.

Bingöl-Karlıova kömürleri düşük vitrinit oranına sahip olmasına karşın kriterler açısından akışkan yataklı gazlaştırıcı prosesleriyle uyumludur.

Eskişehir-Alpu kömürleri için mevcut veriler dikkate alındığında akışkan yataklı gazlaştırıcı prosesine göre uygunsuz kriter bulunmamaktadır. Kül ergime, vitrinit özellikleri, kül bileşimi gibi analiz verileri ulaşılabilir olduğunda da incelenmelidir.

Kırklareli-Vize kömürlerinin gazlaştırma kıstasları akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar için uygundur. İki teknolojik seçenek içinde öğütme maliyeti dikkate alınmalıdır.

Kahramanmaraş-Elbistan kömürleri düşük kalorilidir ve gazlaştırma prosesleri için tercih edilen değerin altındadır. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar için çalışma limitlerine uygun olan Elbistan kömürleri için öğütme maliyetleri de önem kazanmaktadır.

Ankara-Beypazarı kömür kriterleri akışkan yataklı gazlaştırıcılar için uygun limit değerlerdedir. Sabit-hareketli yataklı gazlaştırıcılar için nem miktarının yüksekliğinin yanı sıra yüksek öğütme indeksi ile parçalanma riski artar. Ufalanma, parçalanma özellikleri reaktörde tozlanma yaratıp gaz akışını bozabileceği için tercih edilmez.

Tekirdağ-Çerkezköy kömürlerine mevcut veriler ışığında bakıldığında akışkan yataklı gazlaştırıcılar için uygunsuz kriter bulunmamaktadır. Kül ergime, vitrinit özellikleri, kül bileşimi gibi analiz verileri ulaşılabilir olduğunda da incelenmelidir.

Konya-Karapınar kömürünün kalori değerinin düşük olması tercih edilmeyen bir unsurdur ancak akışkan yataklı reaktörlerin çalışma limitlerine uyar. Düşük kalorifik değere karşın yüksek rezerv miktarı dikkate alındığında teknik-ekonomik fizibilite yapılmalıdır.

Isparta-Şarkikaraağaç kömürlerine gazlaştırma prosesi öğütme maliyetleri göz önüne alınarak sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılarda uygulanabilir.

Denizli-Çardak ve Amasya-Merzifon kömürleri yüksek kül miktarı içermesi sebebiyle yer üstü gazlaştırma proseslerine orijinal halinde, günümüz teknolojik şartlarında uygun değildir.

Sivas-Kangal kömürünün kalori değerinin düşük olması tercih edilmeyen bir kriterdir ancak akışkan yataklı reaktörlerin çalışma limitlerine uyar. Öğütme maliyeti dikkate alınmalıdır.

Kütahya-Seyitömer kömürlerinin gazlaştırma proses kriterleri akışkan yataklı gazlaştırıcılar için uygundur. Kül miktarının sınır değerde olması sebebi ile sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı için uygun olmayabilir. Her iki sistem içinde öğütme maliyeti dikkate alınmalıdır.

Muğla-Milas kömürleri için nispeten yüksek öğütme ve gaz temizleme maliyetleri göz önüne alınarak akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar uygundur.

Muğla-Yatağan kömürleri akışkan yataklı ve sürüklemeli akışlı prosesler için uygun kıstaslardadır. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı sistemeler için öğütme maliyeti önemlidir.

Bursa-Orhaneli kömürü sürüklemeli akışlı ve akışkan yataklı gazlaştırma prosesleri için uygun özelliklerdedir.

Afyonkarahisar-Dinar kömürünün kalori değerinin düşük olması tercih edilmeyen bir özelliktir ancak akışkan yataklı reaktörlerin çalışma limitlerine uyar ayrıca öğütme maliyeti de önemlidir. Kül ergime, vitrinit özellikleri, kül bileşimi gibi analiz verileri ulaşılabilir olduğunda incelemeye dahil edilmelidir.

Taş kömürleri kekleşme, şişme, düşük reaktiflik özellikleri gösterdikleri için genellikle tercih edilmeyen yapısal özellikler içermektedir. Zonguldak-Karadon karbonifer yaşlı kömürler yüksek kükürt içeriği sebebiyle gazlaştırma reaktörlerine uygun değildir. Ayrıca vitrinit miktarı düşüktür.

Şırnak-Silopi asfaltitlerinin gazlaştırılması kül miktarındaki uyum sayesinde akışkan yataklı gazlaştırıcılarda mümkündür. Yüksek kükürt miktarı sentez gaz temizleme kapasitesini ve maliyetlerini arttıracağından yüksek kükürt özelliği göz önünde bulundurulmalıdır.

4.1.3 Türkiye Kömürleri İçin Yapılmış Yer Üstü Gazlaştırma Çalışmaları

Türkiye'de kömür gazlaştırma prosesi ilk uygulamaları 1853 tarihinde açılan Dolmabahçe Gazhanesi ile başlar muhtelif yerlerde açılan gazhaneler ile devam eder. En son Ankara-Maltepe'de 1929 yılında havagazı fabrikası faaliyet göstermiştir (Ünalan, 2010). Bu ilk uygulamaların dışında ticari olarak 1950-1974 yılları arasında Kütahya Azot İşletmelerinde amonyak üretimi için kömür gazlaştırma prosesi ile sentez gaz üretimi yapılmıştır. İlk kurulan tesiste 2 adet Winkler reaktörü kullanılmakta ve Haber-Bosch metodu ile 119 ton/gün kapasiteyle amonyak üretimi yapılmaktaydı (Yıldırım ve diğer., 1976). Winkler gazlaştırıcısının ürün sentez gaz kompozisyonu % hacim olarak; H_2 % 35, CO % 48, CH_4 % 2, N_2 % 1, CO_2 % 14 tür. Sentez gaz üst ısıl değeri 2600 Kcal/kg ve soğuk gaz verimi % 74,9'dur (Schobert, 1995). Kapasite artışı için yapılan ek tesiste ise 4 adet Koppers-Totzek gazlaştırıcısı kullanılmakta ve Casale metoduna göre amonyak sentezi yapılmaktaydı (340 ton

NH_3/gün, 50,000 m³/saat sentez gaz kapasitesi). Seyitömer linyitleri kullanılan Kütahya Azot tesislerinde yıllık 800.000 ton civarında kömür kullanılmaktaydı. Amonyak üretiminde kullanılan Seyitömer linyitinin tesis beslemesindeki tipik analiz değerleri; nem % 33, kül (susuz kömürde) % 30, kükürt (susuz ve külsüz kömürde) % 4, alt ısıl değer (susuz ve külsüz kömürde) 6200 Kcal/kg, HGI 30'dur. Elementer analiz değerleri (susuz külsüz kömürde) C % 63,96, H % 6,15, S % 4, N % 0,87, O % 25'dir. Kömürün kül yumuşama, ergime ve akma sıcaklıkları sırasıyla 1180 ºC, 1240 ºC, 1390 ºC'dir (Yıldırım ve diğer., 1976).

Günümüzde Türkiye'de halen ticari anlamda bir kömür gazlaştırma tesisi henüz yoktur. TKİ tarafından Soma Kömür Gazlaştırma Projesi ile Manisa-Soma'ya 433,000 ton/yıl amonyak, 1,000,000 ton/yıl üre, 348,000 ton/yıl polipropilen, 192,000 ton/yıl düşük yoğunluklu polietilen üretim kapasiteleriyle kömür gazlaştırma tesisi proje süreçleri devam etmektedir. Soma'da gerçekleştirilecek olan ayrı bir TKİ projesi ise Tübitak MAM ile beraber yürütülen Şekil 4.5'te gazlaştırma ve gaz temizleme pilot tesisi gösterilen, kömür ve biyokütle kullanılarak sıvı yakıt üretimi yapılacak olan Trijen projesidir (Akgün, 2014).



Şekil 4.5 Soma gazlaştırma ve gaz temizleme pilot tesisi

2009 yılında başlanan projeye ait pilot tesis 250 kg/sa besleme kapasiteli akışkan yataklı gazlaştırıcı ve gaz temizleme sistemleri faaliyete alınmış olup, F-T sentezi ile yakıt ürün üretimine henüz başlanmamıştır Z. Olgun (kişisel iletişim, 26.01.2016). Gerçekleştirilen gazlaştırma test sonuçları özeti şöyledir (Akgün, 2014);

- Hava ajanı ile yapılan deneylerde ER değerinin artması ile birlikte sentez gazın alt ısıl değeri düşmektedir.
- Oksijen yüzdesi arttıkça sentez gaz ısıl değeri önemli derecede artmaktadır.
- Elde edilen en yüksek sentez gazı alt ısıl değeri 2173 Kcal/Nm³ olmuştur.
- Gaz bileşenlerinden CO, H_2 ve CH_4 konsantrasyonları ER değerinin artması ile azalmaktadır. CO içerik miktarı 0,5 ER değerlerinde en yüksek seviyededir.
- Kükürt giderimi için dolgulu kolonlardabazik çözeltiler kullanılan gaz yıkama prosesi seçilmiştir.

2011 yılında TKİ tarafından Kütahya-Tunçbilek GLİ Müessesesinde yapılan 250 kg/sa kapasiteli sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı pilot tesisi ve deneysel çapta 20 kg/sa kapasiteli akışkan yataklı gazlaştırıcı ile kömür gazlaştırma faaliyetleri sürmektedir. Metanol üretimi hedeflenen sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılı pilot tesiste bugüne kadar yapılmış deneme sonuçlarından bazıları şu şekildedir; Manisa-Soma kömürü kullanılarak hacimce % 55,9 CO, % 21,7 H_2, % 1,14 H_2S, % 0,90 N_2 içerikli, 2245 Kcal/Nm³ ısıl değerli sentez gazı, Kütahya-Tunçbilek kömürü kullanılarak % 48 CO, % 16,4 H_2 içerikli, 1862 Kcal/Nm³ ısıl değerli sentez gazı, Tekirdağ-Saray kömürü kullanılarak % 26 CO, % 8 H_2 içerikli, 1075 Kcal/Nm³ ısıl değerli sentez gazı üretilmiştir Z. Olgun (kişisel iletişim, 26.01.2016). Tez çalışmam kapsamında TKİ-Tunçbilek gazlaştırma pilot tesisine 15.01.2016 tarihinde teknik gezi gerçekleştirdim (Şekil 4.6). İncelemelerim esnasında metanol üretimi gerçekleştirebilmek gayesiyle, sürüklemeli akışlı gazlaştırıcı pilot tesisinden çıkan ham sentez gaz için temizleme ünitesi kurulması çalışmaları devam etmekteydi (Şekil 4.7a). Pilot tesisi özetlemek gerekirse, pilot tesisin kömür hazırlama ünitesinde 1 t/sa kapasiteli çekiçli kırıcı ile 0-40 mm boyutlarındaki % 30 nem içerikli kömür önce 10 mm altına indirilir sonra 100 µm altına öğütülür. Kurutulan kömür % 5 nem içeriğinin altına düşürülür. 100 µm altındaki malzeme azot basıncı altında gazlaştırıcıya taşınır. Oksijen ve azot ihtiyacı kriyojenik hava ayrıştırma jeneratörleri ile karşılanıp 10 m³'lük tanklarda

depolanmaktadır. Sistemde 2000 lt/sa kapasite ile suya ihtiyaç vardır. Su filtrelendikten sonra 10 m³'lük proses su tankında depolanır. Yukarıdan beslemeli 250 kg/sa kapasiteli sürüklemeli akışlı tip gazlaştırıcı 1500 ºC sıcaklığa kadar çıkabilmektedir ve atmosferik basınçta çalıştırılmaktadır. Gazlaştırıcı tabanında soğutulan kül yapışkanlık özelliğini yitirir ve kül uzaklaştırma sistemiyle bant konveyörlere aktarılarak kül havuzuna taşınır. Gazlaştırıcıdan çıkan gaz ısı değiştiricilerde soğutularak 950 ºC sıcaklıktan 300 ºC'ye düşürülür (Ziypak, 2012). Gazlaştırıcı çıkışı ve sıcaklık ölçümünü sağlayan ısıl çifti Şekil 4.7b'de gösterilmektedir.



Şekil 4.6 TKİ-Tunçbilek kömür gazlaştırma ve gaz temizleme pilot tesisi

Projeden sorumlu, "Tübitak MAM Enerji Enstitüsü Yakma Gazlaştırma Bölümü" Kimya Mühendisleri Dr. Müh. Aykut Argönül ve Orçun Er tesis bilgilerini aktarmışlardır. Özetle soğutulan sentez gazı yıkama kulesinden geçirilerek iri partiküllerden arındırılır, damla tutucudan geçirilen sentez gazı gaz temizleme ünitesine gönderilir. Gaz temizleme ünitesinde H_2S (hidrojen sülfür) ve COS (karbonil sülfür) miktarının 10 ppm seviyelerinden 1 ppm'e düşürülmesi, partikül miktarının 10 mg/Nm³ seviyesinin altına düşürülmesi hedeflenmektedir. Torba filtreler ve bariyer filtrelerle partiküller tutulur. COS, içeriğindeki sülfür hidroliz katalizörü ile hidrojen sülfüre dönüşürken karbonil sülfür miktarı 1 ppm seviyelerine

düşmektedir. H_2S, pH 11'de NaOH çözeltisi ile tepkimeye sokularak sülfür NaHS (sodyum bisülfit) katısı olarak ayrılır. 10-20 ppm seviyelerindeki hidrojen sülfür çinko oksit adsorban yatağı ile 1 ppm seviyelerine düşürülür. Bu sırada ham sentez gazında az miktarda bulunan hidroklorik asitin (HCI) bir miktarı yıkama kulesinde ajan su ile giderilir kalan eser miktardaki HCI ve HF (hidroflorik asit) sodyum hidroksit tepkimesinde giderilir. Temiz gazda minimum hacimce % 50 CO ve % 25 H_2 gaz elde edilmelidir O. Er (kişisel iletişim, 15.01.2016).

Tübitak MAM Gebze'de bulunan deney amaçlı kömür gazlaştırma pilot tesis sistemleri kapasiteleri ile şunlardır; 150 kg/sa akışkan yatak, 70 kg/sa sabit yatak, 50 kg/sa dolaşımlı akışkan yatak (Tarakçıoğlu, 2015). Ayrıca Ankara Anadolu Plazma Teknoloji Merkezinde 3,5 kw su buharlı plazmatron ile plazma gazlaştırma denemeleri yapılmaktadır. Soma kömürleri ile yapılan deney sonuçlarında hacimce % 76-81 arasında H_2 gazı elde edilmiştir (İbrahimoğlu, Vural, Yürek, ve Demirel, 2012).



Şekil 4.7 Tunçbilek gazlaştırma pilot tesisi (a- gaz temizleme ünitesi, b- gazlaştırıcı çıkışı ve ısıl çifti)

Tarakçıoğlu (2015), Tunçbilek 20 kg/saat kapasiteli akışkan yataklı gazlaştırıcıda gerçekleştirdiği gazlaştırma denemelerinde Tunçbilek, Soma ve Tunçbilek lavar çıkış kömürlerini kullanmıştır. Tunçbilek kömürü ile hacimce, % 4,5 CO, % 4 H_2, %14,5 CO_2, %1,5 CH_4 gaz bileşim değerleri elde etmiştir. Soma kömürü ile hacimce, % 14,1 CO, % 10 H_2, % 10,5 CO_2, %1,5 CH_4 gaz bileşim değerleri elde etmiştir. Tunçbilek lavar kömürü ile hacimce, % 9,2 CO, % 7,2 H_2, % 14,2 CO_2, %1,6 CH_4 gaz bileşim değerlerini elde etmiştir.

TKİ tarafından Gaz Teknoloji Enstitüsü'ne (*Gas Technology Institute, GTI*) üç adet Türkiye linyit kömürünün mevcut gazlaştırma teknolojilerine göre gazlaştırma prosesi değerlendirilmesi amacıyla, analiz ve reaktiflik testleri (TGA) yaptırılmıştır. Lau (2014), yaptıkları Manisa-Soma, Kütahya-Seyitömer ve Kütahya-Tunçbilek kömürlerinin testler sonucunda çok reaktif olduğunu, TGA sonuçlarında % 90-98 aralığında karbon dönüşümleri gerçekleştirdiğini ve yüksek gazlaştırma sıcaklıklarına gerek olmadığını aktarmıştır.

Güngor, Özbayoğlu, Kasnakoğlu, Bıyıkoğlu, ve Uysal (2012), Konya-Ilgın, Muğla-Yatağan ve Kütahya-Tunçbilek kömürleri ile farklı gazlaştırıcı ajan oranları, sıcaklık ve basınçlarda gazlaştırma denemeleri yapmışlardır. Sonuçlarında H_2/CO üretiminde optimum oranların yakalanması için, gazlaştırma için hava ajanı kullanılırken nem ve O_2 içeriğinin kritik öneme sahip olduğu, yüksek basınçta H_2 üretiminin azalmaya başladığı, düşük basıncın H_2 üretimini etkilemediği ve yüksek gazlaştırıcı sıcaklıklarına hava-buhar ajanlı gazlaştırma prosesinde gerek olmadığı sonuçlarına varmıştır.

Vural (2014), Manisa-Soma kömürüne buhar ajanı ile gerçekleştirdiği gazlaşma denemelerinde hacimce % 75 H_2 gaz ve 3847 Kcal/Nm³ ısıl değerli sentez gazı elde etmiştir.

Ünlü, Kayahan, Argönül, Ziypak, ve Akça (2015), Tunçbilek sürüklemeli akışlı gazlaştırma pilot tesisinde Tekirdağ-Saray, Çanakkale-Çan, Bursa-Orhaneli,

Kütahya-Tunçbilek, Manisa-Soma kömürleri ile deneyler gerçekleştirmiştir. Deney sonuçları özeti Tablo 4.4'te gösterilmektedir.

Tablo 4.4 Ünlü ve diğer. (2015) linyit gazlaştırma deney sonuçları özeti

Şartlar	Saray	Çan	Orhaneli	Tunçbilek	Soma
Sıcaklık (°C)	1217	1437	1469	1518	1465
ER (–)	0,50	0,53	0,53	0,51	0,47
a Gaz alt ısıl değeri mak. (MJ/Nm³)	6,6	7,6	8,3	9,8	10,5
b Gaz alt ısıl değeri (MJ/Nm³)	5,7	6,6	6,1	9,3	10,0
Kömür akış hızı (kg/sa)	478	381	318	280	242
Hacimsel gaz akış hızı (Nm³/sa)	314	351	390	430	410
Soğuk gaz verimi (%)	41	42	41	64	72
Sentez gaz kompozisyon değeri					
CO (% hacimce)	35,6	43,2	36,1	57,2	59,7
H_2 (% hacimce)	11,4	10,4	14,3	19,5	23,1
CO_2 (% hacimce)	39,9	32,5	23,6	18,5	12,8
N_2 (% hacimce)	13,1	13,9	26,0	4,8	4,4
Azotsuz gaz kompozisyon değeri					
CO (% hacimce)	41,0	50,1	48,8	60,1	62,4
H_2 (% hacimce)	13,2	12,2	19,3	20,5	24,2
CO_2 (% hacimce)	45,8	37,7	31,9	19,4	13,4
a Azot gazsız ürün gaz kompozisyonu					
b Ürün gaz kompozisyonu					

Kayahan (2008), Bursa-Orhaneli kömürü ile deneysel kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcıda gerçekleştirdiği deneylerde 5,18- 6,66 Mj/Nm³ aralığında gaz alt ısıl değerli, hacimce % 14,69-27 aralığında CO, % 12,52-26,01 aralığında H_2, % 40,50-56,42 aralığında N_2, % 1,16-4,15 aralığında CH_4, içerikli sentez gaz elde etmiştir.

Mıhladız (2009), Kütahya-Seyitömer kömürünün, TKİ Tunçbilek sürüklemeli akışlı gazlaştırıcısında oksijen ajan ile gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçlarını hacimce; % 55,27 CO, % 28,87 H_2, % 12,10 CO_2, % 1,07 N_2, % 2,12 H_2S olarak açıklamıştır.

Kaya (2009), geliştirdiği MATLAB modeli ile gazlaştırma parametre sonuçlarını doğrulama yaparak kömür gazlaşma verilerini incelemiştir. Tunçbilek kömürü için yaptığı incelemenin sonucunda, hidrojen derişiminin sıcaklık, hava fazlalık katsayısı ve buhar/kömür oranıyla önemli ölçüde değiştiğini, buhar ilavesi ile hidrojen oran artışının belli bir seviyeye kadar devam edeceğini belirtmiştir.

Dervişoğlu ve Hortaçsu (1997), % 50 Tavşanlı, % 25 Soma, % 25 Benli (Tunçbilek) kömürlerinin karışımı ile oluşturulmuş besleme kömüründe yaptıkları gazlaştırma sonuçlarına göre hacimce, % 27- 30 arasında CO, % 16-20 arasında H_2, % 3,6-5,6 arasında CO_2, % 0,1-0,8 arasında CH_4, içerikli sentez gaz elde etmiştir.

Keltüoğlu (2014), Trakya-Malkara kömürleriyle buhar ajanlı yaptığı sabit yataklı deney çalışmasında ortalama hacimce, % 76,96 H_2, % 5,49 CO, % 3,71 CH_4, % 13,84 CO_2 içerikli sentez gaz kompozisyonu elde etmiştir.

D. Uysal, Doğan, ve Z. Uysal'ın (2011) Çanakkale-Çan, Kütahya-Tunçbilek ve Konya-Ilgın kömürleri ile buhar ortamında gerçekleştirdikleri sabit yataklı gazlaştırma deneylerinde 700 ºC sıcaklıkta verimli sonuçları elde etmiştir. 700 ºC sıcaklıkta gerçekleşen sonuçlar Tablo 4.5'te gösterilmektedir.

Tablo 4.5 Çan, Tunçbilek, Ilgın sabit yataklı gazlaştırma deney sonuçları özeti (Uysal ve diğer., 2011)

Hacimce % gaz ürün kompozisyonu	**Çan**	**Tunçbilek**	**Ilgın**
H_2	67,86	74,35	56,70
CO	22,70	11,08	10,44
CH_4	0,69	14,27	16,63
CO_2	8,75	0,30	16,23

Durgut (2010), Kütahya-Tunçbilek, Manisa-Soma, Kütahya-Değirmisaz, İstanbul-Ağaçlı ve Adıyaman-Gölbaşı kömürlerinin gazlaşma özellikleri üzerine deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Tunçbilek kömürünün 650 ºC sıcaklıktan sonra kütle değişiminin sabit kaldığı ve en verimli sıcaklığın 650 ºC olduğu, Soma ve Gölbaşı kömürlerinin 950 ºC sıcaklıkta maksimum verimli olduğu, Ağaçlı kömürlerinde 650 ºC sıcaklıkta kütle kaybını tamamladığı, Değirmisaz kömürünün ise düşük gazlaşma verimi sunduğu ve kalan katı miktarının büyük olduğu sonuçlarına varmıştır.

Koç (2006), Karaman-Ermenek kömür kokunun gazlaştırılması ile elde edilen sonuçlarda 800 ºC sıcaklıkta tepkime yeteneğinin en yüksek olduğu, asitlerle uzaklaştırılan mineral maddenin eksikliği katalitik etkiyi ortadan kaldırdığı ve reaksiyon hızlarında düşüş yaşandığını açıklamıştır.

4.2 Kömür ve Kömür Yatağı Karakteristik Özelliklerinin Yer Altı Gazlaştırma Proseslerine Etkileri

Türkiye kömürlerinin çoğunluğunu oluşturan linyit kömürleri, genellikle düşük ısıl değer, yüksek nem ve kül içerikleri sebebi ile ekonomik olarak üretilmesi zor olan kömürlerdir. Kalite değerlerinin yanı sıra jeolojik zorluklar, faylar, düzensiz yataklanma, derin yatak oluşumları, yüksek yer altı işçilik maliyetleri gibi sebeplerle birçok kömür sahası değerlendirilememektedir. Tezimin bu bölümünde üretim faaliyetlerinde bulunulan sahaların ve geleneksel metotlar ile değerlendirilemeyen kömür yataklarının, yer altı kömür gazlaştırma proseslerine uygunluk potansiyelleri ayrım yapılmadan incelenmiştir. Önceki bölümlerde açıklanan gazlaştırma yöntemleri ve kömür özelliklerine ek olarak bu bölümde yer altı gazlaştırma proseslerine has olan jeolojik, hidrojeolojik ve kömür damarı özellikleri gibi kriterler de açıklanmıştır.

4.2.1 Yer Altı Kömür Damarı Seçimi

YKG uygulamasında en önemli konu olan yer seçimi yapılırken kömür, tabakalar, su koşulları, yüzey tesis olanakları gibi unsurlara beraber bakılır. Son 100 yıllık süreç içerisinde YKG çalışmaları linyitten antrasit kömür yataklarına, dik damarlılardan yatay kömür damarlarına kadar farklı tipte kömür yataklarına uygulanmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara gör yer seçimi ile ilgili en önemli parametreler şunlardır (Hyder, 2012);

- Kömürün tipi/derecesi
- Kömür damarının kalınlığı
- Kömür damarının derinliği
- Kömür damarının eğimi

- Tabakaların yapısı
- Kömür damarının geçirgenlik ve boşluk özellikleri
- Nem içeriği
- Hidrojeoloji ve akiferlerin yakınlığı

Diğer ilgili parametreler şunlardır;

- Rezerv miktarı
- Altyapı uygunluğu
- Kömür yatağı metan varlığı
- Arazi kısıtlamaları ve yasal gereklilikler

Tablo 4.6 YKG yer seçimi için gerekli kriterlerin derecelendirilmiş özet tablosu (Camp ve diğer., 2015)

DERECE	KRİTERLER
En Önemli	Kömür zonunun (kesit, ara kesmeler ile birlikte) ortalama kalorifik değeri
	Maksimum Alansal Gaz Enerji Değeri (MAGE)
	Tavan taşının göçmeye karşı duraylılığı
	Kömür ve yan kayaçların jeomekanik özellikleri
	Kömür damarının derinliği
Çok Önemli	Kömür ve kayaçların hidrolojik özellikleri
	Fay dağılımı ve karakteristikleri
Önemli	Kömür zonunun (kesit, ara kesmeler ile birlikte) kalınlığı
	Kömür damarının eğimi
	Kömür damarının yatay sürekliliği
	Tavan taşının ısı etkisiyle kavlama, bozunma karakteristikleri
	Kömür analiz değerleri
	Kömürleşme derecesi

CRIP yer altı gazlaştırma metodunun geliştiricisi ve uygulayıcısı konumundaki LLNL (*Lawrence Livermore National Laboratory*) kurumu, uygulama tecrübeleri sonucunda yer altı kömür gazlaştırma yer seçimi için oluşturduğu birincil analiz

değerlendirme metodu, kömür sahalarının potansiyellerini açıklar ve uygun olanlar için sıradaki analiz çalışmalarına yönlendirir. Tablo 4.6'da gösterildiği üzere gerekli kriterler önem derecelerine göre değerlendirilmiştir. Tüm etkenler her saha için derecelendirilir ve saha seçimi için karşılaştırılır (Camp ve diğer., 2015).

4.2.1.1 Kömür Yataklarının Karakteristik Özelliklerinin Etkileri

4.2.1.1.1 Kömürleşme Derecesi (Rank). Linyitten antrasit kömür çeşidine kadar tüm kömürleşme tipleri YKG denemeleri sentez gaz üretimi konusunda başarılı olmuştur ancak bazı kömür tipleri diğerlerine nazaran daha kolay gazlaşmıştır. Yüksek dereceli kömürleri yeraltında gazlaştırmak düşük dereceli kömürlere göre çok daha zordur. Bunun iki önemli nedeni vardır. Bu unsurlar, rektivite ve şişme'dir. Bitümlü kömürler genellikle aglomerizasyona uğrarlar. Bu tip kömürler genellikle ısıtıldıklarında şişerler ve viskoz katran üretirler bu durumda üretim ile besleme kuyusu arasındaki bağlantı kanalları engellenir (Hyder, 2012; Budak, 2014). Örnek olarak Rusya ve Belçika'da taş kömürlerinden yapılan denemeler bu özelliklerin sonucunda verimsiz kalmıştır (Hyder, 2012).

Düşük dereceli kömürler özellikle linyit ve alt bitümlü kömürler yapısal özelliklerinden dolayı geçirgenliği yüksektir, kuyular arası kolay bağlantı sağlar ve kolay tutuşurlar bu sebeplerden dolayı bu tip kömürler YKG prosesleri için tercih edilir (Hyder, 2012). Yüksek dereceli kömürler daha az uçucu madde içerdiğinden daha zor tutuşurlar, reaksiyona girme eğilimleri daha azdır ve daha az reaktiftirler. Düşük dereceli kömürlerde görülen yüksek kül içeriği ise ürün gazı miktarının düşmesine sebep olur. Kül içeriğinin % 60'dan fazla olmaması gerekmektedir (Budak, 2014).

Kömür seçimi için LLNL'nin oluşturduğu kestirim aracındaki en önemli olanları, kömür kesitinin ortalama kalorifik değeri (CV) ile maksimum alansal enerji olarak tanımladığı, metrekare başına açığa çıkan maksimum gaz kimyasal enerji miktarının (MAGE, *Maksimum Areal Gas Chemical Energy*) kestirimidir. Çökme ya da parçalanmanın olmadığı, tabakalar arası ısı kaybının yaşanmadığı, yer altı su

sızıntısının olmadığı ve tam karbon dönüşümün tamamlandığı varsayılır. Önce farklı litolojik tabakalar yani ara kesmeler ve kömürler için birim alan başına yapılan ölçüm (MJ/m²) daha sonra tüm kalınlık kesiti boyunca toplanıp hesaplanır. CV ve MAGE değerlerinin yüksek olması YKG potansiyelinin yüksek olması anlamına gelir. Bu iki değerin fonsiyonu olarak gazlaştırma uygunluğu değerlendirilir. Değerlendirme için kullanılan derecelendirme şeması Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Değerlendirmeye örnek olarak ince bir kömür damarının ısıl değeri yüksek olabilir ve CV değeri yüksek çıkabilir ama metrekare başına çıkan kimyasal enerji miktarı kabul edilemeyebilir çıkabilir. Aynı şekilde kalın bir kömür damarında MAGE değeri yüksek çıkarken kesitin ortalama kalorifik değeri düşük çıkabilir. Elde edilen dereceler sahanın her metrekaresi için harita üzerine işlenir ve sahanın tamamını temsil eden uygunluk dereceleri içinden en iyi alanlar belirlenir (Camp, Het, Yürek, ve Wagoner, 2015).

Tablo 4.7 Kömür kesiti uygunluk sınıflandırması (Camp ve diğer., 2015)

		MAGE MJ/m² x 000		
		> 80	40 - 80	< 40
CV Kcal/kg	> 3500	En uygun	Umut verici	Zorlayıcı
	2500 - 3500	Umut verici	Mümkün	Zorlayıcı
	< 2500	Zorlayıcı	Zorlayıcı	Zorlayıcı

Kömür ve kayaç tabakalarının maksimum alansal gaz enerjisi formül (4.3)'te aktarılmıştır.

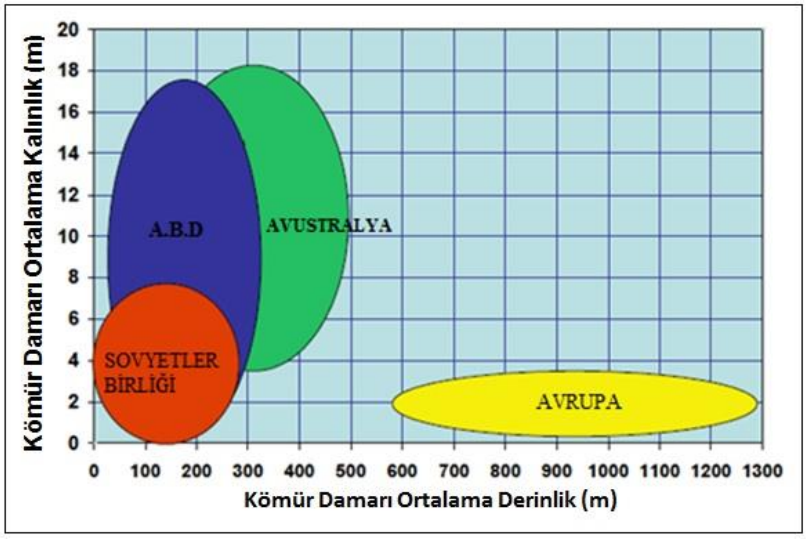
$$AE = \rho \cdot \delta \cdot LHV_g \tag{4.3}$$

Alansal enerji AE (MJ/m^2), kömür ya da kayaç özgül ağırlığı ρ (kg/m^3), dikey tabaka kalınlığı δ (m), gaz alt ısıl değeri LHVg (MJ/kg) olarak ifade edilir. LHVg (AIDg) değeri bulunurken normal alt ısıl değerinden (AID) su ve buharın alacağı ısı, kül ve molozların alacağı ısı, ürün gazın kuruma ile alacağı ısı gibi kayıplar çıkarılır. Tüm katmanlar için aynı işlem yapılır ve çoklu tabakaların değerleri toplanır, kayaçlar için alt ısıl değer sıfırdır (Shafirovich ve Camp, 2012). Tez çalışmamda YKG proseslerine uygun yer seçimi incelemesi yapılırken fikir vermesi açısından sahaların MAGE değerleri sahaların envanter bilgileri içerisinde yer alan alt ısıl değeri kullanılarak hesaplanmış ve LHVg değerini oluşturan kayıplar hesaba dahil edilmemiştir. Sonuç olarak çıkan potansiyel maksimum alansal enerji değerleri tüm sahalar için, enerji kayıpları katılmamış olan alt ısıl değer verisi (AID) girilerek hesaplandığından farklı sahalar arasında bağıl karşılaştırma amaçlı kullanılmıştır.

4.2.1.1.2 Kömür Damarının Kalınlığı. Kömür damarının kalınlığı diğer bir önemli yer seçimi parametresidir. YKG çalışmaları sonucundaki veriler doğrultusunda kalın kömür damarları verimli olmasından dolayı tercih edilir ancak minimum 1 m kalınlıkta olan kömür damarları da yer altında gazlaştırılabilir. Yapılan çalışmalar sonucunda verim, ekonomiklik ve çevre açısından 2 m den kalın kömür damarlarının çalışılmaya uygun olduğu aktarılmıştır. Her ne kadar alt limit 2 metrede olsa genellikle su ve çevre için kontrollü çalışılan kömür damar kalınlığı 5 m ile 10 m arasıdır. Kalınlıkta üst limit yoktur ancak 20 metreden sonra kanalda çökme veya tasman gibi çevre riskleri artmaktadır (Hyder, 2012). Shafirovich ve Varma (2009) makalesinde Gastech firmasının optimum kalınlık değeri olarak 10 metreden fazla damar kalınlığı olması gerektiğini ve Powder River ile Wyoming bölgesinde 10-30 metre kalınlıklar arasında uygulama yapıldığını aktarmıştır.

Yer altı gazlaştırma prosesinin anlatıldığı Bölüm 3'de yer alan Şekil 3.22'de damar kalınlığının su miktarına göre gazlaştırma bölgesindeki ısıl güç kazanımına etkisi gösterilmiştir. Grafikte 2 m kalınlıktan sonraki kalınlık artışı ısıl değerde değişiklik yaratmamıştır. Uygunluk incelemesi yapılırken kalınlık parametresi için yukarıdaki bilgiler doğrultusunda üst limit alınmamış ve 2 metre alt limit olarak alınmıştır.

4.2.1.1.3 Kömür Damarının Derinliği. YKG uygulama denemeleri değişen derinliklerde yapılmıştır. Şekil 4.8'te gösterildiği gibi Rusya ve A.B.D'de 30 m'den 350 m'ye kadar, Avrupa'da 600 m'den 1200 m'ye kadar değişen derinliklerde çalışmalar yapmıştır (Shafirovich ve Varma, 2009). Pratik olarak YKG uygulanabilen damar derinliği; hidrostatik basınç, reaktör boşluğu ve potansiyel su akiferinin nüfus etme özelliklerinin fonksiyonudur. Daha iyi kontrol ve su kirlenmesini önlemek için 200 metrelerden daha fazla derinlik tercih edilir. Derinlik arttıkça sondaj maliyetleri ve operasyon zorlukları artar 800 metreden sonra ekonomik parametreler olumsuzlaşır (Burton ve diğer., 2007; Hyder, 2012). Derinlik arttıkça delme maliyetlerinin artmasının yanı sıra yüksek besleme ve işletme basıncı gerekeceğinden pompa maliyetleri de artar. Ancak derin yatakların içme suyuyla bağlantısı az olduğundan içilebilen suyun kirlenmesinin önüne geçilmiş olur. Derin olmayan sığ yataklarda tasman (yüzey çökmesi) mümkünken üretim derinliği arttıkça tasman riski azalmaktadır. Ayrıca derinlik sayesinde, üretilen sentez gaz ürünü gaz türbinine beslenecek ise ihtiyaç duyulan ekstra basınç eklenmesine gerek kalmaz (Burton ve diğer., 2007).



Şekil 4.8 Dünya'da YKG uygulamalarının derinlik ve kalınlık verileri (Burton ve diğer., 2007)

4.2.1.1.4 Kömür Damarının Eğimi. Kömür damarının eğimi ve dalma açısı YKG prosesi için men edici bir yer seçimi özelliği değildir. Yatak eğimine uygun olan metot gazlaştırma yöntemleri arasından seçilebilir (Ekim, 2011; Hyder, 2012).

Rusya ve A.B.D uygulamalarında 50 dereceden dik damarlarda dahi başarılı olmuştur. Dik damarlı kömür yataklarının geleneksel madencilik metotları ile üretilmesi daha zor ve maliyetli olduğu için YKG uygulamaları dik damarlarda tercih edilir olmuştur (Hyder, 2012).

4.2.1.1.5 Tabakaların Yapısı. Tavan tabakalarının sertlik yapısının özelliği sondaj kuyularının yıkılma riskini ve su kirlenmesi riskini azaltır. Tabakaların reaktör ortamını oluşturacak sağlamlıkta durması gereklidir. Geçirimsiz olan tavan ve taban tabakaları gaz kayıplarını engeller. Faylar, çatlaklar, bindirmeler gibi jeolojik etkenler yapısal olarak gaz kaçaklarına ve yer altı su kirliliğine sebep olabilirler (Hyder, 2012).

4.2.1.1.6 Kömür Damarının Geçirgenlik ve Boşluk Özellikleri. Geçirgenlik özellikleri üretim ve besleme kuyusunun birbirine bağlantı sağlayabilmesi için önemlidir. Bağlantı sağlamanın dışında geçirgenlik sayesinde oksitleyici ajan transferi ve gazlaşma hızı artar. Aranan geçirgenlik özelliği düşük dereceli kömürlerde yüksek iken kömür derecesi arttıkça azalır. Tavan tabakasındaki belirli miktarda su geçirgenliği reaksiyon bölgesindeki su ihtiyacına pozitif katkı sağlar. Yüksek geçirgenlik ve boşluk özelliği pozitif katkılarının yanı sıra gaz kaçışlarını da arttırabilir (Hyder, 2012; Shafirovich ve Varma, 2009).

4.2.1.1.7 Nem İçeriği. Kömür damarı su içeriğinin YKG prosesi için iki yönlü tesiri vardır. Birincisi fazla su geliri ateşlemeyi engeller ve reaksiyon bölgesine aşırı su sızıntısı reaksiyonu engeller. İkincisi reaksiyonun başlaması için ve su gazı reaksiyonunun gerçekleşmesi için su gereklidir (Hyder, 2012).

Yüksek nem miktarı genellikle yüksek uçuculuk, yüksek reaktivite ve düşük kömür derecesi ile ilişkilendirilir. Bu özellikler yer altı kömür gazlaştırma prosesi için aranan özelliklerdir. Fakat nem oranının % 40'ı geçmemesi beklenir. Nem oranı arttıkça gazın kalorifik değeri düşer. Bunların dışında kömür içerindeki nem miktarı çok yüksek olduğunda, su endotermik gazlaştırma reaksiyonları için gerekli olan ısıyı

kendi buharlaşması için kullanır. Bu durumda reaksiyonların gerçekleşmemesine, oluşması istenen karbon monoksitin oluşamamasına neden olur (Budak, 2014).

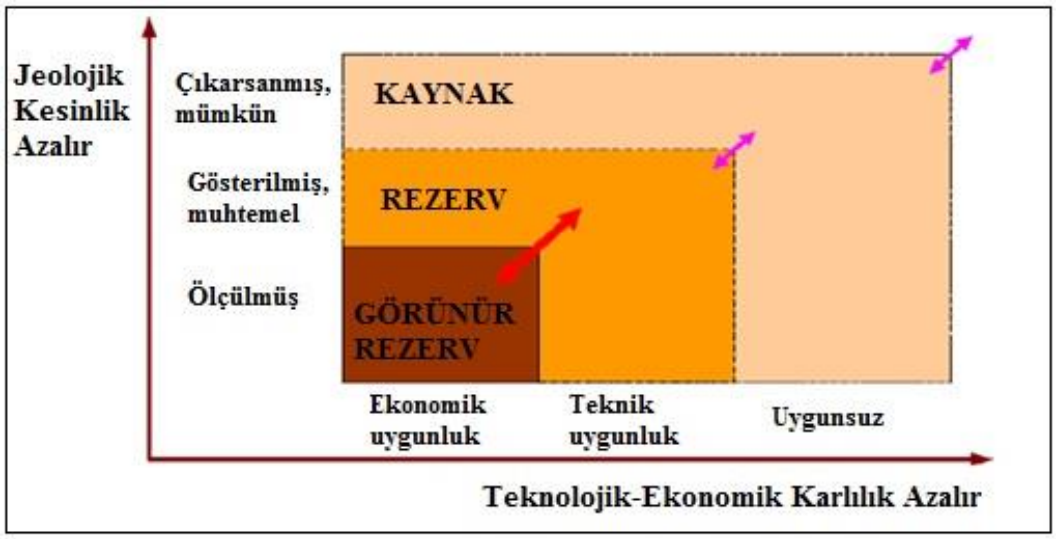
4.2.1.1.8 Hidrojeoloji ve Akiferlerin Yakınlığı. Yer seçimi için önemli olan unsurlardan biride yer altı su kaynaklarının kirletilmemesidir. Organik bileşikler benzen, tolüen, etil benzen yahut ağır metallar gibi kirleticiler akiferlere sızabilmektedir. Bölgenin hidrojeolojik haritalarında akiferlerin yeri, içeriği, kalınlığı, faylar, litoloji bilgileri yer almalıdır. Akiferlerin durumu tespit edilip uzak durulması, yer altı suyu bakımından zengin olmayan bölgelerin tercih edilmesi gereklidir (Hyder, 2012).

Gazlaştırma yapılan kömür damarı ana su akiferinden dikey olarak minimum 100 metreden daha uzakta olmalıdır (Dzimba, 2011).

4.2.1.1.9 Rezerv Miktarı. Genel olarak sentez gaz üretimi projelerinde ne kadar kömür kullanılacağı öncelikle belirlenir. Mesela küçük kapasiteli enerji üretiminde bölgesel olarak küçük rezerv miktarları yeterli olabilirken diğer taraftan büyük endüstriyel ölçekli kimyasal üretim tesisleri için yüksek miktarda rezerv gereklidir. Örnek olarak 300 MW'lık IGCC elektrik üretim tesisi için % 50 verim ile 20 yıl sürekli çalışma koşullarında, 1200 Kcal/m³ ısıl değerli 75,6 x 10^9 Nm³ sentez gazı üretilmelidir. Bu miktar için gazlaştırma yapılacak kömür rezervi 33 x 10^6 tondur (Hyder, 2012).

Rezerv miktarı kavramının doğru anlaşılabilmesi için Şekil 4.9'da kaynak, rezerv ve görünür rezerv kestirimin teknolojik-fizibilite grafiği aktarılmıştır. Belirlenen kömür kaynağı miktarının uygulanacak teknolojiye göre kullanılacak miktar hesapları yapıldıktan sonra çıkan sonuç, teknik kullanılabilir miktar olan rezerv miktarını, ticari projenin ömrünü verir. Sonuç olarak rezerv miktarının üretilebilir kısmının karlılık hesapları yapılır ve ekonomik olarak uygun olan kömür miktarı görünür rezervi belirtir. Türkiye kömürlerinin gazlaştırma teknolojilerine uygunlukları ele alınırken sahaların envanter bilgilerinden faydalanılmıştır. Bu değerlere teknolojik fizibilite uygulanmadığı için verilen rezerv miktarı bilgisi

kaynak rezerv miktarıdır. Yukarıda aktarılan bilgilerde küçük ölçekli tabir edilen elektrik üretimi amaçlı yer altı gazlaştırma tesisi için gerekli rezerv miktarı 33 mton'dur ancak beslenecek oksijen miktarının sentez gaz ısısını arttırması, kömürün ısıl değeri gibi parametreler projelerin yeterli kömür miktarlarında değişikliğe sebep olacaktır. Tez çalışmamda tercih edilen rezerv miktarı belirlenirken Türkiye'deki konvensiyonel elektrik üretim santrallerinin kapasite ve ömürlerine benzerlikleri baz alınarak yukarıdaki örnekte belirtilen 33 mton YKG prosesi için minimum aranan görünür rezerv miktarı olarak seçilmiştir.



Şekil 4.9 Kaynak, rezerv ve görünür rezerv kestirim şeması (Dzimba, 2011)

4.2.1.1.10 Altyapı Uygunluğu. Yer seçimi için ulaşım, enerji ihtiyacı, gaz iletim hatları gibi unsurların varlığı önemlidir. Engelleyici unsur olmamasına karşın ideal yer seçimi için, ana ulaşım hatlarına yakınlık, gaz iletim hatları için yerleşim yerlerine yakınlık ve elektrik üretim tesisinin şehirlere yakınlığı, minimum çevresel etkisi gibi etkenler (gürültü, hava ve su kirliliği) incelenmelidir (Shafirovich ve Varma, 2009).

4.2.1.1.11 Kömür yatağı metan varlığı. Kömür damarının metan içeriğinin yer altı kömür gazlaştırma prosesi için etkileri henüz detaylı olarak bilinmemektedir. Genel olarak bilinen, metan içeriği kömür yatağı metan üretimi (CBM) metotlarıyla üretilebilecek miktarlarda değilse ve YKG prosesi uygulanacaksa metan varlığı

sentez gaz ısıl değerini arttırır ve yanma sürecine katkı sağlar. Uygulama sonuçlarına göre aynı şartlarda YKG prosesi, metan drenaj sondajlarının (CBM) kazandığı enerji miktarının 20 katı verimle enerji elde eder (Hyder, 2012).

4.2.2 Türkiye Derin Kömür Yatakları Özelliklerinin Yer Altı Gazlaştırma Prosesine Uygunluklarının Karşılaştırılması

YKG uygulamalarına uygun yer seçimi için gerekli özellikler belirtilmiş ve ticari yaklaşımlar önceki bölümlerde açıklanmıştır. Kömür damarı seçimi bölümünde detayları açıklanan gazlaştırmaya uygun karakteristik özellik parametreleri, sahaların yeterliliğinin karşılaştırılabilmesi için Tablo 4.8'de derlenmiştir. Tablo 4.8'de özetlenen kömür damarı karakteristik parametreleri, YKG prosesinin uygulanabilirlik potansiyellerini görmek için tüm derin kömür sahaları için kullanılabilir.

Türkiye kömürlerinin gazlaştırma proseslerine uygunluklarının araştırılması çalışmam kapsamında, kaynak rezerv miktarları Türkiye kömürlerinin çoğunluğunu kapsayan bazı sahalar incelenmiştir. Herhangi bir ticari yer altı gazlaştırma projesi oluşturmak için kömür damarı karakteristiklerinin potansiyelleri belirlendikten sonra analizler, fizibilite çalışmaları ve pilot deneme kuyuları yapmak gereklidir.

Tablo 4.8 Yer altı kömür gazlaştırma prosesi kömür yatağı uygunluk parametreleri

Parametreler	**YKG Koşulları**
Damar kalınlık (m)	2m < tercih edilir
Damar derinlik (m)	200m < tercih edilir
Damarın eğimi	Tüm çeşitleri uygundur, uygun metot tercih edilir
Kömür derecesi	Alt bitümlü ve linyit kömürleri, kekleşmeyen, şişmeyen, yüksek uçuculu kömürler < 60 % kül miktarı (% ağırlıkça, orj. baz)
Kalorifik değer *(Alt ısıl değer, orj.baz)*	2500 Kcal/kg < Kalınlık boyunca ara kesmeler dahil ortalama kalorifik değer
MAGE *(Mj/m ²*, alt ısıl değer orj.baz)	40000 MJ/m² (LHVg) < 0 < MJ/m² (AID, kayıplar hariç) sahalar arası bağıl karşılaştırma
Nem miktarı *(% ağırlıkça, orj.baz)*	< 40 %
Yer altı suyu	Akiferlerden uzak durulmalıdır
Geçirgenlik, boşluk	Ateşlemeye ve bağlantıya imkan verecek yüksek geçirgenlik
Tabaka yapıları	Geçirimsiz tavan ve taban tabakaları, faysız ve çatlaksız tabakalar
Rezerv miktarı *(metrik ton)*	Kullanım alanı ve karlılık belirler 33 milyon ton <

4.2.2.1 Türkiye Derin Kömür Yataklarının Özellikleri

Türkiye kömür yataklarının genel özellikleri başlık 4.1.2.1 altında aktarılmıştır. YKG prosesi için derinlik değeri mecburi olmayıp, tercih edilen sınır değer minimum 200 metredir bu sebeplerle bu derinlik çalışmamda baz olarak alınmıştır. Tezimin Türkiye kömürlerinin yer üstü gazlaştırma prosesine uygunlukları açısından özellikleri, sahaların verilerinin paylaşıldığı eklerde mevcuttur (Bknz., EK-1,…,EK-27). Sahaların yer altı gazlaştırma proseslerine uygunluk incelenmesinde yer altı kömür gazlaştırma prosesi kömür yatağı parametreleri tablosunda derlenen kriterler (Tablo 4.8) baz alınmıştır.

4.2.2.2 Türkiye Derin Kömür Yataklarının Yer Altı Gazlaştırma Prosesine Uygunlukları

Tezimde incelenen sahalar içerisinde maksimum 200 metre kömür damar derinliğini aşmayan sahalar olmasına karşın yer altı kömür gazlaştırma prosesine uygunluk incelemesi eklerle verileri aktarılan tüm sahalara yapılmıştır. Değerlendirme sonuçları aşağıda açıklanmıştır. Ölçülmemiş olan yer altı suyu kriterleri belirlenen limit derinlikleri aştığı için uyumlu sayılmaktadır aynı şekilde geçirgenlik, boşluk miktarları damarın linyit kömürü derecesinde olması, reaktiflik özellikleri ile beraber uyumlu sayılmaktadır. YKG prosesleri için sonraki aşamalara geçildiğinde tabaka değerleri ile birlikte fizibilitelerde bu parametreler detaylı araştırılmalıdır.

Adana-Tufanbeyli, Bursa-Keles, Konya-Ilgın, Kahramanmaraş-Elbistan, Kütahya-Seyitömer kömürleri için düşük kalori değeri ve düşük kalan derinlik mesafesi sebebiyle günümüz koşullarına göre YKG prosesi uyumsuzdur.

Çanakkale-Çan ve Muğla-Milas kömürlerinin YKG proses kriterlerine uygun olmasının yanı sıra MAGE değerleri diğer sahalara kıyasla yüksektir.

Kütahya-Tunçbilek ve Muğla-Yatağan kömür damarı özellikleri YKG uygulamaları için uygundur.

Manisa-Soma kömür damarı kriterlerinin yer altı gazlaştırmaya uygun olmasının yanı sıra MAGE değeri diğer sahalarla karşılaştırıldığında en yüksek değere sahiptir.

Tekirdağ-Saray, Kırklareli-Vize, Sivas-Kangal, Konya-Karapınar ve Afyon-Dinar kömürlerinin yüksek nem miktarı ve düşük kalori değeri YKG prosesleri için uygunsuzdur. Ayrıca MAGE değerleri de nispeten düşüktür.

Bolu-Göynük kriterleri YKG prosesine uygundur ancak maksimum derinliğin limitleri aştığı bölgelerdeki rezerv miktarı göz önünde bulundurulmalıdır.

Çorum-Dodurga kömürleri YKG kriterlerine rezerv miktarı dışında uygundur. Mevcut rezerv miktarı ile uygunsuz olan sahanın rezerv gelişimleri takip edilmelidir.

Bingöl-Karlıova kömürünün YKG için kalori limit değeri uygunsuzdur. Limitlere yakın olan kalori değerleri ile alakalı olarak gelecekte ekonomik-teknik koşullar takip edilmelidir.

Eskişehir-Alpu kömürleri YKG proseslerine kalori limit değeri dışında uygundur. MAGE değeri nispeten yüksek olan sahanın rezerv miktarının büyüklüğü göz önüne alındığında bölgesel inceleme gerekli olacaktır. MTA'dan emekli Yüksek Jeoloji Mühendisi İsmail Özdemir, Alpu kömür yatağının 1,5 milyar tonluk rezerv kapsamında, alt ve üst damarlarında bölgesel olarak kalori değerinin 2500 Kcal/kg değerleri aştığı alanların geniş rezerv verebileceği bilgilerini aktarmıştır (İ. Özdemir, kişisel iletişim, 21.12.2015).

Ankara-Beypazarı kömür damarı özellikleri yer altı gazlaştırma proses kriterlerine uygundur ancak diğer sahalara nazaran düşük MAGE değeri sebebiyle zorluk derecesi yüksek ama uyumludur diyebiliriz.

Tekirdağ-Çerkezköy kömür damarı özellikleri YKG prosesine kalori değeri açısından uygunsuzdur.

Isparta-Şarkikaraağaç kömür damar özellikleri kalınlık ve kalori kıstasları bakımından YKG prosesine uygunsuzdur.

Denizli-Çardak kömür sahası rezerv miktarı ve düşük kalori değeri ile YKG prosesine uygunsuzdur.

Amasya-Merzifon kömür damarı yer altı gazlaştırma proseslerine kriterler açısından uygundur. Merzifon sahası için Türkiye kömürleri rezerv tablosunda bulunan rezerv miktarına ek olarak, sahanın tamamlanan arama dönemi raporuna göre son rezerv miktarı ve analiz değerleri (Taşkın, 2015) EK-19'da mevcuttur. Yeni Çeltek Kömür ve Madencilik A.Ş.'e ait, aynı Çeltek kömürlü formasyonunda aynı özelliklerde, derinliklerde ve yüksek MAGE değerlerinde başka sahalar da mevcuttur ve bunlar Merzifon kömür havzasının rezervini arttırmaktadır.

Bursa-Orhaneli kömür damarı derinlik kriteri açısından YKG işlemine uygunsuzdur. Yüksek MAGE ve kalori değerleri göz önünde bulundurularak derinlik ile ilgili konuları içeren tasman, yer altı suları gibi parametrelerin detaylandırılacağı çalışmaların yapılması gereklidir.

Zonguldak-Karadon taş kömürü ve Şırnak-Silopi asfaltitleri kömürleşme derecesi, kömür tipi ve yataklanma özellikleri açısından uyumsuzdur. Karadon kömürleri taş kömürü olması sebebiyle şişme kekleşme meğili yüksektir proseste bağlantı sorunlarına sebep olacaktır. Asfaltitlerin yataklanması filon gibi uniform yapıda olduğu için YKG proseslerine uygun değildir.

İncelenen sahalar içerisinde Çan, Tunçbilek, Soma, Göynük, Beypazarı, Merzifon, Milas, Yatağan sahaları için yer altı gazlaştırma prosesi kıstaslar açısından uygundur. Ayrıca bu sahaların MAGE değerlerini kıyasladığımızda en yüksek değerli sahadan düşüğe doğru sıralama şöyledir; Manisa-Soma (773.136 MJ/m^2), Çanakkale-Çan

(377.664 MJ/m²), Muğla-Milas (260.272 MJ/m²), Kütahya-Tunçbilek (175.616 MJ/m²), Amasya-Merzifon (168.360 MJ/m²), Muğla-Yatağan (96.300 MJ/m²), Bolu-Göynük (93.240 MJ/m²), Ankara-Beypazarı (40.659 MJ/m²).

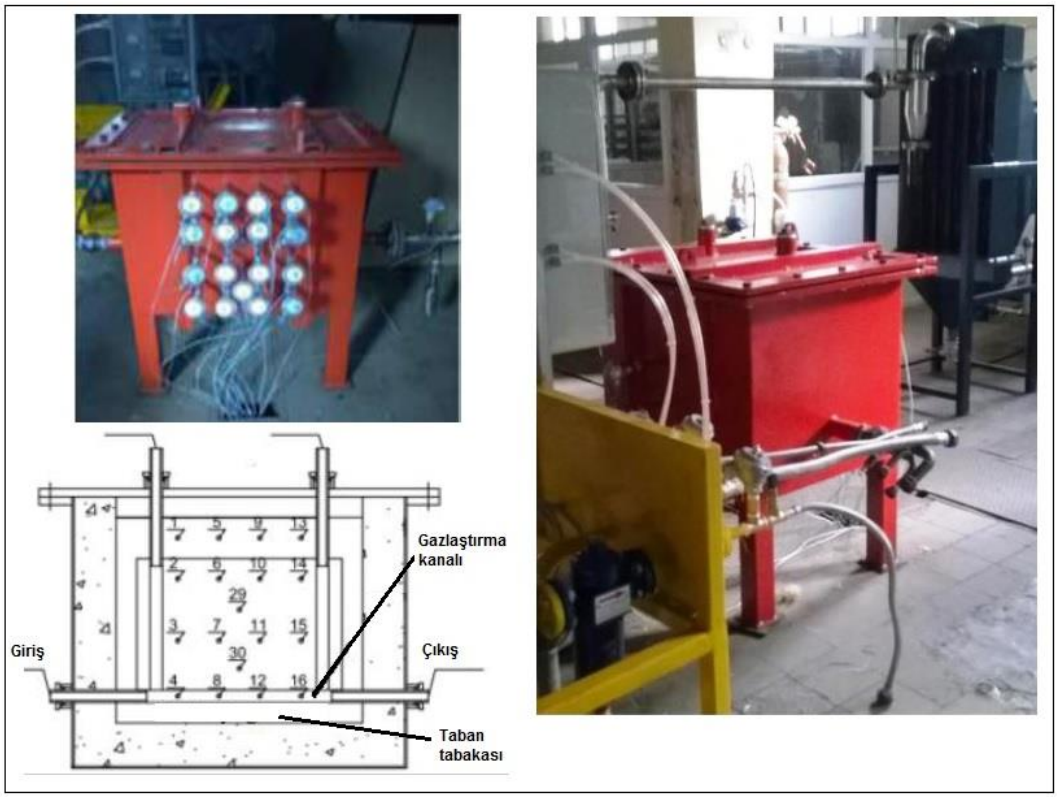
4.2.3 Türkiye Kömürleri İçin Yapılmış Yer Altı Gazlaştırma Çalışmaları

Türkiye'de pilot ölçek dahil yer altı gazlaştırma uygulaması henüz yapılmamıştır. Deneysel olarak TKİ Soma kömürlerini Slovakya Kosice Teknik Üniversitesinde test ettirmiştir. Kömür damarı doğal koşulları oluşturmak amaçlı oluşturulmuş reaktör ile gerçekleşen yer altı gazlaştırma deneyleri sonucu, Soma kömürünün YKG prosesi ile gazlaştırılmasının mümkün olduğu ve endüstriyel kullanım için uygun içerikli sentez gazı elde edildiği aktarılmıştır (Özer, 2011).

TKİ kendi uhdesindeki linyit sahalarının yer altı gazlaştırma proseslerine uygunluklarının araştırılması için Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı'na (LLNL) etüt ve analiz çalışmaları yaptırmıştır. Elde edilen derecelendirme, en iyi seçenekten en kötü seçeneğe doğru şu şekildedir (Camp ve diğer., 2015);

1- Soma-Eynez derin sahalar, mükemmel.
2- Tunçbilek-Domaniç derin sahalar, çok iyi.
3- Muğla-Turgut, iyi.
4- Soma-Evciler, iyi ile orta arasında.
5- Bursa-Keles Davutlar, mümkün.
6- Trakya-Çerkezköy sahaları, mümkün.
7- Tunçbilek-Demirbilek, ince kömür damarları ve düşük MAGE değerleri yüzünden mümkün görünmemektedir.
8- Adana-Tufanbeyli, düşük MAGE değeri ile mümkün görünmemektedir.
9- Trakya-Edirköy, düşük MAGE değeri ile mümkün görünmemektedir.
10- Trakya-Safaalanı, düşük MAGE değeri ile mümkün görünmemektedir.
11- Trakya-Küçükyoncalı, düşük MAGE değeri ile mümkün görünmemektedir.
12- Konya-Beyşehir, düşük MAGE değeri ile mümkün görünmemektedir.
13- Kırklareli-Vize, düşük MAGE değeri ile mümkün görünmemektedir.

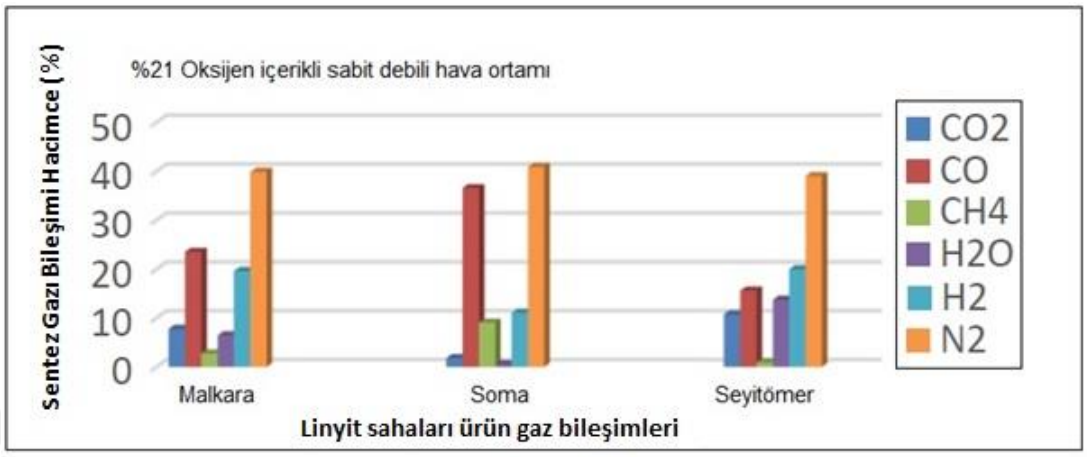
Okutan ve diğer. (2015) Uysal Madencilik firmasına ait Tekirdağ-Malkara-Pirinççeşme linyit sahasının numuneleri ile kömür damarı doğal koşulları oluşturmak amaçlı oluşturulmuş reaktörde (Şekil 4.10) yer altı gazlaştırma denemeleri yapmıştır. Deneyler sonucunda Malkara kömürleri ile başarılı yer altı gazlaştırma proses canlandırması gerçekleştiğini ve 2150 Kcal/m³ ısıl değerli hacimce % 37 CO, % 26 H_2, % 3,5 CH_4 sentez gazı elde edildiğini açıklamıştır.



Şekil 4.10 Yer altı gazlaştırma deney reaktörü (Okutan ve diğer., 2015)

Budak (2014), yer altı gazlaştırma prosesi ile üretilen sentez gazının bileşimi ve ısıl değerinin farklı koşullar altında tespit edilmesi için geliştirdiği MATLAB modeli ile incelemeler yapmış ve 100 MW kapasiteli IGCC santrali için gerekli sentez gazı karşılığı YKG maliyetini hesaplamıştır. Manisa-Soma, Kütahya-Seyitömer ve Tekirdağ-Malkara kömürleri ile hava ajanı kullanıldığı varsayılan kestirimlerde en yüksek uçucu ve sabit karbon miktarı olan Soma kömür yatağının, ürün gaz bileşenleri bakımından (Şekil 4.11) ve ısıl değeri bakımından diğer sahalara göre

daha yüksek değerlerde olduğunu açıklanmıştır. Ayrıca Malkara kömürlerinin YKG maliyetinin rekabet edilebilir olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.11 Farklı kömür yataklarının sentez gazı bileşim etkisi (Budak, 2014)

Ekim (2011), çalışmasında yer altı kömür gazlaştırma prosesi için gerekli özellikleri göz önünde bulundurarak bazı sahalarda uygunluk değerlendirmesi yapmıştır. İnceleme sonuçlarında; Kütahya-Seyitömer, Kütahya-Tunçbilek, Manisa-Soma, Muğla-Yatağan, Bolu-Göynük, ve Bursa-Keles sahaları YKG prosesi için uygun bulunmuş, Erzurum-Aşkale ve Kahramanmaraş-Elbistan sahaları ise YKG prosesi için uygun bulunmamıştır. MATLAB yazılımı ile ısıl değer ve gaz bileşim kestirim değerlerini de elde ettiği çalışmasında uygun bulunan sahalarda yaptığı maliyet analizlerinde bağlantılı düşey kuyular tekniği (ELW) kullanıldığında; % 15 ile % 48 arasında, kontrollü olarak hareket ettirilen ateşleme noktası tekniği (CRIP) kullanıldığında ise; % 20 ile % 50 arasında kârlılık değerleri elde edildiğini açıklamıştır.

BÖLÜM BEŞ
SONUÇLAR

Dünyadaki enerji ihtiyacının giderek artması ve konvensiyonel enerji kaynakların aynı hızda azalması enerji arzı sürekliliği için alternatif enerji kaynaklarının kullanımı ve geliştirilmesi gerekli kılmaktadır. Aynı gereklilik petrol kaynaklı kimyasal hammadde üretimi içinde geçerlidir. Petrol ve doğalgaz arz talep dengesine bağlı olarak piyasa dengesi yön değiştirmektedir. Kömür gazlaştırma prosesleri yeni kullanılan bir uygulama olmamasına karşın piyasa arz ve talepleri ile birlikte teknolojik gelişmeler doğrultusunda gelişmektedir. Yeni teknolojik gelişmeler, hammaddelerin uygunlukları ile ilgili yeni parametreler sunmaktadır. Tez çalışmam sonucunda son teknoloji olarak ticari manada kullanılan gazlaştırma prosesleri ve teknolojik parametreleri belitilmiştir. Belirtilen gazlaştırma teknolojilerine uygun olan, besleme için gerekli kömürlerin parametre özellikleri de son teknolojik imkanlara göre değerlendirilmiştir. Bugüne kadar Türkiye kömürleri ile ilgili kaynak rezerv ve rezervlerin kullanımı ile ilgili yapılmış çalışmaların bu yeni teknolojik imkanlar içerisinde tekrar araştırılarak teknolojik adaptasyonun sağlanması gereklidir. Bu gereklilik doğrultusunda mevcut yeni parametreler göz önüne alınmış ve Türkiye kömürlerinin gazlaştırma prosesine uygunlukları incelenmiştir. Ayrıca geçmişte yapılmış çalışmalar derlenmiştir. Yeni teknolojik gelişmeler sonucunda kabul edilebilir kriterler, Türkiye kömürlerinin çoğunluğunu kapsayan linyit kömür özelliklerine genellikle uygun aralıklardadır. Düşük ısıl değer, yüksek kül, yüksek nem ve yüksek kükürt değerleri sebebiyle kullanılamayan Türkiye'deki bazı kömür yataklarının kullanılabilme olasılığının arttığı ve bu konuda detaylı, kapsamlı araştırmaların yapılması gerekliliği görülmüştür. Gazlaştırma uygulamalarına entegre ön proses olarak kullanılan kömür zenginleştirme işlemleri ile kömür besleme özellikleri olumlu yönde değişmektedir. Gazlaştırmaya uygun gözükmeyen kömürlerimizin zenginleştırme prosesleri uygulandıktan sonraki özelliklerine göre gazlaştırma proseslerine uygunlukları araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

Adams, D. M. B., Carpenter, A. M., Collot, A.G., Couch, G., Fernando, R., Henderson. C., ve diğer. (2009). *Gasification fundamentals and processes*. EIA Clean Coal Center. 25 Eylül 2015, http://www.coalonline.org/site/coalonline.

Akgün, F. (2014). Kömürden sıvı yakıt üretim teknolojileri. Toptaş, M. ve Akgün, F. (ed). *Kömür teknolojileri çalıştayı* içinde (334-356). Gebze: Tübitak MAM matbaası.

Alp, İ. (1997). Asfaltit. *Madencilik Dergisi, 3* (16), 5-9. 23 Şubat 2015, http://www.maden.org.tr/yayinlar/dergi_goster.php?kodu=691.

Asim, U. B. ve Siddiqui, M. A. (2014). Investigation of stresses in coal gasifier hearth under thermal loading using finite element analysis. *International Conference on Machine Learning, Electrical and Mechanical Engineering,* 8-9 Haziran, Dubai. 23 Temmuz 2015, http://iieng.org/siteadmin/upload/6584E0114008.pdf.

Atabey, E., Ağrılı, H., Akın, U., İslamoğlu, Y., Konak, N., Köker, A., ve Yusufoğlu, H. (2010). *Türkiye linyit envanteri*. Ankara: Maden Tekik ve Arama Genel Müdürlüğü yayınları.

Atalay, F. (2011). *Türkiye Tersiyer kömürlerinin jeoistatistiksel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Ateşok, G. (2009). *Kömür kullanımı ve temiz kömür teknolojileri*. İstanbul: Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları.

Ay, Ş. (2011). *Synthesis gas cleaning: H_2S – tar removal and gas conditioning*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Basu, P. (2006). *Combustion and gasification in fluidized beds*. U.S.A.: CRC Press/ Taylor and Francis Group LLC.

Bell, D. A., Towler, B. F.,ve Fan, M. (2011). *Coal gasification and its applications*. Great Britain: William Andrew/ Elsevier Science and Technolgy.

Bhutto, A. W., Bazmi, A. A., ve Zahedi, G. (2013). Underground coal gasification: From fundamentals to applications. *Progress in Energy and Combustion Science 39*, 189-214.

Bowen, B. H., Irwin, M. W., ve Canchi D. (2007). *Coal-To-Liquids (CTL) and Fischer-Tropsch Processing (FT)*. 16 Şubat 2015, http://www.acla.org.au/wp-content.

Bozkurt, Y. (2005). *Kömür ve kokların katalitik gazlaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.

Breault, R. W. (2010). Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies. *Energies, 3*, 216-240. 22 Haziran 2015, MDPI veritabanı.

Budak, T. (2014). *Yer altı kömür gazlaştırma prosesi: Denge modeli ve ekonomik analiz*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Bulut, B. (2010). *Yüksek fırınlarda verim artırmak amacıyla koklaşabilir yerli ve ithal kömürlerin optimum harmanlama özelliklerinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Burton, E., Friedmann, J., ve Upadhye, R (2007). Best practice in underground coal gasification. *Lawrence Livermore National Laboratory reports*, W-7405-Eng-48, Amerika Birleşik Devletleri. 11 Ağustos 2015, http://www.purdue.edu/discoverypark.

Camp, D.W., Het, K., Yürek, Ş., ve Wagoner, J. L. (2015). Türk linyitlerinin yeraltı kömür gazlaştırma yöntemi için değerlendirilmesi. *24. Uluslararası madencilik kongresi ve sergisi-İngilizce bildiriler kitabı*, 1078-1086. Ankara: MMO yayınları.

Canel, M. (1986). Kömürlerin gazlaştırılması. *Madencilik, 15,* (2), 35-41.

Collot, A. G. (2005). Matching gasification technologies to coal properties. *International Journal of Coal Geology*, *65,* 191-212.

Cortés, C. G., Tzimas, E., ve Peteves, S. D. (2009). Technologies for coal based hydrogen and electricity co-production power plants with CO_2 capture. *European Commission Joint Research Centre Institute for Energy scientific and technical reports*, EUR 23661 EN-2009, Luxembourg. 20 Ocak 2016, http://europa.eu.

Couch, G. R. (2009). *Underground coal gasification.* IEA clean coal center. 12.12.2015, http://www.coalonline.org/site/coalonline.

Dervişoğlu, M. ve Hortaçsu, Ö. (1997). An experimental study of coal gasification. *Energy , 23* (12), 1073–1076.

Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) (2001). Devlet Planlama Teşkilatı enerji hammaddeleri alt komisyon kömür çalışma grubu. *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı*, Ankara. 09 Mart 2016, http://ekutup.dpt.gov.tr/.

Durgut, R. A. (2010). *Kömür gazlaştırma prosesi ve yerli linyit kömürlerinin gazlaşma özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Dzimba, B. C. (2011). *Consideration of the criteria required for the selection of potential underground coal gasification sites in South Africa*. Yüksek Lisans Tezi, Witwatersrand Üniversitesi, Johannesburg.

Ekim, R. (2011). *Yer altı kömür gazlaştırma prosesinin Türk kömür yataklarına uygulanabilirliği ve maliyet analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Friedmann, J. (2009). Accelerating development of underground coal gasification: Priorities and challenges for U.S. research and revelopment. Chaisson, J., Mike, F., Thompson, J.,ve Waltzer, K. (ed). *Coal without carbon an investment plan for federal action* içinde, (1), 1-17. Boston: Clean Air Task Force reports. 01 Aralık 2015, http://www.catf.us/resources/publications/files/Coal_Without_Carbon.pdf.

Gafur, A. A. (2006). *Bitümlü şist ve plastik atıkların gazlaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Gross, C. ve Van der Riet, M. (2011). The Eskom UCG experience. *6. CTL and Coal Gasification 2011 Conference*, Avustralya. 6 Aralık 2015, http://eskom.co.za.

Güngor, A., Özbayoğlu, M., Kasnakoğlu, C., Bıyıkoğlu, A., ve Uysal, B. Z. (2012). A parametric study on coal gasification for the production of syngas. *Chemical Papers, 66* (7), 677–683.

Hanyue, H. (2015). *Precise makes progress IET directional drilling*. 28 Kasım 2015, Eti Soda teknik gezi sunumu, Ankara.

Hepbaşlı, A. (2010). Coal as an energy source in Turkey. *Energy Sources, 26,* (1), 55-63.

Higman, C. ve Burgt, B. (2008). *Gasification* (2. Baskı). United States of America: Gulf Professional Publishing/Elsevier.

Hyder, Z. (2012). *Site characterization, sustainability evaluation and life cycle emissions assessment of underground coal gasification*. Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State Üniversitesi, Virginia.

Imran M., Kumar, D., Kumar N., Qayyum, A., ve Saeed, A. (2014). Environmental concerns of underground coal gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31,* 600–610.

İbrahimoğlu, B., Vural, E. S., Yürek, Ş., ve Demirel O. (2009). *Plazma kömür gazlaştırma*. 01 Mart 2016, http://www.dektmk.org.tr/upresimler/enerjikongresi12.

İmageshack, (2015). 30 Ekim 2015, Dolmabahçe Gazhanesi günümüzde İnönü Stadyumu yerinde. http://imagizercv.imageshack.us/scaled/large/827/21yw.jpg

İzgi, B. (2011). *Gazifikasyonlu bir yakıt hücresi sisteminin simülasyonu ve performans analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kabe, T., Ishihara, A., Qian, E. W., Sutrisna, I. P.,ve Kabe, Y. (2004). Coal and coal-related compounds structures, reactivity and catalytic reactions. *Studies in Surface Science and Catalysis, 150,* 269-303. Great Britain: Elsevier Science.

Karayiğit, A. I., Oskay, R. G., Christanis, K., Tunoğlu, C., Tuncer, A., ve Bulut, Y. (2015). Palaeoenvironmental reconstruction of the Çardak coal seam, SW Turkey. *International Journal of Coal Geology, 139,* 3-16.

Kavak, O. ve Toprak, S. (2012). Karlıova Halifan (Bingöl) kömürlerinin organik jeokimyasal ve petrografik özellikleri. *MTA dergisi, 144,* 23-50. Ankara: MTA yayınları. 10 Ocak 2016, https://www.researchgate.net/publication.

Kavak, O., Connan, J., Erik, N. Y., ve Yalçın, M. N. (2010). Organic geochemical characteristics of Şırnak asphaltites in Southeast Anatolia, Turkey. *Oil Shale, 27* (1), 55-83. 24 Şubat 2015, https://www.researchgate.net/publication.

Kavuşan, G. (1986). Yeraltı gazlaştırılmasının önemi, etkileyen faktörler, gazın kullanımı, bilinen uygulamalar. *İzmir 4. Enerji Kongresi, Teknik oturum tebliğleri 2,* 269-279. 10.09.2015, http://acikarsiv.ankara.edu.tr/browse/3496.

Kaya, E. (2009). *Kömür gazlaştırma ürünlerinin kimyasal denge kuramı ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Kayahan, U. (2008). *Design and operation of a laboratory scale fluidized bed gasification system*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Keltüoğlu, C. (2014). *Trakya kömürlerinin gazlaştırılması olanakları ve ekonomikliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.

Kızgut, S. (1990). TTK Karadon bölge kömür damarlarının yıkanabilirlik özelliklerinin araştırılması. *Madencilik, 29,* (1), (33-40).

Klein, A. (2002). *Gasification: An alternative process for energy recovery and disposal of municipal solid wastes*. Yüksek lisans Tezi, Columbia Üniversitesi, New York. Proje sponsoru: Earth Engineering Center.

Klimenko, A. Y. (2009). Early ideas in underground coal gasification and their evolution. *Energies, 2,* 456-476. 22.06.2015, MDPI veritabanı.

Koç, S. (2006). *Linyitlerin gazlaştırılmasına mineral madde içeriğinin etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.

Lau, F. P. (2014). Kömür gazlaştırma. *Antalya Kömür Gazlaştırma, Kömürden Sıvı Yakıt Üretimi ve Kaya Gazı Çalıştayı*,2014, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Antalya.

Lau, F. P. (2015a). Kömür gazlaştırma. *İstanbul Uluslararası Enerji Hammaddeleri ve Enerji Zirvesi*, 2015, Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı, İstanbul.

Lau, F. P. (2015b). Kömür gazlaştırma. Karaosmanoğlu, F., Önal, G., ve Koç, A. (ed). *Kömür Gazlaştırma, Kömürden Sıvı Yakıt Üretimi ve Kaya Gazı Çalıştayı* içinde (5-74). İstanbul: Yurt Madenciliğini Geliştirme Vakfı Yayınları.

Lee, S., Speight, J. G.,ve Loyalka, S. K. (2007). *Handbook of alternative fuel technologies*. U.S.A.: CRC Press/ Taylor and Francis Group LLC.

Liu, K., Cui, Z., ve Fletcher, T.H. (2010). Coal Gasification. Liu, K., Song, C., ve Subramani, V. (ed). *Hydrogen and syngas production and purification technologies* içinde (156-216). U.S.A: John Wiley and Sons, Inc. Publication.

Luque, R. ve Speight, J. G. (2014). *Gasification for synthetic fuel production fundamentals, processes and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing/ Elsevier Science and Technology.

Maki, D. Y. (2010). *Döner tip biyokütle gazlaştırıcı tasarımı ve prototip imalatı*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Mastalerz, M., Drobniak, A., Rupp, J., ve Shaffer, N. (2005). *Assessment of the quality of Indiana coals for integrated gasification combined cycle (IGCC) performance; analysis of the existing data and proposal of new research final report to the center for coal technology researh*. Indiana Geological Survey Indiana Üniversitesi. 21 Ocak 2016, https://www.purdue.edu/discoverypark.

Mathew, T. (2013). *Coal/petcoke gasification and Reliance's Jamnagar gasification project*. 21.07.2015, http://teqip.jdvu.ac.in/for_website/Program%2026.07.2013.

Mıhladız, V. (2009). Kömür gazlaştırma kavramsal tasarımı. *Dünya Enerji Komitesi 11. Enerji Kongresi bildirileri*, İzmir. 10 Kasım 2015, http://www.dektmk.org.tr/pdf.

Miller, B.G. (2005). *Coal energy systems*. United States of America: Elsevier Academic Press.

Nayır, T. (2012). *Kömür ve biyokütle karışımlarının gazlaştırılması ve aspen hysys programı ile simulasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Okutan, H., Gür, M.,Arısoy, A., Eskin, N., Böke, E., Dertli, H., ve diğer., (2015). Design of a large-scale laboratory experimental set-up for underground coal gasification of Turkish lignites. *Uluslararası Enerji Hammaddeleri ve Enerji Zirvesi*, 1-3 Ekim 2015, İstanbul.

Ökten, G. ve Okutan, H. (1991). Kömürün yer altında gazlaştırılması. Kural, O. (ed). *Kömür* içinde (722-737). İstanbul: Kurtiş Basımevi.

Özer, A. (2011). *Soma linyitlerinin yer altında gazlaştırılabilme açısından incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Özsarı, F., Dağ, C., ve Tansak T. (2015). Tekirdağ (Malkara)-Edirne (İpsala) Oligosen havzası kömür aramaları projesi. Akıllı, H, Çalık, A., Sümer, E.Ö, Şen, P., ve Yavaş, F. (ed). *MTA 80. yıl Sempozyumu genişletilmiş bildiri özetleri kitabı* içinde (231-236). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü yayınları.

Öztaş, N. A. ve Yürüm, Y. (2000). Pyrolysis of Turkish Zonguldak bituminous coal part 1. effect of mineral matter. *Fuel, 79,* 1221-1227.

Pişkin, S. (1991). Kömür gazlaştırma. Kural, O. (ed). *Kömür* içinde (655-718). İstanbul: Kurtiş Basımevi.

Rezaiyan, J. ve Cheremisinoff, N. P. (2005). *Gasification technologies a primer for engineers and scientists*. Florida: Taylor and Francis Group/CRC press.

Sajjad, M. ve Rasul, M. G. (2014). Review on the existing and developing underground coal gasification techniques in abandoned coal seam gas blocks: Australia and global context. Energies "Whither Energy Conversion Present Trends, Current Problems and Realistic Future Solutions". *1. International e-Conference on Energies.* 21 Kasım 2015, http://sciforum.net/conference/ece-1.

Schobert, H. H. (1995). Alternetive uses of lignites. *Coal Science and Technology, 23*, (602-678). United States of America: Elsevier Press.

Sezgin, M., Bulut, Y., Kırman, E., Özdemir, M., Aydın, H., ve İnci Ç.N. (2015). Dinar-Domayova kömür sahası ve jeolojik özellikleri. Akıllı, H, Çalık, A., Sümer, E.Ö, Şen, P., ve Yavaş, F. (ed). *MTA 80. yıl sempozyumu genişletilmiş bildiri özetleri* kitabı içinde (209-216). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü yayınları.

Shafirovich, E. ve Camp, D. W. (2012). A summary of MAGE: a method for estimating the maximum possible chemical energy content of UCG product gas per unit area for a multistrata coal zone. *Lawrence Livermore National Laboratory Reports*, LLNL-TR-551211, Amerika Birleşik Devletleri. 05 Ocak 2016, http://www.osti.gov/scitech.

Shafirovich, E., ve Varma, A. (2009). Underground coal gasification: a brief of current status. *Industrial Engineering Chemistry Research, 48,* 7865–7875.

Simbeck, D. R., Korens, N., Biasca, F. E., Vejtasa, S., ve Dickenson, R. L. (1993). Coal gasification guidebook: status, applications, and technologies. *EPRI Research Project Reports*, 2221-39, California: SFA Pacific Inc.

Sönmez, Ö. (2006). *Kömür ve maseral gruplarının çeşitli çözücülerde şişme davranışlarının ve sıvılaşma üzerine etkileri*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Suarez-Ruiz, I. (2012). Organic petrology: an overview. Al-Juboury, A. (ed.) *Petrology - new perspectives and applications*. 20.10.2015, InTech veri tabanı, http://www.intechopen.com/books/petrology-new-perspectives-and-applications.

Syed, S., Janajreh, I., ve Ghenai, C. (2012). Thermodynamics equilibrium analysis within the entrained flow gasifier environment. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering, 4,* (1), 47-54.

Şengüler, İ. (2015). Eskişehir-Alpu havzasının jeolojisi ve havzadaki kömür ile bitümlü marnların özellikleri. Akıllı, H, Çalık, A., Sümer, E.Ö, Şen, P., ve Yavaş, F. (ed). *MTA 80. yıl sempozyumu genişletilmiş bildiri özetleri kitabı* içinde (217-221). Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü yayınları.

Şengüler, İ., Kara, İ., Bulut, Y., Yapıcı, E., Karabağ, E., Taka, M., Özdemir, M., ve Dümenci, S. (2015). Coal exploration in Turkey: MTA projects and new discovered lignite fields. *Uluslararası Enerji Hammaddeleri ve Enerji Zirvesi*, 1-3 Ekim 2015, İstanbul.

Tarakçıoğlu, A. (2015). *Bazı Türk linyitlerinin akışkan yatak gazlaştırıcıda gazlaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Taşkın H. (2015). Amasya ili Merzifon ilçesi 201201117 sicil numaralı linyit sahasının jeolojik genel arama raporu. *Yeni Çeltek Kömür ve Madencilik A.Ş. arama raporları*, Ankara (yayınlanmamış).

Temur, S., Orhan, H., ve Deli, A. (2007). Statistical interpretation of some physical and chemical data of the Tertiary coal deposits in Turkey. *Geochemistry International, 46*, (4), 409-422.

Tolay, M., Yamankaradeniz, H. Daradimos, G., Hirschfelder, ve Vostan, P. (2008). Temiz enerji üretimi için gazlaştırma teknolojisi. *İstanbul 7. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, 131-138. 26 Eylül 2015, http://www.uteg.org/makaleler.

Trommer, D. (2006). *Thermodynamic and kinetic analyses of the solar thermal gasification of petroleum coke*. Doktora Tezi, Swiss Federal Technology Enstitüsü, Zurich.

Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) (2015). *Türkiye Taşkömürü Kurumu sektör raporu*. Zonguldak, Türkiye Taş Kömürü Kurumu. 10 Şubat 2016, http://www.taskomuru.gov.tr/file/Is_Zekasi_Raporlari.

Tuncalı E, Bilgin Ç., Yavuz N., Toprak S., Köker A., Gencer Z., Ayçık H., ve Şahin N. (2002) *Türkiye tersiyer kömürlerinin kimyasal ve teknolojik özellikleri*. Ankara; Maden Tekik ve Arama Genel Müdürlüğü yayınları.

Ulaval, (2015). 28 Ekim 2015, http://www2.ggl.ulaval.capersonnelbourques33.53.jpg

Uysal, D., Doğan, Ö. M., ve Uysal, B. Z (2011). Kömürün gazlaştırılması ile hidrojen üretimi üzerine kömür tipinin ve sıcaklığın etkisi. *18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, (810-813), Zonguldak.

Ünalan, G. (2010). *Kömür jeolojisi*. Ankara; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi yayınları.

Ünlü, A., Kayahan, U., Argönül, A., Ziypak, M., ve Akça, A. (2015). Pilot scale entrained flow gasification of Turkish lignites. *Journal of the Energy Instute*, 1-7.

Ünver, Ö., Tüzüner, S., Başaran, M., Ersoy, M., Ercan, N., ve Gürkan, M. (2010). *Temiz kömür teknolojileri*. Ankara: Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Yayınları.

Van Der Merwe, G. L. (2011). *The influence of particle size and devolatilisation conditions on the CO_2 gasification of Highveld coal*. Yüksek Lisans Tezi, North-West Üniversitesi, Güney Afrika Cumhuriyeti. 19 Aralık 2015, http://dspace.nwu.ac.za/handle/10394/6979.

Van Dyk, J. C. (2014). *Appliyng thermo 350 m underground a factsage equlibrium study for underground coal gasification*. 10 Kasım 2015, http://gtt.mch.rwthaachen.de/gtt-web/Consulting/Workshops/WS2014/J.VanDyk.

Vural, E. S. (2014). *Soma-Eynez linyitinin su buharı gazlaştırması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Wagner, N. J. (2008). Coal gasification. Suarez-Ruiz, I., ve Crelling, J. C., (ed). Van Dyk, J. C., Matjie, R. H., ve Coertzen M., (as). *Applied coal petrology the role of petrology in coal utilization* içinde (119-144). London: Elsevier/Academic Press.

Wang, P. ve Massoudi, M. (2013). Slag behavior in gasifiers part I: influence of coal properties and gasification conditions. *Energies, 6*, 784-806. 09.11.2015, MDPI veritabanı.

Wang, P., Means, N., Shekhawat, D., Berry, D. ve Massoudi, M. (2015). Chemical-looping combustion and gasification of coals and oxygen carrier development:a brief review. *Energies, 8*, 10605-10635. 09.11.2015, MDPI veritabanı.

Yaşyerli, N. (1992). *Türk linyitlerinin karbondioksit ortamında gazlaştırma kinetiği*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Yıldırım A., Gümrükçüoğlu, M., Erdoğmuş, H., Altundağ, O., Arıel, N., Çeviker, Ş., ve diğer., (1976). Kömürden amonyak üretimi. *Kimya Mühendisleri Odası dergisi, Kömür ve Teknolojisi Özel Baskısı, 8* (75), 65-75.

Yılmazoğlu, M. Z. (2012). *Gazlaştırıcılı kombine çevrim santralleri ve yerli termik santrallerde performans güçlendirilmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

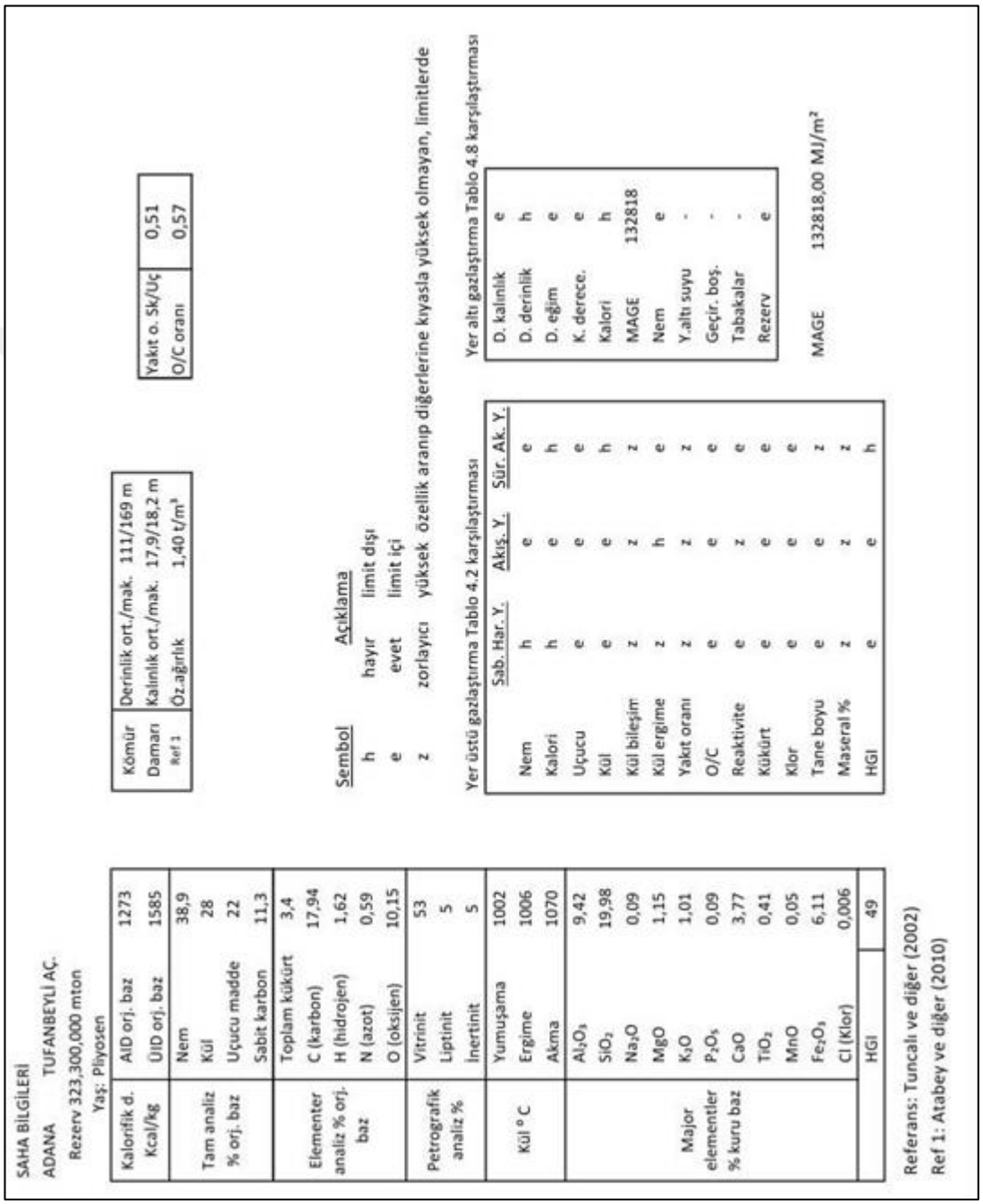
Yüksel, Y. E. (2010). *Türkiye'deki bazı kömürlerin gazlaştırılması ile hidrojen üretiminin ekserji analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Zhu, Y. ve Frey, H. C. (2010). Integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant design and technology. Roddy, D. (ed). *Woodhead publishing series in energy: number 5, advanced power plant materials, design and technology* içinde (54-83). Cambridge: Woodhead Publishing Limited/CRC Press LCC.

Ziypak, M. (2011). Development of gasification and activities in Turkish Coal Enterprises. *International Pittsburgh Coal Conference*, 12-15 Eylül, Amerika Birleşik Devletleri. http://www.engineering.pitt.edu.

EKLER

EK-1: Adana-Tufanbeyli Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

ADANA TUFANBEYLİ AÇ.

Rezerv 323,300,000 mton

Yaş: Pliyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AİD orj. baz	1273
	ÜİD orj. baz	1585
Tam analiz % orj. baz	Nem	38,9
	Kül	28
	Uçucu madde	22
	Sabit karbon	11,3
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	3,4
	C (karbon)	17,94
	H (hidrojen)	1,62
	N (azot)	0,59
	O (oksijen)	10,15
Petrografik analiz %	Vitrinit	53
	Liptinit	5
	İnertinit	5
Kül ° C	Yumuşama	1002
	Ergime	1006
	Akma	1070
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	9,42
	SiO_2	19,98
	Na_2O	0,09
	MgO	1,15
	K_2O	1,01
	P_2O_5	0,09
	CaO	3,77
	TiO_2	0,41
	MnO	0,05
	Fe_2O_3	6,11
	Cl (klor)	0,006
	HGI	49

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

Kömür Damarı	Derinlik ort./mak. 111/169 m
	Kalınlık ort./mak. 17,9/18,2 m
Ref 1	Öz.ağırlık 1,40 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,51
O/C oranı	0,57

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

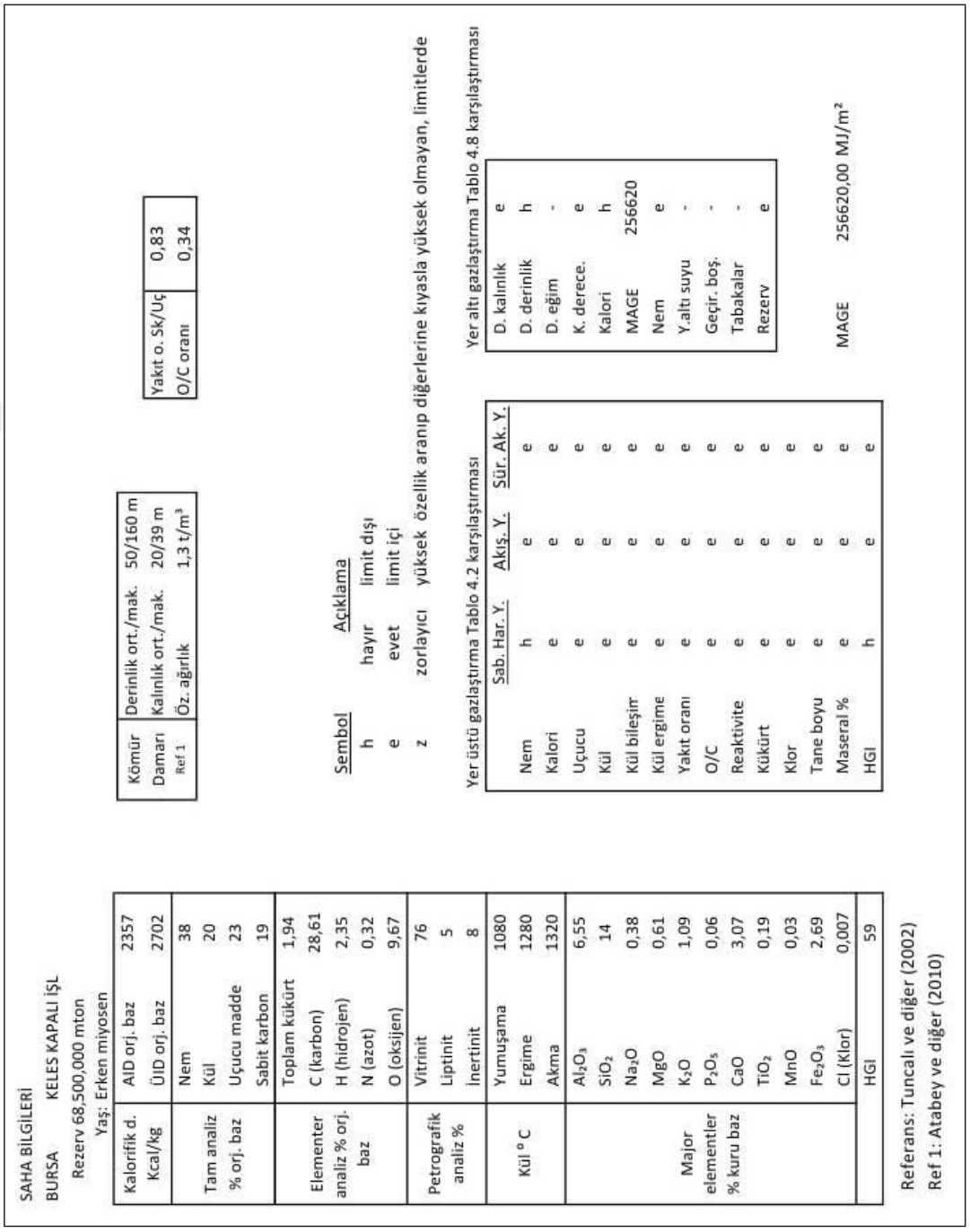
	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	h	e	h
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	h
Kül bileşim	z	z	z
Kül ergime	z	h	e
Yakıt oranı	z	z	z
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	z	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	z	z	z
HGI	e	e	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	h
D. eğim	e
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	132818
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 132818,00 MJ/m²

EK-2: Bursa-Keles Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

BURSA KELES KAPALI İŞL

Rezerv 68,500,000 mton

Yaş: Erken miyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AİD orj. baz	2357
	ÜİD orj. baz	2702
Tam analiz % orj. baz	Nem	38
	Kül	20
	Uçucu madde	23
	Sabit karbon	19
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,94
	C (karbon)	28,61
	H (hidrojen)	2,35
	N (azot)	0,32
	O (oksijen)	9,67
Petrografik analiz %	Vitrinit	76
	Liptinit	5
	İnertinit	8
Kül ° C	Yumuşama	1080
	Ergime	1280
	Akma	1320
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	6,55
	SiO_2	14
	Na_2O	0,38
	MgO	0,61
	K_2O	1,09
	P_2O_5	0,06
	CaO	3,07
	TiO_2	0,19
	MnO	0,03
	Fe_2O_3	2,69
	Cl (Klor)	0,007
	HGI	59

Kömür Damarı Ref 1	Derinlik ort./mak.	50/160 m
	Kalınlık ort./mak.	20/39 m
	Öz. ağırlık	1,3 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,83
O/C oranı	0,34

Sembol	Açıklama	
h	hayır	limit dışı
e	evet	limit içi
z	zorlayıcı	yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşim	e	e	e
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	e
Maseral %	e	e	e
HGI	h	e	e

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

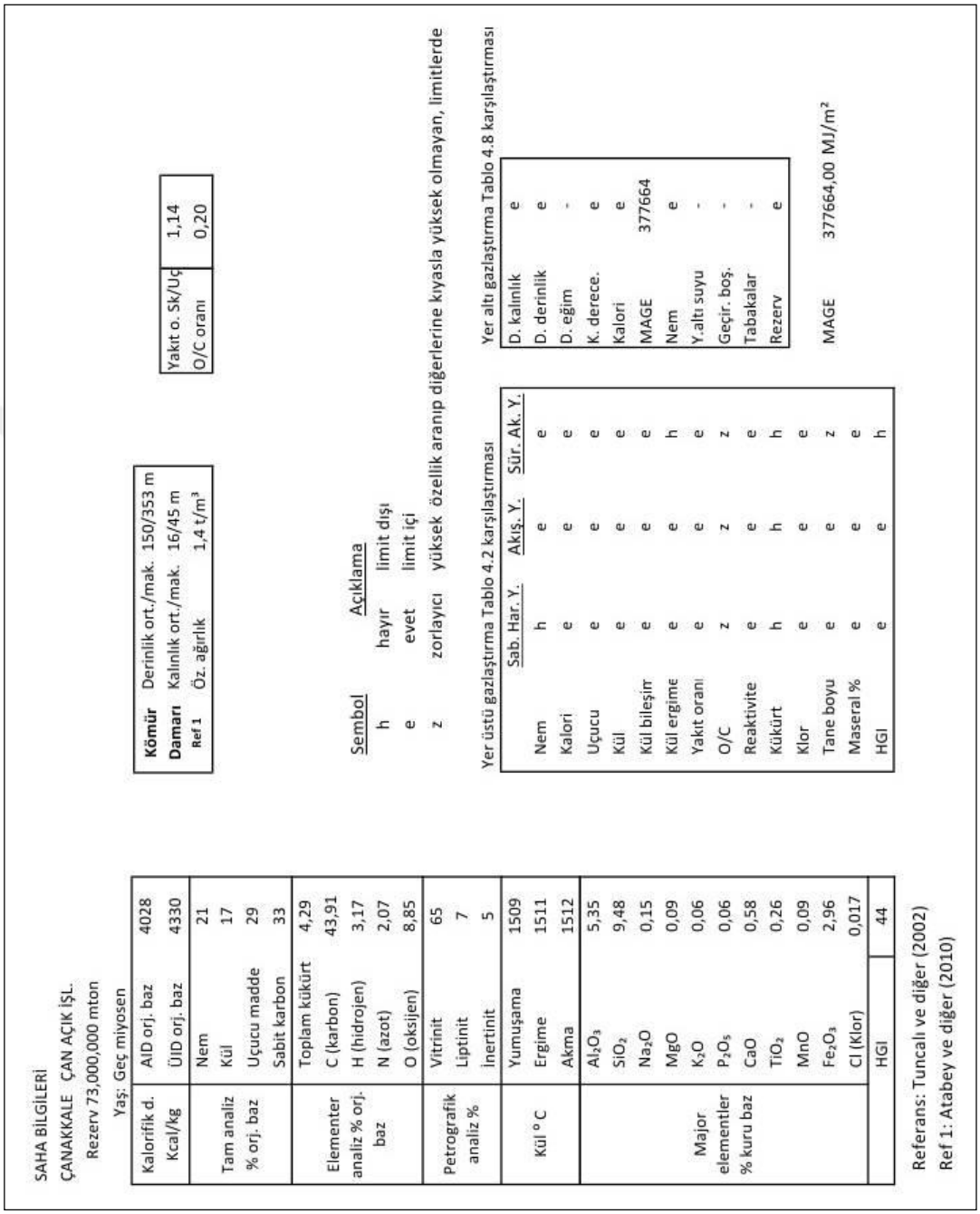
D. kalınlık	e
D. derinlik	h
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	256620
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 256620,00 MJ/m²

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-3: Çanakkale-Çan Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ
ÇANAKKALE ÇAN AÇIK İŞL.
Rezerv 73,000,000 mton
Yaş: Geç miyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	4028
	ÜID orj. baz	4330
Tam analiz % orj. baz	Nem	21
	Kül	17
	Uçucu madde	29
	Sabit karbon	33
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	4,29
	C (karbon)	43,91
	H (hidrojen)	3,17
	N (azot)	2,07
	O (oksijen)	8,85
Petrografik analiz %	Vitrinit	65
	Liptinit	7
	İnertinit	5
Kül ° C	Yumuşama	1509
	Ergime	1511
	Akma	1512
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	5,35
	SiO_2	9,48
	Na_2O	0,15
	MgO	0,09
	K_2O	0,06
	P_2O_5	0,06
	CaO	0,58
	TiO_2	0,26
	MnO	0,09
	Fe_2O_3	2,96
	Cl (Klor)	0,017
HGI		44

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)
Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

Kömür	Derinlik ort./mak.	150/353 m
Damarı	Kalınlık ort./mak.	16/45 m
Ref 1	Öz. ağırlık	1,4 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	1,14
O/C oranı	0,20

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

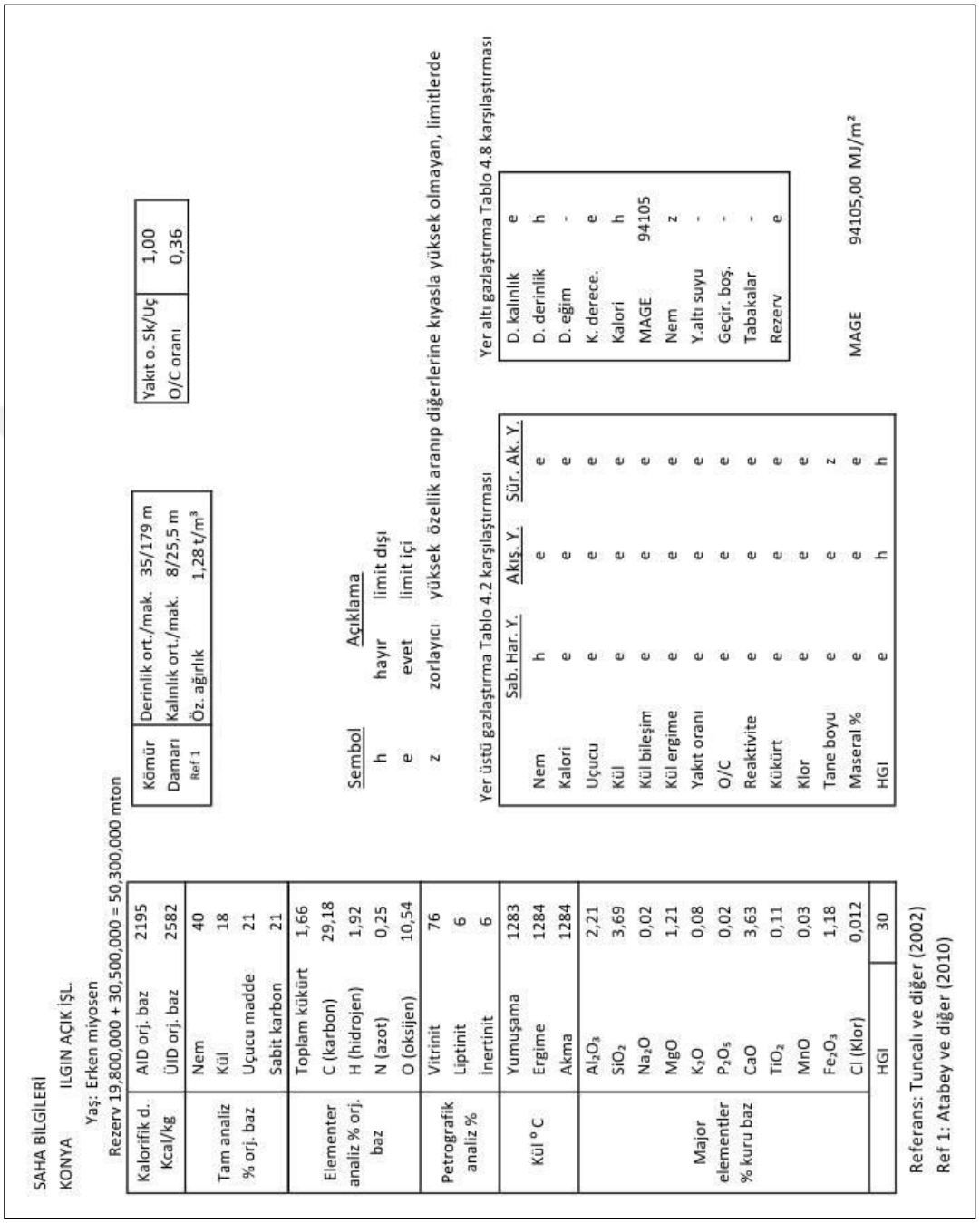
	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşimi	e	e	e
Kül ergime	e	e	h
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	z	z	z
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	h	h	h
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	e	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	e
MAGE	377664
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 377664,00 MJ/m²

EK-4: Konya-Ilgın Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

KONYA ILGIN AÇIK İŞL.

Yaş: Erken miyosen

Rezerv 19,800,000 + 30,500,000 = 50,300,000 mton

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	2195
	ÜID orj. baz	2582
Tam analiz % orj. baz	Nem	40
	Kül	18
	Uçucu madde	21
	Sabit karbon	21
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,66
	C (karbon)	29,18
	H (hidrojen)	1,92
	N (azot)	0,25
	O (oksijen)	10,54
Petrografik analiz %	Vitrinit	76
	Liptinit	6
	İnertinit	6
Kül ° C	Yumuşama	1283
	Ergime	1284
	Akma	1284
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	2,21
	SiO_2	3,69
	Na_2O	0,02
	MgO	1,21
	K_2O	0,08
	P_2O_5	0,02
	CaO	3,63
	TiO_2	0,11
	MnO	0,03
	Fe_2O_3	1,18
	Cl (Klor)	0,012
HGI		30

Kömür Damarı	Derinlik ort./mak.	35/179 m
	Kalınlık ort./mak.	8/25,5 m
Ref 1	Öz. ağırlık	1,28 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	1,00
O/C oranı	0,36

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşim	e	e	e
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	h	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

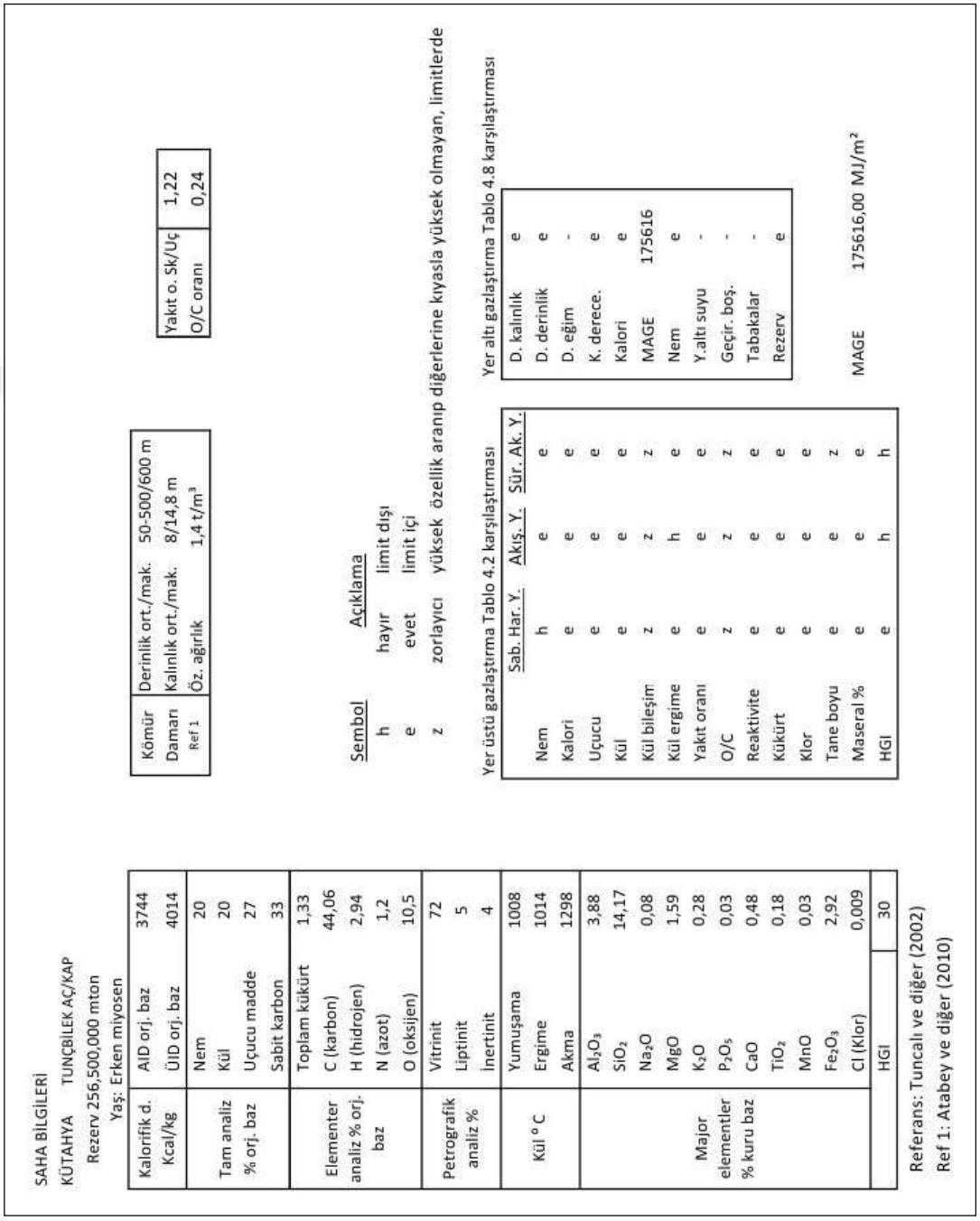
D. kalınlık	e
D. derinlik	h
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	94105
Nem	z
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 94105,00 MJ/m²

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-5: Kütahya-Tunçbilek Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

KÜTAHYA TUNÇBİLEK AÇ/KAP

Rezerv 256,500,000 mton

Yaş: Erken miyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	3744
	ÜID orj. baz	4014
Tam analiz % orj. baz	Nem	20
	Kül	20
	Uçucu madde	27
	Sabit karbon	33
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,33
	C (karbon)	44,06
	H (hidrojen)	2,94
	N (azot)	1,2
	O (oksijen)	10,5
Petrografik analiz %	Vitrinit	72
	Liptinit	5
	İnertinit	4
Kül ° C	Yumuşama	1008
	Ergime	1014
	Akma	1298
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	3,88
	SiO_2	14,17
	Na_2O	0,08
	MgO	1,59
	K_2O	0,28
	P_2O_5	0,03
	CaO	0,48
	TiO_2	0,18
	MnO	0,03
	Fe_2O_3	2,92
	Cl (Klor)	0,009
HGI		30

Kömür Damarı Ref 1	Derinlik ort./mak.	50-500/600 m
	Kalınlık ort./mak.	8/14,8 m
	Öz. ağırlık	1,4 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	1,22
O/C oranı	0,24

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşim	z	z	z
Kül ergime	e	h	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	z	z	z
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	h	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

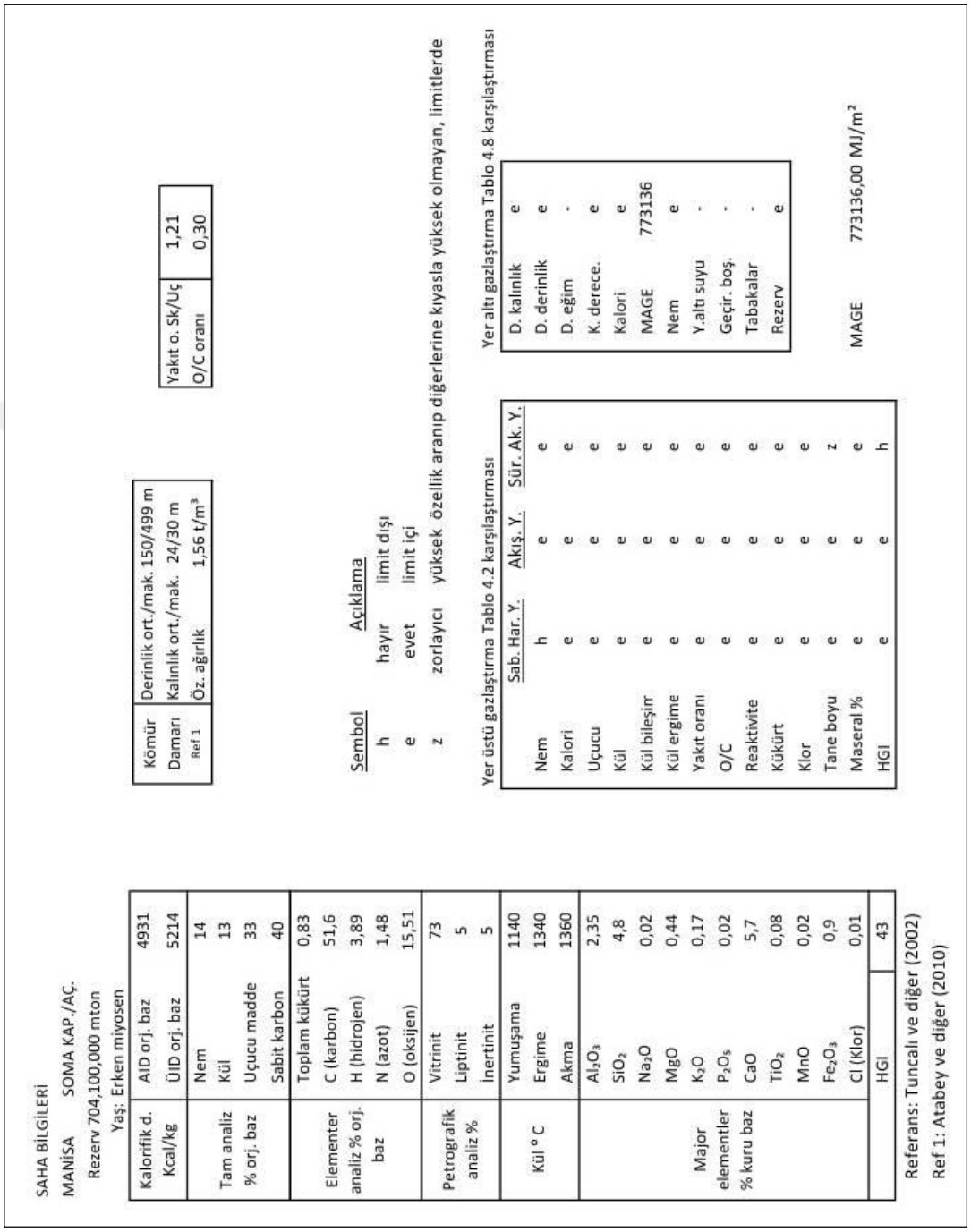
D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	e
MAGE	175616
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 175616,00 MJ/m²

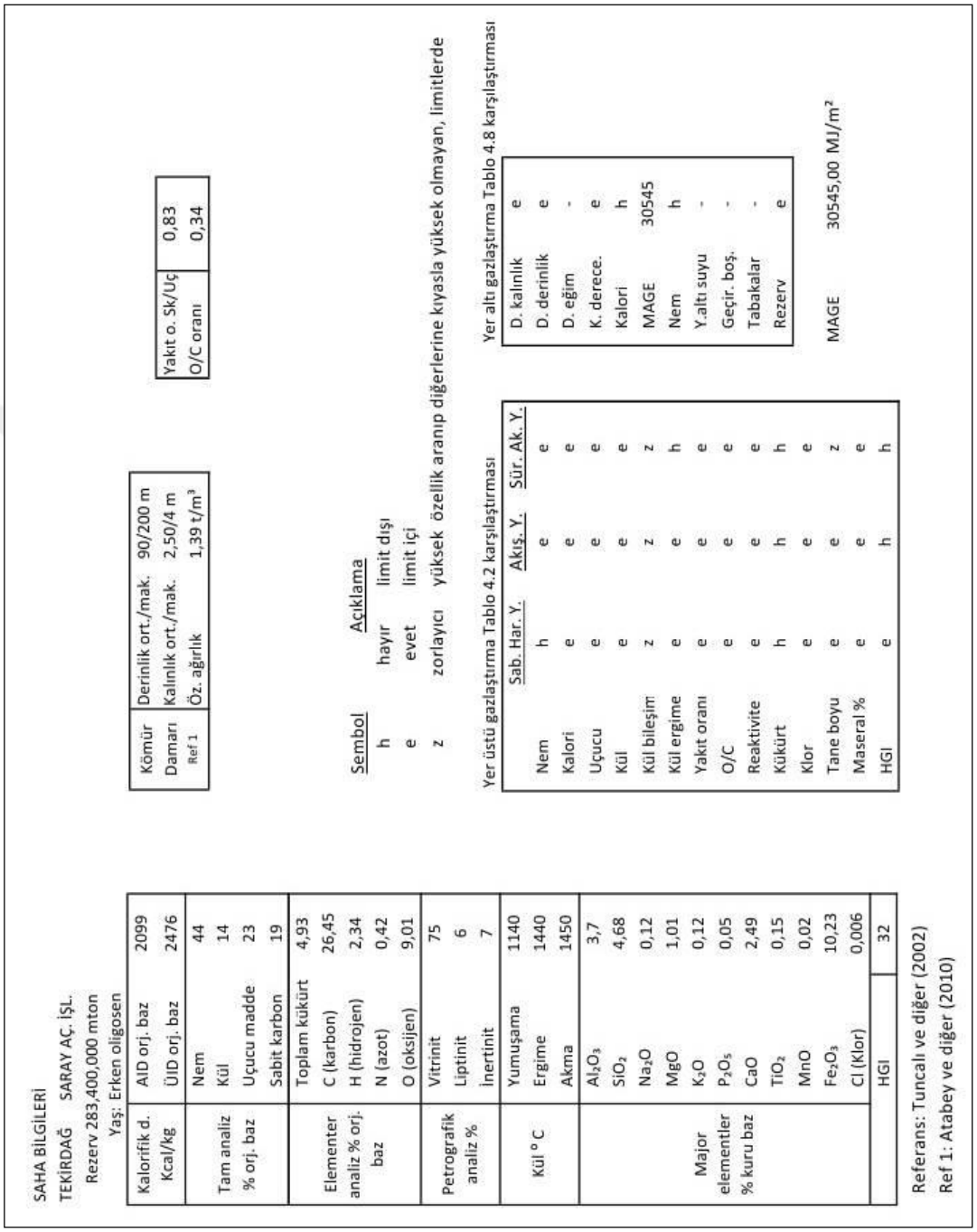
Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-6: Manisa-Soma Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-7: Tekirdağ-Saray Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

TEKİRDAĞ SARAY AÇ. İŞL.

Rezerv 283,400,000 mton

Yaş: Erken oligosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	2099
	ÜID orj. baz	2476
Tam analiz % orj. baz	Nem	44
	Kül	14
	Uçucu madde	23
	Sabit karbon	19
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	4,93
	C (karbon)	26,45
	H (hidrojen)	2,34
	N (azot)	0,42
	O (oksijen)	9,01
Petrografik analiz %	Vitrinit	75
	Liptinit	6
	İnertinit	7
Kül ° C	Yumuşama	1140
	Ergime	1440
	Akma	1450
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	3,7
	SiO_2	4,68
	Na_2O	0,12
	MgO	1,01
	K_2O	0,12
	P_2O_5	0,05
	CaO	2,49
	TiO_2	0,15
	MnO	0,02
	Fe_2O_3	10,23
	Cl (Klor)	0,006
HGI		32

Kömür Damarı Ref 1		
	Derinlik ort./mak.	90/200 m
	Kalınlık ort./mak.	2,50/4 m
	Öz. ağırlık	1,39 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,83
O/C oranı	0,34

Sembol	Açıklama	
h	hayır	limit dışı
e	evet	limit içi
z	zorlayıcı	yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşim	z	z	z
Kül ergime	e	e	h
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	h	h	h
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	h	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

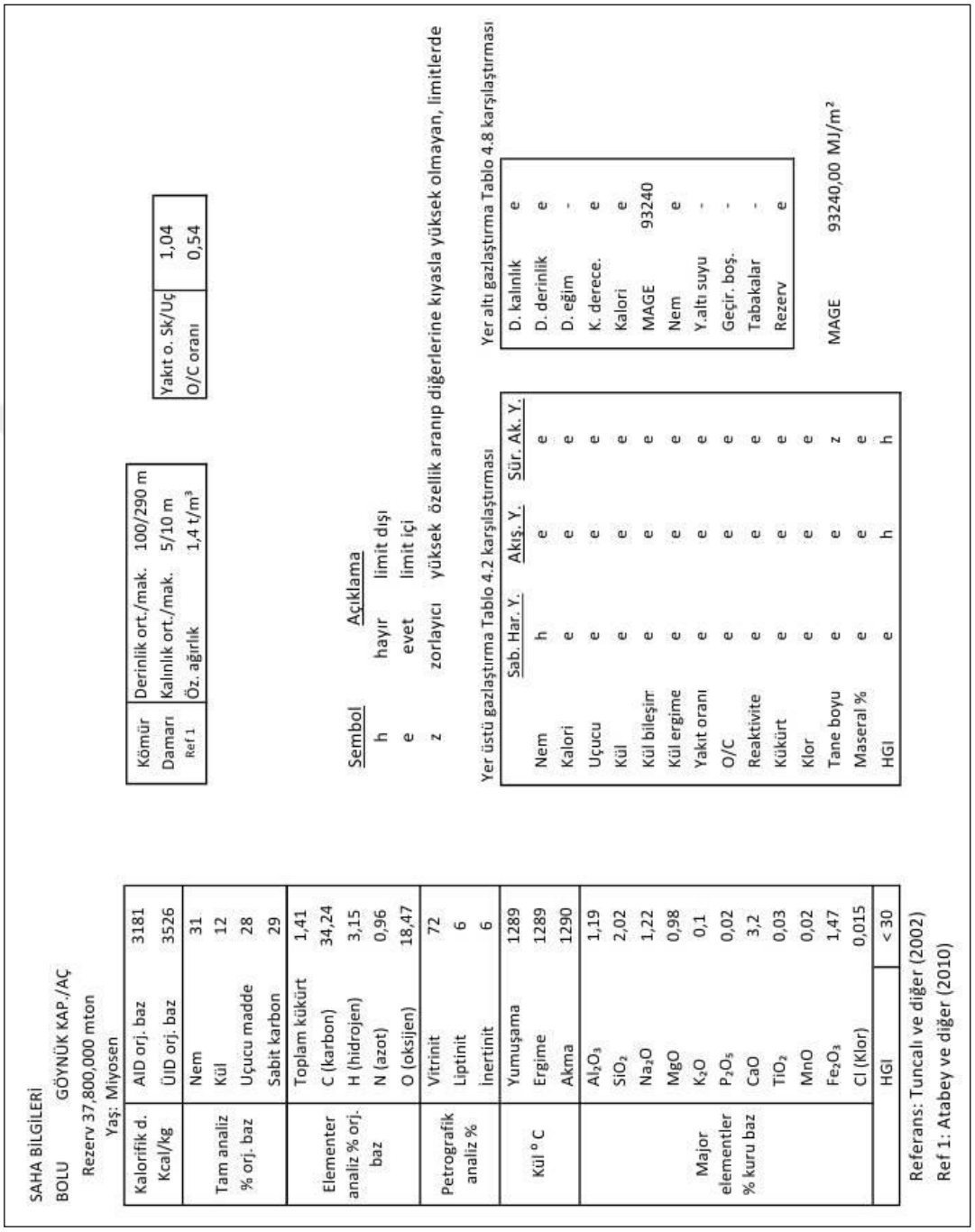
D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	30545
Nem	h
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 30545,00 MJ/m²

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-8: Bolu-Göynük Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

BOLU GÖYNÜK KAP./AÇ

Rezerv 37,800,000 mton

Yaş: Miyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AİD orj. baz	3181
	ÜİD orj. baz	3526
Tam analiz % orj. baz	Nem	31
	Kül	12
	Uçucu madde	28
	Sabit karbon	29
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,41
	C (karbon)	34,24
	H (hidrojen)	3,15
	N (azot)	0,96
	O (oksijen)	18,47
Petrografik analiz %	Vitrinit	72
	Liptinit	6
	İnertinit	6
Kül ° C	Yumuşama	1289
	Ergime	1289
	Akma	1290
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	1,19
	SiO_2	2,02
	Na_2O	1,22
	MgO	0,98
	K_2O	0,1
	P_2O_5	0,02
	CaO	3,2
	TiO_2	0,03
	MnO	0,02
	Fe_2O_3	1,47
	Cl (Klor)	0,015
	HGI	< 30

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

Kömür Damarı	Derinlik ort./mak.	100/290 m
Ref 1	Kalınlık ort./mak.	5/10 m
	Öz. ağırlık	1,4 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	1,04
O/C oranı	0,54

Sembol	Açıklama	
h	hayır	limit dışı
e	evet	limit içi
z	zorlayıcı	yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

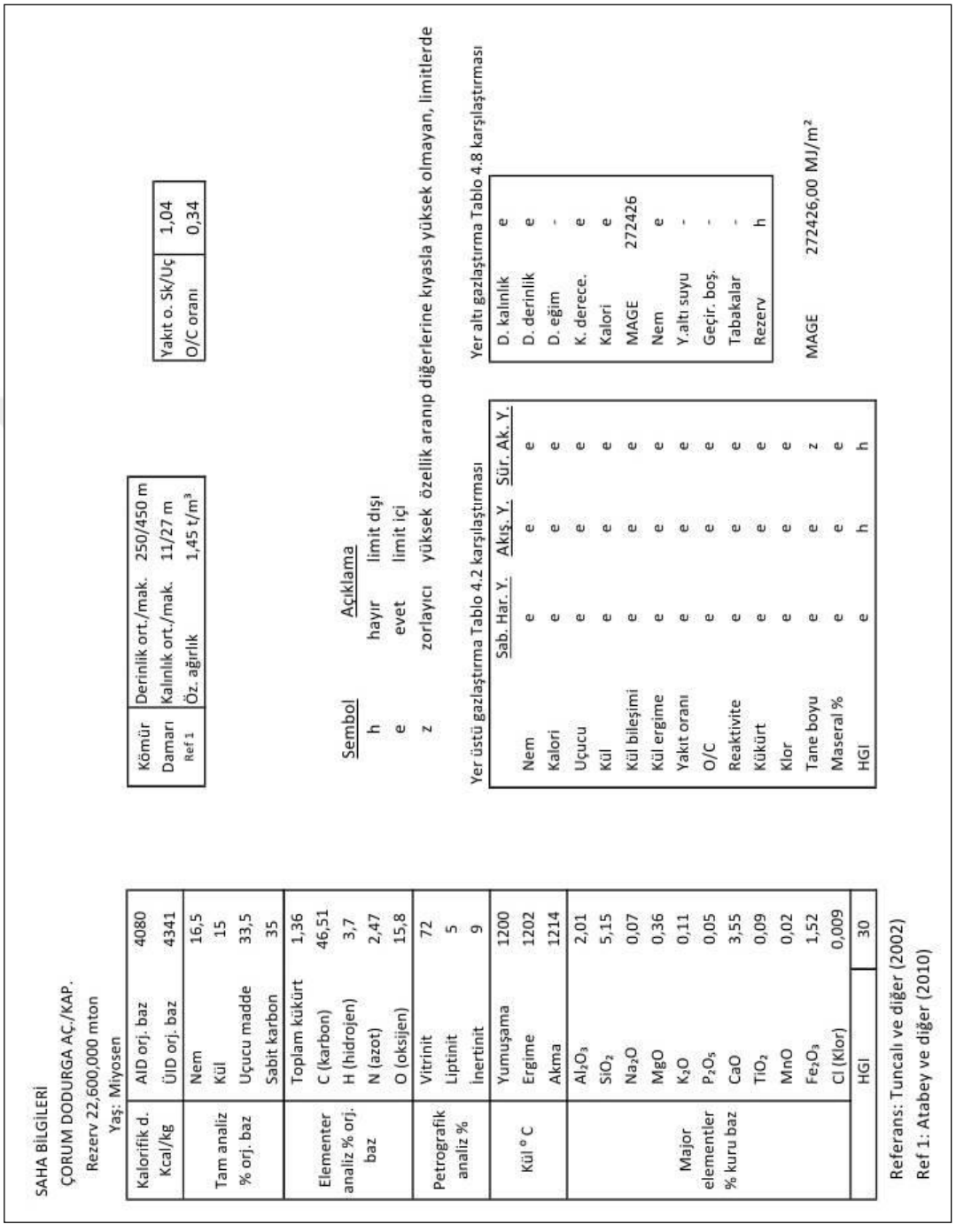
	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşimi	e	e	e
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	h	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	e
MAGE	93240
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 93240,00 MJ/m²

EK-9: Çorum-Dodurga Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

ÇORUM DODURGA AÇ./KAP.

Rezerv 22,600,000 mton

Yaş: Miyosen

Kalorifik d.	AID orj. baz	4080
Kcal/kg	ÜID orj. baz	4341
Tam analiz % orj. baz	Nem	16,5
	Kül	15
	Uçucu madde	33,5
	Sabit karbon	35
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,36
	C (karbon)	46,51
	H (hidrojen)	3,7
	N (azot)	2,47
	O (oksijen)	15,8
Petrografik analiz %	Vitrinit	72
	Liptinit	5
	İnertinit	9
Kül ° C	Yumuşama	1200
	Ergime	1202
	Akma	1214
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	2,01
	SiO_2	5,15
	Na_2O	0,07
	MgO	0,36
	K_2O	0,11
	P_2O_5	0,05
	CaO	3,55
	TiO_2	0,09
	MnO	0,02
	Fe_2O_3	1,52
	Cl (Klor)	0,009
HGI		30

Kömür Damarı		
Ref 1	Derinlik ort./mak.	250/450 m
	Kalınlık ort./mak.	11/27 m
	Öz. ağırlık	1,45 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	1,04
O/C oranı	0,34

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	e	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşimi	e	e	e
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	h	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

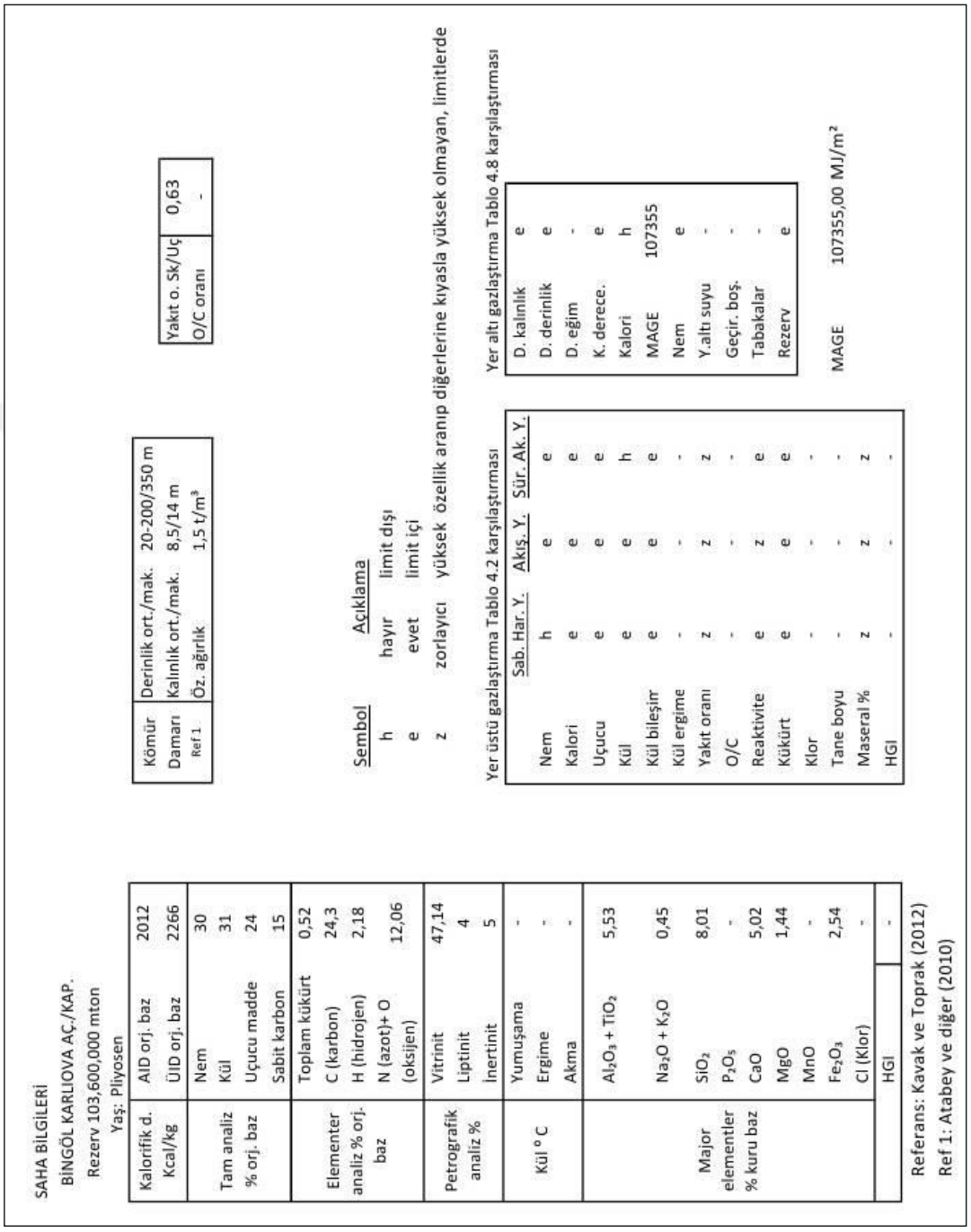
D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	e
MAGE	272426
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	h

MAGE 272426,00 MJ/m²

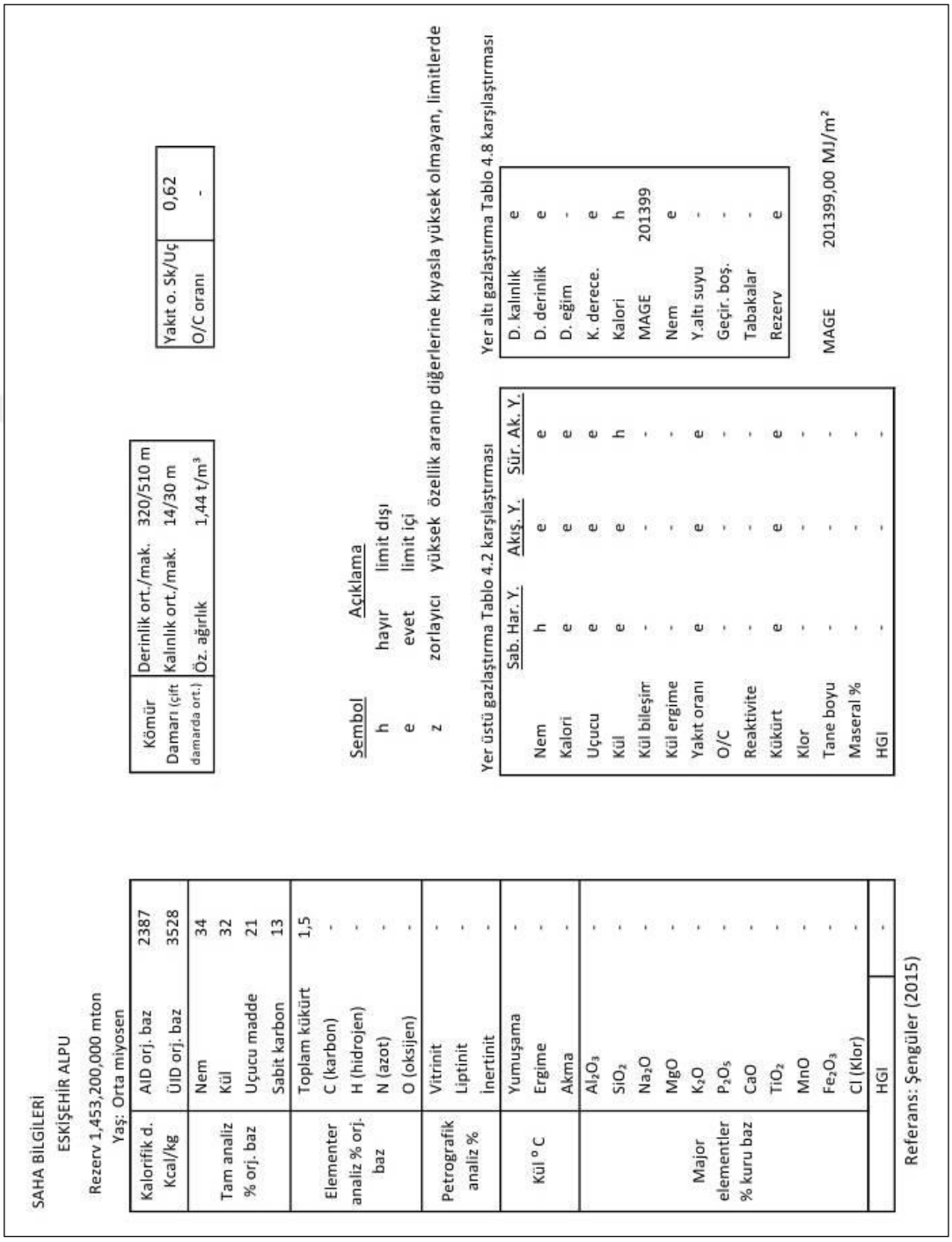
Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

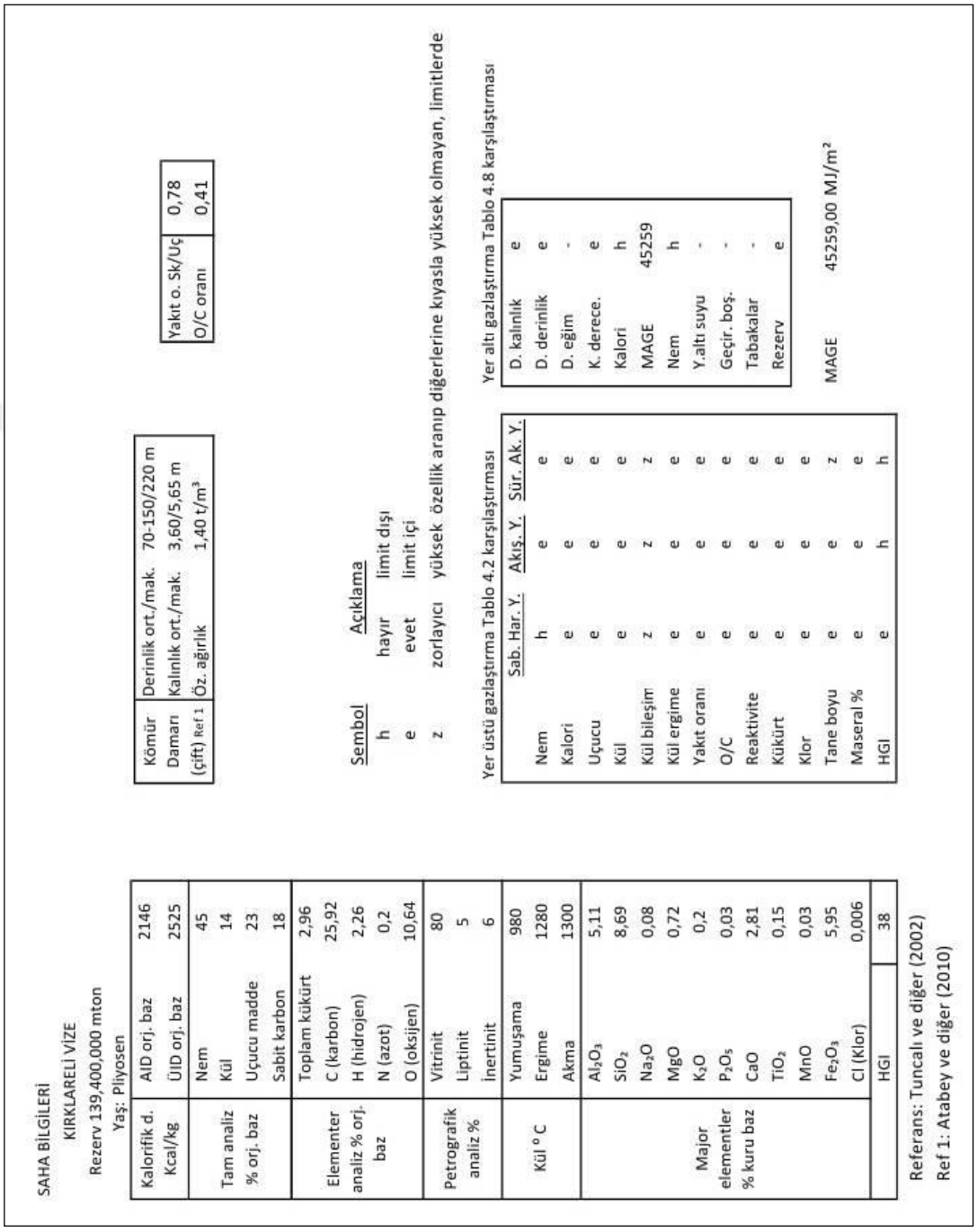
EK-10: Bingöl-Karlıova Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-11: Eskişehir-Alpu Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-12: Kırklareli-Vize Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-13: Kahramanmaraş-Elbistan Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi

SAHA BİLGİLERİ
K.MARAŞ AFŞİN ELBİSTAN AÇ.İŞL
Rezerv 4,831,000,000 mton
Yaş: Pliyosen

Kalorifik d.	AID orj. baz	1530
Kcal/kg	ÜID orj. baz	1913
Tam analiz % orj. baz	Nem	50
	Kül	17
	Uçucu madde	21
	Sabit karbon	12
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,94
	C (karbon)	21,19
	H (hidrojen)	1,83
	N (azot)	0,52
	O (oksijen)	9,4
Petrografik analiz %	Vitrinit	68
	Liptinit	3
	İnertinit	6
Kül ° C	Yumuşama	1120
	Ergime	1180
	Akma	1200
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	4,94
	SiO_2	11,59
	Na_2O	0,1
	MgO	0,97
	K_2O	0,27
	P_2O_5	0,2
	CaO	7,35
	TiO_2	0,27
	MnO	0,03
	Fe_2O_3	2,17
	Cl (Klor)	0,006
HGI		33

Kömür Damarı Ref 1		
	Derinlik ort./mak.	50/150 m
	Kalınlık ort./mak.	40/58 m
	Öz. ağırlık	1,20 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,57
O/C oranı	0,44

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	h	e	h
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşir	z	z	z
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	z	z	z
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	h	h

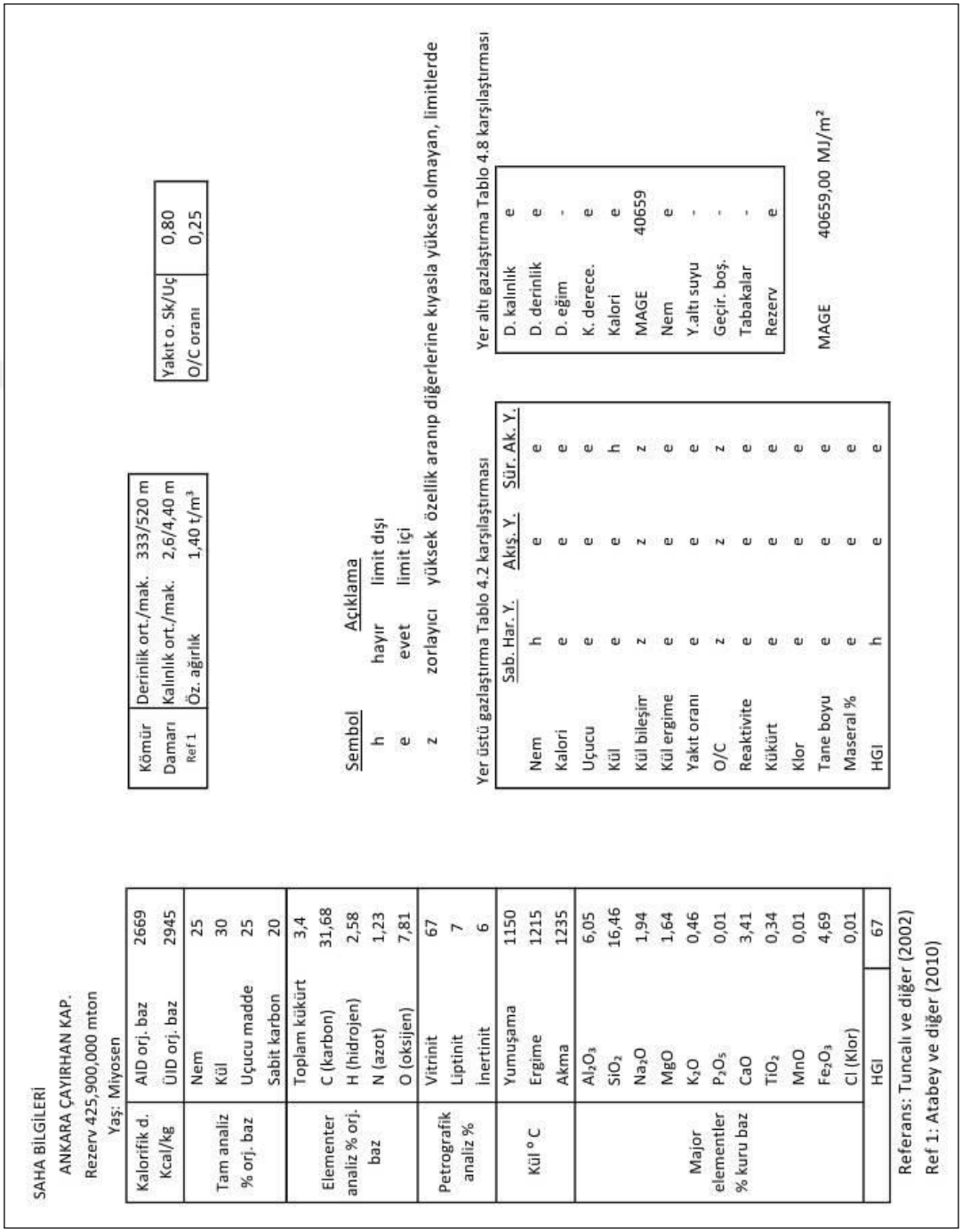
Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	h
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	307680
Nem	h
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

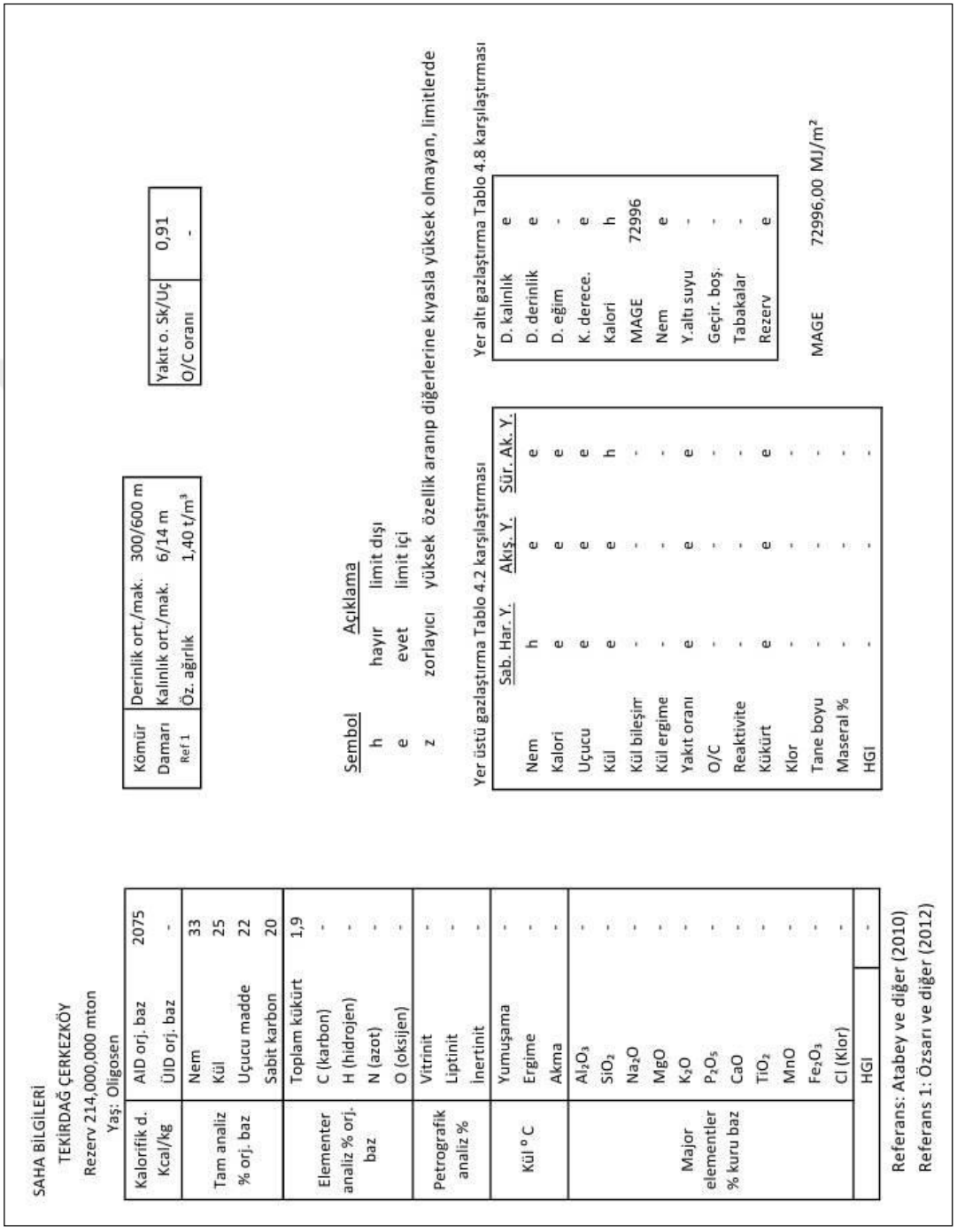
MAGE 307680,00 MJ/m²

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)
Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-14: Ankara-Beypazarı Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-15: Tekirdağ-Çerkezköy Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

TEKİRDAĞ ÇERKEZKÖY

Rezerv 214,000,000 mton

Yaş: Oligosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	2075
	ÜID orj. baz	-
Tam analiz % orj. baz	Nem	33
	Kül	25
	Uçucu madde	22
	Sabit karbon	20
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,9
	C (karbon)	-
	H (hidrojen)	-
	N (azot)	-
	O (oksijen)	-
Petrografik analiz %	Vitrinit	-
	Liptinit	-
	İnertinit	-
Kül ° C	Yumuşama	-
	Ergime	-
	Akma	-
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	-
	SiO_2	-
	Na_2O	-
	MgO	-
	K_2O	-
	P_2O_5	-
	CaO	-
	TiO_2	-
	MnO	-
	Fe_2O_3	-
	Cl (Klor)	-
HGI		-

Kömür Damarı Ref 1	Derinlik ort./mak.	300/600 m
	Kalınlık ort./mak.	6/14 m
	Öz. ağırlık	1,40 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,91
O/C oranı	-

Sembol	Açıklama	
h	hayır	limit dışı
e	evet	limit içi
z	zorlayıcı	yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	h
Kül bileşimi	-	-	-
Kül ergime	-	-	-
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	-	-	-
Reaktivite	-	-	-
Kükürt	e	e	e
Klor	-	-	-
Tane boyu	-	-	-
Maseral %	-	-	-
HGI	-	-	-

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	72996
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 72996,00 MJ/m²

Referans: Atabey ve diğer (2010)

Referans 1: Özsarı ve diğer (2012)

EK-16: Konya-Karapınar Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi

SAHA BİLGİLERİ

KONYA KARAPINAR

Rezerv 1,832,000,000 mton

Yaş: Pliyosen

Kalorifik d.	AİD orj. baz	1343
Kcal/kg	ÜİD orj. baz	-
Tam analiz % orj. baz	Nem	47
	Kül	20
	Uçucu madde	23
	Sabit karbon	10
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	2,83
	C (karbon)	-
	H (hidrojen)	-
	N (azot)	-
	O (oksijen)	-
Petrografik analiz %	Vitrinit	-
	Liptinit	-
	İnertinit	-
Kül ° C	Yumuşama	-
	Ergime	-
	Akma	-
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	-
	SiO_2	-
	Na_2O	-
	MgO	-
	K_2O	-
	P_2O_5	-
	CaO	-
	TiO_2	-
	MnO	-
	Fe_2O_3	-
	Cl (Klor)	-
HGI		-

Kömür Damarı Ref 1		
	Derinlik ort./mak.	180/421 m
	Kalınlık ort./mak.	27/33 m
	Öz. ağırlık	1,30 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,43
O/C oranı	-

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	h	e	h
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşim	-	-	-
Kül ergime	-	-	-
Yakıt oranı	z	z	z
O/C	-	-	-
Reaktivite	-	-	-
Kükürt	e	e	e
Klor	-	-	-
Tane boyu	-	-	-
Maseral %	-	-	-
HGI	-	-	-

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

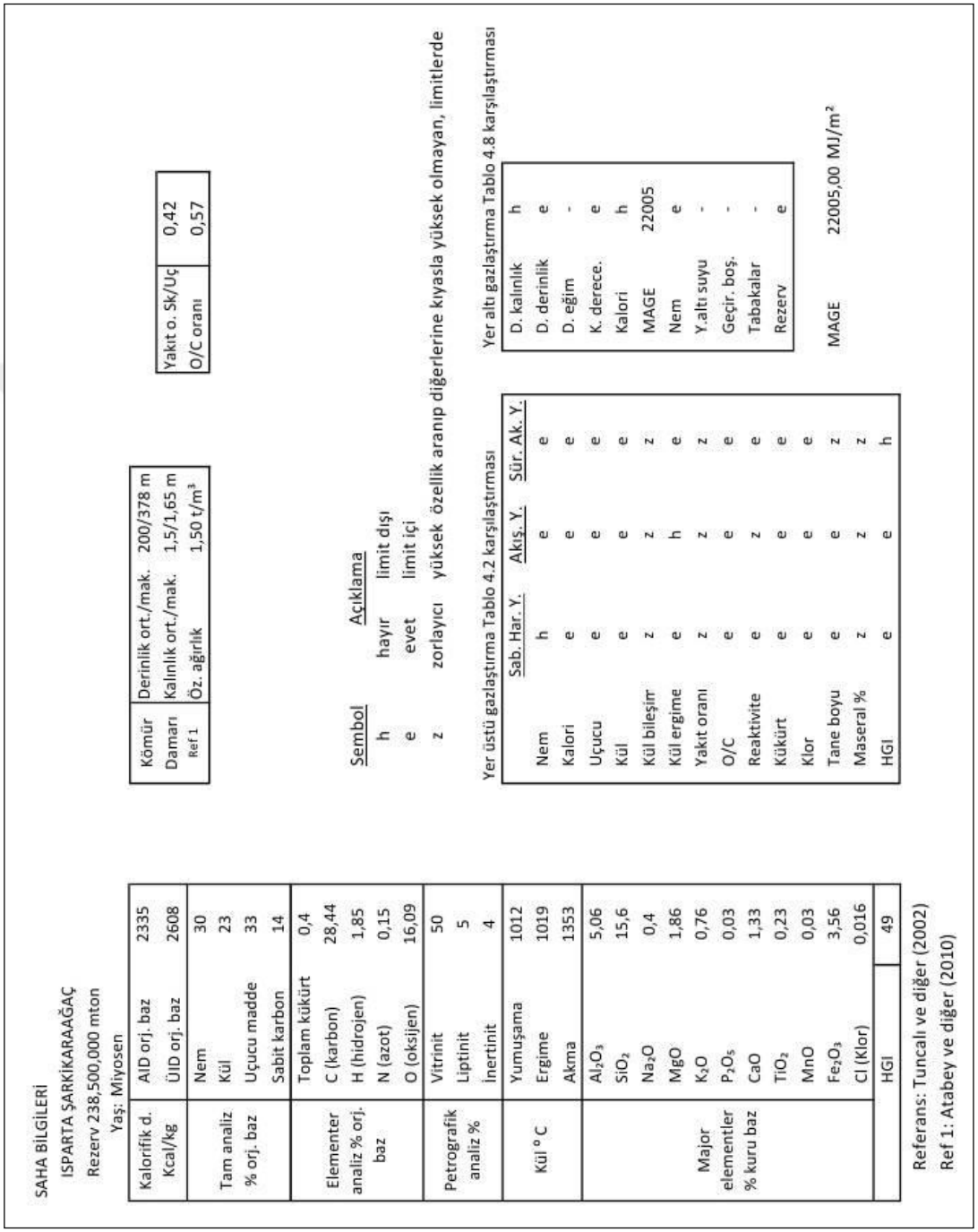
D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	197262
Nem	h
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 197262,00 MJ/m²

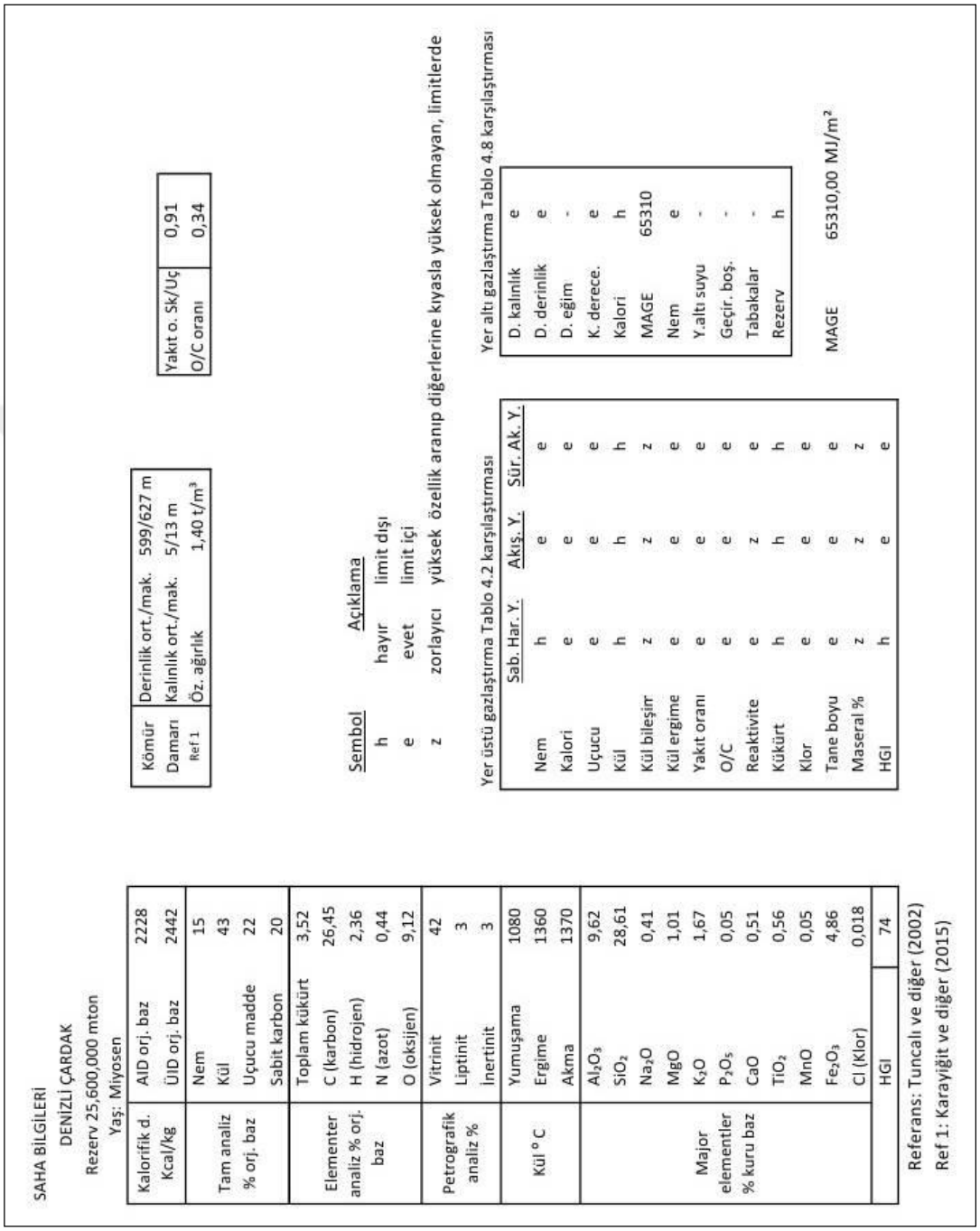
Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-17: Isparta-Şarkikaraağaç Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-18: Denizli-Çardak Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

DENİZLİ ÇARDAK

Rezerv 25,600,000 mton

Yaş: Miyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	2228
	ÜID orj. baz	2442
Tam analiz % orj. baz	Nem	15
	Kül	43
	Uçucu madde	22
	Sabit karbon	20
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	3,52
	C (karbon)	26,45
	H (hidrojen)	2,36
	N (azot)	0,44
	O (oksijen)	9,12
Petrografik analiz %	Vitrinit	42
	Liptinit	3
	İnertinit	3
Kül ° C	Yumuşama	1080
	Ergime	1360
	Akma	1370
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	9,62
	SiO_2	28,61
	Na_2O	0,41
	MgO	1,01
	K_2O	1,67
	P_2O_5	0,05
	CaO	0,51
	TiO_2	0,56
	MnO	0,05
	Fe_2O_3	4,86
	Cl (Klor)	0,018
HGI		74

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Karayiğit ve diğer (2015)

Kömür Damarı Ref 1		
	Derinlik ort./mak.	599/627 m
	Kalınlık ort./mak.	5/13 m
	Öz. ağırlık	1,40 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,91
O/C oranı	0,34

Sembol	Açıklama	
h	hayır	limit dışı
e	evet	limit içi
z	zorlayıcı	yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

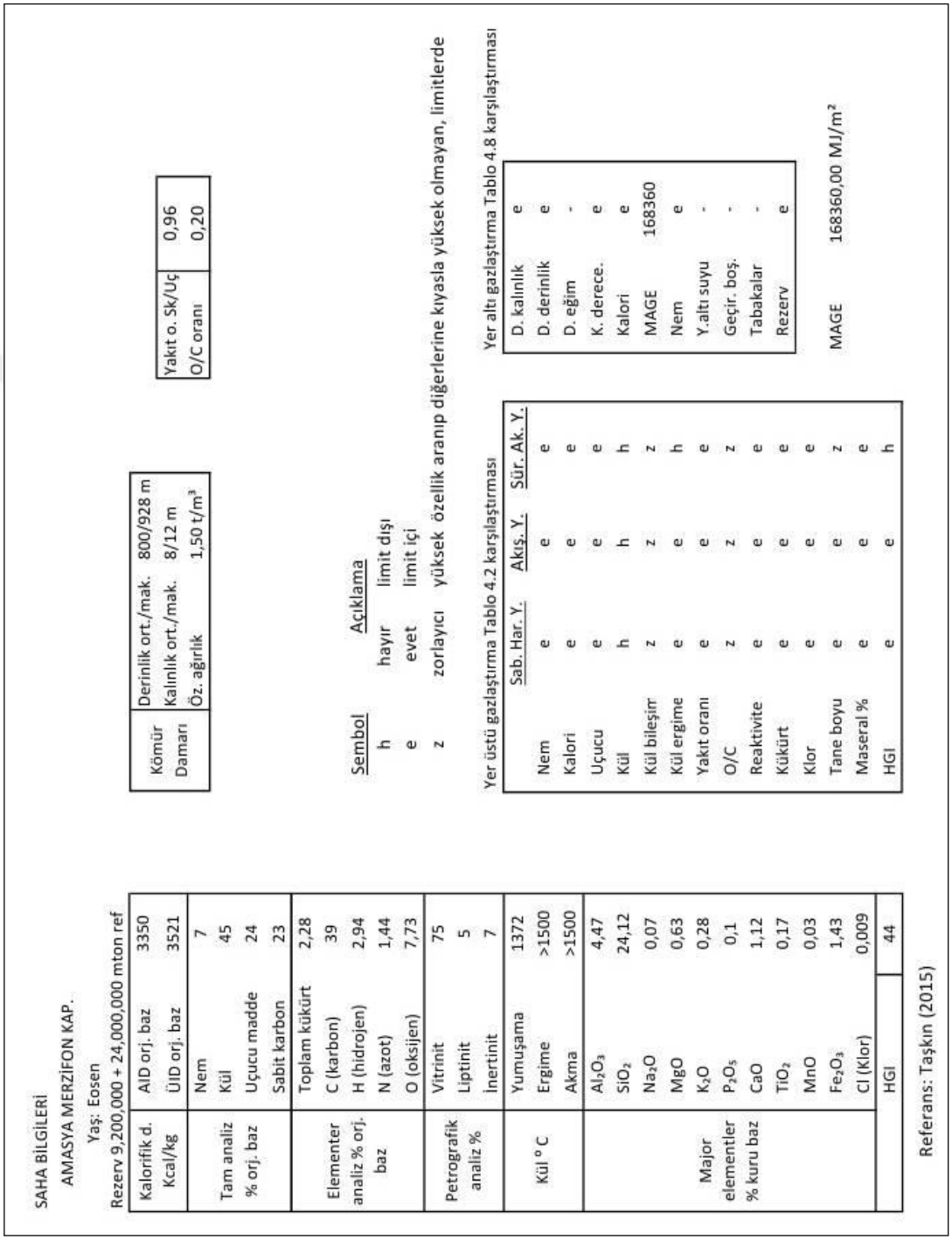
	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	h	h	h
Kül bileşim	z	z	z
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	z	e
Kükürt	h	h	h
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	e
Maseral %	z	z	z
HGI	h	e	e

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	65310
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	h

MAGE 65310,00 MJ/m²

EK-19: Amasya-Merzifon Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

AMASYA MERZİFON KAP.

Yaş: Eosen

Rezerv 9,200,000 + 24,000,000 mton ref

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	3350
	ÜID orj. baz	3521
Tam analiz % orj. baz	Nem	7
	Kül	45
	Uçucu madde	24
	Sabit karbon	23
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	2,28
	C (karbon)	39
	H (hidrojen)	2,94
	N (azot)	1,44
	O (oksijen)	7,73
Petrografik analiz %	Vitrinit	75
	Liptinit	5
	İnertinit	7
Kül ° C	Yumuşama	1372
	Ergime	>1500
	Akma	>1500
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	4,47
	SiO_2	24,12
	Na_2O	0,07
	MgO	0,63
	K_2O	0,28
	P_2O_5	0,1
	CaO	1,12
	TiO_2	0,17
	MnO	0,03
	Fe_2O_3	1,43
	Cl (Klor)	0,009
	HGI	44

Referans: Taşkın (2015)

Kömür Damarı	Derinlik ort./mak.	800/928 m
	Kalınlık ort./mak.	8/12 m
	Öz. ağırlık	1,50 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,96
O/C oranı	0,20

Sembol	Açıklama	
h	hayır	limit dışı
e	evet	limit içi
z	zorlayıcı	yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	e	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	h	h	h
Kül bileşim	z	z	z
Kül ergime	e	e	h
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	z	z	z
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	e	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	e
MAGE	168360
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 168360,00 MJ/m²

EK-20: Sivas-Kangal Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi

SAHA BİLGİLERİ

SİVAS KANGAL AÇ.

Rezerv 98,500,000 mton

Yaş: Erken pliyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AİD orj. baz	1380
	ÜİD orj. baz	1764
Tam analiz % orj. baz	Nem	52
	Kül	16
	Uçucu madde	21
	Sabit karbon	11
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	2,4
	C (karbon)	19,7
	H (hidrojen)	1,55
	N (azot)	0,58
	O (oksijen)	8,81
Petrografik analiz %	Vitrinit	43
	Liptinit	6
	İnertinit	7
Kül ° C	Yumuşama	1174
	Ergime	1214
	Akma	1265
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	5,09
	SiO_2	12,99
	Na_2O	0,23
	MgO	1,07
	K_2O	0,27
	P_2O_5	0,13
	CaO	5,12
	TiO_2	0,23
	MnO	0,03
	Fe_2O_3	2,04
	Cl (Klor)	0,005
HGI		39

Kömür Damarı (3 damar) Ref 1		
	Derinlik ort./mak.	35/100 m
	Kalınlık ort./mak.	10/26 m
	Öz. ağırlık	1,30 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,52
O/C oranı	0,45

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	h	e	h
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşim	e	e	e
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	z	z	z
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	z	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	z	z	z
HGI	e	h	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	75140
Nem	h
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 75140,00 MJ/m²

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-21: Kütahya-Seyitömer Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi

SAHA BİLGİLERİ
KÜTAHYA SEYİTÖMER AÇ.
Rezerv 180,500,000 mton
Yaş: Erken miyosen

Kalorifik d.	AID orj. baz	2022
Kcal/kg	ÜID orj. baz	2345
Tam analiz % orj. baz	Nem	36
	Kül	25
	Uçucu madde	21
	Sabit karbon	18
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	2,01
	C (karbon)	24,78
	H (hidrojen)	1,97
	N (azot)	0,66
	O (oksijen)	9,73
Petrografik analiz %	Vitrinit	64
	Liptinit	5
	İnertinit	6
Kül ° C	Yumuşama	1207
	Ergime	1282
	Akma	1323
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	5,67
	SiO_2	19,71
	Na_2O	0,2
	MgO	2,35
	K_2O	0,39
	P_2O_5	0,04
	CaO	1,37
	TiO_2	0,35
	MnO	0,04
	Fe_2O_3	5,63
	Cl (Klor)	0,007
	HGI	33

Kömür Damarı	Derinlik mak.	150 m
	Kalınlık ort./mak.	15/36 m
Ref 1	Öz. ağırlık	1,30 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,86
O/C oranı	0,39

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	h
Kül bileşim	z	z	z
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	e	e	e
HGI	e	h	h

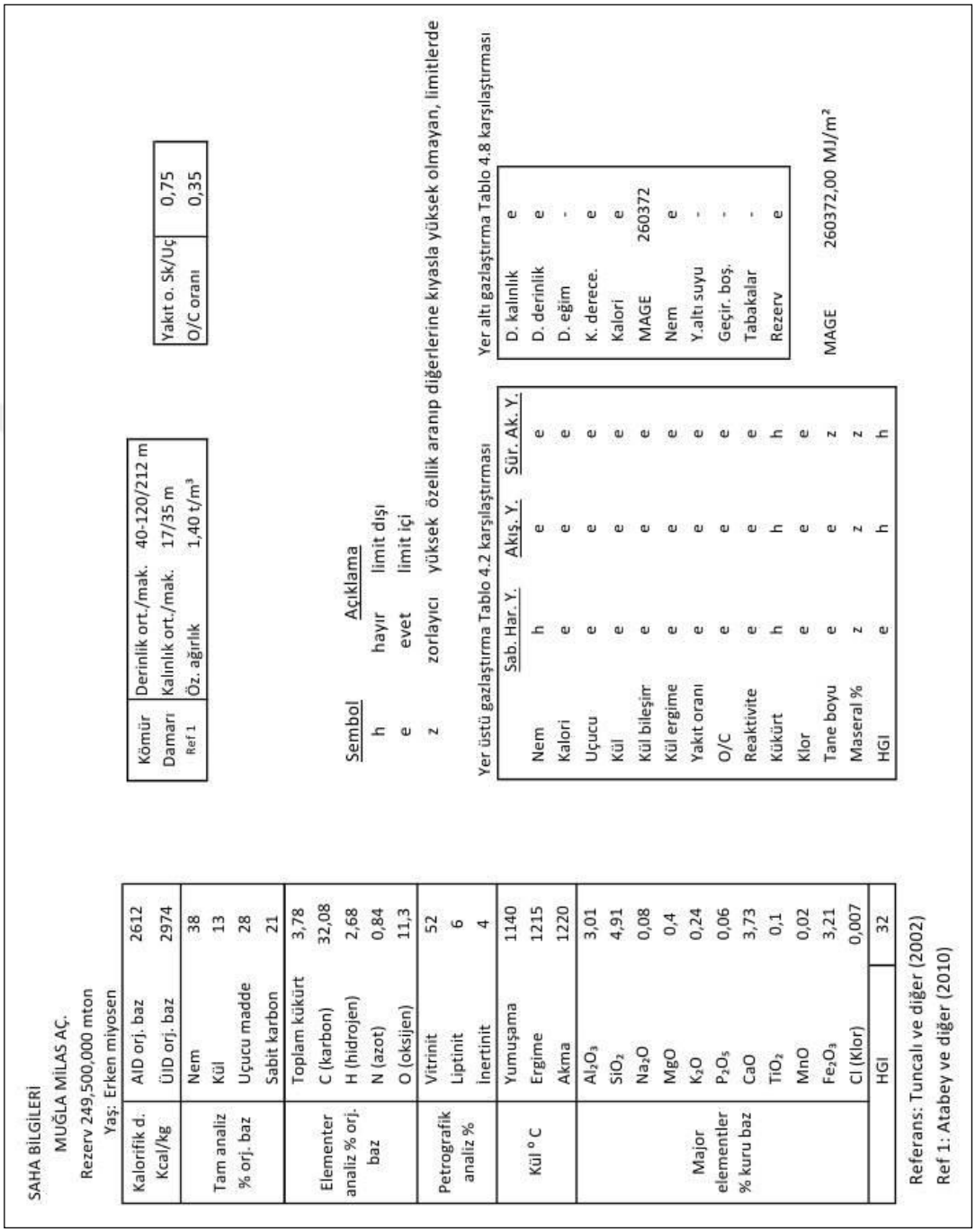
Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	h
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	165165
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 165165,00 MJ/m²

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)
Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

EK-22: Muğla-Milas Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-23: Muğla-Yatağan Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi

SAHA BİLGİLERİ

MUĞLA YATAĞAN AÇ./KAP.

Rezerv 155,000,000 mton

Yaş: Miyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AID orj. baz	2556
	ÜID orj. baz	2911
Tam analiz % orj. baz	Nem	39
	Kül	14
	Uçucu madde	27
	Sabit karbon	20
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,76
	C (karbon)	30,55
	H (hidrojen)	2,42
	N (azot)	1,16
	O (oksijen)	11,57
Petrografik analiz %	Vitrinit	58
	Liptinit	6
	İnertinit	3
Kül ° C	Yumuşama	1284
	Ergime	1310
	Akma	1314
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	5,24
	SiO_2	8,44
	Na_2O	0,07
	MgO	0,89
	K_2O	0,35
	P_2O_5	0,12
	CaO	3,17
	TiO_2	0,16
	MnO	0,02
	Fe_2O_3	1,86
	Cl (Klor)	0,02
	HGI	44

Referans: Tuncalı ve diğer (2002)

Ref 1: Atabey ve diğer (2010)

Kömür Damarı Ref 1		
	Derinlik ort./mak.	42-255/505 m
	Kalınlık ort./mak.	6/12 m
	Öz. ağırlık	1,50 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,74
O/C oranı	0,38

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

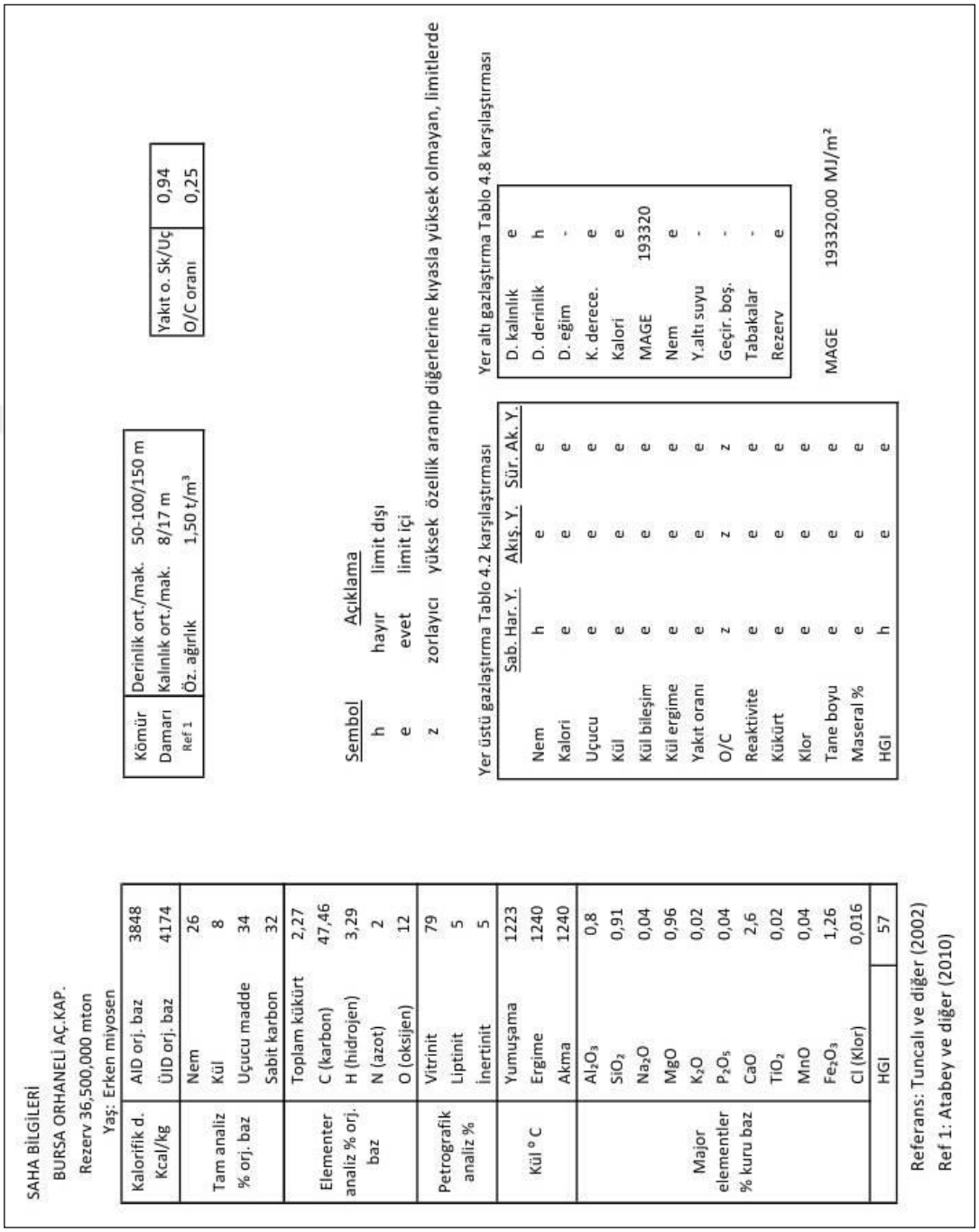
	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşim	e	e	e
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	e	e	e
Reaktivite	e	e	e
Kükürt	e	e	e
Klor	e	e	e
Tane boyu	e	e	z
Maseral %	z	z	z
HGI	e	e	h

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	e
MAGE	96300
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 96300,00 MJ/m²

EK-24: Bursa-Orhaneli Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



EK-25: Afyonkarahisar-Dinar Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi

SAHA BİLGİLERİ

AFYON DİNAR

Rezerv 941,500,000 mton

Yaş: Pliyosen

Kalorifik d.	AID orj. baz	1706
Kcal/kg	ÜID orj. baz	-
Tam analiz % orj. baz	Nem	41
	Kül	19,5
	Uçucu madde	31
	Sabit karbon	8,5
Elementer analiz % orj. baz	Toplam kükürt	1,35
	C (karbon)	-
	H (hidrojen)	-
	N (azot)	-
	O (oksijen)	-
Petrografik analiz %	Vitrinit	-
	Liptinit	-
	İnertinit	-
Kül ° C	Yumuşama	-
	Ergime	-
	Akma	-
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	-
	SiO_2	-
	Na_2O	-
	MgO	-
	K_2O	-
	P_2O_5	-
	CaO	-
	TiO_2	-
	MnO	-
	Fe_2O_3	-
	Cl (Klor)	-
	HGI	-

Kömür Damarı Ref 1		
	Derinlik ort./mak.	216-419/650 m
	Kalınlık ort./mak.	16/45 m
	Öz. ağırlık	1,35

Yakıt o. Sk/Uç	0,27
O/C oranı	-

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	h	e	e
Kalori	h	e	h
Uçucu	e	e	e
Kül	e	e	e
Kül bileşimi	-	-	-
Kül ergime	-	-	-
Yakıt oranı	z	z	z
O/C	-	-	-
Reaktivite	-	-	-
Kükürt	e	e	e
Klor	-	-	-
Tane boyu	-	-	-
Maseral %	-	-	-
HGI	-	-	-

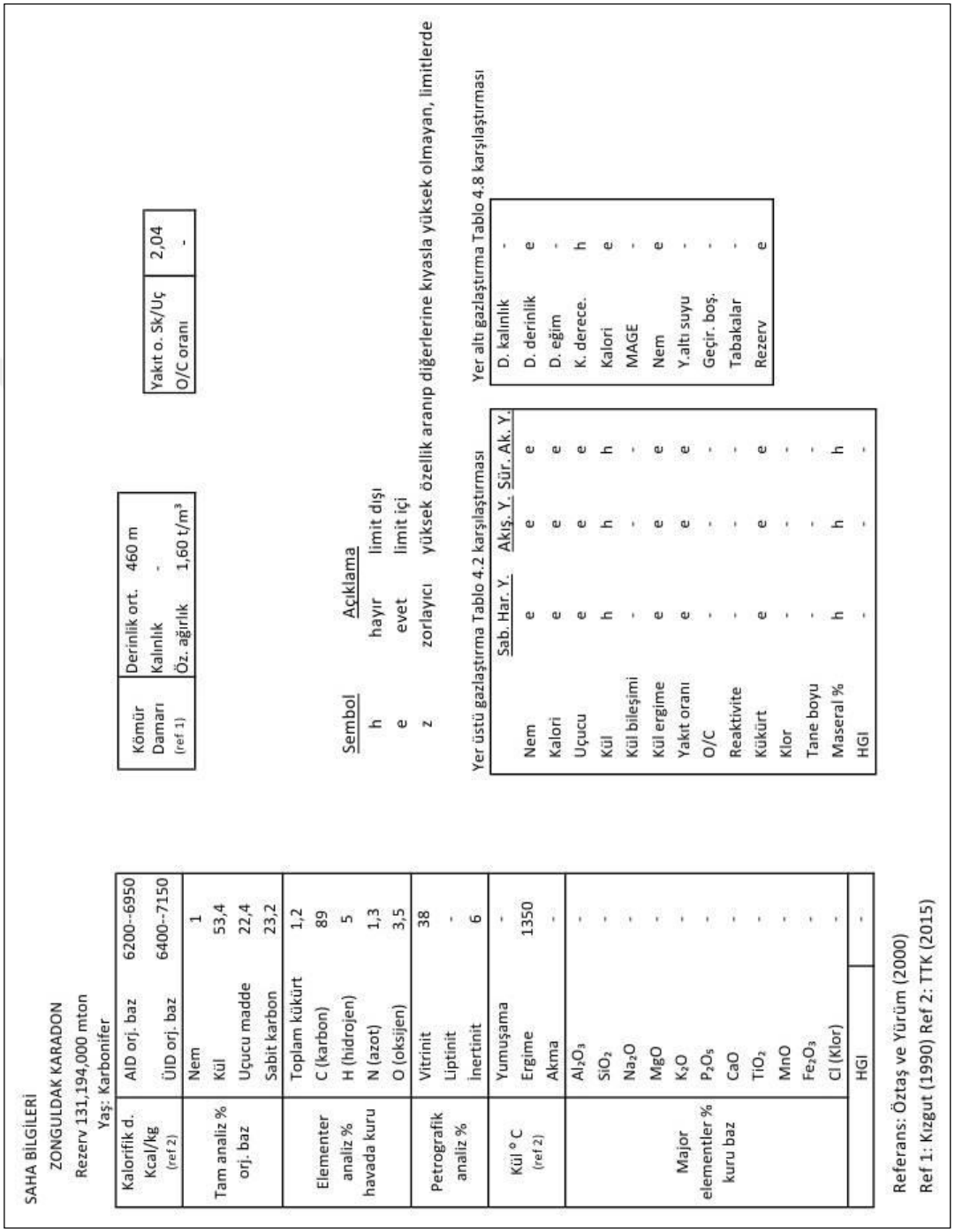
Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	e
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	e
Kalori	h
MAGE	154224
Nem	h
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

MAGE 154224,00 MJ/m²

Referans: Sezgin ve diğer (2015)

EK-26: Zonguldak-Karadon Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi



SAHA BİLGİLERİ

ZONGULDAK KARADON

Rezerv 131,194,000 mton

Yaş: Karbonifer

Kalorifik d. Kcal/kg (ref 2)	AID orj. baz	6200--6950
	ÜID orj. baz	6400--7150
Tam analiz % orj. baz	Nem	1
	Kül	53,4
	Uçucu madde	22,4
	Sabit karbon	23,2
Elementer analiz % havada kuru	Toplam kükürt	1,2
	C (karbon)	89
	H (hidrojen)	5
	N (azot)	1,3
	O (oksijen)	3,5
Petrografik analiz %	Vitrinit	38
	Liptinit	-
	İnertinit	6
Kül ° C (ref 2)	Yumuşama	-
	Ergime	1350
	Akma	-
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	-
	SiO_2	-
	Na_2O	-
	MgO	-
	K_2O	-
	P_2O_5	-
	CaO	-
	TiO_2	-
	MnO	-
	Fe_2O_3	-
	Cl (Klor)	-
HGI		-

Kömür Damarı (ref 1)	Derinlik ort.	460 m
	Kalınlık	-
	Öz. ağırlık	1,60 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç		2,04
O/C oranı		-

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	e	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	h	h	h
Kül bileşimi	-	-	-
Kül ergime	e	e	e
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	-	-	-
Reaktivite	-	-	-
Kükürt	e	e	e
Klor	-	-	-
Tane boyu	-	-	-
Maseral %	h	h	h
HGI	-	-	-

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	-
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	h
Kalori	e
MAGE	-
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

Referans: Öztaş ve Yürüm (2000)

Ref 1: Kızgut (1990) Ref 2: TTK (2015)

EK-27: Şırnak-Silopi Analizler ve Gazlaştırma Prosesi Uygunluk İncelemesi

SAHA BİLGİLERİ

Şırnak Silopi Asfaltit

Rezerv 81,940,000 mton

Yaş: Geç miyosen

Kalorifik d. Kcal/kg	AİD orj. baz	4344
	ÜİD orj. baz	4551
Tam analiz % orj. baz	Nem	0,32
	Kül	39,35
	Uçucu madde	34,08
	Sabit karbon	26,25
Elementer analiz % havada kuru	Toplam kükürt	8,26
	C (karbon)	-
	H (hidrojen)	-
	N (azot)	-
	O (oksijen)	-
Petrografik analiz %	Vitrinit	-
	Liptinit	-
	İnertinit	-
Kül ° C	Yumuşama	-
	Ergime	-
	Akma	-
Major elementler % kuru baz	Al_2O_3	-
	SiO_2	-
	Na_2O	-
	MgO	-
	K_2O	-
	P_2O_5	-
	CaO	-
	TiO_2	-
	MnO	-
	Fe_2O_3	-
	Cl (Klor)	-
HGI		-

Kömür Damarı Ref 1	Derinlik mak.	600 m
	Kalınlık ort./mak.	-
	Öz. ağırlık	1,67 t/m³

Yakıt o. Sk/Uç	0,77
O/C oranı	-

Sembol	Açıklama
h	hayır limit dışı
e	evet limit içi
z	zorlayıcı yüksek özellik aranıp diğerlerine kıyasla yüksek olmayan, limitlerde

Yer üstü gazlaştırma Tablo 4.2 karşılaştırması

	Sab. Har. Y.	Akış. Y.	Sür. Ak. Y.
Nem	e	e	e
Kalori	e	e	e
Uçucu	e	e	e
Kül	h	e	h
Kül bileşimi	-	-	-
Kül ergime	-	-	-
Yakıt oranı	e	e	e
O/C	-	-	-
Reaktivite	-	-	-
Kükürt	h	h	h
Klor	-	-	-
Tane boyu	-	-	-
Maseral %	-	-	-
HGI	-	-	-

Yer altı gazlaştırma Tablo 4.8 karşılaştırması

D. kalınlık	-
D. derinlik	e
D. eğim	-
K. derece.	h
Kalori	e
MAGE	-
Nem	e
Y.altı suyu	-
Geçir. boş.	-
Tabakalar	-
Rezerv	e

Referans: Alp (1997)

Ref 1: Kavak ve diğer (2010)