

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

PLAZMA GAZLAŞTIRMA

İBRAHİM YAYALIK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISI-PROSES PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET KOYUN**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAZMA GAZLAŞTIRMA

İbrahim YAYALIK tarafından hazırlanan tez çalışması 22.12.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet KOYUN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mesut AKGÜN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ
İstanbul Ticaret Üniversitesi

Prof. Dr. Mesut GÜR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Özgür ATAYILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Her şeyden önce, içtenlikle severek gerçekleştirdiğim bu tez konusunda çalışma imkânı sunan; doktora öğrenimim süresince bilimsel bir çalışma ortamı sağlayan; bilgisini, emeğini ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen; gerek akademik, gerekse bilim adamı kimliği yanına girişimciliğini de ekleyen, bana çok şey öğreten tez danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Koyun'a tüm samimiyetimle teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde bulunarak değerli katkıları ile bu tez çalışmasını destekleyen, kendisinden çok şey öğrendiğim Sayın Prof. Dr. İsmail Ekmekçi'ye; yine tez izleme komitemde bulunan, değerli fikirleri ile tez çalışmam boyunca yol gösteren ve onlarca gaz numunesinin sabırla ölçümünü sağlayan Sayın Prof. Dr. Mesut Akgün ve ekibinden Sayın Arş. Gör. Dr. Ekin Kıpçak ile Arş. Gör. Demet Yenialaca'ya teşekkürlerimi sunarım.

Deney setimin oluşturulmasında yardımlarını esirgemeyen tüm İETT yetkililerine ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca her türlü fedakârlıktan kaçınmadan destekleyen ve bana ilham kaynağı olan eşim Seher Yayalılık ile oğullarım M. Kaan Yayalılık ve M. Eralp Yayalılık'a teşekkür ederim. Hiçbir fedakârlıktan kaçınmadan büyük bir evlat özlemi içinde beni okutma gayreti içine bulunan ve her zaman desteklerini yakinen hissettiğim sevgili babam Duran Yayalılık ve annem Fatma Yayalılık'a en içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Bizden Rahmetini esirgemeyen Ceneb-i Hakka Hamd olsun.

Aralık, 2014

İbrahim YAYALIK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Orijinal katkı	5
BÖLÜM 2	
TERMAL TEKNOLOJİLER	6
2.1 Termik Prosesler.....	6
2.1.1 Yakma	6
2.1.2 Piroliz	7
2.1.3 Gazlaştırma.....	11
2.1.4 Gazlaştırmanın gelişim süreci.....	11
2.1.5 Gazlaştırıcılar	12
2.1.5.1 Sabit Yatakta Gazlaştırıcılar	13
2.1.5.2 Akışkan Yatakta Gazlaştırıcılar	16
2.1.5.3 Sürüklemeli akış Gazlaştırıcı	17
2.1.5.4 Döner Fırın Gazlaştırıcılar.....	17
2.1.5.5 Plazma Gazlaştırma.....	17
2.2 Gazlaştırma Tepkimeleri	20
2.2.1 Oksijen Tepkimeleri	20

2.2.2 Buhar (su) Tepkimeleri	22
2.2.3 Hidrojen Tepkimeleri	23
2.2.4 Karbondioksit Tepkimeleri	24
2.3 Tepkimeyi Kontrol Eden Basamakların Tanımı	26
2.3.1 Hız Kontrol Edici Basamağın Belirlenmesi	28
2.3.2 Gazlaştırma Dönüşümlerinin İncelenmesi.....	28
2.4 Türkiyede Gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar	29
2.5 EKA (Evsel Katı Atıklar)'ın Gazlaştırılması.....	30
BÖLÜM 3	
ATIKLAR VE YAPILAN ÇALIŞMALAR	32
3.1 Atıklar	32
3.2 Sürdürülebilir Atık Yönetimi.....	32
3.2.1 Nihayi Bertaraf.....	33
3.2.2 Evsel Katı Atıkların Enerji değeri.....	34
3.3 Katı Atıktaki Enerji ile ilgili Yapılan çalışmalar	37
3.4 Katı atıkların Sabit Yatakta Gazlaştırılması üzerine yapılan çalışmalar	42
3.5 Katı atıkların Akışkan Yatakta Gazlaştırılması üzerine yapılan çalışmalar	43
3.6 Katı Atıkların Plazma Yöntemiyle Gazlaştırılması üzerine yapılan çalışmalar	47
BÖLÜM 4	
TERMODİNAMİK İNCELEME	55
4.1 Temel Gazlaşma denklemi	55
4.2 Gazlaştırma Matrisinin oluşturulması	57
4.3 Reaktöre verilmesi gereken ısı enerjisi hesabı.....	59
4.4 Ekserji	61
4.5 Yazılım sonuçlarının irdelenmesi.....	66
4.5.1 Sadece buharla yapılan gazlaştırma	66
4.5.2 Sadece Oksijenle yapılan gazlaştırma.....	69
4.5.3 Oksijen sabit tutulup Buhar oranının artırılması halii;	72
4.5.4 Buhar sabit tutulup Oksijenin artırıldığı durum;	75
BÖLÜM 5	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	78
5.1 Deney Seti	78
5.2 Reaktör	80
5.3 Cihazlar ve Ölçü Aletleri	81
5.4 Deney Tesisatı Fotoğrafları	82
5.5 Deneyin Yapılması ve deneylerin temel ilkeleri	87
5.6 Gaz ürünlerin Analizi	89

BÖLÜM 6

BULGULAR VE TARTIŞMA.....	90
6.1 Eysel Katı Atıkların plazma ortamında gazlaştırılması.....	90
6.2 Plazma Gazlaştırma	91
6.2.1 Etan (C ₂ H ₆)	91
6.2.2 Metan (CH ₄)	92
6.2.3 Hidrojen (H ₂).....	93
6.2.4 Karbon monoksit (CO)	94
6.2.5 Karbon dioksit (CO ₂)	95
6.3 Oksijenle plazma gazlaştırma	96
6.3.1 Etan (C ₂ H ₆)	98
6.3.2 Metan (CH ₄)	98
6.3.3 Hidrojen (H ₂).....	99
6.3.4 Karbon monoksit (CO)	100
6.3.5 Karbondioksit (CO ₂)	100
6.4 Buharla Plazma Gazlaştırma.....	103
6.4.1 Etan (C ₂ H ₆)	103
6.4.2 Metan (CH ₄)	104
6.4.3 Hidrojen (H ₂).....	105
6.4.4 Karbon monoksit (CO)	106
6.4.5 Karbondioksit (CO ₂)	106
6.5 Gaz ürünlerin Plazma, Buharla Plazma ve Oksijenle Plazma gazlaştırma sonuçlarının kıyaslanması	108
6.5.1 Etan (C ₂ H ₆)	109
6.5.2 Metan (CH ₄)	109
6.5.3 Hidrojen (H ₂).....	110
6.5.4 Karbon monoksit (CO)	110
6.5.5 Karbondioksit (CO ₂)	111
6.6 Farklı Gazlaştırıcılara göre gazlaştırma ürünlerinin AİD değerlerinin değişimi.....	112
6.7 Gazlaştırma esnasında oluşan Oksijen	113
6.8 Gazlaştırma Hızı.....	115
6.9 Gazlaştırmanın Mekanizması ile Bulguların Nedenselleştirilmesi.	116
6.9.1 Plazma Gazlaştırma Kinetiği	116
6.9.2 Tablolarla Yorum	118
6.10 Sonuçların yazılım sonuçları ile kıyaslanması.....	122

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR	128
EK-A	
GAZ KROMOTOGRAFINDAN ÇIKAN GENEL DENEY SONUÇLARI	133

EK-B

%100 GAZ ORANINA GÖRE NORMALLEŞTİRİLMİŞ DENEY SONUÇLARI 135

EK-C

YAZILIM 137

EK-D

YAZILIM SONUÇLARI 141

ÖZGEÇMİŞ 148

SİMGE LİSTESİ

ΔG_f	Gibbs Oluşum Entalpisi
$\Delta H^0_{298 K}$	Kimyasal oluşum Entalpisi
ϵ_0	Standart Kimyasal Ekserji
C_f	Serbest Karbon
D	Düffüzyon kat sayısı
Ea	Aktifleşme Enerjisi
K	Hız sabiti
Kp	Kimyasal denge sabiti
$m_{c,0}$	İlk Karbon kütlesi
m_c	Anlık Karbon Değişimi
RDF	Atıktan Üretilmiş Yakıt
R	İdeal gaz sabiti
T_R	Gazlaştırma sıcaklığı
T	Sıcaklık
X	Değişim Oranı

KISALTMA LİSTESİ

AID	Alt Isıl Değer
DAY	Dolaşımli Akışkan Yatak
EKA	Eysel Katı Atıklar
FID	Alevli iyonlaşma dedektörü (Flame Ionisation Dedector)
GC	Gaz Kromatografisi
HCL	Hidrojen Klorür
KAY	Kabarcıklı Akışkan Yatak
PCB	Poli Karbon Bileşikleri
TCD	Termal iletkenlik dedektörü (Thermal Conductivity Dedector)
ÜID	Üst Isıl Değer

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Isıl proseslerin ilişkisi	10
Şekil 2.2 Sabit Yatak Gazlaştırıcılar (Üsten ve Alttan gaz çıkışlı)	15
Şekil 2.3 Dolaşımli Akışkan Yatak Gazlaştırıcılar	16
Şekil 2.4 Sürüklemeli akış gazlaştırıcı ve plazma gazlaştırıcı	18
Şekil 2.5 Plazma gazlaştırmaya giren ürünlerin enerjiye dönüşümü prosesleri	19
Şekil 2.6 Plazma Gazlaştırmaya giren ve çıkan ürünler	21
Şekil 2.7 Gazlaştırma tepkimeleri için denge sabitleri	26
Şekil 2.8 Tepkime hız kontrol basamaklarının sıcaklık ve tepkime hızıyla değişimi.....	27
Şekil 3.1 İstanbul evsel atıklarının yaklaşık bileşenleri.....	35
Şekil 3.2 Çeşitli atıkların içerdikleri nem oranına göre ısıl değerleri	38
Şekil 4.1 800°C'de buharla gazlaştırmadaoluşan ürünlerin değişimi.....	67
Şekil 4.2 1000°C'de buharla gazlaştırmadaoluşan ürünlerin değişimi.....	67
Şekil 4.3 1227°C'de buharla gazlaştırmada oluşun ürünlerin değişimi.....	68
Şekil 4.4 1000°C'de buharla gazlaştırma harcanan enerji (Elektrik) ve üretilen enerji (Hugaz) değişimi	68
Şekil 4.5 1000°C'de buharla gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri.....	69
Şekil 4.6 800°C'de oksijenle gazlaştırmada oluşun ürünler	70
Şekil 4.7 1000°C'de oksijenle gazlaştırmada oluşun ürünler	70
Şekil 4.8 1227°C'de oksijenle gazlaştırmada oluşun ürünler	71
Şekil 4.9 1000°C'de buharla gazlaştırma harcanan enerji ve üretilen enerji.....	71
Şekil 4.10 1000°C'de oksijenle gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri.....	72
Şekil 4.11 1000°C'de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada oluşun ürünler	73
Şekil 4.12 1000°C'de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri	74
Şekil 4.13 1000°C'de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada verilen elektrik enerjisi ve oluşun gazın ısıl değeri.....	74
Şekil 4.14 1000°C'de buhar sabit tutulup oksijen oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada oluşun ürünler	76
Şekil 4.15 1000°C'de buhar sabit tutulup oksijen oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri	76
Şekil 4.16 1000°C'de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada verilen elektrik enerjisi ve oluşun gazın ısıl değeri.....	77

Şekil 5.1	Deney tesisatının şematik resmi.....	79
Şekil 5.2	Reaktör kesit resmi	80
Şekil 5.3	Deney seti resmi	82
Şekil 5.4	Deney seti resmi	83
Şekil 5.5	Reaktör içi resmi	84
Şekil 5.6	Güç Kaynağı resmi	84
Şekil 5.7	Sıcaklık göstergesi resmi	84
Şekil 5.8	Termokupl resmi.....	84
Şekil 5.9	Gazölçer resmi	85
Şekil 5.10	GC Gaz Kromatografi resmi	85
Şekil 5.11	Rota metreler resmi.....	86
Şekil 5.12	Gaz tüpleri resmi	86
Şekil 5.13	Deney numuneleri resmi	87
Şekil 5.14	Gaz numune kabı resmi	87
Şekil 5.15	Gaz alev resmi.....	87
Şekil 6.1	Etan oluşumunun sıcaklıkla değişimi	92
Şekil 6.2	Metan oluşumunun sıcaklıkla değişim.....	93
Şekil 6.3	Hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişim	94
Şekil 6.4	Karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişim.....	94
Şekil 6.5	Karbon dioksit oluşumunun sıcaklıkla değişim	95
Şekil 6.6	Plazma gazlaştırma ürünü gazların oluşumunun sıcaklıkla değişim	96
Şekil 6.7	Alt Isıl Değerin sıcaklıkla değişimi	97
Şekil 6.8	Etan oluşumunun sıcaklıkla değişim	98
Şekil 6.9	Metan oluşumunun sıcaklıkla değişim.....	99
Şekil 6.10	Hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişim	99
Şekil 6.11	Karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişim	100
Şekil 6.12	Karbondioksit oluşumunun sıcaklıkla değişim.....	101
Şekil 6.13	Oksijenle Plazma gazlaştırma ürünü gazların oluşumunun sıcaklıkla değişimi	102
Şekil 6.14	Oksijenle Plazma gazlaştırma ürünü gazların A.I.D'nin sıcaklıkla değişimi..	103
Şekil 6.15	Etan oluşumunun sıcaklıkla değişim.....	104
Şekil 6.16	Metan oluşumunun sıcaklıkla değişim	105
Şekil 6.17	Hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişim	105
Şekil 6.18	Karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişim	106
Şekil 6.19	Karbon dioksit oluşumunun sıcaklıkla değişim.....	107
Şekil 6.20	Buharla Plazma gazlaştırma ürünü gazların oluşumunun sıcaklıkla değişimi.....	107
Şekil 6.21	Buharla Plazma gazlaştırma ürünü gazların A.I.D'nin sıcaklıkla değişimi	108
Şekil 6.22	Etan oluşumu kıyaslanması	109
Şekil 6.23	Metan oluşumu kıyaslanması	110
Şekil 6.24	Hidrojen oluşumu kıyaslanması.....	111
Şekil 6.25	Karbon monoksit oluşumu kıyaslanması	111
Şekil 6.26	Karbondioksit oluşumu kıyaslanması	112
Şekil 6.27	Gazlaştırıcılara göre gazlaştırma ürünü gazların A.I.D'nin sıcaklıkla değişiminin kıyaslanması	115
Şekil 6.28	Plazma gazlaştırma gaz debisinin sıcaklıkla değişimi.....	115

Şekil 6.29 Yüksek sıcaklıkta ön görülen tepkime mekanizması	116
Şekil 6.30 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Etan miktarları	119
Şekil 6.31 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Metan miktarları.....	119
Şekil 6.32 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Hidrojen miktarları	120
Şekil 6.33 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Karbon monoksit miktarları.....	121
Şekil 6.34 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Karbondioksit miktarları.....	121

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kentsel çöplerin piroliz sürecine sıcaklığın etkisi.....	10
Çizelge 2.2 Çeşitli gazlaştırıcıların karşılaştırılması	20
Çizelge 2.3 Gazlaştırma işlemimde gerçekleşebilecek Tepkimeler ve Termodinamik özellikleri	25
Çizelge 2.4 İstanbul evsel atıklarından enerji üretimi.....	29
Çizelge 2.5 Çeşitli gazlaştırma yöntemlerindeki gaz miktarları	31
Çizelge 3.1 Katı atık enerjisi üzerine yapılan çalışmalar.....	34
Çizelge 3.2 İstanbul EKA'ın yaklaşık kimyasal formülü (Kuru Külsüz)	36
Çizelge 3.3 Katı atık enerjisi üzerine yapılan çalışmalar	40
Çizelge 3.4 Sabit yatakta gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar	45
Çizelge 3.5 Akışkan yatakta gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar	46
Çizelge 3.6 Plazma gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar	49
Çizelge 4.1 Türevler matrisi	58
Çizelge 4.2 Bazı maddelerin Standart molar kimyasal ekserji	59
Çizelge 4.3 Gaz bileşen Alt Isıl Değerleri ve molekül ağırlıkları.....	61
Çizelge 4.4 Gaz halde referans türlerin ortalama basınçları ve standart kimyasal ekserjileri	64
Çizelge 4.5 Bazı maddelerin Standart molar kimyasal ekserji	65
Çizelge 5.1 Deney tesisatında kullanılan cihazların modelleri ve özellikleri	81
Çizelge 6.1 Plazma Gazlaştırma tablosu	91
Çizelge 6.2 Oksijenle Plazma Gazlaştırma tablosu.....	97
Çizelge 6.3 Buharla Plazma Gazlaştırma tablosu	103
Çizelge 6.4 Plazma ve buharla plazma gazlaştırma deneylerinde çıkan oksijen miktarları.....	114
Çizelge 6.5 Her üç gazlaştırmada oluşan Etan miktarları.....	118
Çizelge 6.6 Her üç gazlaştırmada oluşan Metan miktarları	119
Çizelge 6.7 Her üç gazlaştırmada oluşan Hidrojen miktarları	120
Çizelge 6.8 Her üç gazlaştırmada oluşan Karbon monoksit miktarları	120
Çizelge 6.9 Her üç gazlaştırmada oluşan Karbondioksit miktarları	121

PLAZMA GAZLAŞTIRMA

İbrahim YAYALIK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet KOYUN

Ülkemizde şehirleşmenin hızla artmasıyla birlikte enerji bağımlılığı gün geçtikçe daha da artmaktadır. Enerji ihtiyacı, büyük bölümü ithal edilen petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Evsel atıkların çevre kirliliği, küresel ısınma, düzenli depolama maliyetleri ile enerji ihtiyaçlarının ve maliyetlerinin artması nedeniyle enerjiye dönüştürme çalışmaları hız kazanmaktadır. Aşırı enerji ihtiyacı ve çevresel sorunlar; düşük kalorili kömürler, biyolojik atıklar ve evsel atıkların enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlamak amacıyla araştırmacılar tekrar termik proseslerden gazlaştırma üzerine yoğunlaşmaktadır.

Bu tez çalışmasında, detaylı bir ayrıştırmaya ihtiyaç duymadan gazlaştırarak ve ergiterek atıkların değerlendirilmesine olanak sağlayan plazma gazlaştırma teknolojisi seçilmiştir. Evsel katı atıkların kimyasal bileşenleri ve gazlaştırma tepkimeleri incelenerek plazma gazlaştırma reaktörü dizaynı için gerekli parametrelerin büyüklüklerini tespit etmek için bir bilgisayar yazılımı gerçekleştirilmiştir. Yazılım sonuçlarına uygun olarak 10 Kg/h gazlaştırma kapasiteli, sürekli akışlı, atmosferik basınçlı ve 1600°C kadar çıkabilen bir plazma reaktörü boyutlandırılarak inşa edilmiştir.

600 -1600°C arasında yapılan gazlaştırmalarda atıktaki bileşenler elementel düzeyde çok hızlı tepkimeler oluşturmuştur. Düşük sıcaklıklarda yüksek enerjili gazların oluşması yanında tepkimeye girmeyen karbonların siyah karbon olarak değerlendirilebilecektir. 1400°C'ye doğru oluşan gazın enerji değerinin düşmesi yanında siyah karbon oluşumunun da durduğu ve 1600°C'de farklı bir dönüşüm mekanizmasının

gerçekleşmektedir. İlk aşamada oluşan gazların ikinci aşamada daha yüksek kalorili hidrokarbonlara dönüştüğü, dolayısıyla gaz veriminin artmasıyla diğer metotlara göre farklı ve avantajlı bir perspektif oluşturduğu görülmüştür.

Plazma, oksijenle plazma ve buharla plazma gazlaştırmaların en verimli olduğu parametreler, avantaj ve dezavantajları ile düşük ve orta sıcaklıklarda oluşan gaz ürünlerin kalori değeri yanında, hızlı tepkime sonucu oluşan ve bacada tutulan karbonun da endüstriyel değerinin olabileceği yöntemler çalışılmıştır. Sonuç olarak, düşük sıcaklıklarda plazma ve oksijenle plazma gazlaştırma verimli iken buharla plazma gazlaştırma verimsiz olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda ise her üç yöntem de yaklaşık olarak aynı verimliliğe gelmektedir. 1600°C ve üstü sıcaklıkta reaktör girişine oksijen ve gazlaştırma çıkış bölgesine buhar besleyerek daha kalori değeri yüksek gaz ürünlerin oluşumu gerçekleştirilebilir.

Anahtar kelimeler: Evsel katı atıklar, Plazma gazlaştırma, Ekserji, Enerji

PLASMA GASIFICATION

İbrahim YAYALIK

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet KOYUN

Energy dependence is increasing day by day, with rapid increase in urbanization of our country. Main energy resources are fossil fuels such as oil, natural gas and coal, the majority of which is imported. Together with increasing environmental pollution and global problems, energy and its storage costs are becoming bigger concern. Increasing energy needs and above given problems had accelerated energy conversion researches. One of the methods that researchers are focused is employing gasification thermal process to use low-calorie coal, biological waste and municipal waste as an energy source.

Plasma gasification technology, which does not need a detailed decomposition, has been chosen for the study. In this technology, wastes are converted to energy source with gasification and fusion.

A plasma gasification reactor is needed to examine chemical components and gasification reactions of municipal solid wastes. Software was written to determine the necessary parameters for correct design of the reactor. A plasma reactor was constructed according to the results of the software. The reactor has the following features: 10 kg/h gasification capacity, continuous flow, atmospheric pressure and ability to work up to 1600°C.

Gasification at 600-1600°C carried out. It has been observed that waste components

created very fast reactions on elemental level. At low temperatures, non-reactive carbons which named as black carbons are formed as well as high energy gases. When the temperature is around 1400°C, energy value of the formed gas dropped and Black Carbon formation is stopped. At around 1600°C, a different mechanism of conversion was observed; the gases which are formed at the first stage are turned into higher calorific hydrocarbons in the second stage. Thus, increased gas efficiency generates a different and advantageous perspective compared with other methods.

Plasma, oxygen plasma and steam plasma gasification methods are examined. Advantages and disadvantages, the most efficient parameters, resulting gas products' calorific values in low and moderate temperatures, and potential industrial value of the black carbon held in the output channels have been studied.

As a result, plasma and oxygen plasma gasification are efficient, and steam plasma gasification is inefficient at low temperatures. All three methods has about the same efficiency at high temperatures. At temperatures of 1600°C and above, feeding oxygen to the reactor inlet and steam to gasification output might result in formation of higher calorific value gas products. This approach can be examined in the future works.

Keywords: Municipal solid waste, Plasma gasification, Exergy, Energy.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

1970 yılındaki petrol krizinden sonra tüm dünya alternatif enerji arayışlarına girdi. İlk akla gelen kömür olmuştur. Kömürün kullanımının kolaylaştırılması ve yaygınlaştırılması çalışmalarına hız verildi. Kömür gazlaştırılarak hava gazı ve kok elde edilerek tüketicilere sunuldu. Kömürün çok karmaşık ve heterojen yapıya sahip olması nedeniyle gazlaştırma teknolojisi geliştirilerek daha ekonomik ve kullanılabilir hale getirmek için bilimsel çalışmalar yapıldı. İlerleyen yıllarda dünya barışındaki olumlu gelişmeler, siyasi ve ekonomik krizlerin etkisini azaltmasıyla petrol fiyatlarının düşmesi ve üretimin artması sonucu kömür ve diğer alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi azaldı.

1991 Körfez savaşı, 11 Eylül 2002 saldırısı ve 2003 ikinci Körfez savaşı ile birlikte dünyadaki siyasi ve ekonomik belirsizliklere birde Küresel Isınma problemi eklenince tüm dünya yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına adeta hücum etti. Kömür termik santralleri yeni çevreci yakma teknikleriyle donatılırken, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, dalga enerjisi, hidrojen enerjisi, biyogaz, biyodizel, biyobenzin, nebati yağlar, alkol gibi doğa dostu enerji kaynakları daha kullanılabilir hale getirilmek amacıyla yeni teknikler geliştirme çabalarına hız verildi.

Doğalgaz kullanımının artmasıyla birlikte büyük şehirlerdeki hava kirliliği probleminin ortadan kalkmasıyla birlikte endüstriyel gelişmelere de paralel olarak ülkelerde şehirleşmiş nüfus oranı da önemli ölçüde arttı. Şehirlerdeki aşırı nüfus artışı evsel katı atık (EKA)

problemini de beraberinde getirdi. Belediyeler bu atıkları düzenli depolama alanlarına taşıdılar. Yetersiz kaldıkça yenilerini inşa ettiler. Biyolojik çözünme sonucu oluşan metan gazı nedeniyle meydana gelen patlamalar depolama alanlarına doğru büyüyen mahalleleri tehdit etmeye başladı. Gaz çıkış bacaları inşa edilerek patlama problemleri önlenmeye çalışıldı. Ancak atmosfere bırakılan metanın ozon tabakasına zarar vermesi, küresel ısınmayı arttırıcı etkisi nedeniyle uluslararası anlaşmalar gereği (Kyoto sözleşmesi) atmosfere bırakılması yasaklanmıştır.

Geçen asrın başlarında evsel katı atıkların önemli bir miktarının organik maddeler içermesi, depolama alanlarında çevre ve yeraltı su kirliliğine neden olmaları dikkati çekmiş ve yakılarak tasfiyesi ve enerji kaynağı olarak kullanılması gündeme gelmiştir. İlk zamanlarda kömür yakan termik santrallerde yakılması yoluna gidilmiştir. İçerisindeki aşırı nem nedeniyle doğrudan yakılması mümkün olmamıştır. Kurutularak yakılabildiyse de aşırı kül ve zararlı baca gazı emisyonları problemleri ortaya çıkmıştır [1].

Şehirleşmenin hızla artması dolayısıyla katı atıkların miktarlarının artması, düzenli depolama alanlarındaki sorunlar, şehrin düzenli depolama alanlarına kadar büyümesi, çevre sorunları ile büyüyen ve modernleşen şehirlerin enerji ihtiyaçları göz önüne alındığında bu evsel katı atıkların hem enerjisinden faydalanmak hem de tasfiye etmek olmazsa olmaz bir zorunluluk haline geldi. Bu nedenle bu atıklar için gelişen yeni termik teknolojilerden istifade etme veya yeni teknolojiler geliştirme yoluna gidilmiştir.

Yıllık ortalama kişi başına New York'ta 700 kg ve İstanbul'da 400 kg katı atık meydana gelmektedir. Bu İstanbul da yılda 4 milyon ton katı atık demektir. %15 inorganik madde olup kalanı %50-55 civarında nemli organik maddeden oluştuğu tespit edilmiştir[2], [3].

Bu atıkların çevreye zarar vermeden dönüştürülmesi gerekmektedir. Yapılan araştırmalarda gömülen atıkların normalden 4 kat daha fazla hava kirliliğine sebep olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca su ve toprak kirliliğine de sebep olmaktadır. Bu atıkların gömülme maliyeti ton başına 60 TL olmaktadır. Yakılarak imha edilmesi halinde kuru kütlelerin yarısı kadar kül oluşmakta ve bu kül ağır metaller ve toksin maddeler içermektedir. Baca gazı da

yine ciddi hava kirliliğine sebep olmaktadır. Yüksek nem içerdiğinden yakmak oldukça zor ve topaklaşma olması nedeniyle kurutulması da büyük problem olmuştur.

Bu nedenlerden dolayı katı atıkların çevre kirliliğinin önüne geçmek ve enerjisinden faydalanabilmek amacıyla gazlaştırma teknolojisinden istifade edilmeye başlanmıştır. Piroliz ve gazlaştırma işlemlerinde Katran problemi çıkmaktadır. Gaz içindeki katran enerji kaybına neden olması yanında geçtiği yüzeylerde yoğuşmakta, tıkanmalara neden olmakta ve temizlenmesi oldukça zor olmuştur. Bu nedenle gazlaştırmadan sonra katran kırıcı kullanılmak zorunda kalınmıştır. Plazma gazlaştırmada yüksek sıcaklıktan dolayı katran parçalanmaktadır. Özellikle plazma gazlaştırma ile elde edilen cüruf katı atığın kütesinin 1/100 kadar olmakta ve amorf bir yapıda olmasıyla bünyesindeki ağır metalleri ile toksinlerin suda çözünmesine imkân vermediğinden çevre kirliliği oluşturmamaktadır. Çıkan gazlarda gaz arıtma sistemlerinde arıtılarak çevreye zarar verecek maddelerden temizlenmektedir. Kurulan enerji tesisinde %30 verimde elektrik üretilebilmektedir[1].

Yapılan hesaplarda İstanbul evsel atıklarının %50 nem için 7843 kJ/kg bir enerjiye sahip olduğu görülmüştür. Nem kurutularak enerji değeri daha da arttırılabilir. Ton başına 720 kW elektrik üretilebilir. Bunun yaklaşık 100 kW kadarı gaz temizleme gibi iç ünitelerde kullanılır[2].

Emisyon probleminin çözümü amacıyla, yakıt ve atıkların gazlaştırılarak yakılması düşünüldü. İlk gazlaştırma çalışmaları sabit yatak gazlaştırıcılarda yapıldı. Emisyon probleminin önemli ölçüde ortadan kalktığı görüldü. Ancak heterojen yapı ve aşırı nem yüzünden sistemin çalışmasında sıkıntılar yaşanmıştır. Özellikle yatak içi sıcaklığın kontrol edilememesi neticesinde zaman zaman sıcaklığın külün erime sıcaklığı üzerine çıkması sonucu topaklaşmalar olması kül uzaklaştırma problemlerine neden olmuştur. Daha sonra akışkan yatak gazlaştırıcılar geliştirildi. Bu gazlaştırıcılarda yüksek hızdaki hava hareketleri ve atıkların belli ölçülerde öğütülmesi gibi problemlerden dolayı yeterli ekonomiklik ve kullanılabilirlik sağlanamamıştır[4].

Bu nedenle en son termik teknoloji olan plazma gazlaştırma teknolojisi çalışmalarına başlanmıştır. Bu teknoloji ile çalışan sistemlerde EKA herhangi bir ön işleme tabi

tutulmaksızın doğrudan gazlaştırma yapılabilecek ve tamamen eridiği için uçucu zararlı kül problemi de ortadan kalkmaktadır. Bu konuda, yayınlanmış az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Yapılan çalışmalarda gazlaştırma 1000 °C civarında yapılmaktadır. Çünkü daha yüksek sıcaklıklarda üretilen gazın enerji değeri düşmektedir [58].

Bu doktora çalışmasında plazma, oksijenle plazma ve buharla plazma gazlaştırma yöntemlerinin gazlaştırma sıcaklığına bağlı olarak en iyi gazlaştırma şartları incelenmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Halen kaynaklara göre plazma gazlaştırma yeterince araştırılmamıştır. Plazma gazlaşmanın fiziksel kimyasal süreçleriyle ilgili yeterli bulgu ve bilgi oluşmamıştır. Aynı zamanda plazma gazlaşmanın ısıl analizi, sürecin kısıtlarının ne olduğu, özellikle yükselen sıcaklıklarda sistemin nasıl bir tepki göstereceği tam belirgin değildir. Aynı zamanda sürdürülebilir olarak, kullanılabilir, sanayiye ve ekonomiye dönüşebilir bir sistem olup olmadığı da belirgin değildir. Dünyada uygulandığı açıklanan sistemlerin şu anda problemlerinin olduğu bilinmektedir. Bu sebeplerle, doktora tezi çalışmasında, EKA plazma gazlaştırma yöntemiyle gazlaştırılarak şehir dışına taşımadan enerjiye dönüşümünün sağlanması hedeflenmektedir. İlk aşama, evsel katı atıkların termal (ısı) gazlaştırılmasına yöneliktir. Bu aşamada amaç farklı sıcaklıklarda gaz ürün verimi ve kompozisyonu üzerindeki etkilerin ortaya konulmasıdır. İkinci aşamada gazlaştırma verimi üzerinde oksijen ve su buharının gazlaşma sonu ürünler üzerindeki etkisini kapsamaktadır. Son aşamada da bir termik süreç olarak plazma gazlaştırma yöntemiyle en iyi gazlaştırma süreç şartları ve enerji veriminin tespiti hedeflenmektedir. Böylece, şehirlerde atık taşıyan binlerce kamyonun ekonomiye ve çevreye olumsuz etkilerinden kurtulup, atığın üretildiği yere çok yakın veya mahalle bazında plazma gazlaştırma üniteleri kurulmasının, işletilmesinin anlamlı olup olmadığı belirlenmiş olacaktır.

1.3 Orijinal katkı

Çalışma kapsamında, özellikle plazma gazlaşma işleminin yüksek sıcaklıklarda farklılaşmaya başladığı süreç değişkenleri bulunmuştur. Bu sonuç kaynaklarda ve bilinen raporlardakinden farklı ve orijinal bir katkı oluşturmaktadır. Uluslararası bilimsel dergiler için yayın yapılacaktır. Diğer bir katkısı da gazlaşmanın uygulanabilirliği ile ilgili süreç şartlarında ısı verimleri elde edilmiştir.

Gazlaştırma özellikle kömür gazlaştırma olarak eski bir yöntemdir. Ancak plazma gazlaştırma yeni bir termik proses (ısı süreç) olarak özellikle şehirleşmenin ve sonucunda evsel atıkların yeni tüketim olanaklarıyla birlikte artması, bertarafındaki maliyetlerin yükselmesine enerji ihtiyaçları da eklenince dikkat çekmeye başlamıştır. Son zamanlarda çalışmalar hızlanmışsa da henüz istenen seviye yakalanamamıştır. Dolayısıyla plazma gazlaştırma yöntemiyle evsel katı atıkların bertaraf edilmesi ve enerji kaynağı haline getirilmesi önemli bir katkı sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

TERMAL TEKNOLOJİLER

2.1 Termik Prosesler

Oluşumu için yüksek ısı gerektiren ve bu ısıdan dolayı gerçekleşen tepkimeler sonucunda yüksek ısı açığa çıkaran süreçlerdir. Burada konu gereği sadece yakma, piroliz ve gazlaştırma proseslerinden söz edilecektir. Şekil 2.1'deki proseslerin ilişkisi görülmektedir.

2.1.1 Yakma

En eski termik proses olup yakılabilir maddelerin yakılarak ısı enerjisi üretim prosesidir. Her yakıt, kaynağında doğrudan yakılabilir. İçindeki nem ve inorganik (yanmayan) madde miktarı arttıkça verdiği ısı enerjisi azalır. Yanma, yanabilir elementlerin (karbon, hidrojen, kükürt vs.) oksijenle hızlı kimyasal tepkimeye girmesi olarak ifade edilir.

Yakma teknolojisi bir nihai bertaraf yöntemi değildir. Sadece ısı enerjisini değerlendirme yöntemidir. Yanma sonucunda da atıklar oluşmaktadır. Oluşan külün bir depolama alanında bertaraf edilmesi gerekir. Çünkü yakılan maddelerin bünyesinde tehlikeli maddeler olabilir veya yanma esnasında tehlikeli bileşikler oluşabilir. Yanma sonucu oluşan baca gazları da yine çevre için bir tehlikedir. Bu gazlar analiz edilerek zararlı gazlar oluşuyorsa gerekli arıtma işlemlerinin yapılması gerekir[5], [6].

Katı atıklar enerjisinden faydalanabilmek için yakılabilirler. Ancak içindeki nem miktarı çok yüksek ise bu işlemi gerçekleştirmek oldukça zordur. Yanmanın iyi gerçekleşmemesi sonucu hem kül oranı çok yüksek olur hem de baca gazı zararlı gazlar ihtiva eder. Yine de yakma sonucu depolama alanlarına giden atık miktarı azalacağından depolama alanı ihtiyacı azalacak hem de enerji elde edilecektir. Yakma teknolojisi atıktan enerji elde etmek için çok önemlidir[7].

2.1.2 Piroliz

Piroliz kelimesi Yunanca 'da ateşten ortaya çıkmak anlamına gelmektedir. Piroliz, organik maddelerin oksijensiz ortamda ısı verilerek kimyasal olarak bozunması demektir. Karbonlaştırma da denilmektedir. En yaygın tanınan piroliz, odun kömürü üretimidir. Gazsızlaştırma da denilen bu işlem yavaş bir süreçtir. Tamamen oksijensiz ortam oluşturmak çok zor olduğundan işlem esnasında ortamda bir miktar oksijen olacaktır ve bu nedenle bir oksidasyon söz konusudur. Sistemde uçucu materyaller oldukça termal bozunma gerçekleşir. Proses esnasında katı ve sıvı türevlerde pek çok tepkime gerçekleşir. Organik maddenin yapısı ve işletim şartlarına bağlı olarak yanıcı gaz oluşumu da mümkündür [8], [9].

Yakma ekzotermik bir tepkimedir, piroliz ise tam tersi endotermik bir prosestir. Yanma sonucunda genellikle karbondioksit, su ve kül oluşurken, pirolizde katran, yağ ve yanıcı gaz oluşmaktadır. Piroliz sonucu oluşan ürünler yakıt olarak kullanılabilirler. Piroliz teknolojik olarak düşünüldüğünde yeni olmakla birlikte odun kömürü üretimi dışında kullanımı pek yaygın değildir. Petrol ve doğalgaz rezervlerinin yeterli ve ucuz olması gaz yakıt üretiminin ticari kullanımına olanak vermemiştir. Bu nedenle ekonomik kriz dönemlerinde ve çevresel endişeler söz konusu olduğunda bazı çalışmaların yapılması zorunlu olmuştur. Özellikle tehlikeli atıkların kontrolünde önemi artmıştır.

Isıtma hızına göre iki çeşit piroliz vardır. Yavaş piroliz, organik maddelerin 300°C sıcaklık civarında havasız ortamda sabit yataklı reaktörlerde uzun süre ve düşük hızda ısıtılmasıyla katı ve sıvı ürünlere dönüşmesidir. Hızlı piroliz ise, organik maddeler yüksek sıcaklık ve

yüksek ısıtma hızlarında akışkan yatak reaktörlerde gazlaştırılmasıdır. Reaktörden ayrılan bu gazlar soğutulmuş sıvı ürünlere dönüşür. Hızlı ısıtma neticesinde organik madde kömürleşmez. Çıkan gazın hemen hızlı soğutulması daha fazla sıvı ürün oluşmasını sağlar[10], [11].

Piroliz olayında organik madde üzerinde termik parçalanma aşağıdaki gibi oluşmaktadır;

100-120°C: Kuruma

120-250°C: Bünyedeki suların ayrılması, CO₂ oluşumu ve kükürt parçalanması

250°C: Polimerler, hidrojen ve kükürt parçalanması

340°C: Metan ve hidrokarbon oluşumu

380°C: Karbonlaşma aşaması

400°C: C-O ve C-N bağlarının parçalanması

400-420°C: Piroliz yağı ve katran oluşumu

600°C: Çıkan ürünlerin ısıya dayanıklı maddelere dönüşmesi

600°C< Aromatlar ve etilenlerin oluşması [10]

1200°C>Tüm katranlar parçalanır

1200°C< Tüm organik maddeler gazlaşır ve inorganik maddeler cüruflar haline gelir.

Piroliz düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık olarak iki şekilde uygulanır. Düşük sıcaklık piroliz işlemlerinde ana ürün zift ve yağ iken yüksek sıcaklık değerlerinde ise gazdır. Yüksek ve hızlı ısıtma tüm molekülleri parçalayarak katı ürün oluşumunu minimize eder. Bir biokütle veya kömür ısıtıldığı zaman kurutma, kırılma, izomerizasyon, hidrojen uzaklaştırma, aromatisasyon, kondensasyon gibi tepkimeler meydana gelmektedir. Elde edilen ürünler ise su, karbondioksit, karbon monoksit, hidrojen, yağlar, katran, diğer gazlar ve katı maddelerdir. Verimlilik; giren malzemenin bileşimleri, parçacık boyutu, bekleme süresi, ısıtma hızı ve reaktör sıcaklığı gibi faktörlere bağlıdır. Parçacık boyutu ısınma hızını da doğrudan etkiler. Daha yavaş ısındıklarında parçacık sıcaklığı düşük olduğundan uçucu maddelerin uzaklaştırılma hızı ve verimi düşmektedir. Piroliz esnasında seri paralel pek çok karmaşık tepkimeler meydana gelir. Bu karmaşık tepkimeler biokütlenin ara ürünlere ayrılması ya da rafine edilmesi olarak ifade edilir.

Piroliz esnasında oluşması muhtemel bazı tepkimeler aşağıda verilmiştir;



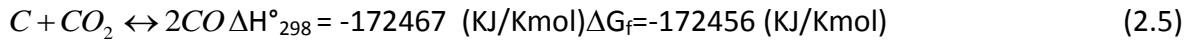
Belirli şartlar altında serbest Karbon açığa çıkar.



Diğer bazı tepkimelerde şöyle verilmiştir.



Asıl amaç pirolizdeki serbest karbon oluşumunu azaltmaktır. Bu daha sonraki tepkimelerde gerçekleşir.

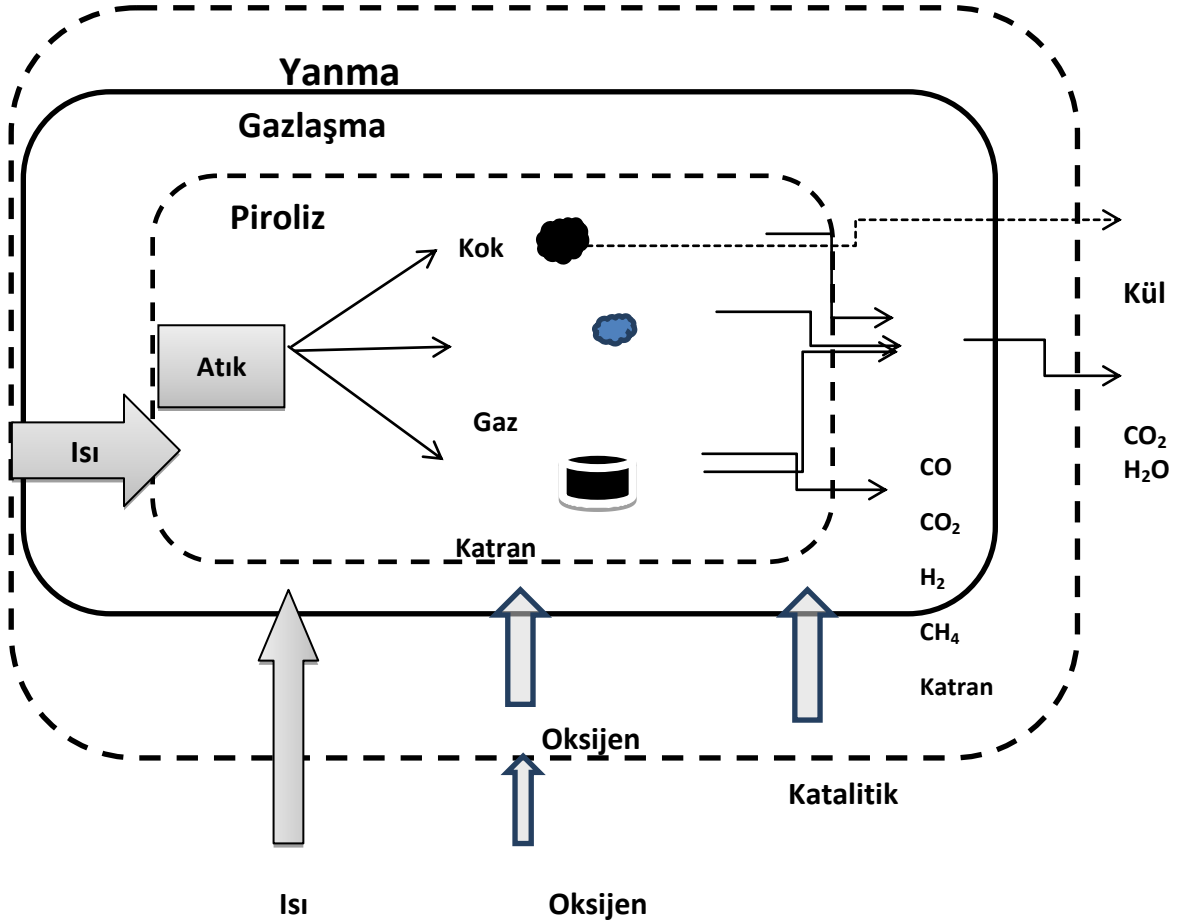


Isıtma hızının yüksek olması, düşük ısıtma hızına kıyasla daha yüksek miktarda uçucular ve kömürleşmiş katı ürünleri ortaya koyar. Daha gözenekli ve düşük yoğunluklu kömürümsü yapılar oluştururlar. Düşük piroliz hızında uçucuların yavaş yavaş ayrılması, reaktör içindeki kömürümsü parçacıkların uçucularla ikincil tepkimeye girmesi ikincil katı ürünlerin oluşmasına sebep olur. Uçucuların reaktörü hızlıca terk etmesiyle düşük katı ürün ve yüksek uçucu oluşumu gerçekleşir.

Sıcaklık, piroliz ürünlerinin verimini ve bileşimini etkileyen en önemli değişkendir. Çizelge 2.1'de kentsel çöplerin piroliz sürecine sıcaklığın etkisi görülmektedir. Düşük sıcaklıkta katran ve kül oluşurken yüksek sıcaklıkta gaz yakıt oluşumu gerçekleşmektedir. Sabit sıcaklıkta farklı malzemelerle yapılan çalışmalarda ürün çeşitliliği aynı olmasına rağmen katı, sıvı ve gaz verimleri farklılık göstermiştir.

Çizelge 2.1 Kentsel çöplerin piroliz sürecine sıcaklığın etkisi[10]

Parametreler	Sıcaklık °C		
	500	650	900
	Ürün verimi % Kütle		
Gaz	12,3	18,6	24,4
Sıvı	61,1	59,2	58,7
Katı	24,7	21,8	17,7
	Gazın Üst Isıl Değeri		
Gazlar % Mol			
Hidrojen	5,56	16,6	32,5
Karbon monoksit	33,5	30,5	35,3
Karbondioksit	44,8	31,8	18,3
Metan	12,4	13,9	10,5
Etan	3	3,1	1,1
Üst Isıl değer Kcal/m ³	2940	3780,9	4850



Şekil 2.1 Isıl proseslerin ilişkisi[5]

2.1.3 Gazlaştırma

Kullanım amacına uygun gaz üretmek üzere yüksek sıcaklıklarda organik maddelerin hava, buhar, oksijen, hidrojen, karbondioksit veya bunların karışımlarıyla tepkimeye sokulmasıyla hidrojen, metan, etan, karbon monoksit gibi yanıcı gazlar üretilmesi prosesine gazlaştırma denir. Gazlaşma esnasında gaz/katı, gaz/sıvı ve gaz/gaz tepkimeleri meydana gelir. Gazlaşma öyle hızlı olur ki yüksek sıcaklığın etkisiyle sıvı/gaz tepkimesi hemen hemen hiç görülmez. Yanıcı gazlar dışında gazlaşmaya giren maddelerin yapısına bağlı olarak karbondioksit, azot, oksijen ve su buharı da oluşur. Bu tepkimeler çoğu zaman tek basamaklı değildir. Genellikle oluşan gaz/katı tepkimesi katının dış yüzey alanındaki gözeneklerde gerçekleşir[12], [13].

Gazlaştırmanın en önemli avantajları aşağıda belirtilmiştir:

1. Elektrik üretimi, kimyasal madde üretiminde kullanılan temel maddelerin eldesi ve sıvı yakıt eldesine olanak sağlaması.
2. Kömür, büyük moleküllü yağlar, petrol koku, ağır rafineri atıkları, rafineri atıkları, hidrokarbon, kontamine olmuş toprak, biokütle ve tarımsal atıklar gibi farklı türde besleme maddelerinin mevcut olması.
3. Beslenen maddelerdeki kirlenici unsurların giderimi ve temiz sentez gazı üretimine imkân vermek.
4. Atıkların ve düşük değere sahip maddelerin değerli ürünlere dönüştürülmesini sağlamak.
5. Depolama sahalarında bertarafı gerçekleştirilen katı atık miktarının azaltılmasına katkıda bulunmak[14].

2.1.4 Gazlaştırmanın gelişim süreci

Gazlaştırma ile ilgili ilk bulgu 1792 yılında İskoç bir Mühendis Murdoch'ın kömür pirolizinden elde ettiği gazı evinin aydınlatmasında kullanmasıdır. İlerleyen zamanda Murdoch, James Watt için bir gaz ünitesi kurmuştur. Bu tesisle Murdoch, Watt'ın döküm

hanesinin aydınlatmasını sağlamıştır. İlk gaz firması ise 1812'de Londra'da kurulmuştur. Firma kömürden elde ettiği sentez gaz ile Westminster Köprüsü'nü aydınlatmıştır [15].

Amerika'da ise Baltimore şehrinin caddelerinin aydınlatılması amacıyla 1816 yılında ilk tesis inşa edilmiştir. 1826'ya gelindiğinde Boston ve New York şehirlerinin aydınlatılması amacıyla yeni gaz tesisleri kurulmuştur. Bütün bu gelişmeleri takiben dünya çapında büyük şehirlerin aydınlatılması için kullanılacak tesisler ve gaz dağıtım ağları yaygınlaşmıştır.

Hava ve sentez gazının karıştırılarak daha ekonomik bir yanma sağlayan Bunsen yakma ünitesinin icat edilmesiyle birlikte, yüksek sıcaklıklara duman salımı olmadan ulaşılmasına imkân sağlanmıştır. 1855 yılında gerçekleşen bu gelişme ile gaz kullanımının yaygınlaşması ivme kazanmıştır. 19 yy. sonlarına yaklaşıldıkça, kömür gazlaştırması artık ticari olarak kabul edilen bir teknoloji haline dönüşmüştür. Özellikle, hava akışlı gazlaştırıcılar olarak da bilinen gaz jeneratörleri yoğun olarak kullanım alanı bulmuşlardır. 1875 yılında sentez gaz kullanım ev aydınlatmalarında yaygınlaşmış, yüzyılın sonlarında ise endüstriyel uygulamaları başlamıştır.

1900'lerin başında biokütle gazlaştırması kimyasal hammaddesi, sentez gaz ve hidrojen üretimi amacıyla uygulanmaya başlamıştır. 2. dünya savaşı süresince bir milyonu aşkın hava üflemeli gazlaştırıcılar ahşap ve kömür kullanarak enerji, buhar ve araçlar için güç üretimi amacıyla kullanılmışlardır. Ancak 2. dünya savaşı sonrasında maliyeti daha düşük, ısıtma verimi yüksek doğalgazın bulunmasıyla birlikte sentez gaz üretimi ve teknoloji geliştirilmesi yavaşlamış ve durma noktasına gelmiştir.

Son zamanlarda aşırı nüfus artışına bağlı şehirleşmenin artması, tüketim mallarının artması, sanayileşmeyle birlikte üretilen çeşitli atıkların çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmeye başlamasıyla, atıkların bertarafıyla birlikte enerji ihtiyaçlarına katkısı nedeniyle tekrar gündeme gelmiştir.

2.1.5 Gazlaştırıcılar

Gazlaştırıcılar, katı haldeki organik maddeleri gaz haline getiren makinelerdir. Bir gazlaştırıcı sistem şu elemanlardan oluşur: Yakıt yükleme, gazlaştırıcı sistem, gaz ölçümü

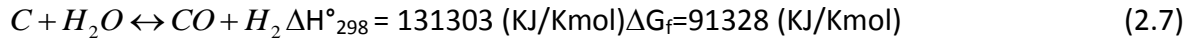
ve temizleme sistemleri ile yakma sistemleri. Yakıt içerisindeki uçucu organik moleküller yakıtın yaklaşık % 80'nini oluşturduğundan gazlaştırmada temel görev bu uçucu maddeleri sürekli gazlara çevirmektir. İkinci iş ise oluşan kömürü gazlaştırmaktır. Gazlaştırmacı yapılarına göre şöyle sınıflandırılırlar; [16]

2.1.5.1 Sabit Yataкта Gazlaştırmacılar

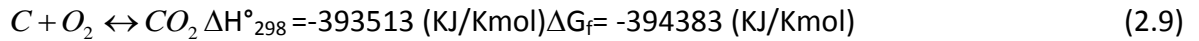
Endüstride çok uygulanan eski bir gazlaştırma sistemidir. Bu sistemde katı madde, kül ve reaktif gazlar ile gaz ürünler arasında zıt yönde bir akış gerçekleşir, bu nedenle ısı taşınımı çok iyi gerçekleşir[17].

Bu sistemde katı maddenin etkilendiği bölgeler şunlardır:

- Nem ve uçucu maddelerin uzaklaşma bölgesi, bu bölgede nem uzaklaşır katı madde uçucu maddelerini verir.
- Gazlaştırma bölgesi, burada karbon - su buharı tepkimesi ve karbon-karbondioksit tepkimesi gerçekleşir.



- Yanma bölgesi, bu bölgede, karbon-oksijen tepkimesi ile ısı ve karbondioksit oluşur.



Kül yatağı bölgesi, bu bölgede oksijen gazlaştırmacıya giren gazı ısıtır.

Küçük ölçekli gazlaştırmacılar oldukça basit cihazlardır. Yakıtla dolu silindirik bir gövdeden oluşurlar. Bu gövde üzerinde hava giriş ve gaz çıkışı için bir ağız bulunur. Ayrıca bir de ızgara vardır. Gövde ateş tuğlasıyla örülmüştür. Gazlaştırmacılar, ya taşınabilir olarak yapılırlar ve bir kamyonla yüklenerek istenilen yere götürülürler ya da sabit bir yerde kurulurlar. Gazlaştırmacıların tasarımında en önemli kısım yakıt kolonuna verilecek havanın gönderiliş biçimi ve yeridir. Buna göre de gazlaştırmacılar sınıflandırılırlar. En önemlileri ise

yukarı akışlı, aşağı akışlı ve çapraz akışlı gazlaştırıcılardır. Gazlaştırma bölgesi 300-1000°C ve yanma bölgesi 1000-1700°C sıcaklığa kadar çıkar. En önemli sabit yatak gazlaştırıcılar;

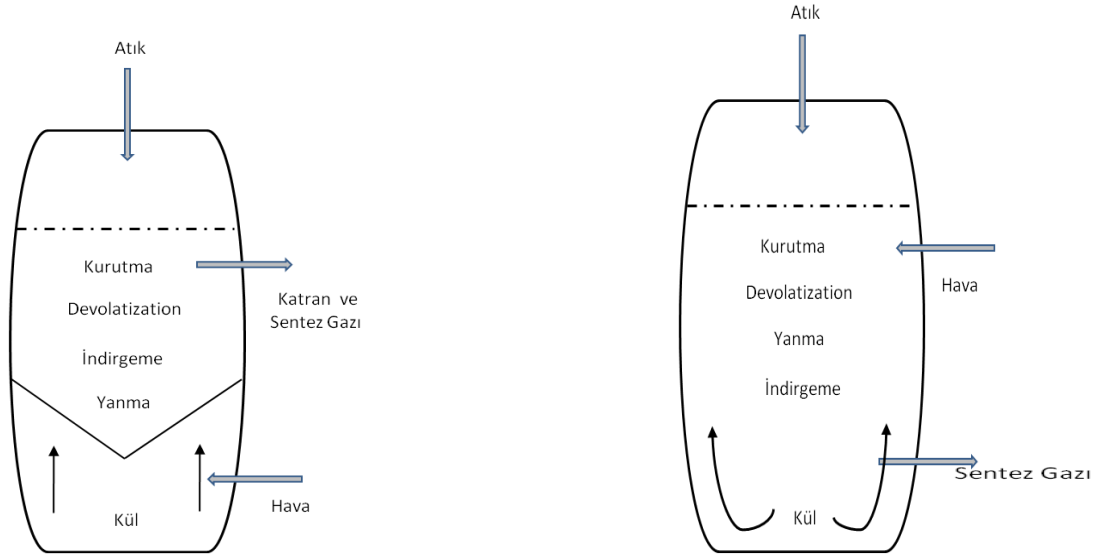
a) Yukarı akışlı gazlaştırıcı: Hava akışı, yakıt akışına ters olarak ve gaz üreticinin mümkün olduğu kadar alt kısmından sağlanmıştır. Üretilen gaz ise gazlaştırıcının üst kısmından alınmaktadır. Şekil 2.2'de bir yukarı akışlı gazlaştırıcı görülmektedir. Yukarı akışlı gazlaştırıcılar, sıcak gazların yakıt kolonundan geçerek oldukça düşük sıcaklıkta gazlaştırıcıyı terk ettiklerinden yüksek verime sahiptirler. Gaz tarafından verilen duyulur ısı yakıtı kurutmak ve ön ısıtmak için kullanılmaktadır. Damıtma ve kurutma bölgesinde meydana gelen ürünler ise; su, katran ve yağ buharları olup bunlar oksitlenme bölgesine geçmezler. Bu nedenle bu gazlaştırıcılarda yüksek uçucu maddeye sahip yakıtların gazlaştırılması yapılırsa, üretilen gazda yüksek oranda katran bulunacaktır. Gaz kalitesini artırmak ve sıcaklığı külün ergime noktasının altında tutmak için birçok üretici nemli hava kullanmaktadır. En önemli tasarım değişkenleri; hava yüklemesinin yöntemi, gaz çıkışının pozisyonu, ızgaranın tipi ve boyutu, nemli hava girişi için ortalama buharlaşan su miktarı, ateş bölgesi, beklenen özgül gazlaştırma oranı ve yakıt yatağının yüksekliğidir[18], [19].

b) Aşağı akışlı gazlaştırıcı: Yukarı akışlı gazlaştırıcıda üretilen gaz yüksek oranda katran içerdiğinden içten yanmalı motorlarda kullanılması zordur. Bu problemi ortadan kaldırmak için "Aşağı akışlı" gazlaştırıcılar geliştirilmiştir. Bu tipte gönderilen hava, yakıtla aynı yönde yani aşağıya doğrudur ve gaz da gazlaştırıcının alt kısmından dışarı alınmaktadır. Şekil 2.2' de bu tip bir gazlaştırıcı görülmektedir.

Bu tasarımın altında yatan temel düşünce ise şu şekildedir: Damıtma bölgesinde açığa çıkan katran, yağlar ve buharlar yüksek sıcaklığa sahip değildir. Bunlar, gaz çıkışından geçmek için kısmi yanma bölgesinden de geçmek zorundadırlar. Burada yüksek sıcaklıktan geçerken parçalanarak gaza dönüşürler. Böylece gaz karışımının içerisinde çok düşük oranda katran kalır. En önemli tasarım değişkenleri ise; yanma bölgesinin tasarımı, hava gönderilmesi, ızgara tasarımı, boğaz tasarımıdır. Aşağı akışlı tipteki bir gazlaştırıcının hava giriş kısmının üzerinde daraltılmış dikdörtgen bir kesit vardır. Buna boğaz adı verilir ve bu

boğaz sıcak karbona homojen bir kalınlık sağlayarak damıtma gazlarının geçişine izin verir. Bu nedenle tasarımda önemli bir değişken olmaktadır.

Aşğı akışlı tipteki gazlaştırmacılar; yüksek kül oranına, yüksek nem oranına veya yüksek cürufa sahip yakıtların gazlaştırılmasına uygun değildir. Nem oranının %20'yi geçmesi durumunda bu sistem için bu yakıtın kullanılması uygun olmayacaktır. Eğer yakıtın kül oranı yüksekse bu durumda ızgaranın döner olması gerekecektir. Bu gazlaştırmacı için önerilen en yüksek kül oranı %5 civarındır. İlave buhar veya suyun sisteme verilmesi "Aşğı akışlı" gazlaştırmacılar da çok kullanılmaz. Hidrojen üretimi için yakıt ve havadaki nem yeterli olmaktadır.



Şekil 2.2 Sabit yatak gazlaştırmacılar (üsten ve alttan gaz çıkışlı).

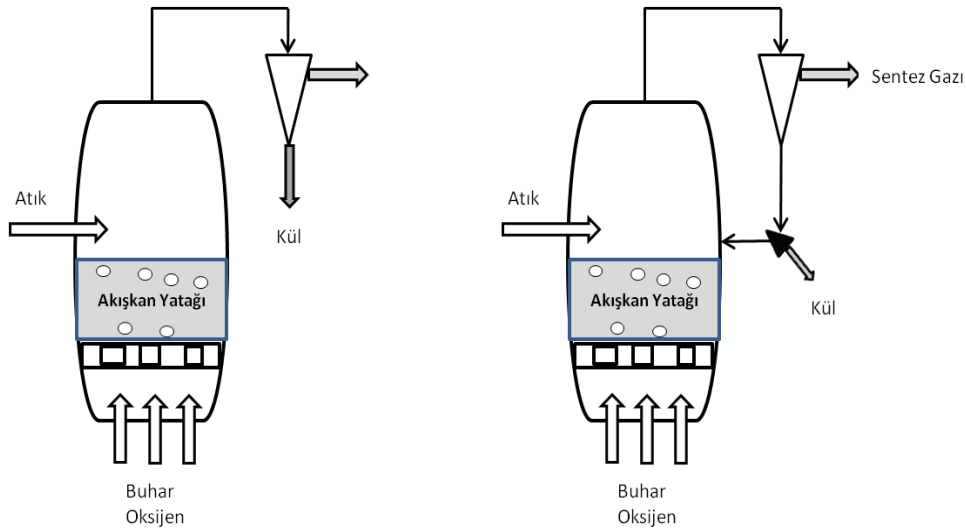
Diğer sabit yatak gazlaştırmacılar kullanışlı değildir. İhtiyaca göre farklı tasarımları olabilmektedir. Komple bir gazlaştırma sisteminde; depolama, kuru tma, gazlaştırmacıya yükleme, kül ve katranı gazlaştırmacıdan alma, sistemden gaz çekme, gaz temizleme, yakma, ölçme ve kontrol sistemleri bulunur[20], [21].

2.1.5.2 Akışkan Yatakta Gazlaştırıcılar

Katı, yatağa beslendiğinde hava veya oksijen ve su buharı ile akışkanlaşır. Akışkan yatağa, sabit yaktan (aynı boyuttaki reaktör için) daha fazla katı madde beslenebilir. Akışkan yatakta, gaz ürün yatağın sıcaklığıyla aynı sıcaklıkta dışarı çıkar. Akışkan yatakta, sabit yaktan, daha az is ve katran oluşur.

Bu proste (Şekil 2.3) katı madde, oksijen ve su buharı ile akışkanlaşıp gazlaştırılmaktadır. Üretilen karbondioksit buhar yerine kullanıldığında, karbon monoksit açısından zengin bir gaz üretilir. Katı maddenin büyük parçacıkları akışkan yatağın yatak bölgesinde gazlaştırılır. Toz ve küçük tanecikler ise yatağın üst kısmında gazlaştırılır. Bu sistem 800-1000°C 'de çalışır. Gazlaşma bölgesi daha yüksek sıcaklığa çıkmamalıdır. Aksi takdirde kül ergir. Kül ergitmeli gazlaştırıcılarda yanma bölgesinde sıcaklık 1400°C ye kadar çıkar[22], [23].

Kabarcıklı akışkan yatak ve dolaşimli akışkan yatak olarak iki çeşittir. Kabarcıklı akışkan yatakta akışkan hızı 0,3 m/s dir. Dolaşimli akışkan yatakta hız daha yüksek olup 5 m/s kadar çıkar. Bu gazlaştırıcıda gazlaşmadan çıkan katı parçacıklar tekrar gazlaştırıcıya döner. Hızında yüksek olması nedeniyle gazlaşma verimi çok yüksektir. Ancak yüksek hızdan dolayı ısı kaybı çok olduğundan ısı verimi düşüktür. Petrol koku ve 0,5-0,95 mm boyutlarındaki her türlü organik maddeyi gazlaştırabilir[24], [25], [26],[27], [28], [31].



Şekil 2.3 Dolaşimli akışkan yatak gazlaştırıcılar.

2.1.5.3 Sürüklemeli akış Gazlaştırıcı

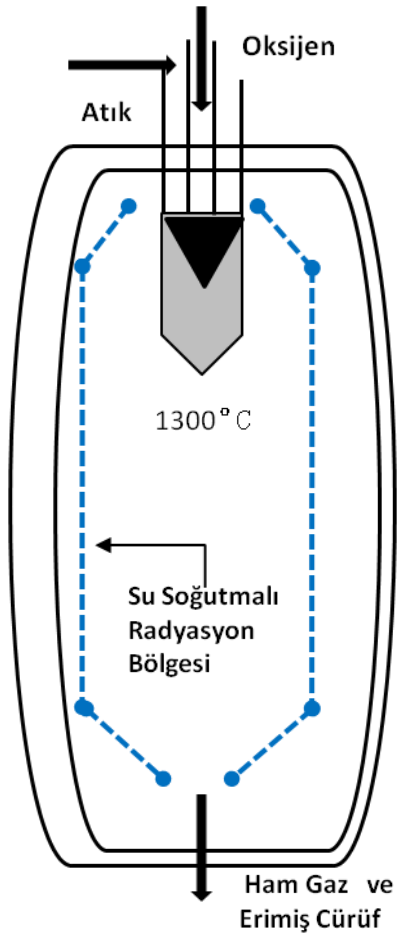
Bu tip gazlaştırıcılar genellikle 25 bar basınca kadar basınçlı çalışan gazlaştırıcılardır. Şekil 2.4'de şematik resmi verilmiştir. Rafineri atıkları, karışık plastikler ve kömürleri gazlaştırır. 1 mm den küçük ve yüksek enerji değerine sahip maddeler gazlaştırılır. En az %60 katı içeren sulu karışımlar basınçlı reaktöre beslenirken oksidasyon için oksijende beslenir. 1200- 1500°C gibi yüksek sıcaklıkta (kül ergime sıcaklığının üzerinde) çalışırken çok kaliteli gaz üretir. Eriyik (cüruf) gazlaşma odasından alınır[29], [30].

2.1.5.4 Döner Fırın Gazlaştırıcılar

Bu tip reaktörler genellikle endüstriyel atıkların yakılmasında ve çimento üretiminde kullanılır. Döner fırında katı karışım sürekli yüksek sıcaklıktaki tepkime bölgesine hareket ettirilir. Fırın dakikada 1,5 devirle dönerken katı karışım dakikada 3 cm yol alır. İlk aşamada 450°C gazlaşma meydana gelir ve katı karışım gaz ve kok haline gelir. Demir ve alüminyum gibi metaller ayrılır. İkinci aşamada kok yanma odasında 1,2 hava fazlalık kat sayısı ile 1300 °C de yakılır. Kül ergitilerek 1/200 oranında katı hacmine ulaşılır. Bu reaktörler genellikle yakma esaslı çalışmalarına rağmen evsel katı atıkların gazlaşmasını sağlayan reaktörlerde yapılmıştır.

2.1.5.5 Plazma Gazlaştırma

Plazma; elektronlar, iyonlar ve yüksüz parçacıklardan oluşan, elektriksel olarak yüksüz olan, maddenin 4. hali olarak ifade edilir. Plazma teknolojisi, bir proseste elektrik akımını bir gaz içerisinden geçirerek aralıksız bir elektrik arkı oluşturmayı içerir. Sistemdeki elektriksel özdirençten dolayı, gaz moleküllerinden elektronları ayıran, iyonlaşmış bir gaz akışına veya plazmaya sebep olur ve kayda değer bir ısı açığa çıkar. 2000°C'de, gaz molekülleri atomlarına ayrışır ve sıcaklık 3000°C'ye yükseldiğinde gaz molekülleri elektron kaybeder ve iyon haline gelirler [15], [32].



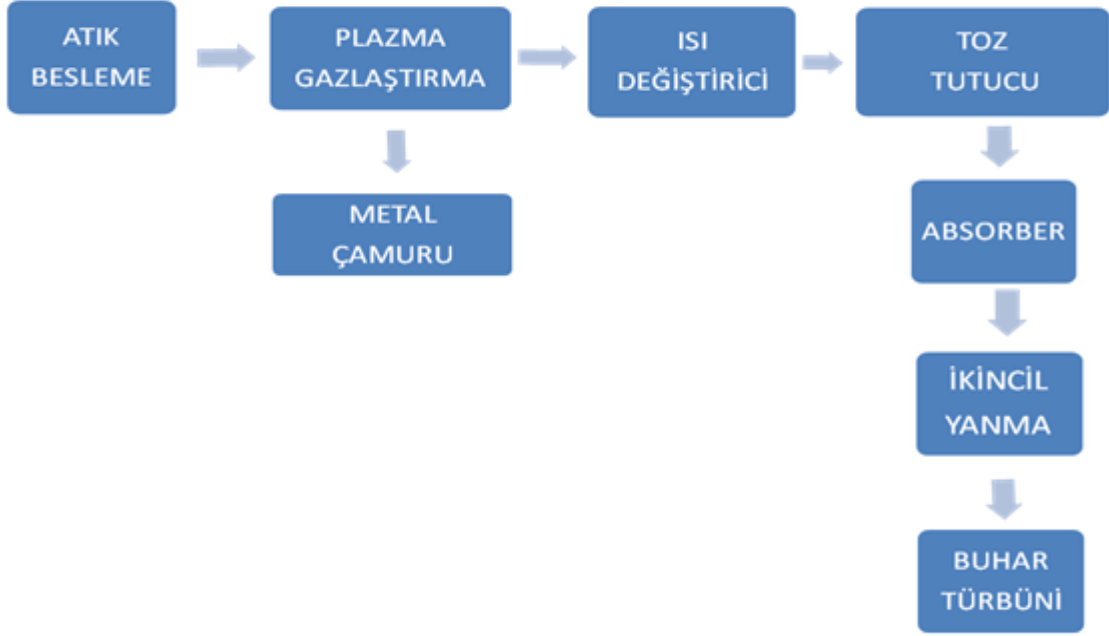
Şekil 2.4 Sürüklemeli akış gazlaştırıcı ve plazma gazlaştırıcı.

Plazma teknolojisinde, yüksek enerjili ve sıcak bir plazma akımı iki elektrot arasında üretilir. Plazma elektrotların biri diğerine yüksek enerjili plazma jeti oluşturur (Şekil 2.4). Transfersiz (iki elektrot arasında plazma oluşturan) ark cihazlarında iki elektrot bulunurken, transferli (Ark eriyik üzerinden devreyi tamamlayan) cihazlarda ise ikinci elektrot işin kendisidir.

Plazma teknolojisi pek çok alanda kullanılmaktadır. Özellikle tehlikeli atıkların dönüşümünde inorganik maddeleri camsı bir cürufa dönüştürerek güvenle tekrar kullanılabilir hale getirmesi çevre açısından çok önem arz etmektedir. Bu nedenle plazma gazlaştırma teknolojisi geliştirilmiştir. En önemli dezavantajı pahalı enerji kaynağı olan

elektrik enerjisi kullanmasıdır. Plazma üretiminde genellikle grafit elektrotlar kullanılır[33], [34], [35],[58].

Plazma gazlaştırma sistemleri genellikle Şekil 2.5’de görüldüğü gibi birçok bileşenden oluşur. En önemli avantajı gazlaştırılacak materyallerin ön işlemeye ihtiyaç duymamasıdır. Oluşan gazlar zenginleştirildikten sonra yakılarak enerjiye dönüştürülmektedir. Külün ergitilebilmesi için reaktör içi sıcaklığın 1500°C’ civarında tutulması gerekir[36].



Şekil 2.5 Plazma gazlaştırmaya giren ürünlerin enerjiye dönüşümü prosesleri

Plazma gazlaştırma reaktörlerinin gazlaştırmadaki üstünlükleri Çizelge 2.2’de açık bir şekilde görülmektedir. Tepkimeler çok hızlı gerçekleşir ve katılar için boyut faktörünün önemi olmadığı gibi sıvı ve gazlar içeren maddeleri rahatlıkla gazlaştırırlar. Daha küçük hacimlerde yüksek kapasitede gazlaşma sağlarlar. Çok yüksek sıcaklıklara olanak sağlaması nedeniyle inorganik maddeleri ergiterek kül oluşumunu engeller. Sistem farklı tepkenler kullanarak daha verimli ürünlerin üretilmesine olanak sağlar[5].

Plazma gazlaştırma yöntemiyle gazlaştırılan maddeler ve gazlaştırma sonucu oluşan ürünler Şekil 2.6’da görülmektedir[57].

Çizelge 2.2 Çeşitli gazlaştırıcıların karşılaştırılması[5]

	Aşağı akışlı	Yukarı akışlı	K.A.Y.	D.A.Y.	Sürük. Akış	Döner Fırın	Plazma
Yakıt Partikül Boyutu	100 mm	100mm	<150	100 mm az	1 mm	Önemi yok	Önemi yok
Biçim	Aynı	Aynı	Aynı	Aynı	Aynı	Önemi yok	Önemi yok
Nem Miktarı	<20 %	<50 %	<55 %	<55 %	<15 %	Önemi yok	Önemi yok
Kül miktarı	< 5 %	< 15 %	< 25 %	< 25 %	< 20 %	< 40 %	Önemi yok
Kül erime noktası °C	> 1250	> 1000	> 1000	> 1000	< 1250	Önemi yok	Önemi yok
Yoğunluk Kg/M ³	> 500	> 400	>100	> 100	>400	> 100	> 100
Sıcaklık profili	Geniş	Geniş	550-1000	900-1000	1200-1500	Geniş	1500-5500
Isı Transferi W/m ² K	20-100	20-100	200-700	100-350	Zayıf	Çok zayıf	Çok Yüksek
Kalma zamanı	Boşalınca kadar		Partk.asılı iken	Birkaç saniye	Kısa zaman	1-2 saat	yok
Dönüşüm	Yüksek		Yavaş	Yüksek	Belirsiz	Yüksek	100%
Proses esnekliği	Çok sınırlı		Mükemmel	Mükemmel	Çok sınırlı	Sınırlı	Mükemmel
Non-Katalitik Proses	Yüksek sıcaklık		Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Geniş	Tehlikel. Atık
Katalitik Proses	Kullanılır		Kullanılır	Kullanılmaz	Kullanılmaz	Kullanılmaz	Kullanılmaz

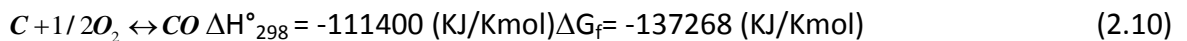
2.2 Gazlaştırma Tepkimeleri

Gazlaştırma esnasında peş peşe bir dizi tepkimeler oluşur. Ne zaman hangi tepkimenin oluştuğunu kestirmek çok zordur. Bu muhtemel tepkimeler;[37],[38]

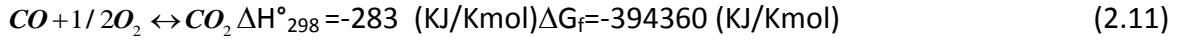
2.2.1 Oksijen Tepkimeleri

Gazlaştırma esnasında oksijen saf olarak ya da havadan reaktöre verilir. Kimyasal tepkime prensiplerine uygun olarak aşağıdaki ekzotermik (ısıveren) tepkimeler oluşur.

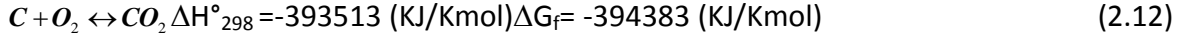
Kısmi oksidasyon;



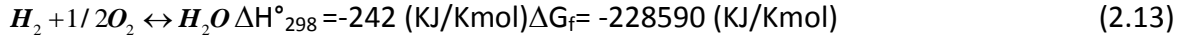
CO oksidasyonu;



Karbon oksidasyonu;



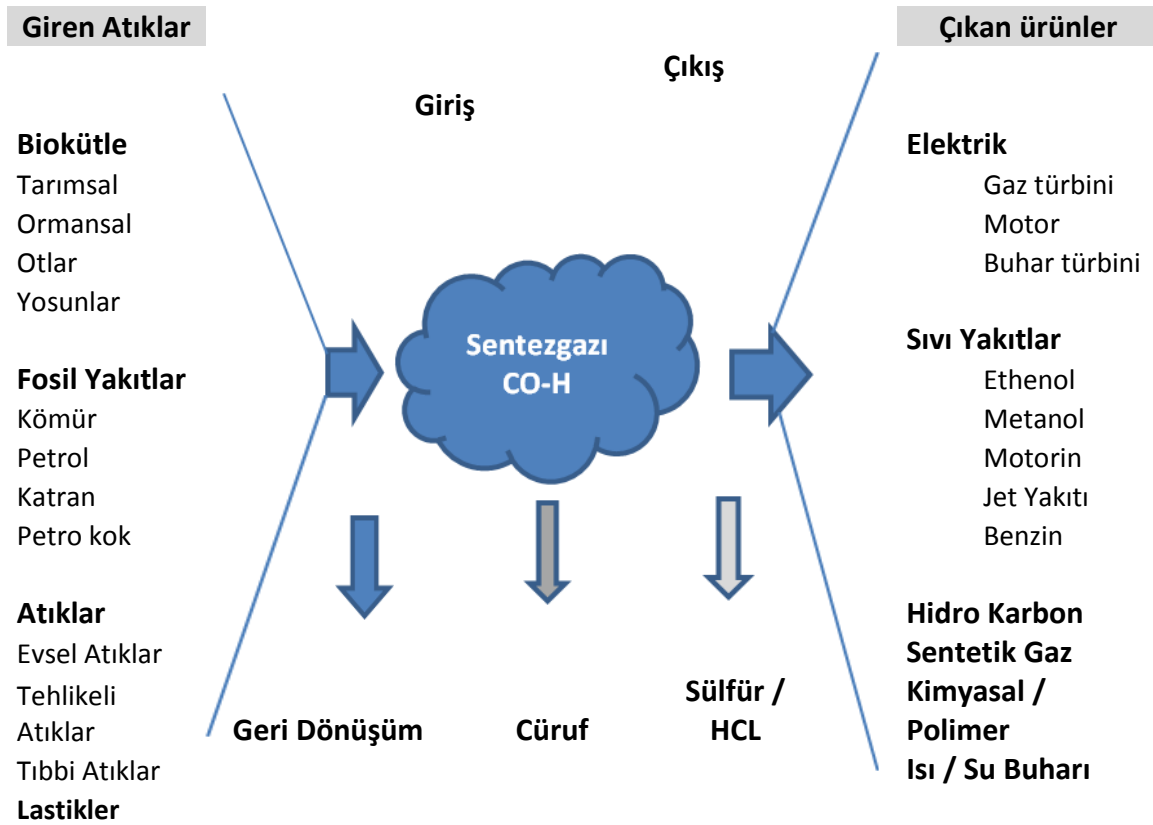
Hidrojen oksidasyonu;



C_nH_m Oksidasyonu;



Plazma Gazlaştırma



Şekil 2.6 Plazma gazlaştırmaya giren ve çıkan ürünler

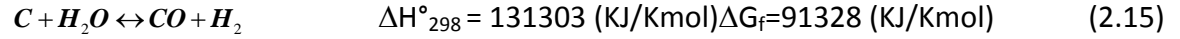
Yeterli oksijen olması halinde normal yanma tepkimesi oluşur. Oksijen yetersiz ise CO meydana gelir. Karbon miktarı fazla ise kalan karbon Kok haline gelir. Karbon katı

olduğundan oksijenle yaptığı ilk tepkime heterojen tepkimedir. Gazlaştıktan sonra homojen tepkimeler oluşturur. Tepkime esnasında hem CO hem de CO₂ oluşur. Ancak yüksek sıcaklıklarda daha çok CO oluşur. Organik maddelerin yapıları karmaşık olduğundan daha çok yüksek ısılarda diffüzyonal olarak tepkime gelişir. Organik yapıdaki hidrojen ekzotermik tepkime sonucu suya dönüşür.

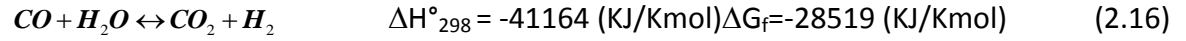
2.2.2 Buhar (su) Tepkimeleri

Gazlaşma esnasında buharın karbon ve bileşikleriyle yaptığı tepkimeler. Bu tepkimeler endotermik ve ekzotermik olabilirler.

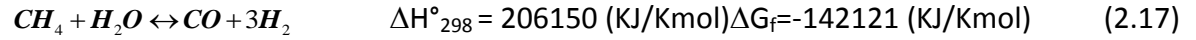
Su-gaz tepkimesi;



Su-gaz değiştirme tepkimesi;



Buhar metan dönüşümü;



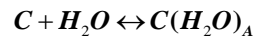
Buhar dönüşümü;

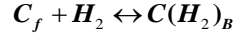
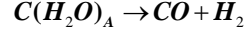


Su gaz değiştirme tepkimesi ekzotermik bir tepkimedir. Bu tepkime sentez gazlarından hidrojen üretme tepkimesidir. Tepkime çift yönlüdür. Sıcaklık değişimine ve sıcaklığa çok bağlıdır. Gazlaştırma sonucu oluşan sentez gazındaki karbon monoksit ve Hidrojen tepkime şartlarına bağlı olarak metan ve suya dönüşür. Bu dönüşüm ekzotermik bir tepkimedir. Buhar endotermik olarak karbonla tepkimeye girer ve karbon monoksit ile hidrojen olarak sentez gazını oluşturur. Yine buhar organik madde ile tepkimeye girdiğinde Karbon monoksit ve Hidrojen sentez gazlarına dönüşür.

Her nasılsa buhar ve karbon tepkimeleri iki farklı mekanizmada gerçekleşir.

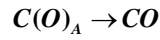
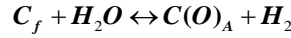
Mekanizma A





C_f Serbest karbonu simgelemektedir. $C(H_2O)_A$ ve $C(H_2)_B$ ise su ile hidrojenin karbon tarafından adsorblanmasını göstermektedir. Çift yönlü ok tepkimenin çift yönlü olduğunu göstermektedir. Mekanizma A da buhar Karbonla adsorblanmaktadır. Tüm gazlaştırma hızlarında hidrojen adsorblamaktadır.

Mekanizma B

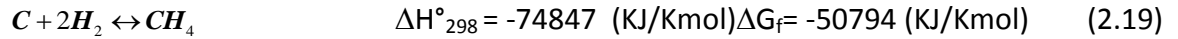


Öte yandan Mekanizma B'de, gazlaştırma hızını kimyasal soğurulmuş oksijenle birlikte hidrojenin tepkimeye girme isteği etkiler böylece karbon monoksit içindeki oksijenin kimyasal soğurulması dönüşümüyle sınırlanır. Bu yüzden bu mekanizma oksijen değişimi olarak kısaltılarak gösterilir.

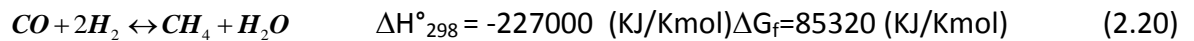
2.2.3 Hidrojen Tepkimeleri

Doğrudan hidrojen karbonla tepkimeye girerek metan oluşturur. Bu tepkimeye hidrogazlaştırma tepkimesi denir.

Hidrojenlenme;



Metanlaşma;

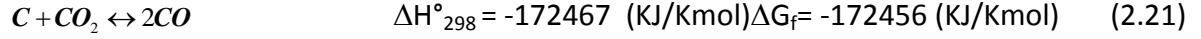


Bu tepkimeler ısıveren olup genellikle düşük sıcaklıklarda ($T < 670^\circ\text{C}$) gerçekleşir. Buhar ve karbondioksit tepkimelerine benzemez. Düşük sıcaklıkta tepkime hızı çok yavaştır. Bunun için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç vardır.

2.2.4 Karbondioksit Tepkimeleri

Karbon ile karbondioksitin tepkimeye girmesiyle karbon monoksit oluşur. Endotermik bu tepkimeye Boudouard tepkimesi olarak isimlendirilir. Buhar tepkimelerine benzerdir.

Boudouard tepkimesi;

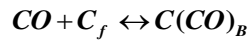
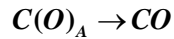
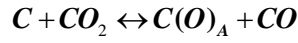


Endotermik kuru dönüşüm;

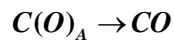
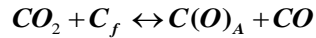


Çift taraflı bu gazlaştırma tepkimesi yüksek sıcaklıkta ($T > 680^\circ\text{C}$) meydana gelir. Yüksek basınç ve sıcaklıkta yeterli dönüşümü sağlar. Bu tepkime gazlaştırmada tek olarak asla değerlendirilmez çünkü düşük dönüşüm, düşük kinetik hız ve düşük termal verime sahiptir. P_{CO} ve P_{CO_2} kısmi basınçlarıyla yazılan hız denklemi karbon monoksit oluşumunu sağlayan en az iki mekanizma olduğunu gösterir.

Mekanizma A



Mekanizma B

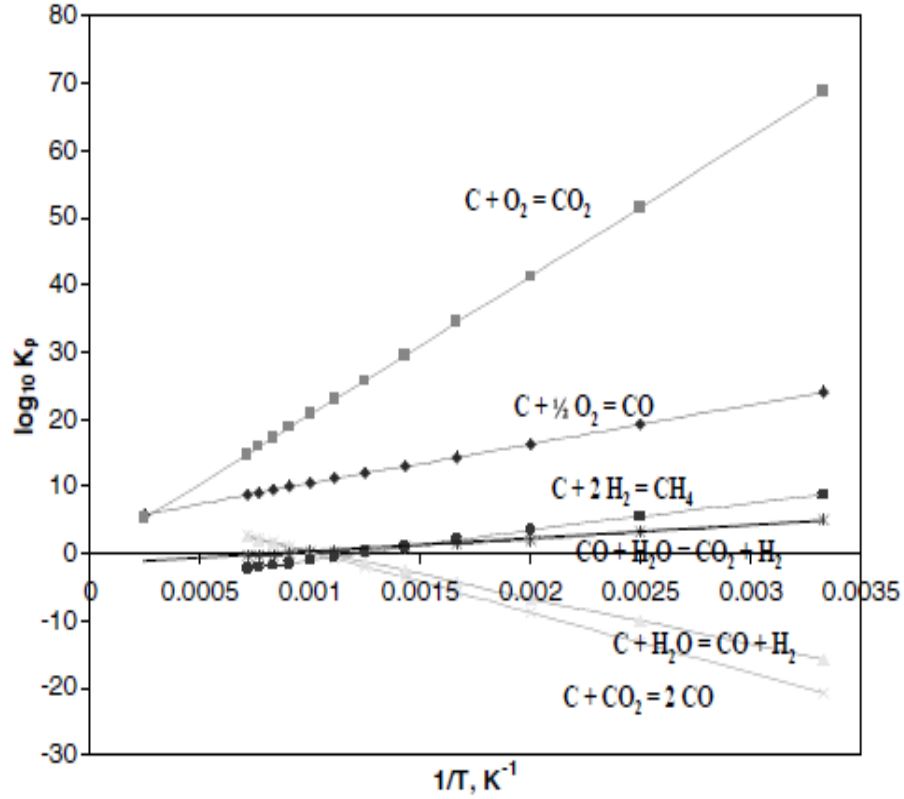


Her iki mekanizma karbon monoksit tepkime hızını düşürür. Bu düşüşün sebebi Mekanizma A oluşumundan sonra Mekanizma B oluşmasındandır. Karbondioksitin tüm tepkimelerinde bu geçerlidir. Yine organik madde Karbondioksitle tepkimeye sokulduğunda endotermik bir tepkime oluşur ve tepkime sonunda karbon monoksit ile hidrojen oluşur.

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda tüm tepkimeler endotermik yönde gelişir. Sonuç olarak ekzotermik tepkime kaynaklı olan yanma ürünleri meydana gelmez. Çizelge 2.3'de gazlaşma esnasında oluşabilecek tepkimelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Gazlaştırma işleminde gerçekleştirilecek tepkimeler ve termodinamik özellikleri

REAKSİYONLAR	ΔH_f (KJ/Kmol)	ΔG_f (KJ/Kmol)
$C + 1/2O_2 \leftrightarrow CO$	-110523	-137268
$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	-74847	-50794
$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	-393513	-394383
$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$	131303	91328
$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	-172467	-172456
$H_2 + CO \leftrightarrow 1/2CH_4 + 1/2CO_2$	-123657	85320
$H_2O + C \leftrightarrow 1/2CH_4 + 1/2CO_2$	-7646	6008
$H_2O + CO \leftrightarrow H_2 + CO_2$	-41164	-28519
$3H_2 + CO \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206150	-142121
$4H_2 + CO_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	164896	-113602
$CH_4 + O_2 \leftrightarrow C + 2H_2O$	-408804	-406398
$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O$	802318	-800781
$2H_2O + C \leftrightarrow 2H_2 + CO_2$	90139	62809
$H_2 + 1/2S \leftrightarrow H_2 S$	-296897	-300369
$SO_2 + 3H_2O \leftrightarrow H_2 S + 2H_2O$	509175	495965
$H_2S + CO_2 \leftrightarrow COS + H_2O$	-121833	-234000
$N + X/2 O_2 \leftrightarrow NO_x$	90374	86688



Şekil 2.7 Gazlaştırma tepkimeleri için denge sabitleri [38]

2.3 Tepkimeyi Kontrol Eden Basamakların Tanımı

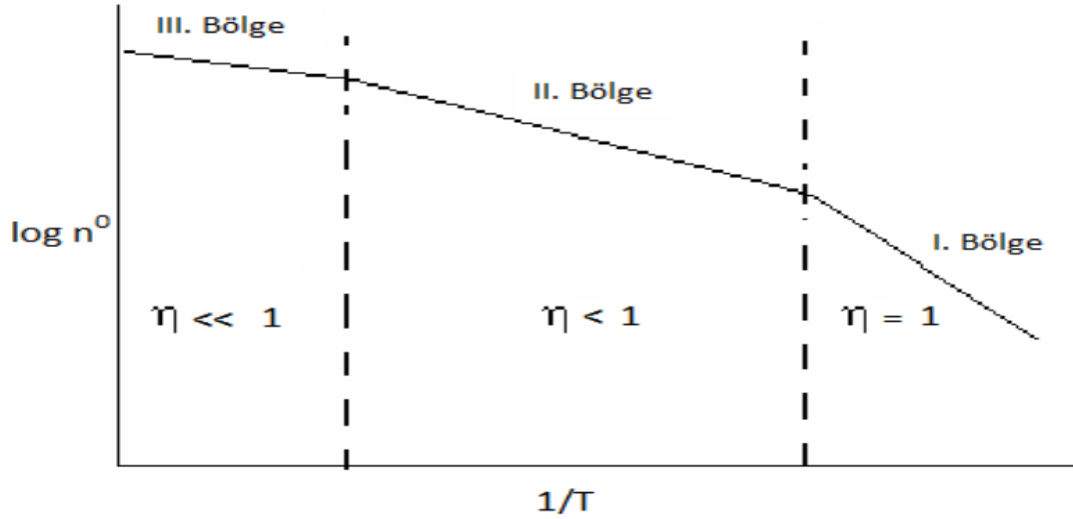
Katı-gaz tepkimesinde tepkime hızı kontrol basamağı; gaz difüzyonu veya kül difüzyonu gibi difüzyon kontrollü, kinetik (kimyasal tepkime) kontrollü ve ara rejimde olabilir[37].

1-Düşük sıcaklıklarda katının reaktivitesi düşük ise gözenekli katıya giren gaz molekülleri gözenekli yüzeyle son tepkimeleri yapmadan parçacığın derinlerine doğru nüfuz eder. Tepken gazın bileşimi katı parçacığın her yerinde aynıdır, bu durumda dönüşüm Kinetik kontrollü olur. Aktivasyon enerjisi gerçek değeri ile aynıdır. Tepkime hızı numunenin boyutuna bağlı değildir. Tepkime katının her yerinde devam eder. Gözenekler büyür ve parçacık boyutu seçilen modele göre küçülür veya aynı kalır.

2-Yüksek sıcaklıklarda gerçek katı reaktivitesi görünür reaktifiteden daha büyüktür. Gaz tepken molekülünün tepkime yapmak üzere parçacığın derinliklerine doğru nüfuz etmesi ihtimali azdır. Tepkimeler genellikle gözenekli katı taneciğın dış yüzeyi ya da yakınlarında

başlar ve devam eder. Difüzyon tepkime hızını azaltır fakat kontrol edici basamak değildir, dönüşüm kimyasal tepkime ve difüzyonun bileşik etkisiyle devam eder. Sıcaklığın artmasıyla katı reaktivitesi dolayısıyla tepkime hızı artar fakat difüzyon hızı da paralel olarak artar. Ölçülen aktivasyon enerjisi ve tepkime mertebesi gerçek değerle uyuşmaz. Tepkime parçacığın dış boyutlarının küçülmesiyle devam eder.

3-Daha yüksek sıcaklıklarda gerçek katı reaktivitesi daha yüksek olacaktır ki; gaz tepken molekülleri tanenin iç zarf kesitinde daha yüksek oranda tepkime yapacaklardır ancak bu kez de kütle taşınımı tepkime hızına ayak uyduramadığında difüzyon dönüşümü sınırlandıracaktır ve hızı kontrol eden basamak olacaktır. Tamamen difüzyon kontrollü dönüşüm bu şartlarda gerçekleşir. Tepken gazın bileşimi parçacığın dış yüzeyinde neredeyse sıfırdır. Kütle transferi sıcaklıkla yavaş artar. Difüzyon kontrollü tepkimenin aktivasyon enerjisi görünür aktivasyon enerjisinden oldukça küçüktür. Bütün tepkime dış yüzeyde olur, iç yüzey etkilenmez.



Şekil 2.8 Tepkime hız kontrol basamaklarının sıcaklık ve tepkime hızıyla değişimi.

Tepkime hız kontrol basamaklarının sıcaklık ve tepkime hızıyla değişimi Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Gazlaşma hızını birinci bölgede kimyasal tepkime belirler. Doğrunun eğimi aktifleşme enerjisi E_a 'ya bağlıdır. İkinci bölgede aktifleşme enerjisine bağlı olarak eğim düşmüştür. Üçüncü bölgede D difüzyon (yayınım) kat sayısı etkindir, k hız sabiti etkin

değildir. Düşük sıcaklıklarda gazlaşma katı yüzeylerde meydana gelirken, en çok gözenek içinde meydana gelir. Yüksek sıcaklıklarda gazlaşma sadece katı dış yüzeyinde meydana gelir.

2.3.1 Hız Kontrol Edici Basamağın Belirlenmesi

Önceki bölümlerde katı-gaz tepkime modelleri tanıtılmış ve incelenmiştir. Bu inceleme ortaya koymuştur ki dönüşüm işlemini baştan sona modelleyebilmek ve doğru kinetik ifadeyi bulabilmek için dönüşümün “hız kontrol edici” basamağının seçilmesi yapılan işlemlerin doğruluğu bakımından çok önemlidir. Genellikle dönüşüm-zaman eğrilerinde lineer bölgede tepkime hızlıdır ve işlem hızı kinetik kontrollüdür. Ancak daha sonra eğrinin eğimi azalır bu bölge için kinetik kontrollü rejim uygulanırsa bulunan aktivasyon enerjisi gerçektekenden daha büyüktür. Bu nedenle EKA'nın dönüşüm ve tepkime hızlarının belirlenmesi için deneysel sonuçlar irdelendikten sonra tüm tepkimenin hız kontrol basamağı belirlenir.

2.3.2 Gazlaştırma Dönüşümlerinin İncelenmesi

Her gazlaşma sıcaklığı için $m_{c,o}$ (EKA kütlesi) farklıdır. Dolayısıyla farklı sıcaklıklar için farklı dönüşümler hesaplanır.

$$X = 1 - \frac{m_c}{m_{c,0}} \quad (2.23)$$

Eşitlikteki $m_{c,o}$ EKA'nın başlangıç karbon kütlesi, m_c anlık EKA'da kalan karbon kütlesidir. Dönüşümlerin belirlendiği bu bölümde gazlaşma işlemini tanımlayabilmek için bir tepkime modeli seçilmelidir. Ancak hız kontrol basamağının önceden belirlenmesi gerekir. Kimyasal basamakta tepkimeler sıcaklığa çok duyarlıdır farklı sıcaklıklarda yapılan çalışmalar kontrol basamağının difüzyon veya kinetik kontrollü olup olmadığını ortaya koyar. Dönüşüm zaman değerlerinden çizilen eğriler tanımlamayı vermektedir. Ayrıca tepkime sıcaklığına karşı tepkime hızının çizildiği Arrhenius eğrileri ile de dönüşüm tanımlaması yapılabilir.

2.4 Türkiye’de Gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar

Ülkemizde doğalgaz gelmeden önce şehirlerde kömürden hava gazı üretilmekte idi. Doğalgazın ucuz ve çevre açısında temiz olması nedeniyle hava gazı tesisleri kapatıldı. Günümüzde herhangi bir amaçla yapılmış gazlaştırma tesisi hala bulunmamaktadır. Ancak evsel atıklar, düşük kalorili kömürler ve en önemlisi dış enerji bağımlılığı yeni arayışlara sebep olmuştur. Enerji bakanlığı ve TÜBİTAK gibi kurumlar teşvikler sunmaya başlamıştır. Özel teşebbüslerde yavaş yavaş ilgilerini artırmaya başlamıştır.

Ülkemizde henüz pilot uygulama olarak dahi çalışan bir gazlaştırma tesisi henüz yoktur. Ancak deneysel amaçlı laboratuvar ölçekli çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Çok kısa zaman içinde ticari işletmelerin çalışmaya başlayacağı umudu gün geçtikçe artmaktadır. Genellikle sabit yatak ve akışkan yatak gazlaştırıcılarla atmosferik şartlarda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Biokütle gazlaştırma amaçlı süper kritik su koşullarında da çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 2.4’de İstanbul ilimizde bile henüz enerji üretimi amaçlı bir tesisin bulunmadığı açıkça görülmektedir[2].

Çizelge2.4 İstanbul evsel atıklarından enerji üretimi[2]

Evsel Atık Geri Dönüşüm	Elle Ayıklanarak geri dönüşümü sağlanan ambalaj atığı	ton/yıl	8.454	7.447
	Kaynağında Ayrıştırılarak geri dönüşümü sağlanan ambalaj atığı	ton/yıl	50.495	89.301
	Geri dönüşümü sağlanan toplam ambalaj atığı	ton/yıl	58.949	96.748
	Atıktan Türetilmiş Yakıt	ton/yıl	1.087	2.590
	Kompost	ton/yıl	10.450	15.240
Çöp gazından Elektrik Üretimi	Hasdal	KWh/yıl	1.791	1.688
	Odayeri	KWh/yıl	50.668	70.180
	Kömürcüoda	KWh/yıl	20.227	45.092
	Çöp gazından üretilen toplam Elektrik	KWh/yıl	72.686	116.960

2.5 EKA (Evsel Katı Atıklar)'ın Gazlaştırılması

EKA'nın Kömür yakan santrallerde yakılarak enerjiye dönüşümü zararlı baca gazı emisyonu ve yarısının küle dönüşmesiyle oluşan atığın tekrar düzenli depolama zorunluluğu ekonomik ve çevreci bir yöntem olmayacağı sonucunu çıkarmıştır. Böylece yeni teknolojik gelişmelerle birlikte yeni arayışlara girilmiştir. İçindeki yüksek orandaki su nedeniyle doğrudan yakılması mümkün olmadığından yardımcı yakıtlarla ya da kurutularak yakılması üzerinde çalışılmış ancak kül, baca gazı ve kurutma problemi nedeniyle bir sonuç alınamamıştır.

Geri kazanım çalışmalarının artmasıyla birlikte kalan organik maddelerden yakıt elde etme çalışmalarına başlandı(RDF). Elde edilen bu yeni yakıt, daha az kül ve daha iyi bir baca gazı emisyonu için öğütülüp gazlaştırıldı. Çizelge 2.5' de ki tabloda farklı sıcaklık ve yöntemlerle yapılan gazlaştırma işleminde ortaya çıkan gaz türleri ve miktarları verilmektedir. Bu tablo araştırmacıların makalelerinde yayımladığı değerler kıyaslanarak hazırlanmıştır.

İlk gazlaştırma çalışmaları sabit yatak gazlaştırıcılarda yapıldı. Bu tip gazlaştırıcılarda yüksek oranda kül çıkması, yüksek sıcaklıklarda külün topaklaşması ve verimlerinin düşük olması yeni arayışlara itti. Gazlaştırma oranı oldukça yüksek olan dönüşümlü akışkan yatak gazlaştırıcılar geliştirildi. Bu gazlaştırıcılardaki aşırı hava miktarı nedeniyle gazlaştırma oranı yüksek olmasına rağmen yüksek ısı kaybı nedeniyle genel verimlerin düşük olması yanında atığın homojen bir şekilde öğütülmesi gibi pahalı ve uzun süren ön hazırlıklar gerektirmesi atıkların tasfiyesinde istenilen sonuca ulaşılamamıştır. Bu gün bu sistemle çalışan birçok tesis bulunmaktadır.

Son zamanlarda yeni bir termik teknoloji olan plazma gazlaştırma teknolojisi dikkat çekmiştir. Çok yüksek sıcaklıkta gerçekleşen bu prosesle atıklardan %1 kütleli oranda cüruf kalıncaya kadar gazlaştırmak mümkün olabilmektedir. Bu yöntemde EKA bir ön hazırlığa ihtiyaç duyulmaksızın doğrudan doğruya gazlaştırılması mümkün olmaktadır. EKA'nın %1 miktarda kalan cüruf taşıdığından içindeki zararlı maddelerin çözünmemesi nedeniyle herhangi bir çevre kirliliğine sebep olmadığı gibi parke taşı gibi çeşitli amaçlar için kullanılması da mümkündür.

Çizelge 2.5 Çeşitli gazlaştırma yöntemlerindeki gaz miktarları

	M.Tendler [33]	T.Yamamoto [19]	M.Morris [26]	E.D.Larson [25]	E.D.Larson		
	Plazma 2000°C	O ₂ Gazlaştır. 1650°C		K.A.Y. 800°C	K.A.Y. 800°C	D.A.Y 780°C	D.A.Y 780°C
	RDF		RDF	RDF(Islak)	RDF(Kuru)	RDF(Islak)	RDF(Kuru)
CO	27,5	27	8,79	16,2	41,8	6,8	14,3
CO₂	3,2	30	15,65	4,2	10,8	11,8	24,8
CH₄	-	-	11,3	6,5	8,2	3,9	8,2
H₂	26,3	35	8,61	7,2	18,6	22,3	46,8
H₂O	4,9	-	9,49	61,2	-	52,1	-
N₂	37,8	8	45,83	0,4	0,01	-	-
Gaz Enerjisi	5,88 Mj/M ³	-	7425 Kj/NM ³	-	20,1 Mj/M ³	-	14,3 Mj/M ³
Termal Verim	-	-	-	-	0,6	-	0,58
Enerji Oranı	-	-	-	-	0,58	-	0,65

Plazma gazlaştırma sonucu EKA'nın büyük bölümü CO, H₂ ve CH₄ gibi yanıcı gazlar ile CO₂ ve H₂O yanma ürünü gazlar oluşmaktadır. Yanıcı gazlarda yakılarak enerjiye dönüştürüldüğünde yine CO₂ ve H₂O oluştuğundan oldukça çevreci bir baca gazı emisyonuna ulaşılmaktadır. EKA bünyesinde bulunan kükürt ve azot gerek gazlaşma esnasında gerekse yanma sonucunda oksitlere dönüşmekte buda gaz temizleme yöntemleriyle ortadan kaldırılabildiğinden bu yöntemin oldukça çevreci olacağı açıkça görülmektedir.

EKA'ın içerisinde çok farklı mineraller bulunmaktadır. Bütün bu minerallerin gazlaşmaya etkileri de çok farklıdır. Bazıları iyi yönde, bazıları da kötü yönde etkilerken hiç etki göstermeyen minerallerde bulunmaktadır. Özellikle silikatlar kötü yönde etkilerken sodyum, potasyum ve kalsiyum gibi mineraller iyi yönde etkilemektedir.

ATIKLAR VE YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1 Atıklar

İnsanları yaşamların boyunca, üretim ve kullanım faaliyetleri sonucunda oluşan, ortama atıldığında insan ve çevre sağlığına zarar verebilecek her türlü maddeye atık denilmektedir. Atıklar oluşum şekillerine göre şöyle sınıflandırılmıştır;

1. Evsel katı atıklar
2. Tıbbi atıklar
3. Tehlikeli atıklar
4. Nükleer atıklar
5. Sıvı atıklar

olarak sınıflandırılırlar. Yine bunlar kendi arasında çeşitli sınıflara ayrılabilirler. Her sınıfın oluşumu, taşınımı, zararları ve bertaraf işlemleri de özel olacaktır.

3.2 Sürdürülebilir Atık Yönetimi

Atık yönetiminde tüm unsurların göz önüne alınması çok önemlidir aksi takdirde çok önemli doğal kaynaklar israf edilecek ve büyük ekonomik kayıplar yaşanacaktır. Bunun için atık yönetim öğelerini verimlilik ve etkinlik açısından irdeleyen bütünleştirici bir atık

yönetimi kavramı ortaya çıkmaktadır. Burada amaç her aşamada yapılan işlemlerin çevresel ve ekonomik büyüklüklerinin değerlendirilmesidir. Atık yönetiminin verimlilik analizi çevresel ve ekonomik etkinlik olmak üzere iki önemli değişken üzerinden yapılır. İçinde bulunduğumuz çağda tüketim alışkanlıklarını değiştirilerek az atık üretmek ve daha sonrada atıkları tekrar ekonomiye kazandırmayı amaçlayan sürdürülebilir atık yönetimi önem kazanmaktadır.

3.2.1 Nihai Bertaraf

Atıkların, ekonomiklik ve imkânsızlıklar nedeniyle veya geri kazanım ve geri dönüşümleri mümkün olmayan kısımları, yeraltına sızıntı olmayacak şekilde izole edilmiş alanlara depolanır. Bu alanlar dolduktan sonra üzeri kapatılarak havaya herhangi bir gaz sızıntısının olmaması için gaz çıkış bacaları inşa edilir. Bacalardan çıkan gazlar toplanarak enerji değeri varsa elektrik enerjisine dönüştürülür, yoksa atmosferik kirliliğe neden olmaması için yakılarak imha edilir.

Depolama alanları içinde oluşan gazların patlamasıyla ciddi bir şekilde mal ve can kayıplarına yol açmıştır. Depolama alanlarının olası çevre kirliliğine karşı alınacak önlemler konusunda Birleşmiş Milletler çatısı altında yasal düzenlemeler ve önlemler alınmaktadır.

Evsel katı atıkların kompozisyonu ve miktarı toplumların gelişmişlik seviyeleri, buldukları coğrafyaya, kültürlerine, inançlarına, mevsimlere ve gelişme süreçlerine bağlı olarak sürekli değişir. Dünyanın globalleşmesiyle ulaşım ve iletişim imkânlarına bağlı olarak teknik ve sosyal etkileşimlerle birlikte tüketim mallarının her coğrafyaya ulaşması nedeniyle insanların tüketimleri dolayısıyla atıkları da git gide bir birine benzemektedir. Örneğin alüminyum kutu, tetrapak, naylon poşet ve pet şişe gibi ambalajlar artık dünyanın her coğrafyasına ulaşmış durumdadır. Bu gün tüm dünyada meyve ve sebzeler neredeyse 12 ay boyunca tüketilmektedir. Bu da bize zaman içinde tüm dünyanın evsel atıkları kompozisyonlarının bir birine yaklaştığını göstermektedir. Evsel katı atıkları; organik atıklar (mutfak atıkları), Ambalaj atıkları (plastik, pet şişe, poşet, kâğıt, karton ve tetrapak

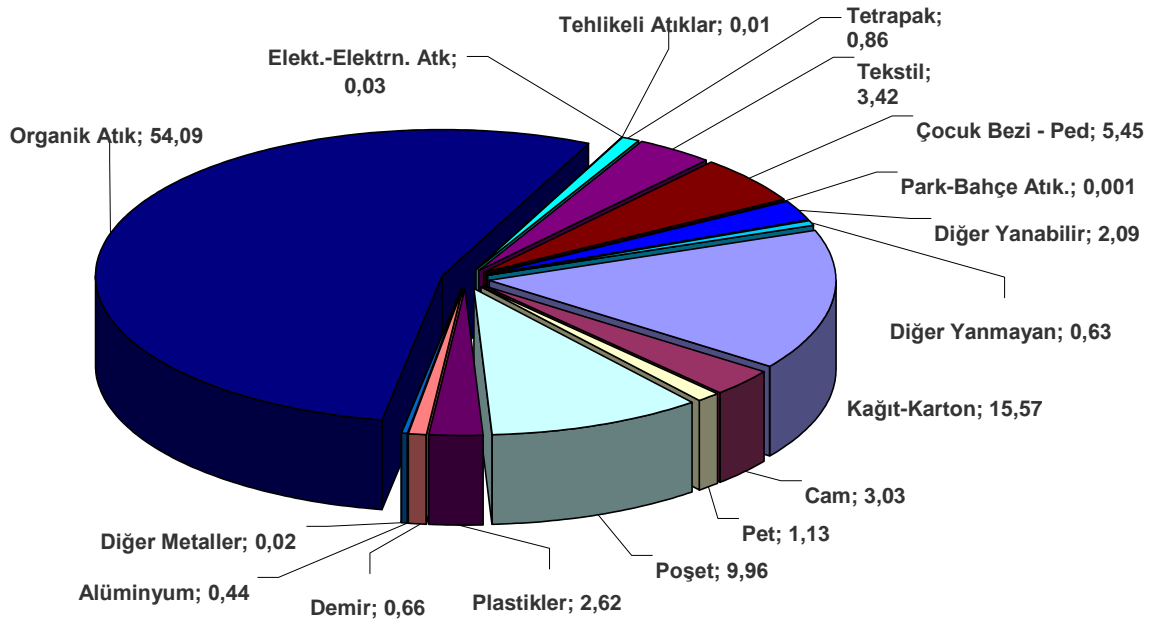
gibi.), tekstil, çocuk bezi, cam ve metallerden oluşur. Şekil 3.1’de İstanbul EKA’larının yaklaşık kompozisyonu görülmektedir.

3.2.2 Evsel Katı Atıkların Enerji değeri

EKA’ın çok büyük kısmı organik atıklar ve hidrokarbon esaslı maddelerden oluşması nedeniyle bir enerji kaynağı olabilecek karakterdir. Şekil 3.2’de çeşitli hidrokarbon karışımlarının içindeki su oranına göre enerji değerleri verilmektedir. Çizelge3.1’de görüldüğü gibi EKA’nın çok büyük miktarını oluşturan organik atıkların ve yiyeceklerin bünyesinin önemli bir kısmı sudan oluşmaktadır. Bu da enerji olarak değerlendirilmesinde en büyük engeli teşkil etmektedir. Kırsal yaşamda organik ve yiyecek atıklarının evcil hayvanları beslemekte kullanılması hem büyük bir ekonomik kazanım hem de atık oluşumunu azalttığı görülmektedir. Yaşam şeklinin değişiminin atık üretimine katkısı açıkça görülmektedir. Artık çağımızda şehirleşmenin daha da artacağı açıktır. Bu nedenle atıkların çevre kirliliğini önlemek amacıyla bertaraf edilmesi esnasında faydalı değerler üretilmesine yönelik çalışmalar yapmak gerekmektedir. Enerji değerinin tespiti için öncelikle o şehrin atıklarını ifade eden ortalama karışım elde edilir ve bu karışım üzerinden ortalama karakteristik değerler tespit edilir[2],[58].

Çizelge 3.1 Atıkların kimyasal bileşimleri ve üst ısıl değerleri[1]

ATIK	%H ₂ O	%C	%H	%O	%N	%S	%KÜL	ÜİD KJ/Kg
Yiyecek	70,0	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0	5512
Kâğıt	6,0	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0	15800
Plastik	2,0	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0	32564
Tekstil	10,0	55,0	6,6	31,2	4,6	0,2	2,5	17243
Ahşap	20,0	42,7	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5	18 608
Organik	60,0	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5	6 513
Cam	2,0	0,5	0,1	0,4	0,1	0,0	98,9	140
Metal	3,0	4,5	0,6	4,3	0,1	0,0	90,5	698
İnorganik	8,0	26,3	3,0	2,0	0,5	0,5	68,0	6 978



Şekil 3.1 İstanbul evsel atıklarının yaklaşık bileşenleri[2]

EKA'nın enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi amacıyla üretilen atıkları temsil eden ortalama bir değer tespiti için pek çok çalışmalar yapılmıştır. Themelis vd. [1] New York evsel atıkları için yaptığı çalışma da atığı oluşturan hidrojen, karbon, oksijen, azot ve kükürt elementlerini içeren Kimyasal bir formül tanımlamaya çalışmıştır. Elde edilen bu formül atıkların içeriği her yerde farklı olacağından yerden yere fark edecektir. Benzer bir şekilde İstanbul atıkları için Çizelge 3.2'de gerekli değerler kullanılarak kimyasal formül $C_6 H_9 O_3$ olarak tespit edilmiştir. Bu formül belirlenirken atık içindeki inorganik maddeler ve nem yok sayılmıştır. Yani kuru külsüz atık formülü olarak tanımlanmıştır. Bu formül tüm kimyasal işlemlerde atığı temsil etmektedir. Miktar söz konusu olduğunda yaklaşık kül ve nem oranı düşüldüğünde çok az bir hata ile atığı temsil ettiği görülmektedir.

Çizelge 3.2 İstanbul EKA'nın yaklaşık kimyasal formülü(kuru külsüz)[2]

Madde Grubu	% ağırlık	Karbon	Hidrojen	Oksijen	Azot	Kükürt
Kâğıt	10,28	43,5	6	44	0,3	0,2
Plastik	2,24	60	7,2	22,8	0	0
Tekstil	3,66	55	6,6	31,2	4,6	0,2
Poşet	17,8	69	9	5,8	6	0,2
Cam	4,85	0,5	0,1	0,4	0,1	0
Metal	1,39	4,5	0,6	4,3	0	0
Organik Madde	52,86	49,5	6	42,7	0,2	0,1
Diğerleri	6,92	26,3	3	2	0,5	0,2
	100	46,6955	5,90563	29,9478	0,9087	0,2267
	Atomik ağırlık	12,01	1,01	16	14,01	32,07
	MOL	3,89	5,85	1,87	0,06	0,01
		6,00	9,02	2,89	0,10	0
Yaklaşık Kimyasal Formül		$C_6 H_9 O_3$				

(3.1) Denklemindeki ekzotermik tepkimeden yanma sıcaklığı 1000°C'de 2700 kJ/mol ısı üretir. $C_6 H_9 O_3$ moleküler ağırlığı 129 olur ve kuru-külsüz EKA'nın teorik tepkime ısı 20930 kJ/kg olarak hesaplanır. EKA'nın içindeki suyun 120°C'de buharlaşarak ayrıldığı kabul edildiğinde buhar kayıp ısı 2636 kJ/kg olarak hesaplanır. Cam ve metalin 700°C ayrıldığı kabul edildiğinde cam ile ısı kaybı 628 kJ/kg ve metal ile ısı kaybı 544kJ/kg olarak hesaplanır. İstanbul nemli EKA'nın ısı değeri (3.1) denkleminde aşağıdaki gibi hesaplanır; [1]

$$UID_{EKA} = 20930X_{EKA} - 2636X_{H_2O} - 628X_{CAM} - 544X_{METAL} \quad (3.1)$$

(3.1) denkleminde %50 kütleli oranda su bulunan ortalama atık karışımı, cam ve metal yaklaşık kütleli oranları yazılarak 9100 kJ/kg bulunmuştur. Themelis vd [1] yaptığı çalışmada kâğıt, plastik, tekstil, yiyecek, metal ve cam gibi EKA'nın bileşimindeki maddelerin ısı değerlerini ayrı ayrı toplayarak aynı ısı değere ulaşmıştır. Yine (3.2) külsüz nemli EKA'nın Üst Isıl Değerini MJ/Kg cinsinden veren formül;

$$UID_{EKA} = (1 - (\%H_2O / 100))(-0.3708(\%C) - 1.1124(\%H) + 0.1391(\%O) - 0.3178(\%N) - 0.1391(\%S)) \quad (3.2)$$

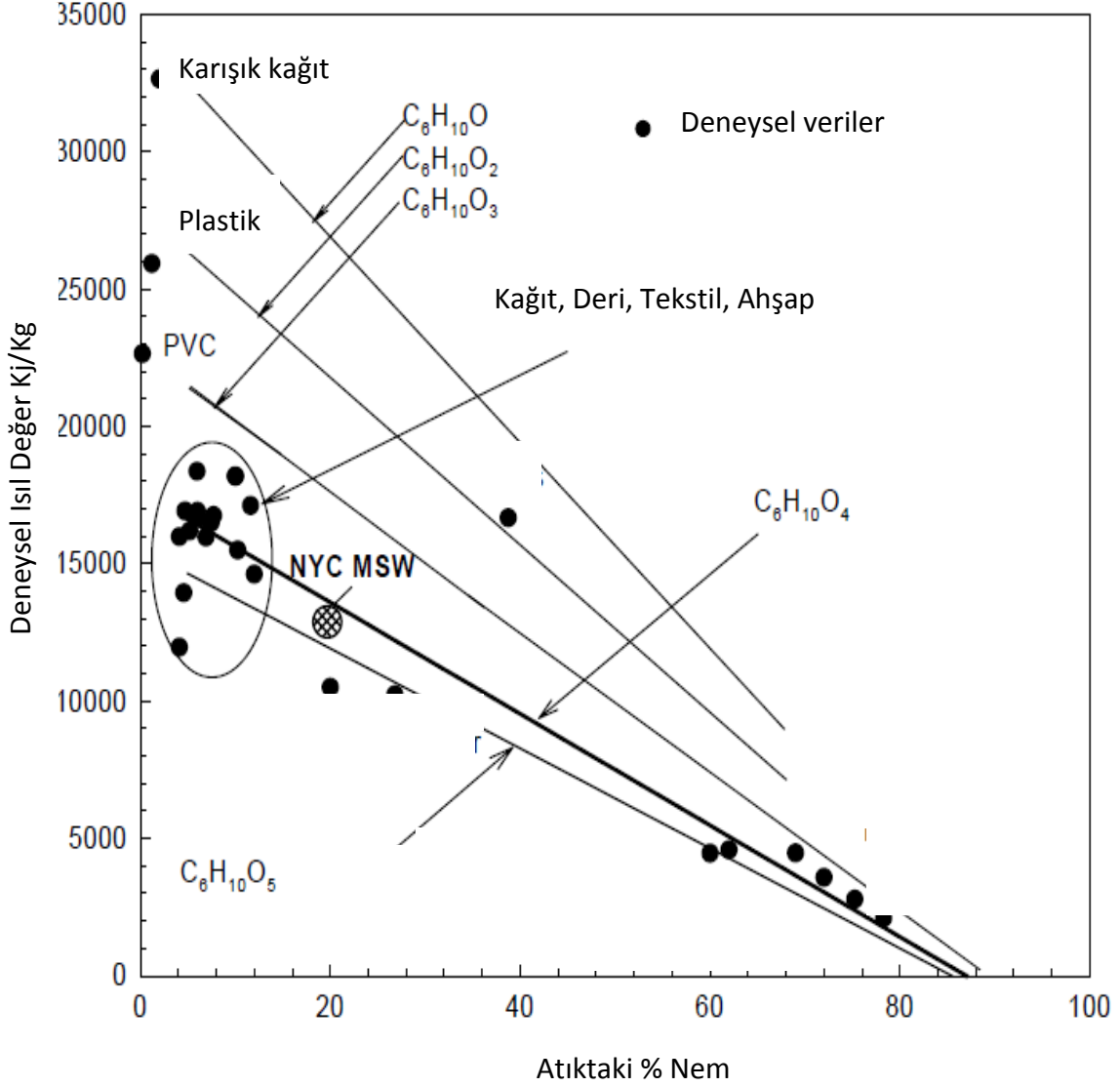
olarak buldular. Buradaki H₂O, C, H, O, N ve S sırasıyla su, karbon, hidrojen, oksijen, azot ve kükürt kütleli oranlarıdır. Önceleri kömür yakan santrallerde yakılmaya başlandı. Baca gazı emisyonları ve yakılan miktarın yarısı kadar kül bırakması bu yöntemde çok ekonomik olmadığını ortaya koydu. Yıllık ortalama kişi başına New York'ta 700 kg ve İstanbul'da 400 kg katı atık meydana gelmektedir. Bu İstanbul da yılda yaklaşık olarak 5 milyon ton katı atık demektir [1]. Katı atık gazlaştırma çalışmaları termik teknolojilerin gelişmesine paralel olarak değişim ve gelişim göstermiştir.

3.3 Katı Atıktaki Enerji ile ilgili Yapılan çalışmalar

Çizelge 3.3'de katı atıkların enerjisi üzerine yapılan çalışmalar gösterilmiştir. Themelis vd (2002), New York katı atıkları üzerinde yaptıkları çalışmalarda yıllık katı atık miktarı, bileşimi, tasfiyesi, enerjiye dönüştürülebilirliği ve enerji değerini ortaya koymuşlardır. New York katı atığı için organik bileşiğin yaklaşık C₆ H₁₀ O₄ kimyasal formülü ile 620 kWh/ton bir enerjiye sahip olduğunu tespit ettiler. Katı atıklardaki nem ve inorganik madde oranlarına göre deneysel olarak ısı verimlerini tespit etmişlerdir. Katı atıklarda bulunan geri dönüştürülebilir inorganik maddelerin ayrılmasından sonra organik kısmın enerjiye dönüştürülmesinin uygun olacağını ortaya koymuşlardır[1].

Klein (2002), yaptığı çalışmalarda katı atıklardan enerji elde etmek için geliştirilen yakma sistemlerini; yakma teknikleri, ilk yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri, gaz konsantrasyonları ve baca gazı konsantrasyonları açısından karşılaştırmıştır. Katı atıklardan

metanol üretilebileceği gibi hidrojen de üretilebileceği böylece sıfır emisyonla çalışan sistemler geliştirilebileceğini ortaya koymuştur [13].



Şekil 3.2 Çeşitli atıkların içerdikleri nem oranına göre ısıl değerleri [1]

Belgiorno vd (2002),yaptığı çalışmalarda katı atıklardan enerji elde etmek için tesis edilen; sabit yatak gazlaştırıcılar, akışkan yatak gazlaştırıcılar ve dolaylı gazlaştırıcıları, enerji dönüşümü, ürün gazlar, çevre, ön hazırlama ve gazlaştırılan atıklar yönünden karşılaştırdılar. Dolaylı gazlaştırıcıların işletme kolaylığı ve ürün gazın ısı değeri, sabit yatak gazlaştırıcıların termal verim ve akışkan yatak gazlaştırıcıların besleme ve karışım elastikiyeti yönünde daha iyi olduklarını ortaya koydular[11].

Murphy vd (2003),yaptıkları çalışmada katı atıklardan enerji elde edilmesi için teknik, ekonomik ve çevresel analizler yapmışlardır. Büyük tesislerde birim maliyetin azaldığını, atıktaki plastik oranının artmasıyla enerji veriminin arttığını, düzenli depolama alanlarında depolanan katı atıkların oluşturduğu enerjiye dönüşümü tekniklerini kıyaslayarak çevreye etkilerini araştırdılar. Birim enerji başına maliyetleri ve açığa çıkan gaz miktarlarını tespit ettiler[48].

Filippis vd (2004),yaptıkları çalışmada iki farklı kompozisyondaki katı atığı diğer yakıtlarla da kıyaslayarak enerji verimliliği ve gazlaşma sonu ürünleri açısından değerlendirdiler. Zengin ülkelerin atıklarının da enerji açısından daha zengin olduğunu ortaya koydular[14].

Porteous (2005),yaptığı çalışmalarda katı atıklardan enerji elde etmek için geliştirilen yakma sistemlerinin baca gazı emisyonları ile özellikle yaydığı dioksitlerin çevre kirliliği üzerindeki etkilerini incelemiş ve izin verilen değerlerin oldukça altında olduğunu tespit etmiştir. Katı atıkların çevre dostu bir enerji olduğunu ortaya koymuştur[6].

Jung vd (2005),yaptıkları çalışmada EKA'nın kül ergitme sıcaklığının üzerinde gazlaştırılması proseslerinde metal davranışlarını incelediler. Gazlaştırmadan sonra eritilen kül içindeki; Ca, Si, Cl, K, Al, As, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Sb, Se, Sn ve Zn metallerinin miktarlarını mg/Kg cinsinden tespit ettiler[49].

Yapılan bu çalışmalarla katı atıkların önemli bir enerjiye sahip oldukları ortaya konulmuştur.

Çizelge 3.3 Katı atık enerjisi üzerine yapılan çalışmalar

Kaynak	Eşitlik
Themelis vd (2002) [1]	<p>EKA'ın yaklaşık kimyasal formülü; $C_6H_{10}O_4$</p> $C_6H_{10}O_4 + 6,5O_2 = 6CO_2 + 5H_2O \quad (3.3)$ <p>Bu tepkime sonucu 18400 kJ/Kg ısı açığa çıkar.</p> $C_6H_{10}O_3 + 7O_2 = 6CO_2 + 5H_2O \quad (3.4)$ <p>Bu tepkime sonucu ise 23000 kJ/Kg ısı açığa çıkar.</p> <p>EKA'nın içindeki inorganik maddelerin kütle oranları tespit edildiğinde Karışımın ısı değeri;</p> $Q=18400 \cdot X_{Yan.Mad.} - 2636 \cdot X_{H_2O} - 628 \cdot X_{Cam} - 544 \cdot X_{metal} \quad \text{kJ/Kg} \quad (3.5)$
Filippis vd (2004) [14]	<p>EKA'ın gazlaştırılması ile elde edilen yanıcı gazlar:</p> <p>Fakir ülkelerde; $H_2 + CO = \%19$</p> <p>Zengin ülkelerde; $H_2 + CO = \%39,39$</p> <p>15 Ton/Saat EKA kapasiteli elektrik üretimi:</p> <p>Fakir ülkelerde; 9,75 MW</p> <p>Zengin ülkelerde; 23,1 MW</p>

Çizelge 3.3 Katı atık enerjisi üzerine yapılan çalışmalar (Devam)

Kaynak	Eşitlik
Klein (2002) [13]	<p>Hidrojen oluşum tepkimelerini şöyle belirledi;</p> $C + 2H_2 = CH_4 + 75 \text{ kJ} \quad (3.6)$ $CH_4 + CaO + 2H_2 = CaCO_3 + 4H_2 - 75 \text{ kJ} \quad (3.7)$ $C + CaO + 2H_2O(s) = CaCO_3 + 2H_2 + 0.6 \text{ kJ} \quad (3.8)$ <p>CaCO₃ tekrar CaO şöyle dönüşür</p> $CaCO_3 + 178.8 \text{ kJ} = CaO + CO_2 \quad (3.9)$ <p>EKA'dan hidrojen elde edilen tepkime,</p> $C_6H_{10}O_4 + 6CaO + 8H_2O = 6CaCO_3 + 13H_2 - 175 \text{ kJ/mol} \quad (3.10)$
Porteous (2005) [6]	<p>EKA'nın yakılmasıyla oluşan dioksin: 0,002 ng/Nm³ < 0,1 ng/Nm³</p> <p>EKA'nın Gazlaştırma sıcaklığına göre gaz-katı oranları;</p> <p>400–600°C =%60 gaz-%40 katı</p> <p>600–800°C =%80 gaz -%20 katı</p> <p>900–1600°C Coksijene veya hava miktarına bağlı</p> <p>EKA'nın elementel kütlesi;</p> <p>Karbon: %24</p> <p>Hidrojen: %3,2</p> <p>Oksijen: %15,9</p> <p>Azot: %0,7</p> <p>Kükürt: %0,1</p> <p>Su: %31,2</p> <p>Klor: %0,7</p> <p>Kül ve inorganik maddeler: %24,2</p> <p>Net ısı değeri: 10.600 MJ/Ton</p> <p>1 Ton EKA 500 kWh elektriğe eşdeğer</p> <p>1 Ton EKA 200 Kg petrole eşdeğer</p>

Çizelge 3.3 Katı atık enerjisi üzerine yapılan çalışmalar (Devam)

Kaynak	Eşitlik
Jung vd (2004) [49]	<p>EKA'ın plazma yakma oluşan uçan külün içindeki elementlerin kütleli oranları;</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (atmosfere açık) : % 53–59,5</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (oksijen yetersiz) : % 60,1–62,1</p> <p>EKA'ın plazma yakma oluşan alt külün içindeki elementlerin kütleli oranları;</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (atmosfere açık) : % 46,7</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (oksijen yetersiz) : % 42,1–42,5</p> <p>EKA'ın plazma gazlaştırma ve eritmede oluşan uçan külün içindeki elementlerin kütleli oranları;</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (atmosfere açık) : % 63,3–63,9</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (oksijen yetersiz) : % 48,4–68,8</p> <p>EKA'ın plazma gazlaştırma ve eritmede oluşan cürufun içindeki elementlerin kütleli oranları;</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (atmosfere açık) : % 41,6–47,1</p> <p>Ca, Si, Cl, Na ve K (oksijen yetersiz) : % 45,9–48,7</p> <p>Diğer elementler; Al, As, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Sb, Se, Sn ve Zn</p>

3.4 Katı atıkların Sabit Yatakta Gazlaştırılması üzerine yapılan çalışmalar

Katı atıklar önceleri kömür yakan termik santrallerde yakılmaya çalışıldı ancak yakma zorlukları ve aşırı kül nedeniyle ekonomik olmadı. Bu nedenle teknolojik gelişmelere paralel olarak sabit yatakta gazlaştırmak suretiyle yakılmaya başlandı. Çizelge 3.4'de sabit yatak gazlaştırıcılarda yapılan çalışmalar elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Yamamoto vd (2000), yaptıkları çalışmada 2 ton/gün kapasiteli sabit yatak bir gazlaştırıcı geliştirdiler. Kurutulmuş katı atıkları ve normal nemli katı atıkları gazlaştırdılar. Her iki atığın gazlaşma sonu ürünlerini ve baca gazı emisyonlarını karşılaştırdılar. Külден

kurtulmak için fırın sıcaklığını 1340K kadar çıkararak külün cüruf halinde erimesini sağladılar[19].

Choy vd (2004),yaptıkları çalışmada üniversite yerleşkesi (Hong Kong) içine 10 Ton/gün atık yakma kapasiteli bir termik santral kurdular. Yıllık 633 600 kWh (0,095 \$/kWh) elektrik ve 1900 M³ (0,92 \$/M³) sıcak su ürettirler. Sistemde; gazlaştırıcı, yanma odası, siklon, reaktör, buhar türbini, kimyasal baca gazı temizleme ünitesi, torba filtre ve baca bulunmaktadır[21].

Min vd (2005),yaptıkları çalışmada star-meet sistemi olarak adlandırdıkları sabit yatakta yüksek sıcaklıkta hava üfleyerek yaptıkları gazlaştırma sisteminde elde ettikleri ürün gazlara yüksek sıcaklıkta buhar vererek iyileştirdiler, gaz temizleme işlemlerine tabi tutuktan sonra temiz gazı dizel motorda yakarak enerjiye dönüştürdüler. 1200 kcal/Nm³ ısı değere ulaşan gazın yanması sonucu motoru %30 termal verimle çalıştırdılar[17].

Yamamoto vd (2000),yaptıkları çalışmada2 ton/gün kapasiteli sabit yatak bir gazlaştırıcı geliştirdiler. Kurutulmuş katı atıkları ve normal nemli katı atıkları gazlaştırdılar. Her iki atığın gazlaşma sonu ürünlerini ve baca gazı emisyonlarını karşılaştırdılar. Külden kurtulmak için fırın sıcaklığını 1340 K kadar çıkararak külün cüruf halinde erimesini sağladılar[19].

3.5 Katı atıkların Akışkan Yatakta Gazlaştırılması üzerine yapılan çalışmalar

Sabit yatak gazlaştırıcılar aşırı kül ve verimsizliği nedeniyle akışkan yatak teknolojisinin gelişmesiyle birlikte akışkan yatak gazlar geliştirildi. Bu tip gazlaştırıcılarda EKA'nın ön işlemlerden geçirilmesi sonra öğütülerek gazlaştırıcıya verilmesiyle daha verimli gazlaştırma sağlanmıştır. Özellikle Japonya gibi yüzölçümü küçük olan ülkelerde düzenli depolama alanı kısıtlılığı nedeniyle bu tip gazlaştırıcılar üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 3.5'de akışkan yatak gazlaştırıcılarla yapılan çalışmalar gösterilmiştir.

Moris vd (1998),yaptıkları çalışmada dönüşümlü akışkan yatak gazlaştırıcıda gazlaştırılan katı atıkların gazlaşma sonu ürünlerini ve diğer yakıcı sistemlerle yatırım maliyeti açısından kıyaslayarak değerlendirdiler. Dönüşümlü akışkan yataklı gazlaştırıcılı gaz ve buhar türbinli

kombine sistemin, 600 Ton/gün ve 26,5 MW nominal güç için %31 verimle çalıştığını tespit ettiler [26].

Kato ve Yoshikawa (2000),yaptıkları çalışmada kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcıda 200 Kg/gün kapasite ile atmosferik basınçta yatak ısı dağılımı ve verimini çıkardılar. Pülferize beslemede daha yüksek sıcaklığa ulaşıldığını tespit ettiler[29].

Cioni vd (2003),dönüşümlü akışkan yatak gazlaştırıcıda 200 ton/gün kapasitede pelet haline getirilmiş katı atığı yakarak enerjiye dönüştüren bir santralde çalışmalar yaptılar. Gazlaştırıcıya beslenen 10–15 mm boyutlarındaki atıkları oluşturan elementlerin miktarlarını tespit ettiler. Bu elementlerin gazlaştırma sonunda hangi moleküllere dönüştüklerini, oluşan gaz ile külün bileşiklerini, uçucu madde miktarını, ısı değerleri ve baca gazı emisyonlarını tespit ettiler.

Fujimura vd (2001), dönüşümlü akışkan yatak gazlaştırıcıların gelişimlerini incelediler. Normal akışkan yataktan basınçlı akışkan yatak gazlaştırıcılara kadar gelişimin evrelerini ile her bir gazlaştırıcıdan kaç adet ve hangi kapasitede imal edildiklerini araştırdılar. En son olarak çok farklı atık yakabilen, basınçlı ve iç dönüşümlü akışkan yatak geliştirme çalışmalarının devam ettiğini belirttiler[27].

Çizelge 3.4 Sabit yatakta gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar

Kaynak	Eşitlik										
Yamamoto vd (2000) [19]	<p>%44 C, %3,4 H₂, %32,2 O₂ ve %20 inorganik maddeden oluşan EKA'nın sabit yatakta gazlaştırılmasıyla aşağıdaki gaz emisyonunu elde ettiler;</p> <table data-bbox="548 520 1031 741"> <thead> <tr> <th>Gazlar</th> <th>Miktar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hidrojen (H₂)</td> <td>% 35</td> </tr> <tr> <td>Karbon monoksit (CO)</td> <td>% 27</td> </tr> <tr> <td>Karbondioksit (CO₂)</td> <td>% 30</td> </tr> </tbody> </table>	Gazlar	Miktar	Hidrojen (H ₂)	% 35	Karbon monoksit (CO)	% 27	Karbondioksit (CO ₂)	% 30		
Gazlar	Miktar										
Hidrojen (H ₂)	% 35										
Karbon monoksit (CO)	% 27										
Karbondioksit (CO ₂)	% 30										
Min vd (2005) [17]	<p>Sabit yatak gazlaştırıcıda yaptıkları çalışmalarda gaz zenginleştirme ünitesinde aşağıdaki denklemleri kullandılar;</p> $C + CO_2 = 2CO \quad (3.11)$ $C + H_2O = CO + H_2 \quad (3.12)$ $C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n + m/2)H_2 \quad (3.13)$ $C + O_2 = CO_2 \quad (3.14)$ $C + 1/2O_2 = CO \quad (3.15)$ $C_nH_m + (n + m/4)O_2 \rightarrow nCO_2 + m/2H_2O \quad (3.16)$ <p>%49,3 C, %6,3 H₂ ve %43,4 O₂ oluşan EKA'nın sabit yatakta gazlaştırılmasıyla aşağıdaki gaz emisyonunu elde ettiler;</p> <table data-bbox="548 1514 878 1766"> <thead> <tr> <th><u>Gazlar</u></th> <th><u>Miktar</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hidrojen</td> <td>%12,3</td> </tr> <tr> <td>Karbon monoksit</td> <td>%22,36</td> </tr> <tr> <td>Karbondioksit</td> <td>%16,6</td> </tr> <tr> <td>Metan</td> <td>%4,82</td> </tr> </tbody> </table>	<u>Gazlar</u>	<u>Miktar</u>	Hidrojen	%12,3	Karbon monoksit	%22,36	Karbondioksit	%16,6	Metan	%4,82
<u>Gazlar</u>	<u>Miktar</u>										
Hidrojen	%12,3										
Karbon monoksit	%22,36										
Karbondioksit	%16,6										
Metan	%4,82										

Çizelge 3.5 Akışkan yatakta gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar

Kaynak	Eşitlik														
Cioni vd (2003)	<p>%43,1 C, %7,7 H₂, %32,1 O₂ ve %12 inorganik maddeden oluşan EKA'nın dönüşümlü akışkan yatakta gazlaştırılmasıyla aşağıdaki gaz emisyonunu elde ettiler;</p> <table> <thead> <tr> <th>Gazlar</th> <th>Miktar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hidrojen (H₂)</td> <td>% 12,1</td> </tr> <tr> <td>Karbon monoksit (CO)</td> <td>% 6,5</td> </tr> <tr> <td>Karbondioksit (CO₂)</td> <td>% 11,4</td> </tr> <tr> <td>Su (H₂O)</td> <td>% 16,5</td> </tr> <tr> <td>Metan (CH₄)</td> <td>% 2,9</td> </tr> <tr> <td>Azot (N₂)</td> <td>% 46,4</td> </tr> </tbody> </table>	Gazlar	Miktar	Hidrojen (H ₂)	% 12,1	Karbon monoksit (CO)	% 6,5	Karbondioksit (CO ₂)	% 11,4	Su (H ₂ O)	% 16,5	Metan (CH ₄)	% 2,9	Azot (N ₂)	% 46,4
Gazlar	Miktar														
Hidrojen (H ₂)	% 12,1														
Karbon monoksit (CO)	% 6,5														
Karbondioksit (CO ₂)	% 11,4														
Su (H ₂ O)	% 16,5														
Metan (CH ₄)	% 2,9														
Azot (N ₂)	% 46,4														
Kato ve Yoshikawa (2000) [29]	<p>Kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcıda karbon (C) dönüşüm hızı denklemini aşağıdaki gibi vermiştir;</p> $CC = \frac{A_{gaz} \cdot (C_{CO_2} + C_{CO} + C_{CH_4})}{A_{ant} \cdot C_{c-ant} + A_{hava} \cdot C_{CO_2-hava}} \times 100 \quad (3.17)$ <p>A = Debi C = Karbon oranı Soğuk gaz verimi denklemi;</p> $CGE = \frac{A_{gaz} \cdot E_{gaz}}{A_{ant} \cdot E_{ant}} \times 100 \quad (3.18)$ <p>E = Üst ısı değeri</p>														

Selinger vd (2004), yaptıkları çalışmada ikiz dönüşümlü akışkan yatak gazlaştırıcıda gazlaştırma ve kül ergitme proseslerini incelediler. Bu tip gazlaştırıcıda gazlaştırma atmosfer basıncında ve daha düşük sıcaklıkta akışkan yatakta yapılıyor, ikinci yüksek

sıcaklıkta çalışan yatakta kül ergitiliyor. Bu tip gazlaştırıcılarda daha düşük furan oluştuğunu ve atıkların içindeki metallerin geri kazanılabildiğini tespit etmişlerdir[30].

3.6 Katı Atıkların Plazma Yöntemiyle Gazlaştırılması üzerine yapılan çalışmalar

Sabit ve akışkan yatak gazlaştırıcılarda EKA'nın ön işlemlere tabi tutulma zorunluluğu yeni teknikler arayışına yöneltmiştir. Yeni termal teknolojilerden plazma yöntemiyle çalışan gazlaştırıcılar geliştirildi. Bu tip gazlaştırıcılarda EKA doğrudan gazlaştırılabilmekte ve tamamen ergidiğinden kül problemi de bulunmamaktadır. Çizelge 3.6'da plazma gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar gösterilmiştir.

Beck (2003), katı atıkların plazma yöntemiyle gazlaştırılması üzerine çalışmalarda; plazma teknolojisini tanıttıktan sonra bu teknolojinin kullanılabileceği evsel katı atıklar, tehlikeli atıklar, tıbbi atıklar ve kül yakma gibi tasfiye proseslerinde kullanılabileceğini ortaya koydu. Plazma teknoloji ile çalışan katı atıktan enerji elde edilen santrallerden 14 Cent/Kwh maliyetle elektrik üretilebildiğini, hatta radyoaktif atıkların dahi tasfiye edilebileceğini ve diğer teknolojilere göre daha iyi baca gazı emisyonlarına ulaşılabildiğini tespit etti.

Leal-Quirós (2004), plazma tekniği ve torçları gelişiminden bahsettikten sonra bu teknoloji ile katı atıkların gazlaştırılarak 11 900 kcal/kg değerinde gaz üretilebildiğini bu da düşük değerlikli bir yakıtın oldukça zenginleştirilebildiğini ortaya koymuştur. Yine baca gazı emisyonlarının diğer teknolojilerden %5 daha iyi olduğunu belirtmektedir[50].

Moustakas vd (2005), 50 kg/saat kapasiteli katı atık plazma gazlaştırma reaktörü imal ettiler. Sistemi atık besleme ünitesi, plazma torçları ve kontrol sistemi, gazlaştırma fırını, yüksek sıcaklık siklonu, ikinci yanma odası ve gaz temizleme ünitesinden oluşturdular. Gaz ürünlerde yaptıkları ölçümlerde %24–43 hidrojen, %25–44 karbon mono oksit, % 10–26 karbon dioksit ve azot üretildiğini tespit ettiler. Eriyik cürufun soğuduktan sonra donarak taşlaştığını dolayısıyla içinde bulunan ağır metallerin suda çözünmediğinden çevre kirliliğine yol açmayacağını ve aynı kapasitede diğer yakıcılardan %30–50 daha düşük tesis yatırımı gerektirdiğini ve EKA gazlaştırma sonucunda miktarlarının 1/5 ile 1/50 arasındaki oranlarda azaltılabildiğini tespit ettiler. Ürün gazın zenginleştirilerek hidrokarbonlar,

hidrojen, amonyak (gübre), methanol ve elektrik üretiminin mümkün olacağına işaret ettiler[32].

Mountouris vd (2005), katı atık plazma gazlaştırma teknolojisinin enerji üretimi ve katı atıkların tasfiyesinde çevre dostu bir teknoloji olduğunu ortaya koyduktan sonra termodinamik analizler için ürün gaz, enerji ve egserji hesapları yaptılar. Gazlaştırma eşitlik modeli adı altında bir model geliştirdiler. İki elektrot arasında elektrik arkıyla çalışan bir plazma reaktörü geliştirdiler. Reaktöre giren elementlerle çıkan elementlerin eşitliği (kütle korunumu kanununa) dayalı bir gazlaştırma denklemi kurarak çıkan ürün miktarlarını belirlediler. Daha sonra giren enerji – çıkan enerji ve giren egserji- çıkan egserji miktarlarını hesaplayarak sistemin enerji ve egserji verimlerini hesapladılar. EKA içindeki nem oranına bağlı olarak enerji ve egserji değişimlerini incelediler[35].

Kim vd (2003), 100 kW'lık PCBs atığını buharla plazma gazlaştırma sistemi kurdular. PCB ve CCl_4 karışımı zehirli atıkları gazlaştırdıktan sonra enerjiye dönüştürdüler ve baca gazı emisyonunun normal değerlerde olduğunu tespit ettiler. Tehlikeli atıkların plazma yöntemiyle gazlaştırılarak enerjiye dönüştürülmesinin bilinen yöntemlerden daha verimli olduğunu ortaya koydular[53].

Tendler vd (2004), katı atıkların plazma yöntemiyle tasfiyesi ve enerjiye dönüştürülmesi üzerine çalışmalar yaptılar. Çeşitli katı atıkların plazma gazlaştırma sonuçlarına göre ürün gaz emisyonlarını ile gazlaştırma şartlarını ve verimlerini karşılaştırdılar. Atıkları döner fırınlarda gazlaştırdıktan sonra plazma ile gaz molekülleri parçaladılar. Metan hiç oluşmadı, yanıcı gaz sadece hidrojen ve karbon monoksit oldu. Modern plazma torçların AC veya DC akım yapılabildiğini ve 20 000°C sıcaklığa ulaşmanın mümkün olduğunu belirttiler. Atıkları diğer yöntemlere göre daha ucuza tasfiyelerinin mümkün olduğunu ortaya koydular[33].

Çizelge 3.6 Plazma gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar

Kaynak	Eşitlik
Mountouris vd (2005) [35]	<p>EKA'ın yaklaşık Kimyasal formülü; CH_xO_y belirleniler.</p> $CH_xO_y + wH_2O + mO_2 + 3,7mN_2 = n_1H_2 + n_2CO + n_3CO_2 + n_4H_2O + n_5CH_4 + n_6N_2 + n_7C \quad (3.19)$ <p>Gazlaştırma denge denklemini kurdular. Üç bağımsız tepkime eşitliğini aşağıdaki gibi oluşturdular;</p> $CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 \text{ (Metan çözünmesi-endotermik)} \quad (3.20)$ $CO + H_2O = CO_2 + H_2 \text{ (Su-gaz yer değiştirme-ekzotermik)} \quad (3.21)$ $C + H_2O = CO + H_2 \text{ (Ön su gaz değişimi-endotermik)} \quad (3.22)$ <p>Metan çözünmesi kimyasal denge sabiti</p> $K_1 = [CO] \cdot [H_2] / [CH_4] \cdot [H_2O] \quad (3.23)$ <p>Su gaz yer değiştirme tepkime kimyasal denge sabiti</p> $K_2 = [CO_2] \cdot [H_2] / [CO] \cdot [H_2O] \quad (3.24)$ <p>Ön su gaz yer değiştirme kimyasal denge sabiti</p> $K_3 = CO \cdot H_2 / H_2O \quad (3.25)$ <p>Kimyasal denge sabiti Sıcaklık T bir fonksiyonudur.</p> $\ln K = \ln K^0 + \frac{\Delta A}{R} \ln \frac{T}{T_0} + \frac{\Delta B}{2R} (T - T_0) + \frac{\Delta C}{6R} (T^2 - T_0^2) + \frac{\Delta D}{12R} (T^3 - T_0^3) \quad (3.26)$ <p>Kütle Dengesi;</p> <p>Karbon dengesi; $1 = n_2 + n_3 + n_5 + n_7 \quad (3.27)$</p> <p>Hidrojen dengesi; $2w + 1,44 = 2n_1 + 2n_4 + 4n_5 \quad (3.28)$</p> <p>Oksijen dengesi; $w + 0,66 + 2m = n_2 + 2n_3 + n_4 \quad (3.29)$</p>

Çizelge 3.6 Plazma gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar (Devam)

Kaynak	Eşitlik
Mountouris vd (2005)	Metan çözünme denge sabiti; $K_1 = \frac{x_1^3 \cdot x_2}{x_4 \cdot x_5}$ (3.30)
Devamı	Su gaz değiştirme tepkime sabiti; $K_2 = \frac{x_1 \cdot x_3}{x_2 \cdot x_4}$ (3.31)
	Kurum oluşum denge sabiti; $K_3 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_4}$ (3.32)
	Bileşiklerin molar oranı; $x_i = \frac{n_i}{\sum_1^6 n_i}$ (2.33)
	<p>Entalpi dengesi;</p> $H_{f,ant}^0 + wH_{f,H_2O(l)} + mH_{f,O_2}^0 + 3,76mH_{f,N_2}^0 + E_{elektrik} =$ $n_1H_{f,H_2}^0 + n_2H_{f,CO}^0 + n_3H_{f,CO_2}^0 + n_4H_{f,H_2O}^0 + n_5H_{f,CH_4}^0 + n_6H_{f,N_2}^0$ $+ n_7H_{f,C}^0 + \int_{T_1}^{T_2} (n_1c_{p,H_2} + n_2c_{p,CO} + n_3c_{p,CO_2} + n_4c_{p,H_2O} + n_5c_{p,CH_4}$ $+ n_6c_{p,N_2} + n_7c_{p,C})dT$ <p style="text-align: right;">(3.34)</p>
	<p>Burada c_p kat sayısı şöyle hesaplanır;</p> $C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 \quad (T=200- 1100 \text{ K})$
	Enerji ve egserji hesapları:
	Karışımın kimyasal egserjisi;
	$\varepsilon_{0,m} = \sum_i x_i \varepsilon_{0,i} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i$ <p style="text-align: right;">(3.35)</p>
	Fiziksel Egserji;
	$E = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \Rightarrow dE = dQ \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \Rightarrow dE = c_p \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT \Rightarrow E$ $= \int_T^{T_0} c_p dT - T_0 \cdot \int_T^{T_0} \frac{c_p}{T} dT \Rightarrow E = \int_T^{T_0} (\sum x_i c_{p,i}) dT - T_0 \cdot \int_T^{T_0} \frac{(\sum x_i c_{p,i})}{T} dT$ <p style="text-align: right;">(3.36)</p>

Çizelge 3.6 Plazma gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar (Devam)

Kaynak	Eşitlik
<p>Mountouris vd (2005) Devamı</p>	<p>Atığın kimyasal egserji denge denklemi;</p> $\varepsilon_{ant} = \left(\frac{W_c}{n_{ant}} \right) + v_{CO_2} \cdot \varepsilon_{CO_2} + v_{H_2O} \cdot \varepsilon_{H_2O(l)} - v_{O_2} \cdot \varepsilon_{O_2} \quad (3.37)$ <p>Atığın enerji denge denklemi;</p> $\frac{W_c}{n_{ant}} = \left(\frac{Q_{cv}}{n_{ant}} \right) + (h_{ant} + v_{O_2} \cdot h_{O_2} - v_{CO_2} \cdot h_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) \quad (3.38)$ <p>Atığın entropi dengesi denklemi;</p> $0 = \left(\frac{Q_{cv}/n_{ant}}{T_0} \right) + s_{ant} + v_{O_2} \cdot s_{O_2} - v_{CO_2} \cdot s_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot s_{H_2O} \quad (3.39)$ <p>20 ve 21 denklemleri toplanırsa;</p> $\frac{W_c}{n_{ant}} = (h_{ant} + v_{O_2} \cdot h_{O_2} - v_{CO_2} \cdot h_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) - T_0 \cdot (s_{ant} + v_{O_2} \cdot s_{O_2} - v_{CO_2} \cdot s_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot s_{H_2O}) \quad (3.40)$ <p>19 ve 22 denklemleri toplanırsa;</p> $\varepsilon_{ank} = UID - T_0 \cdot (s_{ank} + v_{O_2} \cdot s_{O_2} - v_{CO_2} \cdot s_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot s_{H_2O}) + v_{CO_2} \cdot \varepsilon_{CO_2} + v_{H_2O} \cdot \varepsilon_{H_2O(l)} - v_{O_2} \cdot \varepsilon_{O_2} \quad (3.41)$ <p>Kuru ve külsüz atığın entropisini Bejan ve arkadaşları şöyle hesapladı;</p> $\varepsilon_{ant} = c \cdot (37,1653 - 31,4767 \exp(-0,564682 \cdot \left(\frac{h}{c+n} \right)) + 20,1145 \left(\frac{o}{c+n} \right) + 54,3111 \left(\frac{n}{c+n} \right) + 44,6712 \left(\frac{s}{c+n} \right) \quad (3.42)$

Çizelge 3.6 Plazma gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar (Devam)

Kaynak	Eşitlik
<p>Mountouris vd (2005) Devamı</p>	<p>Kimyasal egserjii Kotas şöyle hesapladı; $\varepsilon^0 / [kJ / kg] = (AID + 2442.w). \varphi_{kuru},$ $\varphi_{kuru} = 1,0437 + 0,1882 \left(\frac{H}{C} \right) - 0,061 \left(\frac{O}{C} \right) \quad (3.43)$ $+ 0,0404 \left(\frac{N}{C} \right) \left(\frac{O}{C} < 0,667 \text{ geçerli} \right)$ <p>Atığın kimyasal ekserjisini Prins ve arkadaşları şöyle hesapladı; $\varepsilon^0 / [kJ / kg] = (AID + 2442.w). \beta,$ $\beta = \left(\frac{1,0412 + 0,216 \frac{H}{C} - 0,2499 \frac{O}{C} \left[1 + 0,7884 \frac{H}{C} \right] + 0,045 \frac{N}{C}}{1 - 0,3035 \frac{O}{C}} \right) \quad (3.44)$ $\left(\frac{O}{C} < 2,67 \text{ geçerli} \right)$ <p>Birinci kanuna göre verim; $e = \frac{UID_{sentezgazi}}{AID_{Atık} + Elektrik} \quad (3.45)$ <p>İkinci Kanuna göre verim; $\varepsilon = \frac{KimyasalEgzerji_{sentezgazi}}{AID_{Atık} + Elektrik} \quad (3.46)$ </p> </p></p></p>

Çizelge 3.6 Plazma gazlaştırma üzerine yapılan çalışmalar (Devam)

Kaynak	Eşitlik			
Tendler vd (2004) [33]	Plazma gazlaştırma sonucu tablodaki değerleri buldular;			
	PARAMETRELRLR	AHŞAP	ATIK	LASTİK
	Plazma sıcaklığı °C	1950	2000	1800
	Hidrojen (H ₂)	%24,5	%26,3	%30,6
	Karbon mono Oksit (CO)	%31,4	%27,5	%24
	Karbon dioksit (CO ₂)	%3,5	%3,2	%5,2
	Su (H ₂ O)	%4,9	%4,9	%4,9
	Metan yok. Tamamen hidrojene dönüşmektedir.			
	Yapılan çalışmalarda ahşap ve metan plazma yöntemiyle gazlaştırıldığında aşağıdaki tablo değerleri elde edildi.			
	PARAMETRELRLR	AHŞAP	METAN (CH ₄)	
	Plazma sıcaklığı °C	1200	1200	
	Hidrojen (H ₂)	%28,7–36,2	%41,75	
	Karbon monoksit (CO)	%42,2–44,5	%20,5–25	
	Karbondioksit (CO ₂)	-	-	
Su (H ₂ O)	-	-		
Metan (CH ₄)	-	-		

Murata vd (2005), karbon içeren bileşiklerin plazma yöntemiyle gazlaştırılması üzerine çalışmalar yaptılar. Bu tip bileşikler stabildir ve uzun süre doğada çürümezler. 1400°C üzerinde sıcaklıkta gazlaştırdılar[34].

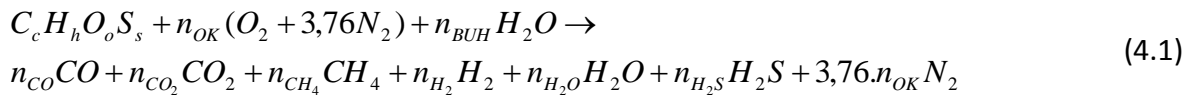
Nishikawa vd (2006), karbon içeren atıkları DC plazma ile gazlaştırılması esnasında buhar ve argon kullanılması halinde grafit elektrotun ağırlık kayıplarını incelediler. Argon plazmanın buhar plazmadan daha stabil olduğunu ve grafit elektrotta ağırlık kaybının daha az olduğunu tespit ettiler. Karbonlu atıkların gazlaştırılmasında buhar plazmasının daha fazla kütle kaybı sağladığını gösterdiler [51].

Nishikawa vd (2004), karbon içeren atıkların buharla gazlaştırılmasını DC plazma ve RF (Radyo Frekansı) plazma sistemleriyle incelediler. Hidrojen üretimi diğer termal teknolojilerden oldukça yüksek olduğundan karbonlu atıkların gazlaştırılmasında daha elverişli olduğunu ortaya koydular[52].

TERMODİNAMİK İNCELEME

4.1 Temel Gazlaşma denklemi

Evsel katı atıkların karbon, hidrojen, oksijen ve kükürt'ten oluştuğu kabul edilerek temel gazlaşma denklemi kurulmuştur. Buradan kütle denkliği denklemleri kurulmuştur. Varsayım olarak; azot bulunmadığı, tepkimelerde kullanıldığı için ürünlerde oksijen çıkmadığı ve EKA'daki yanıcı maddelerin tamamının tepkimeye girdiği kabul edilmiştir. Ayrıca gazlaşma sıcaklığının sabit ve tepkimelerin tersinmez olduğu öngörülmüştür. Kimyasal bileşimi bilinen EKA için gazlaşma denklemi aşağıdaki gibi yazılmıştır;[37]



Denklemden de görüldüğü gibi oksijenin tamamı tepkimeye girmiştir. Azot sadece havadan gelmektedir ve hiç tepkimeye girmemektedir. Buradan kütle dengesini yazarsak;

$$N_C = n_{CO} + n_{CO_2} + n_{CH_4} \quad (4.2)$$

$$N_H + n_{BUH} = 2n_{CH_4} + n_{H_2} + n_{H_2O} + n_{H_2S} \quad (4.3)$$

$$N_O + n_{BUH} / 2 + n_{OK} = n_{CO} / 2 + n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{H_2O} / 2 \quad (4.4)$$

$$N_S = n_{H_4S} \quad (4.5)$$

Burada dört denge denklemi elde edilmiştir. Bilinmeyen sayısı ise altıdır. n_{BUH} ve n_{OK} sırasıyla tepken buhar ve oksijen mol akımlarıdır. Buhar/EKA ve Oksijen/EKA oranlarının girilmesiyle bulunur. Hesapları kolaylaştırmak için bu denklemlerin kısmi kesirleri alınırsa yedinci bilinmeyen N_T ortaya çıkmıştır.

$$N_C = N_T(y_{CO} + y_{CO_2} + y_{CH_4}) \quad (4.6)$$

$$N_H + n_{BUH} = N_T(2y_{CH_4} + y_{H_2} + y_{H_2O} + y_{H_2S}) \quad (4.7)$$

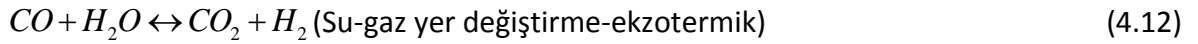
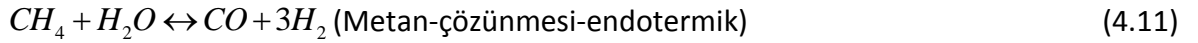
$$N_O + n_{BUH} / 2 + n_{OK} = N_T(0,5y_{CO} + y_{CO_2} + 0,5y_{H_2O}) \quad (4.8)$$

$$N_S = N_T y_{H_2S} \quad (4.9)$$

Denklemleri çözmek için üç ilave denkleme daha ihtiyaç vardır. Dalton kanununa göre gaz ürünlerin yüzdeleri toplamı 1 olacağından eşitlik şöyle yazılabilir;

$$\frac{1}{N_T}(y_{CO} + y_{CO_2} + y_{CH_4} + y_{H_2} + y_{H_2O} + y_{H_2S}) = 1 \quad (4.10)$$

Montouris A. vd (2005)[35] yaptıkları çalışmada gazlaştırma tepkimelerinden;



Tepkimelerini gaz ürünleri dengeleyen tepkimeler olarak almıştır. Biz burada ihtiyacımız olan iki denklem için ilk iki denklemi kullanacağız. Kimyasal denge denklemini kısmi kesirli olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz;[37]

$$\frac{y_{H_2} y_{CO_2}}{y_{CO} y_{H_2O}} = 0,0265 \exp(3956 / T_R) \quad (4.14)$$

$$\frac{y_{CH_4} y_{H_2O}}{y_{CO} (y_{H_2})^3} = 4,3554 \cdot 10^{-14} \exp(27020 / T_R) \quad (4.15)$$

4.2 Gazlaştırma Matrisinin oluşturulması

Denklemlerde reaktör sıcaklığına bağlı ve sayısal olarak verilen Kp kimyasal denge sabitleri Janaf tablolarından alınmıştır. Böylece oluşturulan denklemlerle birlikte 7x7'lik bilinmeyenler matrisi kurulabilir. Bu matris Newton-Rabhsen yöntemiyle çözülebilir. Denklemlerdeki terimler bir tarafa toplanıp sıfıra eşitlenerek matris denklemleri oluşturulur[46].

$$J(y_i) \cdot \Delta y_i = -F(y_i) \quad (4.16)$$

Burada sırasıyla; y_{CO} , y_{CO_2} , y_{CH_4} , y_{H_2} , y_{H_2O} , y_{H_2S} ve N_T yerine; Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 , Y_6 ve Y_7 yazarsak denklemler şu şekilde oluşur;

$$F_1 = y_1 + y_2 + y_3 - (N_C / y_7) \quad (4.17)$$

$$F_2 = 2y_3 + y_4 + y_5 + y_6 - (N_H + n_{BUH}) / y_7 \quad (4.18)$$

$$F_3 = 0,5y_1 + y_2 + 0,5y_5 - (N_O + 0,5n_{BUH} + n_{OK}) / y_7 \quad (4.19)$$

$$F_4 = y_6 - (N_S / y_7) \quad (4.20)$$

$$F_5 = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 - 1 \quad (4.21)$$

$$F_6 = y_4 \cdot y_2 - y_1 \cdot y_5 \cdot 0,0265 \exp(3956 / T_R) \quad (4.22)$$

$$F_7 = y_3 \cdot y_5 - y_1 \cdot y_4^3 \cdot 4,3554 \cdot 10^{-4} \exp(27020 / T_R) \quad (4.23)$$

$$\begin{bmatrix} -(y_1 + y_2 + y_3 - (N_C / y_7)) \\ -(2y_3 + y_4 + y_5 + y_6 - (N_H + n_{BUH}) / y_7) \\ -(0,5y_1 + y_2 + 0,5y_5 - (N_O + 0,5n_{BUH} + n_{OK}) / y_7) \\ -(y_4 \cdot y_2 - y_1 \cdot y_5 \cdot 0,0265 \exp(3956 / T_R)) \\ -(y_3 \cdot y_5 - y_1 \cdot y_4^3 \cdot 4,3554 \cdot 10^{-4} \exp(27020 / T_R)) \\ -(y_6 - (N_S / y_7)) \\ -(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 - 1) \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Burada y_{1-6} ; ürün gaz mol sayılarını, y_7 ; ürün gazların toplam molar oranını, N_C ;EKA'daki karbon miktarı, N_{O_2} ;EKA'daki oksijen miktarı, N_{H_2} ; EKA'daki hidrojen miktarı, N_S ; EKA'daki kükürt miktarı, N_{BUH} ; EKA ile tepkimeye giren buharın mol sayısı, N_{OK} ; EKA ile tepkimeye giren oksijenin mol sayısı ve T_R ; gazlaştırma sıcaklığıdır.

Çizelge 4.1 Türevler matrisi

1	1	1	0	0	0	0	N_C/y_{27}
0	0	2	1	1	1	1	$(N_H + N_{BUH})/y_7^2$
0.5	1	0	0	0.5	0	0	$-(N_O + 0.5N_{SUF} + N_{OK})/y_7$
$-0.0265 \exp(3956/T_R)y_3$	Y4	0	Y2	$-0.0265 \exp(3956/T_R)y_1$	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	0
$-y_4^6 \cdot 6.7125 \cdot 10^{-14} \exp(27020/T_R)$	0	Y5	$-3y_4^3 \cdot 6.7125 \cdot 10^{-14} \exp(27020/T_R)$	Y3	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	N_S/y_{27}

Denklemlerin (4.17-23) hepsinin sırasıyla her değişkene göre türevi alınır ve bir J(y) türevler matrisi (Çizelge 4.1) oluşturulur. F(y) (4.24) denklemlerin matrisidir. Δy_i (kat sayılar matrisi) aranan çözüm kümesidir ve ürünler; CO, CO₂, CH₄, H₂, H₂O ile H₂S miktarlarını vermektedir.

4.3 Reaktöre verilmesi gereken ısı enerjisi hesabı

Gazlaştırma matrisinin çözülmesiyle kuru külsüz EKA'nın gazlaştırma giriş ve çıkış madde miktarları tespit edilmiştir. Reaktördeki ısı kaybını da yok sayarak yani verilen enerjinin tamamen gazlaştırmaya gittiğini kabul ederek reaktöre verilen ısıyı hesaplayabilir;

Girentalpi (EKA, buhar; hava ve verilen ısı)=çıkanentalpi (ürünler ve ısı kayıpları)

$$H_{GIREN} = H_{f,atık}^0 + N_{BUH}H_{f,H_2O(l)}^0 + N_{OK}H_{f,O_2}^0 + 3,76N_{OK}H_{f,N_2}^0 + P_{elektrik} \quad (4.25)$$

$$H_{ÇIKAN} = y_1H_{f,H_2}^0 + y_2H_{f,CO}^0 + y_3H_{f,CO_2}^0 + y_4H_{f,H_2O}^0 + y_5H_{f,CH_4}^0 + y_6H_{f,H_2S}^0 + 3,76N_{OK}H_{f,N_2}^0 + \int_{T_1}^{T_2} (y_1c_{p,H_2} + y_2c_{p,CO} + y_3c_{p,CO_2} + y_4c_{p,H_2O} + y_5c_{p,CH_4} + y_6c_{p,H_2S} + 3,76.N_{OK}c_{p,N_2})dT \quad (4.26)$$

Çizelge 4.2 Bazı maddelerin standart molar oluşum entalpisi(298,17 K, 1 atm.)

MADELER	H ^o _f Kj/Kmol
CO	-110530
CO ₂	-393520
CH ₄	-74850
H ₂	0
H ₂ O	-285830
H ₂ S	-20630
EKA (kuru-Külsüz)	-3092000

$$Cp_{co} = 28,16 + 1,6751.10^{-3}T_R + 5,3717.10^{-6}T_R^2 - 2,2219.10^{-9}T_R^3 \quad (4.27)$$

$$Cp_{co2} = 22,257 + 59,808.10^{-3}T_R + 35,01.10^{-6}T_R^2 + 7,4693.10^{-9}T_R^3 \quad (4.28)$$

$$Cp_{CH4} = 19,887 + 50,242.10^{-3}T_R + 12,686.10^{-6}T_R^2 - 11,011.10^{-9}T_R^3 \quad (4.29)$$

$$Cp_{H2} = 29,107 + 1,9159.10^{-3}T_R + 4,008.10^{-6}T_R^2 - 0,87044.10^{-9}T_R^3 \quad (4.30)$$

$$Cp_{H2O} = 32,238 + 1,9234.10^{-3}T_R + 10,555.10^{-6}T_R^2 - 3,5952.10^{-9}T_R^3 \quad (4.31)$$

$$Cp_{H2S} = 4,186(7,07 + 0,3133.10^{-2}T_R + 0,1364.10^{-5}T_R^2 - 0,7867.10^{-9}T_R^3) \quad (4.32)$$

$$Cp_{N2} = 28,9 - 1,571.10^{-3}T_R + 8,081.10^{-6}T_R^2 - 2,873.10^{-9}T_R^3 \quad (4.33)$$

Burada ürün gazların gazlaştırma sıcaklığındaki entalpileri kaynaklardan[37] alınan Cp değerleriyle bulunur. H°_f oluşum entalpileri (Çizelge 4.2) tablodan alınmıştır. Aynı tür atomlardan oluşan moleküllerin oluşum entalpileri sıfırdır. Burada bilinmeyen tek EKA'nın oluşum entalpisi kalmaktadır. Bu da yine tablolardan[35] eşdeğer moleküllerin oluşum entalpisinden alınmıştır. Giren ve çıkan entalpi eşitliğini sağlayan $P_{elektrik}$ entalpi değeri dışarıdan verilecek elektrik enerjisi miktarını belirler.

Gazlaştırma verimi; ürünlerin enerji değerinin girdilerin (EKA ve elektrik) enerji değerine oranıdır. Verimi hesaplayabilmek için EKA ile giren enerjiyi ve ürünlerin enerjisini de hesaplamamız gerekmektedir.

EKA'nın enerjisini hesaplayabilmek için öncelikle homojen bir bileşiminin tespit edilerek komponentlerinin belirlenmesi gerekmektedir. İçindeki kâğıt, tekstil, cam, metal, organik atıklar, nem, plastikler vs. ortalama miktarları tespit edilerek, bunların verebileceği enerji değerleri tablolardan bulunarak EKA'nın enerji değerinin tespiti mümkündür. Birçok farklı yöntemler kullanılmıştır. Biz burada EKA'nın içindeki ortalama yanıcı (enerji veren) elementlerin kimyasal analizle miktarlarını tespit ederek ampirik formüllerle enerji değerini hesaplayacağız;[37]

$$UID_{EKA} = (370,8N_C + 1112,4N_{H_2} + 139N_S - 139,1N_{O_2})M_{EKA} \quad (4.34)$$

Bu formülde EKA deki hidrojen, kükürt, karbon ve oksijen miktarları bilindiğinde (kuru-külsüz) kJ/kg cinsinden enerji değerini vermektedir. Yine bu formülle çok farklı kompozisyondaki EKA'nın enerji değerini kolaylıkla hesaplamak mümkündür.

Çizelge 4.3 Gaz bileşen alt ısıl değerleri ve molekül ağırlıkları[37]

Gazlar	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	H ₂ O	H ₂ S
Alt Isı Değeri kJ/kg	12640	0	35850	119970	0	15250
Mol Ağırlığı kg/mol	28.01	44	16.04	2.016	18	34.08

Gaz ürünlerin enerji değeri Çizelge 4.3 kullanılarak şöyle hesaplanır;

$$UID_{Gaz} = (28,04Y_1 / M_{GAZ})12640 + (16,04Y_3 / M_{GAZ})35850 + (2,016Y_4 / M_{GAZ})119970 + (34,08Y_6 / M_{GAZ})15250 \quad (4.35)$$

Gaz karışımı ısıl değeri olarak bulunur. Ürün gazlar içindeki CO, CH₄, H₂ ve H₂ S yanması halinde enerji verecektir. Yazılımdan tespit edilen miktarları ve tablolardan alınan enerji değerleri yardımıyla bulunur.

$$N_{ENERJİ} = (UID_{Gaz} / (UID_{EKA} + P_{ELEKTRİK}))100 \quad (4.36)$$

Formülüyle enerji verimi bulunur.

4.4 Ekserji

Mevcut bir çevrede, belirli bir başlangıç durumu ile bir sistemden alınabilecek maksimum iş, "ekserji" olarak tanımlanır. Q gibi bir ısı akımından, süreçte kullanılan akışkanın ve çevrenin durumuna göre, tam tersinir durum değişimleri ile sadece belirli değerde, pozitif veya negatif iş, yani ekserjisi elde edilir. "ekserji yıkımı" olarak adlandırılan, geri kalan bir

enerji bölümü hiçbir şekilde değerlendirilemez. Ekserji, çevre şartlarına bağlıdır. Ekserjinin çevre şartlarına ve sıcaklığına olan bu bağımlılığı bir dezavantajdır. Burada ayrıca, işin, sadece çevre ile sıcaklık dengelenmesi sayesinde değil, basınç, kimyasal potansiyel gibi büyüklüklerin dengelenmesinden de kazanılabileceği belirtilmelidir.

Ekserji; kimyasal ekserji ve fiziksel ekserji olarak iki bölümden oluşur. Fiziksel ekserji sistemin Sıcaklığı ve basıncına bağlıdır. Yani ekserji sistemin giriş ve çıkışındaki basınç ve sıcaklık gibi fiziksel değişimlere bağlıdır.

Kimyasal ekserji, bu maddeleri çevrenin kimyasal kompozisyonunda yer alan maddelere dönüştüren kimyasal tepkimelerden elde edilebilecek maksimum iş şeklinde tanımlanır. Biz gazlaştırma öncesi ve sonrası normal şartlardaki giren EKA ve çıkan gaz ürünlerin tepkimelerinden elde edilebilecek maksimum işi hesaplayacağımızdan sadece kimyasal ekserji ile ilgileneceğiz.

Kimyasal ekserjinin hesaplanabilmesi için öncelikle çevrenin tam olarak tanımlanması gerekir. Çizelge 4.4'de 1 atm basınç ve 298,15K sıcaklık için standart atmosferik şartlar tanımlanmıştır.

Kimyasal ekserjiyi hesaplamak oldukça karmaşıktır. Bu karmaşıklığa çözümünü kolaylaştırmak için tüm maddelerin normal şartlardaki standart kimyasal ekserjileri hesaplanarak Çizelge 4.5'de verilmiştir. Böylece kimyasal ekserji hesaplamaları kolaylıkla yapılabilmektedir.

EKA'nın kimyasal ekserjisini hesaplamak için onun kuru ve külsüz olarak oksijenle tam yanma tepkimeye girdiği varsayılır. Bu tam yanma tepkimesi sonucu ortaya çıkan kullanılabilir enerji bu EKA'nın ekserjisini verecektir.[35]



Bu tepkimenin ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\mathcal{E}_{ant} = \left(\frac{W_c}{n_{ant}} \right) + v_{CO_2} \cdot \mathcal{E}_{CO_2} + v_{H_2O} \cdot \mathcal{E}_{H_2O(l)} - v_{O_2} \cdot \mathcal{E}_{O_2} \quad (4.38)$$

$(W_c/n_{atık})$ ifadesini belirleyebilmek için entropi ve enerji dengesini yazarsak;

Atığın enerji denge denklemi;

$$\frac{W_c}{n_{ant}} = \left(\frac{Q_{cv}}{n_{ant}} \right) + (h_{ant} + v_{O_2} \cdot h_{O_2} - v_{CO_2} \cdot h_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) \quad (4.39)$$

Atığın entropi dengesi denklemi;

$$0 = \left(\frac{Q_{cv} / n_{ant}}{T_0} \right) + s_{ant} + v_{O_2} \cdot s_{O_2} - v_{CO_2} \cdot s_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot s_{H_2O} \quad (4.40)$$

Atığın kimyasal egserji denge denklemi;

$$\frac{W_c}{n_{ant}} = (h_{ant} + v_{O_2} \cdot h_{O_2} - v_{CO_2} \cdot h_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot h_{H_2O}) - T_0 \cdot (s_{ant} + v_{O_2} \cdot s_{O_2} - v_{CO_2} \cdot s_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot s_{H_2O}) \quad (4.41)$$

(Wc/n_{atık}) değeri yerine konulursa;

$$\varepsilon_{atık} = UID - T_0 \cdot (s_{atık} + v_{O_2} \cdot s_{O_2} - v_{CO_2} \cdot s_{CO_2} - v_{H_2O} \cdot s_{H_2O}) + v_{CO_2} \cdot \varepsilon_{CO_2} + v_{H_2O} \cdot \varepsilon_{H_2O(l)} - v_{O_2} \cdot \varepsilon_{O_2} \quad (4.42)$$

bulunur. Çizelge 4.5'de bazı bileşiklerin molar ekserjileri tablolarda verilmiştir. Atığın entropisini Montarious vd [35] şöyle hesaplamıştır;

$$s_{atık} = c \cdot \left(\begin{array}{l} 37,1653 - 31,4767 \exp\left(-0,564682 \cdot \frac{h}{c+n}\right) + 20,1145 \frac{O}{c+n} + \\ 54,3111 \frac{n}{c+n} + 44,6712 \frac{s}{c+n} \end{array} \right) \quad (4.43)$$

Burada c,h,o.s ve n kuru külsüz atıktaki karbon, hidrojen, oksijen, kükürt ve azotun kütlelesel miktarlarıdır.

Kimyasal egserji şöyle hesaplanır;

$$\varepsilon^0 / [kJ / kg] = (AID + 2442 \cdot w) \cdot \varphi_{kuru}, \quad (4.44)$$

$$\varphi_{kuru} = 1,0437 + 0,1882 \left(\frac{H}{C} \right) - 0,061 \left(\frac{O}{C} \right) + 0,0404 \left(\frac{N}{C} \right) \left(\frac{O}{C} < 0,667 \text{ geçerli} \right)$$

Çizelge 4.4 Gaz halde referans türlerin ortalama basınçları ve standart kimyasal ekserjileri
($T_n=298,15$ K, $P_n=101,325$ kPa)

Element	Kimyasal Formül	Kuru Havadaki Mol Kesri	Çevrede Ortalama Kısmi Basınç* kPa	Standart Kimyasal Ekserji
				kJ/mol
Ar	Ar	0,00933	0,906	11,69
C (grafit)	CO ₂	0,000345	0,0335	19,87
H ₂	H ₂ O		2,2	9,49
He	He	0,000005	0,000485	30,37
Kr	Kr	0,000001	0,000097	34,36
N ₂	N ₂	0,7803	78,75	0,72
Ne	Ne	0,000018	0,00177	27,19
O ₂	O ₂	0,2099	20,39	3,97
Xe	Xe	0,00000009	0,0000087	40,33
Atmosferik Azot**		0,7898	76,705	0,72

Atığın Kimyasal ekserjisini Prins ve arkadaşları şöyle hesapladı;[35]

$$\varepsilon^0 / [kJ / kg] = (UID + 2442.w).\beta,$$

$$\beta = \left(\frac{1,0412 + 0,216 \frac{H}{C} - 0,2499 \frac{O}{C} \left[1 + 0,7884 \frac{H}{C} \right] + 0,045 \frac{N}{C}}{1 - 0,3035 \frac{O}{C}} \right) \left(\frac{O}{C} < 2,67 \text{ geçerli} \right) \quad (4.45)$$

Burada w EKA da bulunan nem miktarıdır. Sıvı ve gaz suyun ekserjileri farkı ilave edilmiş olmaktadır.

$$\varepsilon_{EKA} = UID_{EKA} (1,0437 + (0,1882N_{H_2} / N_C) - (0,0610N_{O_2} / N_C)) \quad (4.46)$$

Çizelge 4.5 Bazı maddelerin Standart molar kimyasal ekserji (298.17 K, 1 atm.)

MADELER	Standart kimyasal ekserji ϵ_0 Kj/Kmol
CO	275364
CO ₂	20108
CH ₄	830174
H ₂	235212
H ₂ O	4.9
H ₂ S	812000
N ₂	691.1

Karışımın Kimyasal egserjisi;

$$\epsilon_{0,m} = \sum_i x_i \epsilon_{0,i} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (4.47)$$

$$\bar{e}^{ch} = \sum_i y_i \bar{e}_i^{ch} + \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln y_i$$

$$\bar{e}^{ch} = \bar{R} T_0 \sum_i y_i \ln \left(\frac{y_i}{y_i^e} \right)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{GAZ} = & (275364 + (RT_G \ln y_1) y_1) / M_{GAZ} + (RT_G (\ln y_2 / 0,03) y_2) / M_{GAZ} + \\ & (830174 + (RT_G \ln y_3) y_3) / M_{GAZ} + (235212 + (RT_G \ln y_4) y_4) / M_{GAZ} + \\ & (RT_G \ln(y_5 / 3,12) y_5) / M_{GAZ} + (812000 + (RT_G \ln y_6) y_6) / M_{GAZ} \end{aligned} \quad (4.48)$$

İkinci Kanuna göre verim;

$$\epsilon = \frac{\text{Kimyasal Egzerji}_{gaz}}{AID_{Ank} + P_{Elektrik}} \quad (4.49)$$

$$N_{EGSERJI} = (\epsilon_{GAZ} / (\epsilon_{EKA} + P_{ELEKTRIK})) 100 \quad (4.50)$$

Ekserji verimi bulunur.

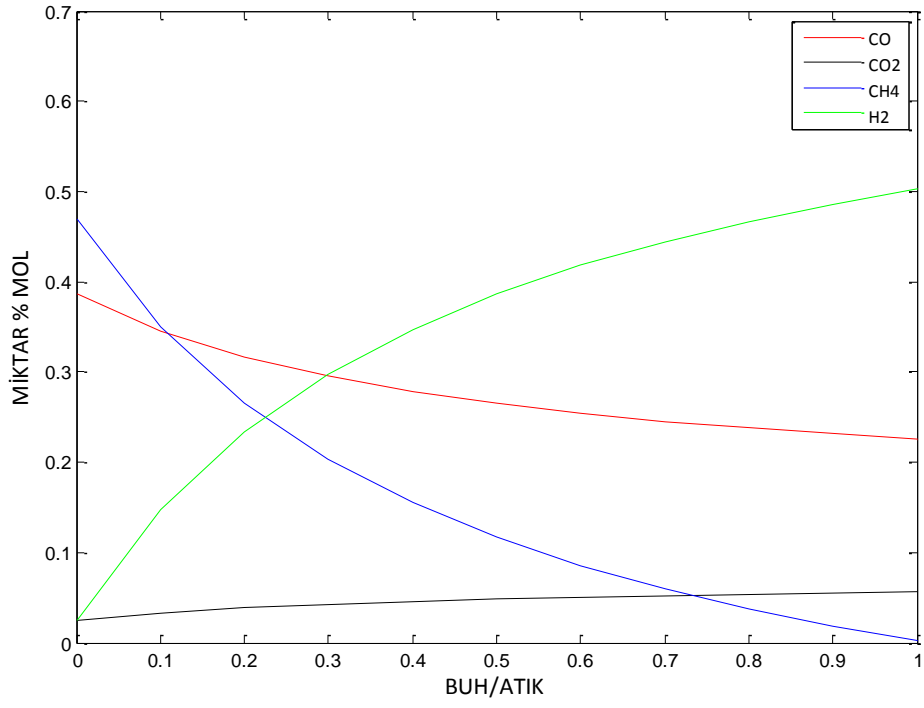
4.5 Yazılım sonuçlarının irdelenmesi

4.5.1 Sadece buharla yapılan gazlaştırma

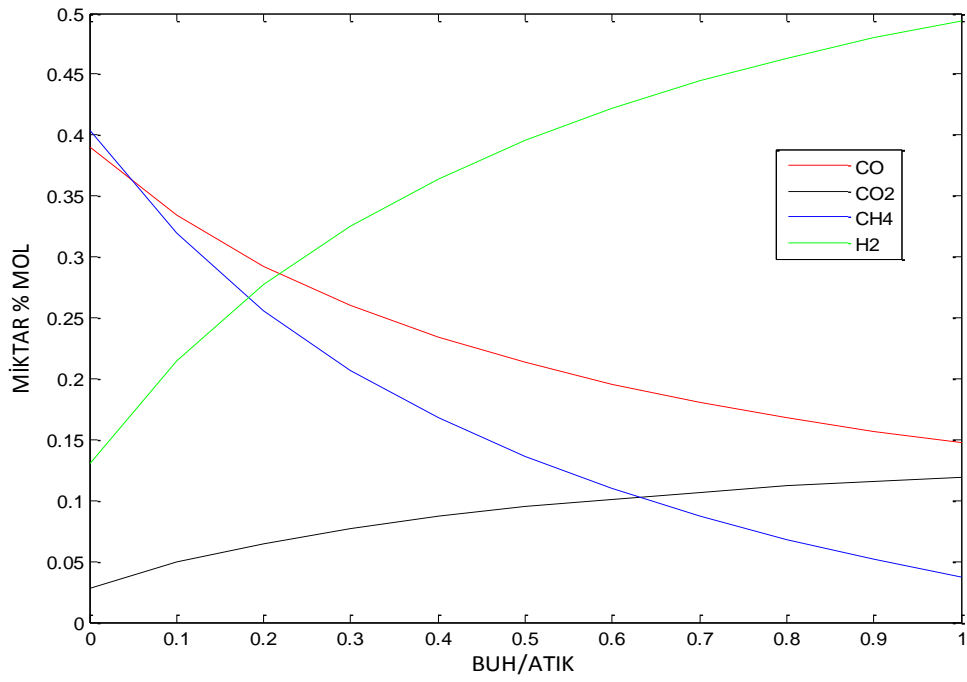
Yazılımı 800°C, 1000°C ve 1227°C'de 0,5 karbon, 0,002 kükürt, 0,1 hidrojen ve 0,4 oksijen içeren EKA için % 100'e kadar buharla gazlaştırıldığı varsayımıyla çalıştırıldı. Şekil 4. 1, 2 ve 3'de sırasıyla oluşan gazlaştırma ürünlerinin miktarlarındaki değişim görülmektedir. Çıkan H₂ konsantrasyonunun sürekli arttığı ancak 0,4 oranından sonra artış hızının düştüğü görülmektedir. Buna karşılık olarak metan tam ters etki gösterdi. 0,4 buhar oranından sonra metan azalma hızı (%15) düşmüştür. CO₂ miktarı 0,3 oranına kadar hızlı artmış ancak ondan sonra artış hızı azalmaktadır. Buna karşılık CO miktarı tam tersi etki göstermektedir. 0,9 Buhar oranından sonra EKA daki H₂ miktarı yetersiz kalmaktadır.

Gaz ısı değeri 20100 kJ/kmol değerinden başlamakta 0,3 buhar oranından sonra azalma hızı düşmektedir. CO ve CH₄ azalması hızının düşmesi nedeniyle gaz ısı değeri de yavaş düşmektedir. Şekil 4.4'de görüldüğü gibi verilen enerji alınan enerjiden az olmaktadır ve buhar miktarı arttıkça harcanan enerjide artmaktadır. Ancak verilen enerjinin büyük bölümü geri kazanılabilmektedir.

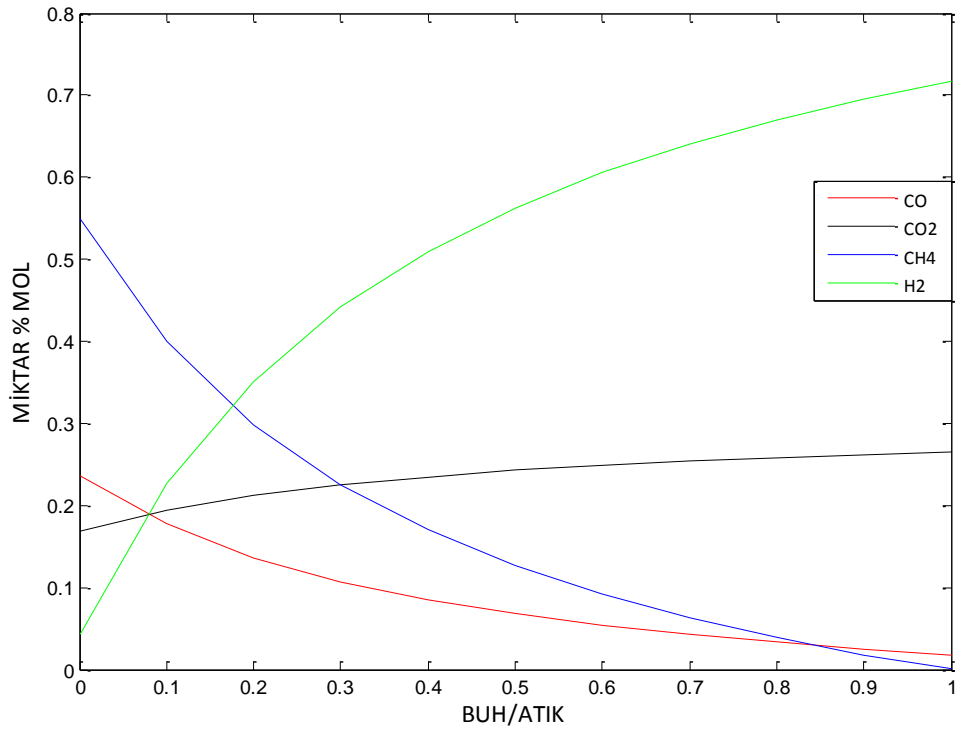
Ekserji ve enerji verimi buhar oranı arttıkça düşmekte ve 0,7 oranından sonra eşitlenmektedir. Ekserji verimi enerji verimine göre üretilen gazın ekserji değerinin çok daha hızlı düşmesi nedeniyle azalmaktadır. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi ekserji verimi enerji veriminden daha yüksektir. Ancak buhar oranı arttıkça daha hızlı düşmektedir. Mümkün oldukça düşük buhar oranında gazlaşmanın gerçekleşmesiyle verimsiz alandan uzaklaşılacağı açıkça görülmektedir. En yüksek enerji verimi %38 ve en yüksek ekserji verimi % 44'le buhar verilmeden elde dilmektedir.



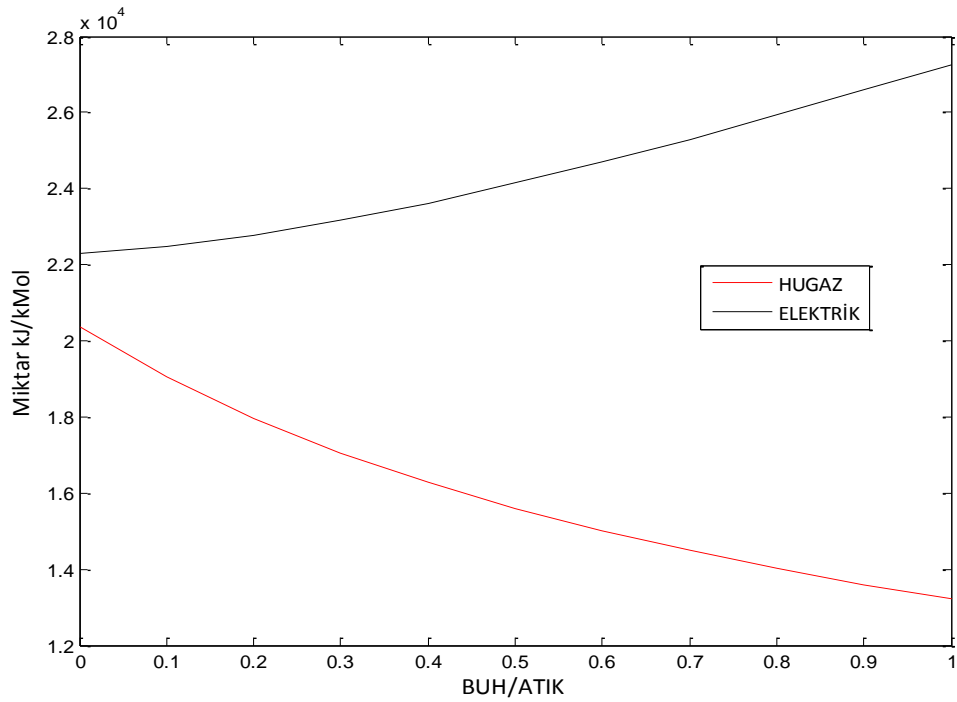
Şekil 4.1 800°C'de buharla gazlaştırmada oluşan ürünlerin değişimi



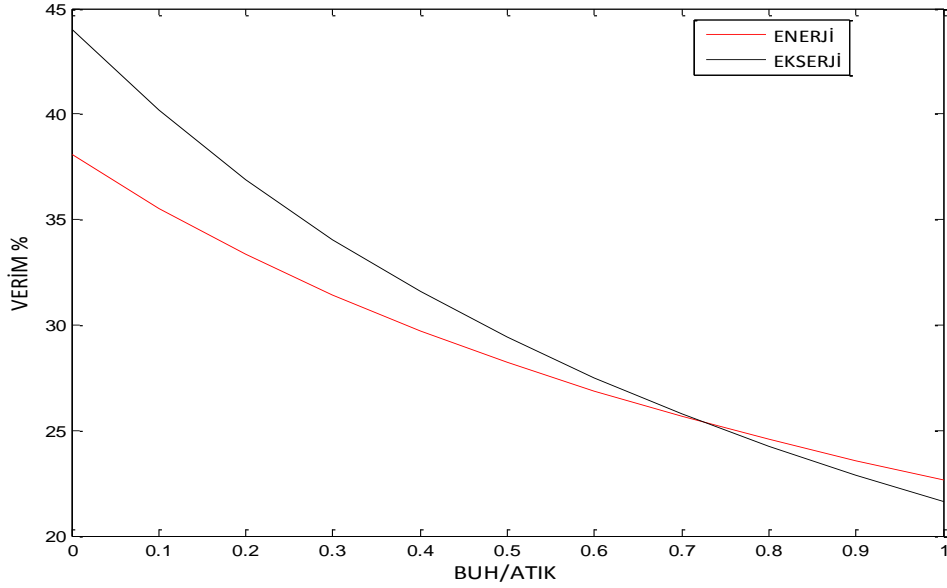
Şekil 4.2 1000°C'de buharla gazlaştırmada oluşan ürünlerin değişimi



Şekil 4.3 1227°C'de buharla gazlaştırmada oluşan ürünlerin değişimi



Şekil 4.4 1000°C'de buharla gazlaştırma harcanan enerji (Elektrik) ve üretilen enerji (Hugaz) değişimi

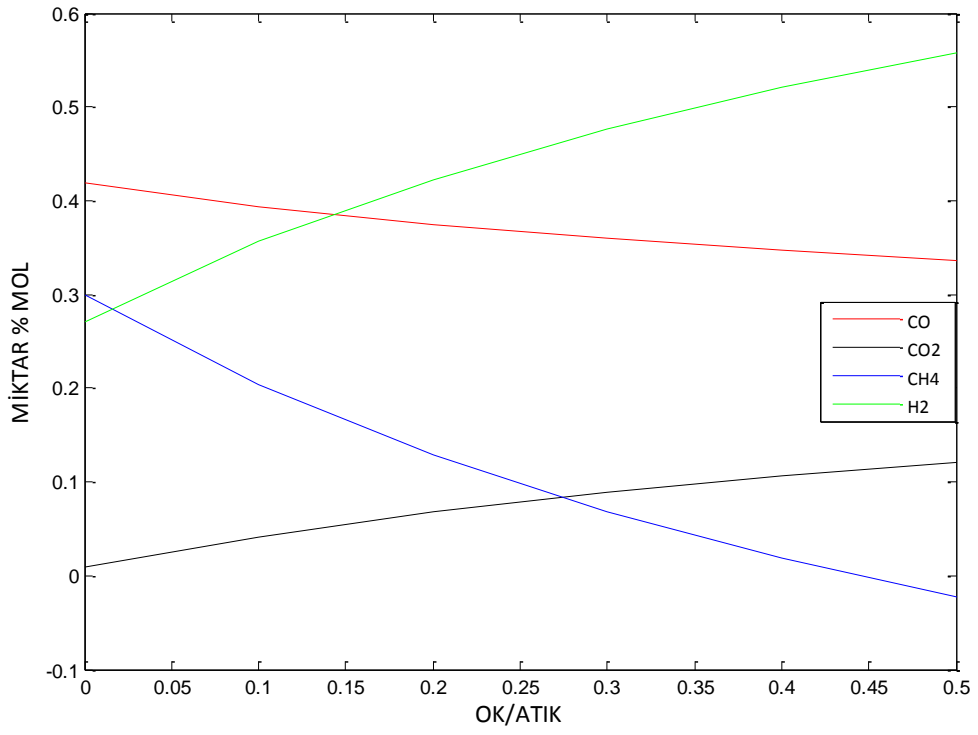


Şekil 4.5 1000°C'de buharla gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri

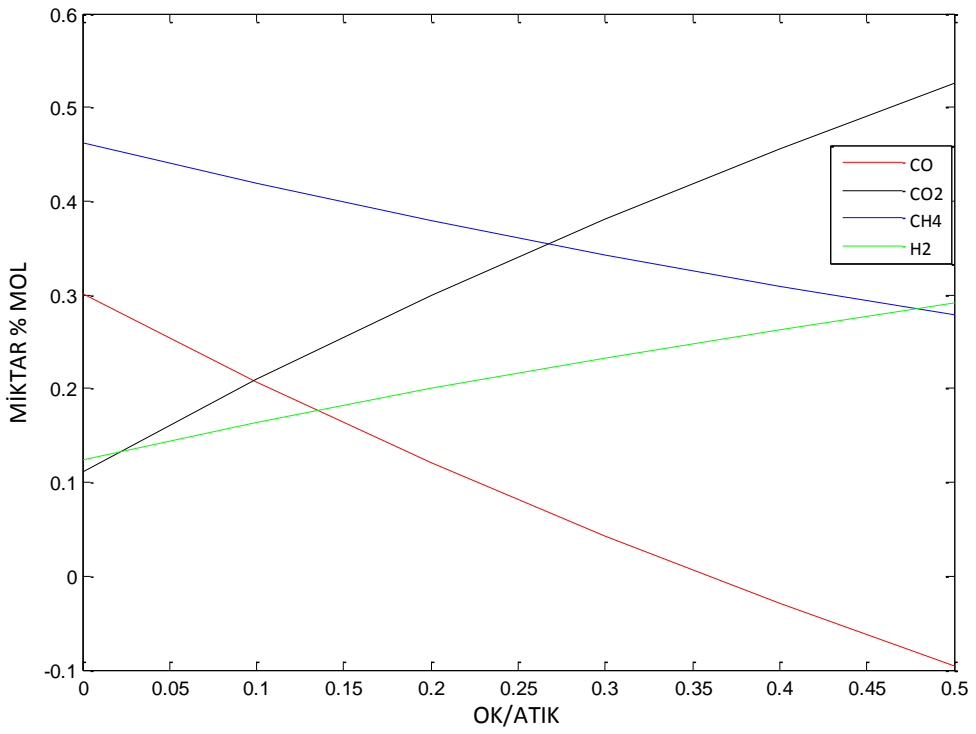
4.5.2 Sadece Oksijenle yapılan gazlaştırma

Yazılımı 800°C, 1000°C ve 1227°C'de 0,5 karbon, 0,002 kükürt, 0,1 hidrojen ve 0,4 oksijen içeren EKA için % 50'e kadar oksijenle gazlaştırıldığı varsayımıyla çalıştırıldı. Sırasıyla Şekil 4.6, 7 ve 8 görüldüğü gibi oksijen/atık oranına göre oluşan ürünlerin dağılımı görülmektedir. Çıkan H₂ konsantrasyonunun sürekli arttığı ancak 0,2 oranından sonra artış hızının düştüğü görülmektedir. Buna karşılık olarak metan tam ters etki gösterdi. 0,2 oksijen oranından sonra metan azalma hızı düşmüştür. 0,55 oksijen oranından sonra ise EKA'daki hidrojenin bittiği görülmektedir. CO₂ miktarı 0,2 oranına kadar hızlı artmış ancak ondan sonra artış hızı azalmaktadır. Buna karşılık CO miktarı tam tersi etki göstermektedir.

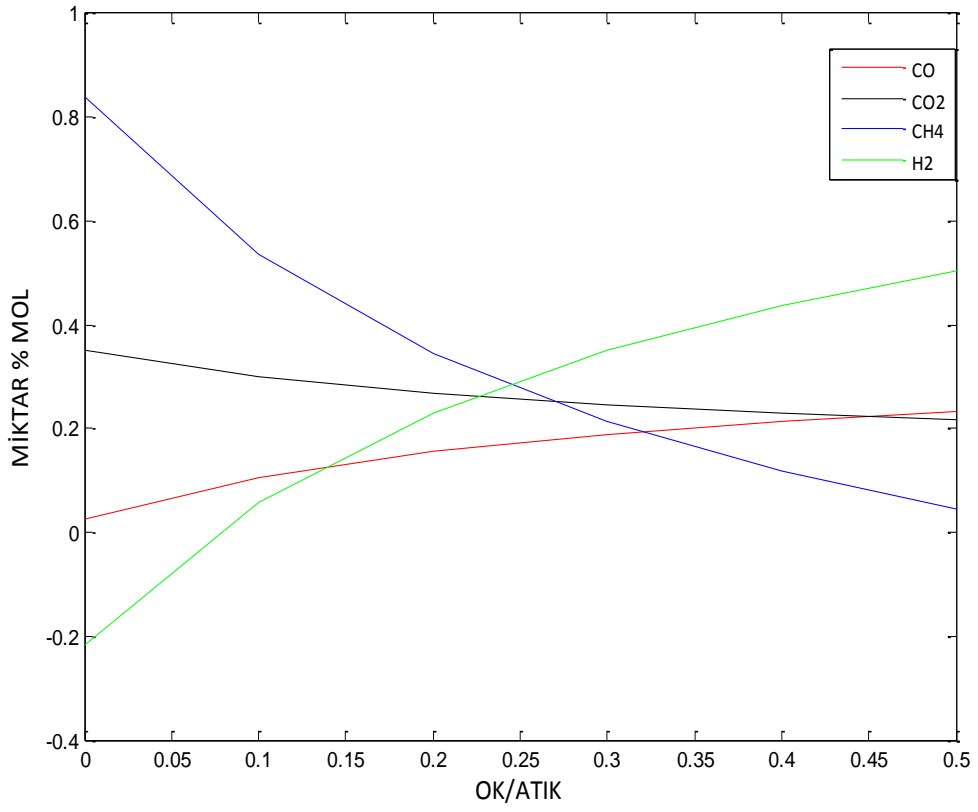
Gaz ısı değeri 21500 KJ/Kmol değerinden başlamakta 0,2 oksijen oranından sonra azalma hızı düşmektedir. CO ve CH₄ azalması hızının düşmesi nedeniyle gaz ısı değeri de daha yavaş düşmektedir. Verilecek enerjideki düşme oksijen verdikçe ekzotermik tepkimeden dolayı enerji açığa çıktığı görülmektedir. Bu nedenle verilen oksijen oranı arttıkça verilecek elektrik enerjisinde azalmaktadır. Ancak Şekil 4.9'da görüldüğü gibi oluşan gazın enerji değeri yanma sonu ürünlerin miktarlarındaki artıştan dolayı çok daha hızlı düşmektedir.



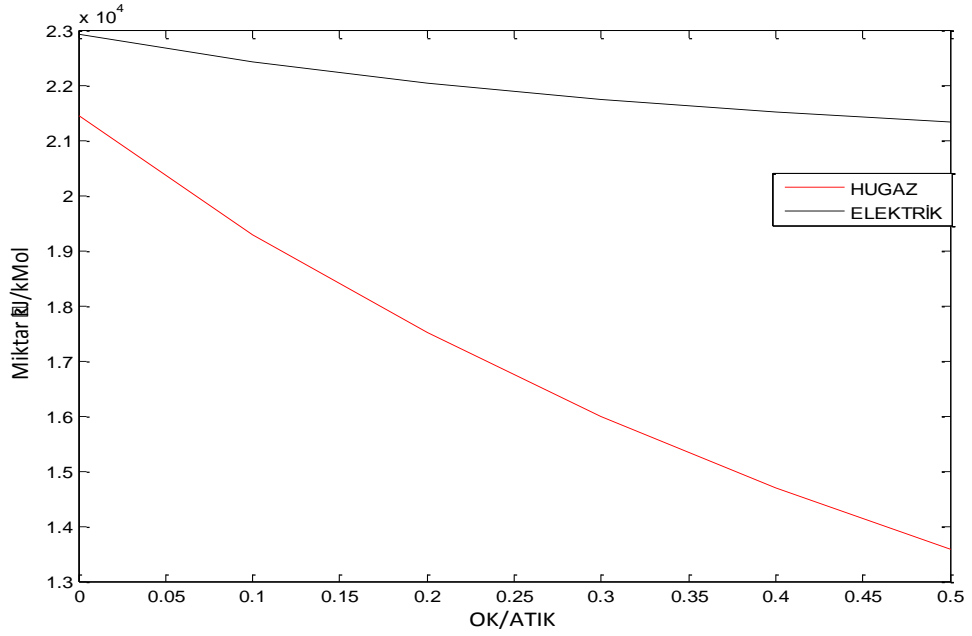
Şekil 4.6 800°C'de oksijenle gazlaştırmada oluşan ürünler



Şekil 4.7 1000°C'de oksijenle gazlaştırmada oluşan ürünler

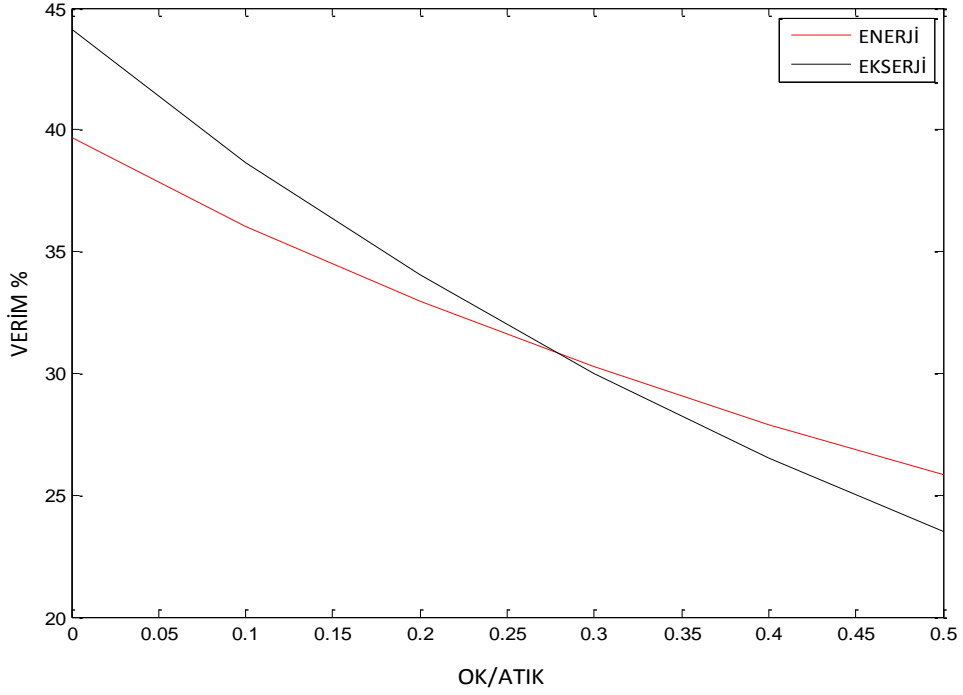


Şekil 4.8 1227°C'de oksijenle gazlaştırmada oluşan ürünler



Şekil 4.9 1000°C'de buharla gazlaştırma harcanan enerji ve üretilen enerji

Ekserji ve enerji verimi oksijen oranı arttıkça düşmekte ve 0,3 oranından sonra eşitlenmektedir. Ekserji verimi, enerji verimine göre üretilen gazın ekserji değerinin çok daha hızlı düşmesi nedeniyle daha fazla azalmaktadır. Enerji verimi azalma hızı gittikçe azalmaktadır. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi mümkün oldukça düşük oksijen oranında gazlaşmanın gerçekleşmesiyle yüksek verim elde edilebilecektir.



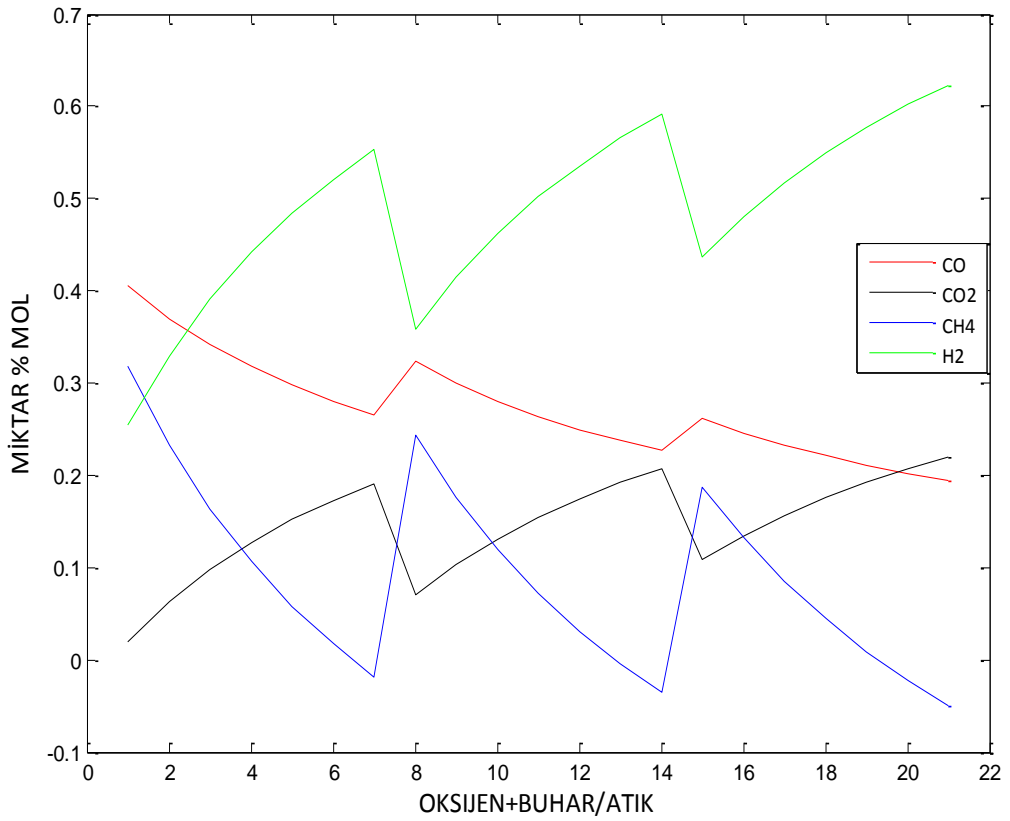
Şekil 4.10 1000°C'de oksijenle gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri

4.5.3 Oksijen sabit tutulup Buhar oranının artırılması hali;

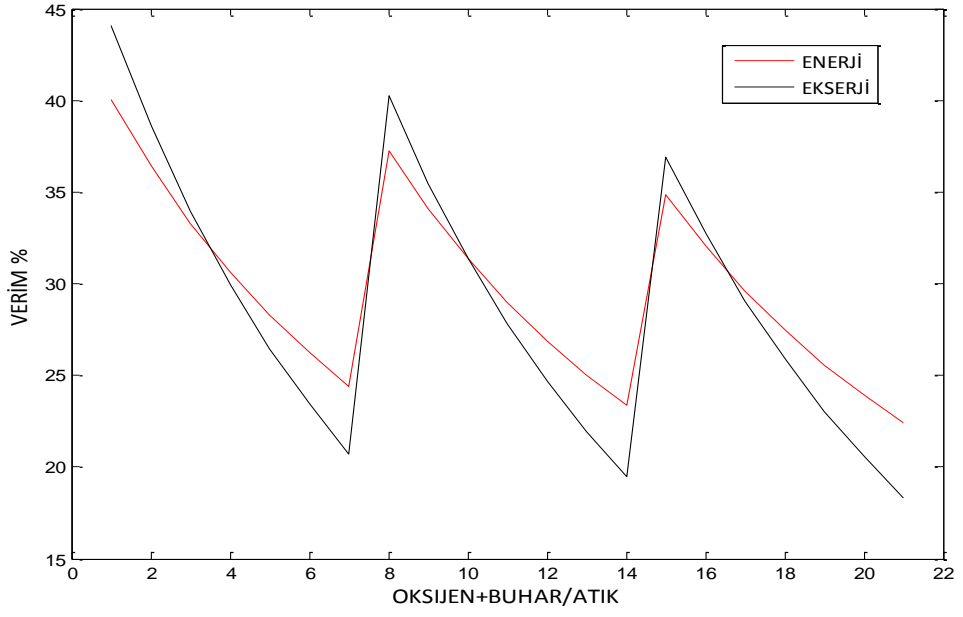
Yazılımı 1000°C, 0,5 karbon, 0,002 kükürt, 0,1 hidrojen ve 0,4 oksijen içeren EKA için %0, 10 ve 20'e kadar oksijenle ve bu oksijen değerleri sabit tutularak %10, 20 ve 30 oranlarında buhar ilave edilerek gazlaştırıldığı varsayımıyla çalıştırıldı. Şekil 4.11'deki gibi artan ve azalan bir değerlerin olduğu görülmektedir. Çıkan H₂ konsantrasyonunun sürekli arttığı ancak oksijen oranının artmasıyla birlikte artış hızının düştüğü görülmektedir. Metan ise oksijen oranı arttıkça azalmakta ancak azalma hızı H₂ göre daha yüksek olmaktadır. CO miktarı düşmekte ancak yüksek oksijen oranlarında azalma hızı düşmektedir. CO₂ miktarı ise artmakta ancak yüksek oksijen oranlarında artış hızı azalmaktadır.

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi oksijen sabit kaldığı halde buhar verilmesi enerji ve ekserji verimini artırmaktadır. Ekserji veriminin yüksek olmasına rağmen enerji veriminde daha hızlı düştüğü görülmektedir. % 30 verim noktasında ekserji ve enerji verimlerinin her halükarda sabit olduğu görülmektedir.

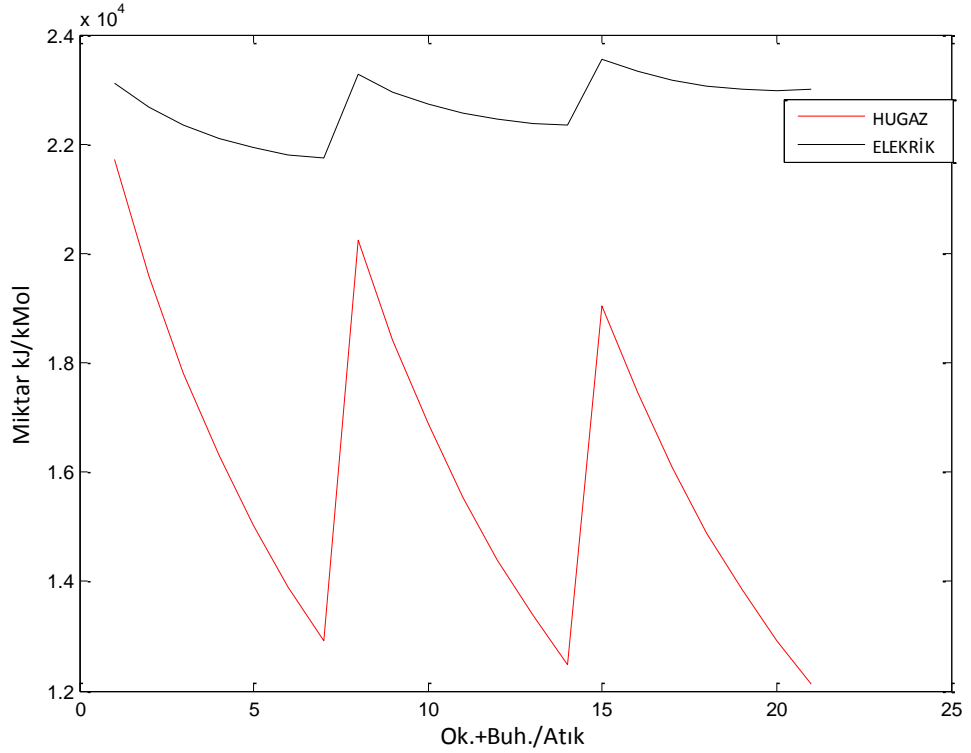
Şekil 4.13’de oksijen sabit tutulup buhar oranları değiştirildiğinde verilen enerji miktarı ortalama olarak sabit kalmaktadır. Yani buhar miktarının artmasıyla verilmesi gereken enerji artışı oksijenin yaptığı ekzotermik tepkimeden gelen ısı enerjisiyle dengelenmektedir. Buhar oranı arttıkça oluşan gaz ürünün ısıl değerinin yükseldiği görülmektedir. Oksijen ve buhar oranları arttıkça ürün gazların ısıl değeri düşmektedir.



Şekil 4.11 1000°C’de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada oluşan ürünler



Şekil 4.12 1000°C'de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri



Şekil 4.13 1000°C'de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada verilen elektrik enerjisi ve oluşan gazın ısı değeri

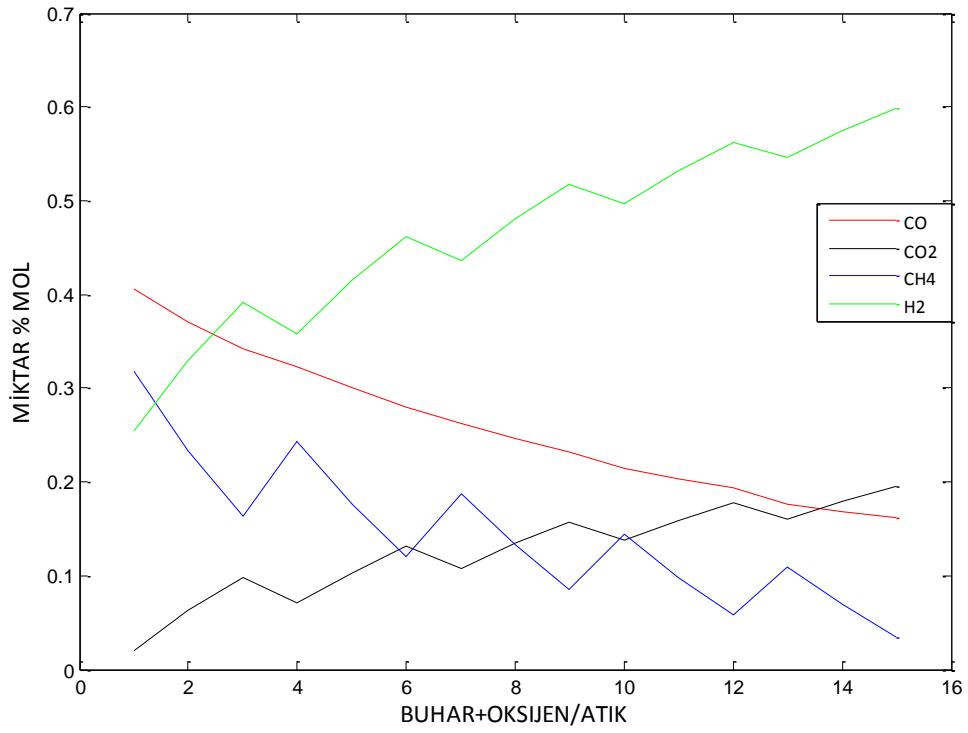
4.5.4 Buhar sabit tutulup Oksijenin artırıldığı durum;

Yazılımı 1000°C’de 0,5 karbon, 0,002 kükürt, 0,1 hidrojen ve 0,4 oksijen içeren EKA için % 0, 10, 20, 30 ve 40’a kadar buhar ve bu buhar değerleri sabit tutularak % 0, 10 ve 20 oranlarında oksijen ilave edilerek gazlaştırıldığı varsayımıyla çalıştırıldı. Oluşan gaz ürünlerin miktarlarındaki değişim Şekil 4.14’de görülmektedir. Buhar sabit oksijen arttırıldıkça CO oluşumunda doğrusal bir düşme olurken diğer gazlarda oksijen arttıkça miktarlarında keskin artışlar göstermektedir. Çıkan H₂ miktarının sürekli arttığı ancak buhar oranının artmasıyla birlikte artış hızının düştüğü görülmektedir. Metan ise buhar oranı arttıkça azalmakta ancak azalma hızı H₂ göre daha yüksek olmaktadır. CO miktarı düşmekte ancak buhar oranı arttıkça azalma hızı düşmektedir. CO₂ miktarı ise artmakta ancak yüksek buhar oranlarında artış hızı azalmaktadır.

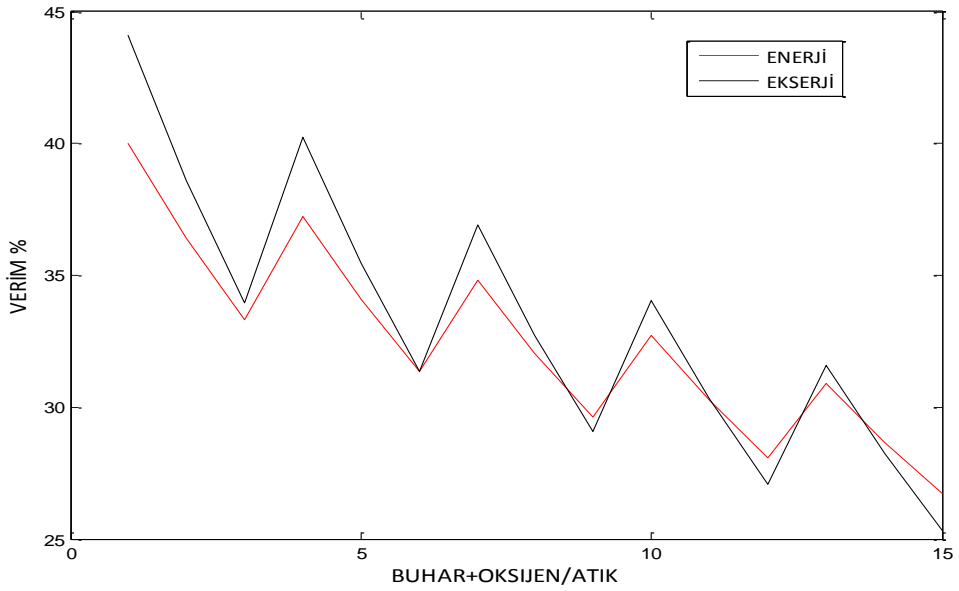
Ekserji ve enerji verimleri oksijen ve buhar oranları arttıkça düşmekte ancak buhar arttıkça Enerji verimindeki düşüş hızı azalmaktadır. Şekil 4.15’de görüldüğü gibi düşük oranlardaki buhar ile oksijen oranında ekserji verimi yüksek kalmakta ve daha yüksek oranlara gelindiğinde ekserji verimindeki düşüş daha hızlı olduğundan enerji veriminden daha düşük değerlere gelmektedir.

Şekil 4.16’da anlaşılacağı üzere oksijen sabit olmasına rağmen buharın artması neticesinde verilecek elektrik enerjisi miktarı da artmaktadır. Ancak bu artış oksijenin tepkimesi neticesinden oluşan ısı enerjiden dolayı daha yavaş sürmektedir. Oluşan gazın ısı enerjisi ise buhar arttıkça artmasına rağmen gittikçe düşmektedir.

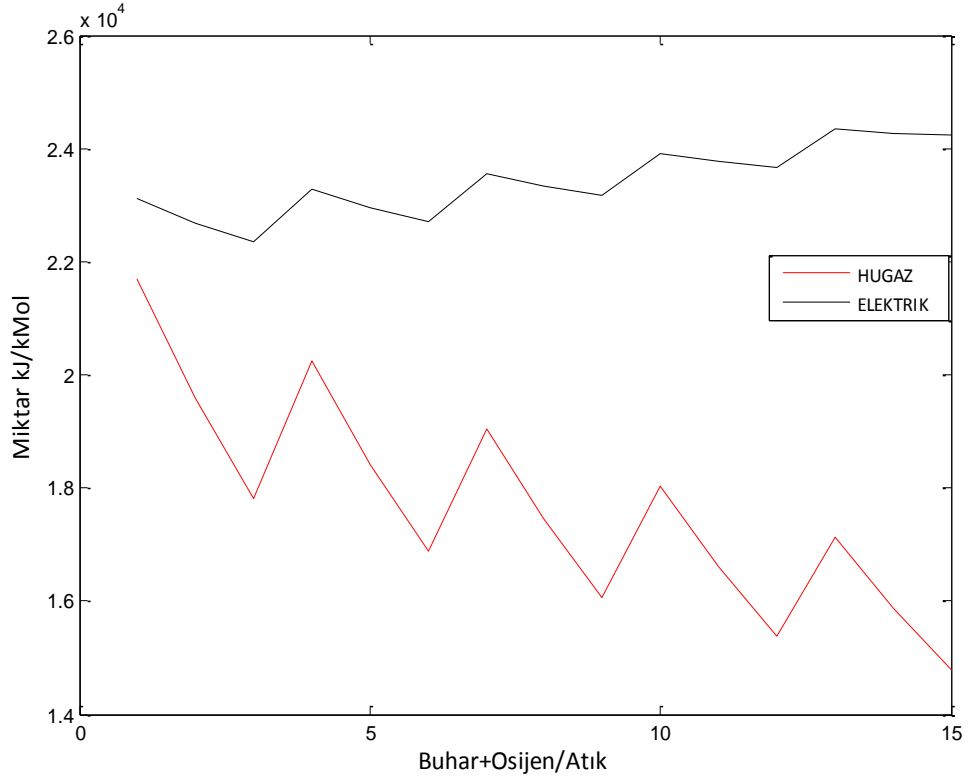
Plazma gazlaştırma yazılımı ile oksijenle ve buharla gazlaştırma esnasında oluşan gaz ürünlerin miktarlarındaki değişim ile ilgili bir fikir edinildi. Her iki gazlaştırma yönteminde gerekli olan elektrik enerjisi miktarının yaklaşık tespiti mümkün oldu. Enerji ve ekserji verimleri ve farklı şartlardaki durumları izlenerek en verimli gazlaştırma şartlarının neler olabileceği konusunda ön bilgilere sahip olundu. Yazılımda kullanılan kimyasal tepkime hızı denkleminin dolayı ve bu tepkime denkleminin sıcaklığın bir fonksiyonu olmaması sebebiyle farklı sıcaklık değerlerinde ne gibi değişimler olabileceği gözlemlenememiştir.



Şekil 4.14 1000°C'de buhar sabit tutulup oksijen oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada oluşan ürünler



Şekil 4.15 1000°C'de buhar sabit tutulup oksijen oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada enerji ve ekserji verimleri



Şekil 4.16 1000°C'de oksijen sabit tutulup buhar oranı değiştirilerek yapılan gazlaştırmada verilen elektrik enerjisi ve oluşan gazın ısı değeri

Bu Termodinamik etüt çalışmasının sonuç değerleri ile plazma gazlaştırma deneylerimizin sonuç değerleri arasındaki uyum ve uyumsuzlukların yorumları 6. Bölümde verilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deney Seti

Şematik resmi Şekil 5.1'de verilen deney tesisatının fotoğrafları Şekil 5.2-15'de görülmektedir. Reaktör (1) 2000°C sıcaklığa kadar çalışabilecek malzemelerden imal edildi. İçinde grafit bir pota, etrafında izolasyon yünü, sonra refraktör ve en dışında reaktör zarfı bulunmaktadır. Reaktör içi ısı kaynağı olarak DC akım elektrik ark kaynak makinesi (2) kullanıldı. Ark grafit pota içine sallandırılan grafit elektrot ile sağlandı.

Atık besleme ünitesi (7), elle tahrikli vidalı konveyör ve atık haznesinden oluşmaktadır. Vidalı konveyör elle saatin tersi yönünde döndürüldüğünde öğütülmüş atıklar reaktöre üstünden serbest düşmeyle beslenmektedir.

Reaktör içine atmosferik hava sızması için pozitif basınç, soy gaz olan argon gazıyla sağlandı (4). Argon tüpünden sağlanan gaz, regülâtörde basıncı düşürüldükten sonra debimetreden debiyi ayarlanarak reaktöre vermektedir. Burada kullanılan debimetre rota metre tipi olup 0-80 lt/h aralığında çalışabilmektedir.

Reaktöre oksijen ile gazlaştırma için gerekli oksijen, 120 barlık tüpten regülatörle basıncı düşürülerek debimetreden (5) istenen miktara ayarlanarak verilmektedir. Burada kullanılan debimetre rotametre tipi olup 0-160 lt/h aralığında çalışabilmektedir. Buhar besleme için ayrıca bir buhar üretici (6) kullanıldı. 10 Bar basınçta elektrikli ısıtıcı bir doymuş buhar üretmektedir.

Reaktör sıcaklığını kontrol etmek için Radyum-Platin termokupl(ısıl çift) içeren sıcaklık değerini dijital olarak gösteren bir termometre (3) kullanıldı. Termometre 0-1800°C aralığında ölçüm yapabilmektedir. Ancak düşük sıcaklık değerlerinde hassasiyeti düşüktür. Sıcaklık değerleri anlık olarak sürekli dijital ekrandan okunmaktadır. Kayıt yapmamaktadır.

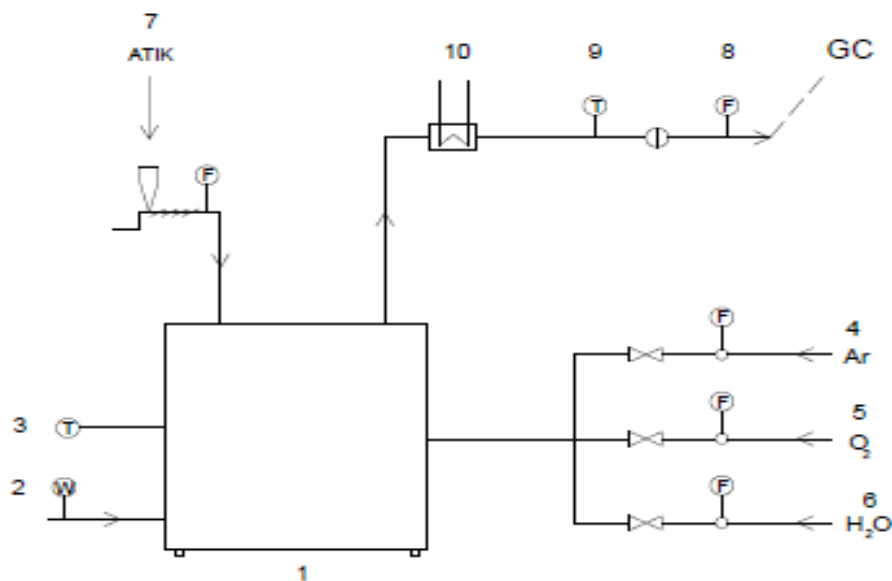
Reaktörde gazlaşma sonucu oluşan gazların miktarı gaz sayacı (8) ile ölçülmektedir. G4 tipi doğalgaz sayacı kullanıldı. Sayacın katı parçacıklardan etkilenmemesi için gazlar filtreden geçirildikten sonra sayaca verilmektedir.

Reaktörden çıkan gazların sıcaklıkları termometre (9) ile ölçülmektedir. Gaz kimyasal analizi için gerekli gaz numunesi aynı yerden alındı.

Yüksek sıcaklıkta bacadan çıkan gazların ölçülebilir sıcaklıklara indirebilmek için bir ısı eşanjörü (10) bulunmaktadır. Soğutucu akışkan olarak su kullanıldı.

- 1.Reaktör
- 2.İsı kaynağı
- 3.Reaktör içi ısıölçer
- 4.Argon besleme
- 5.Oksijen besleme
- 6.Buhar besleme
- 7.Atık besleme
- 8.Gaz debi ölçer
- 9.Çıkış sıcaklığı ölçer
- 10.Gaz soğutucu

F:Debi ölçümü
T:sıcaklık ölçümü
W:Güç

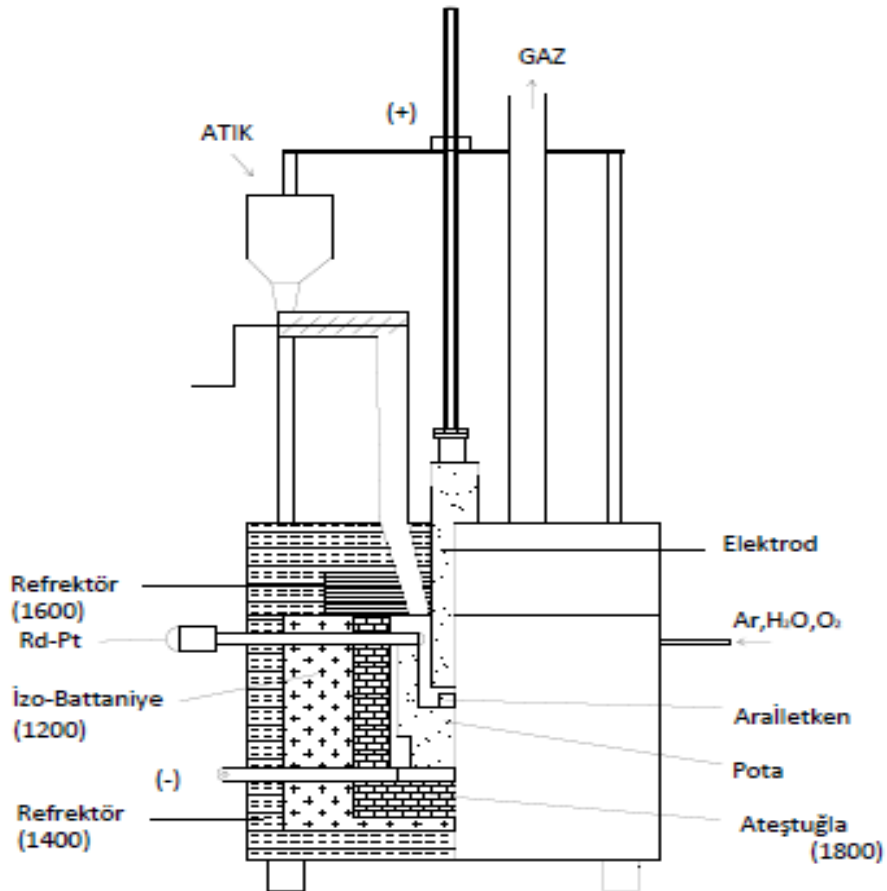


Şekil 5.1 Deney tesisatının şematik resmi

5.2 Reaktör

Reaktör Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, 1mm kalınlığında çelik saçtan dairesel bükülerek imal edildi. Çapı 580 mm ve yüksekliği 600 mm’dir. Üzerinde aynı çapta ve 200 mm yüksekliğinde kapak bulunmaktadır. Reaktörün tabanına 100 mm kalınlığında Süper Ateş marka 1400°C sıcaklığa mukavim izolasyon malzemesi döküldü. Dökümden önce pota şase girişi, Radyum-Platinyum termokupl, argon gazı ve oksijen gazı girişi için gerekli kanallarda oluşturuldu. Yan duvarına 450 mm iç çapında aynı malzeme ile döküm yapıldı.

Kapağın üst kısmına 450 mm çap ve 100 mm derinliğinde bir boşluk kalacak şekilde Süper Ateş marka 1400°C sıcaklığa mukavim izolasyon malzemesi ile dolduruldu. Bırakılan boşluk pota üzerine geleceğinden Süper Ateş marka 1700°C sıcaklığa mukavim refraktör malzeme ile dolduruldu. Dökümden önce kapak üzerinde bulunan grafit elektrot, gaz çıkışı ve atık besleme boşlukları bırakıldı.



Şekil 5.2 Reaktör kesit resmi

Pota grafit malzemeden dış çapı 300 mm ve yüksekliği 300 mm olarak imal edildi. İçine 200 mm çapında ve 200 mm derinliğinde ana reaktör haznesi oluşturuldu. Yine sıcaklık ölçümü için termometre ve argon ile oksijen gazı girişleri için gerekli delikler imal edildi. Reaktör tabanına 100 mm kalınlığında izolasyon battaniyesi (en az 1200°C sıcaklığa mukavim) yerleştirildi. Üzerine 200 mm kalınlığında Ateş tuğla (en az 2000°C sıcaklığa mukavim) yerleştirildi. Tuğlanın üzerine 10 mm ve kalınlığında 200 mm çapında metal levha yerleştirildi. Bu levha (-) kutup şase olacak şekilde reaktör dışına iletkenle çıkış yapıldı. Metal levhanın üzerine pota yerleştirildi ve etrafına 100 mm kalınlığında Ateş tuğla yerleştirildi. Kalan boşluk izolasyon battaniyesiyle dolduruldu. Termokupl ve argon-oksijen girişi monte edildi. Sonra reaktörün kapağı kapatıldı. Kapak üzerine gaz çıkış kanalı, atık besleme ünitesi ve (+) kutup elektrotu sürme sistemi monte edildi.

5.3 Cihazlar ve Ölçü Aletleri

Çizelge 5.1 Deney tesisatında kullanılan cihazların modelleri ve özellikleri

ÖLÇÜ ALETİ	ÖZELLİKLERİ	ADEDİ
Sıcaklık Ölçümü	Rd-Pt Tipi ısı çifti \varnothing 20 mm, L=400 mm 1600°C (-5 - +5)	1
	Seyyar infraret sıcaklık ölçer -30 – 600°C, Hassasiyet +/- 0,5	1
Isı Kaynağı	Oerlikon DC Kaynak makinesi 650 A 380 V-3 Faz elektrik girişi	1
Atık Besleme	Maksimum 10 Kg/h Debi Vidalı Konveyör	1
Gaz Ölçer	G4 Matrix Doğalgaz sayacı nominal basınç 22 mbar, Hassasiyetleri % 1, % 2	1
Gaz Rota metresi	Oksijen debi aralığı 0-160 lt/h Hassasiyetleri % 5	1
Gaz Rota metresi	Argon debi aralığı 0-80 lt/h Hassasiyeti %5	1
Buhar Üretici	10 bar Doymuş buhar 3 KW	1

5.4 Deney Tesisatı Fotoğrafları



Şekil 5.3 Deney seti resmi



Şekil 5.4 Deney seti resmi



Şekil 5.5 Reaktör içi resmi



Şekil 5.6 Güç kaynağı resmi



Şekil 5.7 Sıcaklık göstergesi resmi



Şekil 5.8 Termokupl (Isıl çift) resmi



Şekil 5.9 Gazölçer resmi



Şekil 5.10 GC Gaz Kromatografı resmi



Şekil 5.11 Rotametreler resmi



Şekil 5.12 Gaz tüpleri resmi



Şekil 5.13 Deney numuneleri resmi



Şekil 5.14 Gaz numune kabı resmi



Şekil 5.15 Gaz alev resmi

5.5 Deneyin Yapılması ve deneylerin temel ilkeleri

DeneySEL ölçümlerin yapılabilmesi için öncelikle sistemin rejime gelmesi gerekir. İlk önce reaktör çalışma yapılacak olan sıcaklığı getirilir. Isı kaynağı olarak DC elektrik ark kaynak makinesi, (+) kutbu vidalı ayar mekanizması bulunan grafit elektrot ile (-) kutbu şase üzerinden bağlanan grafit pota arasında ark oluşturarak reaktör sıcaklığını istenen mertebeye çıkartır. Reaktör sıcaklığı kaynak makinesi üzerindeki akım şiddeti değiştirilerek ayarlanmıştır.

Reaktör sıcaklığı, Rd-Pt Isıl çiftten aldığı veriyi anlık olarak sıcaklık değeri olarak gösteren dijital gösterge üzerinden izlenerek ayarlanmıştır. Gazlaştırmanın havasız bir

ortamda gerçekleşmesi için argon tüpünden alınan soy gaz olan argon gazı rotametre ile debisi ayarlanarak Reaktör içine beslenmektedir. Ortam içindeki hava süpürülerek gazlaştırma için uygun hale gelmektedir.

Reaktör besleme nitesi (Vidalı Konveyör) 10 kg/h kapasiteli olup konveyörden çıkan deney numuneleri serbest düşme ile reaktörün içine girmektedir. Reaktörde oluşan gazlar gaz çıkış borusu üzerinden soğutularak gazlere gelmektedir. Gaz numunesi alma yerinden şiringalara alınan gaz numunelerinin GC de gaz analizleri yapılmıştır.

Deneyler 600°C, 800°C, 1000°C, 1200°C, 1400°C ve 1600°C biraz üstündeki sıcaklık değerylerinde yapılmıştır. Herhangi gibi bir gaslaştırıcı reaktant kullanılmadan numunenin yüksek sıcaklığı aniden ısıtılmasıyla bünyedeki moleküllerin parçalanarak yeni moleküllere dönüşümü plazma gazlaştırma olarak tanımlanmıştır. Genellikle 600°C nin üstündeki piroliz gazlaştırma olarak tanımlanır. Bu reaktörde gazlaştırma işlemi saniyeden bile daha kısa bir zaman içinde gerçekleşmektedir.

Yapılan tüm deneylerin GC de yapılan gaz analizleri EK-A da verilmiştir. Bu değeryler GC nin lme kabiliyeti dhilinde ki gazların toplam gaz içindeki mol oranlarıdır. rneğinin argon, azot ve su buharının oranları bulunmamaktadır. Bu değerylerin toplamı 100 tamamlanarak her bir gazı % oranı hesaplanarak EK-B de tablo haline getirilmiştir. Deney No'ları deneylerin yapılış sırasına göre verilmiştir. Deneyler eldeki imknlar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Hiç bir reaktant kullanılmadan yapılan deneyler ve sonuçları izelge 6.1 de verilmiştir. Burada reaktöre hiçbir reaktant vermeden yukarıda belirtilen sıcaklık değerylerinde yapılan gazlaştırmada gaz ürünlerindeki molar oran değeryşiklikleri ortaya koyup en verimli sıcaklık değerynin tespiti amaçlanmıştır.

Saf oksijen (O₂) reaktant olarak kullanıldığı deneyler ve sonuçları izelge 6.2'de verilmiştir. Burada reaktöre 10 ml/h debi ile saf oksijen verilerek yukarıda belirtilen sıcaklık değerylerinde yapılan gazlaştırmada gaz ürünlerindeki molar oran değeryşiklikleri ortaya koyup en verimli sıcaklık değerynin tespiti amaçlanmıştır. Deney 13 ve 14'te daha fazla oksijen verilerek sonuçlardaki değeryşimi görmek amaçlanmıştır.

Buhar (H₂O) reaktant olarak kullanıldığı deneyler ve sonuçları izelge 6.3'te verilmiştir. Burada reaktöre buhar verilerek yukarıda belirtilen sıcaklık değerylerinde yapılan

gazlaştırmada gaz ürünlerindeki molar oran değişiklikleri ortaya koyup en verimli sıcaklık değerinin tespiti amaçlanmıştır.

Numune olarak İstanbul evsel katı atıklarını temsil eden ortalama organik atık karışımı kullanılmıştır. Kurutulup öğütölen bu numuneler pamuksu bir hale geldiği için reaktöre vidalı konveyörle beslemekte zorluklar gözlemlendiğinden reaktöre beslemek daha kolay olduğundan ağaç talaşı kullanıldı. Yapılan deneylerin gaz analizlerinde sonuçlar bir birine eř değer olduğu göröldü. Deneylerin ağaç talaşıyla yapılmasında atıktaki yapının homojensizliğinden deneysel sonuçların etkilenmemesi amaçlanmıştır.

şekil 5.2'de göröldüğü gibi ark (ısı kaynağı) elektrot ile ara parça arasında meydana gelmektedir ve termokupl (ısı çift) arkı göremediğinden ışıma ile oluşacak ısı transferine bağlı olarak sıcaklık ölçümü hatasının önüne geçilmiştir.

5.6 Gaz ürünlerin Analizi

Gaz ürünlerin analizi, YTÜ Kimya mühendisliği bölümü Süper kritik akışkan laboratuvarında bulunan GC (Gaz Kromatografisi) yapılmıştır. GC, Perkin Elmer marka ve Clarus 500 RGA-1115 modeldir. Bu cihaz iki adet TCD ve bir adet FID detektörü içermektedir. Cihaz konfigürasyonu ASTM D1945, ASTM D1946, ASTM D2597 ve DIN 51872-4 standartlarına göre gaz analizi yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Analiz, cihazın üzerindeki kontrol panelinden kullanıcı yönlendirilerek gerçekeştirilir ve elde edilen sonuçlar tablo halinde raporlanarak cihaza bağlı bilgisayara aktarılır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1 Evsel Katı Atıkların plazma ortamında gazlaştırılması

Deneysel çalışmada, İstanbul atıklarının inorganik madde ve nem içermeyen ortalama eşdeğerini içeren bir karışım İSTAÇ'tan temin edilerek kullanılmıştır. Gazlaştırma 600°C, 800°C, 1000°C, 1200°C, 1400°C ve 1600°C sıcaklık aralığında yapılmıştır. Her sıcaklık değerinde sadece atık ve O₂ ile H₂O ayrı ayrı ilave edilerek gazlaştırılmış çıkan gaz ürünlerin analizi yapılmıştır. Gazlaştırma esnasında oluşan su buharı gaz çıkış kanalında yoğunlaşmıştır. Yine gazlaşmada gaz bileşik oluşturamayan karbon (C) kanal çeperlerinde birikmiş, daha ince tanecikler çıkan gazlarla taşınmıştır.

Gaz analiz cihazı (GC); metan, etan, propan, CO₂, O₂, N₂, CO, H₂, C₅/C₆, n-bütan, i-bütan, iso-bütan, t-2-bütan, c-2-bütan ve 1,3-bütan gazlarını molar oranlarını ölçebilmektedir. Bilgisayara aktarılan değerler 100 tamamlanarak % molar oranlar hesaplanmıştır.

Yapılan ölçümlerde metan, etan, CO, CO₂ ve H₂ gazları yanında çok az miktarda deney koşullarına bağlı olarak propan, Propilen, C₅/C₆, iso-bütan, C-2-bütan ve 1,3-bütan gazları ölçülmüştür. Ayrıca reaktöre oluşan hava kaçaklarından dolayı O₂ ve N₂ gazları da değer olarak (N₂=4O₂) görülmüştür. Bu gazlar hesaplamalarda göz önüne alınmamıştır.

6.2 Plazma Gazlaştırma

Plazma gazlaştırma yani tepken olmadan yapılan gazlaştırma deney sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Bu çizelgeye gaz karışımındaki yanıcı gazların A.I.D hesaplanarak ilave edilmiştir. Aynı şartlarda yapılan deneylerde gaz oluşum grafikleri çizilirken en yüksek ısıl değere sahip deney verileri kullanılmıştır. Kullanılan bu değerler Çizelge 6.1’de ilgili deney numarası satırı boyanarak gösterilmiştir.

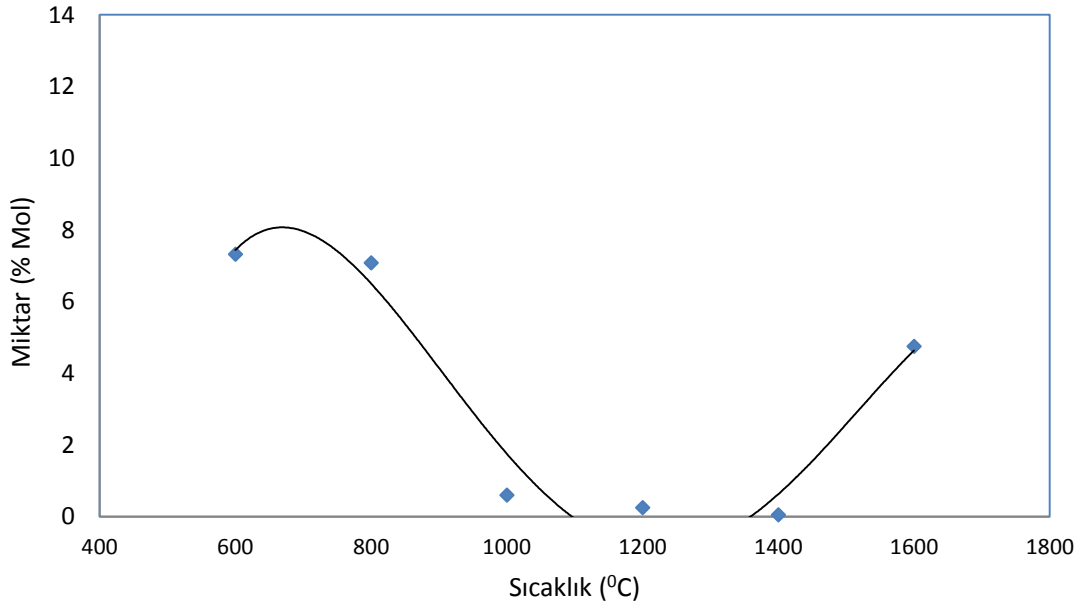
Çizelge 6.1 Plazma gazlaştırma tablosu

Deney No	Metan%	Etan%	CO2%	CO%	H2%	A.I.D.Kcal/Kg	
2	4,0863023	0,3417102	18,23862	76,2289501	0,676526	61434,37617	1000°C
4	6,6533739	0,5024908	19,53726	72,4765885	0	64033,08782	1000°C+Atık
5	10,389553	3,0673502	14,11419	71,8504886	0	80671,90128	700°C+Atık
7	5,5257312	0,6287109	15,32217	77,172035	1,098701	66188,56124	1000°C
9	1,9889403	0,1794403	14,22323	82,4981021	0,826461	61139,61985	1000°C+Atık
10	2,5848986	0,1363636	18,58828	78,0627348	0,411345	58857,37383	1200 °C
12	3,3071064	0,2333548	14,81905	80,668973	0,616043	62509,09531	1200 °C
15	20,024554	7,0810209	22,2964	50,2487011	0	99937,83797	800 °C
18	0,6891322	0,2574019	2,945961	95,6477685	0,308064	67598,96143	1200 °C
20	3,472848	0,1883003	6,245619	87,1972453	2,739673	68323,74168	1300 °C
22	0,1170782	0,0140494	3,395268	95,5495651	0,910283	65843,69396	1400 °C
24	0,6040305	0,059453	3,222722	94,7065349	1,338306	66626,29697	1200 °C
26	0,6856187	0,0606206	3,714829	93,4814698	1,995932	66333,35847	1400 °C
29	19,17773	7,328948	19,33369	53,432276	0	101437,7141	60°C °C
31	16,660601	3,9985443	13,39865	65,5922556	0,210205	92154,40932	800°C
34	12,104695	2,6784805	19,14126	65,4111417	0,290865	78245,21579	800 °C Atık
39	18,886741	6,5232775	17,07467	57,0035711	0,090751	100253,3377	900 °C atık
40	15,505329	4,7566034	12,89211	65,7440705	0,773194	93293,31941	1600°C

6.2.1 Etan (C₂H₆)

Kaynaklarda genellikle gazlaşma esnasında yüksek oranlarda etan çıktığı belirtilmemektedir. Şekil 6.1’de etan oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

Yapılan deneylerde özellikle 600°C ve 800°C de % 7 ye varan oranlarda etan çıktığı görülmektedir. Yukarıda değerlendirilen ve incelenen kaynaklarda[35],[54] etan'ın görülmemesi ve eser miktarda olması, plazma gazlaştırmanın yapısal klasik gazlaştırma sistemlerinden farklı bir kinetik mekanizmaya sahip olduğunu göstermektedir. İlerleyen çalışmalarda plazma gazlaştırmanın kinetiği ve mekanizması üzerine odaklanılmasında fayda olacaktır. Gazlaştırma sıcaklığı arttıkça etan oranı azalmakta ve 1000°C den sonra kaynaklara uygun olarak önemsiz bir değere düşmektedir. Ancak, ilginç ve kaynaklarda görülmeyeceği biçimde 1400°C'den daha yüksek sıcaklıklara gidildiğinde 1600°C'de deneylerde tekrar etan oranının %6 gibi yüksek bir değerde arttığı görülmektedir. Böyle bir değişim hiçbir kaynakta, bugüne kadar not edilmemiştir. Şekil 6.1'de bu kayda değer değişim açık şekilde görülmektedir.

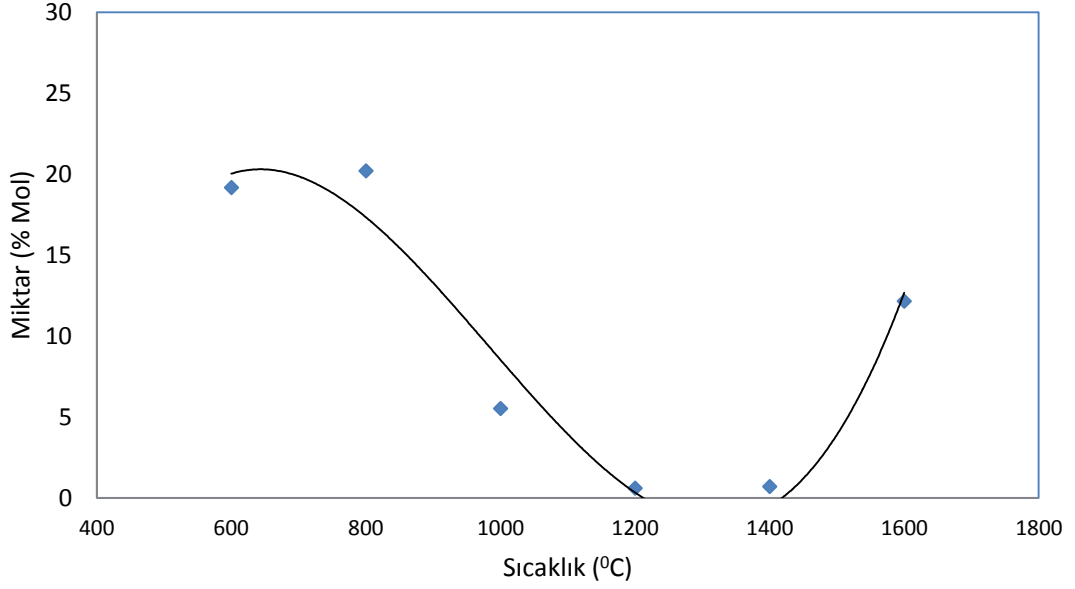


Şekil 6.1 Etan oluşumunun sıcaklıkla değişimi

6.2.2 Metan (CH₄)

Gazlaştırma prosesinin en önemli ürünlerinden biridir. Düşük sıcaklık değerlerinde (600°C ve 800°C) %20 varan oranlarda metan üretimi gerçekleşmektedir. Şekil 6.2'de Metan oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Sıcaklık yükseldikçe metan oranı düşmektedir. 1200°C'den sonra çok önemsiz miktarlarda metan üretimi meydana gelmiştir. Sıcaklık arttıkça metanlaşma tepkimelerinin azaldığı görülmektedir.

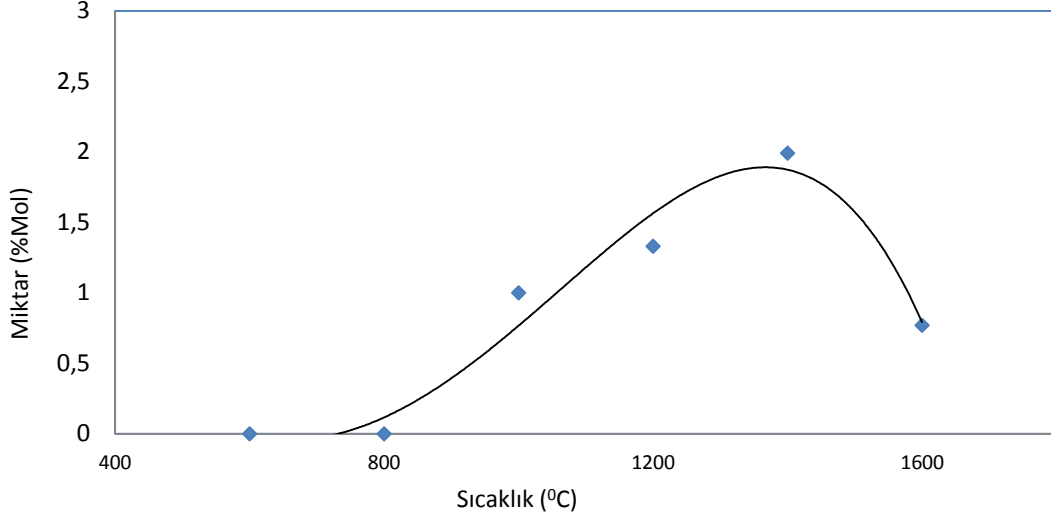
Kaynaklara uygun olarak düşük sıcaklıklarda hidrokarbon bileşikleri oluşmaktadır. Ancak tüm hidrokarbon gazlarında olduğu gibi, 1600°C' de yapılan deneyde ani bir metan artışı görülmektedir. 1400°C'ye kadar olan veriler kaynaklara uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2 Metan oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.2.3 Hidrojen (H₂)

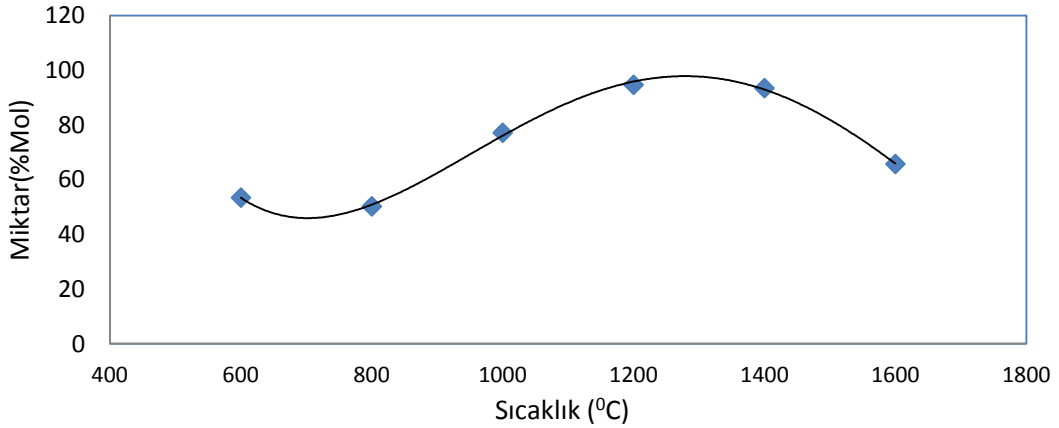
Şekil 6.3'de hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Hidrojen oluşumu 800°C den sonra artmaya başlamakta ve sürekli artan bir seyir göstermektedir. Kaynaklara uygun olmasına rağmen oranı biraz düşük kalmaktadır. Bu da gazlaştırılan malzemenin içeriğine ve reaktörde gerçekleşme imkânı bulan tepkimelerin sonucudur. Ancak 1600°C' de yapılan deneyde ani bir hidrojen düşüşü görülmektedir. Buda hidrojen veren tepkimelerin azaldığını metan üreten tepkimelerin oluştuğunu göstermektedir. Üstelik gözlenen bu farklılığın, tüm diğer gaz bileşenleri için aynı kendine has değişimde gözlendiği ve bunun rastlantıdan ibaret olmadığı anlaşılmaktadır. Oldukça dikkat çekici bir bulgudur. Metan etan gibi hidrokarbonların artışı hidrojenin düşmesi değişimi doğrulamaktadır. Burada ikincil tepkimeler başlamakta ve gelişmektedir.



Şekil 6.3 Hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.2.4 Karbon monoksit (CO)

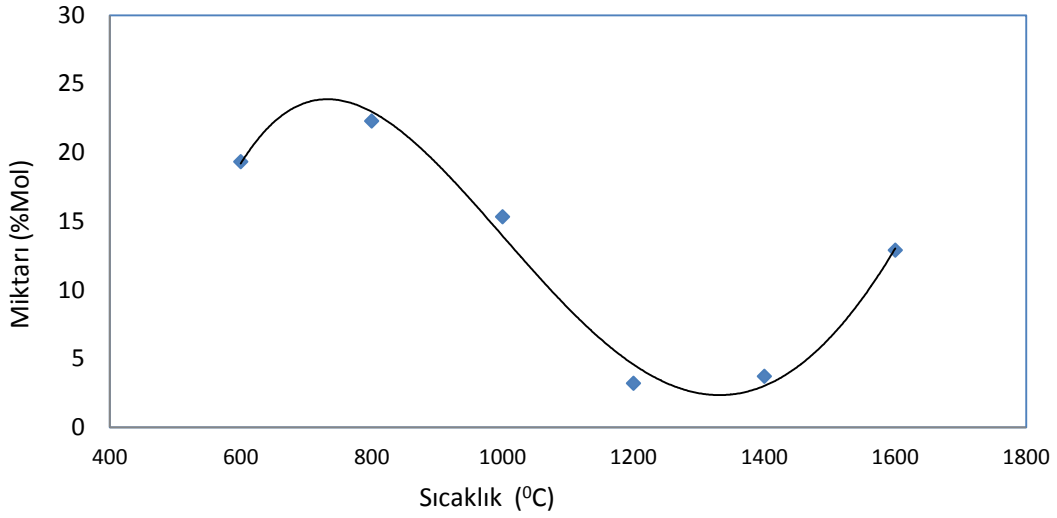
En önemli gazlaştırma ürünlerinden biri de karbon monoksittir. Şekil 6.4’de karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda bile % 65 gibi yüksek değerlerde oluşmaktadır. Özellikle 1400°C gibi yüksek sıcaklıklarda %95 gibi değerlere gelmiştir. Buda yüksek sıcaklıklarda karbondioksitin tepkimeye girerek karbon monoksit oluşturduğunu göstermektedir. Ancak 1600°C’ de yapılan deneyde ani bir karbon monoksit düşüşü görülmektedir. Buda yüksek sıcaklıklarda tepkimelerin karbon monoksit azaltacak yönde geliştiğini göstermektedir.



Şekil 6.4 Karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişim

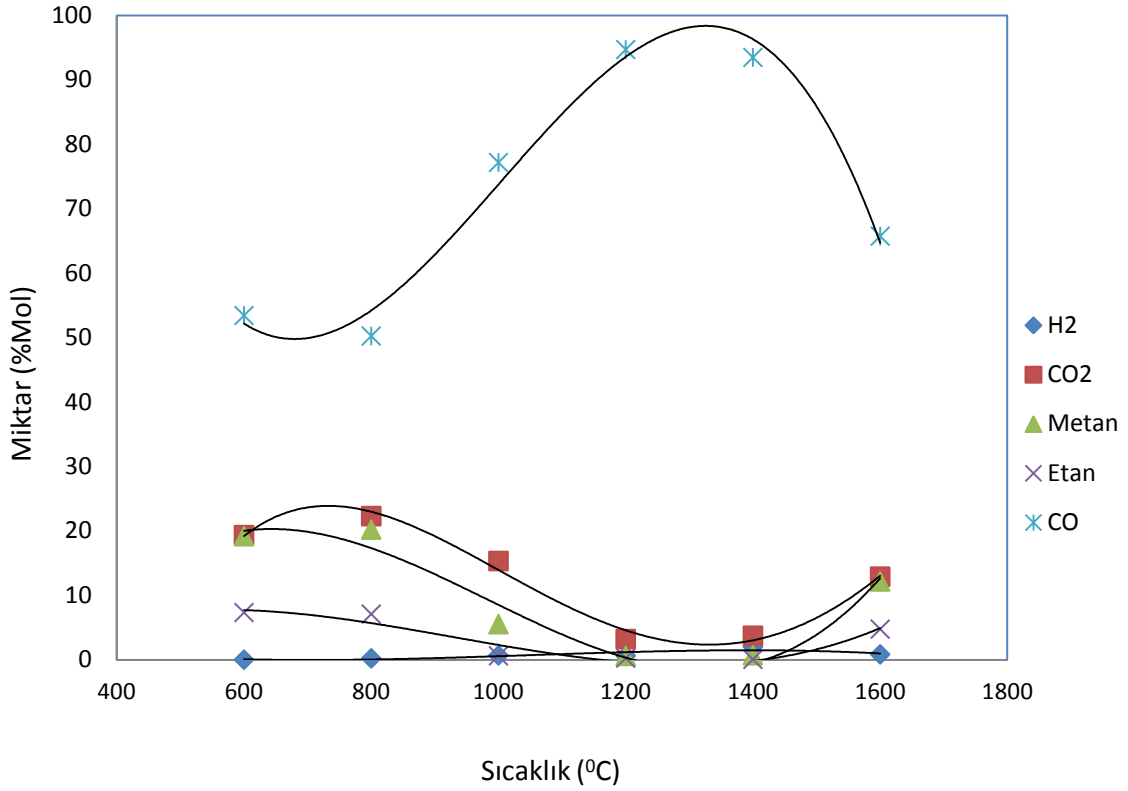
6.2.5 arbon dioksit (CO₂)

Düşük sıcaklıklarda gazlaştırma ürünü olarak karbon dioksit %25 gibi oranlara çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda ise %3 gibi çok düşük değerlere kadar düşmektedir. Bir enerji değeri olmadığından istenen bir ürün değildir. Özellikle 800°C den sonra düşmeye başladığı açıkça görülmektedir. Şekil 6.5’de karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Ancak 1600°C’de yapılan deneyde ani bir karbon dioksit yükselişi görülmektedir.



Şekil 6.5 Karbon dioksit oluşumunun sıcaklıkla değişim

Şekil 6.6’da gazlaşma sonucu oluşan gaz oranlarının değerleri toplu olarak görülmektedir. Hidrojen ve karbon monoksit oranları sürekli artarken diğer gazların oranları düşmüştür. Karbon monoksit dışındaki ürünlerin 1400°C de oranlarının bir birini çok yaklaştığı görülmektedir. Bu durum kaynaklara ve gazlaşma tepkimelerine uygundur. Ancak 1600°C’ de yapılan deneyde karbon monoksit ve hidrojen oranları düşerken buna bağlı olarak diğer gazların oranının arttığı görülmektedir. Buda yüksek sıcaklıklarda etan, metan ve karbondioksit oluşacak şekilde tepkimelerin gerçekleştiğini göstermektedir.

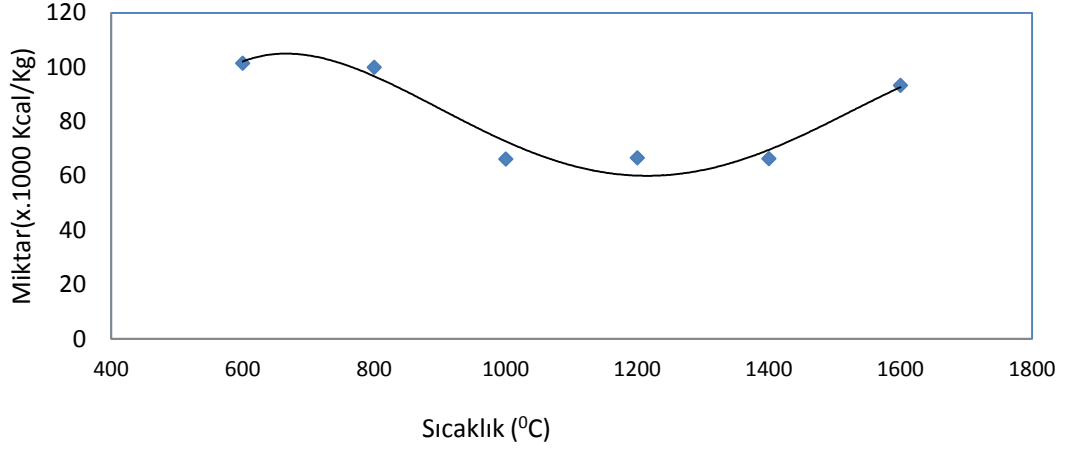


Şekil 6.6 Plazma gazlaştırma ürünü gazların oluşumunun sıcaklıkla değişim

Şekil 6.7’de gazlaştırma sonucu oluşan gazların alt ısı değerleri toplamının sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Karışım gazının hesaplanan alt ısı değeri oluşan yanıcı gazların ısı değeri olup sadece sıcaklık artışına bağlı olarak gazlaşma ürünlerinin ısı değerindeki değişimi vermektedir. Gazlaştırılan numunenin toplam ısı değeri değildir. Çünkü gazlaşma esnasında su (sıvı) ve siyah karbon (C) (katı) da oluşmaktadır. Isıl değer 800°C’den sonra düşmeye başladığı 1200°C’den sonra ise düşüşün çok azaldığı ve 1600°C ise tekrar ısı değeri yükseldiği görülmektedir. Bu da zaten gaz kompozisyonlarının değişimine uygundur ve yüksek sıcaklıklardaki gazlaşmada gazların ısı değerinin arttığını göstermektedir.

6.3 Oksijenle plazma gazlaştırma

Plazma gazlaştırmada tepken olarak saf oksijen kullanılarak yapılan gazlaştırma deney sonuçları Çizelge 6.4’de verilmiştir. Bu çizelgeye gaz karışımındaki yanıcı gazların A.I.D hesaplanarak ilave edilmiştir. Aynı şartlarda yapılan deneylerde gaz oluşum grafikleri çizilirken en yüksek ısı değere sahip deney verileri kullanılmıştır.



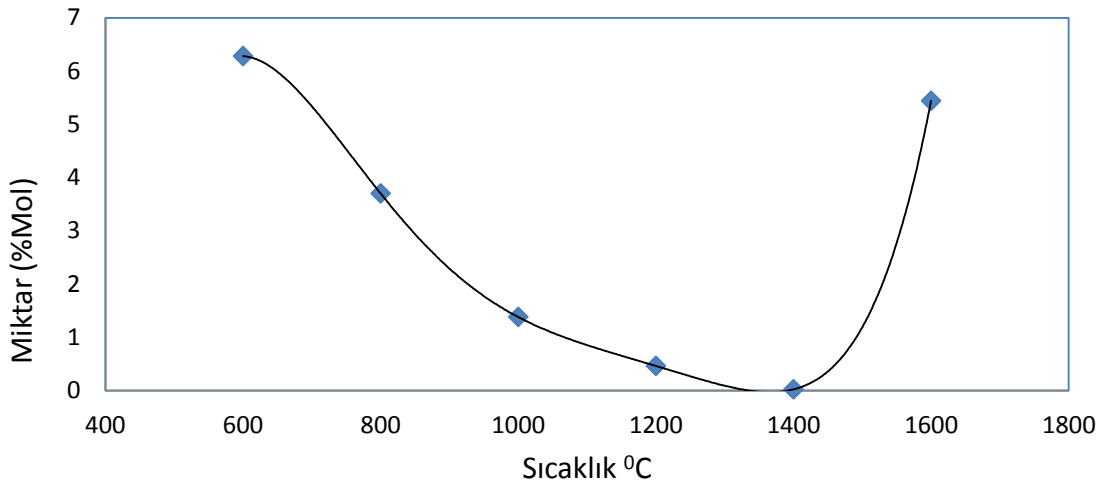
Şekil 6.7 Alt ısıl değerin sıcaklıkla değişimi

Çizelge 6.2 Oksijenle plazma gazlaştırma tablosu

Deney No	Metan%	Etan%	CO ₂ %	CO%	H ₂ %	A.I.D.Kcal/Kg	
1	7,3848692	1,3734043	29,80784	60,1725065	0,613867	60776,95203	1000°C O ₂
6	4,1753203	0,4921873	9,511092	85,027283	0,607405	68134,83838	1000°C O ₂
11	5,2988672	0,3663523	13,49734	79,3736069	0,889398	66118,48517	1200°C +20 O ₂
13	2,9061691	0,2117931	3,4763	89,6426617	3,582328	69479,05051	1200°C +20 O ₂
14	7,0304333	0,4620412	5,825028	83,9128767	2,458879	73805,2828	1200°C+40 O ₂
16	14,640047	3,6922404	19,73104	61,1850493	0,465399	84244,625	800°C + O ₂ ,
17	14,426193	2,3031898	12,34863	69,1010673	1,462936	84437,79877	1000°C + O ₂ ,
19	1,1179977	0,1345425	3,537511	94,2597065	0,853416	67317,51201	1200°C + O ₂
25	0,6979259	0,0611897	5,336528	92,5745409	1,267717	65321,07719	1300°C +O ₂
27	0,1529741	0,021129	3,485444	95,533043	0,785718	65856,64379	1400°C+O ₂
28	17,43314	6,2850511	18,14585	57,2054682	0	96631,09009	600°C _O ₂
30	6,1357087	0,8656013	66,98349	25,2418129	0,70317	32696,16084	700°C _O ₂
32	11,201512	2,607462	11,18229	73,6873842	0,727677	82124,83924	800°C _O ₂
33	17,443825	6,338486	24,52986	50,9191194	0	92578,8123	600°C _O ₂
42	17,192503	5,4420535	10,08008	66,082609	0,831661	99438,89209	1600°C O ₂

6.3.1 Etan (C₂H₆)

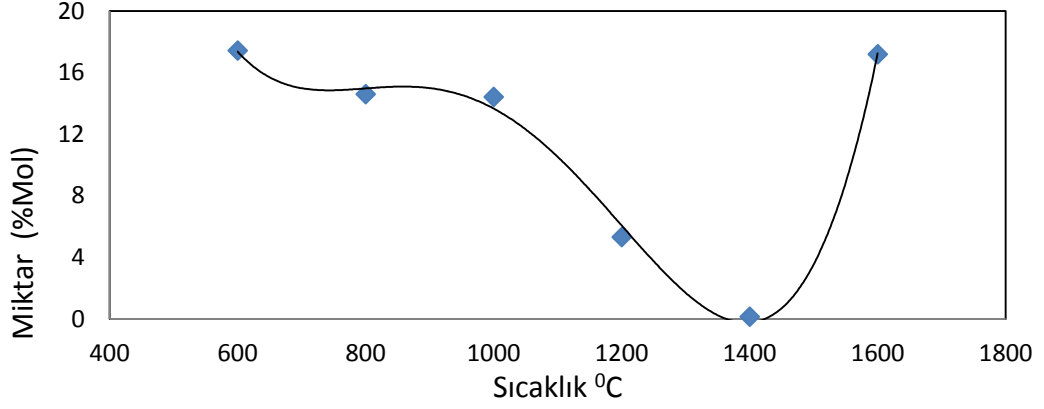
Kaynaklarda genellikle gazlaşma esnasında yüksek oranlarda etan çıktığı belirtilmemektedir. Şekil 6. 8’de etan oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Yapılan deneylerde özellikle 600°C de % 6’yı geçen oranda etan çıktığı görülmektedir. Gazlaştırma sıcaklığı arttıkça oran düşmekte ve 1400°C den sonra kaynaklara uygun olarak önemsiz bir değere gelmektedir. Ancak 1600°C’ de yapılan deneyde tekrar etan oranının %6 civarında arttığı görülmektedir. Buda oksijenle plazma gazlaştırmada yüksek sıcaklıklarda yüksek oranda etan oluştuğunu göstermektedir[33] , [57], [58].



Şekil 6.8 Etan oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.3.2 Metan (CH₄)

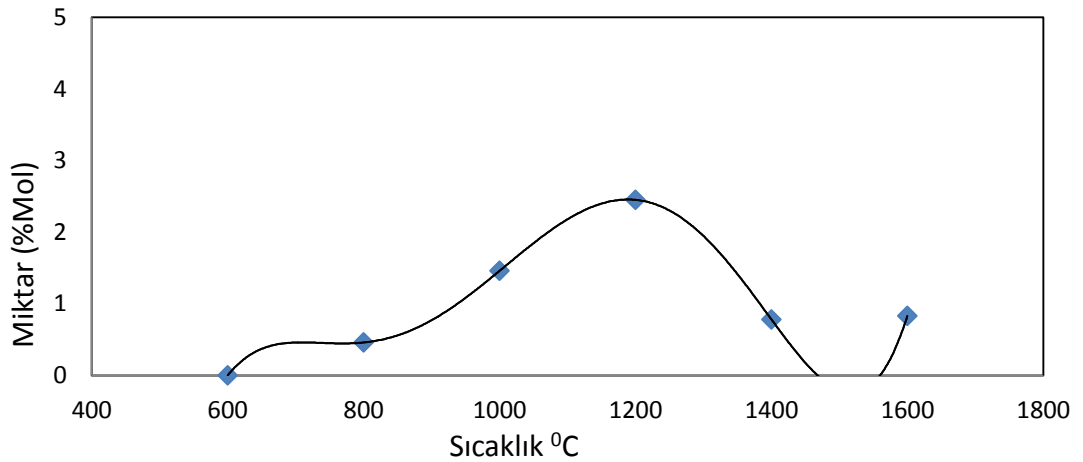
Gazlaştırma sürecinin en önemli ürünlerinden biridir. Düşük sıcaklık değerlerinde (600°C) %18 varan oranlarda metan üretimi gerçekleşmektedir. Şekil 6.9’da metan oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Sıcaklık yükseldikçe metan oranı düşmektedir. 1400°C de çok önemsiz miktarlarda metan üretimi meydana gelmiştir. Sıcaklık arttıkça metanlaşma tepkimelerinin azaldığı görülmektedir. Ancak 1600°C’de yapılan deneyde metan da %18 gibi yüksek artış görülmektedir. 1400°C’ye kadar olan verilerin kaynaklara uygun olduğu görülmektedir.1200°C’de en fazla %5 ve [33]’de metan oluşmadığı kaynaklarda görülmektedir. Kaynaklardaki değerlerin oluşum şartları açıkça belirtilmemekte bu nedenle gaz arıtma işlemlerinden sonra ölçüldüğü tahmin edilmektedir.



Şekil 6.9 Metan oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.3.3 Hidrojen (H₂)

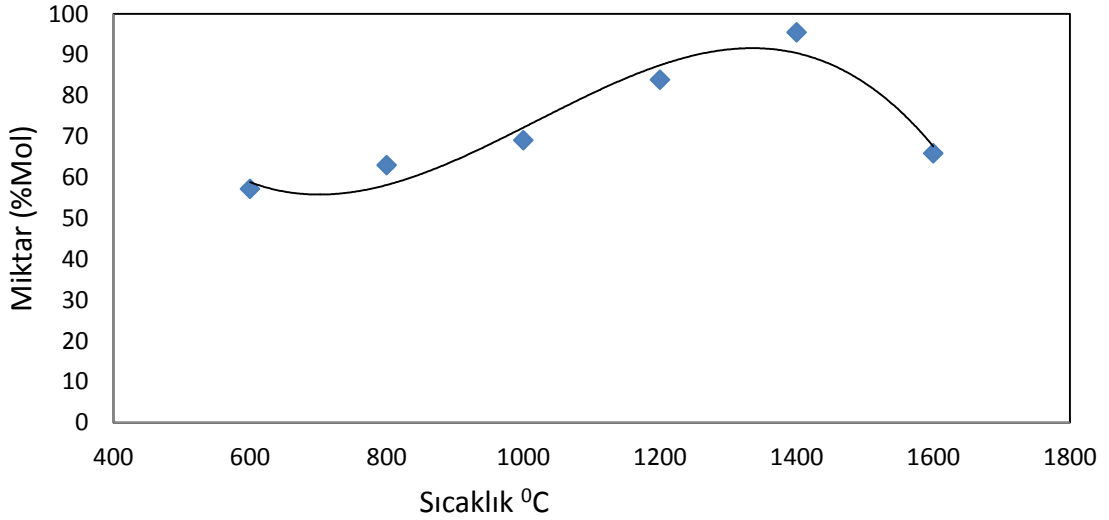
Şekil 6.10'da hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Hidrojen oluşumu 800°C den sonra artmaya başlamakta ve sürekli artan bir seyir göstermektedir. Kaynaklara uygun olmasına rağmen oranı oldukça düşük kalmaktadır. 1200°C'de %3 gibi en yüksek değere gelmekte ve sonrasında Kaynakların aksine düşmektedir. 1400-1600°C' de yapılan deneylerde yatay bir seyir görülmektedir. Bu da hidrojen veren tepkimelerin azaldığını göstermektedir. 1200°C'de Dodge [57] %25-30 ve Tendler [33] %28-36 gibi çok yüksek değerler vermektedir. Bu değerler olsa olsa çok iyi bir gaz temizleme proseslerinin sonunda elde edilebilir. Çünkü gazlaştırılan malzemelerin kimyasal yapıları incelendiğinde molar olarak %6-10 civarında hidrojen içermektedir. Oksijenle plazma gazlaştırma da göz önüne alındığında bu değerlerin elde edilmesi fiziken mümkün değildir.



Şekil 6.10 Hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.3.4 Karbon monoksit (CO)

En önemli gazlaştırma ürünlerinden biri de karbon monoksittir. Şekil 6.11’de karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda bile %67 gibi yüksek değerlerde oluşmaktadır. Özellikle 1400°C gibi yüksek sıcaklıklarda %95 gibi değerlere gelmiştir. Buda yüksek sıcaklıklarda karbondioksitin tepkimeye girerek karbon monoksit oluşturduğunu göstermektedir. Ancak 1600°C’de yapılan deneyde bir karbon monoksit düşüşü görülmektedir. Buda yüksek sıcaklıklarda tepkimelerin karbon monoksit azaltacak yönde geliştiğini göstermektedir. 1200°C’de Dodge [57] %30-60 ve Tendler [33] %42-44 gibi çok yüksek değerler vermektedir. Bu değerler deneysel çalışma sonuçlarına göre biraz düşük kalmaktadır. Hidrojen oranının yüksek gösterilmesinden dolayı düşük olduğu anlaşılmaktadır.

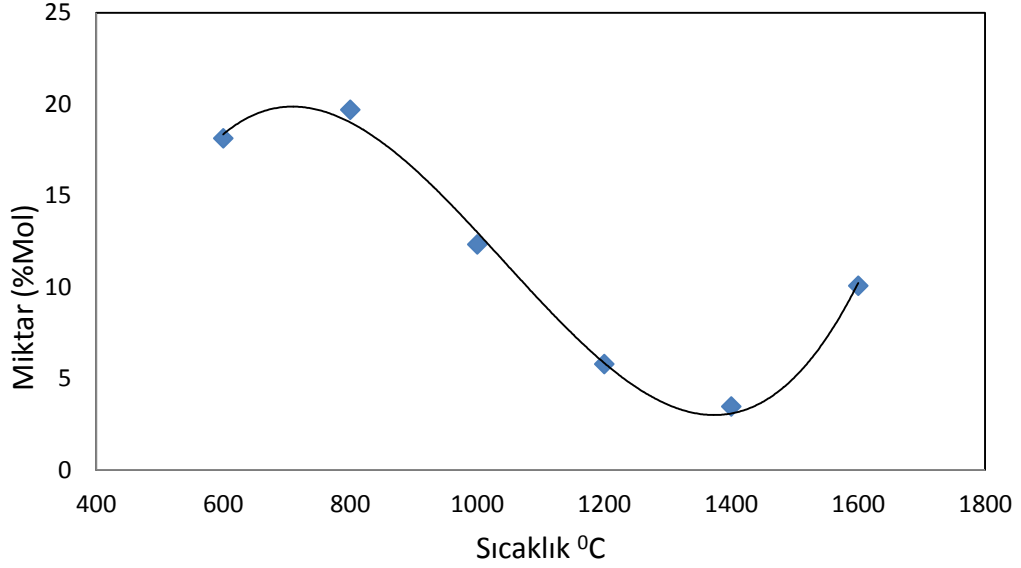


Şekil 6.11 Karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.3.5 Karbondioksit (CO₂)

Şekil 6.12’de Karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda gazlaştırma ürünü olarak karbon dioksit %20 gibi oranlara çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda ise %3 gibi çok düşük değerlere kadar düşmektedir. Bir enerji değeri olmadığından istenen bir ürün değildir. Özellikle 800°C den sonra düşmeye başladığı 1400°C’de %5 seviyesine kadar düştüğü görülmektedir. Ancak 1600°C’de yapılan deneyde ani bir %10 seviyesinde yükseliş görülmektedir. 1200°C’de Dodge [57] %5-15 ve Tendler [33] %0 gibi değerler bile kendi arasında bir tutarlılık

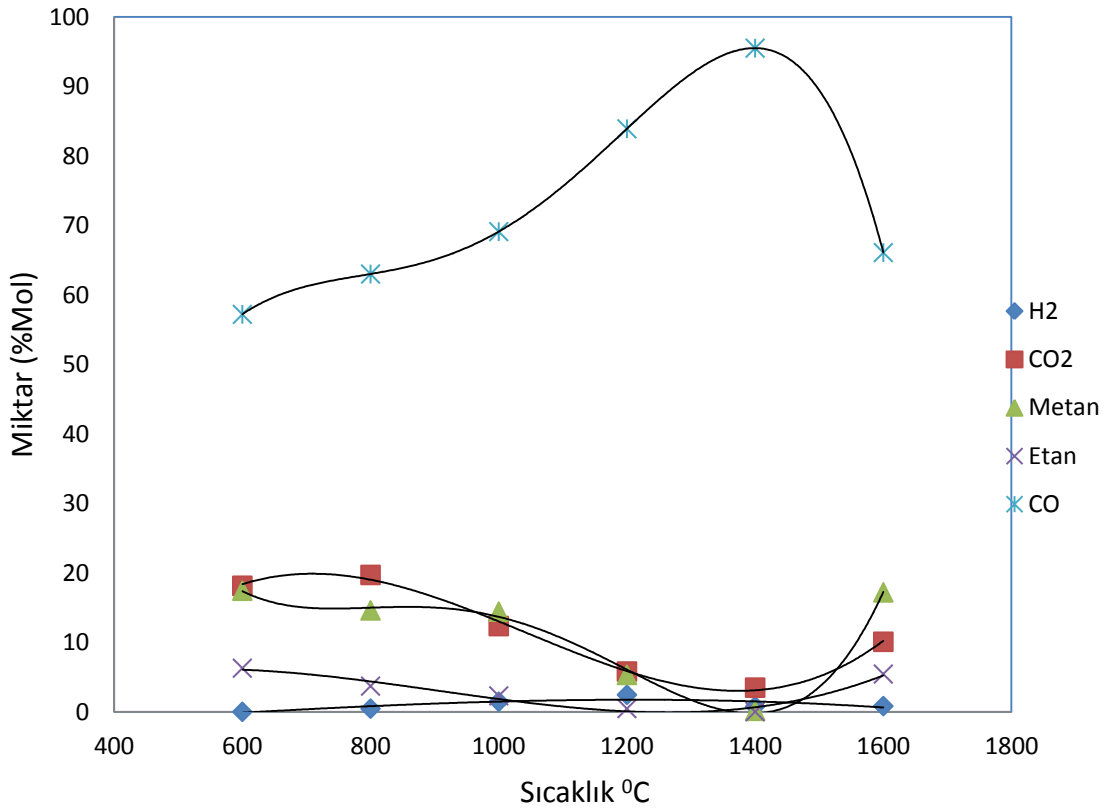
göstermemektedir. Ancak Dodge [57] değerleri deneysel çalışmadaki verilere oldukça yakın değerler vermektedir. Kaynaklarda deneylerin yapıış koşulları ve deney numunelerinin alınıő koşulları net olarak belirtilmediğinden daha gerçekçi değerlendirmeler yapmak mümkün olmamaktadır.



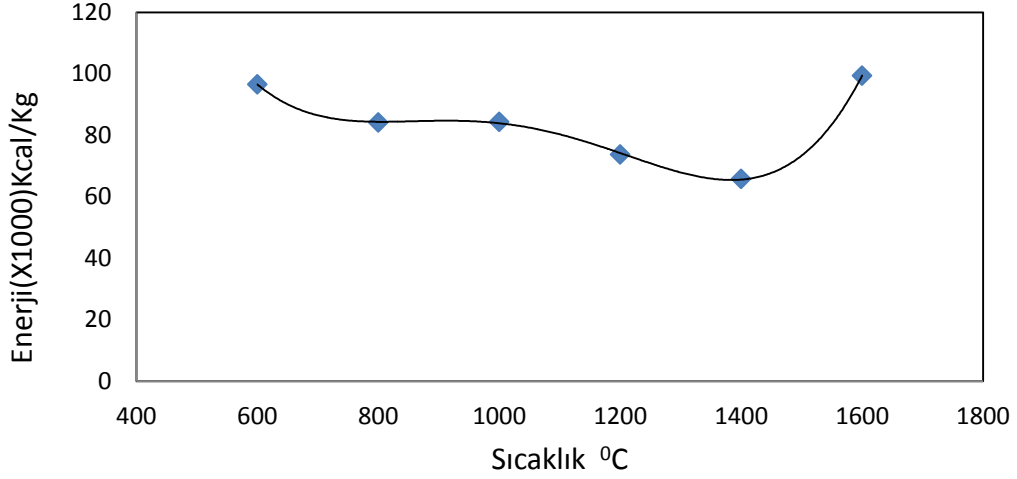
Şekil 6.12 Karbondioksit oluşumunun sıcaklıkla değişim

Şekil 6.13’de oksijenle plazma gazlaşma sonucu oluşan gazların değerleri toplu olarak görülmektedir. Hidrojen ve karbon monoksit sürekli artarken diğer gazlar düşmüştür. Karbon monoksit dışındaki ürünlerin 1400°C de oranlarının bir birini çok yaklaşırken karbon monoksit en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu durum kaynaklara ve gazlaşma tepkimelerine uygundur. Ancak 1600°C’de yapılan deneyde karbon monoksit ve hidrojen oranları düşerken buna bağılı olarak diğer gazların oranının arttığı görülmektedir. Buda yüksek sıcaklıklarda etan, metan ve karbon dioksit oluşacak şekilde tepkimelerin gerçekleştiğini göstermektedir. Kaynaklardaki verilerin alınıő koşulları net olarak verilmediğinden deneysel çalışmada elde ettiğimiz sonuçlarla sağlıklı bir şekilde karşılaştırılması mümkün olmamaktadır. Genellikle yaklaşık değerler verilmesi yanında gaz iyileştirme proseslerinden sonraki gaz karışım oranları verilmekte olduğu anlaşılmaktadır. Deneysel çalışma sonuçlarında oluşan su ölçülemediğinden dikkate alınmamıştır. Ancak bazı kaynaklar su oranlarını da vermekte ancak nasıl ölçüldüğü ile ilgili bir açıklama bulunmamaktadır.

Şekil 6.14'de gazlaştırma sonucu oluşan gazların alt ısı değerleri toplamının sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Karışım gazının hesaplanan alt ısı değeri oluşan yanıcı gazların ısı değeri olup sadece sıcaklık artışına bağlı olarak gazlaşma ürünlerinin ısı değerindeki değişimi vermektedir. Gazlaştırılan numunenin toplam ısı değeri değildir. Çünkü gazlaşma esnasında su (sıvı) ve siyah karbon (C) (katı) da oluşmaktadır. Isıl değer 800°C den sonra düşmeye başladığı 1400°C'ye kadar düştüğü ve 1600°C ise tekrar ısı değerinin yükseldiği görülmektedir. Bu da zaten gaz kompozisyonlarının değişimine uygundur ve yüksek sıcaklıklardaki gazlaşmada gazların ısı değerinin arttığını göstermektedir.



Şekil 6.13 Oksijenle Plazma gazlaştırma ürünü gazların oluşumunun sıcaklıkla değişimi



Şekil 6.14 Oksijenle Plazma gazlaştırma ürünü gazların A.I.D'nin sıcaklıkla değişimi

6.4 Buharla Plazma Gazlaştırma

Plazma gazlandırmada tepken olarak Buhar kullanılarak yapılan gazlaştırma deney sonuçları Çizelge 6.5'de verilmiştir. Bu çizelgeye gaz karışımındaki yanıcı gazların A.I.D hesaplanarak ilave edilmiştir. Aynı şartlarda yapılan deneylerde gaz oluşum grafikleri çizilirken en yüksek ısıl değere sahip deney verileri kullanılmıştır.

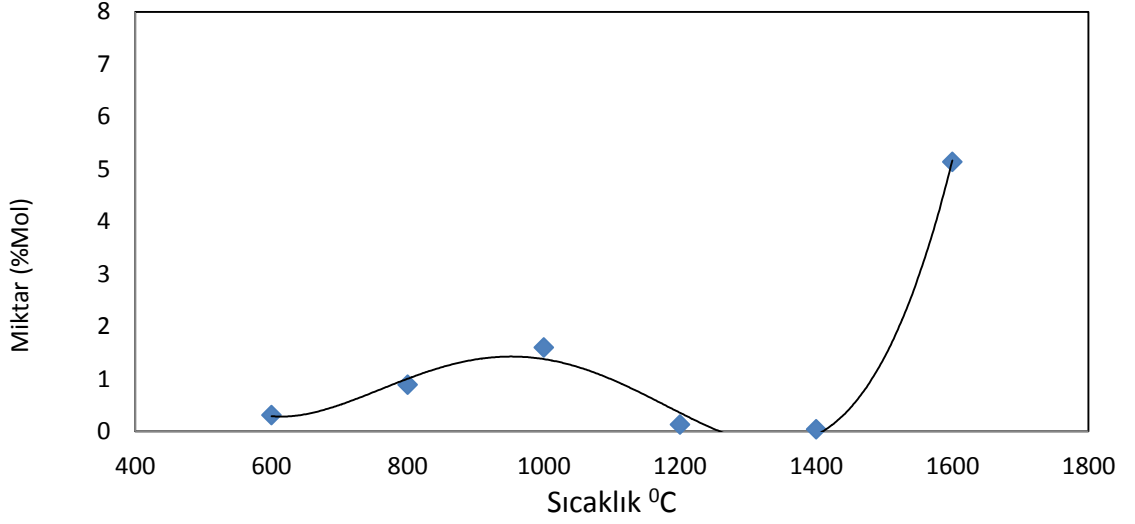
Çizelge 6.3 Buharla plazma gazlaştırma tablosu

Deney No	Metan%	Etan%	CO2%	CO%	H2%	A.I.D.Kcal/Kg	
21	2,8736293	0,1353949	6,137477	88,591382	2,161848	67585,45	1200°C +H ₂ O
23	0,4278399	0,0446368	3,061694	92,8232943	3,605197	66259,09	1400°C +H ₂ O
35	4,650918	0,3643017	42,2169	52,6853081	0	46187,76	600°C +H ₂ O
36	2,95467	0,3168668	35,06409	61,61557	0	48830,25	600°C +H ₂ O
37	6,5923512	0,8915498	21,82545	70,1694929	0,437312	64099,99	800°C +H ₂ O
38	8,872136	1,6060828	14,55122	73,202981	1,606699	73970,61	1000°C +H ₂ O
41	16,452917	5,1415812	11,31276	65,9342081	0,806032	96744,93	1600°C H ₂ O

6.4.1 Etan (C₂H₆)

Şekil 6.15'de Etan oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Yapılan deneylerde özellikle 1000°C de % 2 yi geçen oranda Etan çıktığı görülmektedir. Bir Kaynakta 1000°C %3 etan oluştuğu görülmektedir [8]. Bu veri deneysel bulgularla örtüşmekte ancak genellikle kaynaklar etanı değerlendirmeye almamaktadır [56]. Ancak 1600°C'de

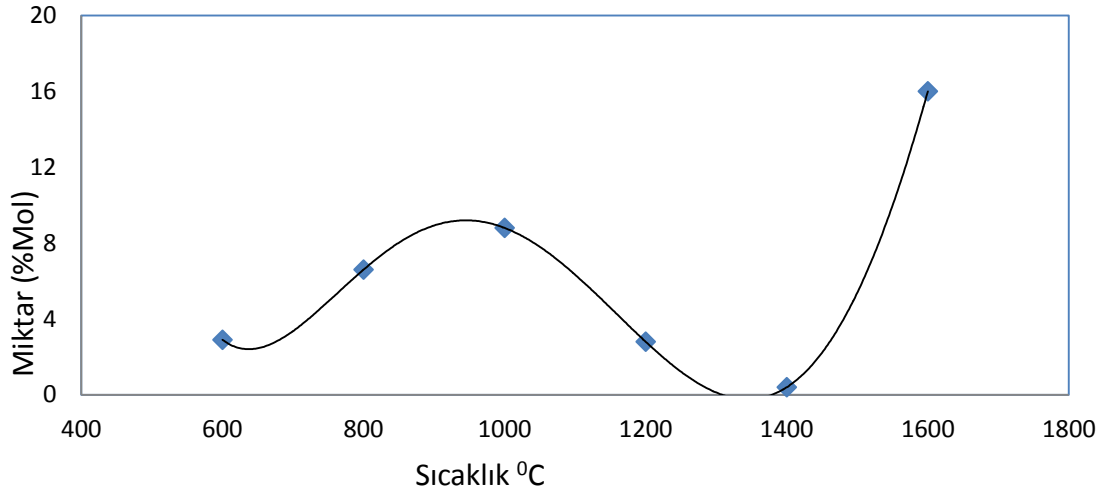
yapılan deneyde tekrar etan oranının %6 civarında arttığı görülmektedir. Buda buharla plazma gazlaştırmada yüksek sıcaklıklarda yüksek oranda etan oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 6.15 Etan oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.4.2 Metan (CH₄)

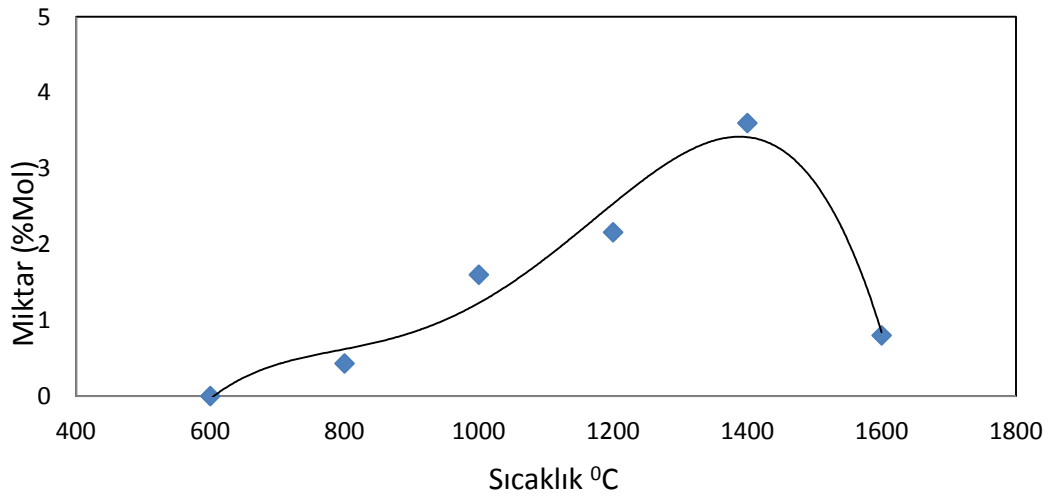
Gazlaştırma sürecinin en önemli ürünlerinden biridir. Şekil 6.16'da metan oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Sıcaklık yükseldikçe metan oranı yükselmektedir ve 1000°C %10 gibi en yüksek değere çıktıktan sonra düşmektedir. 1400°C de çok önemsiz miktarlarda metan üretimi meydana gelmiştir. Sıcaklık arttıkça metanlaşma tepkimelerinin azaldığı görülmektedir. Ancak 1600°C' de yapılan deneyde metan da %16 gibi yüksek artış görülmektedir. 1000-1200°C'ler de Kaynaklarda %2 civarında metan oluştuğu görülmektedir. Bu sonuç deneysel verilere uygun ancak diğer sıcaklık değerleri verilerde olmadığı için bir karşılaştırma yapılamamaktadır[8],[56],[58].



Şekil 6.16 Metan oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.4.3 Hidrojen (H₂)

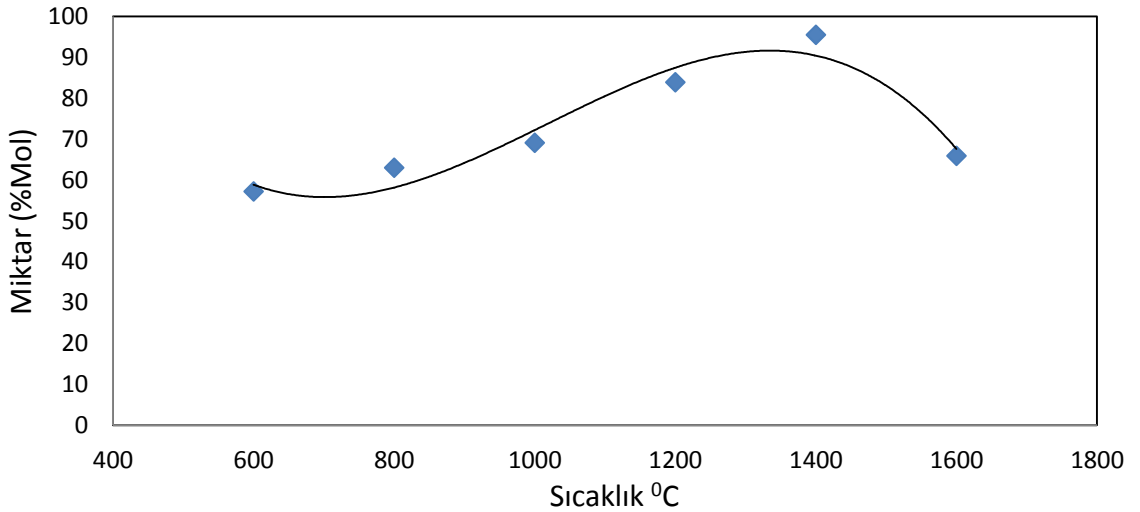
Şekil 6.17’de hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Hidrojen oluşumu 600°C’den sonra artmaya başlamakta ve sürekli artan bir seyir göstermektedir. Kaynaklara uygun olmasına rağmen oranı biraz düşük kalmaktadır. 1400°C’de %3 gibi en yüksek değere gelmekte ve sonrasında düşmektedir. Ancak 1600°C’de yapılan deneyde düştüğü görülmektedir. Buda hidrojen veren tepkimelerin azaldığını göstermektedir. Kaynaklarda 1000°C’de, %10 [8] ve %42 [56] gibi oldukça yüksek değerlerde hidrojen oluştuğu belirtilmektedir. Ancak bunlarda sıcaklık dışında diğer veriler olmadığı için bir kıyas yapmak mümkün olmamaktadır. Gaz zenginleştirme işlemlerinden sonraki veriler gibi gözükmemektedir.



Şekil 6.17 Hidrojen oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.4.4 Karbon monoksit (CO)

En önemli gazlaştırma ürünlerinden biri de Karbon monoksittir. Şekil 6.18’de karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda bile % 60 gibi yüksek değerlerde oluşmaktadır. Özellikle 1400°C gibi yüksek sıcaklıklarda %92 gibi değerlere gelmiştir. Buda yüksek sıcaklıklarda Karbondioksitin tepkimeye girerek karbon monoksit oluşturduğunu göstermektedir. Ancak 1600°C’de yapılan deneyde bir Karbon monoksit düşüşü görülmektedir. Buda yüksek sıcaklıklarda tepkimelerin Karbon monoksit azaltacak yönde geliştiğini göstermektedir. Kaynaklarda 1000°C’de %28 [8] ve %58 [56] oranında CO oluştuğu belirtilmektedir. Bu deneysel verilerin kaynaklarla paralellik arz ettiğini göstermektedir. Ancak kaynaklar tüm şartları vermediği için aynı şartlar aynı sonuçları vermektedir denilememektedir. Özellikle kaynak [56]’da Hrabovsky ve Hlima’nın verdiği sonuçların gaz iyileştirme proseslerinden geçtikten sonra verilen sonuçlar olduğu açıkça görülmektedir.



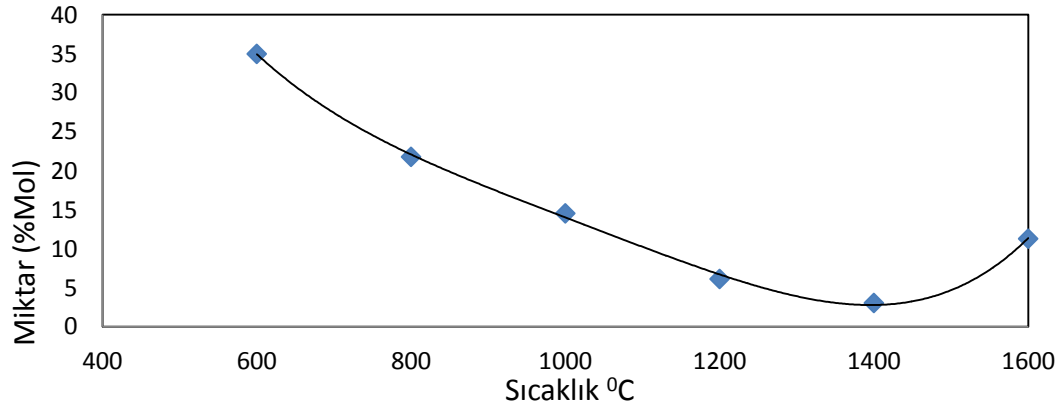
Şekil 6.18 Karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişim

6.4.5 Karbondioksit (CO₂)

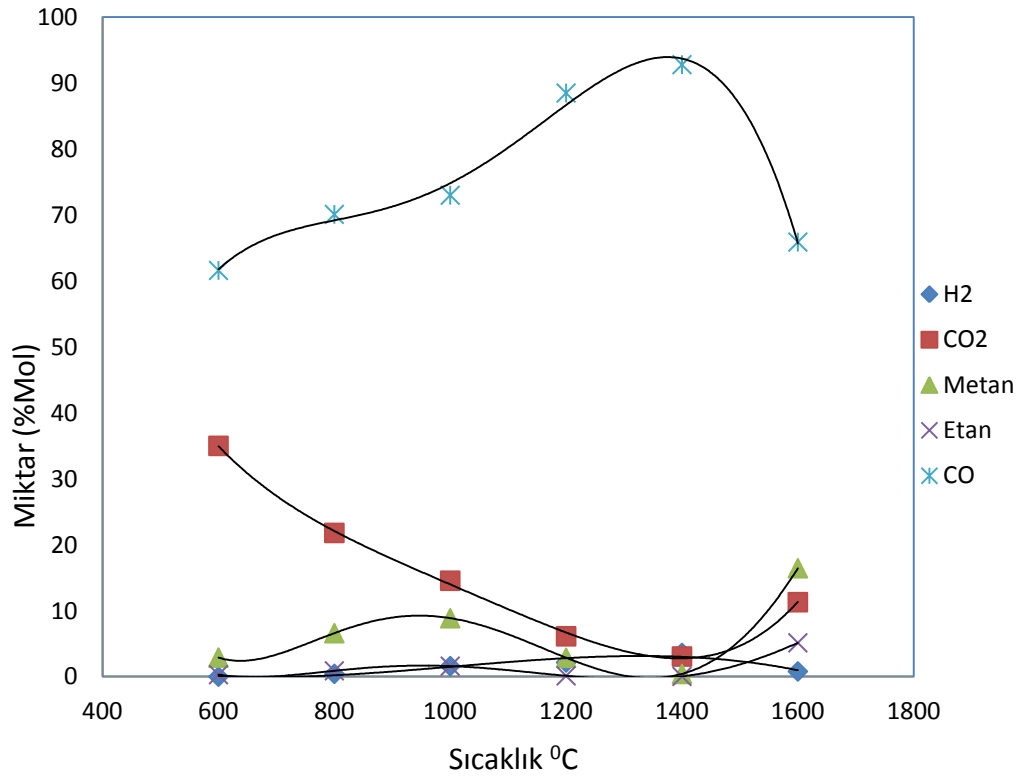
Şekil 6.19’da karbon monoksit oluşumunun sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda gazlaştırma ürünü olarak karbon dioksit %35 gibi oranlara çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda ise %5 gibi çok düşük değerlere kadar düşmektedir. Bir enerji değeri olmadığından istenen bir ürün değildir. Kaynaklara uygun olarak 1400°C’de %5 seviyesine kadar düştüğü görülmektedir. Ancak 1600°C’ de yapılan deneyde ani bir

karbon dioksit %10 seviyesinde yükseliş görülmektedir. Zang [8], ancak 1000°C'de % 12 karbondioksit oluştuğunu belirtmektedir. Diğer bir kaynakta ise [56] karbondioksit değeri % 0 olarak görülmektedir. Bu sıfır CO₂ değeri gaz iyileştirme proseslerinden geçtiğini açıkça göstermektedir.

Şekil 6.20'de buharla plazma gazlaşma sonucu oluşan gazların değerleri toplu olarak görülmektedir. Hidrojen ve karbon monoksit sürekli artarken diğer gazlar düşmüştür.



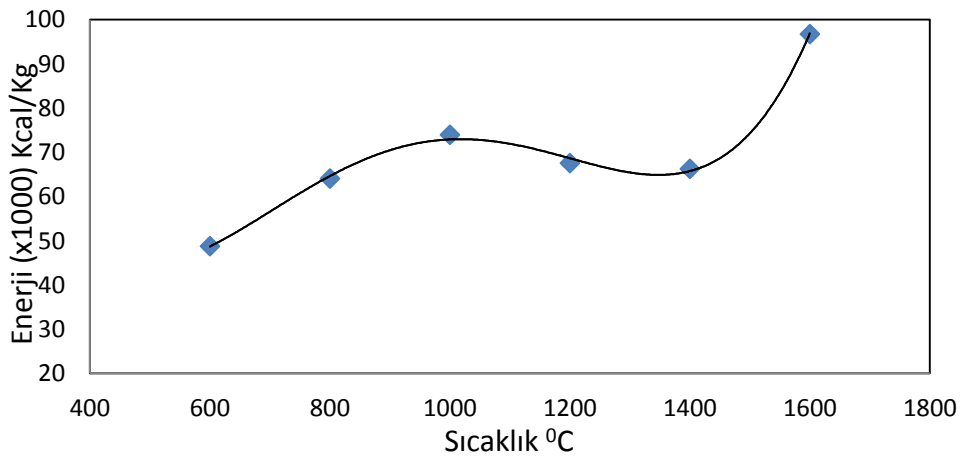
Şekil 6.19 Karbon dioksit oluşumunun sıcaklıkla değişim



Şekil 6.20 Buharla Plazma gazlaştırma ürünü gazların oluşumunun sıcaklıkla değişimi

Karbon monoksit dışındaki ürünlerin 1400°C de oranlarının bir birini çok yaklaşırken karbon monoksit en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu durum kaynaklara ve gazlaşma tepkimelerine uygundur. Ancak 1600°C'de yapılan deneyde karbon monoksit ve hidrojen oranları düşerken buna bağlı olarak diğer gazların oranının arttığı görülmektedir. Buda yüksek sıcaklıklarda etan, metan ve karbon dioksit oluşacak şekilde tepkimelerin gerçekleştiğini göstermektedir.

Şekil 6.21'de buharla plazma gazlaştırma sonucu oluşan gazların alt ısıl değerleri toplamının sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Karışım gazının hesaplanan alt ısıl değeri oluşan yanıcı gazların ısıl değeri olup sadece sıcaklık artışına bağlı olarak gazlaşma ürünlerinin ısıl değerindeki değişimi vermektedir. Gazlaştırılan numunenin toplam ısıl değeri değildir. Çünkü gazlaşma esnasında su (sıvı) ve siyah karbon (C) (katı) da oluşmaktadır. Isıl değer 1000°C den sonra düşmeye başladığı 1400°C'ye kadar düştüğü ve 1600°C ise tekrar ısıl değer yükseldiği görülmektedir. Bu da zaten gaz kompozisyonlarının değişimine uygundur ve yüksek sıcaklıklardaki gazlaşmada gazların ısıl değerinin arttığını göstermektedir.



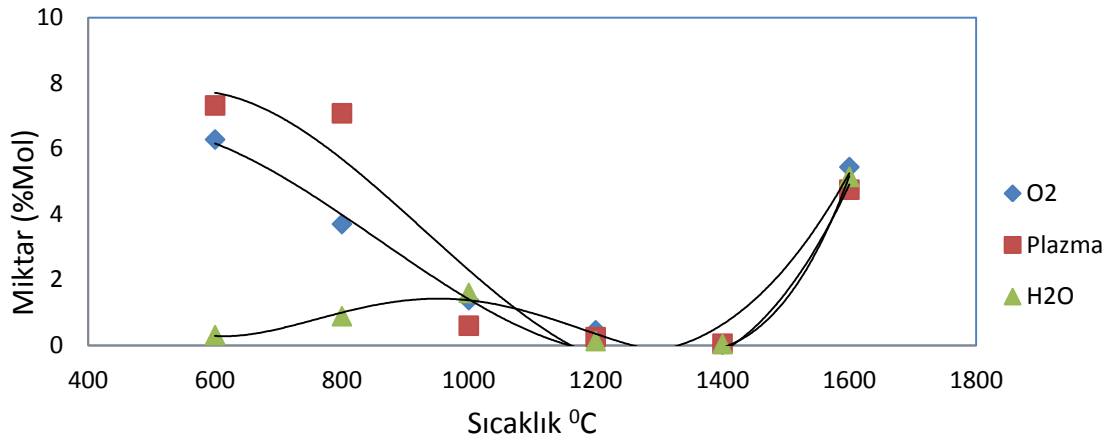
Şekil 6.21 Buharla Plazma gazlaştırma ürünü gazların A.I.D'nin sıcaklıkla değişimi

6.5 Gaz ürünlerin Plazma, Buharla Plazma ve Oksijenle Plazma gazlaştırma sonuçlarının kıyaslanması

Her üç yöntemle yapılan gazlaştırmada gaz ürünün farklı sıcaklıklarda oluşum miktarları kıyaslanarak istenen gazlaştırma ürününün hangi değerlerde elde edileceği tespit edilmektedir.

6.5.1 Etan (C₂H₆)

Kaynaklarda, genellikle 1000°C'nin altında yapılan gazlaştırmalarda hacimsel olarak %0,15 -1,6 ve molar olarak %3-5 Etan oluştuğu görülmektedir [3], [28], [17], [10], [26]. Düşük sıcaklıklarda plazma ve oksijenle plazma gazlaştırmada %7 gibi yüksek oranlarda etan oluşurken buharla plazma gazlaştırmada önemsiz bir miktarda etan oluşmaktadır. 1000°C civarında yaklaşık olarak her üç yöntemde de oluşan etan miktarı bir birine yaklaşmakta ve sonrasında önemsiz bir miktara inmektedir. Ancak 1600°C'de her üç yöntemde de etan oluşumu artmakta ve %6 civarına çıkmaktadır. Şekil 6.22'de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda en çok etan oluşumu plazma gazlaştırmada meydana gelirken yüksek sıcaklıklarda oksijenle plazma gazlaştırmada meydana gelmektedir.

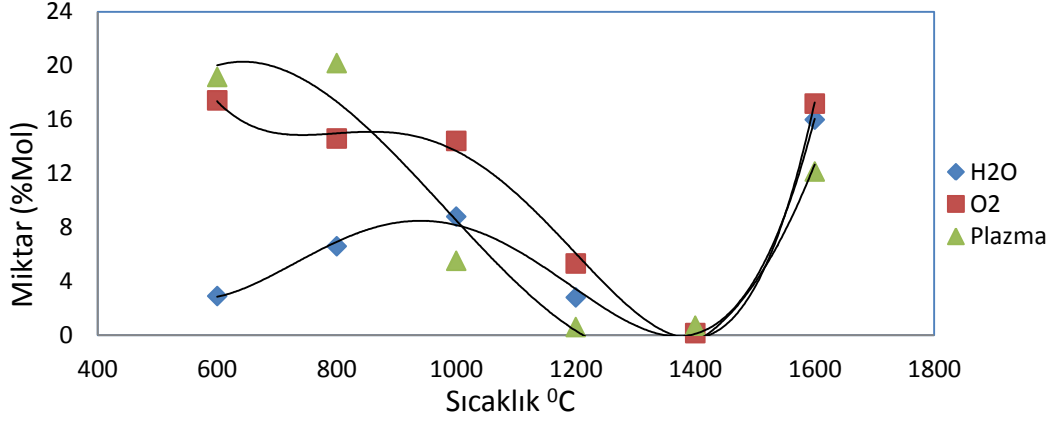


Şekil 6.22 Etan oluşumu kıyaslanması

6.5.2 Metan (CH₄)

Kaynaklarda, genellikle 1000°C'nin altında yapılan gazlaştırmalarda hacimsel olarak %2,18-3 ve molar olarak %3-19,89 oranında Metan oluştuğu görülmektedir[3], [4], [10], [13], [15], [17], [26],[28], [31], [58].1000°C'nin üstünde ise metan üretimi önemsiz bir değerde olmaktadır[35]. Düşük sıcaklıklarda plazma ve oksijenle plazma gazlaştırmada %18 gibi yüksek oranlarda metan oluşurken buharla plazma gazlaştırmada önemsiz bir miktarda metan oluşmaktadır. 1000°C civarında buharla plazma gazlaştırmada %8 gibi bir oranda metan oluşmaktadır.1400°C yaklaşık olarak her üç yöntemde de oluşan metan miktarı bir birine yaklaşmakta ve sonrasında önemsiz bir miktara inmektedir. Ancak 1600°C'de buharla ve oksijenle plazma yöntemde metan oluşumu artmakta ve % 18 civarına çıkmaktadır. Plazma

gazlaştırmada ise %13 de kalmaktadır. Şekil 6.23’de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda en çok metan oluşumu plazma gazlaştırmada meydana gelirken yüksek sıcaklıklarda oksijenle plazma gazlaştırmada meydana gelmektedir. Kaynaklarda 1400°C’nin üzerinde böyle bir çalışmaya rastlanmamıştır.



Şekil 6.23 Metan oluşumu kıyaslanması

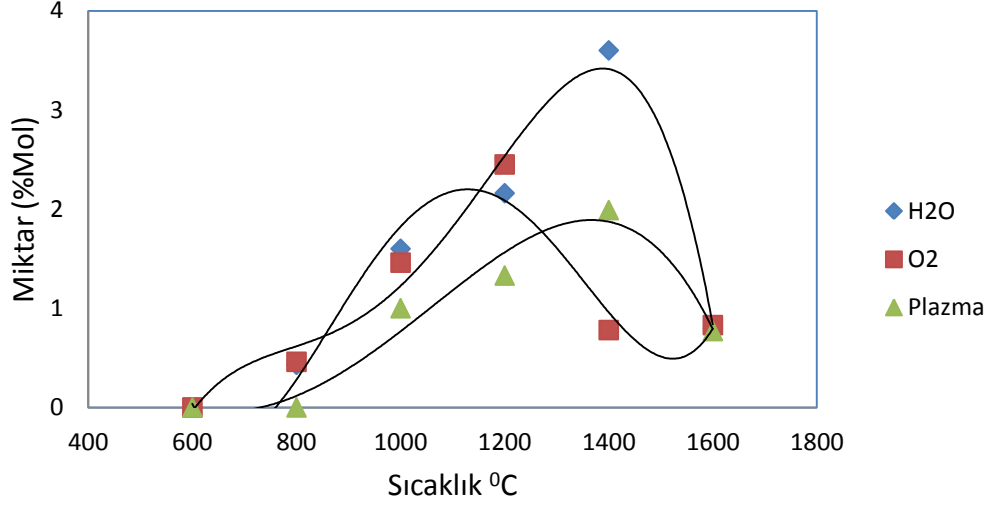
6.5.3 Hidrojen (H₂)

Kaynaklarda, genellikle 1000°C’nin altında yapılan gazlaştırmalarda hacimsel olarak %7,2 ve molar olarak %2,2-21,2 ile 1000°C’nin üstünde hacimsel olarak %25,3 ve molar olarak %19,8-45,69 oranında Hidrojen oluştuğu görülmektedir[3], [4], [10], [13], [15], [17], [26],[28], [31], [33], [35],[58].

Şekil 6.24’de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda 800°C’ye kadar her üç yöntemde de hidrojen oluşumu önemsiz bir miktarda bulunmaktadır. 1200°C civarında oksijenle plazma gazlaştırmada %2,5 gibi en yüksek değere çıkmaktadır.1400°C’ye kadar plazma ve buharla plazma gazlaştırmada hidrojen üretimi sürekli artmakta ve en yüksek değer %3,5 buharla plazma gazlaştırmada elde dilmektedir. Ancak 1600°C de her üç yöntemde de hidrojen üretimi azalmakta ve bir birine eşit hale gelmektedir.

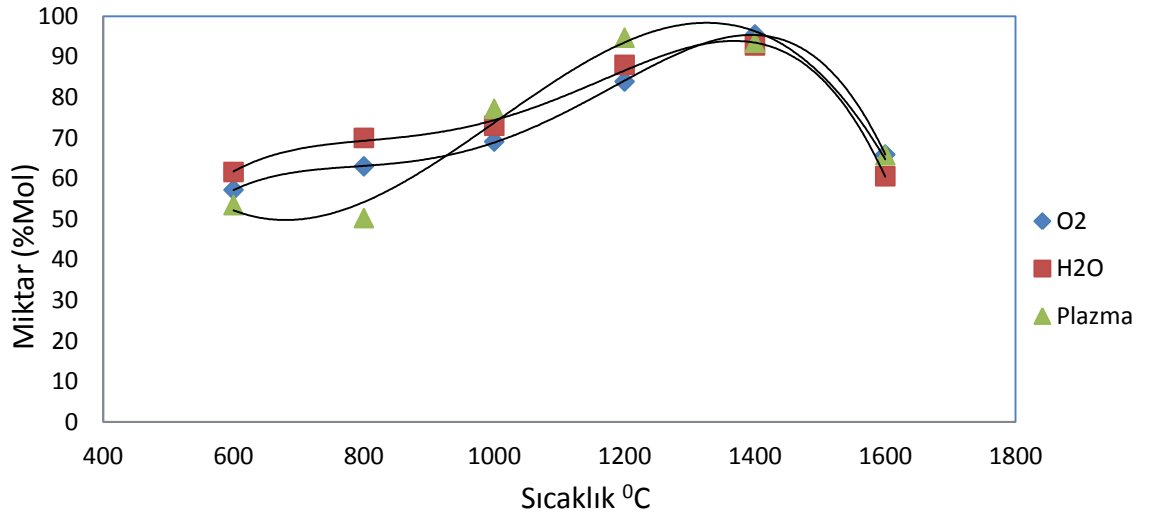
6.5.4 Karbon monoksit (CO)

Kaynaklarda, genellikle 1000°C’nin altında yapılan gazlaştırmalarda hacimsel olarak %9,4 ve molar olarak %2-43,1 ile 1000°C’nin üstünde hacimsel olarak %9,4 ve molar olarak %23,45-31,4 oranında Karbon monoksit oluştuğu görülmektedir [3], [4], [10], [13], [15], [17], [26],[28], [31], [33], [35],[58].



Şekil 6.24 Hidrojen oluşumu kıyaslanması

Şekil 6.25'de görüldüğü gibi her üç gazlaştırma yönteminde de genel olarak 1400°C'ye kadar Karbon monoksit miktarı artmakta ve %90'ları bulmaktadır. 1600°C'de ise 600°C'de olduğu gibi %60'lara kadar düşmekte ve bir birine çok yakın değerlere gelmektedir.

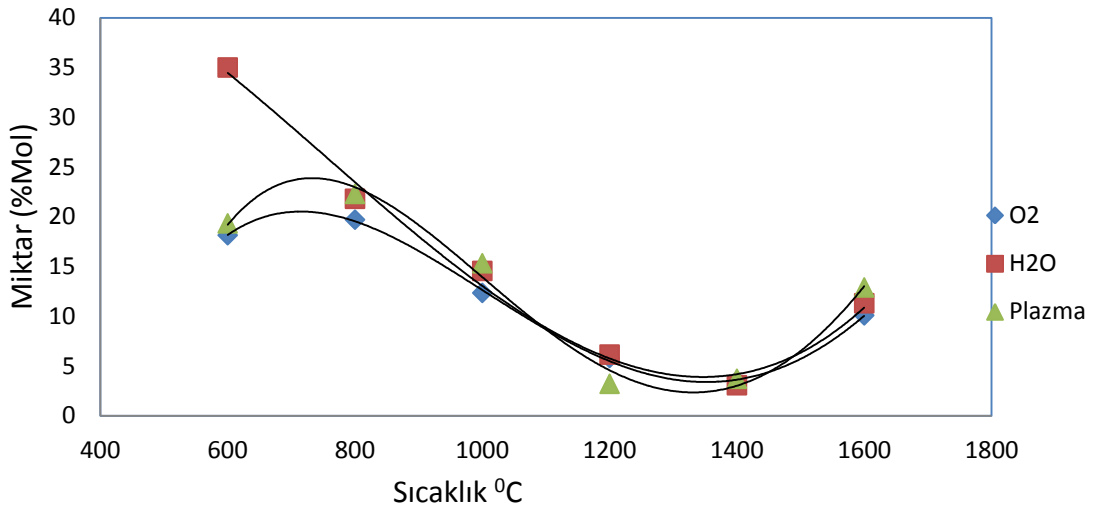


Şekil 6.25 Karbon monoksit oluşumu kıyaslanması

6.5.5 Karbondioksit (CO₂)

Kaynaklarda, genellikle 1000°C'nin altında yapılan gazlaştırmalarda hacimsel olarak %17,1 ve molar olarak %13,46-19 ile 1000°C'nin üstünde hacimsel olarak %25,3 ve molar olarak %9,52-22,12 oranında Karbondioksit oluştuğu görülmektedir[3], [4], [10], [13], [15], [17], [26],[28], [31], [33], [35],[58].

600°C'de buharla plazma gazlaştırmada %35 mertebesinde karbondioksit oluşurken plazma ve oksijenle plazma gazlaştırmada ise %20 mertebesinde karbondioksit oluşmaktadır. Şekil 6.26'da görüldüğü gibi daha yüksek sıcaklıklarda ise her üç yöntemde de değerler bir birine yakın seyretmektedir. 1400°C'ye kadar %5 mertebesine kadar düşme sürmekte ve 1600°C'de %15'e kadar yükselmektedir. Düşük sıcaklıklarda en yüksek değer buharla plazma gazlaştırmada görülürken yüksek sıcaklıklarda plazma gazlaştırmada görülmektedir.



Şekil 6.26 Karbondioksit oluşumu kıyaslanması

6.6 Farklı Gazlaştırıcılara göre gazlaştırma ürünlerinin AID değerlerinin değişimi

Şekil 6.27'de plazma, oksijenle plazma ve buharla plazma gazlaştırma gaz ürünlerin AID değerlerinin sıcaklıkla değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda plazma ve oksijenle plazma gazlaştırma ürünlerinin yüksek ısı değere sahip olduğu, buharla plazma gazlaştırmada ise düşük olduğu görülmektedir. Buharla plazma gazlaştırmada 1000°C'de en yüksek değere çıkmaktadır. 1400°C'de gaz ürünlerin ısı değeri her üç gazlaştırma için yaklaşık olarak aynı ısı değeri vermekte ve en düşük değerdedir. 1600°C'de ise tüm değerler en yüksek ısı değere yaklaşmakta, sırasıyla plazma, buharla plazma ve oksijenle plazma gazlaştırma olarak en yüksek değere ulaşmaktadır. Buharla plazma gazlaştırma düşük sıcaklıklarda düşük ısı değeri verirken yüksek sıcaklıklarda yüksek ısı değeri verdiği açıkça görülmektedir. Plazma ve oksijenle plazma gazlaştırmada düşük sıcaklık değerlerinde en yüksek ısı değere sahip gaz ürünler oluşmaktadır.

Kaynaklarda olduğu gibi Şekil 6.27 görüldüğü gibi 1000°C civarında en verimli gazlaşma gerçekleşmektedir[58]. Bu nedenle bu güne kadar yapılan çalışmalarda ve gazlaştırma tesislerinde nominal sıcaklık hep 1000°C olarak seçilmiş ve sonrasında oluşan problemlerin çözümü için kül ergitme, gaz zenginleştirme gibi ilave sistemler yapılmıştır.

Şekil 6.27 görüldüğü gibi 1600°C' de yapılan gazlaştırma da gaz ürünlerin enerji değeri yüksektir ve tüm inorganik maddeler bu sıcaklıkta ergidiğinden ilave ergitme sistemine ihtiyaç yoktur. Yine bu sıcaklıkta doğrudan tepkenler ilave edilerek gaz ürünler zenginleştirilmesine imkân vermektedir.

6.7 Gazlaştırma esnasında oluşan Oksijen

Plazma Gazlaştırma reaktörüne numuneler serbest düşme ile girmektedir. Her ne kadar argon gazıyla pozitif basınç oluşturulup süpürme yapılıyor ise de difüzyon etkisiyle hava kaçakları meydana gelmektedir. Oksijenle plazma gazlaştırmada saf oksijen verilmektedir. Bu nedenle gazlaştırma esnasında tepkimeye girmeden çıkan oksijen moleküllerinin bulunması mümkündür. Ancak buharla plazma gazlaştırma ve plazma gazlaştırmada hava kaçakları dışında oksijen girişi mümkün değildir. Numuneler bünyesine azot bulunmadığından azot girişi havadan olmaktadır. Çizelge 6.2'de N₂ sütunu değerleri havadaki oksijen miktarının 1/4 azot miktarı olduğu göz önüne alınarak bulunan değer O₂ sütunundaki değerden çıkarılarak tepkime esnasında % kaç oranında oksijen olduğu Çizelge 6.6'da oksijen sütununda verilmiştir. Bu sütundaki (-) değerler havadan gelen oksijenin gazlaştırma esnasında tepkimeye girdiğini, diğer değerler ise gazlaştırma esnasında tepkime sonucu oksijen molekülü oluştuğunu göstermektedir. gaz analizlerinde % 14'lere varan miktarda oksijen görülmektedir.

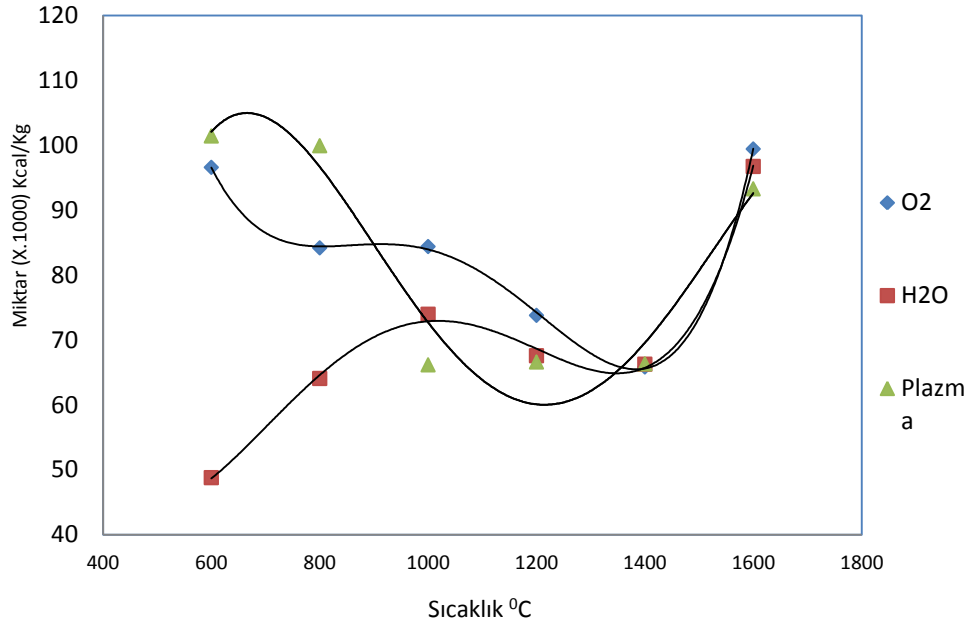
Çizelge 6.6'da plazma gazlaştırmada 1000-1200°C sıcaklıkta yapılan gazlaştırmalarda havadan girmiş oksijenin tepkimeye kullanıldığı görülmektedir. Diğer sıcaklıklarda ise tepkimedeki oksijen molekülü oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 6.6'da buharla plazma gazlaştırmada 1000°C havadan gelen oksijenin tepkimeye girdiği ve özellikle metan oluşumunun yüksek olduğu düşük sıcaklıklarda

gazlaştırmada daha yüksek oranda olmak üzere tepkimedey oksijen molekülü oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 6.4 Plazma ve buharla plazma gazlaştırma deneylerinde çıkan oksijen miktarları

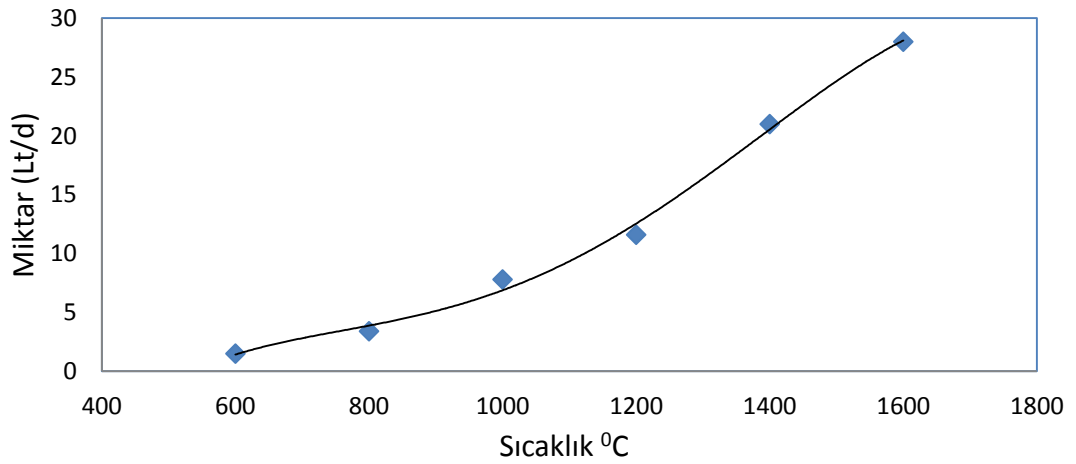
D. No	Metan%	Etan%	CO2%	CO%	H2%	TOPLAM	Oksijen %	
2	4,104	0,343	18,317	76,557	0,679	100	-2,306	1000°C
7	5,540	0,630	15,361	77,368	1,101	100	-2,284	1000°C
10	2,591	0,137	18,629	78,232	0,412	100	-8,254	1200°C
12	3,319	0,234	14,872	80,957	0,618	100	-5,848	1200°C
15	20,095	7,106	22,375	50,425	0,000	100	1,185	800°C
18	0,690	0,258	2,950	95,793	0,309	100	2,194	1200°C
20	3,478	0,189	6,255	87,334	2,744	100	3,691	1300°C
22	0,117	0,014	3,396	95,563	0,910	100	7,156	1400°C
24	0,604	0,059	3,225	94,772	1,339	100	5,489	1200°C
26	0,686	0,061	3,717	93,539	1,997	100	6,254	1400°C
29	19,318	7,383	19,475	53,824	0,000	100	8,928	700°C
31	16,684	4,004	13,417	65,684	0,210	100	11,556	800°C
40	15,556	4,772	12,935	65,961	0,776	100	7,441	1600°C
11	5,329	0,368	13,575	79,832	0,895	100	-5,468	1000°C H2O
21	2,877	0,136	6,144	88,680	2,164	100	5,770	1200°C H2O
23	0,428	0,045	3,063	92,858	3,607	100	2,318	1400°C H2O
35	4,655	0,365	42,252	52,729	0,000	100	12,991	600°C + H2O
36	2,956	0,317	35,081	61,646	0,000	100	14,442	600°C + H2O
37	6,598	0,892	21,844	70,228	0,438	100	12,303	800°C + H2O
38	8,886	1,609	14,575	73,321	1,609	100	10,038	900°C + H2O
41	16,511	5,160	11,353	66,167	0,809	100	5,756	1600°C H2O



Şekil 6.27 Gazlaştırıcılara göre gazlaştırma ürünü gazların A.I.D'nin sıcaklıkla değişiminin kıyaslanması

6.8 Gazlaştırma Hızı

Şekil 6.28'de gaz debisinin gazlaştırma sıcaklığı ile değişimi görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda 600-1000°C arasında debi yavaş artmaktadır. 1400°C kadar hızlı bir artış olduğu görülmektedir. 1600°C'deye doğru artış azalmaktadır. Düşük sıcaklıklarda kül olduğundan kül içinde hala organik maddeler bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kül ergidiğinden inorganik maddeler eriyik olarak reaktörü terk ederken organik maddelerin tamamı gazlaşmaktadır. Bu nedenle çıkan gaz miktarı sürekli artmaktadır.



Şekil 6.28 Plazma gazlaştırma gaz debisinin sıcaklıkla değişimi

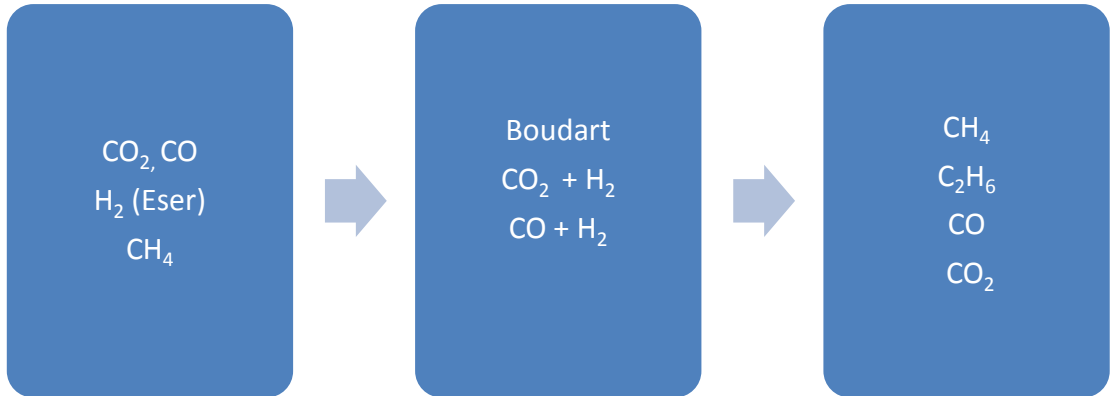
6.9 Gazlaştırmanın Mekanizması ile Bulguların Nedenselleştirilmesi.

6.9.1 Plazma Gazlaştırma Kinetiği

Plazma gazlaştırmada en önemli parametre Şekil 2.7’de görüldüğü gibi sıcaklık olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda endotermik veya ekzotermik tüm tepkimelerin Kp denge sabitinin aynı noktada birleştiği görülmektedir. Bu da bize yüksek sıcaklıklarda tüm moleküllerin atomlarına ayrıştığını göstermektedir. Böylece tepkimeler çok hızlı bir şekilde gelişmekte ve yeni moleküller oluşmaktadır. Pek çok zincir tepkime saniyeden çok daha kısa zamanda gerçekleşmektedir.

Kinetik çalışma bu çalışmanın konusu değildir. Ancak tepkimenin nasıl olduğu ürünlerin sıcaklıkla değişiminden bellidir. Şekil 6.29’da yüksek sıcaklıktaki tepkime mekanizmasının üç kademedeki çok hızlı gerçekleştiği varsayılmıştır.

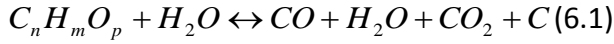
Deneyde düşük sıcaklıklarda buhar hem sistemden entalpi soğuruyor hem de tepkimeleri ilerletmeye katkısı yok. Aynı zamanda buharın varlığı oksijenin faaliyetini tutmaktadır. Oysa yüksek sıcaklıklarda diğerleri gibi etan, metan ve hidrojen lehine faydalı olmaktadır.



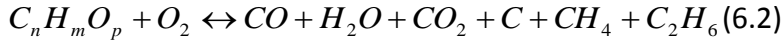
Şekil 6.29 Yüksek sıcaklıkta ön görülen tepkime mekanizması

Şekil 6.22-23’de plazma gazlaştırma ve oksijenle plazma gazlaştırmada 600°C’de metan ve etan oranının buharla plazma gazlaştırmaya göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 6.24’de görüldüğü gibi çok az hidrojen oluşması Daha kararlı bir molekül olan suyun tepkimeye girmediği ve de atık bünyesinde bulunan hidrojeninde suya dönüştüğünü göstermektedir.

Buharla plazma gazlaştırma;

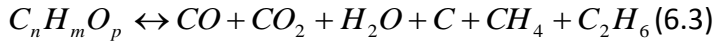


Oksijenle plazma gazlaştırma;



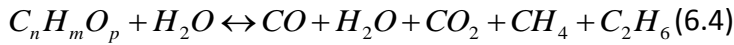
Bu temel tepkimede karbon düşük sıcaklıklarda parçacık (is) olarak kendini göstermektedir. $CH_4 + C_2H_6$ düşük sıcaklıklarda görülmekte 1000°C ile 1200°C arasında görülmemektedir. 1400°C üstünde ise fırlamaktadır. 1600°C üstü sıcaklıklarda deney yapılamadığından bu sıcaklıktan sonraki değişim görülememektedir.

Plazma gazlaştırma;

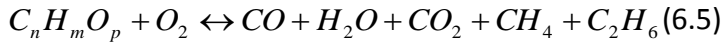


1600°C'de ise yüksek sıcaklıklarda tüm tepkimelerin endotermik yönde ilerlemesi nedeniyle her üç tip gazlaştırmada da yaklaşık olarak aynı ürünler yakın oranlarda oluşmuştur [38].

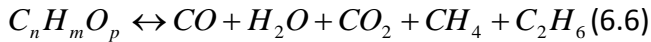
Buharla plazma gazlaştırma;



Oksijenle plazma gazlaştırma;

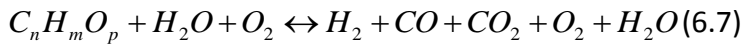


Plazma gazlaştırma;

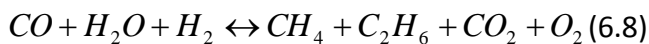


Yüksek sıcaklıkta tüm karbon tepkimeye girdiği için gazlaştırma sonu ürün olarak siyah karbon çıkmamaktadır.

Şekil 6.4,11 ve 18'de görüldüğü gibi 1400°C' yüksek oranda (%95) CO oluşmaktadır.



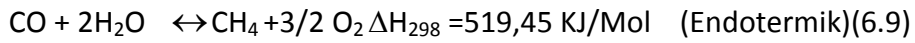
Tepkimesinin oluştuğu görülmektedir.1600°C'den sonra tepkimenin endotermik yönde meydana gelmesi sonucu HC bileşikleri oluşmuş ve CO miktarı düşmüştür.



Tepkimesinin oluştuğu Şekil 6.22-26 ve Çizelge 6.6'da açıkça görülmektedir.

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi yüksek sıcaklıklarda tüm reaksiyonları oluşum hızları bir birine eşit hale gelmektedir. Yüksek sıcaklığa bağlı olarak tüm tepkimeler endotermik yönde gelişmektedir. Şekil 6.27’de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda buharla plazma gazlaştırmada gaz ürünlerin enerji değerinin düşük olması katı haldeki karbon atomunun tepkimeye girmediğini göstermektedir. Buharla karbonun tepkime vermemesi yanıcı gazların oluşumunu engellemektedir. Daha yüksek sıcaklıklara gelindiğinde karbonun aktivitesi artmakta ve buharla tepkimeye girmektedir. Dolayısıyla düşük sıcaklıklarda buharla plazma gazlaştırmada siyah karbon oluşumu maksimum düzeye gelmektedir. Siyah karbon üretimi için uygun şartlar oluşmaktadır.

1600°C’de,



Tepkimesinin oluştuğu her üç türdeki plazma gazlaştırmadaki CO azalması ve oksijen, metan ve etan üretiminden anlaşılmaktadır.

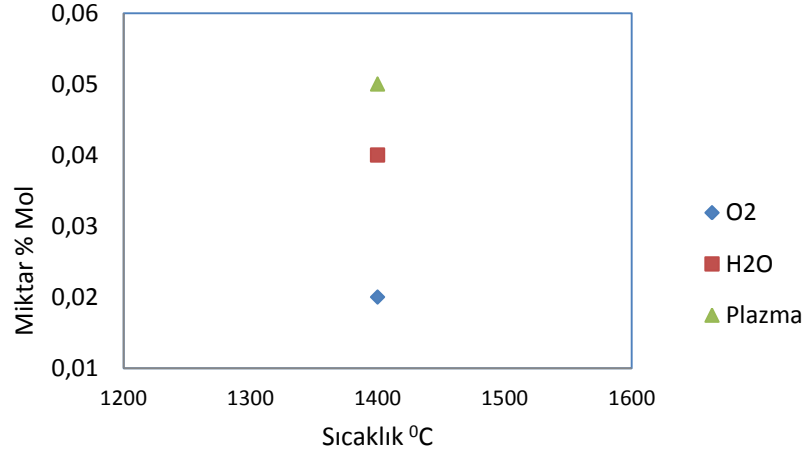
6.9.2 Tablolara Yorum

Çizelge 6.5 Her üç gazlaştırmada oluşan etan miktarları % mol

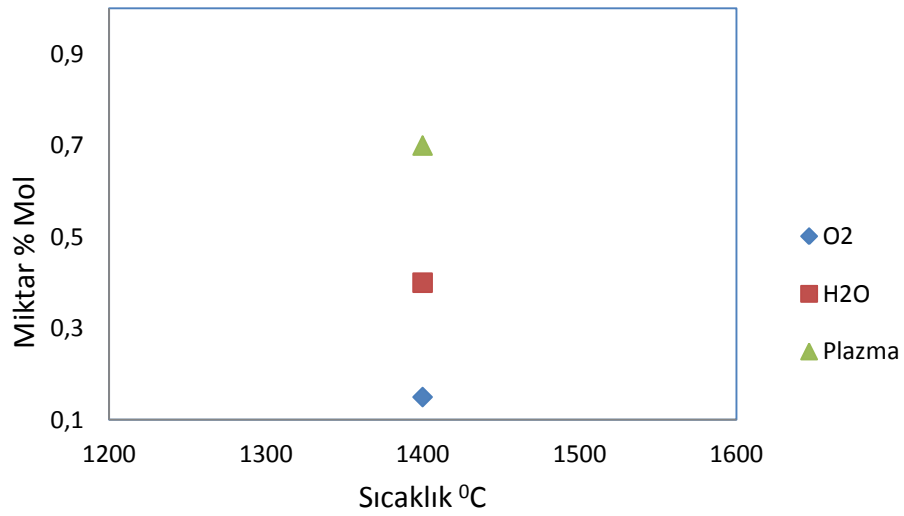
Sıcaklık °C	O ₂	Plazma	H ₂ O
600	6,28	7,32	0,31
800	3,7	7,08	0,89
1000	1,38	0,6	1,60
1200	0,46	0,25	0,13
1400	0,02	0,05	0,04
1600	5,44	4,75	5,14

Çizelge 6.6 Her üç gazlaştırmada oluşan metan miktarları % mol

Sıcaklık °C	H ₂ O	O ₂	Plazma
600	2,9	17,43	19,17
800	6,6	14,6	20,2
1000	8,8	14,42	5,52
1200	2,8	5,32	0,6
1400	0,4	0,15	0,7
1600	16,0	17,19	12,15



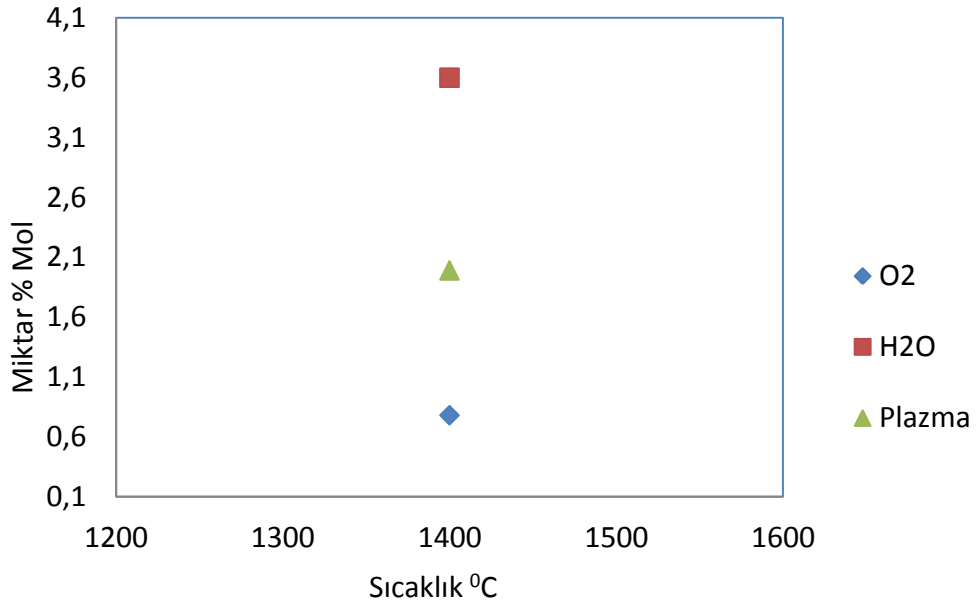
Şekil 6.30 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Etan miktarları



Şekil 6.31 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan metan miktarları

Çizelge 6.7 Her üç gazlaştırmada oluşan Hidrojen miktarları % mol

Sıcaklık °C	H ₂ O	O ₂	Plazma
600	0	0	0
800	0,43	0,46	0
1000	1,6	1,46	1
1200	2,16	2,45	1,33
1400	3,6	0,78	1,99
1600	0,8	0,83	0,77



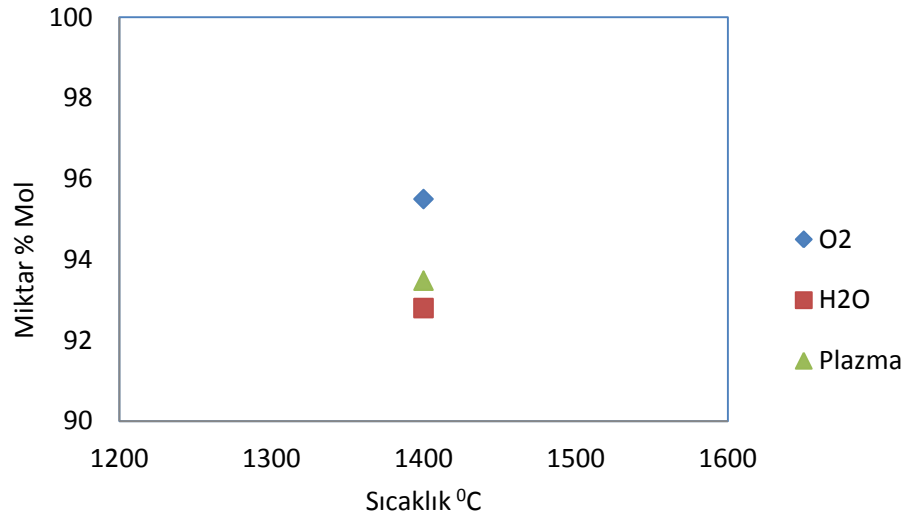
Şekil 6.32 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Hidrojen miktarları

Çizelge 6.8 Her üç gazlaştırmada oluşan karbon monoksit miktarları % mol

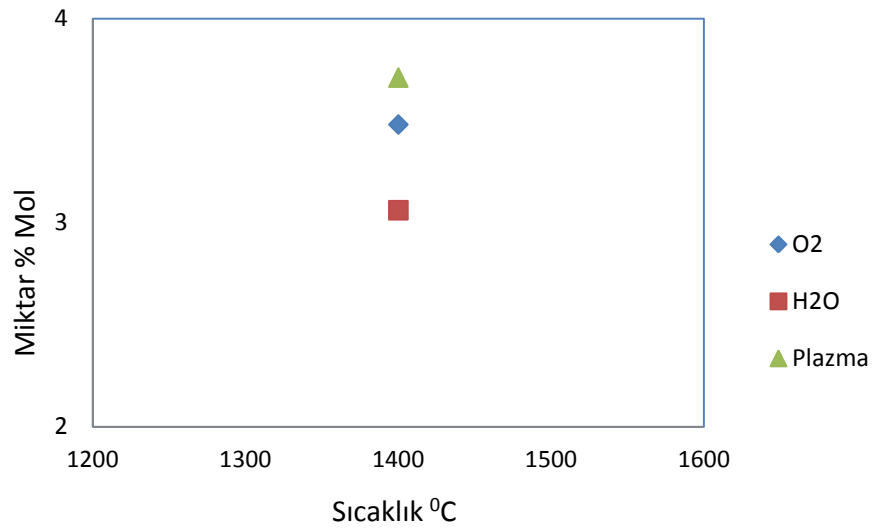
Sıcaklık °C	O ₂	H ₂ O	Plazma
600	57,2	61,6	53,43
800	63	70	50,24
1000	69,1	73	77,17
1200	83,9	88	94,7
1400	95,5	92,8	93,48
1600	65,9	60,56	65,74

Çizelge 6.9 Her üç gazlaştırmada oluşan karbondioksit miktarları % mol

Sıcaklık °C	O ₂	H ₂ O	Plazma
600	18,14	35	19,33
800	19,7	21,8	22,29
1000	12,34	14,55	15,32
1200	5,8	6,14	3,2
1400	3,48	3,06	3,71
1600	10,08	11,3	12,89



Şekil 6.33 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Karbon monoksit miktarları



Şekil 6.34 Her üç gazlaştırmada 1400°C'de oluşan Karbondioksit miktarları

Metan ve etan plazma ortamında düşük sıcaklıklarda daha fazla oluşmaktadır. Oksijen ortamında, plazmaya göre daha az ancak buharla plazmada çok düşük değerlerdedir. Yüksek sıcaklıklarda ise buharla etanın metana göre daha hızlı artmakta çünkü buhar tepkimeleri etan'a daha fazla yönlenebilir. Burada oksijenle olan ilgi muhtemelen CO₂'de olan ilgiyi arttırıp sonra Boudart tepkimesiyle CO₂'tin CO'de dönüşmesine ve CO miktarını artırmasına sebep olduğundan göreceli olarak daha çok miktarda CO buhardan parçalanarak hidrojenle tepkime yaptığından plazmada ve oksijenle plazmada yüksek sıcaklıkta metan daha çok görülmektedir. Etanda artmaktadır ancak metan göreceli olarak daha fazla artmaktadır.

Etan için aynı dönüşüm mekanizması gerçekleşiyor ama buhar etan yakınlığı etanın lehine gelişiyor. Düşük sıcaklıklarda ise buhar metan ve etan oluşumunu engelliyor. Oksijenle plazma ve plazma için düşük sıcaklıklarda 600°C'de aynı değerleri görüyoruz. Sıcaklık yükseldikçe 1000°C'ye kadar oksijenle plazmada etan verimini yukarıda tutabilirken plazmada metan ve etan dramatik olarak düşüyor. Metan oluşmuyor oluşan yüksek sıcaklıkta tüketiliyor. Oluşmama nedeni karbon alıyor CO nun lehine ürün veriyor. CO₂'de 1000°C de parçalanıyor olabilir ancak bu etki sınırlıdır. Hidrojen sıcaklıklarla her üç yöntemde de aynı şekilde artıyor, 1200°C'den sonra duruyor. Etan 1400°C den sonra tekrar 600°C de ki verime ulaşıyor.

Özellikle 1200°C den 1400°C nin biraz üstüne kadar gelişen durum her gaz bileşeni için şekil 6.30-34 ve Çizelge 6.7-11'de verilmiştir. Özellikle bu şekilde geçiş bölgesinin her üç plazma yöntemi için bir biri arasında nasıl değiştiği görülmektedir. Değişimin olduğu bu noktaya odaklanmak değişimin kimliği hakkında bilgi vermektedir. Bu sıcaklıktan sonra tüm tepkimelere atomik temelde bakmak gerekir. Değerlendirmeyi klasik termodinamik değil istatistiksel termodinamik ile değerlendirmek gerekir.

6.10 Sonuçların yazılım sonuçları ile kıyaslanması

Yazılımla elde ettiğimiz sonuçlar Şekil 4.1-16'da gösterilmiştir. Yazılımla plazma gazlaştırma çalışmaları için ve de özellikle plazma reaktörü tasarlama aşamasında boyutlandırmada önemli kısıtlar sunmaktadır. Gerekli enerji kaynağı gücünün tespitini ve gazlaşma sonucu oluşacak gaz ürünlerin türü ve miktarı konusunda önemli bilgiler vermektedir.

Yazılımda buharla plazma gazlaştırmada %70 ve oksijenle plazma gazlaştırmada %55 gibi yüksek oranlarda hidrojen oluştuğu görülmektedir. Verilen tepkenlerin tamamının tepkimeye girdiği varsayımından hareketle tepken arttıkça hidrojen yüksek değerlere ulaşmaktadır. Yaptığımız deneysel çalışma sonuçlarında ise %4 den daha yüksek değerlere ulaşmamaktadır. Hatta düşük sıcaklıklarda hiç hidrojen oluşmamaktadır. Numune içinde hidrojen miktarı o kadar çok değil hem de etan ve metan gibi hidrojen bileşikleride meydana gelmektedir. Yazılımda hidrojen arttıkça hidrojen bileşikleri (Metan gibi) azalmaktadır. Bu durum yapılan deneysel sonuçlarla örtüşmektedir.

Deneysel sonuçlarla yazılım sonuçları CO ve CO₂ oluşumlarında paralellik göstermemektedir. Sıcaklık arttıkça yazılımda CO₂ sürekli artarken CO sürekli azalmaktadır. Deneysel sonuçlarda ise tam tersi sıcaklık arttıkça CO miktarı sürekli artmakta ancak 1600°C'den sonra CO azalmış ve CO₂ artmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu Doktora tezi çalışması kapsamında plazma gazlaştırma ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar, aşağıdaki gibi özetlenebilir;

1-Bu çalışmada en önemli buluntu olarak kaynaklarda hiç rastlanmayan yüksek sıcaklıklarda gazlaştırmanın ürün bileşimidir. Kaynaklarda beklenmediği ölçüde 1400°C'den 1600°C'ye gaz bileşimi yüksek enerjili bir gaz bileşimine doğru ilerlemiştir. Deney düzeneğini teknik sınırlarına kadar yapılan deneyler bu sonuçları vermekle beraber sıcaklık daha fazla yükselebilseydi daha ilginç gaz bileşimleri elde edilebileceği görülmektedir. Fakat doğal olarak bu eğilim yükselen sıcaklıkla sona erip ısı enerjisi bir değeri geçmeyecektir. Yani Y ekseninin enerji olduğu bir grafikte X eksenine paralel bir değişim görecektik.

1400°C'den sonraki bu çarpıcı değişim olabilecek tepkimelerin denge sabitlerinin aynı değere doğru gelmesinden ve yüksek sıcaklıklarda tepkimelerin element düzeyinde olmasındandır.

Bu çarpıcı resim bu tekniğe önemli avantajlar getirmektedir; İlk olarak ekonomik bulgudan söz edersek,

a. Külden ve karbon artıklarından tamamen arınmış ek filtrasyona gerek duymayan değerli gaz elde edebilmek,

b. Erimiş olarak metalleri alma olanağı sağlayan plazma reaktörü, kaba atık ayırma ile beslenen atıkları gazlaştırabilmektedir. Böylece EKA ayırma gibi pahalı, kirli ve sağlığa uygunluk açısından sakıncalı bir çalışma gereksinimini ortadan kaldırmaktadır.

c. Doğal olarak yüksek sıcaklıkta çalışması gereken sistemler daha fazla enerji harcamakta ve bu enerji elde edilen gazla beraber soğuduğunda enerji kaybına neden olmaktadır.

Ancak gazlaşma reaktörü ve gaz kanalından sıcak geçen gazlar önce hava ısıtıcı ile daha düşük sıcaklığa indirilip daha sonra yüksek sıcaklık buharı elde edilerek bir rankine çevrimi ile değerlendirilebilecek kadar kaliteli sıcaklık bulunmaktadır. Elde edilen yüksek sıcaklıktaki hava-oksijen-buhar bileşimi, elektrik enerjisi ile ark yapılan reaktörün daha düşük elektrik enerjisiyle sürdürülebilmesini sağlamaktadır.

d. Gaz ısı değeri yüksek olduğundan bir gaz türbininde Brayton-Rankine Kombine çevrimi ile gazın değerlendirilmesi çok verimli olacaktır. Böylece ürün gazların enerjisinden yüksek düzeyde yararlanılmış olacaktır.

2. Bilimsel olarak,

a. Bilimsel anlamda böylece, gazlaşma teknolojisi ve endüstrisinden çok özel etkileri olabilecek ve kaynaklarda yer almaması hasabiyle bilinmeyen bir nokta olan plazma gazlaştırmanın yüksek sıcaklığın sonuçları elde edilmiş bulunmaktadır.

b. Özellikle oksijenin çıkan bileşiminin içindeki değerinin sıcaklıkla değişimi düşük sıcaklıklarda oksijen tüketiminin azalması ve yine tam tersine yüksek sıcaklıklarda üretilen gazın içinde görülen oksijenin artması, 1000°C civarında ise oksijenin reaksiyonlar tarafından hızlıca tüketilmesi ve bunun nedenlerinin anlaşılmasıdır. Görünen o ki düşük sıcaklıklarda karbonun katı parçacık halinde bulunması tepkimeye girmesini zorlaştırmaktadır. 1000°C'den yüksek sıcaklıklarda ise karbon atomları daha aktif hale geldiğinden kolayca tepkimeye girmektedir. Şekil 6.28'den (denge denklemi eğrisi) yararlanarak açıklaması kolayca yapılabilmektedir. Bu sonuç, bu deneysel tez çalışmasının çıktılarının somutlaştırılmasını sağlamış olup yine kaynaklarda böyle bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Doğal olarak gaz kompozisyonlarının iyileşmesi ve oranları bu çalışma ile açık ve net gerçekleştirilmiş ispatlanmış ve kaynaklara katkı sağlamıştır.

2. Teknolojik olarak;

Gazlaştırma sistemlerinde genellikle dünyada kurulmuş ve çalıştırılmış tesisler düşük sıcaklığa odaklanmıştır. Bu gerek reaktör malzeme teknolojik sınırlarına gelmemek için gerekse yüksek sıcaklık elde etmenin klasik ısıtma sistemleriyle sağlanamamasından olmuştur.

Düşük sıcaklıklardaki dönüşümlerde; hem dönüşüm yüzdeleri hem de dönüştürme hızı düşük olmaktadır. Ayrıca aşırı kül problemi ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda kütle içinde karbonun hızlı ve tam dönüşmemesinden katran gibi sıvı ve dönüşmemiş karbon ile toz karışımı olan is gibi maddeler oluşur. Gaz kalitesi yüksek olsa bile sistemin ciddi sorunlarının ve verimsizliğinin olması mecbur olmadıkça kullanılmamasını beraberinde getirmiştir. Bu sorunlar yüzünden reaktörler kısa sürede çökebilmekte ve temizlenmesi gereksinimleri oluşmaktadır.

Plazma reaktör bu sorunların tamamını izole ettiği gibi ergimiş olarak metallerin ve kül içeriğinin sorun olmasını ortadan kaldırmaktadır. Çıkan gazın daha temiz olması ekstra temizleme ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Yüksek bir hızla hatta flaş piroliz gazlaştırma proseslerinden daha yüksek hızda proses sağlanması ve yüksek bir yüzde dönüşüm sağlamasından dolayı kullanılabilir düzeylere gelmiş bulunmaktadır. Çok noktalı bir plazma gazlaştırma reaktörü daha da yararlı ve teknolojik sonuçlar üretebilecektir.

EKA için basit bir ön ayırımla sistem çalıştırılabilecektir. Ancak kömür, pelet, odun talaşı gibi fosil kaynakların hatta düşük değerlikli sıvıların akış tipi bir plazma gazlaştırma ile değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Öte yandan Türkiye genç toprak olduğundan çok miktarda su ve kül içeren düşük değerlikli linyitler için bu sistem son derece faydalı sonuçlar üretmeye namzettir. Sadece yakıt gazlaştırma değil bu linyitlerin içinde bulunan değerli elementlerin külden ayrılarak ekonomiye kazandırılması da mümkündür. Bu linyitteki külleri ayırıp eritip

veya diğer proses yöntemleri ile ayırmaya çalışmak ekonomik açıdan mümkün değildir oysa gazlaştırma sırasından bu ayırım ekonomik hale gelmektedir.

Bundan sonraki çalışmalar için özellikle yüksek basınçta yüksek sıcaklıklarda plazma sistemlerinin verimlerine ve ürün gazlara bakılmalıdır. 1600°C üstü sıcaklıklarda Plazma gazlaştırma ürünlerinin verimini ve gaz enerji zenginliğini arttırıcı farklı tepkenler denenmesi ve Reaktör girişine oksijen ve reaktör çıkışına Buhar beslenerek gazlaştırma verimliliğine etkisinin araştırılması gelecekte yapılacak çalışmalar için önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Themelis, N. J., Kim, Y.H. ve Brad, M.H. (2002), "Enerjiden Yararlanma ve Enerji Üretimi için New York City Katı Atıklarının Enerji Üretimi için Enerji Üretimi", Waste Management and Research 20 : 223-233.
- [2] Saltabaş F., Soysal S. ve Yıldız Ş., "Evsel Katı Atık Termal Bertaraf Yöntemleri ve İstanbul'a uygulanabilirliği". TÜRKAY 2009 Türkiye'de Katı Atık Yönetimi Sempozyumu, YTÜ, 15-17 Haziran 2009, İstanbul.
- [3] Olgun, H., Doğru, M. Ve Howarth, C. R., "Katı Atıkların Enerji Dönüşümünde Kullanılması ve Gazlaştırıcılar", IV. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi S.835-853, 4-7 Kasım 1999 İzmir.
- [4] Tolay M., Yamankaradeniz H., Daradimos G., Hirschfelder H. Ve Vostan P., "Temiz Enerji Üretimi için Gazlaştırma teknolojisi". VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu. UTES'2008 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
- [5] Arena U., (2011). "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification", Waste Management 32: 625-639.
- [6] Porteous A. (2005), "Why energy from waste incineration is an essential component of environmentally responsible waste management", Waste Management 25: 451-459.
- [7] Porteous A. (2001), "Energy from waste incineration — a state of the art emissions review with an emphasis on public acceptability", Applied Energy 70: 157-167.
- [8] Zhang, Q. (2011) "Mathematical modeling of municipal solid waste plasma gasification in a fixed-bed melting reactor". Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [9] Malkow T. (2004), "Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal", Waste Management 24: 53-79.
- [10] Öngen, A. (2011). "Endüstriyel Atıklardan Gazlaştırma ile Sentez Gazı Üretimi", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Belgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C. ve Napoli, R.M.A. "Energy from Gasification of Solid Wastes", Waste Management 23 : 1-15.
- [12] McKendry P. (2002), "Energy production from biomass (part 3):

gasification”, *Technologies Bioresource Technology* 83: 55–63.

- [13] Klein, A. “Gasification: An Alternative Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Wastes” (2002), Degree of M.S. in Earth Resources Engineering, May 2002, Columbia University, New York.
- [14] De Filippis, P., Borgianni, C., Paolucci, M. ve Pochetti, F. (2004), “Prediction of Syngas Quality for Two-stage Gasification of Selected Waste Feedstocks”, *Waste Management* 24 : 633-639.
- [15] Dereli, C., (2012). “Plazma Gazlaştırma Teknolojisi ile Katı Atık Bertarafı”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16] Warnecke R. (2000), “Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier”, *Biomass and Bioenergy* 18: 489–497.
- [17] Min, T.J., Yoshikawa, K. ve Murakami, K. (2005), “Distributed Gasification and Power Generation from Solid Wastes”, *Energy* 30 (2005) 2219-2228.
- [18] Saravanakumar A., Haridasan T.M., Reed T.B. ve Bai R.K.(2007), “ Experimental investigation and modeling study of long stick wood gasification in a top lit updraft fixed gasifier”.*Fuel* 86: 2846-2856.
- [19] Yamamoto, T., Isaka, K., Sato, H., Matsukura, Y. ve Ishida, H. (1999), “Gasification and Smelting System Using Oxygen Blowing for Municipal Waste”, *ISIJ International* 40 :260-265.
- [20] Zubtsov V.M., Pian C.C.P. ve Yoshikawa K. (2005), “Potential applications of high-temperature air/steam-blown gasification and pyrolysis systems”, *Energy* 30 : 2229–2242.
- [21] Choy, K.K.H., Porter, J. F., Hui, C.W. ve McKay, G. (2004). “Process Design and Feasibility Study for Small Scale MSW Gasification”, *Chemical Engineering Journal* 105: 31–41.
- [22] Fujimura, H., Oshita, T. ve Naruse, K. (2001), “Fluidized-Bed Gasification and Slagging Combustion System”, Presented at the IT3 Conference, 14-18 May 2001, Philadelphia.
- [23] Hamel S., Hasselbach H., Weil S. ve Krumm W. (2005), “Autothermal two-stage gasification of low-density waste-derived fuels”, *Energy* 32 : 95–107.
- [24] Schuster G., Löffler G., Weigl K. ve Hofbauer H. (2001), “Biomass steam gasification an extensive parametric modeling study”, *Bioresource Technology* 77 : 71-79.
- [25] Larsen E. D., Worrell E. ve Chen J. S. (1996), “Clean fuels from solid waste for fuel cell buses in metropolitan areas”, *Resources, Conservation and Recycling* 17 :273–298.
- [26] Morris, M. ve Waldheim, L. (1998), “Energy Recovery from Solid Waste Fuels Using Advanced Gasification Technology”, *Waste Management* 18: 557-564.

- [27] Fujimura H., Oshita T. ve Naruse K. (2001), "Fluidized bed gasification and slagging combustion system", Presented at the IT3 Conference, May 14-18th 2001, Philadelphia, USA.
- [28] Garcia-Ibanez, P., Cabanillas A. ve Sanchez J.M. (2004), "Gasification of leached orujillo (olive oil waste) in a pilot plant circulating fluidised bed reactor", *Biomass and Bioenergy* 27 : 183 – 194.
- [29] Kato, Y. ve Yoshikawa, K. (2000), "Gasification Performance Of A Pebble Bed Gasifier Using High Temperature Air And Steam", *Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference*, July 23-26, 2000, Miami Beach, Florida.
- [30] Selinger, A. ve Steiner, C. (2004), "Waste Gasification in Practice: Twinrec Fluidized Bed Gasification and Ash Melting Review of Four Years of Commercial Plant Operation", *IT3'04 Conference*, 10-14 May 2004, Phoenix, Arizona.
- [31] Drift A.V., Doorn J.V. ve Vermeulen J.V. (2001), "Ten residual biomass fuels for circulating fluidized-bed gasification", *Biomass and Bioenergy* 20 : 45-56.
- [32] Moustakas, K., Fatta, D., Malamis, S., Haralambous, K. ve Loizidou, M. (2005), "Demonstration Plasma Gasification/Vitrification System for Effective Hazardous Waste Treatment", *Journal of hazardous Materials B123* : 120-126.
- [33] Tendler, M., Rutberg, P. ve Oost, G. (2005), "Plasma Based Waste Treatment and Energy Production", *Plasma Physics and Controlled Fusion* 47 : A219-A230.
- [34] Murata, M., Osada, M., Takahashi, M. ve Tagashira, S. "Plasma Melting and Decomposing Technology for Treating PCB-contaminated Wastes", *Nippon Steel Technical Report No. 92* July 2005.
- [35] Mourtoris, A., Voutsas, E. ve Tassios, D. (2005), "Solid Waste Plasma Gasification: Equilibrium Model Development and Exergy Analysis", *Energy Conversion and Management* 47 : 1723-1737.
- [36] Fabry F., Rehmet C., Rohani V. ve Fulcheri L. (2013) "Waste Gasification by Thermal Plasma.", *Waste Biomass Valorization* 2194–2205.
- [37] Koyun, A., (1995), "Düşük Değerlikli Linyitlerin Piroliz ve Gazlaştırılması", *Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- [38] Lee S. (2007), "Gasification of Coal" *Final Report, Handbook of Alternative Fuel Technology* 25-79.
- [39] Gafur, A.A, (2006). "Bitümlü şist ve Plastik Atıkların Gazlaştırılması", *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [40] İbrahimoğlu, B., Vural, E.S., Yürek, Ş. ve Demirel, O., "Plazma Yöntemiyle Kömür Gazlaştırılması", *IV. Ulusal Hidrojen Enerjisi ve Sergisi*, 15-16 Ekim 2009, Kocaeli.

- [41] Madenoğlu, T.G, (2011). "Investigation of Hydrogen and/or Methane Production from Lignocellulosic Wet Biomasses by Supercritical Water Gasification, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [42] İbrahimoglu, B., Vural, E.S., Genç, G. ve Dalli, E., Linyitlerden Sentez gazı üretilmesinde Plazma yöntemi", 1. Uluslararası Plazma Teknolojileri Kongresi, Plazmatech 2014, 29 Nisan 2014, Kayseri.
- [43] Özbay N., Uzun B. B., Varol E. A. ve Pütün A. E. (2006), "Comparative analysis of pyrolysis oils and its subfractions under different atmospheric conditions", Fuel Processing Technology 87 : 1013–1019.
- [44] Toraman, Ö.Y. ve Topal, H. (2003), " Katı Atık ve Çamurların Değerlendirilmesinde Alternatif Termal Teknolojiler ve Uygulamaları" Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 18: 19-33.
- [45] Sınağ A., Sinek K. , Tekeş A.T. , Mısırlıoğlu Z., Canel M. ve Wang L. (2003), " Study on CO2 gasification reactivity of chars obtained from Soma-Isıklar lignite (Turkey) at various coking temperatures.", Chemical Engineering and Processing 42 : 1027- 1031.
- [46] Borat O., Uyarel A.Y. ve Şahin B. (1993) "Uygulamalı Matematik Modelleme", İ.T.Ü. Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Yayınları, 100, İstanbul.
- [47] Lal M.P. ve Singh C.J. (2012), "Plasma Gasification: A Sustainable Solution for the Municipal Solid Waste Management in the State of Madhya Pradesh, India.". International Journal of Environmental Sciences 3: 305–319.
- [48] Murphy, J.D. ve McKeogh, E. (2003), "Tecnical, Economic and Environmental Analysis of Energy Production from Municipal Solid Waste", Renewable Energy 29: 1043–1057.
- [49] Jung, C.H., Matsuto, T. ve Tanaka, N. (2004) "Bihavior of Metals in Ash Melting and Gasification-melting of Municipal Solid Waste (MSW)" Waste Management 25 : 301-310.
- [50] Leal-Quiros, E. (2004), "Plasma Processing of Municipal Solid Waste", Brazilian Journal of Physics Vol. 34: 273-280.
- [51] Nishikawa, H., Ibe, M., Tanaka, M., Takemoto, T. ve Ushio, M. (2006), "Effect of DC Steam Plasma on Gasifying Carbonized Waste", Vacuum 80 : 1311-1315.
- [52] Nishikawa, H., Ibe, M., Tanaka, M., Ushio, M., Takemotoa, T., Tanaka, K., Tanahashid, N. ve Itoe, T. (2004), "A Treatment of Carbonaceous Wastes Using Thermal Plasma with Steam", Vacuum 73 : 589-593.
- [53] Kim S.W., Park H.S. ve Kim H.J. (2003) "100kW steam plasma process for treatment of PCBs (polychlorinated biphenyls) waste", Vacuum 70 : 59–66.
- [54] Mountoris, A., Voutsas, E. ve Tassios, D. (2007), "Plasma Gasification of sewage sludge: Process development and Exergy optimization", Energy Conversion and Management 49 : 2264-2271.
- [55] Moustakas, K., Fatta, D., Malamis, S., Haralambous, K. ve Loizidou, M. (2007), "Analysis of result from the operation of a plot Plasma

Gasification/Vitrification unit for optimizing its performance”, Journal of hazardous Materials B123 :473-480.

- [56] Hrabovsky, M., Hlina, M., Konrad, M., Kopecky, O., Chumak, A., Maslani, A., Kavka, T. ve Zivny, O. (2013), “Steam Plasma-assisted gasification of Organic waste by reactions with water, CO₂ and O₂”, 21. International Symposium on plasma chemistry, 4 Augst-9 Augst 2013, Queensland, Australia.
- [57] Dodge, E. “Plasma Gasification of Wastes clean production of renewable fuels through the vaporization of garbage” (2008), Queens Universty school of Business, July 2008, Cornell Universty, New York.
- [58] Ducharme, C., (2010). “Technical and economic analysis of Plasma assisted waste to energy processes”. Degree of M.S. in Earth and environmental Engineering, September 2010, Columbia University, New York.

GAZ KROMOTOGRAFINDAN ÇIKAN GENEL DENEY SONUÇLARI

D.N	Metan	Etan	Propan	Propilen	CO2	O2	N2	CO	H2	C5/C6+	TOPLAM	
1	1,800	0,335	0,000	0,156	7,264	1,231	29,632	14,664	0,150	0,001	55,233	1000°C O2Tlş
2	0,948	0,079	0,000	0,099	4,233	6,061	29,674	17,690	0,157	0,000	58,942	1000°C+Talaş
3	0,087	0,007	0,000	0,011	1,713	13,896	43,939	3,109	0,000	0,000	62,762	1000°C O ₂ atk
4	1,078	0,081	0,000	0,134	3,165	5,161	30,053	11,741	0,000	0,001	51,412	1000°C+Atık
5	0,237	0,070	0,000	0,013	0,322	8,058	25,051	1,640	0,000	0,000	35,391	600°C+Atık
6	1,413	0,167	0,000	0,063	3,219	2,549	8,952	28,781	0,206	0,000	45,350	1000°C O2Tlş
7	1,612	0,183	0,000	0,073	4,470	3,420	18,328	22,512	0,321	0,001	50,919	1000°C+Talaş
8	0,226	0,019	0,000	0,018	2,200	4,255	16,590	29,007	0,325	0,000	52,639	1000°C O ₂ atk
9	0,461	0,042	0,000	0,065	3,297	3,278	27,511	19,126	0,192	0,000	53,972	1000°C+Atık
10	0,688	0,036	0,000	0,057	4,948	1,848	25,039	20,780	0,110	0,000	53,507	1200 °C Tal
11	1,681	0,116	0,000	0,182	4,281	1,594	17,435	25,176	0,282	0,000	50,746	1000°C TIH ₂ O
12	0,972	0,069	0,000	0,104	4,356	2,101	20,557	23,715	0,181	0,001	52,055	1200 C°
13	1,105	0,081	0,000	0,068	1,321	2,888	6,534	34,072	1,362	0,000	47,431	1200°C 20 O ₂
14	2,677	0,176	0,000	0,118	2,218	1,408	3,791	31,946	0,936	0,000	43,269	1200°C40 O ₂
15	6,329	2,238	0,002	0,050	7,047	6,876	24,524	15,881	0,000	0,027	63,004	800°C
16	5,156	1,300	0,000	0,087	6,949	4,328	16,357	21,548	0,164	0,008	55,902	800°C + O2
17	5,908	0,943	0,000	0,141	5,057	2,284	6,057	28,298	0,599	0,003	49,293	1000°C + O2

18	0,219	0,082	0,008	0,040	0,936	5,408	16,891	30,396	0,098	0,000	54,079	1200°C
19	0,199	0,024	0,000	0,017	0,628	11,915	32,243	16,744	0,152	0,000	61,922	1200°C + O2
20	1,249	0,068	0,000	0,056	2,246	2,501	3,778	31,350	0,985	0,001	42,232	1300°C
21	0,900	0,042	0,000	0,031	1,922	5,121	9,815	27,743	0,677	0,001	46,251	1301°C +H ₂ O
22	0,040	0,005	0,000	0,004	1,160	6,920	12,378	32,645	0,311	0,000	53,464	1400 °C
23	0,152	0,016	0,000	0,013	1,091	1,573	2,604	33,064	1,284	0,000	39,798	1401 °C+H ₂ O
24	0,197	0,019	0,000	0,023	1,052	4,887	9,279	30,904	0,437	0,000	46,797	1200 ⁰ C
25	0,230	0,020	0,000	0,021	1,762	6,644	10,446	30,561	0,419	0,000	50,102	1300°C +O2
26	0,226	0,020	0,000	0,020	1,226	4,839	7,918	30,842	0,659	0,000	45,749	1400°C
27	0,054	0,008	0,000	0,008	1,237	7,695	11,174	33,911	0,279	0,000	54,365	1400°C +O ₂
28	5,107	1,841	0,077	0,065	5,316	13,002	25,528	16,759	0,000	0,054	67,827	600°C _O ₂
29	7,169	2,740	0,072	0,040	7,227	9,977	17,016	19,974	0,000	0,053	64,374	600°C
30	0,586	0,083	0,000	0,004	6,392	18,180	37,980	2,409	0,067	0,002	65,702	700°C _O ₂
31	5,723	1,373	0,000	0,039	4,602	10,304	14,086	22,529	0,072	0,004	58,737	800°C
32	3,845	0,895	0,000	0,194	3,839	7,592	11,934	25,296	0,250	0,005	53,854	800°C _O ₂
33	5,607	2,038	0,094	0,040	7,885	11,195	21,332	16,368	0,000	0,049	64,672	600°C _O ₂
34	2,971	0,658	0,000	0,089	4,699	10,197	21,496	16,057	0,071	0,002	56,240	800 °C Atık
35	0,575	0,045	0,000	0,003	5,215	16,423	33,393	6,508	0,000	0,006	62,169	700 °C +H ₂ O
36	0,394	0,042	0,000	0,001	4,670	16,925	31,840	8,206	0,000	0,005	62,083	600 °C+H ₂ O
37	1,675	0,227	0,000	0,018	5,545	12,549	21,130	17,827	0,111	0,003	59,084	800°C +H ₂ O
38	2,879	0,521	0,000	0,049	4,721	7,386	9,683	23,751	0,521	0,003	49,514	900°C +H ₂ O
39	5,765	1,991	0,000	0,124	5,212	9,694	18,383	17,399	0,028	0,005	58,600	900 °C atık
40	6,117	1,877	0,000	0,126	5,086	5,696	7,233	25,936	0,305	0,003	52,379	1600 °C
41	7,404	2,314	0,000	0,155	5,091	3,396	2,015	29,669	0,363	0,003	50,410	1600°C H ₂ O
42	8,690	2,751	0,000	0,184	5,095	1,097	3,203	33,402	0,420	0,002	54,845	1600°C O ₂

%100 GAZ ORANINA GÖRE NORMALLEŞTİRİLMİŞ DENEY SONUÇLARI

D.N	Metan	Etan	Prpn	Propilen	CO2	O2	N2	CO	H2	C5/C6+	TOPLAM	
1	3,258	0,606	0	0,282	13,15	2,2293	53,649	26,55	0,271	0,001	100	1000°C O ₂ Tlş
2	1,609	0,135	0	0,168	7,181	10,284	50,344	30,01	0,266	7E-04	100	1000°C+Talaş
3	0,139	0,011	0	0,018	2,729	22,141	70,009	4,954	0	0	100	1000°C O ₂ atk
4	2,096	0,158	0	0,26	6,156	10,037	58,454	22,84	0	0,002	100	1000°C+Atık
5	0,67	0,198	0	0,037	0,91	22,768	70,784	4,633	0	0	100	600°C+Atık
6	3,116	0,367	0	0,139	7,099	5,6216	19,74	63,46	0,453	0	100	1000°C O ₂ Tlş
7	3,166	0,36	0	0,144	8,778	6,7174	35,994	44,21	0,629	0,001	100	1000°C+Talaş
8	0,429	0,036	0	0,033	4,179	8,0839	31,515	55,1	0,618	4E-04	100	1000°C O ₂ atk
9	0,854	0,077	0	0,121	6,109	6,0729	50,973	35,44	0,355	7E-04	100	1000°C+Atık
10	1,286	0,068	0	0,107	9,248	3,4534	46,796	38,84	0,205	6E-04	100	1200 °C Tal
11	3,312	0,229	0	0,358	8,436	3,1405	34,356	49,61	0,556	0	100	1000°C TLH ₂ O
12	1,868	0,132	0	0,199	8,369	4,0367	39,49	45,56	0,348	0,002	100	1200 °C
13	2,329	0,17	0	0,144	2,786	6,0895	13,775	71,84	2,871	6E-04	100	1200°C 20 O ₂
14	6,186	0,407	0	0,273	5,125	3,2531	8,7621	73,83	2,163	0	100	1200°C40 O ₂
15	10,04	3,552	0,003	0,079	11,18	10,914	38,924	25,21	0	0,042	100	800°C
16	9,223	2,326	0	0,155	12,43	7,7414	29,261	38,55	0,293	0,014	100	800°C + O ₂
17	11,99	1,913	0	0,285	10,26	4,6342	12,287	57,41	1,215	0,006	100	1000°C + O ₂

18	0,405	0,151	0,014	0,074	1,731	10,001	31,235	56,21	0,181	7E-04	100	1200°C
19	0,321	0,039	0	0,027	1,015	19,242	52,07	27,04	0,245	5E-04	100	1200°C + O ₂
20	2,957	0,16	0	0,132	5,317	5,9221	8,9451	74,23	2,332	0,001	100	1300°C
21	1,946	0,092	0	0,066	4,156	11,071	21,221	59,98	1,464	0,002	100	1300 °C H ₂ O
22	0,075	0,009	0	0,008	2,17	12,943	23,153	61,06	0,582	6E-04	100	1400 °C
23	0,383	0,04	0	0,033	2,74	3,9529	6,5437	83,08	3,227	0	100	1400°C H ₂ O
24	0,421	0,041	0	0,048	2,247	10,443	19,828	66,04	0,933	0	100	1200 °C
25	0,46	0,04	0	0,041	3,516	13,26	20,85	61	0,835	0	100	1300°C +O ₂
26	0,494	0,044	0	0,044	2,679	10,578	17,307	67,41	1,439	2E-04	100	1400 °C
27	0,1	0,014	0	0,014	2,276	14,155	20,553	62,38	0,513	0	100	1400 °C +O ₂
28	7,53	2,715	0,113	0,096	7,838	19,17	37,637	24,71	0	0,079	100	600 °C _O ₂
29	11,14	4,256	0,112	0,061	11,23	15,498	26,432	31,03	0	0,082	100	600 °C
30	0,891	0,126	0	0,006	9,729	27,67	57,806	3,666	0,102	0,003	100	700 °C _O ₂
31	9,743	2,338	0	0,067	7,835	17,542	23,982	38,36	0,123	0,007	100	800 °C
32	7,14	1,662	0	0,36	7,128	14,097	22,16	46,97	0,464	0,009	100	800 °C _O ₂
33	8,67	3,151	0,146	0,062	12,19	17,311	32,985	25,31	0	0,075	100	600 °C _O ₂
34	5,283	1,169	0	0,158	8,355	18,131	38,221	28,55	0,127	0,003	100	800 °C Atık
35	0,924	0,072	0	0,005	8,388	26,417	53,714	10,47	0	0,009	100	700 °C +H ₂ O
36	0,634	0,068	0	1E-03	7,522	27,262	51,286	13,22	0	0,008	100	600 °C +H ₂ O
37	2,835	0,383	0	0,031	9,385	21,239	35,762	30,17	0,188	0,005	100	800 °C +H ₂ O
38	5,814	1,052	0	0,1	9,535	14,917	19,555	47,97	1,053	0,006	100	900 °C + H ₂ O
39	9,838	3,398	0	0,211	8,894	16,543	31,371	29,69	0,047	0,008	100	900 °C Atık
40	11,68	3,583	0	0,241	9,71	10,875	13,808	49,52	0,582	0,006	100	1600 °C
41	14,69	4,59	0	0,307	10,1	6,7376	3,9971	58,86	0,72	0,005	100	1600 °C H ₂ O
42	15,84	5,015	0	0,336	9,29	1,9996	5,8396	60,9	0,766	0,004	100	1600 °C

YAZILIM

```

clc
clear;
TR=1000;
MATIK=10;
TGIRIS=25;
ATIKTAKARBON=0.5;
ATIKTAKUKURT=0.002;
ATIHTAHIDROJEN=0.1;
ATIHTAOKSIJEN=0.4;
MOL=129;
R=8.314;
HUATIK=18400;
n=0;
N=1,5;
TG=1273;
NOKATIK(1)=0;
NBUHATIK(1)=0;
bas =['      i  NBUHATIK  NOKATIK  TGAZLASMA      CO      CO2
CH4      H2      H2O      H2S      ELEKTRIK  EKSERJIATIK  HUGAZ
NENERJI  EKSERJIGAZ      NEKSERJI'];
disp(bas);
z=0;
k=0;
for noka=0:0.1:0.5
    k=k+1;
    i=0;
    j=0;
    z=noka;
    NOKATIK=z;
for sayac=0:0.1:0.0
    i=i+1;
    j=sayac;
    NBUHATIK(i)=j;
    NOK=NOKATIK*MATIK/32;
    NBUH=(NBUHATIK(i)*MATIK)/18;
    NCO=(MATIK*ATIHTAKARBON)/12;
    NKUK=(MATIK*ATIHTAKUKURT)/32;
    Y(1)=0.3;
    Y(2)=0.0000001;
    Y(3)=0.00001;

```

```

Y(4)=0.25;
Y(5)=0.000001;
Y(6)=0.0004;
Y(7)=1;
A=[1 1 1 0 0 0 NCO/Y(7)^2
    0 0 2 1 1 1 (NBUH+MATIK*ATIKTAHIDROJEN*0.5)/(Y(7)^2)
    0.5 1 0 0 0.5 0
(NOK+(MATIK*ATIKTAOKSIJEN/32)+(NBUH/2))/(Y(7)^2)
-0.0265*exp(3956/TG)*Y(5) Y(4) 0 Y(2) -
0.0265*exp(3956/TG)*Y(1) 0 0
-(Y(4)^3)*(6.7125*10^(-14))*exp(27020/TG) 0 Y(5) -
3*(Y(4)^2)*Y(1)*(6.7125*10^(-14))*exp(27020/TG) Y(3) 0 0
0 0 0 0 0 1 NKUK/Y(7)^2
1 1 1 1 1 1 0];
C=[-(-NCO/Y(7)+Y(1)+Y(2)+Y(3))
  -(-
((NBUH+MATIK*ATIKTAHIDROJEN*0.5)/Y(7))+2*Y(3)+Y(4)+Y(5)+Y(6))
  -(-
((NOK+(NBUH/2)+MATIK*ATIKTAOKSIJEN/32)/Y(7))+0.5*Y(1)+Y(2)+0.5*Y(5))
  -(Y(4)*Y(2)-Y(1)*(Y(1)*Y(5)*0.0265*exp(3956/TG)))
  -(Y(3)*Y(5)-(Y(1)*(Y(4)^3)*(6.7125*10^(-
14))*exp(27020/TG)))
  -(- (NKUK/Y(7))+Y(6))
  -(Y(1)+Y(2)+Y(3)+Y(4)+Y(5)+Y(6)-1)];
sayac;
B=inv(A)*C;
dizi_sayac(i)=sayac;
dizi_B(k,i,1)=B(1,1)+Y(1);
dizi_B(k,i,2)=B(2,1)+Y(2);
dizi_B(k,i,3)=B(3,1)+Y(3);

dizi_B(k,i,4)=B(4,1)+Y(4);
dizi_B(k,i,5)=B(5,1)+Y(5);
dizi_B(k,i,6)=B(6,1)+Y(6);
dizi_B(k,i,7)=B(7,1);
TGAZLASMA=TR;

HUATIK=(370.8*ATIKTAKARBON+1112.4*ATIKTAHIDROJEN+139.1*ATIKTAKUKURT-
139.1*ATIKTAOKSIJEN)*MOL;

CPCO=28.16+1.6751*10^(-3)*TR+5.3717*10^(-6)*TR^2-2.2219*10^(-9)*TR^3;
CPCO2=22.257+59.808*10^(-3)*TR-35.01*10^(-6)*TR^2+7.4693*10^(-9)*TR^3;
CPCH4=19.887+50.242*10^(-3)*TR+12.686*10^(-6)*TR^2-11.011*10^(-
9)*TR^3;
CPH2=29.107-1.9159*10^(-3)*TR+4.008*10^(-6)*TR^2-0.87044*10^(-9)*TR^3;
CPH2O=32.238+1.9234*10^(-3)*TR+10.555*10^(-6)*TR^2-3.5952*10^(-
9)*TR^3;
CPH2S=4.186*(7.07+0.3133*10^(-2)*TR+0.1364*10^(-5)*TR^2-0.7867*10^(-
9)*TR^3);
CPN2=28.9-1.571*10^(-3)*TR+8.081*10^(-6)*TR^2-2.873*10^(-9)*TR^3;
MGAZ= dizi_B(k,i,1)*28.01+ dizi_B(k,i,2)*44+ dizi_B(k,i,3)*16.04+
dizi_B(k,i,4)*2.016+ dizi_B(k,i,5)*18+ dizi_B(k,i,6)*34.08;
ELEKTRIK=-(-3092000/129)-NBUH*(-285830/18)-NOK*(0)-3.76*NOK*(0)+(
dizi_B(k,i,1)*(-110530)+ dizi_B(k,i,2)*(-393520)+ dizi_B(k,i,3)*(-
74850)+ dizi_B(k,i,4)*(0)+ dizi_B(k,i,5)*(-285830)+ dizi_B(k,i,6)*(-
206300)+( dizi_B(k,i,1)*CPCO+ dizi_B(k,i,2)*CPCO2+

```

```

dizi_B(k,i,3)*CPC4+ dizi_B(k,i,4)*CPH2+ dizi_B(k,i,5)*CPH2O+
dizi_B(k,i,1)*CPH2S+3.76*NOK*CPN2)*(TR-TGIRIS)/MGAZ;

HUGAZ=( dizi_B(k,i,1)*28.04/MGAZ)*12640+(
dizi_B(k,i,3)*16.04/MGAZ)*35850+( dizi_B(k,i,4)*2.016/MGAZ)*119970+(
dizi_B(k,i,6)*34.08/MGAZ)*15250;

NENERJI=(HUGAZ/(HUATIK+ELEKTRIK))*100;

EKSERJIATIK=HUATIK*(1.0437+(0.1882*ATIHTAHIDROJEN/ATIHTAKARBON)-
(0.0610*ATIHTAOKSIJEN/ATIHTAKARBON));
EKSERJIGAZ=(275364+R*TGIRIS*(log( dizi_B(k,i,1))))*(
dizi_B(k,i,1)/MGAZ+(R*TGIRIS*log( dizi_B(k,i,2)/0.03))*(
dizi_B(k,i,2)/MGAZ+(830174+R*TGIRIS*log( dizi_B(k,i,3)))*(
dizi_B(k,i,3)/MGAZ+(235212+R*TGIRIS*log( dizi_B(k,i,4)))*(
dizi_B(k,i,4)/MGAZ+(R*TGIRIS*log( dizi_B(k,i,5)/3.12))*(
dizi_B(k,i,5)/MGAZ+(812000+R*TGIRIS*log( dizi_B(k,i,6)))*(
dizi_B(k,i,6)/MGAZ;

NEKSERJI=(EKSERJIGAZ/(EKSERJIATIK+ELEKTRIK))*100;
if NOKATIK*NBUHATIK(i)==0
    n=n+1;
    fNBUHATIK(n)=NBUHATIK(i); fNOKATIK(n)=NOKATIK;

    fCO(n)=dizi_B(k,i,1); fCO2(n)=dizi_B(k,i,2);
fCH4(n)=dizi_B(k,i,3); fH2(n)=dizi_B(k,i,4);    fH2O(n)=dizi_B(k,i,5);
fH2S(n)=dizi_B(k,i,6);
    fELEKTRIK(n)=ELEKTRIK; fEKSERJIATIK=EKSERJIATIK; fHUGAZ(n)=HUGAZ;
fNENERJI(n)=NENERJI; fEKSERJIGAZ(n)=EKSERJIGAZ; fNEKSERJI(n)=NEKSERJI;
% NBUHATIK NOKATIK TGAZLASMA CO CO2 CH4 H2 H2O H2S ELEKTRIK
% EKSERJIATIK
% HUGAZ NENERJI EKSERJIGAZ NEKSERJI
    fprintf(' %5g', n), fprintf(' %6g', NBUHATIK(i)), fprintf('
%7g', NOKATIK), fprintf(' %12g', TGAZLASMA),
        fprintf(' %12.5f', dizi_B(k,i,1)), fprintf(' %10.5f',
dizi_B(k,i,2)),
            fprintf(' %10.5f', dizi_B(k,i,3)), fprintf('
%10.5f', dizi_B(k,i,4)),
                fprintf(' %10.5f', dizi_B(k,i,5)), fprintf('
%10.5f', dizi_B(k,i,6)), fprintf(' %10.1f', fELEKTRIK(n)), fprintf('
%10.2f', fEKSERJIATIK),
                    fprintf(' %10.2f', fHUGAZ(n)), fprintf('
%10.2f', fNENERJI(n)), fprintf(' %13.2f', fEKSERJIGAZ(n)), fprintf('
%10.2f\n', fNEKSERJI(n)),
end
end

end

plot(fNOKATIK(1:n),fCO(1:n),'r');

hold

plot(fNOKATIK(1:n),fCO2(1:n),'k');

plot(fNOKATIK(1:n),fCH4(1:n),'b');

```

```
plot(fNOKATIK(1:n),fH2(1:n),'g');  
plot(fNOKATIK(1:n),fH2O(1:n),'g');  
grid on;  
xlabel({'NOKATIK'});  
ylabel({'CO,CO2,CH4,H2'})  
title({'OKSIJEN1273K'});
```

EK-D

YAZILIM SONUÇLARI

i	B/A	O/A	T _g °C	%CO	%CO ₂	%CH ₄	%H ₂	%H ₂ O	%H ₂ S	P _{Elektik} W	ε _{EKA}	UID _{GAZ} J	N _{ENERJ} %	ε _{GAZ}	N _{EKSERJ} i %
1.0	0.0	0.0	800	0.38739	0.02447	0.46955	0.02475	0.09252	0.00132	20903.4	32137.69	19509.7	37.5	23711.32	44.7
2.0	0.1	0.0	800	0.34599	0.03257	0.35003	0.14714	0.12317	0.00109	21350.1	32137.69	18666.01	35.57	21828.21	40.81
3.0	0.2	0.0	800	0.31683	0.03828	0.26583	0.23337	0.14476	9.3E-4	21869.2	32137.69	17962.62	33.9	20259.53	37.51
4.0	0.3	0.0	800	0.29517	0.04252	0.20331	0.29739	0.16079	8.1E-4	22444.1	32137.69	17367.22	32.42	18932.22	34.69
5.0	0.4	0.0	800	0.27846	0.0458	0.15505	0.34681	0.17316	7.2E-4	23062.8	32137.69	16856.72	31.11	17794.49	32.24
6.0	0.5	0.0	800	0.26516	0.0484	0.11667	0.38611	0.183	6.5E-4	23716.5	32137.69	16414.16	29.93	16808.42	30,1
7.0	0.6	0.0	800	0.25434	0.05052	0.08542	0.41811	0.19102	5.9E-4	24398.8	32137.69	16026.83	28.86	15945.59	28,1
8.0	0.7	0.0	800	0.24536	0.05228	0.05948	0.44468	0.19767	5.4E-4	25104.5	32137.69	15685.0	27.89	15184.27	26.53
9.0	0.8	0.0	800	0.23778	0.05376	0.03761	0.46708	0.20328	4.9E-4	25829.9	32137.69	15381.1	27,1	14507.57	24,4
10.0	0.9	0.0	800	0.2313	0.05503	0.01891	0.48623	0.20807	4.6E-4	26571.7	32137.69	15109.13	26.19	13902.17	23.68
11.0	1.0	0.0	800	0.2257	0.05613	0.00274	0.50278	0.21222	4.3E-4	27327.5	32137.69	14864.33	25.43	13357.51	22.46

i	B/A	O/A	T _g ^{°C}	%CO	%CO ₂	%CH ₄	%H ₂	%H ₂ O	%H ₂ S	P _{Elektik} W	€EKA	UID _{GAZ} J	N _{ENERJI} %	€GAZ	N _{EKSERJI} %
1.0	0.0	0.0	1000.0	0.40563	0.01995	0.31857	0.25377	9.6E-4	0.00112	23118.6	32137.69	21707.08	40.02	24365.02	44.09
2.0	0.1	0.0	1000.0	0.32336	0.07038	0.24378	0.35813	0.00339	9.6E-4	23270.0	32137.69	20254.83	37.24	22287.65	40.22
3.0	0.2	0.0	1000.0	0.26171	0.10818	0.18774	0.43633	0.00521	8.4E-4	23542.9	32137.69	19044.1	34.84	20556.76	36.92
4.0	0.3	0.0	1000.0	0.21379	0.13755	0.14418	0.49711	0.00662	7.4E-4	23909.4	32137.69	18019.26	32.74	19092.18	34.06
5.0	0.4	0.0	1000.0	0.17548	0.16104	0.10935	0.54571	0.00775	6.7E-4	24349.5	32137.69	17140.55	30.09	17836.81	31.58
6.0	0.5	0.0	1000.0	0.14414	0.18025	0.08086	0.58546	0.00868	6.1E-4	24848.4	32137.69	16378.8	29.26	16748.82	29.39
7.0	0.6	0.0	1000.0	0.11804	0.19625	0.05713	0.61857	0.00945	5.6E-4	25395.1	32137.69	15712.11	27.09	15796.85	27.46
8.0	0.7	0.0	1000.0	0.09596	0.20979	0.03706	0.64658	0.0101	5.1E-4	25981.2	32137.69	15123.73	26.48	14956.92	25.74
9.0	0.8	0.0	1000.0	0.07704	0.22138	0.01986	0.67058	0.01066	4.8E-4	26600.2	32137.69	14600.64	25.29	14210.4	24.19
10.0	0.9	0.0	1000.0	0.06064	0.23143	0.00495	0.69138	0.01115	4.5E-4	27246.8	32137.69	14132.53	24.21	13542.63	22,080
11.0	1.0	0.0	1000.0	0.0463	0.24023	-0.00808	0.70957	0.01157	4.2E-4	27917.0	32137.69	13711.17	23.22	12941.93	21.55

i	B/A	O/A	T _G °C	%CO	%CO ₂	%CH ₄	%H ₂	%H ₂ O	%H ₂ S	P _{Elektrik} W	€EKA	UID _{GAZ} J	N _{ENERGI} %	€GAZ	N _{EKSERI} %
1.0	0.0	0.0	1227	0.23625	0.16828	0.55025	0.04373	6.0E-5	0.00143	23234.7	32137.69	17901.01	32.93	23197.01	41.89
2.0	0.1	0.0	1227	0.17683	0.19454	0.40043	0.22697	8.0E-5	0.00116	23623.6	32137.69	17051.46	31.15	21303.13	38.2
3.0	0.2	0.0	1227	0.13652	0.21235	0.29879	0.35127	8.0E-5	9.7E-4	24094.5	32137.69	16343.21	30,1	19725.9	35.08
4.0	0.3	0.0	1227	0.10739	0.22523	0.22532	0.44113	9.0E-5	8.4E-4	24628.6	32137.69	15743.72	28.24	18391.55	32.4
5.0	0.4	0.0	1227	0.08534	0.23498	0.16973	0.50912	9.0E-5	7.4E-4	25212.3	32137.69	15229.71	27,2	17247.92	30,1
6.0	0.5	0.0	1227	0.06808	0.24261	0.1262	0.56236	1.0E-4	6.6E-4	25835.7	32137.69	14784.13	25.96	16256.82	28,3
7.0	0.6	0.0	1227	0.05419	0.24874	0.09119	0.60518	1.0E-4	5.9E-4	26491.4	32137.69	14394.16	24.98	15389.67	26.25
8.0	0.7	0.0	1227	0.04278	0.25379	0.06243	0.64036	1.0E-4	5.4E-4	27173.8	32137.69	14050.0	24,1	14624.59	24.66
9.0	0.8	0.0	1227	0.03324	0.258	0.03837	0.66979	1.1E-4	4.9E-4	27878.3	32137.69	13744.03	23.29	13944.62	23.23
10.0	0.9	0.0	1227	0.02514	0.26158	0.01795	0.69476	1.1E-4	4.6E-4	28601.5	32137.69	13470.22	22.55	13336.35	21.96
11.0	1.0	0.0	1227	0.01819	0.26466	4.0E-4	0.71622	1.1E-4	4.2E-4	29340.5	32137.69	13223.76	21.87	12789.24	20,1

i	B/A	O/A	T _e °C	%CO	%CO ₂	%CH ₄	%H ₂	%H ₂ O	%H ₂ S	P _{Elektik} W	€EKA	UID _{GAZ} J	N _{ENERGI} %	€GAZ	N _{EKSERUI} %
1.0	0.0	0.0	800.0	0.41886	0.00843	0.29979	0.27129	5.3E-4	0.00109	22408.1	32137.69	22108.9	41.3	24488.71	44.9
2.0	0.0	0.1	800.0	0.3943	0.04167	0.20438	0.35607	0.00263	9.6E-4	22143.1	32137.69	20284.22	38.08	21384.98	39.4
3.0	0.0	0.2	800.0	0.37497	0.06782	0.1293	0.42278	0.00427	8.6E-4	21959.0	32137.69	18762.8	35.35	18797.99	34.75
4.0	0.0	0.3	800.0	0.35937	0.08893	0.06869	0.47663	0.00561	7.8E-4	21837.1	32137.69	17474.84	33.0	16608.6	30.77
5.0	0.0	0.4	800.0	0.34651	0.10633	0.01872	0.52102	0.0067	7.1E-4	21764.2	32137.69	16370.44	30.95	14731.92	27.33
6.0	0.0	0.5	800.0	0.33573	0.12093	-0.02317	0.55825	0.00762	6.5E-4	21730.5	32137.69	15412.97	29.16	13105.91	24.33
1.0	0.0	0.0	1000.0	0.40563	0.01995	0.31857	0.25377	9.6E-4	0.00112	23118.6	32137.69	21707.08	40.02	24365.02	44.09
2.0	0.0	0.1	1000.0	0.37007	0.0633	0.23293	0.32966	0.00305	0.0010	22672.4	32137.69	19577.1	36.39	21167.32	38.62
3.0	0.0	0.2	1000.0	0.34124	0.09845	0.1635	0.39117	0.00474	9.0E-4	22340.9	32137.69	17801.11	33.29	18501.82	33.96
4.0	0.0	0.3	1000.0	0.31739	0.12751	0.1061	0.44204	0.00614	8.3E-4	22097.7	32137.69	16297.63	30.62	16245.84	29.95
5.0	0.0	0.4	1000.0	0.29735	0.15194	0.05783	0.48481	0.00732	7.6E-4	21923.9	32137.69	15008.41	28.29	14311.79	26.47
6.0	0.0	0.5	1000.0	0.28026	0.17277	0.01668	0.52126	0.00832	7.0E-4	21805.7	32137.69	13890.7	26.24	12635.54	23.42
1.0	0.0	0.0	1227.0	0.02725	0.35116	0.83756	-0.2178	2.0E-5	0.00182	20383.5	32137.69	15016.17	29.15	22317.25	42.49
2.0	0.0	0.1	1227.0	0.10582	0.30004	0.53549	0.05713	1.1E-4	0.00141	20733.7	32137.69	14445.23	27.86	19592.79	37.06
3.0	0.0	0.2	1227.0	0.15544	0.26776	0.34472	0.23076	1.6E-4	0.00115	21105.1	32137.69	13969.2	26.75	17323.72	32.54
4.0	0.0	0.3	1227.0	0.18963	0.24553	0.2133	0.35037	2.0E-4	9.7E-4	21492.8	32137.69	13566.23	25.78	15404.6	28.72
5.0	0.0	0.4	1227.0	0.21461	0.22928	0.11727	0.43777	2.3E-4	8.4E-4	21893.3	32137.69	13220.7	24.94	13759.95	25.47
6.0	0.0	0.5	1227.0	0.23366	0.21688	0.04403	0.50443	2.5E-4	7.4E-4	22304.1	32137.69	12921.15	24.18	12334.94	22.66

i	O/A	B/A	T _G °C	%CO	%CO ₂	%CH ₄	%H ₂	%H ₂ O	%H ₂ S	P _{Elektik} W	€EKA	UID _{GAZ} J	N _{ENERJI} %	€GAZ	N _{EKSERI} %
1.0	0.0	0.0	1000.0	0.40563	0.01995	0.31857	0.25377	9.6E-4	0.00112	23118.6	32137.69	21707.08	40.02	24365.02	44.09
2.0	0.1	0.0	1000.0	0.37007	0.0633	0.23293	0.32966	0.00305	0.0010	22672.4	32137.69	19577.1	36.39	21167.32	38.62
3.0	0.2	0.0	1000.0	0.34124	0.09845	0.1635	0.39117	0.00474	9.0E-4	22340.9	32137.69	17801.11	33.29	18501.82	33.96
4.0	0.0	0.1	1000.0	0.32336	0.07038	0.24378	0.35813	0.00339	9.6E-4	23270.0	32137.69	20254.83	37.24	22287.65	40.22
5.0	0.1	0.1	1000.0	0.29991	0.1035	0.1761	0.41464	0.00498	8.7E-4	22950.6	32137.69	18422.64	34.07	19529.31	35.45
6.0	0.2	0.1	1000.0	0.28038	0.1311	0.1197	0.46172	0.00631	8.0E-4	22717.7	32137.69	16871.57	31.33	17194.65	31.35
7.0	0.0	0.2	1000.0	0.26171	0.10818	0.18774	0.43633	0.00521	8.4E-4	23542.9	32137.69	19044.1	34.84	20556.76	36.92
8.0	0.1	0.2	1000.0	0.24593	0.13444	0.13236	0.48003	0.00647	7.7E-4	23321.6	32137.69	17445.45	32.04	18143.43	32.71
9.0	0.2	0.2	1000.0	0.2325	0.15678	0.08524	0.51722	0.00755	7.1E-4	23166.6	32137.69	16074.6	29.61	16074.33	31,10
10.0	0.0	0.3	1000.0	0.21379	0.13755	0.14418	0.49711	0.00662	7.4E-4	23909.4	32137.69	18019.26	32.74	19092.18	34.06
11.0	0.1	0.3	1000.0	0.2031	0.15898	0.09767	0.53191	0.00766	6.9E-4	23765.5	32137.69	16607.6	30.26	16955.58	30.33
12.0	0.2	0.3	1000.0	0.19385	0.17752	0.05743	0.56202	0.00855	6.4E-4	23673.2	32137.69	15383.71	29,50	15103.48	28,30
13.0	0.0	0.4	1000.0	0.17548	0.16104	0.10935	0.54571	0.00775	6.7E-4	24349.5	32137.69	17140.55	28,90	17836.81	31.58
14.0	0.1	0.4	1000.0	0.16829	0.17892	0.06947	0.57407	0.00862	6.3E-4	24267.8	32137.69	15881.28	28.67	15926.15	28.24
15.0	0.2	0.4	1000.0	0.16199	0.19461	0.0345	0.59894	0.00937	5.9E-4	24226.7	32137.69	14779.06	27,90	14254.08	25.29

i	B/A	O/A	T _g °C	%CO	%CO ₂	%CH ₄	%H ₂	%H ₂ O	%H ₂ S	P _{Elektrik} W	€EKA	UID _{GAZ} J	N _{ENERGI} %	€GAZ	N _{EKSERJI} %
1.0	0.0	0.0	1000.0	0.40563	0.01995	0.31857	0.25377	9.6E-4	0.00112	23118.6	32137.69	21707.08	40.02	24365.02	44.09
2.0	0.1	0.0	1000.0	0.37007	0.0633	0.23293	0.32966	0.00305	0.0010	22672.4	32137.69	19577.1	36.39	21167.32	38.62
3.0	0.2	0.0	1000.0	0.34124	0.09845	0.1635	0.39117	0.00474	9.0E-4	22340.9	32137.69	17801.11	33.29	18501.82	33.96
4.0	0.3	0.0	1000.0	0.31739	0.12751	0.1061	0.44204	0.00614	8.3E-4	22097.7	32137.69	16297.63	30.62	16245.84	29.95
5.0	0.4	0.0	1000.0	0.29735	0.15194	0.05783	0.48481	0.00732	7.6E-4	21923.9	32137.69	15008.41	28.29	14311.79	26.47
6.0	0.0	0.1	1000.0	0.32336	0.07038	0.24378	0.35813	0.00339	9.6E-4	23270.0	32137.69	20254.83	37.24	22287.65	40.22
7.0	0.1	0.1	1000.0	0.29991	0.1035	0.1761	0.41464	0.00498	8.7E-4	22950.6	32137.69	18422.64	34.07	19529.31	35.45
8.0	0.2	0.1	1000.0	0.28038	0.1311	0.1197	0.46172	0.00631	8.0E-4	22717.7	32137.69	16871.57	31.33	17194.65	31.35
9.0	0.3	0.1	1000.0	0.26385	0.15444	0.07199	0.50155	0.00744	7.4E-4	22552.8	32137.69	15541.53	28.95	15193.06	27.78
10.0	0.4	0.1	1000.0	0.24968	0.17445	0.0311	0.53569	0.0084	6.8E-4	22442.2	32137.69	14388.42	26.86	13458.15	24.66
11.0	0.0	0.2	1000.0	0.26171	0.10818	0.18774	0.43633	0.00521	8.4E-4	23542.9	32137.69	19044.1	34.84	20556.76	36.92
12.0	0.1	0.2	1000.0	0.24593	0.13444	0.13236	0.48003	0.00647	7.7E-4	23321.6	32137.69	17445.45	32.04	18143.43	32.71
13.0	0.2	0.2	1000.0	0.2325	0.15678	0.08524	0.51722	0.00755	7.1E-4	23166.6	32137.69	16074.6	29.61	16074.33	29.00
14.0	0.3	0.2	1000.0	0.22093	0.17603	0.04466	0.54925	0.00848	6.6E-4	23064.7	32137.69	14886.09	27.47	14280.8	25.87
15.0	0.4	0.2	1000.0	0.21086	0.19278	0.00934	0.57712	0.00928	6.2E-4	23005.9	32137.69	13845.82	25.58	12711.46	22.00

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	:İbrahim YAYALIK
Doğum Tarihi ve Yeri	:04.03.1966 Muğla
Yabancı Dili	:İngilizce
E-posta	:iyayalik@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Isı-proses	Yıldız Teknik Üniversitesi	1991
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	1988
Lise	Makine Teknisyenliği	Muğla Teknik Lisesi	1984

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2002...	İETT	Mühendis
1995	İstanbul Büyükşehir Belediyesi	Mühendis
1988	TCDD	Mühendis

YAYINLARI

Makale

1. Plazma Gazlaştırma (Sigma Dergisi'nde yayınlanacak)