



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**DÖNGÜSEL EKONOMİ KAPSAMINDA HİDROJENCE ZENGİN SENTEZ GAZ
ÜRETİMİ İÇİN ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT GAZLAŞTIRILMASI**

Şeyma MERCAN

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Atakan ÖNGEN**

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

İSTANBUL - 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Şeyma MERCAN tarafından, Doç. Dr. Atakan ÖNGEN danışmanlığında hazırlanan "Döngüsel Ekonomi Kapsamında Hidrojence Zengin Sentez Gazı Üretimi için Atıktan Türetilmiş Yakıt Gazlaştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 13/02/2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

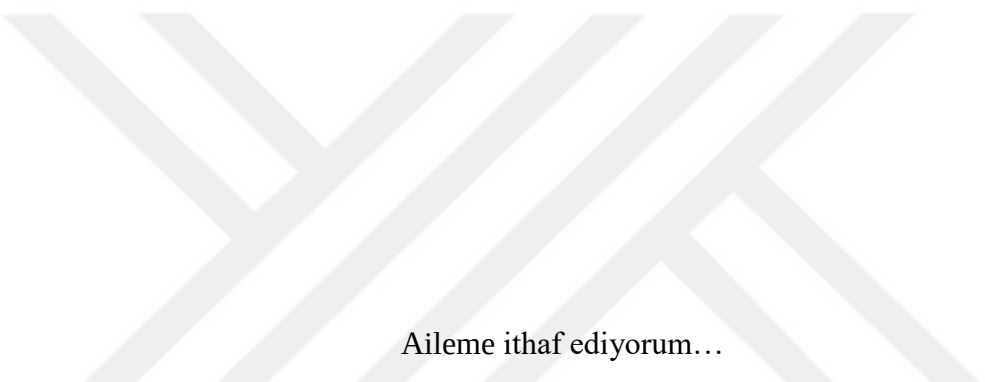
Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Atakan ÖNGEN	☒
	İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa	Kabul
	Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Hüseyin Kurtuluş ÖZCAN	☒
	İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa	Kabul
	Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Uğur Akyol	☒
	Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi	Kabul
	Makine Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Serdar AYDIN	☒
	İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa	Kabul
	Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Aysun ÖZKAN	☒
	Eskişehir Teknik Üniversitesi	Kabul
	Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı	☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Şeyma MERCAN



Aileme ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

DÖNGÜSEL EKONOMİ KAPSAMINDA HİDROJENCE ZENGİN SENTEZ GAZ ÜRETİMİ İÇİN ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT GAZLAŞTIRILMASI

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FDK-2021-34827

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinde sağladığı yönlendirme ve araştırma aşamasından tez yazım sürecinin tamamlanmasına kadar bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatan, akademik çalışmalar konusunda motive eden, çok değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Atakan ÖNGEN'e benim için ayırdığı değerli zaman ve sağladığı destek için teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmalarını sürdürdüğüm dönem boyunca tez izleme jürimde bulunarak, değerli ve yönlendirici yorumlarıyla destek olan hocamlarım Prof. Dr. Kurtuluş ÖZCAN ve Prof. Dr. Uğur AKYOL'a,

SEM-EDS analizleri ve yorumlanmasında yardımcı olan Öğr. Gör. Dr. Hürmüş GÜRSU' ya,

FTIR analizi konusunda yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Kemal PARLAK' a,

Bugüne kadar, her an yanımda olan, bugünlere ulaşmamda sonsuz emekleri için sevgili aileme,

Mutluluk kaynağım kızım Belma' ya,

Son olarak, motivasyon ve azim kaynağım olan, anlayış ve desteğini her daim hissettiğim canım eşim Halil MERCAN'a

Sonsuz teşekkürlerimle.

Şubat 2023

Şeyma MERCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xvi
ABSTRACT	xix
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
2.1. ATIK KAVRAMI	3
2.1.1. Atık Yönetimi	4
2.1.2. Döngüsel Ekonomi Modeli	7
2.2. ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT (ATY)	10
2.2.1. ATY’ den Enerji Eldesi	13
2.2.2. Atıktan Enerji Üretimine Yönelik Gelecekteki Beklentiler	14
2.3. TERMOKİMYASAL PROSESLER	16
2.3.1. Yakma	16
2.3.2. Piroliz	16
2.3.3. Sıvılaştırma	17
2.3.4. Gazlaştırma	17
2.4. GAZLAŞTIRMA	17
2.4.1. Gazlaştırıcı Reaktör Tipleri	19
2.4.2. Gazlaştırma Prosesi	25
2.4.3. Gazlaştırma Prosesi Mekanizması	26
2.4.4. Yakıt Özelliklerinin Gazlaştırmaya Etkisi	28
2.4.5. Gazlaştırma Uygulamaları	29

2.4.6. Katalitik Gazlaştırma.....	31
2.4.7. Gaz Verimi	33
2.5. LİTERATÜR TARAMASI	34
3. YÖNTEM	38
3.1. MATERYALLERİN KARAKTERİZASYONU VE ÖN İŞLEMLER.....	38
3.1.1. Nem Analizi	38
3.1.2. Kül Miktarının Tayini	39
3.1.3. Uçucu Madde Tayini.....	40
3.1.4. Sabit Karbon.....	40
3.1.5. Elementel Analiz	40
3.1.6. Termogravimetrik Analiz (TGA).....	41
3.1.7. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM-EDS) Analizi.....	41
3.1.8. Fourier Transform Infrared Spektrometresi (FTIR).....	42
3.1.9. Gaz Analizleri	43
3.1.10. Isıl Değer Analizi	44
3.1.11. Sentez Gaz Isıl Değer Hesaplamaları.....	45
3.1.12. Reaktör Tasarımı	46
3.1.13. Gaz Hacminin Hesaplanması	48
3.1.14. Katalizör Kullanımı.....	48
3.1.15. Enerji Dönüşüm Verimliliğinin Hesaplanması	49
3.1.16. İstatistiksel Veri Analizi.....	49
3.2. Deneysel Yaklaşım	50
4. BULGULAR	52
4.1. ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU	52
4.1.1. Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY) Numunenin Elementel ve Kimyasal Analizleri ..	52
4.1.2. Atıktan Türetilmiş Yakıt Numunesine ait FTIR Analiz Sonuçları	54
4.1.3. ATY Numuneye Ait Termogravimetrik Analiz Sonuçları.....	55
4.1.4. ATY Numunesine Ait SEM-EDS Analizi	56
4.2. GAZLAŞTIRMA DENEYLERİ	58
4.2.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları.....	58
4.2.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları.....	76
4.2.3. Ni-Al Katalizörü ile ATY Gazlaştırılması Sentez Gaz Analizi	79
4.3. GAZLAŞTIRMA ÜRÜN ANALİZLERİ.....	83
4.3.1. Gazlaştırma Dönüşüm Oranları.....	83

4.3.2. Katı Ürönlere ait Elementel Analiz ve Isıl Değer Sonuçları.....	85
4.3.3. Katı Ürönlere Ait FTIR Analiz Sonuçları	87
4.3.4. SEM-EDS Sonuçları	88
4.3.5. Soğuk Gaz Verimliliği (SGV) Sonuçları	95
4.4. GAZLAŞTIRMA VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL AÇIDAN DEğERLENDİRİLMESİ	96
4.4.1. Korelasyon Analizi.....	96
4.4.2. Regresyon Analizi	97
4.4.3. ANOVA testi.....	98
4.4.4. Gazlaştırma Parametrelerinin Etkisi.....	101
5. TARTIŞMA.....	110
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	113
KAYNAKLAR.....	116
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	138
ETİK KURUL İZİN YAZISI	139
KURUM İZNİ YAZILARI.....	140
ÖZGEÇMİŐ	141

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Sıfır atık hiyerarşisi (Zero waste, 2022)	7
Şekil 2.2: Döngüsel ekonomi yaklaşımı (Korhonen ve diğ., 2017).	8
Şekil 2.3: Döngüsel ekonomi şeması (Ellen Macarthur Foundation, 2019).	9
Şekil 2.4: Atıktan türetilmiş yakıt üretimi (Infiesta ve diğ., 2019).	11
Şekil 2.5: Enerji, gaz ve etanol üretimi için termokimyasal işlem (Basu, 2018).	18
Şekil 2.6: Kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcı (Kayahan ve diğ., 2019).	20
Şekil 2.7: Dolaşımli akışkan yataklı gazlaştırıcı (Kayahan ve diğ., 2019).	21
Şekil 2.8: Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı (Basu, 2010)	22
Şekil 2.9: Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı (Basu, 2010)	23
Şekil 2.10: Sürüklemeli Yataklı Gazlaştırıcı	24
Şekil 2.11: Plazma gazlaştırıcı (Basu, 2010)	25
Şekil 3.1: ATY - gazlaştırma öncesi (a) ve gazlaştırma sonrası (b)	38
Şekil 3.2: Etüv	39
Şekil 3.3: Kül fırını	40
Şekil 3.4: Termogravimetrik (TGA) analiz cihazı.	41
Şekil 3.5: SEM analiz cihazı.	42
Şekil 3.6: FTIR-ATR cihazı	43
Şekil 3.7: Gaz analiz cihazı	44
Şekil 3.8: IKA C200 Bomba Kalorimetre cihazı.	45
Şekil 3.9: Laboratuvarı kullarılan reaktör düzeneği.	47
Şekil 3.10: Seramik ısıtıcı.	47
Şekil 3.11: Gaz toplama torbası.	48

Şekil 3.12: %50Ni-%50Al katalizörü.	49
Şekil 4.1: ATY numune örneğine ait FTIR analiz sonuçları.	54
Şekil 4.2: 10 °C / dk sıcaklık hızında ATY numunesinin azot ortamındaki termogravimetrik analizi.	55
Şekil 4.3: ATY' ye ait SEM görüntüsü.	56
Şekil 4.4: ATY' nin farklı büyütme oranlarında SEM görüntüleri.	57
Şekil 4.5: ATY numunenin seçilen bölgesinde SEM-EDS analizi.	57
Şekil 4.6: 40 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	59
Şekil 4.7: 40 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	60
Şekil 4.8: 40 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	61
Şekil 4.9: 40 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	61
Şekil 4.10: 20 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	62
Şekil 4.11: 20 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	63
Şekil 4.12: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	63
Şekil 4.13: 20 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	64
Şekil 4.14: 40 g ATY ve 0.05 l/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	65
Şekil 4.15: 40 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	66
Şekil 4.16: 40 g ATY ve 0.2 l/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.	66
Şekil 4.17: 40 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	67
Şekil 4.18: 20 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	68

Şekil 4.19: 20 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	69
Şekil 4.20: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	69
Şekil 4.21: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	70
Şekil 4.22: 40 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	71
Şekil 4.23: 40 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	72
Şekil 4.24: 40 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	73
Şekil 4.25: 40 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	73
Şekil 4.26: 20 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	74
Şekil 4.27: 20 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	75
Şekil 4.28: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	75
Şekil 4.29: 20 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.	76
Şekil 4.30: 0.01 L/dk Saf O ₂ debisi ile 700 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.....	77
Şekil 4.31: 0.01 L/dk Saf O ₂ debisi ile 800 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.....	78
Şekil 4.32: 0.01 L/dk Saf O ₂ debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.....	78
Şekil 4.33: Kat/ATY oranının 0.25 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.	80
Şekil 4.34: Kat/ATY oranının 0.50 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.	81
Şekil 4.35: Kat/ATY oranının 0.75 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.	82
Şekil 4.36: Kat/ATY oranının 1.0 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.	82
Şekil 4.37: Kat/ATY oranının 1.25 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.	83
Şekil 4.38: Kuru hava ajanı ile gazlaştırma sonrası ürüne ait FTIR analizi.....	87
Şekil 4.39: Saf O ₂ ajanı ile gazlaştırma sonrası ürüne ait FTIR analizi.	87

Şekil 4.40: Kuru hava ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürüne ait SEM-EDS sonuçları (0.05 L/dk, 900 °C)	89
Şekil 4.41: Saf O ₂ ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürüne ait SEM-EDS sonuçları (0.05 L/dk, 900 °C).	90
Şekil 4.42: Ni/Al katalizör ile gazlaştırma sonrası ürünün SEM görüntüsü, SEM-EDS haritalaması (Katalizör/Numune oranı: 0.50, 850° C, 0.05 L/ dk kuru hava).	92
Şekil 4.43: Ni/Al katalizör ile gazlaştırma sonrası ürünün SEM görüntüsü, SEM-EDS haritalaması (Katalizör/Numune oranı: 0.75, 850° C, 0.05 L/ dk kuru hava)	94
Şekil 4.44: Ajan gaz debisinin sentez gaz dağılımı üzerindeki etkisi. (a) Maksimum konsantrasyon, (b) Ortalama konsantrasyon.	101
Şekil 4.45: Ajan debisi değişiminin H ₂ /CO oranı üzerinde etkisi.....	102
Şekil 4.46: Sıcaklık değişiminin CH ₄ , CO ve H ₂ gazlarına etkisi.....	103
Şekil 4.47: Sıcaklık değişiminin ısıl değer üzerinde etkisi.	104
Şekil 4.48: Isıl değer, Ajan debisi ve Operasyon sıcaklığı etkisi.....	105
Şekil 4.49: Gazlaştırma ajan türünün etkisi. (a) Ortalama CO, CH ₄ ve H ₂ gazı konsantrasyonu, (b) H ₂ /CO.....	106
Şekil 4.50: Yakıt miktarının sentez gaz dağılımı üzerine etkisi. (a) 20 g ATY ve (b) 40 g ATY.....	107
Şekil 4.51: Ni-Al katalizörün sentez gaz konsantrasyonuna etkisi.....	108
Şekil 4.52: Katalizörün ısıl değer üzerindeki etkisi (Sıcaklık ≥700 °C).....	109

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: ATY hazırlama tesislerinde hazırlanacak yakıtın özellikleri.	12
Tablo 2.2: ATY üretimi için izinli olan atıklar içindeki maksimum kabul edilebilir ağır metal içeriği için sınır değerler.	12
Tablo 2.3: Gazlaştırma reaksiyonları.	27
Tablo 3.1: Hidrojen, Metan ve Karbonmonoksit gazlarına ait ısı değerleri (Engineering ToolBox, 2003; Engineering ToolBox, 2018).....	45
Tablo 4.1: ATY atık örneğinin elementel analizi ve kalorifik değeri.	52
Tablo 4.2: ATY atık örneğinin kimyasal analizi.	53
Tablo 4.3: 700 C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 40 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.	62
Tablo 4.4: 700° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 20 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.	64
Tablo 4.5: 800° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 40 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.	67
Tablo 4.6: 800° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 20 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.	70
Tablo 4.7: 900° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 40 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.	74
Tablo 4.8: 900° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 20 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.	76
Tablo 4.9: Saf O ₂ ile gerçekleştirilen gazlaştırma deneylerinin ürün miktarı.	79
Tablo 4.10: Tüm gazlaştırma deneylerinin ürün miktarları.	84
Tablo 4.11: Katı ürünlere ait elementel analiz ve kalorifik değerleri.	86
Tablo 4.12: Kuru hava ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürün EDS sonuçları.	89
Tablo 4.13: Saf O ₂ ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürün EDS sonuçları.	90
Tablo 4.14: Katalitik gazlaştırma sonrası ürünün elementel fraksiyonu.	92

Tablo 4.15: Katalitik gazlaştırma sonrası ürünün elementel fraksiyonu.	94
Tablo 4.16: Soğuk Gaz Verimliliği (SGV).	95
Tablo 4.17: Sıcaklık ve gazlar arasındaki korelasyon.	96
Tablo 4.18: Sıcaklık, Ajan debisi ve Isıl değer arasındaki korelasyon.	97
Tablo 4.19: Model özeti.	97
Tablo 4.20: Regresyon analizi.	97
Tablo 4.21: Sıcaklık $<600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve Sıcaklık $\geq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ şartlarında Anova testi sonuçları.	98
Tablo 4.22: Sıcaklık $<700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve Sıcaklık $\geq 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ şartlarında Anova testi sonuçları.	99
Tablo 4.23: Değişen katalizör/ATY oranlarında Anova testi sonuçları.	100

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
η	: Gazlaştırma Enerji Dönüşüm Verimliliği, %
M	: Numunenin kütlesi (g)
ÜİD	: Üst Isıl Değer
AİD	: Alt Isıl Değer
r	: Korelasyon katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
ANOVA	: Analysis of Variance- Değişkenlik Analizi
ASTM	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ATY	: Atıktan Türetilmiş Yakıt
EAY	: Entegre Atık Yönetimi
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spektrometri
SEM	: Scanning Electron Microscope
TGA	: Termogravimetrik Analiz
WTE	: Atıktan Enerji

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DÖNGÜSEL EKONOMİ KAPSAMINDA HİDROJENCE ZENGİN SENTEZ GAZ ÜRETİMİ İÇİN ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT GAZLAŞTIRILMASI

Şeyma MERCAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Çevre Mühendisliği Programı

Danışman: Doç. Dr. Atakan ÖNGEN

[Sürdürülebilir bir atık yönetimi sağlamak ve enerjiye yönelik artan talebi karşılamak için, atıktan türetilmiş yakıt (ATY) kapsamında bulunan atıkların sahip olduğu kalorifik değerden faydalanarak, atıktan enerji kazanımı sağlanabilir. Bu çalışmada, atıktan türetilmiş yakıtların termokimyasal yöntemlerden birisi olan gazlaştırma prosesi ile katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülerek değerlendirilebilme olanakları araştırılmıştır. Atıktan türetilmiş yakıtlar gazlaştırılarak proses için en iyi şartlar değerlendirilmiştir. ATY karakterizasyonunu ortaya çıkarmak için nem tayini, kül miktarı tayini, uçucu organik madde tayini, sabit karbon miktarı, elementel analiz, FTIR, SEM-EDS ve TGA analizleri yapılmıştır. Deneyler, siklon ayırıcılı, yukarı akışlı sabit yataklı reaktörde, 700, 800 ve 900 °C sıcaklıklarda, kuru hava ve saf oksijenli ajanlar eşliğinde ve farklı ajan debilerinde ve katalizörlü ve katalizörsüz olarak yürütülen gazlaştırma seri deneyleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, ATY örneğinin gazlaştırma deney parametreleri belirlenmiştir. Yürütülen gazlaştırma deneylerinden elde edilen veriler istatistiksel olarak anlamlandırılarak karşılaştırılmıştır. İdeal koşullarda yapılan katalizörsüz gazlaştırma çalışmaları bulgularına göre, en yüksek H₂, CH₄ ve CO konsantrasyonları sırasıyla %45, %21 ve %26 olarak tespit edilmiştir. Katalizör kullanılan gazlaştırma deneylerinde ise en yüksek H₂, CH₄ ve CO konsantrasyonları sırasıyla %67, %23 ve %20 olarak tespit edilmiştir.]

Şubat 2023 | 160 | sayfa.

Anahtar kelimeler: | Atıktan enerji, Atıktan türetilmiş yakıt, Gazlaştırma, Yenilenebilir enerji |



ABSTRACT

Ph.D. THESIS

**REFUSE DERIVED FUEL GASIFICATION FOR THE PRODUCTION OF
HYDROGEN RICH SYNTHESIS GAS IN THE CONCEPT OF CIRCULAR
ECONOMY**

Şeyma MERCAN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Environmental Engineering

Environmental Engineering Programme

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Atakan ÖNGEN

In order to provide sustainable waste management and meet the increasing demand for energy, energy recovery from waste can be achieved by utilizing the calorific value of the wastes within the scope of refuse-derived fuel (RDF). In this study, the possibilities of converting refuse-derived fuels (RDF) into high value-added products with the gasification process, which is one of the thermochemical methods, were investigated. The best conditions for the process were evaluated by gasifying the refuse-derived fuels. In line with the results obtained, the optimum gasification test parameters for the RDF sample were determined. Moisture, ash content, volatile organic matter, fixed carbon content, elemental analysis, FTIR, SEM-EDS, and TGA analyses were performed to reveal the characterization of the samples. Experiments were carried out in the form of gasification serial experiments carried out in an updraft fixed bed reactor with cyclone separator at temperatures of 700, 800 and 900 °C, in the presence of dry air and pure oxygenated agents, at different agent flow rates, with and

without catalyst. In line with the results obtained, the gasification test parameters of the ATY sample were determined. The data obtained from the gasification experiments were statistically evaluated and compared. According to the findings of the gasification studies conducted without a catalyst under ideal conditions, the highest concentrations of H₂, CH₄, and CO were determined to be 45%, 21%, and 26%, respectively. In the gasification experiments using a catalyst, the highest concentrations of H₂, CH₄, and CO were determined to be 67%, 23%, and 20%, respectively. |

February 2023 , 160 pages.

Keywords: Gasification, Refuse derived fuel, Renewable energy, Waste-to-energy,



1. GİRİŞ

Artan nüfus ve yüksek miktarda katı atık üreten hızlı sanayileşmeye bağlı oluşan enerji krizi ve çevresel bozulmanın 21. yüzyılın karşılaştığı yükselen sorunların başında geldiği bilinmektedir (Pujara vd., 2020). Fosil yakıtların tükenmesi ve iklim değişikliğine yönelik tehditler nedeniyle yenilenebilir enerji talebi sürekli artmaktadır (Chabhadiya vd., 2021). Enerji teknolojilerindeki değişim, yaşamın çeşitli alanlarında elzem olan artan enerji taleplerinin üstesinden gelmek için öncelikle yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarına doğru yönelmektedir (İlyas vd., 2020). Enerji krizini ve çevresel bozulmayı hafifletmek için, belediye ve/veya endüstriyel atıklar, plastik, kağıt, ahşap, cam, metalik, doğada biyolojik olarak parçalanabilen ve biyolojik olarak parçalanamayan lastikler gibi geleneksel olmayan kaynaklardan alternatif enerjinin olası geri kazanımı için uygun teknolojilerin kullanılması zorunlu hale gelmiştir (Pujara vd., 2020; Abdallah vd., 2020). Sürdürülebilir kaynak yönetimi, düzenli depolama birikiminin azaltılmasını ve atık yeniden kullanımının, geri dönüşümünün ve enerji içeriğinden faydalanmanın geliştirilmesini gerektirir (Nobre vd., 2019). Atıklar kompostlama, anaerobik çürütme, biyoreaktör depolama alanları gibi biyokimyasal teknolojiler ve yakma, piroliz ve gazlaştırma gibi termokimyasal teknolojiler yoluyla değerlendirilmektedir (Patil ve Singh, 2015; Qazi ve Abushammala, 2018). Termokimyasal yöntemlerden biri olan gazlaştırma, birçok yönden avantajlı olmasıyla göze çarpmaktadır. Gazlaştırma, atıkların katı organik bileşenlerini O_2 , CO_2 , CO , H_2 ve CH_4 gibi gazlara dönüştüren kimyasal bir işlemdir. Oluşan sentezgazın ısı değerini ve gazlaştırmanın soğuk gaz verimini etkileyen önemli gazlar CO , H_2 ve CH_4 tür (Khosasaeng ve Suntivarakorn, 2017). Gazlaştırma prosesi ile oluşan ürünler; içten yanmalı motor, yakıt pili, sıvı yakıt üretimi gibi farklı alanlarda değerlendirilebilir. Gazlaştırma yöntemi ile proses sonucunda oluşan gaz kapalı çevrim içerisinde kalması çevre dostu bir teknoloji olduğunu göstermektedir. Geleneksel atık bertaraf teknolojileri ile karşılaştırıldığında ise, enerji kazanımı bakımından daha verimli bir alternatif sıfır atık teknolojisi olarak öne çıkmaktadır (Yan ve diğ, 2016).

Hidrojen (H_2) en bol bulunan elementlerden biridir ve su, hidrokarbon veya alkol gibi diğer maddelerle birlikte bulunur. Doğal gaz, kömür, biyokütle veya su gibi çeşitli kaynaklardan

üretilebilen yüksek kaliteli bir enerji taşıyıcısıdır. Farklı prosesler eşliğinde, rüzgar veya güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından da faydalanılarak elde edilebilir. Günümüzde, toplam hidrojen üretiminin yaklaşık % 90'ı, özellikle doğal gaz olmak üzere fosil yakıt reformlarından elde edilmekte olup “gri hidrojen” olarak sınıflandırılmaktadır. (Gonzalez vd., 2008; Haryanto vd., 2005; Acar ve Dincer, 2014). Termokimyasal prosesler, biyokütlenin hidrojene ve hidrojen açısından zengin gazlara dönüştürülebildiği tekniklerden oluşur (Lio ve diğ., 2014; Wang ve diğ., 2015). Bu tür işlemlerden elde edilen sentez gazından hidrojen zengin gaz üretimi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerini karşılayan sera gazı emisyonunun sıfır olduğu bir iklim için ileriye doğru atılmış etkili bir adımdır (Fremaux ve diğ., 2015). Termokimyasal teknoloji esas olarak piroliz ve gazlaştırmayı içermektedir.

Son yıllarda H₂, iklim değişikliği ve geleneksel enerji yöntemlerinden kaynaklanan emisyon konusundaki artan endişeler nedeniyle önemli bir ilgi görmektedir. Bu nedenle hidrojen, enerji piyasasını karbondan arındırmak için büyük bir potansiyele sahiptir (Chanthakett vd., 2021). Hidrojenin elektrik üretimi, enerji depolama ve elektrikli araçlardaki yakıt olarak kullanılması gibi avantajları göz önüne alındığında ve temiz enerji hedefine ulaşmak için hidrojenin uygulanması günümüzde diğer alanlarda da artmaktadır.

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY), belediye katı atıkları, normal endüstriyel atıklar veya inşaat ve yıkım atıkları gibi işlenmemiş katı atıklara göre daha düzgün parçacık boyutu dağılımına ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir katı yakıttır (Nobre ve diğ., 2019). ATY yapısında kağıt, kraft, geri dönüştürülemeyen plastik ve tekstil gibi birçok atığı içermektedir. ATY, yüksek kalorifik değere sahip olması, taşımada kolaylığı, düşük kirlilik ve az depolama alanı gereksinimi nedeniyle yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanım için uygun bir yakıt olarak değerlendirilmektedir.

Doktora tezi kapsamında, ATY olan atıklarının termokimyasal yöntemlerden biri olan gazlaştırma ile ısı değeri açısından ve hidrojen zengin sentez gazı üretilmesi için en iyi işletme koşullarına göre laboratuvar ölçekli yukarı akışlı, sirkülasyonlu, sabit yataklı reaktör kullanılarak araştırılması hedeflenmiştir. Ayrıca, bu çalışma ile yenilenebilir enerji kapsamında atıktan türetilmiş yakıtlardan emisyon değeri düşük, katma değeri yüksek ürünler elde etmeyi sağlamak amaçlanmaktadır. ATY' nin gazlaştırılarak atıktan enerji kapsamında katma değere sahip sentez gaz haline dönüştürülmesinin ülke ekonomisine sağlayacağı katkıların yanı sıra, hem emisyon yükünün azaltılması hem de atık minimizasyonu ve bertaraf

etme maliyetlerinin azaltılmasına önemli katkıları olacağı hedeflenmektedir. Tezin, döngüsel ekonomi modellerinin benimsenmesine ve çevrenin iyi korunmasına katkıda bulunarak, ATY'nin yeniden kullanımını ve değerlendirilmesini teşvik etmesi beklenmektedir.

Hedeflenen amaçlar doğrultusunda, laboratuvar ortamında kullanılmak üzere, atıktan türetilmiş yakıtlar değişen işletme şartlarında ısıtma işlem denemelerinde kullanılmışlardır. Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) ait karakterizasyon testleri yapılmış ve literatürdeki örneklerle karşılaştırılması yapılmıştır. Gazlaştırma işlemleri sabit yataklı yukarı akışlı reaktörde, 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 L/dk farklı kuru hava debilerinde çalışmalar gerçekleştirilmiş olup, en uygun kuru hava debisi belirlenmiştir. Tespit edilen değerden yola çıkarak saf oksijen ajan debisi belirlenmiş ve ATY numunenin gazlaştırılma çalışmaları 0.01 ve 0.02 L/dk debide saf oksijen ile gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma ajanlarının gazlaştırma performansı üzerindeki farklılıkları incelenerek, sonuçlar tablo ve grafikler ile verilmiştir. Ayrıca, farklı sıcaklık denemelerinin gazlaştırma performansı üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Elde edilen katı ürünlere ait SEM-EDS, FTIR, elementel analiz ve ısıtma değer testleri uygulanmış ve değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen ürünlerin dönüşüm yüzdesi hesaplanarak, atık minimizasyonuna etkisi değerlendirilmiştir. Gazlaştırma verimini değerlendirebilmek amacıyla deneylere ait soğuk gaz verimliliği hesaplanmıştır. Gazlaştırma veriminin iyileştirilmesi amacıyla seçilen katalizör maddenin proses üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri izlenmiştir. Elde edilen verilerin anlamlandırılması, farklılıkların gösterilmesi ve sonuçların incelenmesi için SPSS 21 (Statistical Package for Social Sciences) istatistik veri analiz programı kullanılmıştır. Gazlaştırma verileri ile regresyon, korrelasyon ve ANOVA analizleri yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. ATIK KAVRAMI

Çeşitli faaliyetler sonucu ortaya çıkan, bu kullanımlar sonucu artık ihtiyaç duyulmayan, istenmeyen çevre ve insan sağlığı için zararlı olabilecek her türlü kalıntı atık olarak bilinmektedir. 02.04.2015 tarihinde Resmi Gazete'de yayımlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği'ne göre ise atık "Üreticisi veya fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi

tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde veya materyali” ifade eder (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015). Farklı bir tanımla atık, sahibi açısından ihtiyaç duyulmayan ve elden çıkarılmak istenen malzemelerdir (Abouelsoud, 2020).

2 Nisan 2015 tarihinde Resmi Gazete’de yayınlanan Atık Yönetimi Yönetmeliği EK-4 ’e göre atıklar 20 alt gruba ayrılır (Atık Yönetimi Yönetmeliği, 2015). Bu gruplar içerisinde ön plana çıkanlar; belediye atıkları, tehlikeli atıklar, tıbbi atıklar ve diğer atıklar şeklinde değerlendirilmiştir. Bunların dışında sınıflandırılan ve tanımlanan diğer atık türleri, tarım ve orman faaliyeti ile oluşan atıklar, endüstriyel üretim süreçlerinde oluşan atıklar, çeşitli inşaat ve yıkım atıkları, maden ve taş ocağı atıkları, elektrik üretim tesislerinde ortaya çıkan atıklar, atık yağlar, atık petrol türevi yağlar ve civa atıkları olarak bilinmektedir.

2.1.1. Atık Yönetimi

Atık üretimi artışı kentleşme, ekonomik kalkınma, ve nüfus artışı gibi nedenlerle gerçekleşmektedir (Rajaeifar ve diğ., 2017). Toplumların daha kalabalıklaşması birlikte, vatandaşlara daha fazla ürün ve hizmet imkanı sunulurken yaşam standardı da yükselmektedir (Aghbashlo ve diğ., 2019b). Bu durum daha fazla atık oluşumuna neden olurken, atık minimizasyonu için uygun atık yönetim sistemlerinin geliştirilmesini de gerekli kılmaktadır. Atık yönetimi planlanmasında atıklar fiziksel durum, ana uygulamalar, bileşim, fizikokimyasal özellikler, biyobozunabilirlik, kaynak ve güvenlik gibi farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir (Edalatpour ve diğ., 2018). Atıkların, geri dönüşüm ve geri kazanım yöntemleri kullanılmadan bertarafı, hem maddesel, hem de enerji açısından ciddi kaynak kaybı olarak düşünülmektedir.

Atık yönetimi, çevre ve toplumun karşılaştığı küresel bazlı bir sorun olduğu için gereklidir. Atık yönetimi, çevre üzerinde oluşan baskıyı önleyerek aynı zamanda atıktan enerji kazanımı sağlayan faaliyet ve yöntemlerden oluşmaktadır (Salihoğlu ve diğ., 2019). Küresel enerji talebi artışı ve sürdürülebilirlik açısından, fosil yakıta yönelim azaltılarak ve atıktan enerji gibi temiz üretim yöntemleri tercih edilmelidir. Atıktan enerji ile hem sürdürülebilir enerji hem de atık minimizasyonu sağlanmaktadır (Burra ve diğ., 2016). Araştırmalar, hem ekonomik hem de sosyal kalkınma açısından atıkların iyi yönetilmesi durumunda etkili bir kaynak olabileceği aksi takdirde ise çevresel bir risk oluşturabileceğini vurgulamaktadır.

Atık Yönetimi Yönetmeliği’nde, atığın ortaya çıkmasının önlenmesi, kaynağında azaltılması ve ayrı toplanması, yeniden kullanılması, geçici depolanması, taşınması, ara depolanması, geri

dönüşümü, geri kazanılması, bertarafı, bertaraf işlemleri sonrası izlenmesi, kontrolü ve denetimi gibi faaliyetler atık yönetimi kapsamaktadır (AYY, 2015: madde 4).

2.1.1.1. Entegre Atık Yönetimi

Entegre atık yönetimi, gelişmiş ülkelerde çevreyi ve insan sağlığını korumak için sürdürülebilir bir şekilde atık yönetiminde kaynak kullanım verimliliğini vurgulayan teknolojik entegrasyon olarak tanımlanmaktadır (Wong, 2022). Çeşitli atık üreten gruplar, atık toplamanın zamanlaması, toplama sisteminin verimliliği, atık taşıyan araçların takibi, birincil veya ikincil toplama ve taşıma durumu, aktarma istasyonları, düzenli depolama ve işleme alanları için uygun alanların belirlenmesi herhangi bir Entegre Katı Atık Yönetimi (EKAY) stratejisinin başarısı için çok önemlidir (Hannan ve diğ., 2015; Menikpura ve diğ., 2012; Rada ve diğ., 2013). Entegre Katı Atık Yönetimi ile, depolama alanlarına atılan atık miktarını en aza indirmek ve kaynakları üst düzeye çıkarmak amacıyla çevresel, ekonomik ve enerji etkileri de dikkate alınarak bir atık yönetimi hiyerarşisi ortaya çıkmıştır (Gurjar ve Gaur, 2022).

Son yıllarda artan üretim ve buna bağlı olarak artan tüketim ile beraber katı atık yönetim planının yetersiz kaldığı sonucuna varılarak 2010/9 sayılı Entegre Atık Yönetimi (EAY) yayınlanmıştır (Eren ve Erdoğan, 2018). Entegre atık yönetimi öncelik sırasına göre önleme, azaltma, yeniden kullanma, geri dönüşüm, enerji geri kazanımı ve bertaraf uygulamalarından oluşmaktadır (Gündüzalp ve Güven, 2016). Birleşmiş Milletler Çevre Programı, entegre katı atık yönetimini üç bölüme odaklanarak ayırmaktadır (United Nations Environment Programme, 2009).

-Yaşam döngüsü odaklı,

-Atığın kaynağına odaklı,

-Yönetim odaklı.

Entegre katı atık yönetimi, sürdürülebilirliği ve “Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri”ne uyumu desteklemek için ürün ve hizmet tasarımıındaki israfı ortadan kaldırma stratejisi olarak döngüsel ekonomi konsepti içinde giderek daha fazla çerçevelenmektedir (Geissdoerfer ve diğ., 2017).

2.1.1.2. Sürdürülebilir Atık Yönetimi

Sürdürülebilir atık yönetimi; atık önleme, tekrar kullanım, geri dönüşüm ve geri kazanıma odaklanmayı, atık hiyerarşisinin uygulanmasını gerektirmektedir (Wilson ve Rodic, 2015; Memon, 2022). Atık yönetiminde sürdürülebilirlik dünya çapında yaygınlaşırken, kaynak azaltma, atık azaltma ve sürdürülebilir üretim ve tüketim yöntemlerinin elde edilmesi gibi diğer kavramlar atık yönetim sistemi/süreçlerine dahil edilmiştir (Rossi ve diğ., 2020). Sürdürülebilir kalkınmayı güçlendirmek ve sürdürmek için küresel perspektiften çevrenin korunmasına daha fazla odaklanıldığı için, atık yönetimindeki mevzuat ve düzenlemeler son zamanlarda yeni bir boyut kazanmıştır (Bello ve diğ., 2022). Wilson ve diğ. (2015)' e göre, sürdürülebilir atık yönetimi çerçevesinin iki ana bölümü kapsamı gerektiğini belirtmiştir:

-Fiziksel unsurlar arasında halk sağlığı (atık toplama ile bağlantılı), çevre (özellikle arıtma ve bertaraf sırasında koruma) ve 3R - azaltma, yeniden kullanma, geri dönüştürme (faydalı kullanım için) bulunmaktadır.

-Yönetişim stratejileri, iyi işleyen bir sistem sağlamak için gereklidir. Bunlar, paydaşların kullanıcılar, sağlayıcılar ve kolaylaştırıcılar olarak katkıda bulunmalarını sağlayacaktır. Ayrıca, mali açıdan sürdürülebilir olmalı ve sağlam kurumlar ve proaktif politikalar üzerine inşa edilmelidir.

2.1.1.3. Sıfır Atık Yönetimi

2018 yılında Sıfır Atık Uluslararası Birliği tarafından sıfır atık kavramının güncel tanımı yapılmıştır. "Sıfır Atık: Tüm ürün, ambalaj ve malzemelerin sorumlu bir şekilde üretilmesi, tüketilmesi, yeniden kullanılması ve geri kazanılması yoluyla tüm kaynakların yakılmadan ve çevreye veya insan sağlığını tehdit eden toprağa, suya veya havaya deşarj olmaksızın korunmasıdır" (Zero Waste International Alliance, 2018). Sıfır atık kavramı, "azalt, yeniden kullan, geri dönüştür, geri kazan ve kalıntıları imha et" anlamına gelen "5R kuralını" içerir. Düşük maliyetler, artan karlar ve azaltılmış çevresel etkiler gibi çeşitli avantajlar sunar (Singh, 2022). Şekil 2.1' de sıfır atık hiyerarşisi gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Sıfır atık hiyerarşisi (Zero waste, 2022)

Sıfır Atık yaklaşımı ile verimliliğin artması sağlınırken, israf önleendiğinden maliyetlerin azaltılması, ekosistem üzerindeki risklerin önlenmesi gibi faydalar da elde edilmektedir (Sıfır Atık, 2022). Sıfır atık konsepti, atık önleme üzerine odaklanan ve kaynak yaşam döngülerinin yeniden tasarlanmasını teşvik eden döngüsel ekonomi ilkesine dayanmaktadır. Böylece, tüm ürünler yeniden kullanılır ve hiçbir atık nihai olarak çöplüklere, yakma fırınlarına veya depolama alanlarına ulaşmaz (Murphy ve Pincetl, 2013). Kaynakların sınırlı olması, tüketimin azaltılması, ürün ve hizmetin yeniden tasarlanması, yeniden kullanılması üzerine vurgu yapılan sıfır atık anlayışı ile döngüsel ekonomiye katkı için farkındalığı artırmak, daha iyi önlemler ve hedefler geliştirmek çok önemlidir (Veleva ve diğ., 2017).

2.1.2. Döngüsel Ekonomi Modeli

Döngüsel ekonomi için yapılmış birçok tanım mevcuttur. Genel bir tanım olarak “Döngüsel Ekonomi” al-yap-kullan-at" modeliyle karakterize edilen doğrusal ekonominin zıt anlamı olarak üretim ve tüketim süreçleri boyunca yürütülen azaltma, yeniden kullanma ve geri dönüşüm faaliyetleri için genel bir terim olarak tanımlanabilir (Andrews, 2015; Ghisellini ve diğ., 2018; Stahel, 2016; Witjes ve Lozano, 2016). Ayrıca, “sirkülasyon”, sınırlı kaynaklarla talepteki değişikliklerin karşılanması ve kaynak verimliliğinin artırılmasını ifade ederken; “Ekonomi”, kaynakların dolaşımından elde edilen araştırma, üretim ve hizmetten elde edilen ek ekonomik faaliyetler ve değeri ifade etmektedir (Tzou ve diğ., 2019).

Döngüsel bir ekonomik sistem, sürdürülebilir kalkınma yoluyla doğal kaynakları korumak ve ekonomik büyümeyi sürdürmek ve çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla hammaddelerin

elden çıkarılmasına yönelik mevcut doğrusal sistemleri geri çekerek atıkları kaynaklara dönüştürmek amacıyla çalışır (Ghisellini vd., 2016).

Geri dönüşüm, yeniden kullanma, azaltma olarak bilinen 3R (recycle, reuse, reduction), döngüsel ekonominin temel kavramlarıdır (Kozal ve Barbaros, 2020). Bu yaklaşım çevresel etkileri en aza indirirken verimli bir ekonomik büyüme sağlaması beklenmektedir (Halkos ve Petrou, 2016). Şekil 2.2, döngüsel ekonomi yaklaşımını göstermektedir.



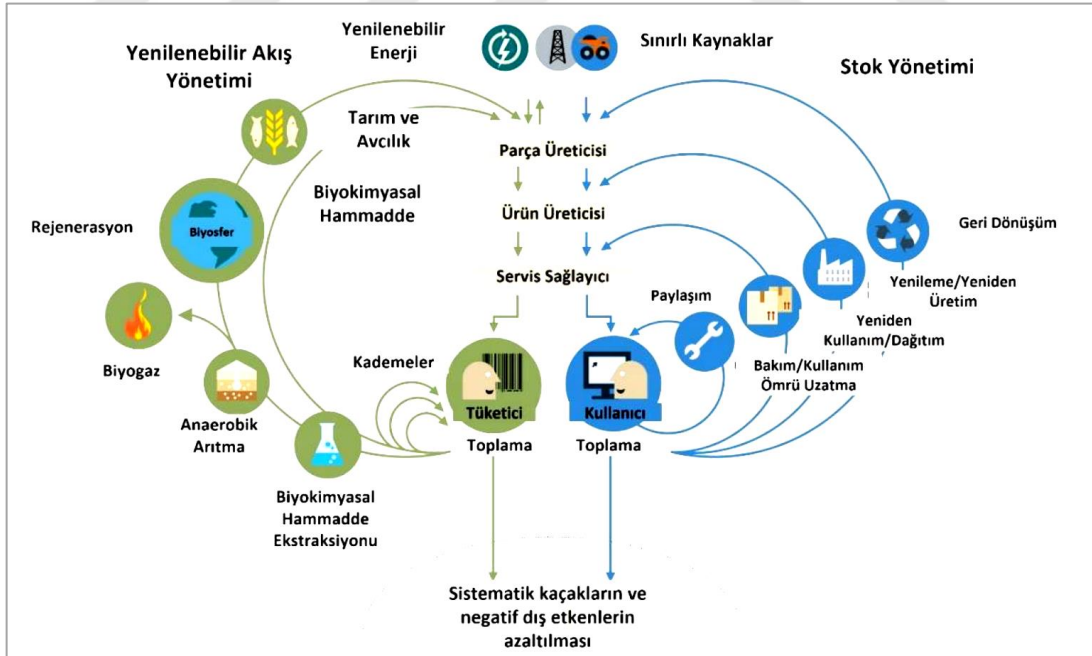
Şekil 2.2: Döngüsel ekonomi yaklaşımı (Korhonen ve diğ., 2017).

Şekil 2.2’ de gösterilen döngüsel ekonomi yaklaşımında; ürünlerin yaşam döngüsü boyunca yeniden kullanılma, yeniden üretme, yenileme, onarma, atıktan enerji süreci, atıktan geri kazanım gibi sürdürülebilirliğe katkı sağlayan uygulamaları içermektedir. Türkiye’de “Döngüsel Ekonomi” uygulaması, “sürdürülebilirlik” tanımı ile 2019’ da uygulanmaya başlanmıştır. 2021 yılı başından itibaren küresel dünyada meydana gelen pandemi, küresel ısınma gibi zorluklar nedeniyle AB’ nin Yeşil Mutabakatı zorunlu tutması ile gündemde turulmaktadır (Balbay ve diğ., 2021). Avrupa Birliği, Avrupa Birliği’nin Eylem Planı ve döngüsel ekonomi vizyonunun uygulanmasını destekleyen bir dizi önlemini kabul etmiştir. Eylem planında yapılan son güncel revizeler ile 11.03.2020 tarihinde “Yeni Döngüsel Ekonomi Eylem Planı” olarak son halini almıştır. Planda öne çıkan bazı maddeler (European Commission, 2020):

- Geri dönüştürülmüş ürün kullanımının artırılması,

- Ürün dayanıklılığının ve tekrar kullanımının sağlanarak, ürünlerdeki tehlikeli kimyasalları dikkate almak,
- Enerji ve kaynak verimliliğini artırmak,
- Karbon ve çevresel ayak izinin azaltılması,
- Tek kullanımlık ürünlerin kısıtlanması ve erdayanıklı ürünler elde edilmesi,
- Satılmayan dayanıklı ürünlerin imhasına yasak getirmek,
- Performansı verimli ve güvenli ürünler sağlanarak, geri dönüştürülmüş içeriğini artırmak,
- Digital ürün potansiyelini harekete geçirmek için dijital pasaport, etiketleme ve filigran gibi uygulamalar sunmak.

Döngüsel ekonomiyi benimsemek, 2050 yılına kadar iklim nötrlüğü hedefinin sağlanmasına ve ekonomik büyümeden kaynak kullanımından ayırmaya kararlı bir katkı sağlayacaktır. Şekil 2.3’ de döngüsel ekonomi şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Döngüsel ekonomi şeması (Ellen Macarthur Foundation, 2019).

2.2. ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT (ATY)

Atıktan Türetilmiş Yakıt, biyolojik olarak parçalanabilen fraksiyonların (örneğin gıda atıkları), metal ve camların çoğunu ayırarak ham belediye atıklarının bileşimini değiştirmek için birkaç işleme tekniğinden sonra elde edilebilir, bu da az miktarda inorganik, daha düşük nem içeriğine sahip organik malzemelerin bir karışımı (örneğin, karışık plastikler, karışık kağıtlar), ve geliştirilmiş termokimyasal özellikler ile sonuçlanır (McHenry, 2020). ATY, belediye atıklarının kalorifik değeri olmayan kısmından ayrılması ile oluşan yakıt karışımıdır. Konvansiyonel yakıtlara göre daha ucuz olup, en düşük ısı değeri 4000 kcal/kg civarı ve üzeridir. ATY' nin içeriğinde plastik, kağıt ve mukavva gibi bileşenler iyi bir kalorifik değere sahip kılmaktadır.

ATY, yüksek kalorifik değere sahip malzemeyi ayırmak için işlemden sonra katı atıklardan elde edilen pelet, tuğla veya kütük formlarında bulunan bir yakıttır (Infesta ve diğ., 2019). ATY iyi bir kalorifik değere, çimento üretiminin performansı üzerinde olumlu etkilere ve kontrol edildiğinde Avrupa mevzuatı gibi katı çevre standartlarını karşılayan sınırlı çevresel etkilere sahiptir (Bourtsalas ve diğ., 2018). Çimento fabrikalarında ATY kullanımı ile fosil yakıt tüketimi azalır, dolayısıyla CO₂ emisyonlarının azalması ile daha çevreci bir atık kullanımı ortaya çıkar. ATY'nin emisyon faktörleri ile yenilenemeyen enerji kaynaklarının emisyon faktörleri arasında büyük bir fark vardır (Kara, 2012).

ATY' nin geleneksel fosil yakıt yerine çimento fırınlarında kullanılması yaşam döngüsü değerlendirmesi, asitleşme, sera gazı emisyonları, ötrofikasyon, depolama maliyetleri ve kanserojen risk potansiyelinde azalma gibi çevresel faydalar göstermiştir. Bununla birlikte, bu faydayı sağlamak için çimento üretiminde ATY kullanılırken hava emisyonlarının kontrol edilmesinin önemi vurgulanmıştır (Silva ve diğ., 2021).

Atıktan enerji proseslerinde belediye atıkların etkin kullanımını iyileştirmek için atıklardan Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY) ve Katı Geri Kazanım Yakıtı olmak üzere iki tür katı yakıt üretilir (Białowiec ve diğ., 2017). Bir katı yakıt olarak, ATY, işlenmemiş katı atığa göre daha düzgün parçacık boyutuna ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir (Malinauskaite, 2013). ATY üretmek için, atıklar parçalanmalı ve cam, metal ve taş gibi tüm yanıcı olmayan malzemeleri uzaklaştırmak için dikkatlice ayrılmalıdır. Parçalama ve ayırma, enerji yoğun bir dizi mekanik işlem kullanılarak gerçekleştirilir (Breeze, 2018).

Genel olarak, belediye katı atıklarından atıktan türetilmiş yakıt eldesi için şu işlemler uygulanır:

- Kaynak azaltma
- Mekanik ayırma ve ayırma
- Parçalama
- Ayırma ve eleme
- Karıştırma
- Kurutma ve peletleme
- Paketleme
- Depolama



Şekil 2.4: Atıktan türetilmiş yakıt üretimi (Infesta ve diğ., 2019).

20/06/2014 tarihli ve 29036 sayılı Resmi Gazete ile yürürlükte olan Atıktan Türetilmiş Yakıt Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği yayınlanmıştır. Tebliğe göre, atıkların analizinde aşağıdaki özellikler belirlenir (Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY), Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği, Değişik: RG-23/12/2014-29214) :

- a) Atığın kaynağı ve atık kodu,
- b) Atığın net kalori değeri,
- c) Kül miktarı,
- ç) Su miktarı,
- d) Uçucu madde miktarı,
- e) pH değeri.

Atıktan Türetilmiş Yakıt, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği'nin EK-III kısmında yer alan ATY hazırlama tesislerinde hazırlanacak yakıt özellikleri Tablo 2.1' de, ATY üretimi için izinli olan atıklar içindeki maksimum kabul edilebilir ağır metal içeriği için sınır değerler ise Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.1: ATY hazırlama tesislerinde hazırlanacak yakıtın özellikleri.

Parametre	Sınır Değer
Kalorifik değer, kcal/kg	>2500
Tane boyutu, mm	<50 ⁽¹⁾
Nem oranı, %	<35
Klor İçeriği, %	<1 ⁽²⁾
Hg, µg/MJ	<330
Ağır metal toplamı, mg/MJ	<2500
PCB, ppm	<5
Solvent içeriği, %	<15

⁽¹⁾ Tane boyutu parametresi ATY kullanacak tesislerde kullanılan teknolojilerin Bakanlıkça uygun bulunması halinde arttırılabilir.

⁽²⁾ Klor by-pass hattı bulunan tesisler için parametre üç katına kadar Bakanlıkça uygun bulunması halinde arttırılabilir.

Tablo 2.2: ATY üretimi için izinli olan atıklar içindeki maksimum kabul edilebilir ağır metal içeriği için sınır değerler.

Element Sınır değeri	Sınır Değer (mg/kg)
Kurşun (Pb)	<600
Kadmiyum (Cd)	<10
Krom (Cr)	<400
Bakır (Cu)	<500
Nikel (Ni)	<300
Çinko (Zn)	<4000

Atıktan Türetilen Yakıtlar, Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği'nin EK-III İlişkin Tebliği' ne (29036/20.06.2014) göre, ATY'nin nem içeriği %35'ten az, ısı değeri ise 2500 kcal/kg'dan yüksek olmalıdır. Isıl değerin bu değerleri sağlayabilmesi için kül içeriğinin düşük, uçucu madde içeriğinin yüksek olması gerekmektedir. ATY' nin yanma davranışı, kömürde olduğu gibi yakın karakteristik olarak da bilinen nem, kül ve uçucu madde içeriğine bağlıdır (Özkan ve diğ., 2022). ATY yakıtların kül içeriği taş kömürü ve biyokütleden önemli ölçüde daha yüksek olabilir. Bununla birlikte, biyokütleden farklı olarak, ATY'nin yanması sırasında üretilen kül çok daha iyi bir kimyasal bileşime sahiptir (Galko ve diğ., 2022).

Ülkemizde ATY potansiyeline ait araştırmalarda, 7 milyon ton belediye atığından elde edilen evsel ATY' nin çimento fabrikalarında yakılması ile 3 milyon ton fosil kullanımının engellenerek yıllık 1,7 milyon ton CO₂ azaltımı ve %80 belediye atığı azaltılacağı tespit edilmiştir (Bulut, 2017). Ülkemizde İSTAÇ'a bağlı bir tesiste ATY üretildiği bilinmektedir. Tesise gelen karışık belediye atıklarından geri kazanılabilir kısımlar ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan geri dönüştürülemeyecek olan plastik türevli atıklardan ise %27 oranında ATY üretimi yapılmaktadır. ATY tesisine gelen 300 ton atıktan 81 ton plastik bazlı ATY eldesi sağlanmaktadır (Çelik, 2018). Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) verilerine göre, endüstriyel atık kaynaklarına yakın bazı entegre fabrikalarda enerjinin %25'den fazlasının ATY'den karşılandığı tespit edilmiştir (Bulut, 2017).

2.2.1. ATY' den Enerji Eldesi

Atıktan enerji kavramının temel tanımı, enerji üretimi için geleneksel kaynaklar yerine alternatif enerji kaynakları olarak farklı atıkların kullanımının tercih edilmesidir. Kabul edilebilir bir kalorifik değere sahip atık malzemeler, ayırma ve parçalama gibi basit işlemlerden hemen sonra veya termokimyasal işlemler gibi daha karmaşık işlemlerden sonra enerji üretimi için kullanılabilir. Atık malzemelerden yanıcı olmayan içeriğin elimine edilmesi nedeniyle termokimyasal proseslerden elde edilen ürünlerin daha yüksek kalorifik değerlere sahip olduğu gözlemlenebilir.

ATY; kağıt, kraft, tekstil, mobilya ve çok çeşitli diğer malzemeler gibi günlük öğelerden oluşur. Bu atığın büyük bir kısmı doğrudan depolama sahasına gider ve depolama sahası hacmini azaltmak için bir atık yönetim sistemi çalışır. Dünyanın birçok ülkesinde atıklar düzenli depolama alanlarına gitmektedir; ancak, birçok ülke atık yönetimini karşılayamamaktadır. Düzenli depolama alanları hava, su ve arazi kalitesini etkileyebilir. Çöp sahasında organik atık ayrıştırılır ve sera gazı emisyonuna katkıda bulunan metan (CH₄) başta olmak üzere çöp gazı üretir. Depolama sahası atıklarından veya içinden geçen su, yakındaki araziye ve yeraltı suyunu kirletebilecek sızıntı suyu oluşturur. ATY, atıkların çevre dostu bir şekilde bertaraf edilmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak yenilenebilir enerji üretimine de katkıda bulunur. Ayrıca enerji üretiminde fosil yakıtlar yerine ATY kullanılması sonucunda zararlı emisyonlar azaltılmaktadır (Yang ve diğ., 2022).

Atıklardan alternatif yakıt geliştirmek, atıklardan elde edilen toplam faydaları en üst düzeye çıkaran termokimyasal dönüşüm yoluyla enerji geri kazanımı sağlar (Elkhalifa ve diğ., 2019; Iyamu ve diğ., 2020; Naqvi ve diğ., 2018). Bu yöntemler ile enerji geri kazanımının yanısıra atık hacminin azaltılması, stabilizasyon ve emisyon kontrolü de sağlanmaktadır. Genel olarak, kaynakların geri kazanılması ve atıktan enerji üretimi için kullanılan ileri teknolojiler genel olarak iki türde kategorize edilebilir. Bu, (i) gazlaştırma, yakma ve pirolizi içeren termokimyasal presesleri ve (ii) anaerobik çürüme, kompostlama ve depolamayı içeren biyokimyasal prosesleri içermektedir (Kabir ve Khan, 2020).

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY), piroliz, gazlaştırma ve yanma gibi süreçler termokimyasal dönüşüm için hammadde olarak kullanılabilir (Couto ve diğ., 2017). Termokimyasal dönüşümde ATY, potansiyel olarak yüksek değerli üretilen ürünlerin homojen bir bileşimi ile sonuçlanır. Örneğin, gazlaştırmadan üretilen gazlar (sentez gaz), metanol (Wall, 2012), amonyak (Litvinenko ve Meyer, 2018), biyometan ve sıvı hidrokarbonlar (Evans ve Smith, 2012). Sentez gaz ısıtma, aydınlatma ve elektrik üretimi için kullanılabil-diğı gibi hammadde üretiminde de faydalanılmaktadır. Atıktan türetilmiş yakıt (ATY), enerji geri kazanımı yoluyla bu atıkları kullanmanın umut verici bir yolu olmaktadır.

Atık miktarının büyük ölçüde azaltılması, alternatif bir enerji kaynağı olma potansiyeli, düzenli depolama rehabilitasyonunun kolaylaştırılması, değerli arazinin geri kazanılması ve karbon ayak izinin azaltılması gibi sayısız avantajlar nedeniyle ATY' den ısıtma işlemi yoluyla atıktan enerji (WtE) üretimi için en çok uygulanan metoddur (Kumar ve Samadder, 2017; Shareefdeen ve Elkamel, 2015; Kalyani ve Pandey, 2014).

Bununla birlikte, ATY' ler termokimyasal reaksiyonlarda yer aldığında, ısıtma hızı, ayrışma için gaz ortamı, sıcaklık, gaz akış hızı, kalma süresi ve parçacık boyutu gibi farklı çalışma koşulları altında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişikliklerin anlaşılması önemlidir (Olatunji ve diğ., 2018).

2.2.2. Atıktan Enerji Üretimine Yönelik Gelecekteki Beklentiler

2030' ların ortalarında beklenen toplam dünya nüfusunun 8,4 milyar, 2050' lerin ortalarında ise 9,6 milyara ulaşması beklenmektedir (Population Reference Bureau, 2013). Nüfus artışı ve küresel ekonomi nedeniyle küresel enerji talebinin, 2040 yılına kadar % 37 artacağı tahmin edilmektedir (International Energy Agency, 2014). Dünya Bankası, gelecekteki eğilimleri tahmin ederken, küresel atık üretiminin 2025 yılına kadar günlük 6 milyon tonun üzerine

çıkacağını öngörmektedir (World Energy Council, 2016). Fosil yakıt kaynakları, 2060 yılına kadar tükeneceği tahmin edildiğinden sürdürülebilir ve güvenli olmadığı kabul edilmektedir (Howarth, 2019). Ayrıca, küresel atık üretiminin 2100 yılında 11 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Rogoff ve Screve, 2019).

Gelişmekte olan ülkeler, sürekli ekonomik büyüme ve endüstriyel gelişme için artan enerji ihtiyacından endişe duymakta ve bu nedenle alternatif enerji kaynakları aramaktadır. Örneğin, Güney ve Güneydoğu Asya ülkeleri ekonomik büyüme için artan enerjiye ihtiyaç duymakta ve şu anda Bangladeş gibi büyük ölçüde fosil yakıtla bağımlıdır (Khan, 2020a; Khan, 2019). Bu bölgedeki ülkeler artık sadece fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için değil, aynı zamanda büyük miktarda belediye katı atık ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak için de yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Bu bölgedeki birçok ülke, bu atıklardan mümkün olduğunca enerji geri kazanımı için atıktan enerji teknolojilerinin kullanılmasını önermiştir. (Rohatgi 2017).

Fosil yakıtların daha çevre dostu olanlarla değiştirilmesi için alternatif enerji kaynakları önem arz etmektedir. Bu bağlamda bilimsel faaliyetler, hidrojenin fosil yakıtlara alternatif olarak büyük bir potansiyel taşıdığını ve küresel net sıfır enerji ağının kurulmasında önemli bir rol oynayacağını göstermektedir (Hydrogen Council, 2021).

Atıktan enerji süreçleri, net sıfır karbon ve atık vizyonları tarafından belirlenen gelecekteki hedeflerini önemli ölçüde karşılayacaktır. Atıktan enerji dönüşüm prosesleri, yıllık 160 milyon ton sera gazı emisyonunu azaltma potansiyeline sahiptir ve 2030 yılına kadar %2 elektrik sağlaması beklenmektedir (Kalair ve diğ., 2021). Şu anda ABD, her gün ortalama 90.000 ton atığı dönüştürebilen 87 tesise ev sahipliği yapmaktadır. Bu, kolayca erişilebilen 2,3 GW elektrik üretimi demektir (Klinghoffer ve diğerleri, 2013).

Suudi Arabistan, dünyanın ikinci petrol üreticisi olmasına rağmen, özellikle atıktan enerji araştırmalarına ve ATY'ye önemli yatırımlar yapmıştır. Bu çaba, ülkenin 2032 yılına kadar 100 GW'a ulaşacağı tahmin edilen artan enerji talebi açısından daha da motive edilmektedir (Ouda ve diğ., 2017). Hidrojen de dahil olmak üzere alternatif enerji kaynakları, emisyon azaltımı ve yenilenebilir özellikleri nedeniyle gelecekteki enerji ekonomisinde çok önemli bir rol oynayacaktır.

2.3. TERMOKİMYASAL PROSESLER

Termokimyasal dönüşüm teknikleri; sıvılaştırma, yakma, piroliz ve gazlaştırma olarak bilinmektedir (Seo ve diğ., 2022).

2.3.1. Yakma

Yanma, orijinal katı yakıt kaynağında bulunan organik maddenin yüksek sıcaklıkta tamamen oksidasyonu yoluyla katı yakıtın termal enerjiye dönüştürülmesidir. Bu teknikte atık malzeme 900 °C ile 950 °C sıcaklık arasında yakıt gazı (çoğunlukla CO₂, CH₄ ve H₂ karışımı) yardımıyla yakılmaktadır (Ali ve diğ., 2020). Bu yüksek sıcaklık aralığı enerji üretmek için uygulanabilir. Bu enerji ısı enerjisi olarak kullanılabilir ve elektrik enerjisine dönüştürülür. Enerji üretimi için ana hammadde genellikle düşük nem içeriğine sahip katı atıklardır. Yanma sonrasında kalan katı (kül), uygun şekilde muhafaza edilmezse reaktörlerde çalışma sorunlarına neden olabilecek oksitlenmemiş inorganik maddelerden oluşur. Bu yöntemin ana avantajı, önemli ölçüde atık azaltma ve daha hızlı ve daha fazla enerji üretimidir (Abbasi ve diğ., 2022). Atık kütlesini ve hacmini en aza indirmenin yanı sıra, yakma işleminde yer alan yüksek sıcaklık, tehlikeli madde imhasına da yardımcı olur (Tsui ve Wong, 2019). Yakma işleminin uygulanmasındaki en büyük dezavantaj ise, çevre ve sağlık riskleri içeren yüksek düzeyde hava ve su kaynaklı kirleticilerin oluşmasıdır (Alao ve diğ., 2022). Yakmanın son ürünü, esas olarak karbondioksit (CO₂), nitrojen (N₂), oksijen (O₂) ve yanıcı olmayan malzemelerden oluşan sıcak yanan gazlardır. Ancak yakma işlemi sırasında dioksinler, furanlar, partikül maddeler (PM), kükürt oksitler (SO_x), nitrojen oksitler (NO_x) gibi kirleticilerin emisyonu meydana gelir. Bu nedenle, atık yakma tesislerinde kirletici/emisyon hava kirleticilerini azaltmak için kontrol sistemi kullanılmaktadır (AlQattan ve diğ., 2018; Ouda ve diğ., 2016; Perna ve diğ., 2018)

2.3.2. Piroliz

Piroliz, biyokütlenin havasız ortamda katı, sıvı ve gaz (CH₄, H₂, CO, CO₂, vb.) olan katma değere sahip ürünlere dönüştürülmesi yöntemidir (Gurjar ve diğ., 2021). Piroliz, genellikle biyokütle türlerinin termokimyasal dönüşümü için genellikle en çok tercih edilen yöntemdir. Sıcaklık, basınç, reaktör tipi ve akışkanlaştırıcı gaz seçimi gibi parametreler piroliz işlemi sonrası ürün dağılımı üzerinde etkilidir. Sıcaklık, moleküller arası bağların parçalanması ve kırılması üzerinde etkili olmaktadır. Kesik ve yarı kesikli reaktör, akışkan ve sabit yataklı reaktör gibi farklı türlerdeki reaktör tiplerinin kendilerine ait avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin, kesikli reaktörde piroliz ürün verimi daha yüksek olmasına rağmen genellikle

maliyet konusunda diğer reaktörlere göre dezavantajlıdır (Al-Salem ve diğ., 2017). Konvansiyonel piroliz, işlem sırasında kullanılan operasyonel parametrelere bağlı olarak, yavaş piroliz, hızlı piroliz ve flash piroliz olarak ayrılır (Vuppaladadiyam ve diğ., 2022). Son zamanlarda, ara piroliz olarak bilinen, yavaş ve hızlı piroliz arasında gerçekleştirilen yeni bir piroliz formu geliştirilmiştir (Sun ve diğerleri, 2022).

2.3.3. Sıvılaştırma

Sıvılaştırma, organik maddelerin katalizörler ve hidrojen verici çözücüler ile suyun doyma basıncı üzerinde ve yüksek sıcaklıkta (250 °C) sıvı yakıtlara dönüştüren termokimyasal bir süreçtir. Biyokütlenin katı yapısını yağlı bileşenlere (biocrude) parçalamak için depolimerizasyon, bağ kırma, yeniden düzenleme ve dekarboksilasyon gibi reaksiyonlar eşlik eder (Gollakota ve diğ.,2018).

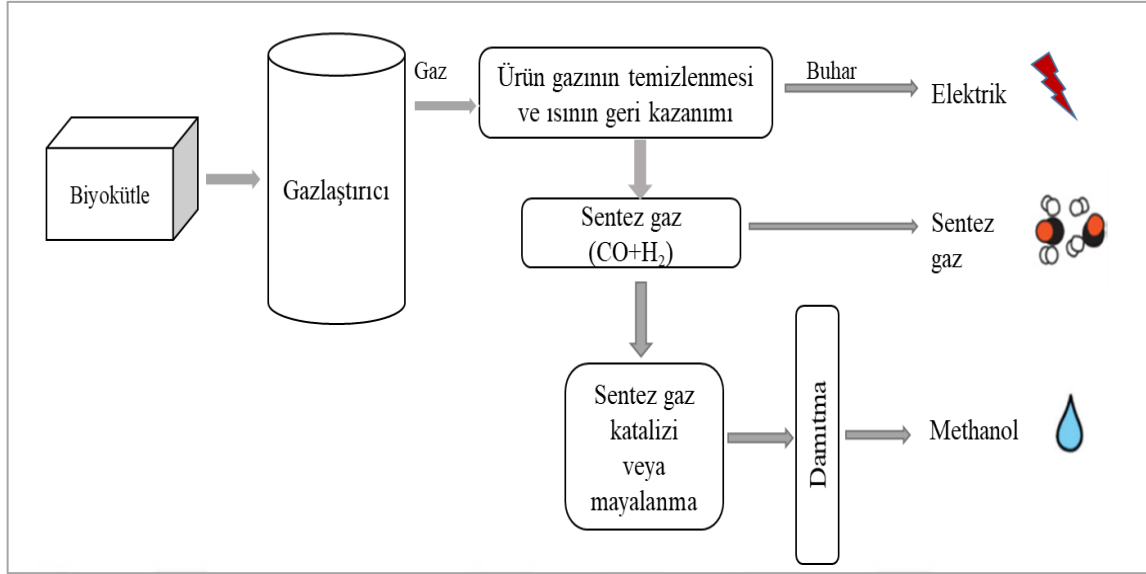
2.3.4. Gazlaştırma

Gazlaştırma prosesi 2.4 başlığı altında detaylı olarak açıklanmıştır.

2.4. GAZLAŞTIRMA

Gazlaştırma, biyokütle ve kentsel katı atık gibi karbon ve hidrojen içeren maddelerin bir gazlaştırma ajanı (hava, buhar ve oksijen) varlığında yüksek sıcaklıklarda (800-1100°C) kısmen oksitlendiği ve gaz halindeki ürünlere dönüştürüldüğü termokimyasal bir dönüşüm sürecidir (Capareda ve Maglinao, 2019). Ancak, gazlaştırmadaki oksijen miktarı, yakıtın tam yanması için gereken stokiyometrik miktarın altında olacak şekilde kontrol edilir, böylece hammaddedeki enerjinin %80' ini kimyasal enerji olarak içeren bir sentez gazı (syngaz) üretilir. Genellikle sentez gazı olarak adlandırılan ürün gazı, hidrojen (H₂), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO₂), su (H₂O) ve metan (CH₄) gibi az miktarda hidrokarbondan oluşur (Chan ve diğ., 2019).

Gazlaştırma kapalı bir hazne içinde endotermik ve ekzotermik reaksiyonlar yürüttüğü için, çalışması sırasında daha az enerji talebi vardır. Gazlaştırma, konvansiyonel atık bertaraf teknolojilerine kıyasla enerji kazanımı açısından daha verimli ve proses sonucunda oluşan gazın kapalı hazne içerisinde kalması nedeniyle daha çevre dostu bir uygulama olarak bilinmektedir (Yan ve diğ, 2016). Gazlaştırma, yüksek enerji verimliliği ve düşük sera gazı emisyonu üreten ileri bir teknolojidir (Saidi ve diğ., 2020). Şekil 2.5' de biyokütlenin gazlaştırma işlemi şematik olarak gösterilmiştir:



Şekil 2.5: Enerji, gaz ve etanol üretimi için termokimyasal işlem (Basu, 2018).

Gazlaştırma ile hammadde, yakıt olarak veya katma değerli kimyasalların üretimi için kullanılabilecek uygun gazlı ürünlere dönüştürülür (Basu, 2018). Bu yakıt ürünleri, elektrik üretimi, hidrojen üretimi ve diğer kimyasal ürünler için bir hammadde olarak dahil olmak üzere birçok uygulamada kullanılabilir (Kushwah ve diğ., 2022). Gazlaştırma ürünlerinin içeriği ve miktarı organik maddenin cinsine, aktivitesine, gazlaştırma ajanının tipine ve uygulama yöntemine göre değişmektedir (Ongen ve diğ., 2019; Varank ve diğ., 2022).

Oksijen, buhar ve hava, gazlaştırma için kullanılan başlıca gazlaştırma maddeleridir (Ramos ve diğ., 2018). Bir gazlaştırıcıda üretilen gazın bileşimi ve ısı değeri, kullanılan gazlaştırma maddesinin türünün ve miktarının güçlü fonksiyonlarıdır (Cortazar ve diğ., 2023). Azot, oksijenin kısmi basıncını düşürerek gazlaştırma reaksiyonlarının verimini azaltır ve oluşan sentez gazın ısı değeri düşük olur (Xiang ve diğ., 2020). Bundan kaçınmak için gazlaştırma ajanı olarak oksijen kullanılır. Düşük katran içeriğine sahip bir gaz elde etmek için oksijen iyi bir tercihtir (Cortazar ve diğ., 2023). Buhar ve hava gazlaştırma ile karşılaştırıldığında, oksijen gazlaştırma, en yüksek ısı değere sahip sentez gazını üretir (Basu, 2010). Yine de hava, kolaylık, düşük sermaye maliyeti ve işletme maliyeti nedeniyle küçük veya orta ölçekli gazlaştırıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Habibollahzade ve diğ., 2021). Bir gazlaştırıcıda gerekli yanma reaksiyonları için gerekli oksijeni sağlamak için genellikle buharla birlikte hava eklenir.

Gazlaştırma, diğer atıktan enerji metodlarına kıyasla daha düşük sera gazı emisyonuna sahip, verimli, çevre dostu bir yöntemdir. Bu yöntem, farklı atık kaynaklarına ve hammaddelere karşı yüksek esnekliğe sahiptir (Alaedini ve diğ., 2023). Ürün gaz kalitesi, ısı değeri ve uygulama alanları üzerinde etkili olan parametreler sıralanmaktadır (Öngen, 2010; Valizadeh ve diğ., 2022):

- Yakıt özellikleri
- Gazlaştırma ajan türü
- Reaksiyon sıcaklığı
- Ajan akış debisi
- Yakıtın partikül boyutu
- Reaktör ısıtma hızı
- Bekleme süresi
- Katalizör/ yakıt oranı

2.4.1. Gazlaştırıcı Reaktör Tipleri

Atıkların gazlaştırılması için biyokütle gazlaştırma ile aynı temel reaktör tipleri kullanılabilir. Uygun bir gazlaştırıcının seçimi genellikle atık türüne ve ürün gazının nihai uygulamasına bağlıdır. Gazlaştırıcılar dört ana grupta sınıflandırılabilir (Midilli ve diğ., 2021);

-Akışkan yataklı,

-Sabit yataklı,

-Sürüklemeli akışlı

-Plazma gazlaştırıcılar.

2.4.1.1. Akışkan Yataklı (Fluized Bed) Gazlaştırıcılar

Akışkan yataklı gazlaştırıcılar, akışkan yatak rejimine ulaşmak için küçük parçacık boyutu gerektirir. Yatak daha homojendir; bu nedenle reaksiyon bölgelerini ayırt etmek mümkün değildir. Gazlaştırma ajanı aynı zamanda bu birimlerde akışkanlaştırma maddesidir. Sabit yataklı gazlaştırıcılara göre çeşitli avantajlara sahiptir:

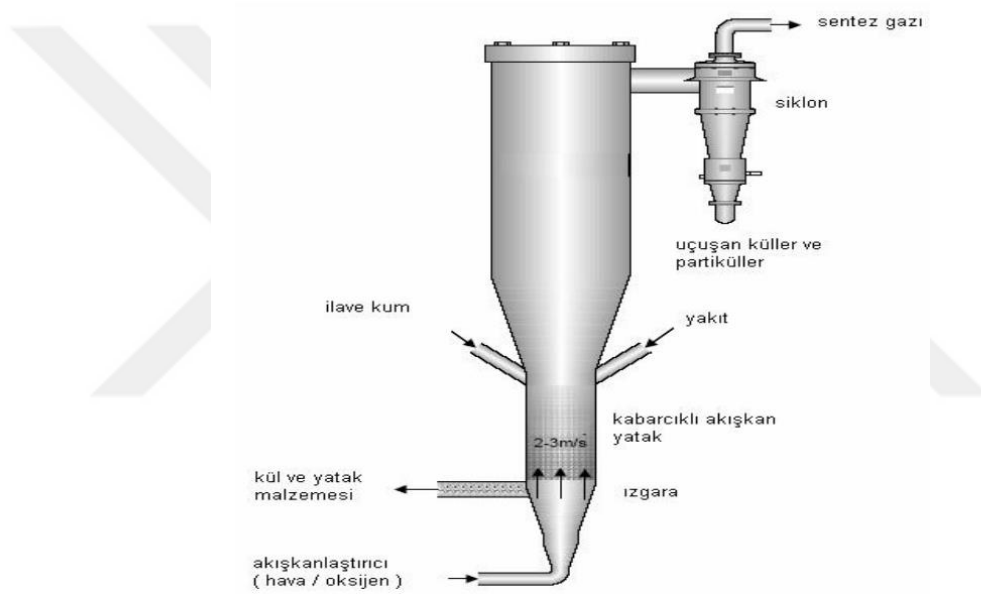
-homojen ve kontrol edilebilir sıcaklık,

-düşük katran üretimi,

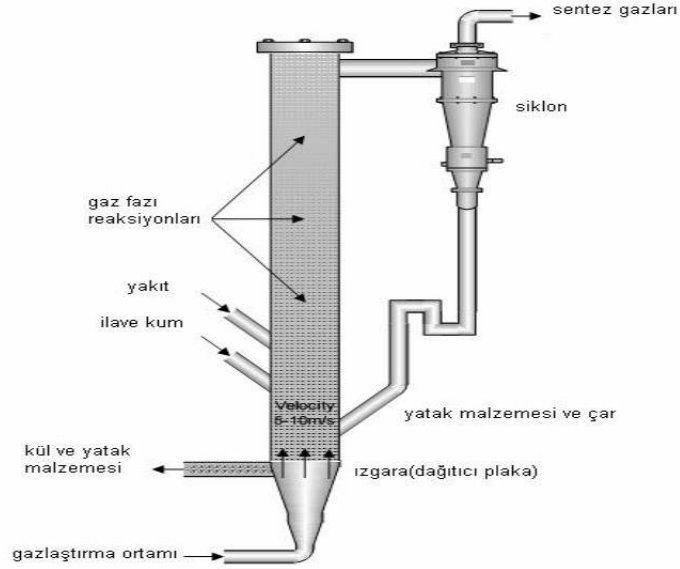
-yüksek oranda dönüşüm,

-mükemmel gaz katı teması (Sánchez ve Martín, 2022).

Akışkan yataklı gazlaştırıcılar, yakıt kaynaklarının termal ayrışması ile yüksek verimle sentez gazı üretir. Bu gazlaştırıcılar yüksek performansa sahip olup, çevre dostu ve ekonomik olarak etkin teknolojilerdir (Demirtaş, 2019). Akışkanlaştırma hızına bağlı olarak kabarcıklı akışkan yataklı ve dolaşımli akışkan yataklı olmak üzere 2 tip gazlaştırıcı vardır. Şekil 2.6’ da kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcı, Şekil 2.7’ de dolaşımli akışkan yataklı gazlaştırıcı gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcı (Kayahan ve diğ., 2019).



Şekil 2.7: Dolaşimli akışkan yataklı gazlaştırıcı (Kayahan ve diğ., 2019).

2.4.1.2. Sabit Yataklı (Fixed Bed) Gazlaştırıcılar

Sabit yataklı gazlaştırıcılar hava ve yakıt girişi yönüne göre iki farklı temel yolla çalışabilir:

- yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı
- aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı

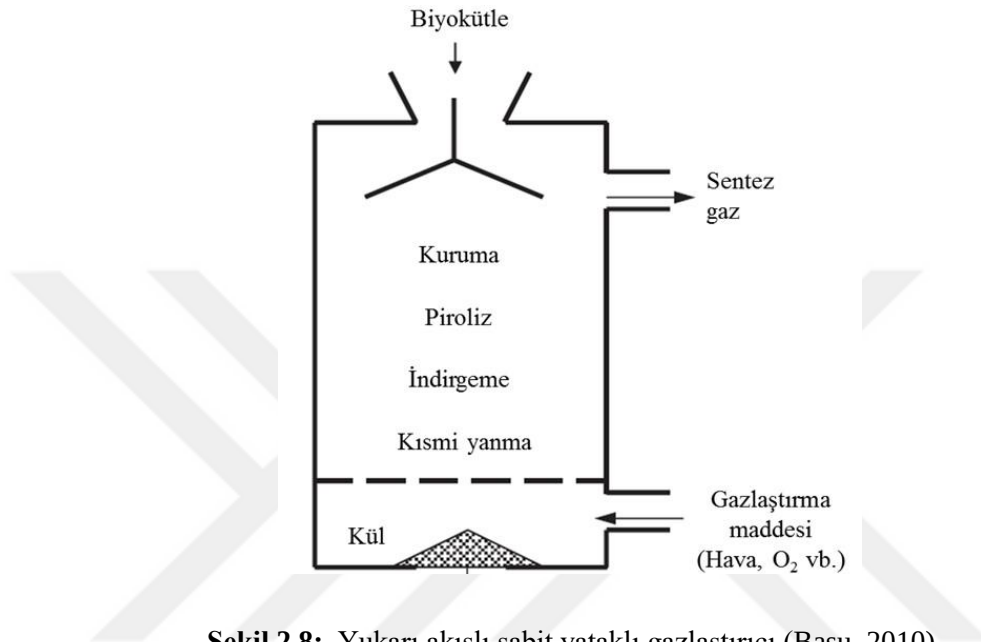
Ayırt edici özellik, gazlaştırma maddesinin veya ürün gazının akış yönüdür. İlk durumda akış yönü yukarı, ikinci durumda akış yönü aşağı doğrudur. Sabit yataklı reaktörler, iyi bir karbon dönüşümü, yüksek bekleme süresi, düşük kül oluşumu ve düşük gaz hızı ile çalıştırılabilir (Yücel ve diğ., 2016; Ren ve diğ., 2020b). Genellikle, sabit yataklı gazlaştırıcılar küçük ölçekli uygulamalarda (10 MW'a kadar) kullanılmıştır.

Yukarı akışlı (updraft) gazlaştırıcı

Yukarı çekişli bir gazlaştırıcı, kısmi yanma, indirgeme ve piroliz bölgelerinden oluşur. Gazlaştırma ajanı reaktörün alt bölgesinden beslenerek yakıt akışına karşı akım görevi görür. Yukarı akışlı (updraft) gazlaştırıcının özellikleri şunlardır (Rakesh ve Dasappa, 2018):

- Nispeten yüksek katran içeriğine sahip bir ürün gazı,
- Düşük ürün gaz çıkış sıcaklıkları nedeniyle yüksek termal verim,
- Yüksek nem içeriğine sahip yakıt gazlaştırılması.

Yukarı akışlı gazlaştırıcıda, sıcak gaz hammadde yatağından geçerken ve gazlaştırıcıyı düşük sıcaklıkta terk ederken en yüksek verimliliğe ulaşılır. Gazın verdiği ısı, hammaddeyi ön ısıtma ve kurutma için kullanılır. Ham gazda aşırı katran miktarı ve yükleme kapasitesinin zayıf olması, yukarı akışlı gazlaştırıcının dezavantajlarından biridir. Yukarı akışlı gazlaştırıcının şematik gösterimi Şekil 2.8 'de görülmektedir.



Şekil 2.8: Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı (Basu, 2010)

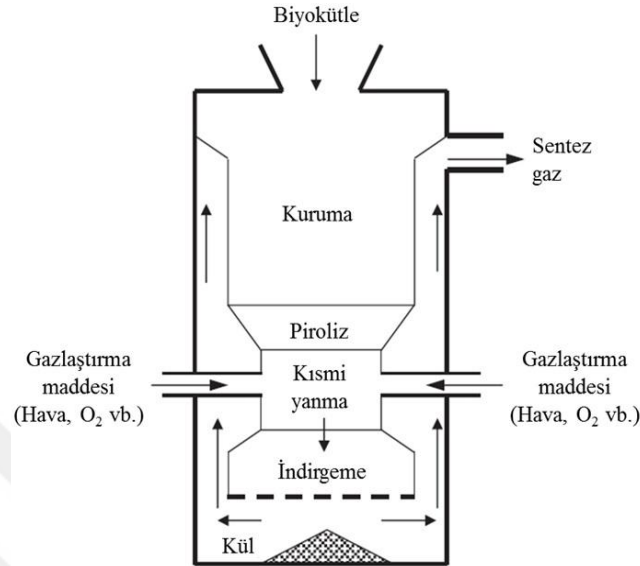
Aşağı Akışlı (down draft) Gazlaştırıcı

Aşağı akışlı gazlaştırıcıda, yakıt reaktörün üstünden verilir ve gazlaştırma ajanı gazlaştırıcının alt bölümüne doğru ilerler. Piroliz ve yanma ürünleri aşağı doğru akar. Sıcak gaz daha sonra gazlaştırmanın gerçekleştiği kalan sıcak kömürün üzerinde aşağı doğru hareket eder. Aşağı akışlı küçük gazlaştırıcılarda, daha düşük bir genel verimlilik ile daha yüksek nem ve kül içeriğinin idaresi zorluğu yaygın görülen sorunlardır. İyi gaz kalitesine sahip bir tesisi ateşlemek ve çalışma sıcaklığına getirmek için gereken süre (20-30 dakika), yukarı akışlı gaz üreticisinden daha kısadır. Düşük katran içeriğine sahiptir. Ancak daha düşük enerji çıkışı görülür. Bu tip gazlaştırma reaktörü aşağıdaki özellikleri sunar (Rakesh ve Dasappa, 2018):

- Nispeten düşük katran içeriğine sahip bir ürün gazı,
- Yüksek ürün gaz çıkış sıcaklıkları nedeniyle düşük termal verim
- Nispeten düşük nem içeriğine sahip yakıt gazlaştırılması,

-Sabit yataktan sorunsuz gaz akışını garanti etmek için yalnızca yoğun ve katı besleme stoğu işlenebilir.

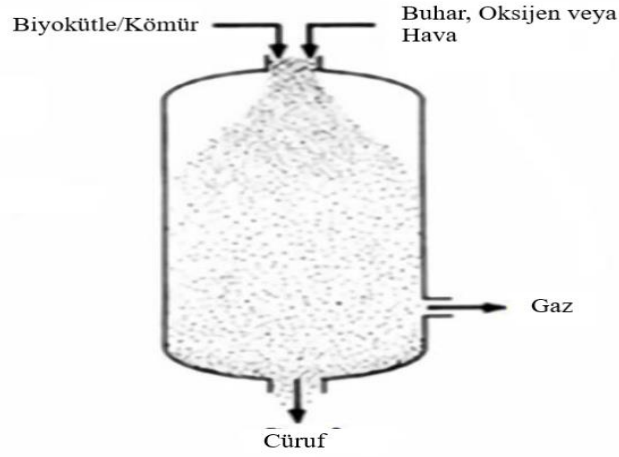
Aşağı akışlı gazlaştırıcının şematik gösterimi Şekil 2.9' da görülmektedir.



Şekil 2.9: Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı (Basu, 2010)

2.4.1.3. Sürüklemeli Yataklı Gazlaştırıcılar

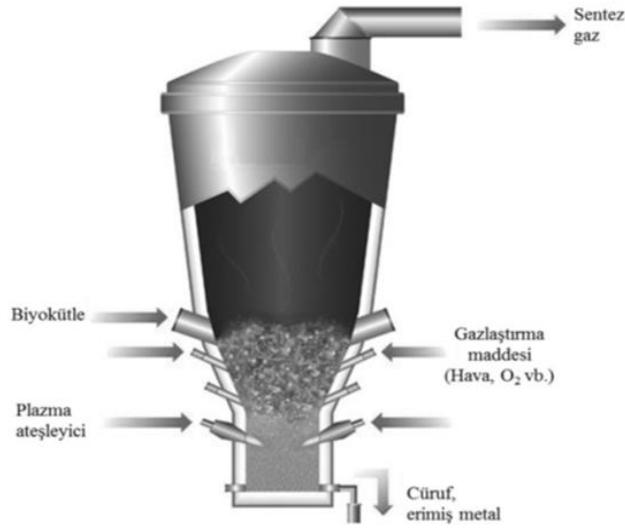
Bu tip gazlaştırıcılarda kullanılan küçük boyutlu yakıt, gazlaştırma maddesi ile birlikte akan reaktörün üst kısmından beslenir. Gazlaştırma ajanı ile reaktörün üst kısmından beslenen yakıt hızla ısıtılır; bununla birlikte gazlaştırma ajanı ile reaksiyona girer (Tarakcıoğlu, 2015). Ortalama reaktör sıcaklığı 1500 C civarındadır; ancak sürüklenmiş yataklı gazlaştırıcılarda yakıt partikül boyutu ortalama 250 mm'dir. Yakıt, reaktöre mikron partikül boyutunda gönderilir (Feng ve diğ., 2020). Sürüklenmiş akışlı gazlaştırıcılar, gelişmiş karbon dönüşüm verimliliğine ve daha fazla yakıt esnekliğine, tekdüze sıcaklık dağılımına ve düşük kalma süresine sahiptir (Weiland ve diğ., 2013). Sürüklemeli yataklı gazlaştırıcının şematik gösterimi Şekil 2.10' da gösterilmektedir.



Şekil 2.10: Sürüklemeli Yataklı Gazlaştırıcı

2.4.1.4. Plazma Gazlaştırıcılar

Plazma gazlaştırma, termodinamik dengenin bir ark plazma aracılığı ile sağlandığı ve çalışma koşulları ile gazlaştırma işleminin geliştirilmiş bir düzenlemesidir (Materazzi ve diğ., 2014). Yüksek kaliteli sentez gazı üretmek için kısmi oksidasyon altında çok yüksek sıcaklıklar (1400–2000 °C) kullanır (Prado ve diğ., 2020). Bu kadar yüksek sıcaklıklarda, metaller, toksik malzemeler, silikon dahil olmak üzere gazlaştırıcılarda beslenen tüm atıklar, toksik olmayan kalıntılar halinde erir (Rajasekhar, 2015). Plastik, organik ve sentetik bileşikler, zehirli gazlar, karbon, hidrojen, oksijen ve elementlerin ana kurucu atomlarına ayrışır. Bu işlem sırasında, organik maddeler aktif türler aracılığıyla bileşenlerine ayrılır ve üretilen nihai malzemeler kül, cüruf ve sentez gazıdır. Şekil 2.8’ da plazma gazlaştırıcının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.11: Plazma gazlaştırıcı (Basu, 2010)

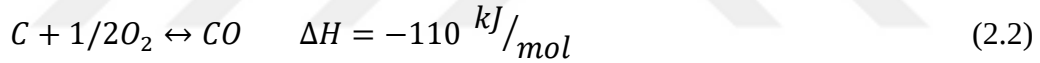
2.4.2. Gazlaştırma Prosesi

Kuruma, piroliz, indirgenme ve yükseltgenme gazlaştırma prosesinin oluşturan 4 aşamadır:

1. Kuruma Bölgesi: Kurutma aşamasında, hammadde oksidasyon aşamasından gelen ısı ile nem içeriğini kaybeder. Isıl işlemlerin tümünde, başlangıç basamağında olduğu gibi gazlaştırma işlemi de kurutma ile başlamaktadır. Kurutma işlemi 100-150 °C aralığında oluşur. Katı bir biyokütle yakıtının nem içeriği buharlaştığında geriye kuru madde kalır ve daha sonra kimyasal reaksiyonlara da katkıda bulunabilecek buhar oluşur (Al-Hwayzee, 2016). Kurutma, reaktörün daha küçük boyutlarına izin verdiği ve daha yüksek bir sıcaklığın daha kolay elde edilmesini sağladığı için faydalı kabul edilir. Besleme malzemesindeki yüksek nem içeriği, reaksiyon dengesini ürün gazındaki daha yüksek metan konsantrasyonuna ve daha düşük hidrojen içeriğine kaydırarak gazlaştırıcı sıcaklığını düşürür.
2. Piroliz Bölgesi: Piroliz, çeşitli parametrelerden etkilenerek (örn. atık bileşimi, nem içeriği, sıcaklık) elde edilen ürünlerin verimlerini ve özelliklerini doğrudan etkileyen karmaşık bir süreçtir. Pirolitik ayrışma, katı organik maddenin yüksek karbon içeriğine sahip gaz halindeki bileşiklere ve katı kalıntılara endotermik bir dönüşüm aşamasıdır. Nem salınımı hammaddeyi 150-200 °C' ye kadar ısıtmanın ilk aşamalarında meydana gelir. Bundan sonra pirolitik bozunma 500-700 °C civarında başlar ve biter. 35 °C' nin altındaki sıcaklıklarda, ana reaksiyonlar sırasıyla depolimerizasyon ve dehidrasyon, dekarbonilasyon ve dekarboksilasyon olan su, karbon monoksit ve karbon dioksittir.

Kuru hammadde bu aşamada daha yüksek sıcaklığa maruz bırakılır. Bu işlem oksijen yokluğunda yaklaşık 500-550 °C sıcaklıkta çalışır. Bu endotermik süreç, besleme malzemesinin daha zayıf olan kimyasal bağlarını kırar ve yüksek moleküler ağırlıklı kömürle birlikte uçucu gazları serbest bırakır. Piroliz sırasında salınan uçucu maddelerin bir kısmı daha soğuk yüzeylerde yoğunlaşabilir ve "katran" adı verilen sıvı ürünler oluşturabilirken, kalıcı gaz halindeki türler gaz fazında şu şekilde kalır: CO₂, H₂, CO, CH₄ ve hafif hidrokarbonlar (Ciuta ve diğ., 2018).

3. Oksidasyon Bölgesi: Uçucu ürün, kömürle birlikte bu bölgede sınırlı oksijenle reaksiyona girer. Bu yanma işlemi, çeşitli gazların (CO, CO₂), kalıntı olarak cüruf üretilmesine ve ısı açığa çıkmasına neden olur. Bu ısı, kapalı bölmede birikir ve gazlaştırma bölgesi için gereken sıcaklığı artırır. Reaksiyonları hızlandırmak için sıcaklık 800 °C ile 1000 °C arasında tutulur. Bu aşamada cüruf, gazlaştırıcının tabanına taşınır (Chanthakett ve diğ., 2021).



4. İndirgenme (Gazlaştırma) Bölgesi: Bu aşamada, gazlaştırma işleminde, uçucu maddeler ve kalan kömür, yüksek sıcaklıkta (800–1000 °C) CO₂ ve buhar ile reaksiyona girer ve çeşitli reaksiyonlar yoluyla sentez gazı (CO ve H₂) ve az miktarda başka gazlar üretir. Gazlaştırıcı koşullarına bağlı olarak bir dizi ayrı tersinir gaz fazı reaksiyonu aynı anda gerçekleşir. Su-gaz değişimi reaksiyonu ve buhar reformasyonu olarak bilinen buharla reaksiyonlar ile H₂, CO ve CO₂ üretilir. Boudouard reaksiyonu, CO₂ ve metanasyon metanının (CH₄) hidro-gazlaştırılmasını gerçekleştirir (Deng ve diğ., 2019). İndirgenme aşamasında gerçekleşen termodinamik bilgiler gazlaştırma prosesi mekanizması bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.4.3. Gazlaştırma Prosesi Mekanizması

Katı atıklar gibi farklı hammaddeler, sınırlı konsantrasyonda bir oksitleyici ajan varlığında yüksek sıcaklıkta gazlaştırma yoluyla “üretici gaz” veya “sentez gaza” (CO ve H₂) dönüştürülebilir (Materazzi ve diğ., 2016). Gazlaştırma sırasında hammadde, oluşan heterojen

reaksiyonlar yoluyla hızla bir gaza, yani üretici gaza dönüştürülür. Oluşan sentez gaz içten yanmalı motorlarda, gaz türbinlerinde ve katı oksit yakıt hücrelerinde ısı ve güç üretmek için veya katma değerli kimyasalların ve sentetik biyoyakıtların üretimi için kimyasal bir platform olarak kullanılabilir (Vamvuka ve Sfakiotakis, 2015; Ramos ve diğ., 2018; Slezak ve diğ., 2019; Santos ve Alencar, 2020; Lampropoulos, 2021). Gazlaştırma koşullarına (sıcaklık ve basınç gibi) ve kullanılan besleme stoğuna bağlı olarak farklı derecelerde ilerleyebilen birkaç ana reaksiyondan oluştuğu söylenebilir. Gazlaştırmadaki kimyasal reaksiyonlar Tablo 2.3’deki denklemlerde verilmiştir (Basu, 2018).

Tablo 2.3: Gazlaştırma reaksiyonları.

$C + O_2 \leftrightarrow CO_2$	-131 kJ/mol	Oksidasyon	(2.1)
$C + 1/2O_2 \leftrightarrow CO$	-110.5 kJ/mol	Kısmi oksidasyon	(2.2)
$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$			(2.3)
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+131 kJ/mol	Su-gaz değişim	(2.4)
$C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$			(2.5)
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	+172 kJ/mol	Boudouard reaksiyon	(2.6)
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	-74.8 kJ/mol	Hidro-gazlaştırma	(2.7)
$CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2$	-41.2 kJ/mol	Su-gaz değişim	(2.8)
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	+206 kJ/mol	Buhar Reformu	(2.9)
$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO + 4H_2$	+165 kJ/mol	Buhar Reformu	(2.10)

Reaksiyonlar (2.1) - (2.3) kimyasal denge reaksiyonlarıdır ve bu nedenle ürünler ve reaktanlar birlikte bulunabilir ve termodinamik denge yasaları tarafından tanımlanan konsantrasyon oranlarını koruyabilir. Reaktör içerisine verilen gazlaştırma ajanı olan hava ve oksijenin

çoğunluğu (2.1) - (2.3) reaksiyonlar arasında gerçekleşen tepkimelerde kullanılmaktadır. Bu aşamada katı yakıtın kurutulması, kimyasal bağların kırılması ve (2.4) ve (2.9) numaralı reaksiyonların gerçekleşmesi için ihtiyaç duyulan yüksek reaktör sıcaklığının elde edilmesi amacıyla yeterli ısının oluşması amaçlanmaktadır. Su-gaz (2.4) ve Boudouard (2.6) reaksiyonu yüksek sıcaklık, düşük basınçta gerçekleşen endotermik reaksiyonlardır. CO ve H₂O' dan yüksek enerji girişi ile H₂ ve CO₂ üretimidir. Bu reaksiyonlar hem H₂ hem de CO üreterek, verimi artırır ve oluşan kül miktarını azaltan reform reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonun bariz eksikliği, reaksiyonun büyük pozitif ısısının gösterdiği gibi, yüksek enerji girdisidir (Lee ve diğ., 2022).

Denge koşulları (2.4) ve (2.5) reaksiyonları için daha yüksek sıcaklıklarda ve (2.7) ve (2.8) numaralı reaksiyonlar için daha düşük sıcaklıklarda ürünlerin oluşumuna doğru kayar. Bu nedenle, indirgeme aşamasının gerçekleştiği sıcaklıkların kontrol edilmesi, ortaya çıkan sentez gazı özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha yüksek sıcaklıklar katran oluşumunu azaltır ve işlemin sonunda daha az katı kalıntı verir, ve daha düşük enerji içerikli sentez gazı verir (Molino ve diğ., 2016; Hussain ve diğ., 2021).

Su-gaz değişimi reaksiyonu (2.8), H₂O adsorpsiyonu ile devam edebilir ve bir katalizörün yüzeyine CO molekülleri; daha sonra, bir proton ayırır ve CO₂ ve H₂' ye daha fazla reaksiyona/ayrışmaya uğrayan -CO, -OH ve -O' yu oluşturur. Su- gazı değişim reaksiyonu, gazlaştırma işleminin H₂/CO oranını artıracak şekilde artan H₂ içeriğine ve azalan CO içeriğine ulaşmasına yardımcı olur. CO, 2.8 reaksiyona bağlı olarak H₂ ve CO₂ üretmek için buharla reaksiyona girer (Chianese ve diğ., 2015).

Gazlaştırma aşaması, atığı hidrojene dönüştürmek için birden fazla reaksiyondan oluşur; bununla birlikte, hidrojen üretiminin başlıca kimyasal reaksiyonları, su-gaz değişimi reaksiyonu ve buhar reformasyonudur. Sıcaklık arttıkça, buhar reformu endotermik reaksiyonlarını takiben metan konsantrasyonu azalırken, (2.9) ve (2.10) reaksiyonları ile birlikte hidrojen konsantrasyonu artacaktır. CO konsantrasyonu (2.4), (2.6) ve (2.9) reaksiyonları ile artmaktadır (Inayat ve diğ., 2021).

2.4.4. Yakıt Özelliklerinin Gazlaştırmaya Etkisi

Gazlaştırma yöntemini belirlemede yakıt olarak kullanılacak hammaddenin özelliklerinin iyi bilinmesi ve belirlenmesi gereklidir. Kullanılan hammaddenin kimyasal analizlerinin yanında kalorifik değer ve elementel içeriği tespit edilmelidir.

Partikül boyutu ve şekli; gazlaştırıcı için önemli tasarım parametrelerden biridir. Yakıt, gazlaştırıcı reaktör tipi ve boyutunun seçiminde önemlidir. Yakıtın sıklıkla sebep olduğu gazlaştırıcıdaki tıkanma sebebiyle yakıtın parçacık boyutu ve dağılımı gazlaştırma bölgesinin boyutunun ayarlanmasını gerektirmektedir. Büyük partikül boyutuna sahip yakıtların reaktör içerisinde ilerlemesini engellerken, daha küçük partiküller ise hava ve gaz boşluğunu tıkayarak basıncı düşürür ve gazlaştırıcının tıkanmasıyla sonuçlanır. Yakıt materyalin küçük partikül boyutuna sahip olması, kuru sentez gazı ve hidrojen oluşum verimlerinin yanı sıra karbon dönüşümünün etkinliği de artırmaktadır (Parthasarathy ve Narayanan, 2014).

Elementel analiz; C, H, O, N, S tayini yapılarak gaz bileşenlerinin tespit edilerek, yorumlanmasını sağlar. Bu analiz sonucunda, yakıt numunenin yüksek karbon içeriğine sahip olması, gazlaştırma ile üretilecek sentez gazın daha az katrana içereceği söylenebilir (Kiang, 2018).

Kül; yüksek oranda bulunması, gazlaştırıcıdaki ızgara tasarımı son derece önemli olmaktadır. Yakıtın içeriğinde yüksek karbon oranı gazlaştırma reaksiyonları için önemli bir parametredir.

Nem; yakıtta istenmeyen bir özelliktir. Genel olarak, nemin bir yakıtın ısı özellikleri ve gazlaştırıcının işletim şartları üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. Nem oranının yüksekliği ile üretilen sentez gaz ısı değeri düşük olmasının ve katranın yüksek olmasının sebebidir.

Uçucu madde; çeşitli gazlardan oluşur. Bu gazların içerikleri hidrojen, karbon dioksit, karbon monoksit, hidrokarbonlar, kükürt dioksit ve metandan oluşmaktadır. Bir yakıtta yüksek miktarda uçucu madde bulunması, yanma verimini düşmesine neden olmaktadır.

2.4.5. Gazlaştırma Uygulamaları

1. Kömür Gazlaştırma: Kömürün gazlaştırılmasında sentez gazı (karbon monoksit ve hidrojen karışımları), metan ve diğer hidrokarbonlara da ek olarak bir gaz karışımı üretilir. Gaz toplanır ve ısı üretmek, elektrik üretmek için yakılabilir veya dolaylı sıvılaştırmada veya kimyasalların üretiminde sentez gazı olarak kullanılabilir. Kömür gazlaştırma ekipmanı, büyük yatırım ve yüksek güvenilirlik gerektirir ve endüstriyel uygulamalar üzerinde ekonomik olarak önemli bir etkiye sahiptir (Furusawa ve diğ., 2019). Entegre Gazlaştırma Kombine Çevrimi (IGCC) olarak adlandırılan gazlaştırma yoluyla elektrik üretmek için bir hammadde olarak tercih edilmektedir. IGCC, elektrik üretmek için sentez gazı ve buhar türbinlerini kullanır (Aktan, 2020). IGCC

araştırmalarının çoğu hammadde olarak kömüre odaklanmıştır, ancak çoğu karbonlu yakıtı (petrol kok, rafineri tabanları, biyokütle, atık vb.) gazlaştırmak mümkündür. Gazlaştırma, farklı kömür derecelerini idare edebilir, ancak çoğu IGCC uygulaması, verimlilik nedenleriyle yüksek kalorifik değerli kömürlere odaklanmıştır. Araştırmacılar, kömür gazlaştırmanın ucuz temiz enerji, daha az sera gazı emisyonu, temiz elektrik, daha   vreci kimyasallar ve hidrojen bakımından zengin sentez gazı üretme kabiliyetine sahip olduğunu da doğrulamıştır (Midilli ve diğ., 2021).

2. Biyokütle Gazlaştırma: Biyokütle gazlaştırma, bir oksitleyici ajan aracılığı ile karbonlu organik maddenin gazlaştırılarak, gaz ürüne dönüşümü olarak açıklanmaktadır (Mutlu ve diğ., 2019). Biyokütle enerjisi, dünyanın bilinen en eski enerji kaynağıdır ve fosil yakıtlardan elde edilmeyen tek karbon kaynağıdır. Biyokütle, bitkilerden ve ağaçlardan (su ve toprak bitki örtüsü)   retilen tüm organik materyalleri ve ayrıca tarım, ormancılık ve endüstriyel atıklar, insan ve hayvan atıkları ve belediye katı ve biyo-katı atıkların (kanalizasyon) organik kısmı gibi atıkları içermektedir. Biyokütleyle dayalı yenilenebilir enerji temiz, güvenli ve   vrenin korunması, enerji güvenliği ve ekonomi açısından faydalıdır. Biyokütle ve atık biyokütleden biyoenerji üretimi iklim değişikliğinin azaltılmasında çok önemli bir rol oynayabileceğinden, fosil yakıtların neden olduğu küresel ısınma sorununu ele alma potansiyeli nedeniyle, son birkaç yıldır araştırma ve geliştirilmektedir (Narnaware ve Panwar, 2022). Biyokütle, 650–1200   C sıcaklık aralığında ve belirli oranda gazlaştırma ajanı aracılığı ile gazlaştırma sırasında dönüştürülür. Sentez gazdaki iki tür olan ve gazlaştırma sürecinde yakıt ve kimyasal sentez için çok önemli olan karbon monoksit (CO) ve hidrojen (H₂)   retilir (Abdoulmoumine ve diğ., 2016).

3. Atık Gazlaştırma: Katı atık, enerji üretimi için hammadde olarak kullanılabilecek yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Atıktan türetilmiş yakıt (ATY), plastik, arıtma çamuru ve atık lastik gazlaştırmada kullanılan atıklardan bazılarıdır. Çeşitli termokimyasal teknolojiler arasında bulunan gazlaştırma, katı atıkları yüksek ısıl değere sahip sentez gazına dönüştürmek için uygun yöntemlerden biridir. Atıkta bulunan inorganik fraksiyonlar k  le dönüştürülür ve güvenli bir şekilde depolanabilir. Sentez gaz; elektrik   retimi, Fischer-Tropsch yakıtları, kimyasallar ve hidrojen üretimi gibi çeşitli uygulamalar için de kullanılabilir (globalsyngas, 2021).

4. Plazma Gazlaştırma: Plazma gazlaştırma, evsel katı atık, endüstriyel atık, tehlikeli atık gibi çok çeşitli organik ve inorganik atıkları ayrıştırmaya uygun, gelişmekte olan alternatif bir termokimyasal teknolojidir (İbrahimoglu ve Yilmazoğlu, 2020). Plazma, gaz atomlarının bir veya daha fazla elektron kaybettiği ve elektriksel olarak yüklendiği iyonize bir gazdır (Oliveria ve diğ., 2022). Atık, yoğun ısının atık molekülleri basit bileşiklere parçaladığı ve katransız sentez gazına dönüştürüldüğü plazma alanına girer, inorganik maddeler ise eritilir ve 1200- 2000 °C sıcaklık aralığında yoğun, inert, süzülemez bir cürufa ve nihayetinde yüksek kalorifik değere ve inert, katı cürufa sahip yakıt gazlarına dönüştürülür (Saidi ve Ghaffari, 2020). Plazma gazlaştırmanın yüksek enerjili (alotermal) arıtması, yüksek dioksin bozunması (Gomez ve diğ., 2009) ve "katransız" sentez gazı üretimi (Ho ve diğ., 2017) dahil olmak üzere, geleneksel (ototermal) gazlaştırmada elde edilemeyen kimyasal reaksiyona olanak tanır (Sanjaya ve Abbas, 2023).

2.4.6. Katalitik Gazlaştırma

Katalizör, gazlaştırmanın işletme maliyetlerini etkili bir şekilde azaltarak, düşük sıcaklıkta yüksek organik madde dönüşüm oranı elde eder (Lu ve diğ., 2019). Gazlaştırma işleminde yaygın olarak kullanılan katalizörler, homojen katalizörler ve heterojen katalizörlerdir. Yaygın heterojen katalizörler ise metal bazlı katalizörler (nikel bazlı katalizörler vb.) ve doğal mineral katalizörlerden oluşmaktadır. Homojen katalizörler ise, alkali metal karbonatlar, alkali metaller ve alkali metal oksitler (K_2CO_3 , KOH, Na_2CO_3 , NaOH, CaO, vb.) dahil olmak üzere alkali metal katalizörleridir (Liu ve diğ., 2023).

Atıkların termokimyasal dönüşümünde katalizörlerin kullanılması zorunlu olmasa da oluşan belirli durumlar için kullanımı faydalı olmaktadır. Bu durumlar:

- Ürün gazından katranın çıkarılması,
- Özellikle sentez gazı (CO, H_2 karışımı) olarak kullanılacağı zaman, ürün gazında metan içeriği azalması.

Katran: gazlaştırma işleminden istenmeyen bir yan ürün olarak ortaya çıkmıştır. Katran tıkanma, kirlenme ve korozyon gibi ciddi operasyonel sorunlara neden olan ve sentez gazının çıkarılmadan veya dönüştürülmeden doğrudan kullanılmasını önleyen, yüksek moleküler ağırlıklı organik malzemenin viskoz, karışımıdır (Deng ve diğ., 2019). Katran, moleküler

ağırlığı benzenden daha büyük olan organik bileşiklerin karmaşık bir karışımıdır. Ek olarak katranın, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından yüksek kanserojen potansiyele sahip maddeler olarak tanımlanan yüksek konsantrasyonlarda polisiklik aromatik hidrokarbonlar (PAH'lar) içerdiği bilinmektedir (Chan ve Tanksale, 2014).

Katran Reformu; Genellikle katran, piroliz aşamasında biyokütlenin (karbonlu malzemeler) ayrışmasından termokimyasal dönüşüm işlemi sırasında oluşur. Katran bileşikleri, kimyasal yapılarına, karbon halkası sayısına ve moleküler ağırlıklarına göre kategorize edilebilir (Valderrama ve diğ., 2018) Katran bileşenlerinin sınıflandırılması ve tanımlanması çok önemlidir. Konsantrasyon limitleri ve sıcaklık noktaları sentez gazının aşağı akışlı uygulamaları için dikkate alınması gereken en önemli kriterlerden olduğundan dolayı sentez gazında bulunan spesifik katran bileşiklerinden önemli ölçüde etkilenir (Rakesh ve Dasappa, 2018). Genel olarak, yüksek verimli bir sentez gazı saflaştırma sistemi, katranın tamamen uzaklaştırılması maliyet etkin değilse, daha ağır katran bileşiklerinin azaltılmasına odaklanmalıdır (Rakesh ve Dasappa, 2018). Katalitik gazlaştırma reformunun, katranın gaz halindeki bileşenlere dönüştürülmesini veya parçalanmasını teşvik etmenin ve sentez gazındaki H_2/CO oranını ayarlamamanın etkili bir yolu olduğu düşünülmektedir (Zuhang ve diğ., 2019).

Katalizörlerin uygulanması, gazlaştırma işleminde katalizörün konumuna göre iki farklı gruba ayrılabilir. Katalizörün doğrudan hammadde ile karıştırıldığı ve gazlaştırıcıya beslendiği birincil katalizör uygulaması olarak adlandırılan katalizörün ilk uygulamasıdır. İkinci uygulamada, katalizörler gazlaştırıcının aşağısında yer alan ikinci reaktöre yerleştirilir. İkincil bir reaktörde bağımsız olan katalizör, gazlaştırma ünitesindekinden farklı çalışma koşulları altında farklı davranabilir.

Katalizör, daha düşük enerjinin farklı bir geçiş durumunu içerebilen alternatif bir mekanizma sağlayarak çalışır. Bazı katalizörler ayrıca aromatik monomerlerinde lignoselülozik biyokütlenin C-C ve C-O eter bağının ayrılmasına da izin verir (Yamaguchi ve diğ., 2017).

Gazlaştırmada oluşan katranını ortadan kaldırmak ve H_2 bakımından zengin sentez gazın verimli üretimini gerçekleştirmek için birçok literatür çalışması ile doğal minerallerin olduğunu kanıtlanmıştır (Zhao ve diğ., 2017; Suhaj ve diğ., 2019; Islam, 2020). Ni bazlı (Farooq ve diğ., 2021), Fe bazlı (Han ve diğ., 2020; Ahmed ve diğ., 2018) gibi modifikasyonlar katran giderme için uygulanabilir ve H_2 açısından zengin gaz elde edilebilir.

Bu modifikasyonlar genellikle, katalizör özelliklerini modifiye eden ve daha sonra katran dönüşümü için katalizör performansını iyileştiren optimize edilmiş katalizör tasarımı yoluyla gerçekleştirilir. Bu özellikler, aktif metal ile destek arasındaki etkileşimi güçlendirme, metal dağılımında artış, yüzey alanında/gözenek hacminde artış, kristal boyutlarının küçültülmesi, daha iyi mekanik mukavemet sağlanması, kok oluşumuna karşı direnç ve/veya katalizörün asitlik/bazlık özelliklerinin değiştirilmesi şeklinde olabilir (Gao ve diğ., 2021).

Soy metallerin yüksek maliyeti nedeniyle Nikel, C-C, O-C ve C-H bağ aktivasyonuna yönelik karşılaştırılabilir yüksek aktivitesi, daha iyi kullanılabilirliği ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle endüstriyel uygulamalar için en yaygın şekilde kullanılır (Li ve diğ., 2021b; Valizadeh ve diğ., 2021). Ayrıca Nikel, oluşan sentez gaz bileşimindeki H₂ konsantrasyonunu artıran ters amonyak reaksiyonunu katalize eder (Syed-Hassan ve Fuadi, 2016).

Alümina, yüksek mekanik bütünlüğü, termal kararlılığı (Zhang ve diğ., 2018) gazlaştırma reaksiyonlarına karşı inertliği ve sinterleme ve HCl tarafından zehirlenmeye karşı güçlü direnci (Veksha ve diğ., 2018) nedeniyle yüksek sıcaklıkta akışkan yataklı katalitik katran dönüştürücü uygulandığında uygun bir destek malzemesi olarak düşünülebilir.

2.4.7. Gaz Verimi

Gazlaştırma ile üretilen sentez gazın kompozisyonu, yakıt hammaddesine, gazlaştırıcı tipine, ajan tipine ve operasyonel şartlara göre değişmektedir. Bir gazlaştırma işleminin verimliliği, sentez gaz bileşimi ve ısı değeri, soğuk gaz verimliliği (SGV), karbon dönüşüm verimliliği ve katran içeriği gibi çeşitli parametreler kullanılarak değerlendirilir (Rodriguez-Alejandro ve diğ., 2016; Saha ve diğ., 2019; AlNouss ve diğ., 2020). Üretilen gazın ve hammaddenin sahip olduğu ısı değerleri ile soğuk gaz verimliliği hesaplanmaktadır. Gaz verimi, aşağıdaki şekilde belirlenmektedir (Basu, 2010).

$$\text{Soğuk gaz verimi } (\eta_{\text{Gaz}}) = \frac{LHV_{\text{gaz}} \times V_{\text{gaz}}}{LHV_{\text{biyokütle}} \times m_{\text{biyokütle}}} \times 100 \quad (2.11)$$

LHV_{gaz} : Sentez gazın alt ısı değeri (AID)

V_{gaz} : Sentez gaz hacmi

$LHV_{\text{biyokütle}}$: Biyokütle ısı değeri

2.5. LİTERATÜR TARAMASI

Bu tez çalışmasına benzer olarak yapılan araştırmalarda görülmüştür ki atıktan türetilmiş yakıttan (ATY) termokimyasal metodlarla enerji geri kazanımı uygun bir metoddur. ATY atıklarının gazlaştırma yöntemleriyle değerlendirilmesi konusunda ulusal ve uluslararası literatüre bakıldığında birçok çalışmanın yapıldığı görülmüştür. Literatür çalışmaları sabit yataklı veya akışkan yataklı reaktörler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında literatür çalışmalarından farklı olarak deneyler siklon ayırıcılı, sirkülasyonlu sabit yataklı reaktör tasarımı ile gerçekleştirilmiştir. Atıktan türetilmiş yakıt ile benzer türevli atıklar olan katı atıktan türetilmiş yakıt (SRF), belediye atıkları gibi atıklar ile yapılan çalışmalarda değerlendirilmiştir.

Kungkajit ve diğ. (2015), aşağı yönlü gazlaştırıcıda atık türevli yakıt gazlaştırması üzerindeki plastik malzemelerin etkisini incelemiştir. Sonuçlar, eşdeğerlik oranı $ER = 0.38$ için üretilen sentez gazının ısı değeri, kullanılmayan atık plastikler için (7.8 MJ/Nm^3) kullanılmış atık plastiklerden (5 MJ/Nm^3) daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Tezer ve diğ. (2023), aşağı ve yukarı akışlı sabit yataklı reaktörde belediye arıtma çamuru gazlaştırılmasını gerçekleştirmişlerdir. 0.05 ile 0.5 L/dk arasında değişen debilerde kuru hava ajanı ve 0.01 L/dk debide saf O_2 ajanı kullanılmıştır. Ayrıca; 700 , 800 ve $900 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak üç farklı sıcaklık değerinde deneyler yürütülmüştür. Sabit yataklı reaktör tipleri, gazlaştırma ajan tipi ve sıcaklık parametrelerinin sentez gazı kalitesine etkileri gözlemlenmiştir. Kuru hava ile yürütülen deneylerde; yukarı akışlı ve aşağı akışlı gazlaştırıcılardan üretilen sentez gazındaki maksimum H_2 içeriği sırasıyla hacimce $\%42$ ve $\%46$ olarak elde edilmiştir. Saf oksijen ile yürütülen deneylerde ise yukarı ve aşağı akışlı gazlaştırıcılar için H_2 içeriği, sırasıyla hacimce $\%40$ ve $\%45$ olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, sıcaklığın $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ye yükselmesiyle sentez gazındaki H_2 gazının konsantrasyonunun arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Yaşar ve diğ. (2021), ATY'nin enerjiye dönüştürülmesi için gazlaştırma yoluyla farklı sıcaklıkların ve buharın ATY' ye oranının sentez gaz bileşimi ve kalorifik değer üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yaklaşık $900 \text{ }^\circ\text{C}$ lik yüksek sıcaklığın iyi bir gazlaştırma için uygun koşullar olduğunu gözlemlemişlerdir. ATY' nin kalorifik değerini 4340 kcal/kg olarak bulmuşlardır.

Chen ve diğ. (2020), belediye katı atığın gazlaştırılması ile optimum H_2 ve diğer gazların (CO , CO_2 ve CH_4) üretimi üzerindeki deneysel parametrelerin etkisini ve etkileşimini araştırmışlardır. Üç bağımsız değişkenin (yani sıcaklık, eşdeğerlik oranı ve kalma süresi) oluşan sentez gaz ve katranın verimleri üzerindeki etkisini bulmak için istatistiksel bir teknik olan yanıt yüzeyi yöntemi (Response Surface Methodology-RSM) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarda; reaksiyon sıcaklığı, üretilen sentez gazın bileşimi ve toplam verim üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Artan sıcaklık, H_2 miktarında önemli bir artışla sonuçlanmıştır. Sıcaklığın $700\text{ }^{\circ}C$ 'den $900\text{ }^{\circ}C$ 'ye çıkarılmasıyla birlikte, gazlaştırma sonrası oluşan katran ve katı ürün miktarı azalmıştır. Ayrıca, gaz verimi ve H_2/CO mol oranı iyileştirilirken, sentez gazın alt ısı değerinde düşüş gözlenmiştir.

Adefeso ve diğ. (2015) $800\text{ }^{\circ}C$ de aşağı akışlı sabit yataklı bir reaktörde ATY gazlaştırılmasını gerçekleştirmiştir. Yüksek eşdeğerlik oranının, yüksek sıcaklıkların ve ayrıca katalizör kullanımının sentez gazında yüksek H_2/CO ile sonuçlandığını ve poliaromatik hidrokarbonların miktarını azalttığını tespit etmişlerdir.

Wu ve diğ. (2016), sentez gazı bileşimi ile işletme faktörleri arasındaki ilişki ile ilgilenilerek, Ni bazlı katalizörün katran ayrışması üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Belediye atıklarının katalitik gazlaştırma deneyleri, özellikle H_2/CO oranı değişimi ile ilgili olarak, H_2 ve CO oluşumunu teşvik etmede üç tip Ni-katalizörün performansını değerlendirmek için $600-750\text{ }^{\circ}C$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Katkı maddesi olarak alkali kullanan gazlaştırma ve Ni bazlı katalitik reform teknolojisi yoluyla ATY 'den verimli bir şekilde üretildiğinin gösterildiği ve $750\text{ }^{\circ}C$ de H_2 içerikli sentez gazının hacimce yaklaşık %30' unun elde edilebileceğini tespit etmişlerdir.

Irfan ve diğ. (2019), katalizör olarak atık mermer tozu ile belediye katı atık (MSW) gazlaştırılmasından hidrojen zengin sentez gazı üretimini incelemiştir. Üretilen gaz bileşimi, gaz verimi, karbon dönüşüm verimi ve katran verimi farklı katalizör/yakıt oranlarında incelenmiştir. H_2 konsantrasyonunun, kütlece katalizör/yakıt oranındaki artışla önemli ölçüde artarken, CO_2 konsantrasyonunun azaldığını tespit etmişlerdir.

Khosasaeng ve Suntivarakorn (2017), çoğunlukla plastik içeren belediye atıklarından ayrılan ATY 'nin aşağı akışlı gazlaştırıcıda gazlaştırılmasını incelemiştir. Sentez gazın üst ısı değeri $5,87\text{ MJ/Nm}^3$ ve soğuk gaz verimliliği (SGV) ise %73,04 olarak tespit etmişlerdir.

Chan ve diğ. (2019) katalitik katran reformasyonu ve kükürt gidermeye odaklanarak belediye atıklarının gazlaştırmasından sentez gazının yüksek sıcaklıkta saflaştırılmasını araştırmışlardır. Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcıdan üretilen sentez gaz, çok aşamalı bir sistemle arıtılmıştır. Sistem, akışkan yataklı katalitik katran dönüştürücü, partiküller için bir filtre ve klorsuzlaştırma için sabit yataklı bir reaktörden ve daha sonra sistem boyunca çalışma sıcaklıklarının aşağı doğru kademeli olarak kükürttten arındırılmasından oluşmuştur. Alümina üzerinde desteklenen yeni nano yapılı nikel katalizörü kullanılmıştır. Sıcak arıtma sistemi ile %90' a kadar katran ve kükürt giderme verimliliği sağlanmış, toplam sentez gazı verimi artmış %14 ve SGV %12 olarak bulunmuştur.

Zhang ve diğ. (2018) katalitik gazlaştırma ve reform teknolojisi ve gaz arıtma ünitesi aracılığıyla temiz sentez gazı üretmek için belediye katı atığını hammadde olarak kullanmışlardır. Farklı Ce içeriğine sahip Nikel bazlı katalizörler hazırlanmış, daha sonra oksijen ilavesi, buhar ilavesi ve Ni esaslı katalizörlerin bileşenini içeren çalışma parametrelerinin sentez gazı üretim özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlara göre; Ni bazlı katalizöre metal katkı maddelerinin eklenmesi katranın ayrışmasının desteklenip ve sentez gazı verimini artırabileceği bulunmuştur. SGV %70.17 olarak tespit edilmiştir. Katalizör kullanımının katran oluşumunu azaltıcı yönde etkisinin olduğu saptanmıştır.

Zhang ve diğ. (2019), karbon destekli katalizörleri Ni bazlı katalizörlerin ana bileşenine destek olarak emprenye yöntemi ile hazırlamışlardır. Sonuçlar, Nikel bazlı katalizörlerin, belediye atık gazlaştırmasının katalitik reformu sürecinde katran giderimini teşvik edebileceğini ve hidrojen üretimini artırabileceğini göstermiştir.

Suhaj ve diğ. (2019), katalizör aktivitesi, model katran bileşeni olan p-ksilenin ayrışmasında ve ATY gazlaştırma deneylerinde üretilen katranın parçalanmasında olmak üzere iki reaksiyonda test edilmiştir. İki aşamalı ATY gazlaştırması için kullanılan ünite, piroliz reaktörü, sabit yataklı katalitik reaktör ve yıkama sisteminden oluşmaktadır. Katalizörün ATY 'ye kütlece oranı 0.75,1, 1.25, 2 ve 4' lük olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre, katalizör varlığının hem katran parçalama verimliliği hem de gaz bileşimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Deneyler 800°C üzerindeki sıcaklıklarda yapıldığında katalizör spesifik yüzey alanında kayıp gözlemlenmiştir. Katalizör kullanımı ile H₂/CO mol oranı 0,67 ile 1,69 arasında tespit etmişlerdir. Sıcaklık artması ile hidrojen konsantrasyonu artmıştır. H₂

içeriği 700 °C' de hacimce yaklaşık %8,2'den 850 °C' de hacimce yaklaşık %22' ye yükselmiştir.



3. YÖNTEM

3.1. MATERYALLERİN KARAKTERİZASYONU VE ÖN İŞLEMLER

Bu çalışmada, Tuzla’ da faaliyet gösteren geri dönüşüm tesisinde üretilen atıktan türetilmiş yakıt numunesi (ATY) temin edilmiştir. ATY numunesinin içeriği, geri dönüştürülemeyen ambalaj atıkları, kirli kağıt, plastikler, tekstil ürünleri ve boya atıkları gibi yüksek kalori içeriğine sahip endüstriyel atıklardan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan numuneler üzerinde nem tayini, sabit karbon hesaplaması, uçucu madde tayini ve kül tayini analizleri yapılmıştır. ATY örneğine ait fiziksel ve kimyasal özellikler 2. Bölüm’ de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Şekil 3.1’ de temin edilen ATY örneklerinin gazlaştırma işleminden önceki (a) ve sonraki hali (b) gösterilmiştir.



Şekil 3.1: ATY - gazlaştırma öncesi (a) ve gazlaştırma sonrası (b)

3.1.1. Nem Analizi

ASTM D-3173 standardına göre, numuneler THERMO 3608-6CE marka etüvde $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ’ de 1 saat bekletilir (ASTM D3173). Şekil 3.2’ de etüv gösterilmiştir. Nem miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$\% \text{ Nem} = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100 \quad (3.1)$$

M_1 = Yakmadan önceki numune miktarı, g

M_2 = Yakmadan sonraki numune miktarı, g



Şekil 3.2: Etüv.

3.1.2. Kül Miktarının Tayini

Kül tayini, ASTM D-3174 standarda göre bir miktar numunenin yakılması ile kül miktarının tespit edilmesine dayanır (ASTM D-3174). Şekil 3.3’ de kül fırını gösterilmiştir.

Analiz başlangıcında, numuneler için kullanılacak krozenin darası ölçülerek, numuneler krozedeki tartılmıştır. Krozedeki ATY örneği 525 ± 25 °C sıcaklıkta, 1-2 saat bekletilmiştir. Daha sonra kroze desikatöre alınarak oda sıcaklığında bekletilmiş ve tartımı alınmıştır. Kül tayini aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$\% \text{ Kül} = \left[M_2 / M_1 \right] \times 100 \quad (3.2)$$

M_1 = Yakmadan önceki numune miktarı, g

M_2 = Yakmadan sonraki numune miktarı, g



Şekil 3.3: : Kül fırını

3.1.3. Uçucu Madde Tayini

Atık numunelerdeki uçucu madde tayini, standarda göre 900 ± 10 °C’de 7 dakika boyunca inert ortamlı kül fırınında yapılmıştır (ASTM D3175-20, 2020).

3.1.4. Sabit Karbon

Sabit karbon değeri, tespit edilen nem, kül ve uçucu madde miktarlarının toplanıp 100’den çıkarılması ile hesaplanmaktadır (ASTM-D3172-13).

$$\text{Sabit Karbon (\% ağırlık)} = 100 - (\%Nem + \%Kül + \%Uçucu madde) \quad (3.3)$$

3.1.5. Elementel Analiz

Çalışma prensibi karbon, azot ve hidrojen, yakıt numunenin, 900-1150 °C aralığındaki sıcaklıklarda çalışan bir fırın kullanılarak tek bir enstrümantal prosedür ile eş zamanlı olarak tespit edilmesine dayanır. Yanma gerçekleşerek, Karbon (C), Hidrojen (H), Azot (N) ve Kükürt (S) elementlerinin yanma ürünlerini oluşturur. Yanma ürünleri CO₂, H₂O, NO₂ vb. homojen bileşiklerden oluşmaktadır. Yanma sonrası ürünlerin bir sonraki analizi etkilememesi için ortamdan uzaklaştırılır.

Tez kapsamında kullanılan ATY numune ve gazlaştırma işlemleri sonucu elde edilen katı ürünlere elementel analizi yapılarak atığın yapısında bulunan C, H, N ve S yüzdeleri tespit edilmiştir. Elementel analizler BAP kapsamında İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Protek-Merkez laboratuvarında hizmet şeklinde gerçekleştirilmiştir.

3.1.6. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA), bir malzemenin kütlesindeki değişimin hem zaman hem de sıcaklık açısından anlaşılmasını sağlar. Bu yöntemde, 5-20 mg aralığındaki örnek özel bir kroze içinde cihaza yerleştirilerek sıcaklık ayarlaması yapılır. Isıtma devam ederken numunenin ağırlığı devamlı kaydedilir. Numune ortam sıcaklığından 1000 °C' ye kadar 10°C/dak ısıtma hızı ve 50ml/dk gaz akışı eşliğinde, azot ortamında ısıtılır, ardından yarı uçucu bileşikler, polimer bozunması, kül içeriği, karbon siyahı ve nem nedeniyle meydana gelen sonuçtaki ağırlık kaybı hesaplanır. Termogravimetrik analizde elde edilen sonuç, sürekli bir grafik kaydı, şematik, tipik, tek adımlı bir ayrışma reaksiyonu olarak görünür.

Tez kapsamında TGA Analizleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez laboratuvar bünyesinde bulunan SII Nanotechnology – SII6000 Exstar TG-DTA 6300 marka cihazda yaptırılmıştır. Şekil 3.4' de TGA cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Termogravimetrik (TGA) analiz cihazı.

3.1.7. Taramalı elektron mikroskopisi (SEM-EDS) Analizi

Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) çalışma prensibi şu şekildedir. Mikroskopun tepesinde bir elektron tabancası tarafından bir elektron demeti üretilir. Elektron ışını, bir vakum içinde tutulan mikroskopta dikey bir yol izler. Işın, ışını numuneye doğru odaklayan elektromanyetik alanlardan ve merceklerden geçer. Işın numuneye çarptığında, elektronlar ve X-ışınları numuneden çıkarılır. Dedektörler bu X-ışınlarını, geri saçılan elektronları ve ikincil elektronları toplar ve bunları televizyon ekranına benzer bir ekrana gönderilen bir sinyale

dönüştürür ve nihai görüntüyü oluşturur (Microscopewiki, 2022). Oluşan görüntü, numune yüzey morfolojisi ve kompozisyonu hakkında bilgi verir. Cihazın bir yüzeyi görselleştirme, ışını analiz için konumlandırma ve bir numunenin heterojen bileşenleri hakkında temel ve kimyasal bilgiler üretme yeteneği ise SEM-EDS analizi içindir.

Tez çalışması kapsamında bulunan SEM-EDS analizleri Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez laboratuvar bünyesinde bulunan Zeiss EVO® LS 10 Model SEM cihazında hizmet alımı olarak yaptırılmıştır. Şekil 3.5, Zeiss EVO® LS 10 Model SEM cihazını göstermektedir.



Şekil 3.5: SEM analiz cihazı.

3.1.8. Fourier Transform Infrared Spektrometresi (FTIR)

FTIR-ATR analizi, çalışmada kullanılan ATY atıklarının kimyasal karakterizasyonunu belirlemek için tercih edilmiştir. FTIR analizi, görünür ışıktan daha uzun bir dalga boyuna ve daha düşük bir frekansa sahip olan elektromanyetik radyasyon spektrumunun kızılötesi bölgesini ölçer. Bu spektrum, kızılötesi radyasyona (IR) gönderildiğinde bir numunede ölçülebilir. Çalışmanın temel prensibi, farklı atomlar arasındaki bağların arasındaki titreşimleri farklı frekanslarda ışığı absorblamasına dayanır. FTIR analizi ile ışık, bir kızılötesi spektrum çıktısı üreten bir kızılötesi spektrometre kullanılarak ölçülür. FTIR spektrumu, dikey ekseninde maddenin kızılötesi ışık absorpsiyonu ve yatay ekseninde frekansın (dalga boyu) bir grafiğidir. Ortaya çıkan grafikte, oluşan dalga boylarındaki pikler tanımlama için referans fonksiyonel grupları bulunur (Mathias, 2022).

FT-IR incelemeleri, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü Orman Ürünleri Kimyası ve Teknolojisi Anabilim dalında bulunan Perkin Elmer 100 FT-IR Spektrofotometre cihazında yapılmıştır. ATY örnekleri ve deneyler sonrası elde edilen katı ürünler, dalga boyu 650 ile 4000 cm^{-1} aralığında incelenerek yorumlanmıştır. Şekil 3.6' da FTIR-ATR cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.6: FTIR-ATR cihazı.

3.1.9. Gaz Analizleri

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) gazlaştırılması deneyleri sonucu üretilen gaz ürünlerin tespiti, hacimsel yüzde olarak belirlenmiştir. Üretilen sentez gaz analizleri İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Çevre Mühendisliği Bölüm Laboratuvarı' nda bulunan ABB AO2020 model gaz analiz cihazı ile tespit edilmiştir. Sentez gazın içeriğindeki CO, CO₂, H₂, CH₄ ve O₂ bileşenlerinin hacimsel yüzdeleri dakikada bir anlık olarak ölçülmüş ve analiz cihazının bağlı bulunduğu bilgisayara yüklenen yazılım ile kaydedilmiştir.



Şekil 3.7: Gaz analiz cihazı.

3.1.10. Isıl Değer Analizi

Çalışmada kullanılan ATY numune örneği ve gazlaştırma işlemleri sonrası çıkan katı ürünlerin ısı değer analizi yapılmıştır (ASTM D5865-13). Bomba kalorimetreleri, kimyasal reaksiyonların veya fiziksel değişikliklerin ısınısını ölçer. Bu, reaksiyonu sabit hacmi koruyan bir kapta gerçekleştirilerek yapılır ve bu nedenle reaksiyon meydana geldikçe oluşan basınca dayanacak şekilde tasarlanırlar. Bomba kalorimetrede, numune oksijenle birlikte reaksiyon odasına (bomba adı verilir) yüklenir; bu, yalıtkan bir kap içindeki suya daldırılır. Numune ateşlendiğinde, kısmen suya daldırılmış bir termometre meydana gelen sıcaklık değişikliklerini kaydeder. Analizi yapılan numunenin kalorifik değeri, sıcaklık artışı, numune kütesinin ısı kapasitesi ve parçalanması ile hesaplanır. Isıl değer analizi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan IKA C200 Bomba Kalorimetresi cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8’ de tez çalışmalarında kullanılan IKA C200 model bomba kalorimetre cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.8: IKA C200 Bomba Kalorimetre cihazı.

3.1.11. Sentez Gaz Isıl Değer Hesaplamaları

Yapılan gazlaştırma deneyleri ile üretilen sentez gazların ısı değerleri, sentez gaz içeriğinde bulunan CO, H₂ ve CH₄ gazlarına ait Tablo 3.1’ de bulunan üst ısı değerleri referans alınarak hesaplanmıştır. Isıl değer hesabı örnekleri aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Hidrojen, Metan ve Karbonmonoksit gazlarına ait ısı değerleri
(Engineering ToolBox, 2003; Engineering ToolBox, 2018)

Gazlar	Üst Isıl Değer (ÜİD - HHV)				Alt Isıl Değer (AİD - LHV)			
	MJ/kg	MJ/m ³	kcal/m ³	kcal/kg	MJ/kg	MJ/m ³	kcal/m ³	kcal/kg
Hidrojen	141,7	12,7	3050	33889	120,0	10,8	2570	28555
Metan	55,5	39,8	9530	13284	50,0	35,8	8570	11946
Karbonmonoksit	10,1	12,6	3014	2411	10,1	12,6	3014	2411

Sentez gaz içerisinde %20 H₂, %10 CO ve %10 CH₄ olduğu tespit edilmesi durumunda, toplam üst ısı değer tablodaki veriler referans alınarak:

$$\text{Üst ısı değer} = (CO \times 3014 + CH_4 \times 9530 + H_2 \times 3050 / 100)$$

(3.4)

$$= (10 \times 3014 + 10 \times 9530 + 20 \times 3050) / 100 \cong 1864,4 \text{ kcalm}^3$$

olarak hesaplanır.

3.1.12. Reaktör Tasarımı

Deneylerde siklon ayırıcı ile sirkülasyonu sağlanmış, yukarı akışlı, sabit yataklı çelik reaktör kullanılmıştır. Reaktörün iç çapı yaklaşık 8 cm, yüksekliği 50 cm ve hacmi 2 L' dir. Sistemin ısınma hızı sabittir. Reaktör sıcaklığı proses koşullarına göre ayarlanıp, kontrol edilebilmektedir. Reaktörde gaz kaçağı oluşma ihtimaline karşın reaktör ve reaktör kapağı arasında saf grafit ve grafit-kurşun sarmal contalar bulunmaktadır. Deneyler sürerken sıcaklık kaybı, sızdırmazlık ve dışarıdan reaktör içerisine hava girişini engellemek için reaktör üst kapağındaki vidalar iyi şekilde sıkıştırılmıştır.

Reaktöre yüklenen katı hammaddenin, gazlaştırma prosesi ile gaz yakıta dönüşmesi hedeflenmektedir. Kısmi yanmayı ve gazlaştırma reaksiyonlarının oluşması için reaktör içerisine belirlenen değerlerde hava verilmiştir. Proses sonucu, reaktör ve siklon bölümlerinde biriken kül ve toz parçacıkları ile eğer oluşursa katran alınmaktadır.

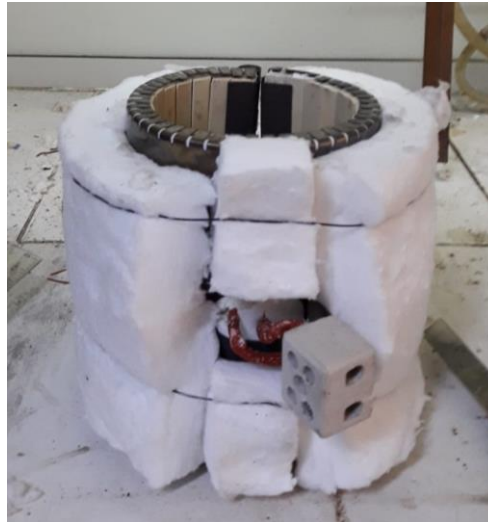
Deneylerde kullanılan reaktör yapısında bulunan siklon ile ayırma işleminin yanısıra söz konusu formların reaktörün kalbine tekrar yönlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede üretilen sentez gazın bir kısmının, siklonda ayrılan katı formların ve yoğunlaşabilen uçucu maddelerin reaksiyonlara tekrar katılmaları sağlanarak gazlaştırma veriminin artırılması hedeflenmiştir. Silindirik gövdenin üst yan kısmından gaz girişi olmakta ve konik gövdeye yönelmektedir. Siklon ile gaz içerisinde olması muhtemel toz, kül, katran vb. gibi istenmeyen içeriklerin sistemden uzaklaştırılması sağlanarak daha iyi bir termal verim sağlanır (Tezer ve diğ., 2022).

Reaktörde bulunan iki adet gaz giriş hattında biri azot gazına diğeri ise kuru hava veya saf O₂ gaz ajanlarına bağlanmıştır. Gazlaştırma prosesi sırasında reaktörün iç sıcaklığı ısılıçift ile ölçülmüştür. Üretilen sentez gaz bünyesinde bulunan organik uçucuların yoğunlaştırılarak sentez gazdan uzaklaştırılmasını sağlamak için ardışık şekilde iki soğutma kolonu bulunmaktadır. Bu bölgede yoğunlaşan sıvılar soğutma kolonlarından geçerek erlenlerde birirmektedir. Bünyesindeki organik uçucuların uzaklaşmasıyla sentez gaz, gaz analiz cihazına yönlendirilerek kompozisyonu tespit edilmiştir. Gazın içerisinde yoğunlaşmamış uçucu organik maddelerin ve partikül maddelerin analiz cihazında tıkanma sorunu oluşturmasını önlemek için analiz cihazına bağlı boru hattında bir adet seramik ve iki adet mikrofiber filtre kullanılmıştır. Reaktörün kapak bölgesinde bulunan çıkış hattı ile üretilen sentez gazın

tahliyesi sağlanmaktadır. Gaz analiz cihazı ile üretilen sentez gaz içerisindeki CO, CO₂, H₂, CH₄ ve O₂ konsantrasyonu yüzdece ve olarak tespit edilmiştir. ABB AO2000 çevrimiçi gaz analiz cihazı içerisinde bulunan soğutma sistemi ile analiz bölgesine gazı beslemeden önce cihazın çalışma sıcaklığı olan 5 °C' ye kadar düşürülerek olası uçucu organik maddelerin de yoğunlaşması sağlanır. Şekil 3.9 ve 3.10' da deney sırasında kullanılan reaktör düzeneğinin görseli bulunmaktadır.



Şekil 3.9: Laboratuvarda kullanılan reaktör düzeneği.



Şekil 3.10: Seramik ısıtıcı.

3.1.13. Gaz Hacminin Hesaplanması

Gazlaştırma deneyleri sonrası elde edilen gaz 40 litre hacimli Tedlar torbada toplanmıştır. Yapılan gazlaştırma deneyleri sırasında toplama torbasında toplanan sentez gazın yaklaşık hacmi su taşıma yöntemi tespit edilmiştir. Gaz hacmini belirlemede kullanılan Tedlar torba Şekil 3.11’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Gaz toplama torbası.

3.1.14. Katalizör Kullanımı

Gazlaştırma proses verimi ve elde edilen sentez gazı içeriği üzerindeki katalizör etkisini incelemek amacıyla laboratuvarında yapılan çalışmalarda %50Ni-%50Al karışıklı ticari katalizörü kullanılmıştır. Katalizör ve ATY numune belirlenen kütlece oranlarda karıştırılarak reaktöre beslenmiştir. Yakıt numune (ATY) miktarına göre ağırlıkça oranları (Katalizör/ ATY numune) değışen oranları 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 ve 1,25 olarak ayarlanmıştır. Deneylerde kullanılan Ni-Al katalizörü Şekil 3.12’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: %50Ni-%50Al katalizörü.

3.1.15. Enerji Dönüşüm Verimliliğinin Hesaplanması

Soğuk gaz verimliliği, gazlaştırıcı tasarımı, besleme stoğu, nem içeriği (sentez gazı bileşimi nedeniyle) ve sentez gazı akış hızı gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Bununla birlikte, SGV değerinin gaz verimindeki artış ile arttığı bilinmektedir.

Her bir kg bazlı üründen üretilen enerji miktarının yakıt malzemesinin ısıl değerine oranı olarak ifade edilen soğuk gaz verimliliği gazlaştırma performansının bir ölçüsüdür ve hem kalorifik değere hem de yakıt numuneden salınan sentez gazı hacmine bağlıdır. Gazlaştırma deneylerine ait soğuk gaz verimliliği (SGV) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır (Basu, 2010):

$$\text{Soğuk gaz verimi } (\eta_{\text{Gaz}}) = \frac{\text{Gazın ısıl değeri/kg yakıt} \times \text{Sentez gaz hacmi}}{1 \text{ kg yakıtın ortalama kalorifik değeri}} \quad (3.5)$$

3.1.16. İstatistiksel Veri Analizi

Yapılan gazlaştırma deneyleri sonucunda ortaya çıkan verilerin anlamlandırılması, farklılıkların gösterilmesi ve sonuçların incelenmesi için SPSS 21 (Statistical Package for Social Sciences) istatistiksel veri analiz programı kullanılmıştır. Gazlaştırma verileri programa ait yazılıma aktarıldıktan sonra regresyon, korrelasyon ve ANOVA analizleri yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

Regresyon analizi, iki ya da daha fazla değişken arasındaki bağıntıyı ölçmek için kullanılan analiz metodudur. Tek değişken kullanılan analizler tek değişkenli regresyon, birden fazla değişken kullanılan analizler ise çok değişkenli regresyon olarak bilinmektedir. Regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişkinin gücü hakkında yorum yapılabilir.

Korelasyon, iki değişkenin doğrusal olarak ne ölçüde ilişkili olduğunu (yani, birlikte sabit bir oranda değiştikleri anlamına gelir) ifade eden istatistiksel bir ölçüdür. Sebep ve sonuç hakkında bir açıklama yapmadan basit ilişkileri tanımlamak için yaygın bir analiz metodudur. Korelasyonlar, -1 ile +1 arasında değişen ve r ile gösterilen korelasyon katsayısı adı verilen birimsiz bir ölçümle tanımlanır. İstatistiksel anlamlılık ise bir p-değeri ile gösterilir.

✓ r sıfıra ne kadar yakınsa doğrusal ilişki kuvveti o kadar zayıftır.

✓ Pozitif r değerleri, her iki değişkenin değerlerinin birlikte artma eğiliminde olduğu pozitif bir korelasyonu gösterir.

✓ Negatif r değerleri, bir değişkenin değerlerinin diğer değişkenin değerleri azalırken artma eğiliminde olduğu negatif bir korelasyonu gösterir (Statistics Knowledge Portal, 2023)

ANOVA, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki etkileşimlerin istatistiksel olarak anlamlı fark olup olmadığının test edilmesinde kullanılır. ANOVA analizlerinde “p” simgesi olarak gösterilen anlamlılık düzeyi $p < 0,01$ ise değişkenler arasındaki ilişkinin anlamlı olduğunu, $p > 0,05$ ise değişkenler arasındaki ilişkinin anlamsız olduğunu ifade etmektedir.

3.2. DeneySEL Yaklaşım

Sistem içerisine beslenecek yakıt miktarı 20 g ve 40 g olarak belirlenmiştir. Gazlaştırma ajanı olarak kuru hava ve saf oksijen (O_2) kullanılmıştır. Kuru hava 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 L/dk’lık debilerde sisteme beslenerek, bu değişimin gazlaştırma performansı üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Saf oksijen ajan debisi belirlenirken en yüksek verimli kuru hava debisinin 1/5’i olacak şekilde değerler seçilmiştir. Kuru hava ile yürütölen gazlaştırma deneylerinden yola çıkılarak saf O_2 için 0.01 ve 0.02 L/dk debiler uygun görölmüştür. Ayrıca, sıcaklığın gazlaştırma verimi ve sentez gaz üzerindeki etkisini izleyebilmek için 700, 800 ve 900 °C sıcaklıklarda gazlaştırma deneyleri tekrarlanmıştır.

Katalizör kullanılmadan yürütülen deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında katalizörlü deneyler yürütülmüş ve katalizör ilavesinin proses üzerindeki etkileri gözlenmiştir. Katalizör olarak ticari olarak satın alınan ağırlıkça %50 karışım oranında Ni-Al katalizörü kullanılmıştır. Gazlaştırma prosesi sırasında üretilen gaz gaz analiz cihazı ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Her deneyden önce kullanılan yakıt tartılarak belirlenen ağırlıkta yakıt reaktöre beslenmiştir. Reaktör içerisi istenilen sıcaklığa ulaşınca kadar seramik rezistans ile ısıtılmış ve ısınma hızı grafiği oluşturulmuştur. Hedeflenen gazlaştırma sıcaklığına erişildikten sonra sıcaklık sabit tutulmuş ve reaksiyonların tamamlanması beklenmiştir. Kesikli olarak çalıştırılan reaktörde yakıt tükenmeye başlayınca sentez gaz kompozisyonlarında azalma başlar, yüzdesel değerlerin minimuma indiği nokta deneyin tamamlandığı nokta olarak kabul edilmiştir. Sistemin elektriği kesilerek düzeneğin soğuması için beklemeye geçilir. Bu aşamada reaktör soğuyana kadar kapaklar açılmaz. Reaktör soğuduktan sonra, kapaklar açılarak içerisinde kalan katı kalıntı ve varsa sıvı ürün alınıp ve tartımı yapılmıştır.

4. BULGULAR

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) numunesinin karakterizasyonlarına ait bulgular ile gazlaştırma deneyleri sonuçları tablo ve şekiller halinde gösterilmiştir. Ayrıca tüm verilerin istatistiksel olarak değerlendirmesi SPSS 21 yazılımı ile sunulmuştur.

4.1. ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT NUMUNELERİN KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde, deneysel çalışmaların hammaddesi olarak kullanılan atıktan türetilmiş yakıt (ATY) ait karakterizasyon çalışmaları verilmiştir.

4.1.1. Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY) Numunenin Elementel ve Kimyasal Analizleri

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) numunenin elementel analiz ve ısı değer analiz değerleri Tablo 4.1' de gösterilmiştir. ATY numuneye ait kimyasal analiz sonuçları ise Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.1: ATY atık örneğinin elementel analizi ve kalorifik değeri.

	Elementel analiz, % ağırlık				Isıl değer analizi, kcal/kg
	C	H	N	S	Isıl değer
ATY	58,1	6,5	1,76	TE	4117

TE:Tespit edilemedi.

Kimyasal element karbon (C), tüm yanıcı malzemelerdeki ana elementtir ve tüm yakıtların sahip olduğu ısı değerinden sorumludur. Hidrojen yüksek bir ısı değer sunar, ancak bu kimyasal elementin yakıtlardaki yüzdesi düşüktür ve yakıtın nemi ile ilgilidir. Açıkçası, daha yüksek karbon ve hidrojen içerikleri, daha düşük oksijen ve kül içerikleri ise yakıtların enerji içeriğini artıracaktır (Vamvuka ve diğ., 2022). Karbon ve hidrojen, ağırlıkça sırasıyla %58,1 ve %6,5 olarak ölçülmüştür; bu, ATY'nin kendine özgü homojen olmaması durumu göz önüne alındığında normal kabul edilebilir (Vounatsos ve diğ., 2016).

ATY numuneye ait ısı değer analizi sonucu ısı değerini 4117 kcal/kg (17.23 MJ/kg) olduğu belirlenmiştir. ATY numunelerinin kuru bazdaki kalorifik değerleri kömürün linyitin (3000 kcal/kg) ve kurutulmuş odunun (3800 kcal/kg) kalorifik değerine yakın olduğu görülmektedir.

Belediye atık ve endüstriyel atıklardan elde edilen atıktan türetilmiş yakıt örneği ile yapılan çalışmada kalarifik değeri 5342 kcal/kg olarak tespit edilmiştir (Agon ve diğ., 2016). Literatürde farklı yakıt türlerine ait karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Hindistan cevizinin gazlaştırılmasına dayanan bir çalışmada kalarifik değer 18.21 MJ/kg (4349 kcal/kg) olarak tespit edilmiştir (Menon ve diğ., 2021). Aydın ve diğ. (2018), odun peletininin gazlaştırılması çalışmasında atığa ait karakterizasyon çalışması yapmışlardır ve odun peletinin sahip olduğu kalarifik değer 4464 kcal/kg (18.69 MJ/kg) olarak tespit etmişlerdir.

Tablo 4.2: ATY atık örneğinin kimyasal analizi.

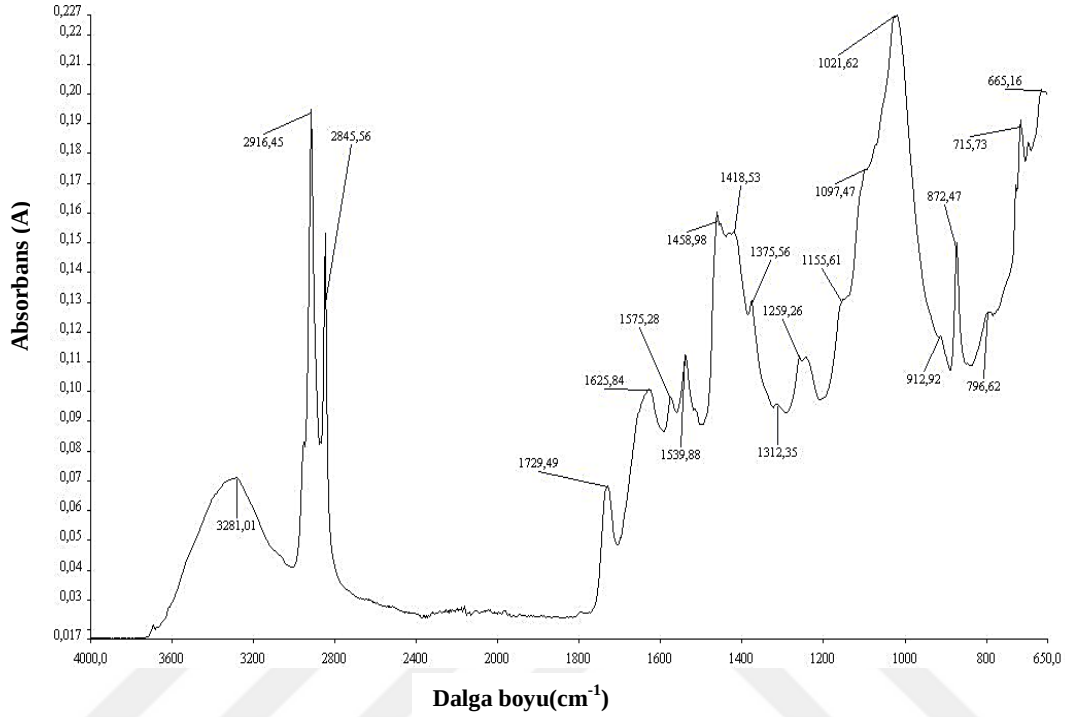
	Kül % Ağırlık	Nem % Ağırlık	Uçucu Madde % Ağırlık	Sabit Karbon % Ağırlık
ATY	12,6	3,98	74,36	9,06

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) numunesinin kimyasal analizi neticesinde neminin %3,98, uçucu maddesinin %74,36, sabit karbonunun %9,06 ve külünün de %12,6 olduğu tespit edilmiştir. ATY' nin kül içeriği, kalarifik değeri ve yanma sonrasında geride kalacak kalıntı miktarını belirlediği için önemlidir. Chiemchaisri ve diğ. (2010), daha yüksek uçucu madde içeriğinin yakıtın yakılma ve tutuşma sürecini kolaylaştıracağını, böylece yanma hızının daha hızlı olacağını öne sürmüştür. Genellikle yüksek uçucu madde ve düşük kül içeriği yüksek kalarifik değer içeriğine sahip yakıt özelliğini göstermektedir (Gentil ve diğ., 2010). Reaksiyonlarda yer alan hammaddenin uçucu madde içeriği ne kadar yüksekse, proses sonucunda o kadar fazla sentez gazı üretimine yol açtığı bilinmektedir (Khezri ve diğ., 2019).

Nem, ATY'de istenmeyen bir özelliktir. ATY' nin nem içeriği arttıkça, ATY'nin ısı değeri azalır. Genel olarak nem, bir yakıtın termal özellikleri üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Atıklarındaki nem içeriği azaldığında yakıtın ısı değeri artmaktadır (Sharma ve diğ., 2022). Saad ve Williams (2016), ATY karakterizasyonu çalışmasında nemi %4,47 olarak tespit etmişlerdir.

4.1.2. Atıktan Türetilmiş Yakıt Numunesine ait FTIR Analiz Sonuçları

ATY atık örneğinin FTIR analiz spektrumları Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



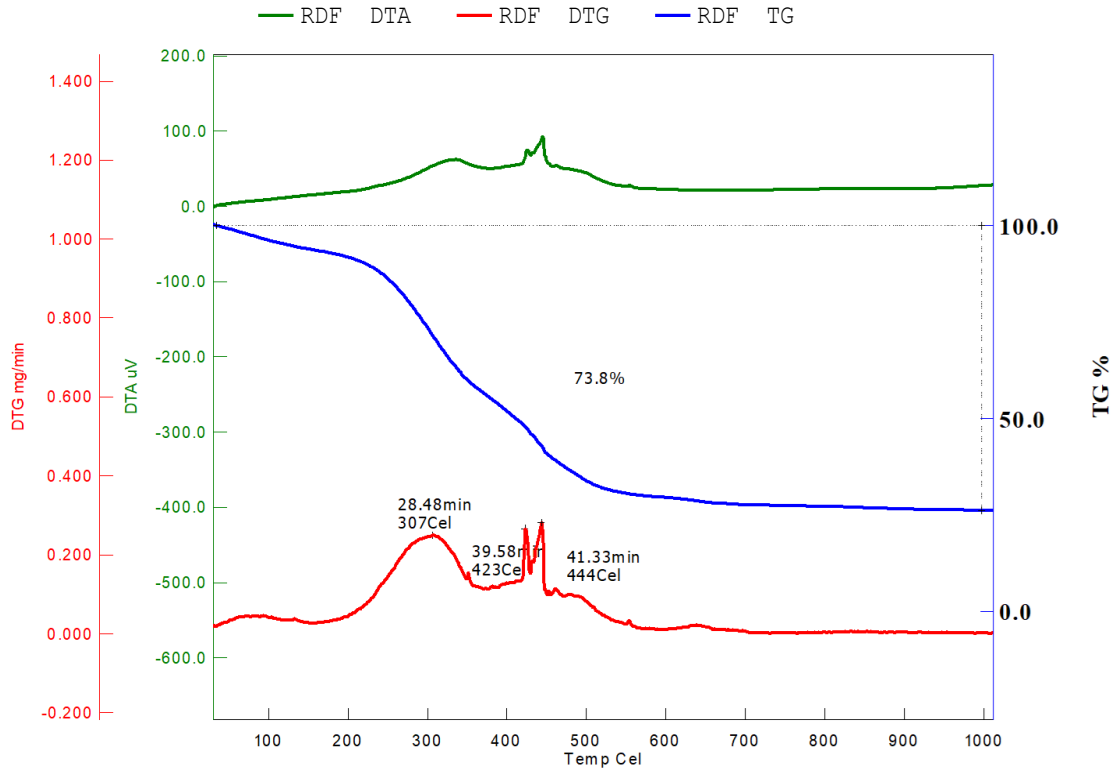
Şekil 4.1: ATY numune örneğine ait FTIR analiz sonuçları.

Çalışmada incelenen atıktan türetilmiş yakıt (ATY) numune FTIR spektrumu incelendiğinde ATY yapısında tespit edilen bazı spesifik gruplar yorumlanabilmektedir. 2800-3000 cm⁻¹ aralığında yer alan pikler, metil ve metilen gruplarında C-H gerilmesinin varlığını göstermektedir. Selüloz, lignin ve hemiselüloz gibi biyokütlenin makromoleküler bileşenleri C-H bağları içerir (Smolinski ve diğ., 2022). Öte yandan, ATY' de bulunan plastik bileşenlerde bu piklere katkıda bulunur (Lu ve diğ., 1999). 2600-3000 cm⁻¹ deki piklerin gözükmesi HCl' nin değerlendirilmesine bağlanabilir ve HCl' nin kaynağı, ATY karışımlarının PVC içermesidir (Singh ve diğ., 2012). 1400-1600 cm⁻¹ deki orta çoklu bantlar aromatik C=C titreşimlerini gösterir. Biyokütlede selülozdan sonra en önemli ikinci bileşen olan ligninin tek aromatik malzeme olduğu bilinmektedir ve bu aralıktaki bantlar biyokütlede bulunan lignine atfedilebilir. 1100-1200 cm⁻¹ aralığındaki pikler selüloz ve hemiselüloz gibi eter tipi yapılarla ilgilidir (Demir ve diğ., 2018). ATY içeriğinde bulunan kağıt ve kağıt ürünleri selüloz açısından zengin olmaktadır. Yine 1729, 1625 ve 1575 dalga boylarındaki pikler ise aromatik yapıdaki grupların C-H bandını göstermektedir. 715-1100 cm⁻¹ arasındaki pikler C-O fonksiyonel grubuyla ilişkilidir (Munajad ve diğ., 2018).

Ham ATY' nin FTIR spektrumları, O-H, C-H, C-O, C=C dahil olmak üzere çeşitli fonksiyonel grupların varlığını göstermektedir.

4.1.3. ATY Numuneye Ait Termogravimetrik Analiz Sonuçları

ATY numunede sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle kaybı ve/veya kazanımlarının tespiti için yapılan termogravimetrik analiz grafiği Şekil 4.2' de sunulmuştur.



Şekil 4.2: 10 °C / dk sıcaklık hızında ATY numunesinin azot ortamındaki termogravimetrik analizi.

Şekil 4.2' de gösterildiği gibi, reaksiyon aralıkları, farklı tip reaksiyonların belirtilen aralıklarında meydana gelen kütle kayıpları, tepe sıcaklıkları, bu aralıklarda meydana gelen maksimum kütle kayıpları ve TG/DTG eğrilerinin birleştirilmesiyle kalıntı yüzdeleri bulunmuştur. Reaksiyon aralıkları, DTG eğrisi pikleriyle de desteklenen TG eğrisinde meydana gelen eğim değişimlerine göre belirlenmiştir.

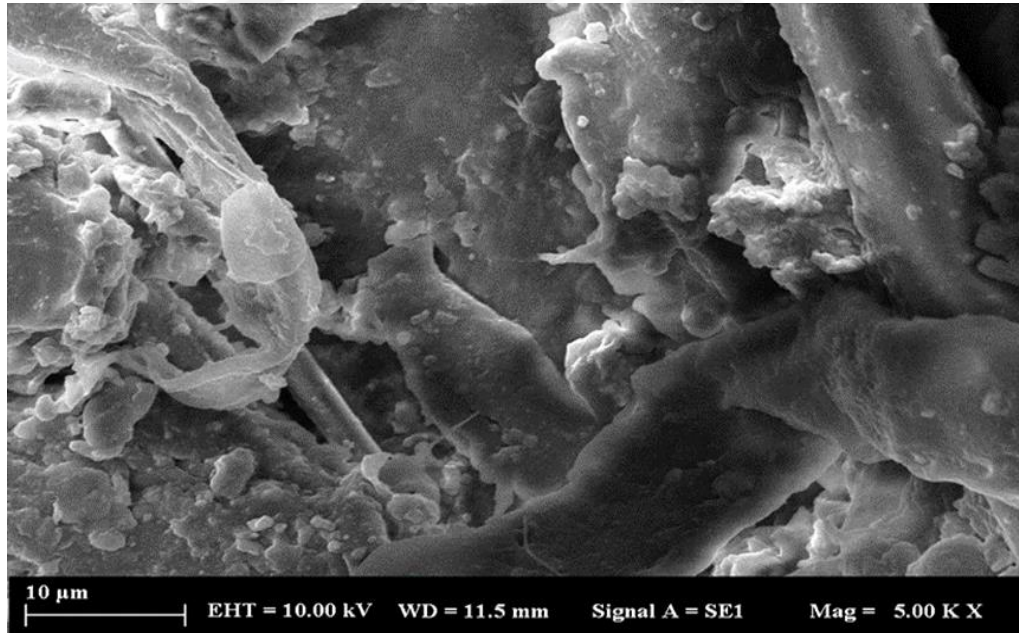
10 °C/dk artış hızı uygulanan TGA analizinde ATY atık örneğinin azot gazı ortamında termal bozunması gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik eğriler incelendiğinde, yakıt numunenin bozunmasının üç bölgede olduğu görülmektedir. ATY atıkların azot ortamında bozundurulması ile ilk ağırlık kaybı 210 °C sıcaklığa kadar hammaddenin yapısında bulunan

nem kaybı ve uçucu maddenin uzaklaşması sonucunda yaklaşık %8 kütle kaybı gözlenmiştir. DTA eğrisinde 307 °C’ de yer alan egzotermik pik (kütle kaybı ~ %50) selüloz bazlı materyallerin ve yumuşak plastik materyallerin termal olarak ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Alfè ve diğ., 2022).

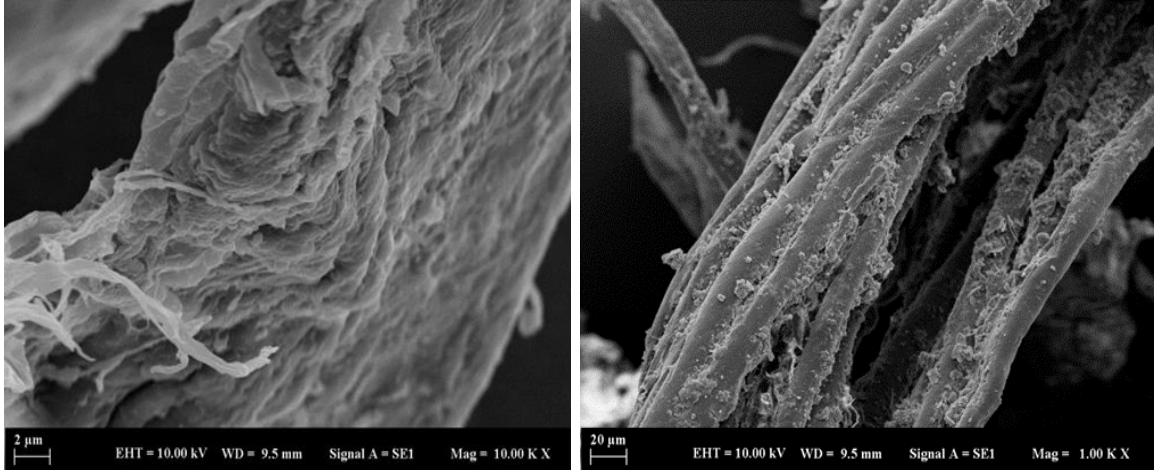
423 °C’ de ve 444 °C’ de polimer bazlı bileşenlerin ayrışmasına (ağırlık kaybı ~ % 40) iki adet egzotermik pik DTA eğrisinde yer almaktadır (Kuspangaliyeva ve diğ., 2021). 500 °C’ den ağırlık kaybı yaklaşık %30 olup, artan sıcaklıklarda ağırlık kaybı değerinde fark edilir bir değişiklik gerçekleşmemiştir. ATY’ ye ait termogravimerik davranış literatür bulgularıyla uyumludur (Alfè ve diğ., 2022; Kuspangaliyeva ve diğ., 2021).

4.1.4. ATY Numunesine Ait SEM-EDS Analizi

Ham ATY numuneye ait farklı büyütmelerde alınan SEM görüntüsü Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’ de ve SEM-EDS analizleri ise Şekil 4.5’ de sunulmuştur.

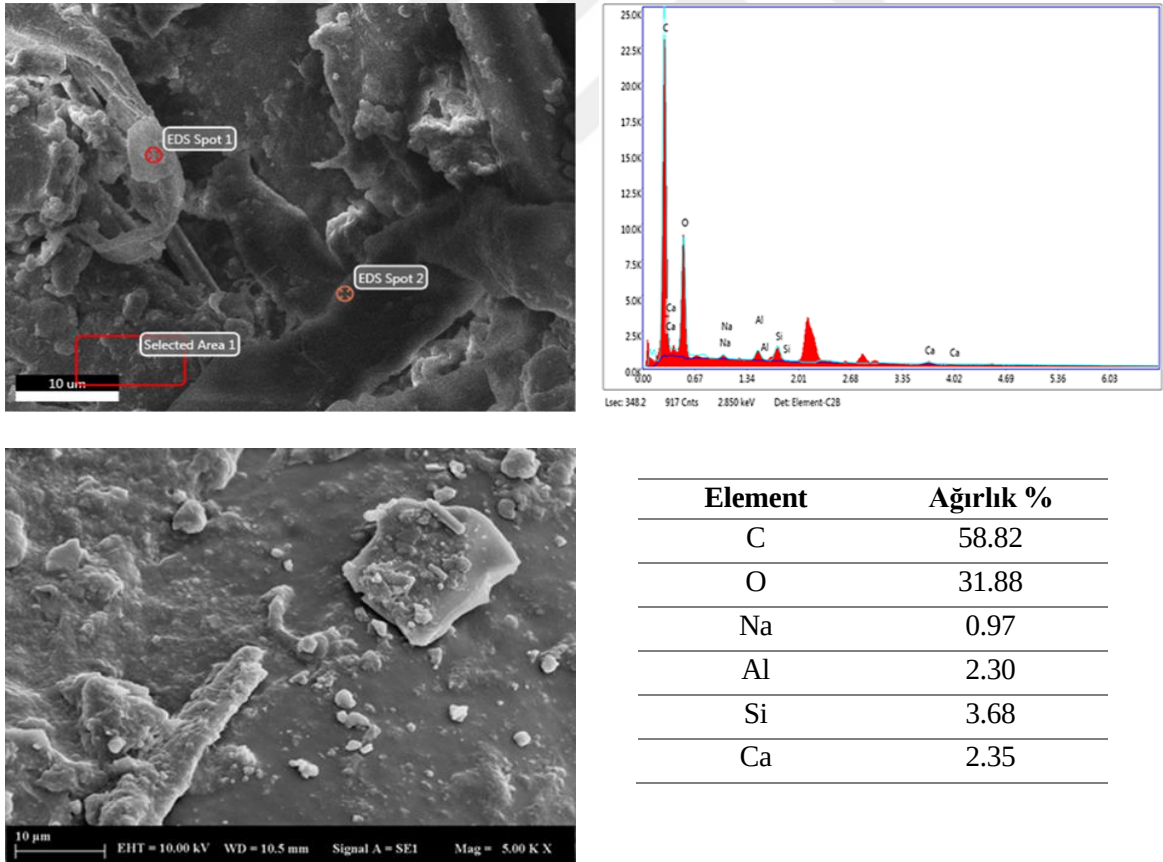


Şekil 4.3: ATY’ ye ait SEM görüntüsü.



Şekil 4.4: ATY' nin farklı büyütme oranlarında SEM görüntüleri.

Şekil 4.3 ve 4.4' de farklı büyütme oranlarında ATY numuneye ait SEM morfolojisi görülmektedir. Granüler bir yüzeye sahip düzensiz bir lif benzeri (kağıt, biyokütle kalıntıları ve tekstil gibi selüloz bazlı bileşenlerin varlığını kanıtlayan) yapıların varlığını göstermektedir.



Şekil 4.5: ATY numunenin seçilen bölgesinde SEM-EDS analizi.

ATY numunenin EDS analizi noktasal olarak bölge seçilerek yapılmıştır. Farklı seçilen bölgelerde farklı değerler görülmesi olasıdır. EDS sonuçlarındaki sayısal değerlere bakıldığı zaman teorik olarak hesaplanan ağırlıkça %58.82 karbon, %31.88 değerinde oksijen görülmüştür. Şekil 4.5’ de gösterildiği gibi, karbon (C), genellikle tabakalar veya çubuklar halinde mevcuttur. Silisyum %3.68 değerinde bulunurken Ca ve Al daha düşük yüzdelerde tespit edilmiştir. EDS analizi sonuçları elementel analiz ile birlikte değerlendirildiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

4.2. GAZLAŞTIRMA DENEYLERİ

Gazlaştırma için kullanılan ATY 20 g ve 40 g ağırlığında kullanılmıştır. Gazlaştırma çalışmalarında ajan gaz olarak 0.05, 0.1, 0.2 ve 0.3 L/dk debilerde kuru hava ve en verimli kuru hava debisinin yaklaşık 1/5’i kadar saf O₂ kullanılmıştır.

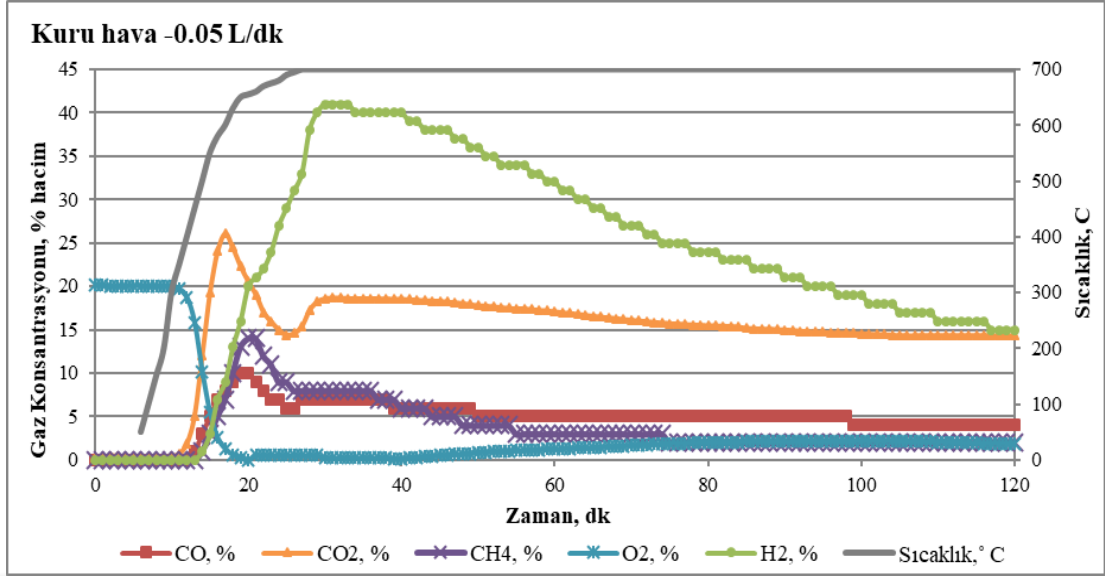
SPSS 21 yazılımı ile istatistiksel değerlendirmelere göre optimum kuru hava debisi 0.05-0.1 L/dk aralığı olarak tespit edilmiştir. Bu değerlendirmelere dayanarak deneylerde uygulanacak saf O₂ debisi 0.01 ve 0.02 L/dk olarak hesaplanmıştır.

4.2.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

4.2.1.1. 700 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma deneyleri

Gazlaştırma ajanın kuru hava olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta ve 40 g ATY yakıt kullanılarak yürütülen gazlaştırma deneylerine ait sonuçlar grafiklerde ve oluşan ürün miktarları Tablo 4.3’ de verilmiştir.

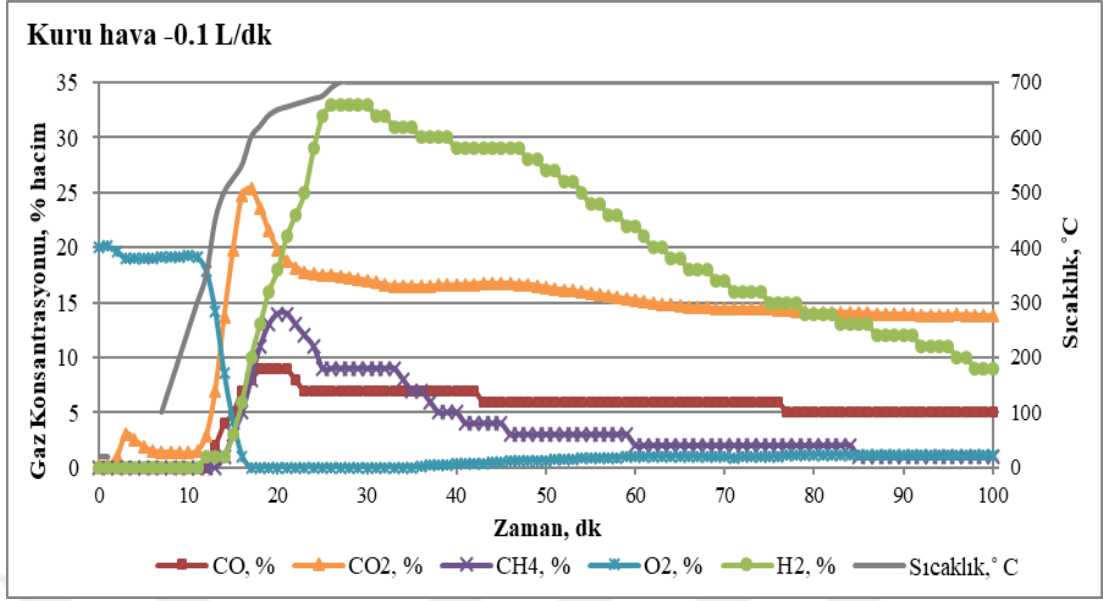
Şekil 4.6’ da 0.05 L/dk debide yürütülen deneyin, sıcaklık ve zamana bağlı değişen gaz dağılım konsantrasyonları verilmiştir.



Şekil 4.6: 40 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C’ de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

Bu deneyde 13. dakikadan itibaren metan ve hidrojen gazı oluşumu görülmüş, metan 20. dakikada %14 ile hidrojen ise 31. dakikada %41 ile maksimuma ulaşmıştır. Sıcaklık artışıyla birlikte gazlaştırmanın ilk aşaması olan yanma ve/veya kısmi yanma reaksiyonlarının başladığı ve bunun sonrasında reaksiyon sonucu içeride bulunan kısmi oksijen tükenmeye başlayıp CO₂ oluşmaya başladığı tahmin edilmektedir. CO₂ artışıyla birlikte kısmi yanma reaksiyonu ve Boudouard reaksiyonu ile oluşan CO₂'nin indirgenmesine bağlı olarak CO oluştuğu ön görülmektedir.

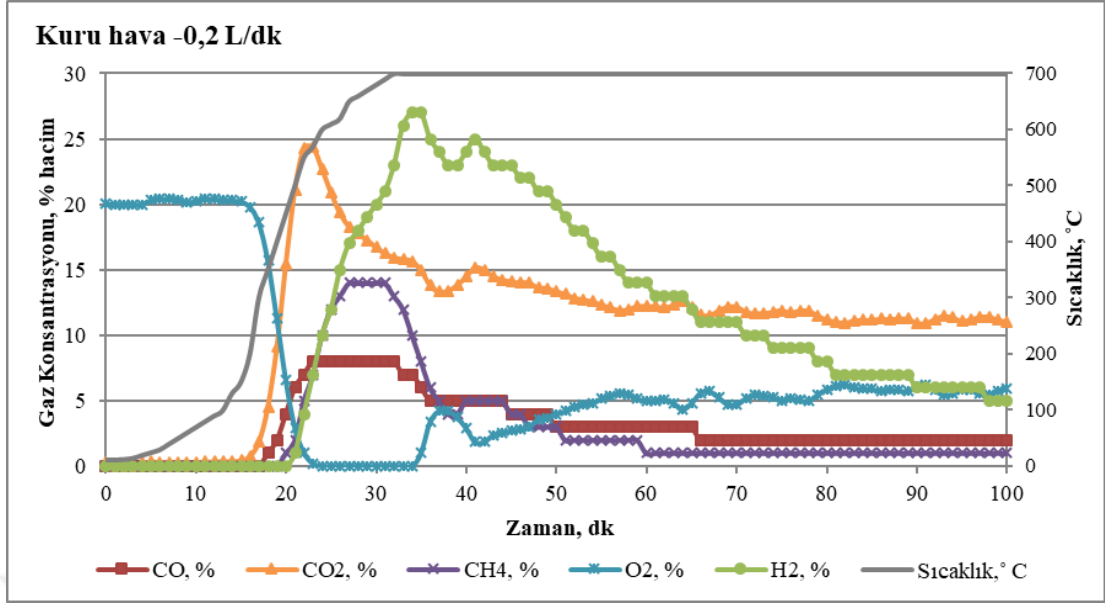
Gazlaştırma ajan debisinin 0,1 L/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların konsantrasyonları şekil 4.7’ de verilmiştir.



Şekil 4.7: 40 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C’ de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

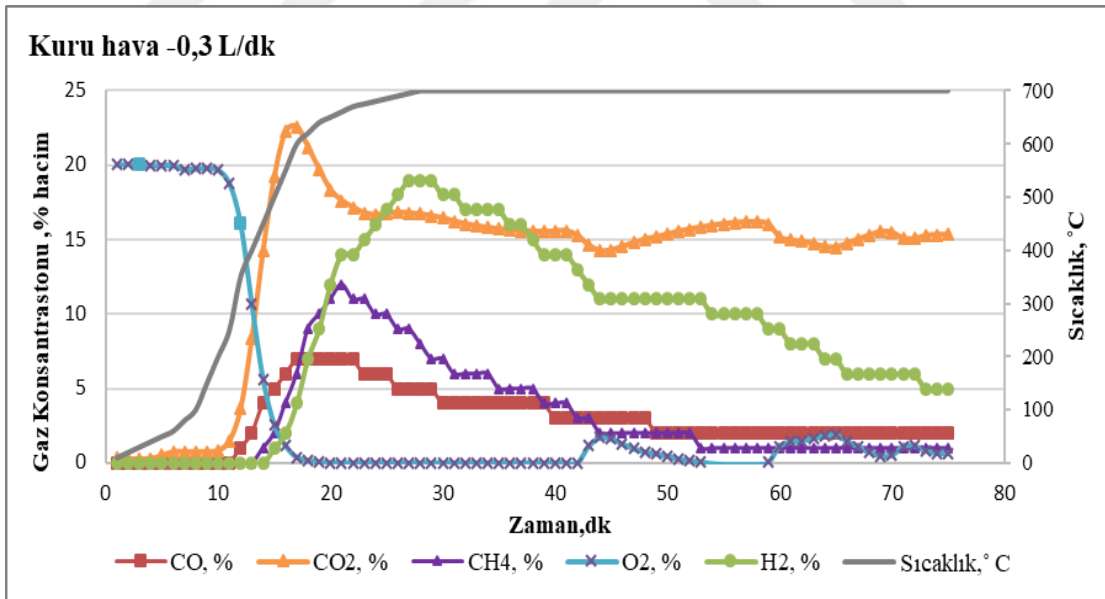
Şekil 4.8’ e göre, sıcaklığın yükselmesi oksijen yüzdesinde azalmaya aynı zamanda CO₂ ve CO oluşumunun hızlandığı görülmektedir. CO konsantrasyonu en fazla %9 seviyesine çıkmıştır. Metan oluşumu 13. dakikada başlayarak 21. dakikada %14 ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Metan reaksiyonlarının verilen zaman aralıklarında etkili olduğu söylenebilir. Hidrojen 26. dakikada %33 seviyesinde görülerek pik değerine ulaşmıştır. Gazlaştırma mekanizmasında gerçekleşen endotermik reaksiyonlar neticesinde H₂ gazı yükselmiştir.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,2 L/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların konsantrasyonları şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8: 40 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,3 L/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların konsantrasyonları şekil 4.9' da verilmiştir.



Şekil 4.9: 40 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

Gazlaştırma ortamına verilen ajan gazın debisindeki artış tam yanma reaksiyonlarını desteklemektedir ve bu istenmeyen bir durumdur. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 kuru hava debisindeki artış ile kısmi yanma ürünlerinden CO konsantrasyonunda düşüş gözlenmiştir. H₂ konsantrasyonu değerlendirildiğinde, kuru hava akışının artışı ile daha düşük yüzdede

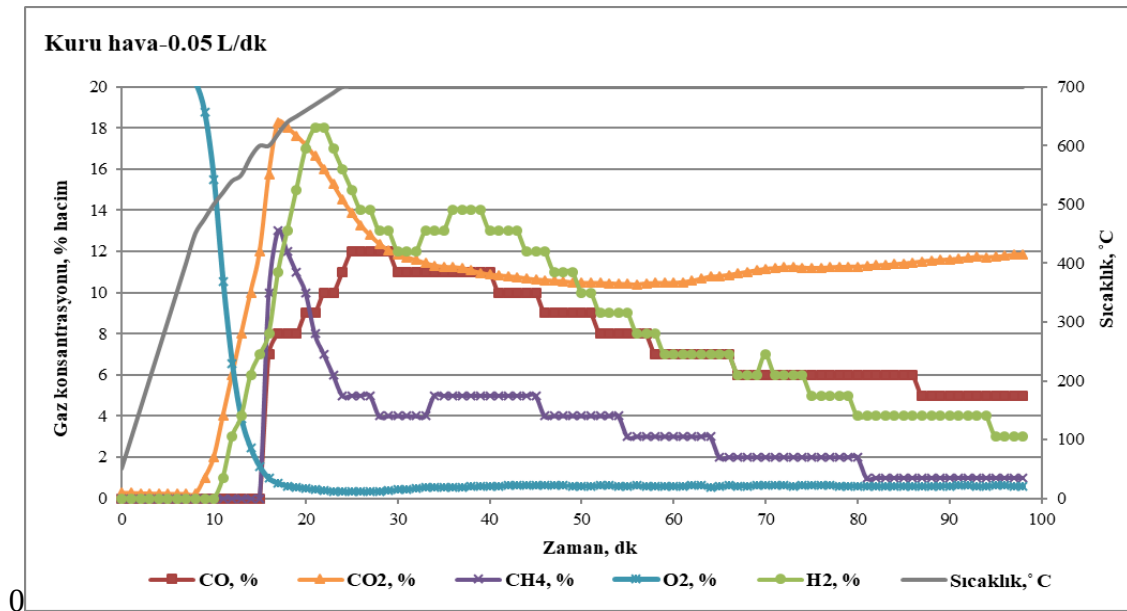
sentezlendiği görülebilmektedir. Ayrıca gaz debisinin artırılması gazlaştırma ile elde edilen sentez gaz bileşen konsantrasyonlarında düşüş ile sonuçlanmıştır.

Tablo 4.3: 700 C' de kuru hava ile gerçekleştirilen 40 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.

Proses	Ham madde (g)	Sıvı ürün (g)	Katı ürün (g)	Sentez gaz (g)
0.05 L/dk	40	4.50	13.88	21.62
0.1 L/dk	40	4.61	14.50	20.89
0.2 L/dk	40	4.89	13.75	21.36
0.3 L/dk	40	4.97	13.02	22.01

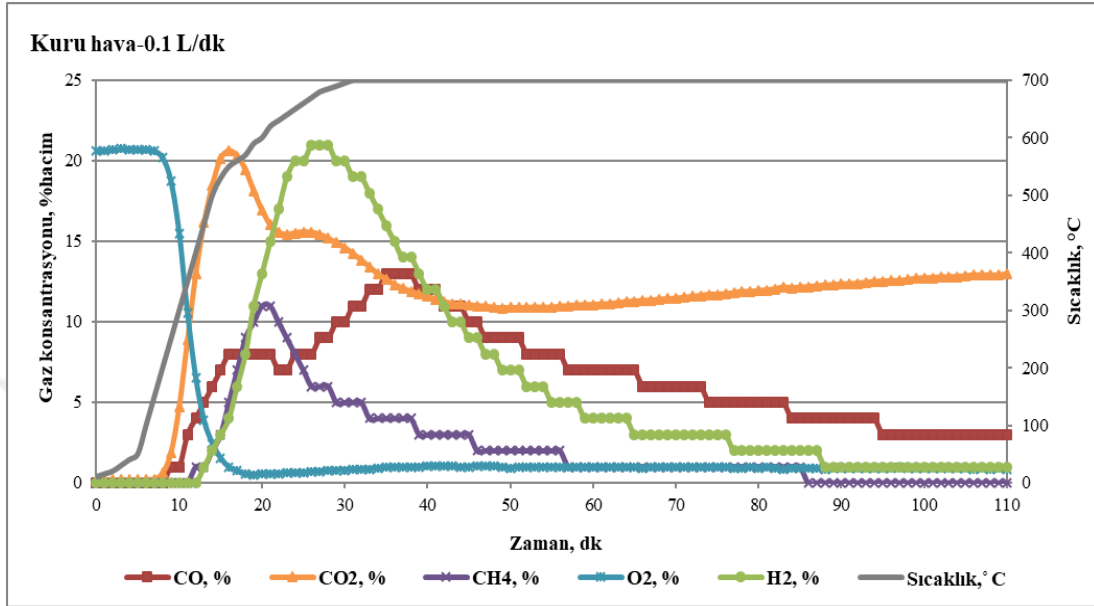
Gazlaştırma ajanının kuru hava olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta ve 20 g ATY kullanılarak yürütülen gazlaştırma deneylerine ait performans grafikleri ve oluşan ürün miktarları tablo 4.4' de sunulmuştur.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların konsantrasyonları şekil 4.10' da verilmiştir.



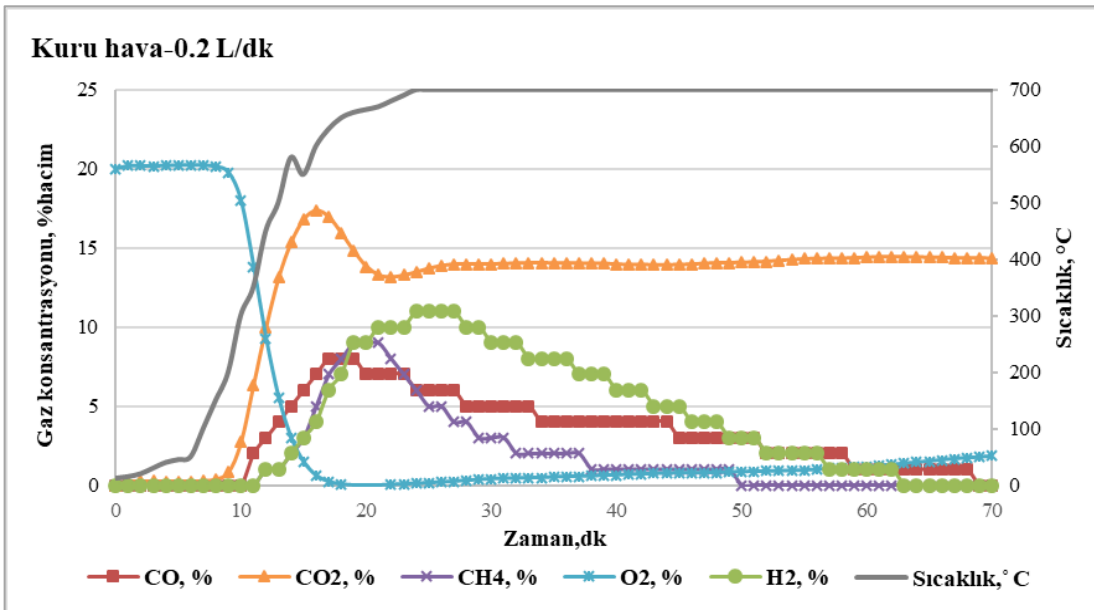
Şekil 4.10: 20 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,1 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların konsantrasyonları şekil 4.11’ de verilmiştir.



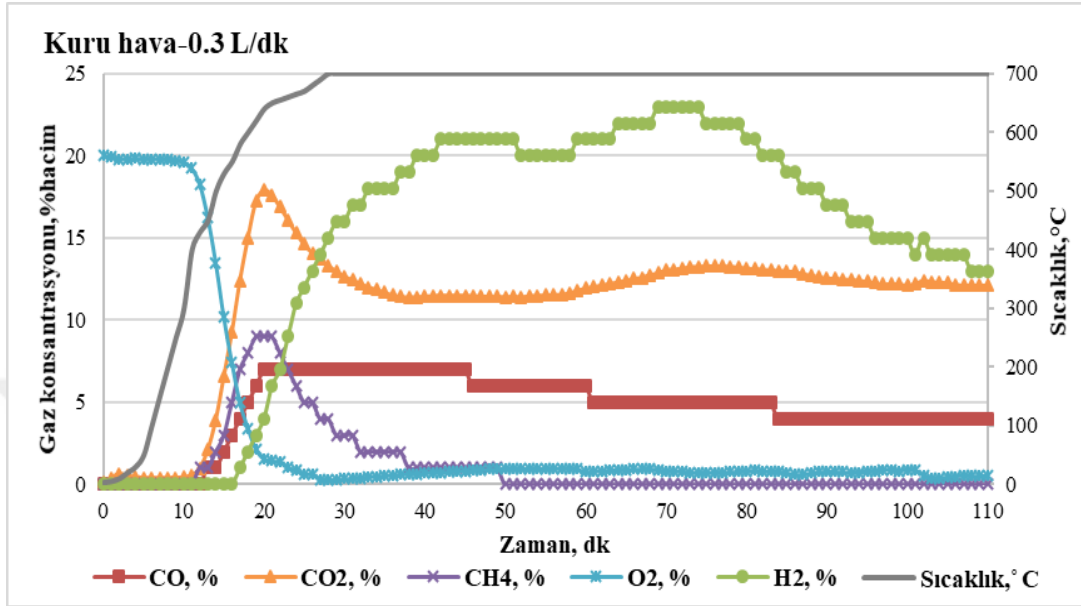
Şekil 4.11: 20 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C’ de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,2 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların konsantrasyonları şekil 4.12’ de verilmiştir.



Şekil 4.12: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C’ de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

Gazlaştırma ajan debisinin 0.3 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların konsantrasyonları şekil 4.13’ de verilmiştir.



Şekil 4.13: 20 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 700 °C’ de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

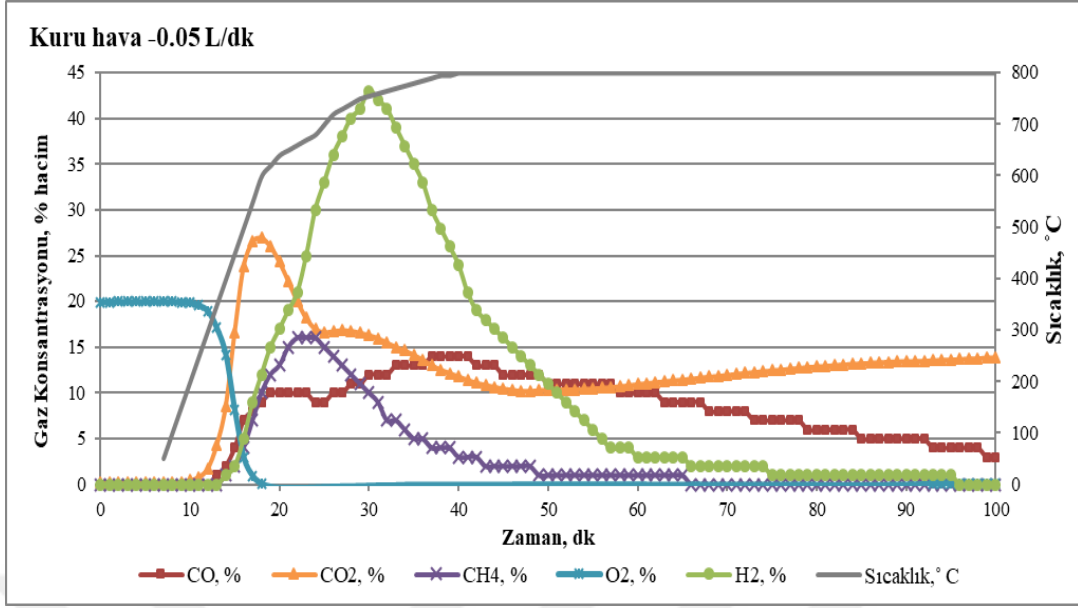
Tablo 4.4: 700° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 20 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.

Proses	Ham madde (g)	Sıvı ürün (g)	Katı ürün (g)	Sentez gaz (g)
0.05 L/dk	20	2.10	6.77	11.13
0.1 L/dk	20	2.02	6.25	11.73
0.2 L/dk	20	2.24	7.28	11.09
0.3 L/dk	20	2.32	6.59	22.01

4.2.1.2. 800 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma deneyleri

Gazlaştırma ajanın kuru hava olarak seçildiği, 800 °C sıcaklıkta ve 40 g ATY yakıt kullanılarak yürütülen gazlaştırma deneylerine ait grafikler ve oluşan ürün miktarları Tablo 4.5’ de verilmiştir.

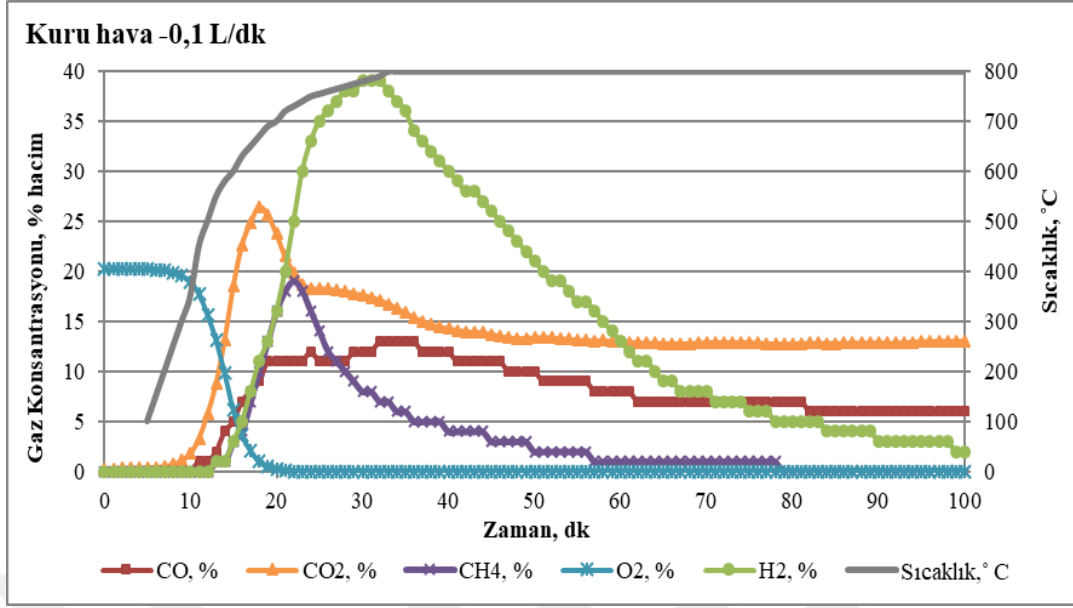
Şekil 4.14’ de 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C’ de yürütülen gazlaştırma deneyine ait sıcaklık ve zamana bağlı gaz dağılımı grafiği görülmektedir.



Şekil 4.14: 40 g ATY ve 0.05 l/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.14' e göre, sıcaklık yükselmeye başlaması yanma reaksiyonları başlatarak CO₂ konsantrasyonunun %26 seviyesine çıkması ile sonuçlanmıştır. Bu sırada kısmi yanma ve boudouard reaksiyonları gerçekleşerek CO seviyesi %10' a ulaşmıştır. ATY' nin verilen koşullardaki gazlaştırması ile 20-30. dakikalar arasındaki zaman aralığında sentez gazındaki H₂ içeriği yaklaşık olarak %17' den %44' e yükselmiş ve bu dakikada pik noktasına ulaştığı görülmüştür. Metan reaksiyonları nedeniyle sentez gazının hidrojen içeriği verilen aralıkta artmıştır. CO artış yönünde pozitif bir değişim göstermezken, verilen zaman aralığında CH₄ ve CO₂ konsantrasyonu azalmıştır. Ayrıca CO₂ %25' den %15 civarına gerilemiştir. Sıcaklıktaki artış endotermik reaksiyonları teşvik ederek H₂ miktarını arttırmıştır (Aydin ve diğ., 2019).

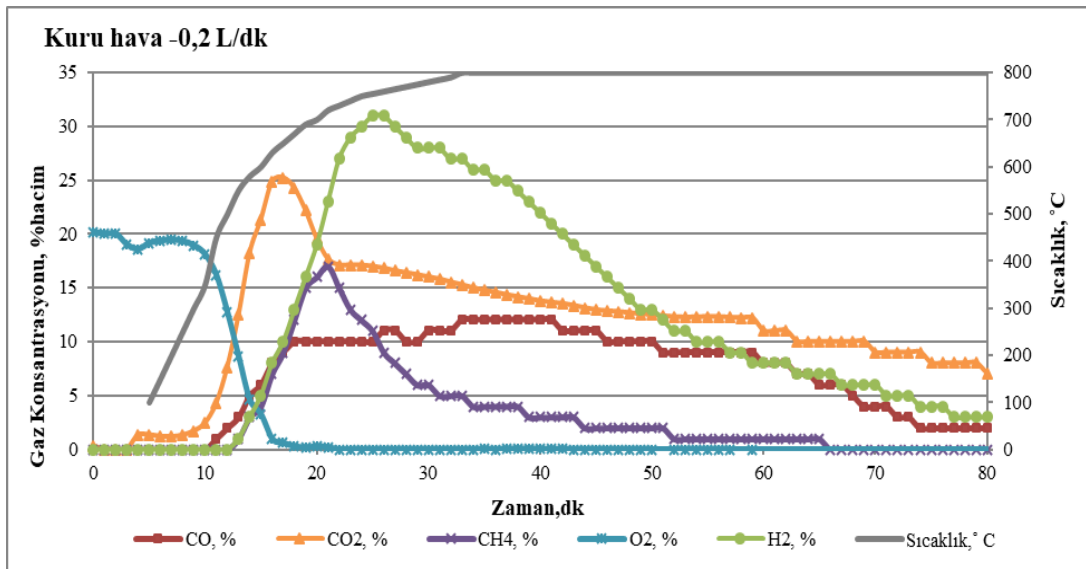
Şekil 4.15' de 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de yürütülen gazlaştırma deneyine ait sıcaklık ve zamana bağlı gaz dağılımı grafiği görülmektedir.



Şekil 4.15: 40 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.15' de, H₂ %39 ile en yüksek gaz hacmine ulaşmıştır ve bunu %20 hacimsel oranıyla CH₄ ve % 14 hacimsel oranıyla CO gazlarının izlediği belirlenmiştir. H₂' nin artış hızının CO' den daha fazla olması H₂/CO kademeli olarak artışına sebep olacaktır. Karbon gazlaştırma ve metan buharı reformasyonu endotermik reaksiyonları 20. dakikadan sonra CH₄ içeriği azalmıştır. Gaz kompozisyonunun 30-35 dakika aralığında yaklaşık % 92 seviyesine çıktığı ve 35. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.

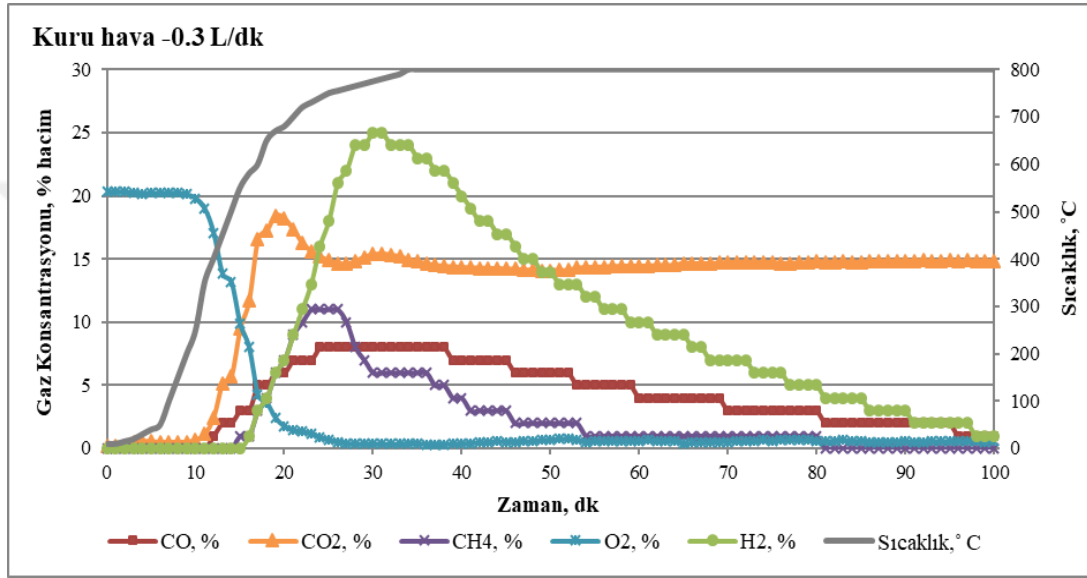
Şekil 4.16, 800 °C ve 0.2 L/dk debide kuru hava ile gazlaştırma grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.16: 40 g ATY ve 0.2 l/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de yürütülen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.16' ya göre, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda sahip gazın 20 ile 28. dakikalar arasında %32 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu %12 hacimsel oranıyla CO ve %17 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 20-28 dakika aralığında yaklaşık %61 seviyesine çıktığı ve 28. dakikadan sonra azaldığı gözlenmiştir.

Şekil 4.17' de 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de yürütülen gazlaştırma deneyine ait sıcaklık ve zamana bağlı gaz dağılımı grafiği görülmektedir.



Şekil 4.17: 40 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

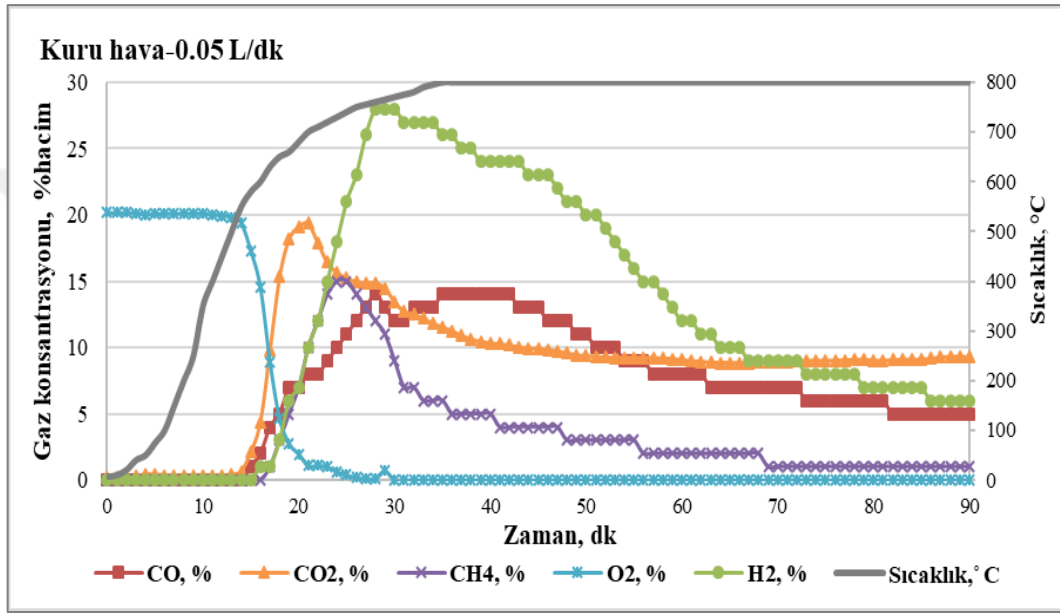
0.3 L/dk kuru hava akış debisinin sentez gaz konsantrasyon değerlerinde önemli ölçüde düşüşe neden olmuştur. H_2 konsantrasyonu en yüksek %25 değerinde görülürken, CH_4 %12 ve CO ise %8' lik maksimum değerlerde tespit edilmiştir. Önceki deneylerde olduğu gibi, kuru hava debisindeki artışın üretilen sentez gaz verimi üzerinde negatif etki oluşturduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.5: 800° C' de kuru hava ile gerçekleştirilen 40 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.

Proses	Ham madde (g)	Sıvı ürün (g)	Katı ürün (g)	Sentez gaz (g)
0.05 L/dk	40	4.35	13.97	21.68
0.1 L/dk	40	4.28	12.02	23.70
0.2 L/dk	40	4.57	11.00	24.43

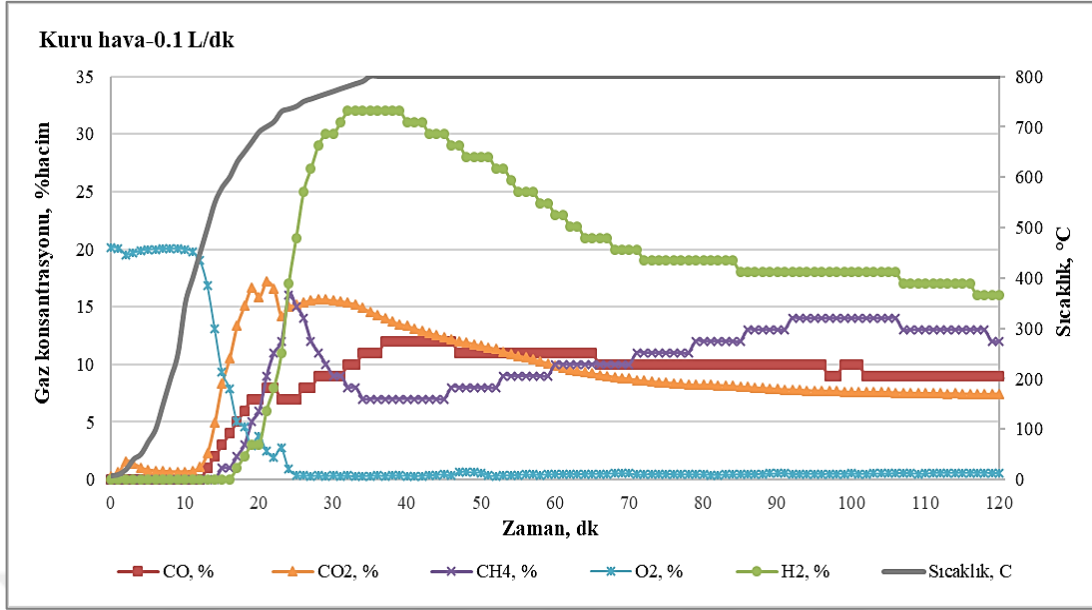
Gazlaştırma ajanın kuru hava olarak seçildiği, 800° C sıcaklıkta ve 20 g ATY kullanılarak yürütülen gazlaştırma deneylerine ait grafikler ve oluşan ürün miktarları Tablo 4.6’ da verilmiştir.

Şekil 4.18, kuru hava debisinin 0.05 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



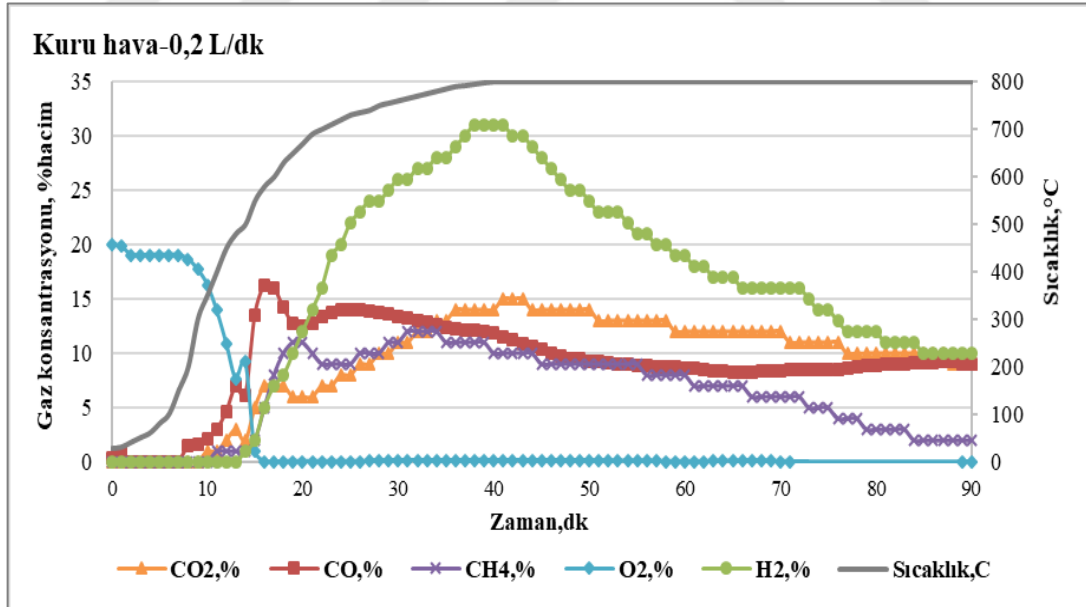
Şekil 4.18: 20 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.29, gazlaştırma ajan debisinin 0.1 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



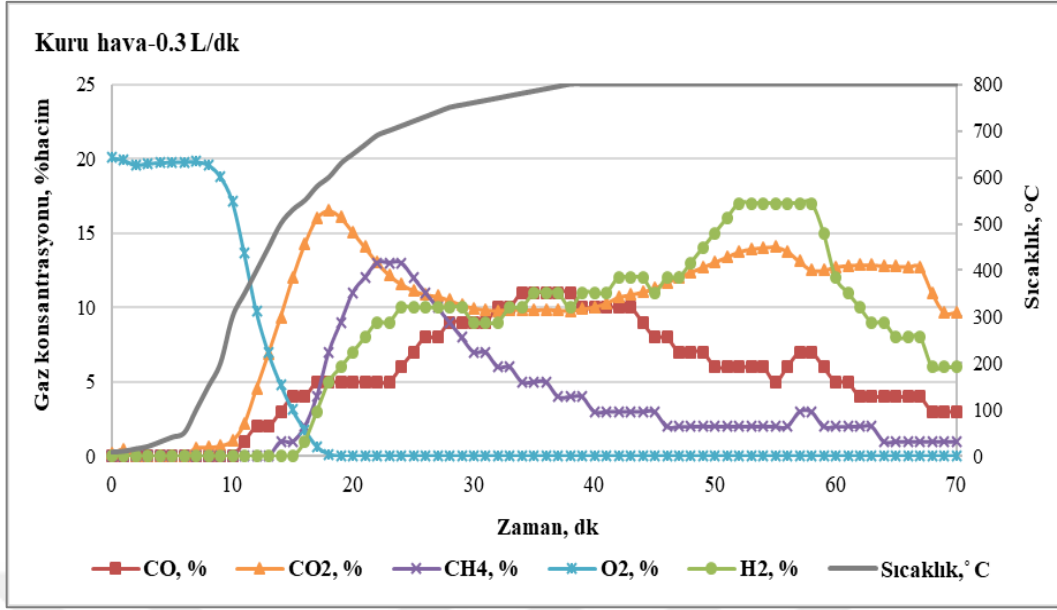
Şekil 4.19: 20 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.20, gazlaştırma ajan debisinin 0.2 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.20: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.21, gazlaştırma ajan debisinin 0.3 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.21: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 800 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

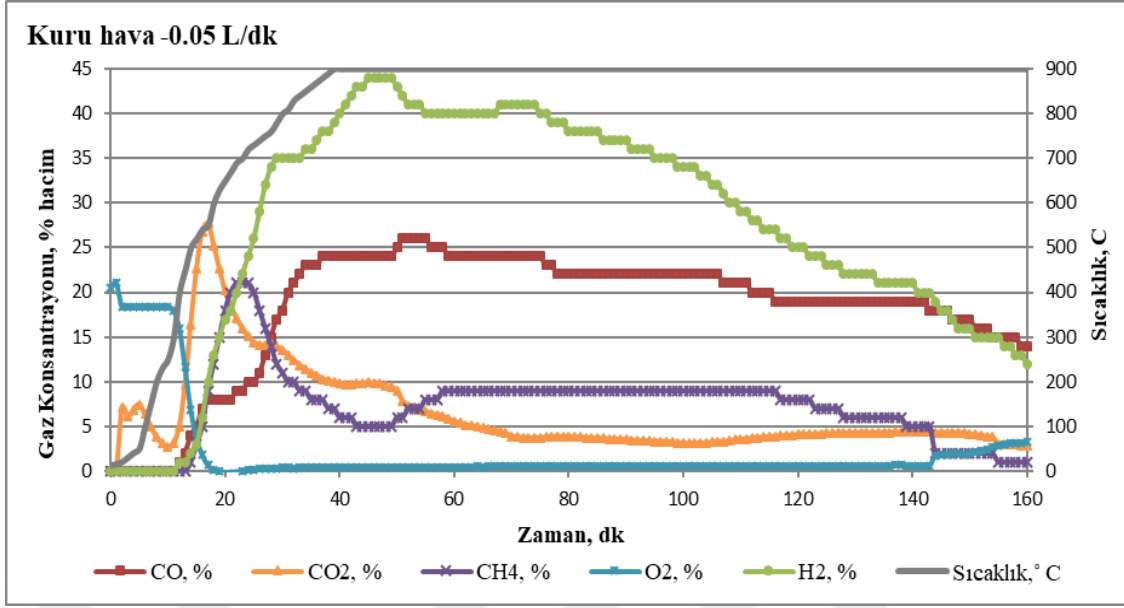
Tablo 4.6: 800° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 20 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.

Proses	Ham madde (g)	Sıvı ürün (g)	Katı ürün (g)	Sentez gaz (g)
0.05 L/dk	20	1.89	7.23	10.88
0.1 L/dk	20	1.86	7.22	10.92
0.2 L/dk	20	2.08	6.07	11.85
0.3 L/dk	20	2.36	6.84	10.86

4.2.1.3. 900 °C’ de Gerçekleştirilen Gazlaştırma Deneyleri

Gazlaştırma ajanın kuru hava olarak seçildiği, 900° C sıcaklıkta ve 40 g ATY kullanılarak yürütülen gazlaştırma deneylerine ait grafikler ve oluşan ürün miktarları Tablo 4.7’ de verilmiştir.

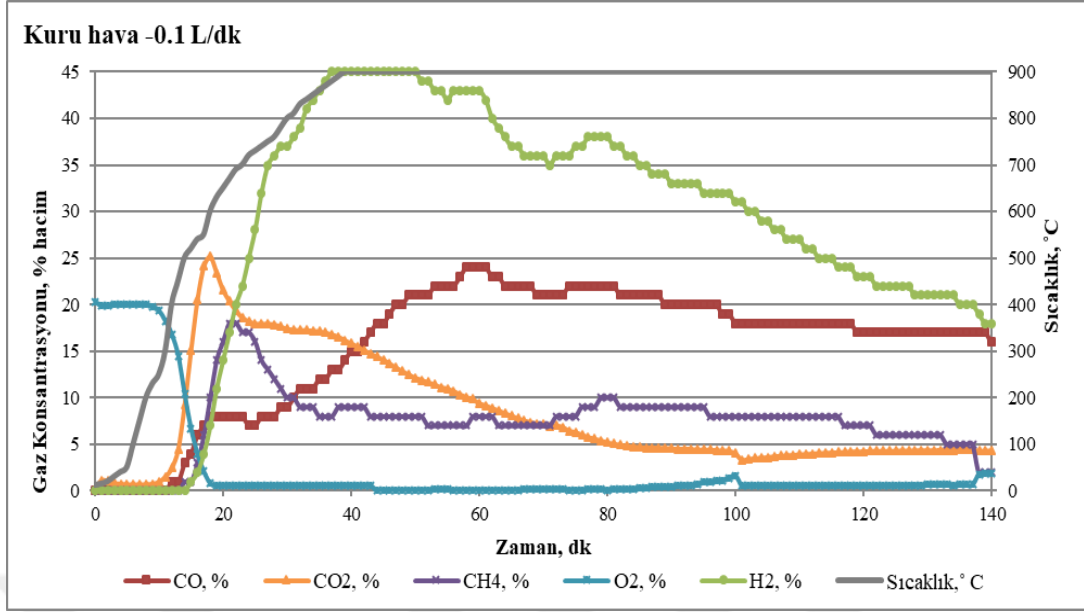
Şekil 4.22, zamana karşı çizilen gazlaştırma ajanı olarak 0.05 L/dk kuru hava kullanılarak ATY gazlaştırmasından üretilen sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.22: 40 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.22’ ye göre, 23 ile 44. dakikalar arasında sentez gaz içerisindeki H₂ konsantrasyonu %22’ den % 45’ e ve CO konsantrasyonu %20’ ye artış eğilimi gösterirken, aynı zaman aralığında CH₄ konsantrasyonu %20’ den %5’ e düşmüştür. Metan reaksiyonunun bir sonucu olarak sentez gazının hidrojen konsantrasyonu verilen aralıkta yükselmiştir. Her ikisi de endotermik süreçler olan karbon gazlaştırma ve metan buharı reformunun bir sonucu olarak CH₄ konsantrasyonu azalmıştır. Ayrıca, CO₂ seviyesi yaklaşık %20’ den %9’ a düşmüştür. Yoğunluktaki artışa rağmen, hidrojen içeriğindeki büyük artış nedeniyle CO₂ yüzdesi düşmüştür. Sıcaklık arttıkça endotermik süreçler daha aktif hale gelerek H₂ oluşumunu arttırmaktadır (Zhai ve diğ., 2017; Pieratti ve diğ., 2011). Ölçülebilir gaz kompozisyonunun 44. dakika itibarıyla %75’ lere çıktığı ve 50. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklığın, H₂ ve CO üretimine yol açan gazlaştırma reaksiyonlarını desteklediği bilinmektedir (Hervy ve diğ., 2019). Yüksek sıcaklıkta H₂ ve CO oluşumu, buhar ve kuru reformasyon reaksiyonlarının yanı sıra katran ayrışmasından da kaynaklanabilir (Qin ve diğ., 2022; Wang ve diğ., 2021).

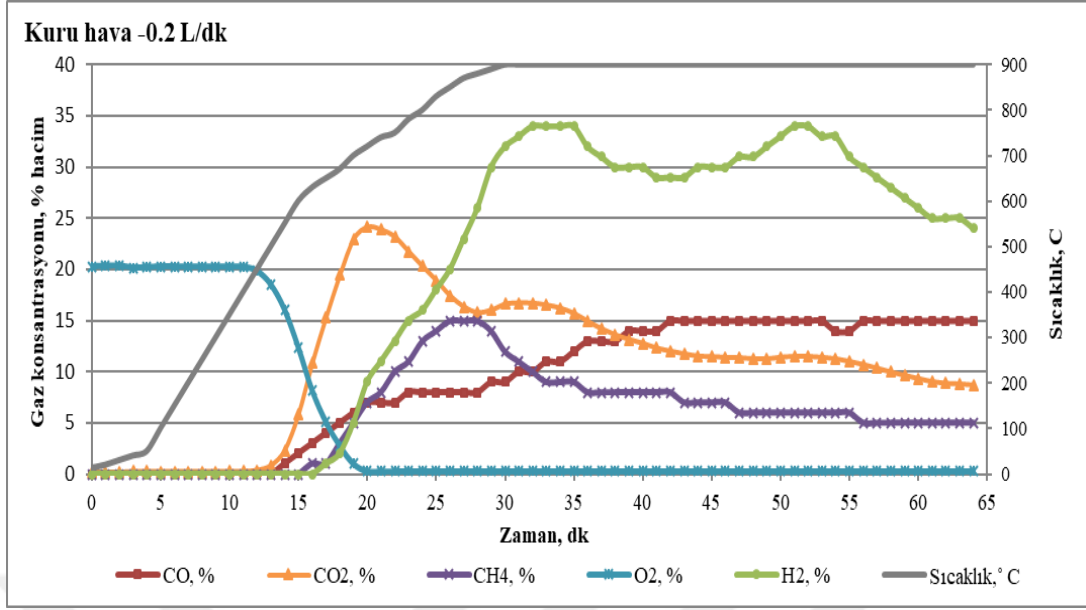
Şekil 4.23, zamana karşı çizilen 0.1 L/dk kuru hava debisinde 900 °C’ de ATY gazlaştırmasından üretilen sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



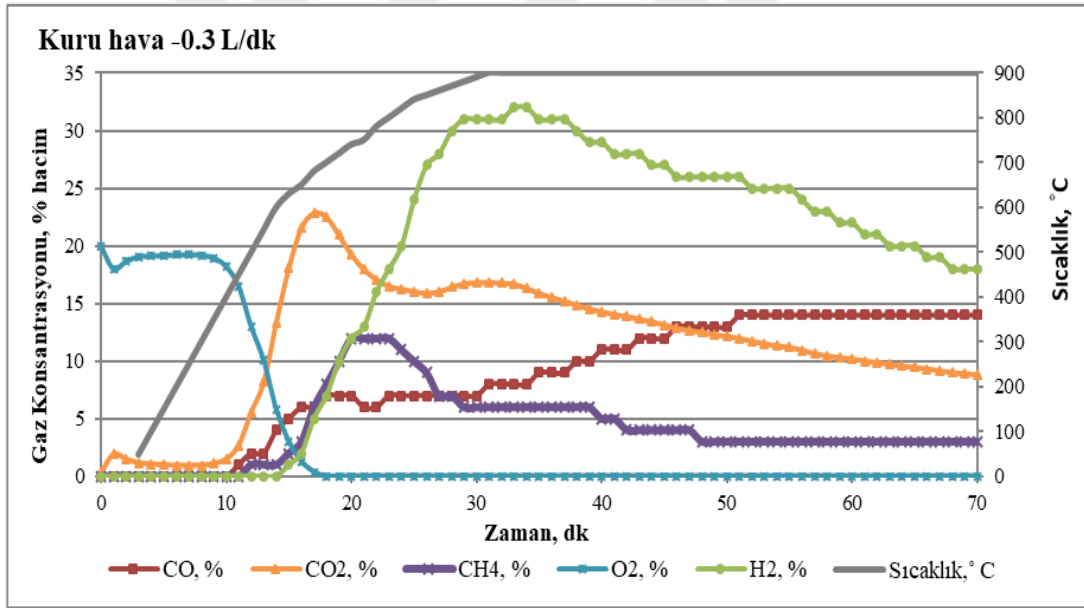
Şekil 4.23: 40 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekilde, sıcaklığın nispeten düşük olduğu durumlarda, R8 ve R10 gibi reaksiyonlar ekzotermik olduğundan, CO₂ üretme eğilimi vardır (Aydın ve diğ., 2019). CO₂ gazı 20. dakikada %26 seviyesinde, CO gazı ise 60. dakikada %24 seviyesinde pik noktaya çıkmıştır. H₂ %45 ile maksimum değerine ulaşmış olup bu pikin yaklaşık 25 dakika sürdüğü görülmektedir. H₂ ve CO içerikleri 900 °C’ de önemli ölçüde artarken CO₂ önemli ölçüde azalmaktadır. Bu durumda düşük CO₂ konsantrasyonu, Boudouard reaksiyonundaki bozunmadan etkilenmiştir (Vamvuka ve diğ., 2022).

Şekil 4.24 ve Şekil 4.25, zamana karşı çizilen gazlaştırma ajanı olarak sırasıyla 0.2 ve 0.3 L/dk kuru hava debisinde 900 °C’ de ATY gazlaştırmasından üretilen sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.24: 40 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.



Şekil 4.25: 40 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Reaktöre verilen kuru hava ajan debisindeki artış tam yanma reaksiyonlarında artışa sebep olmaktadır. Bu, gazlaştırma için istenmeyen bir durumdur. Kısmi yanma sonucu oluşan CO konsantrasyonunun düştüğü ve tam yanma reaksiyonu ile oluşan CO₂ konsantrasyonunda ise yükselme gözlenmiştir. Şekil 4.25' de CO₂ hacmi 70. dakikada %14 seviyesinde iken, düşük debi ile gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçlarında %10' un altında saptanmıştır. Ayrıca, kuru

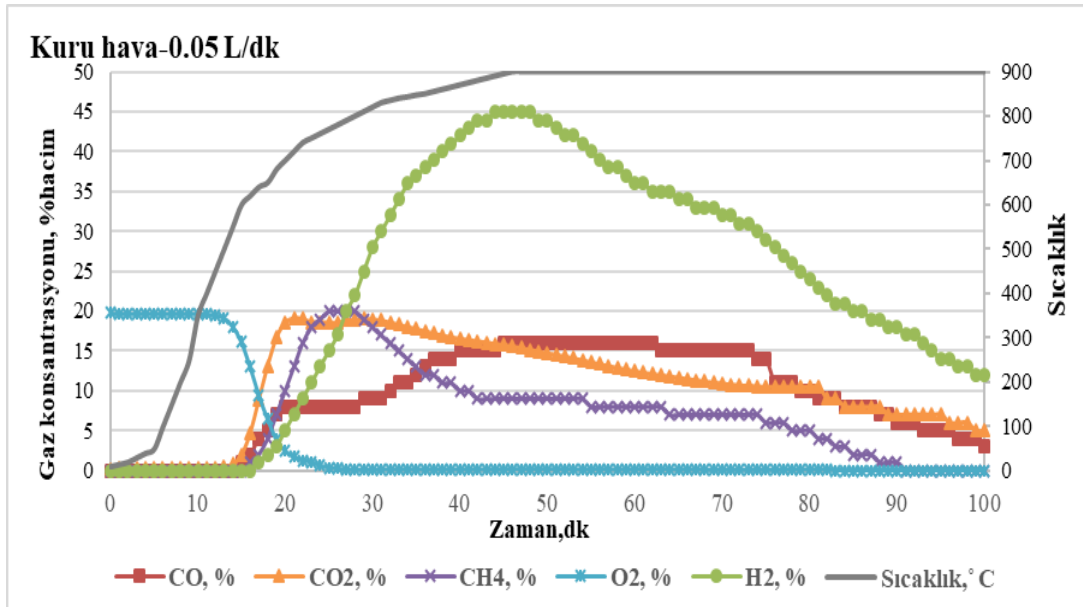
hava debi artışının indirgenme reaksiyonları ile elde edilen sentez gaz yüzdesinde azalmaya neden olduğu bilinmektedir.

Tablo 4.7: 900° C’ de kuru hava ile gerçekleştirilen 40 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.

Proses	Ham madde (g)	Sıvı ürün (g)	Katı ürün (g)	Sentez gaz (g)
0.05 L/dk	40	4.26	13.71	22.03
0.1 L/dk	40	4.21	13.35	22.44
0.2 L/dk	40	4.36	14.10	21.54
0.3 L/dk	40	4.42	13.58	22.0

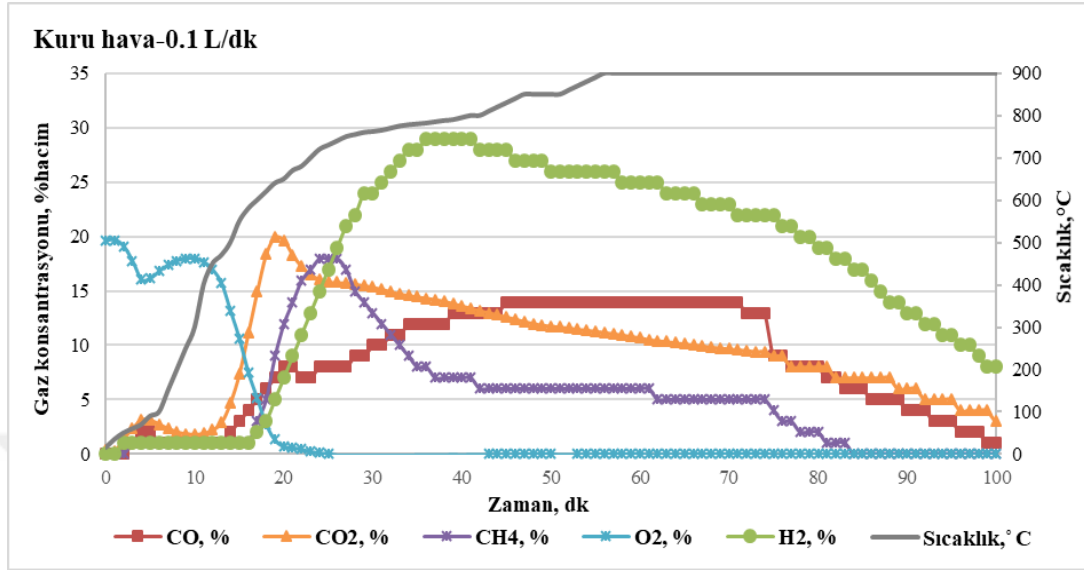
Gazlaştırma ajanının kuru hava olarak seçildiği, 900 °C sıcaklıkta ve 20 g ATY kullanılarak yürütülen gazlaştırma deneylerine ait grafikler ve oluşan ürün miktarları tablo 4.8’ de verilmiştir.

Şekil 4.26, gazlaştırma ajan debisinin 0.05 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



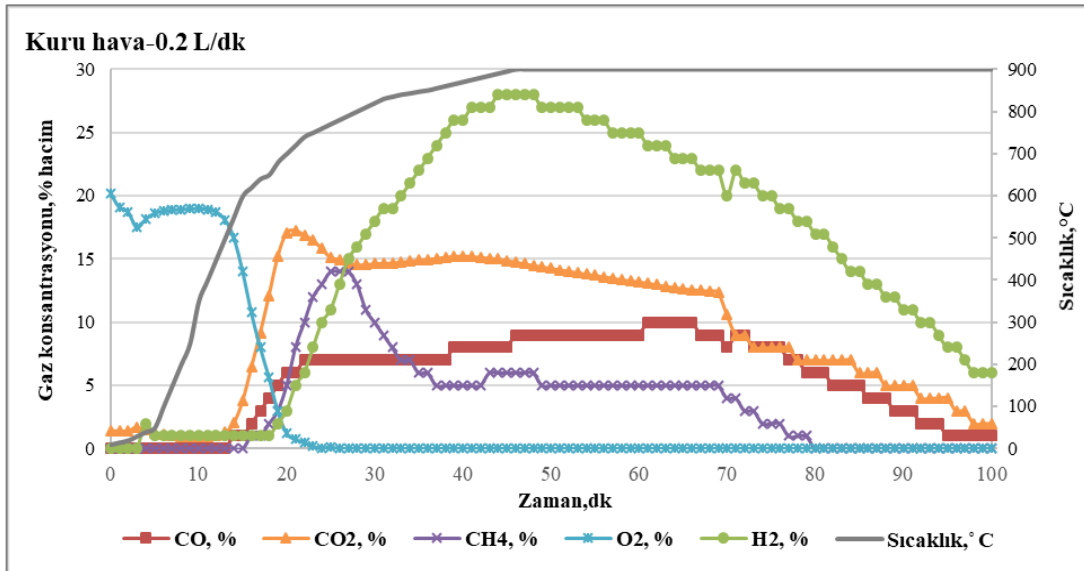
Şekil 4.26: 20 g ATY ve 0.05 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.27, gazlaştırma ajan debisinin 0.1 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



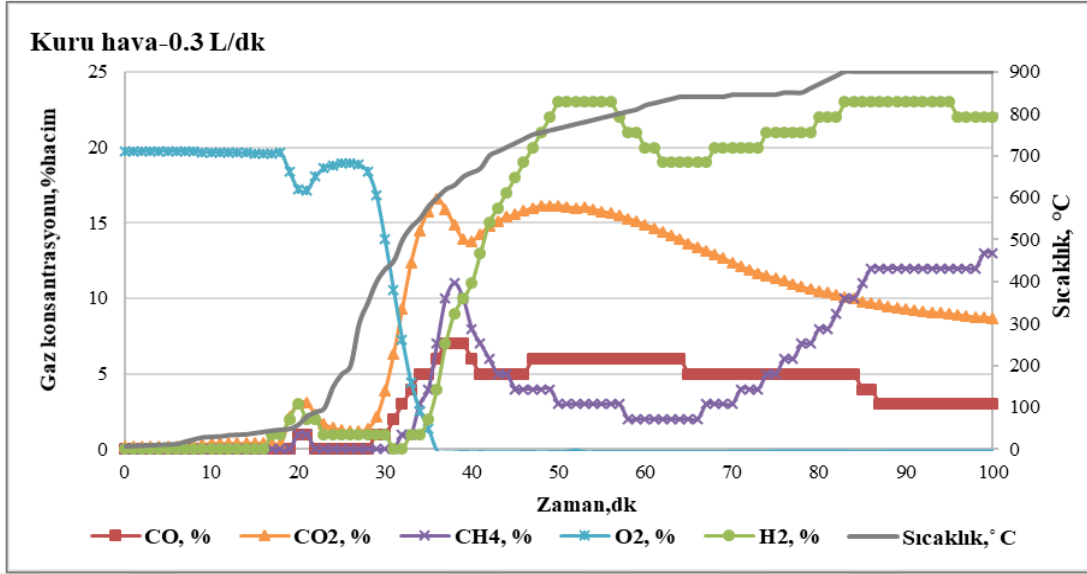
Şekil 4.27: 20 g ATY ve 0.1 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.28, gazlaştırma ajan debisinin 0.2 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.28: 20 g ATY ve 0.2 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.29, gazlaştırma ajan debisinin 0.3 L/dk olarak seçildiği, 20 g ATY ile 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gaz dağılım grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.29: 20 g ATY ve 0.3 L/dk kuru hava debisi ile 900 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

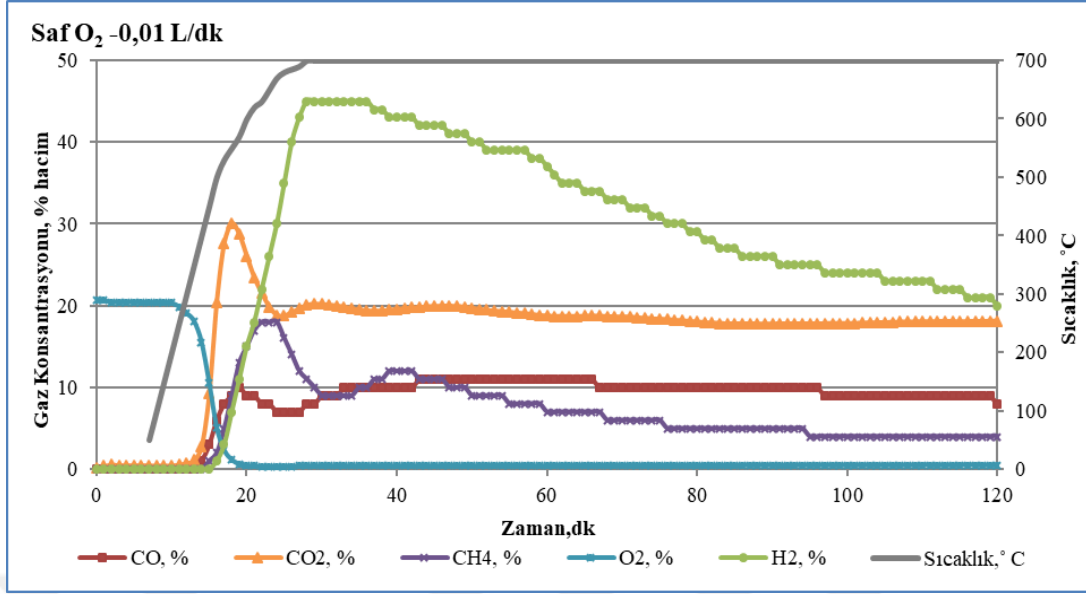
Tablo 4.8: 900° C' de kuru hava ile gerçekleştirilen 20 g ATY gazlaştırma deneylerine ait ürün miktarı.

Proses	Ham madde (g)	Sıvı ürün (g)	Katı ürün (g)	Sentez gaz (g)
0.05 L/dk	20	1.76	7.49	10.88
0.1 L/dk	20	1.70	7.26	11.04
0.2 L/dk	20	1.82	7.00	11.18
0.3 L/dk	20	1.93	6.87	11.20

4.2.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

Saf oksijen ortamlarında gazlaştırma performanslarını gösteren işlemlerine ait şekiller sunulmuştur. Oksijen oranı arttıkça sentez gazında azota rastlanma oranı azalmaktadır. Bu durum ürün gazının azot bakımından daha derişik hale gelmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda sisteme verilen oksijen oranı arttıkça CO_2 ve H_2O başta olmak üzere tam yanma ürünlerinin konsantrasyonları artmaktadır. Bu durum diğer reaksiyonları da tetiklediği için sisteme beslenen gazda oksijen oranı arttıkça tüm bileşen miktarlarında doğru orantılı olarak artması beklenmektedir.

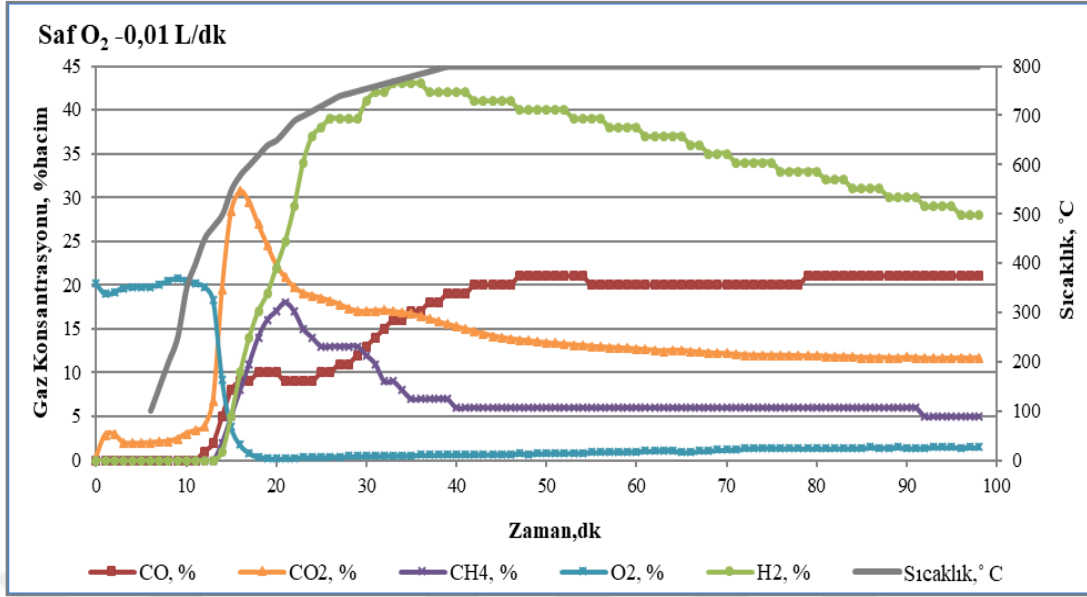
Şekil 4.30 'da, 0.01 L/dk saf oksijen ile 700 °C' de yürütülen deneyde gazlaştırma performans grafiği sunulmuştur.



Şekil 4.30: 0.01 L/dk Saf O₂ debisi ile 700 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Şekil 4.30’ a göre sentez gaz oluşumu aynı şartlar altında kuru hava ile yürütülen deneye kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Saf O₂ ajanı ile sentez gaz içerisindeki azot oranının baskısı azalmıştır. Özellikle CO₂ yüzdesinde yükselme tespit edilmiştir. 17. dakika itibari ile sentez gaz üretimi başlamıştır. H₂, CO ve CH₄ sentez gazların en yüksek değerleri sırasıyla %45, %11 ve %18 olarak saptanmıştır.

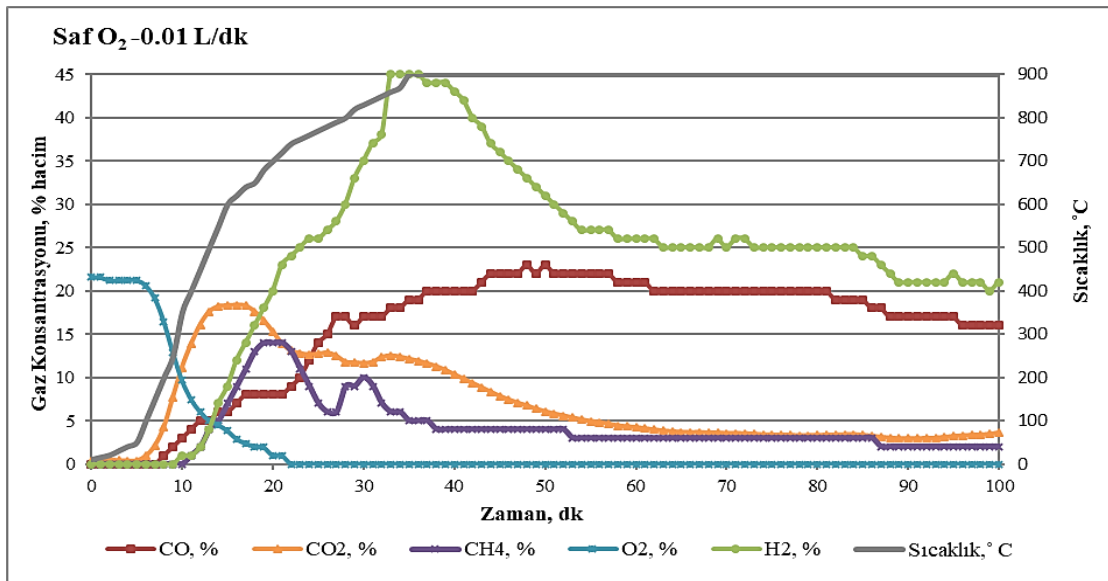
Şekil 4.31’ de, 0.01 L/dk saf oksijen ile 800 °C’ de yürütülen deneye ait gazlaştırma performans grafiği sunulmuştur



Şekil 4.31: 0.01 L/dk Saf O₂ debisi ile 800 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Hem sıcaklık artışı hemde Saf O₂ ajanı kullanımı sentez gaz konsantrasyonu artmıştır. CO₂ konsantrasyonu % 31' e kadar çıkmıştır. 17. dakika itibari ile sentez gaz üretimi başlamıştır. H₂, CO ve CH₄ sentez gazların en yüksek değerleri sırasıyla %44, %21 ve %18 olarak saptanmıştır. Sentez gaz oluşumu, aynı şartlar altında kuru hava ile yürütülen deneye göre daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

0.01 L/dk saf oksijen ile 900 °C' deki deneye ait gazlaştırma performans grafiği Şekil 4.32' de gösterilmektedir.



Şekil 4.32: 0.01 L/dk Saf O₂ debisi ile 900 °C' de gerçekleştirilen gazlaştırma sonuçları.

Yürütülen bu deneyde H₂ oluşumu 10. dakikada başlamış ve 31. dakikada maksimum seviyeye ulaşmıştır. Oluşan pik yaklaşık 7 dakika boyunca devam etmiştir. CO konsantrasyonu saf O₂ ile yürütülen deneyler arasında en yüksek değerde 900 °C sıcaklıkta görülmüştür. Sıcaklık artışının CO oluşumuna olumlu etkisi gözlenmiştir. En yüksek konsantrasyon mertebesinin CO₂ için %18, CO için %23, CH₄ için %14 ve H₂ için %45 olduğu saptanmıştır.

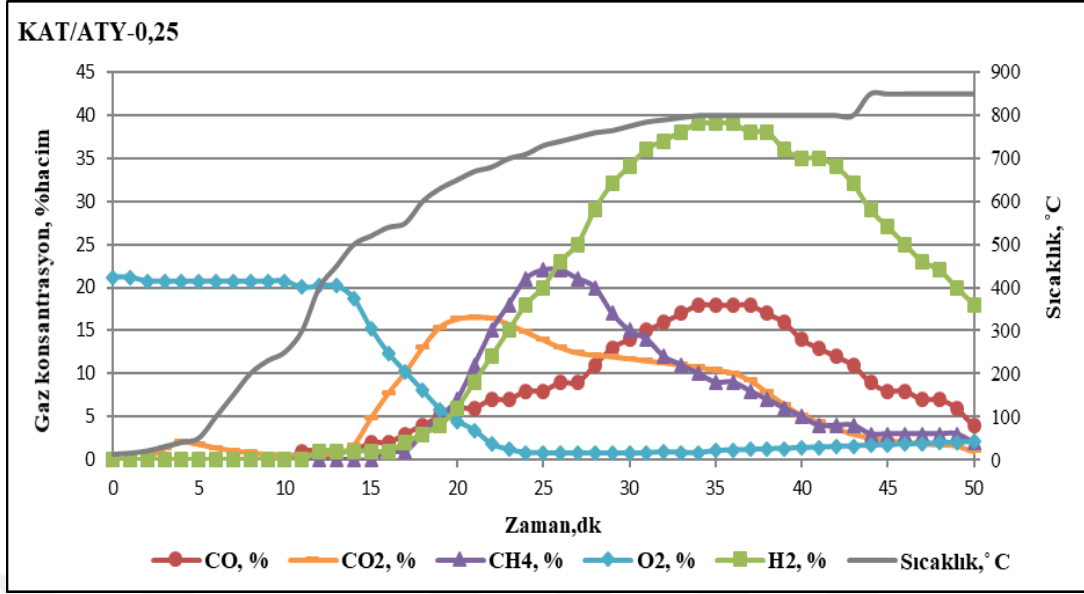
Tablo 4.9: Saf O₂ ile gerçekleştirilen gazlaştırma deneylerinin ürün miktarı.

Proses	Sıcaklık	Hammadde (g)	Sıvı ürün (g)	Katı ürün (g)	Sentez gaz (g)
0.01 L/dk	700	40	4.04	13.14	22.82
0.01 L/dk	800	40	4.02	14.30	21.68
0.01 L/dk	900	40	3.82	12.74	23.44

4.2.3. Ni-Al Katalizörü ile ATY Gazlaştırılması Sentez Gaz Analizi

Katalizör ile gazlaştırma deneylerinin operasyonel koşulları önceki deneylerdeki koşullar ve sonuçları gözönünde bulundurularak ve ATY numuneye belirlenen oranlarda Ni-Al katalizörü karıştırılarak toplam 5 deney gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma deneyleri 0.05 L/dk kuru hava debisinde 850 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Katalizörün numuneye oranı (KAT/ATY Numune) sırasıyla 0,25, 0,50, 0,75, 1,00 ve 1,25 olacak şekilde ayarlanmıştır. Katalizör, ATY numuneye eklenerek katı karışım elde edilmiştir. Ni-Al katalizör ile gazlaştırma deneylerinin gaz dağılımı sonuçları şekiller ile gösterilmiştir.

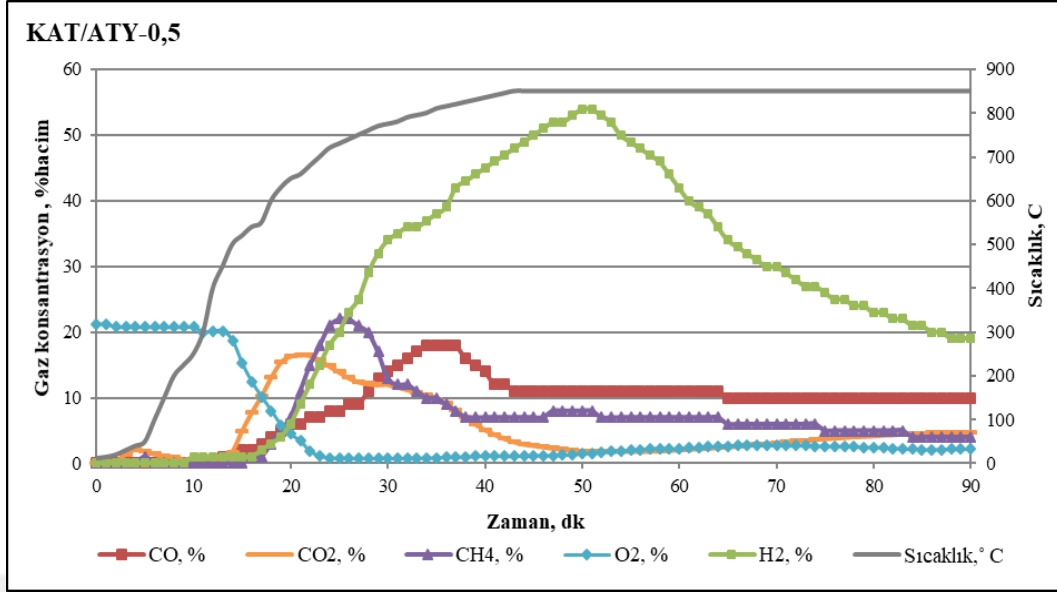
Şekil 4.33 Katalizör/ATY numune oranının 0,25 olduğu deneye ait gaz konsantrasyonlarını göstermektedir.



Şekil 4.33: Kat/ATY oranının 0,25 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.

KAT/ATY numune oranının 0,25 olduğu, 850 °C’de yapılan gazlaştırma deneyinde; 35. dakikada H₂ konsantrasyonu %40 seviyesine kadar gelmiştir. Metan üretmek için karbon monoksit ve hidrojen bir katalizör varlığında reaksiyona sokulabilir. Uygun bir katalizör kullanılması halinde metan oluşumunun daha fazla olacağı varsayılmaktadır. CH₄ 26. dakikada maksimum %23 e ulaşmıştır. CO konsantrasyonu %18 seviyesinde gözlenmiştir. CO₂'nin hacim oranı, artan sıcaklıkla kademeli olarak azalma eğilimindedir. Sıcaklık arttıkça CH₄'ün hacim oranı azalma eğilimindedir. Bunun nedeni, hidrokarbon gazı ve buhar dönüşüm reaksiyonlarının endotermik reaksiyonlar olmasıdır.

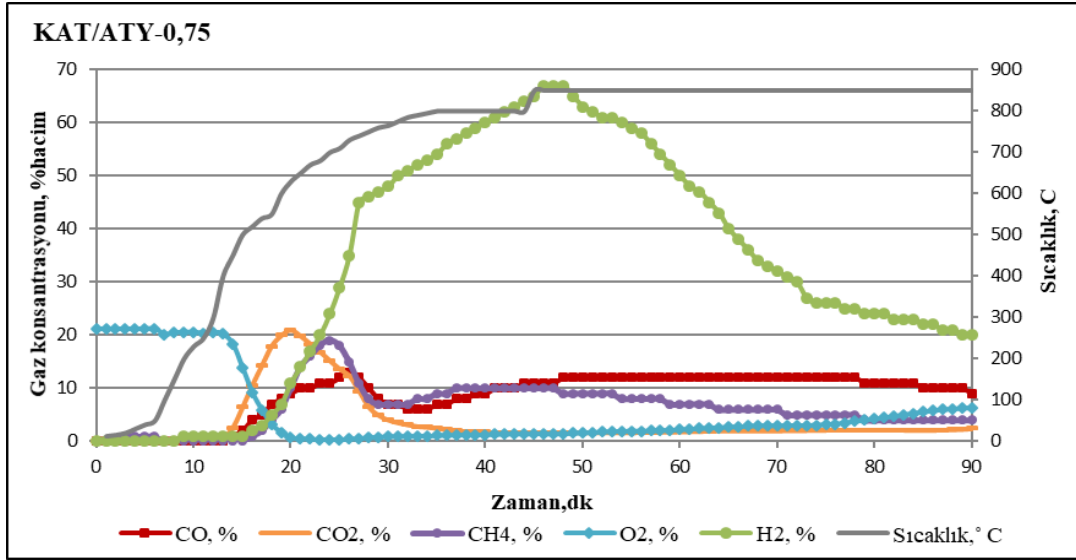
Şekil 4.34, Katalizör/ATY numune oranının 0,50 olduğu, 850 °C’ de yapılan gazlaştırma deneyine ait gaz dağılımı sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.34: Kat/ATY oranının 0,50 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.

KAT/ ATY numune oranının 0,50 olduğu, 850 C' de yapılan gazlaştırma deneyinde; sıcaklık artışı ile birlikte H₂ ve CO seviyesinde artış görülmüştür. H₂ konsantrasyonunun 50. dakikada maksimum değer olarak %54 e ulaştığı gözlenmiştir. CH₄ konsantrasyonu 26. dakikada %23'e ulaşmıştır. Bu değer KAT/ATY oranının 0.25 olduğu deney ile aynıdır. Katalizör oranının artışı ile H₂ konsantrasyonu artış gözlenmiştir. Metan ve karbonmonoksit gazlarında belirgin bir değişiklik görülmemiştir.

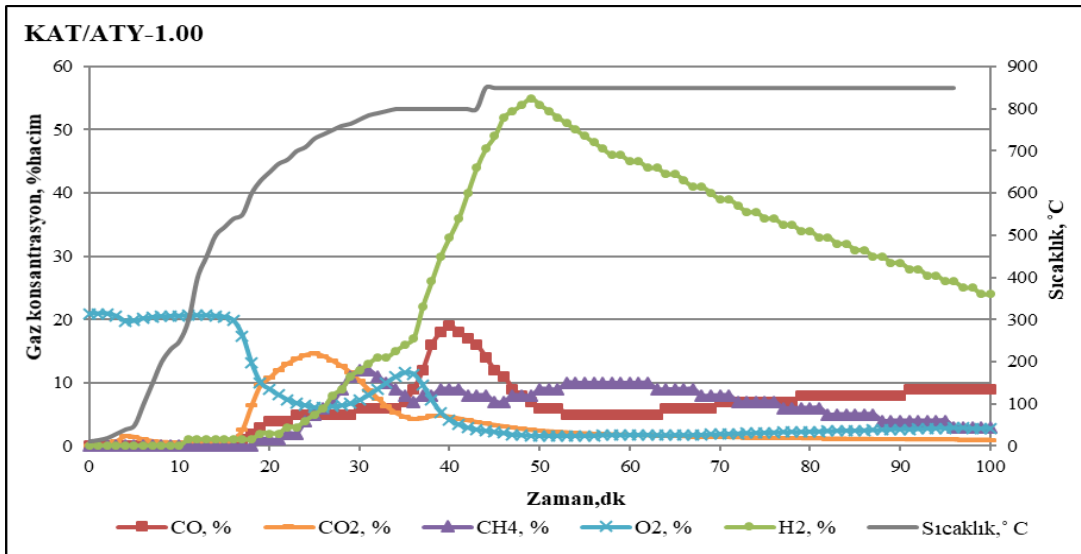
Şekil 4.35, Katalizör/ATY numune oranının 0,75 olduğu, 850 °C' de yapılan gazlaştırma deneyine ait gaz dağılımı sonuçlarını göstermektedir.



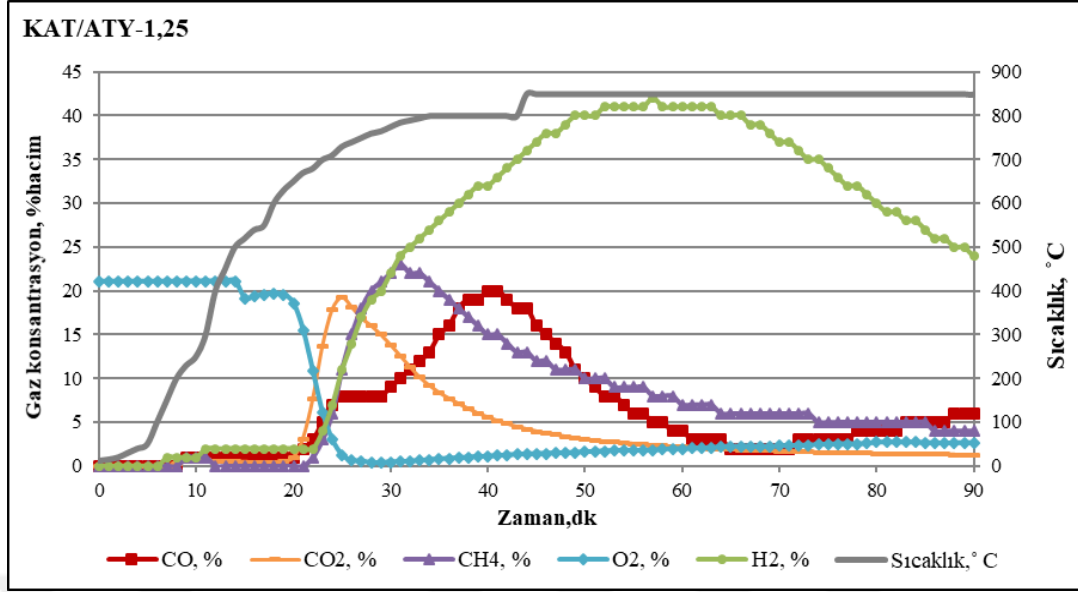
Şekil 4.35: Kat/ATY oranının 0,75 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.

Kat/ ATY numune oranının 0,75 olduğu, 850 °C' de yapılan gazlaştırma deneyine bakıldığında H₂ konsantrasyonunun maksimum % 67'ye ulaştığı gözlenmiştir. Bu değer tüm katalizör uygulanan denemeler arasında en yüksek H₂ konsantrasyonunun görüldüğü deney olmuştur. Metan konsantrasyonu 23. Dakikada %20'ye ulaşmıştır. CO konsantrasyonu ise en fazla %13'e ulaştığı görülmüştür. Kat/ATY oranının artışı ile H₂ konsantrasyonu artış gözlenmiştir. Metan ve karbonmonoksit gazlarında belirgin bir değişiklik görülmemiştir.

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 Katalizör/ATY numune oranının sırasıyla 1.00 ve 1,25 olduğu, 850 °C' de yapılan gazlaştırma deneylere ait gaz dağılımı sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4.36: Kat/ATY oranının 1,0 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.



Şekil 4.37: Kat/ATY oranının 1,25 olduğu gazlaştırma deneyine ait gaz analizi sonucu.

Şekil 4.36 'da H₂ konsantrasyonu %55' e ulaşırken KAT/ATY oranının (1.25) daha fazla olduğu Şekil 4.37' de ise % 41'e kadar yükselmiştir. CO₂'nin hacim oranı, artan sıcaklıkla kademeli olarak azalma eğilimindedir. Bunun nedeni, hidrokarbon gazı ve buhar dönüşüm reaksiyonlarının endotermik reaksiyonlar olmasıdır.

Çeşitli çalışmalarla gazlaştırmada sentez gaz H₂ içeriğine katalitik yüklemenin artırılmasının etkisi izlenmiştir. Genel olarak, katalizör oranındaki artışla ve katalizör türünden bağımsız olarak, buhar-metan reaksiyonu için reaksiyon kalma süresi (Zeng ve diğ., 2022), su gaz değişimi reaksiyonu ve katran iyileştirme reaksiyonu (Kumari ve Mohanty, 2020) artmasına ve gazlaştırmada daha yüksek H₂ oluşumuna neden olmaktadır (Valizadeh ve diğ., 2022). Ancak, katalizör/numune oranını aşırı derecede artırmak, katalizörün kok oluşumu yoluyla devre dışı bırakılması (Cao ve diğerleri, 2021b) ve gazlaştırmanın ısı ve kütle transferi sınırlamaları (Ma ve diğ., 2019) nedeniyle H₂ oluşumunda karşılık gelen artışı yavaşlatabilir. Ayrıca, CH₄' ün gelişmiş buhar reformasyonu nedeniyle daha yüksek oranda CO oluşumu, gazlaştırma ile oluşan sentez gazının H₂ içeriğini azaltmaktadır (Zeng ve diğ., 2022).

4.3. GAZLAŞTIRMA ÜRÜN ANALİZLERİ

4.3.1. Gazlaştırma Dönüşüm Oranları

Gazlaştırma deneyleri sırasında yakıt olarak kullanılan oluşan ürünlerin miktarı ve tespit edilen kütsel dönüşüm Tablo 4.10' da sunulmuştur.

Tablo 4.10: Tüm gazlaştırma deneylerinin ürün miktarları.

	Proses	Ham madde (g)	Katı ürün (g)	Sıvı ürün (g)	Sentez gaz (g)	Kütlesel Dönüşüm (%)
700 °C	0.05 L/dk	20	6.77	2.10	11.13	66
	0.05 L/dk	40	13.88	4.50	21.62	65
	0.1 L/dk	20	6.25	2.02	11.73	69
	0.1 L/dk	40	14.50	4.61	20.89	64
	0.2 L/dk	20	7,28	2.24	10.48	64
	0.2 L/dk	40	13.75	4.89	21.36	66
	0.3 L/dk	20	6.59	2.32	11.09	67
	0.3 L/dk	40	13.02	4.97	22.01	67
800 °C	0.05 L/dk	20	7.23	1.89	10.88	64
	0.05 L/dk	40	13.97	4.35	21.68	65
	0.1 L/dk	20	7.22	1.86	10.92	64
	0.1 L/dk	40	12.02	4.28	23.70	70
	0.2 L/dk	20	6,07	2.08	11.85	70
	0.2 L/dk	40	11.00	4.57	24.43	73
	0.3 L/dk	20	6,84	2.36	10.80	66
	0.3 L/dk	40	12.07	4.80	23.13	70
900 °C	0.05 L/dk	20	7.49	1.76	10.75	63
	0.05 L/dk	40	13.71	4.26	22.03	66
	0.1 L/dk	20	7.26	1.70	11.04	64
	0.1 L/dk	40	13.35	4.21	22.44	67
	0.2 L/dk	20	7.00	1.82	11.18	65
	0.2 L/dk	40	14.10	4.36	21.54	65
	0.3 L/dk	20	6.87	1.93	11.2	66
	0.3 L/dk	40	13.58	4.42	22.0	66

Tablo 4.10 (devam): Tüm gazlaştırma deneylerinin ürün miktarları.

	Proses	Ham madde (g)	Katı ürün (g)	Sıvı ürün (g)	Sentez gaz (g)	Kütlesel Dönüşüm (%)
700 °C	0.01 L/dk	40	13.14	4.04	22.82	67
	0.02 L/dk	40	14.50	4.10	21.40	64
800 °C	0.01 L/dk	40	14.30	4.02	21.68	64
	0.02 L/dk	40	13.16	3.96	22.88	67
900 °C	0.01 L/dk	40	12.74	3.82	23.44	68
	0.02 L/dk	40	TE	TE	TE	TE

Dönüşüm yüzdesi, işlem sonucu azalan katı ürünün miktarının başlangıç numune miktarına oranı ile hesaplanmaktadır. Deneyler bitiminde saptanan kütlesel dönüşüm yüzdeleri karşılaştırıldığında, kuru hava deneylerinin dönüşüm yüzdelерinin "ATY" numunesi için %63-73, saf oksijen deneylerinde ise %64-67 mertebesinde olduğu bulunmuştur. Bu değerlendirmelere göre, ATY gazlaştırma metodunun atık hacimlerinin azaltılmasında da önemli bir kazanım sağladığı görülmüştür.

4.3.2. Katı Ürönlere ait Elementel Analiz ve Isıl Değer Sonuçları

Belirlenen en iyi koşullarda gerçekleştirilen gazlaştırma prosesi ile elde edilen katı ürünlerde oluşan kimyasal değışiklikleri yorumlayabilmek için, katı ürünlerde yapılan elementel analiz ve ürünlerin sahip olduğu kalorifik değeri analizi Tablo 4.12 'de gösterilmiştir.

Tablo 4.11: Katı ürünlere ait elementel analiz ve kalorifik değerleri.

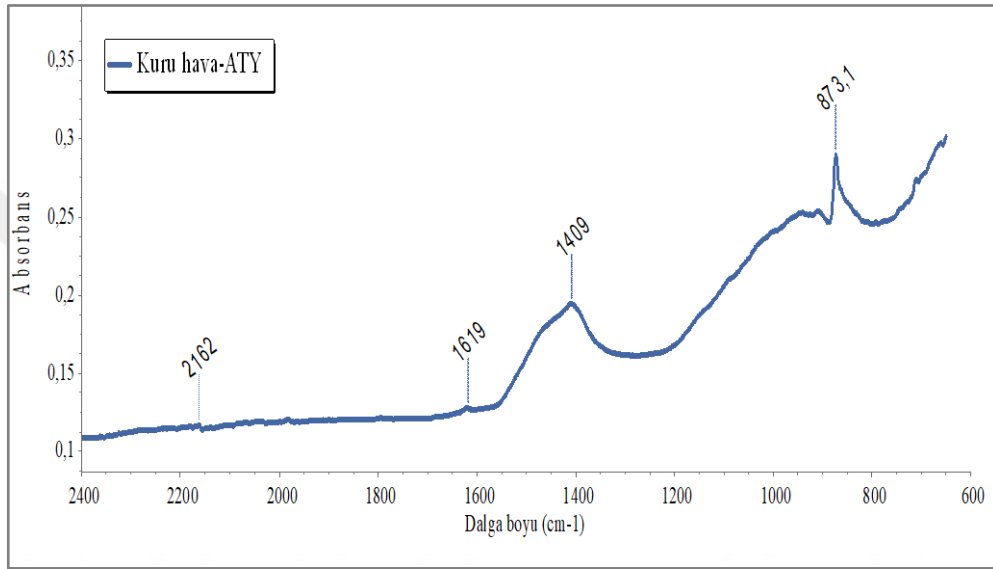
Proses			Elementel Analiz, % ağırlık				Kalorifik Değer
Debi, L/dk	Sıcaklık, °C	Miktar, g	C	H	N	S	kcal/kg
0,05	700	20	12,71	0,39	-	-	1604
0,1	700	20	11,81	0,37	-	-	1592
0,05	700	40	13,97	0,45	-	-	2463
0,1	700	40	9,06	0,22	-	-	2167
0,05	800	20	11,05	0,21	-	-	1608
0,1	800	20	13,53	0,33	-	-	2420
0,05	800	40	15,93	0,30	-	-	2322
0,1	800	40	11,65	0,33	-	-	2286
0,05	900	20	7,09	0,11	-	-	2540
0,1	900	20	4,16	0,26	-	-	2452
0,05	900	40	5,42	0,10	-	-	2167
0,1	900	40	10,12	0,33	-	-	2313
0,01-Saf O ₂	700	40	13,29	0,39	-	-	2031
0,01-Saf O ₂	800	40	17,55	0,21	-	-	2162
0,01-Saf O ₂	900	40	13,18	-	-	-	2426
0,05	850	Kat/num:0,50	8,43	0,28	-	-	1850
0,05	850	Kat/num:0,75	9,70	0,08	-	-	1900

Elementel analiz değerleri incelendiğinde ham ATY örneğinin sahip olduğu karbon içeriğinin (%58) büyük ölçüde gazlaştırılabilirdiği görülmektedir. Gazlaştırma ürünlerinin karbon içeriği %4-17 aralığında ölçülmüş olup sabit yataklı bir reaktör için oldukça yüksek oranlarda

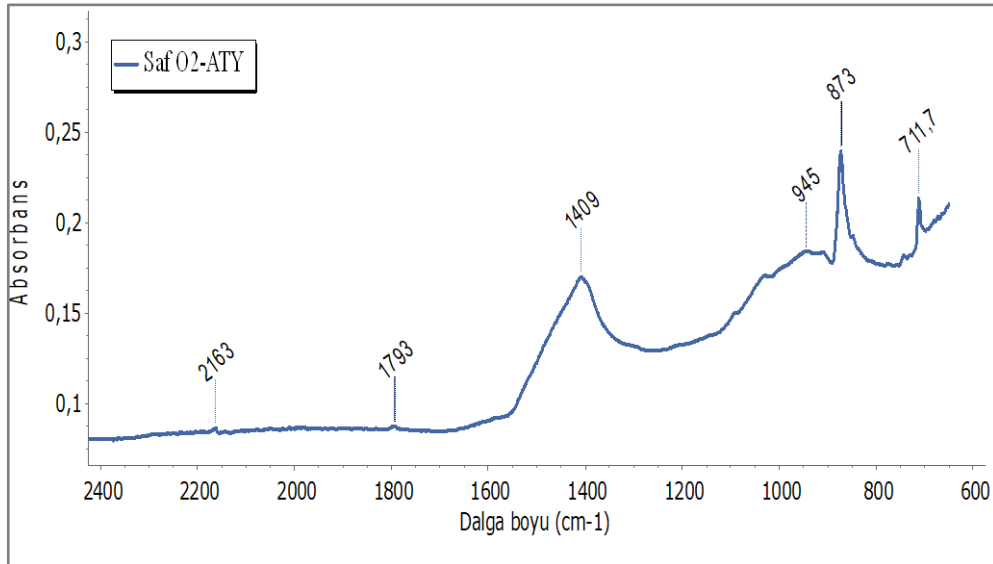
(%71-93) karbon dönüşümü tespit edilmiştir. Katı yakıtın sahip olduğu enerjinin ise (4117 kcal/kg) %39-64 aralığında sentez gaz bünyesine aktarıldığı gözlenmiştir.

4.3.3. Katı Ürünlere Ait FTIR Analiz Sonuçları

ATY' nin kuru hava ajanı ile gazlaştırılması sonrası oluşan katı ürüne ait FTIR analiz spektrumları Şekil 4.38' de, saf O₂ ajanı ile gazlaştırılması sonrası oluşan katı ürüne ait FTIR analiz spektrumları Şekil 4.39' da gösterilmiştir.



Şekil 4.38: Kuru hava ajanı ile gazlaştırma sonrası ürüne ait FTIR analizi.



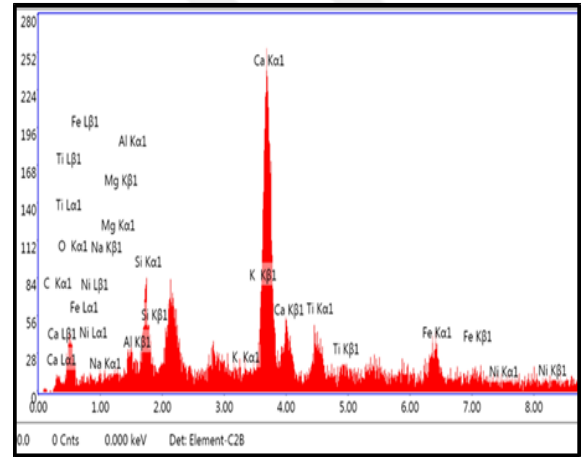
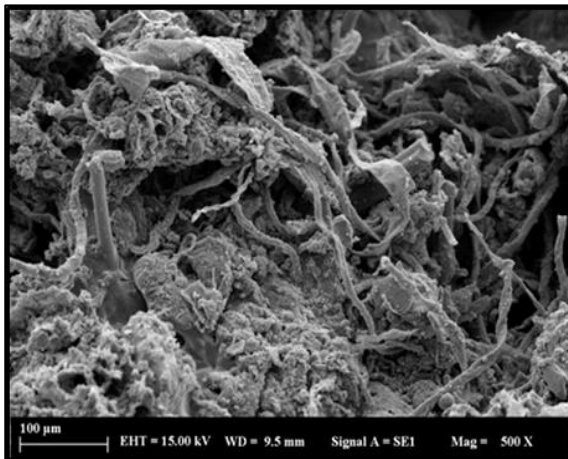
Şekil 4.39: Saf O₂ ajanı ile gazlaştırma sonrası ürüne ait FTIR analizi.

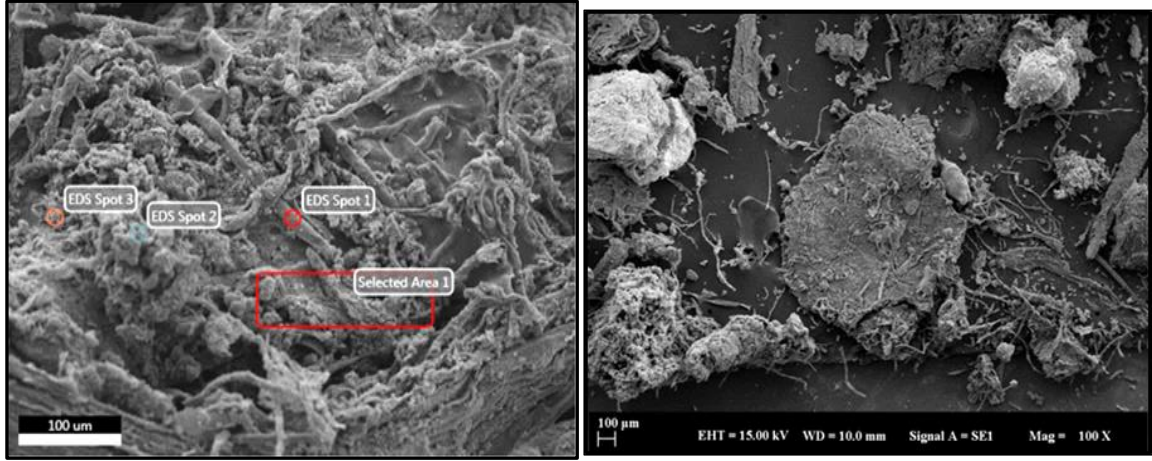
Şekil 4.38 ve 4.39; farklı ajan türleri ile 900 °C’ de gerçekleştirilen gazlaştırma sonrası ürünlere ait FTIR analizini göstermektedir. İki katı örneğinin yüzey kimyası, kızılötesi spektroskopisi ile incelenmiştir. 2200 ve 900 cm^{-1} arasındaki örtüşen bantlar daha az yapılandırılmış hale gelmiştir ve birçok mineralde bulunan CaCO_3 ise karakteristik 873 cm^{-1} merkezli bir tepe noktası baskın hale gelmiştir (Yin ve diğ., 2019). Katı kalıntıları 4000 ve 2400 cm^{-1} arasında düz bir çizgi gösterir ve bu da gazlaştırma sırasında organik bileşenlerin tamamen ayrıştığını gösterir. Bu da, ürünlere ait elementel analizden (Tablo 4.11) elde edilen sonuçlarla tutarlıdır.

4.3.4. SEM-EDS Sonuçları

Yapılan gazlaştırma deneylerinden elde edilen katı ürün kalıntılarının SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılmıştır.

Şekil 4.40, kuru hava ile en uygun şartlarda gerçekleştirilen atıktan türetilmiş yakıtın gazlaştırılmasıyla oluşan katı ürünün farklı büyütme oranlarında SEM görüntülerini göstermektedir.





Şekil 4.40: Kuru hava ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürüne ait SEM-EDS sonuçları (0.05 L/dk, 900 °C)

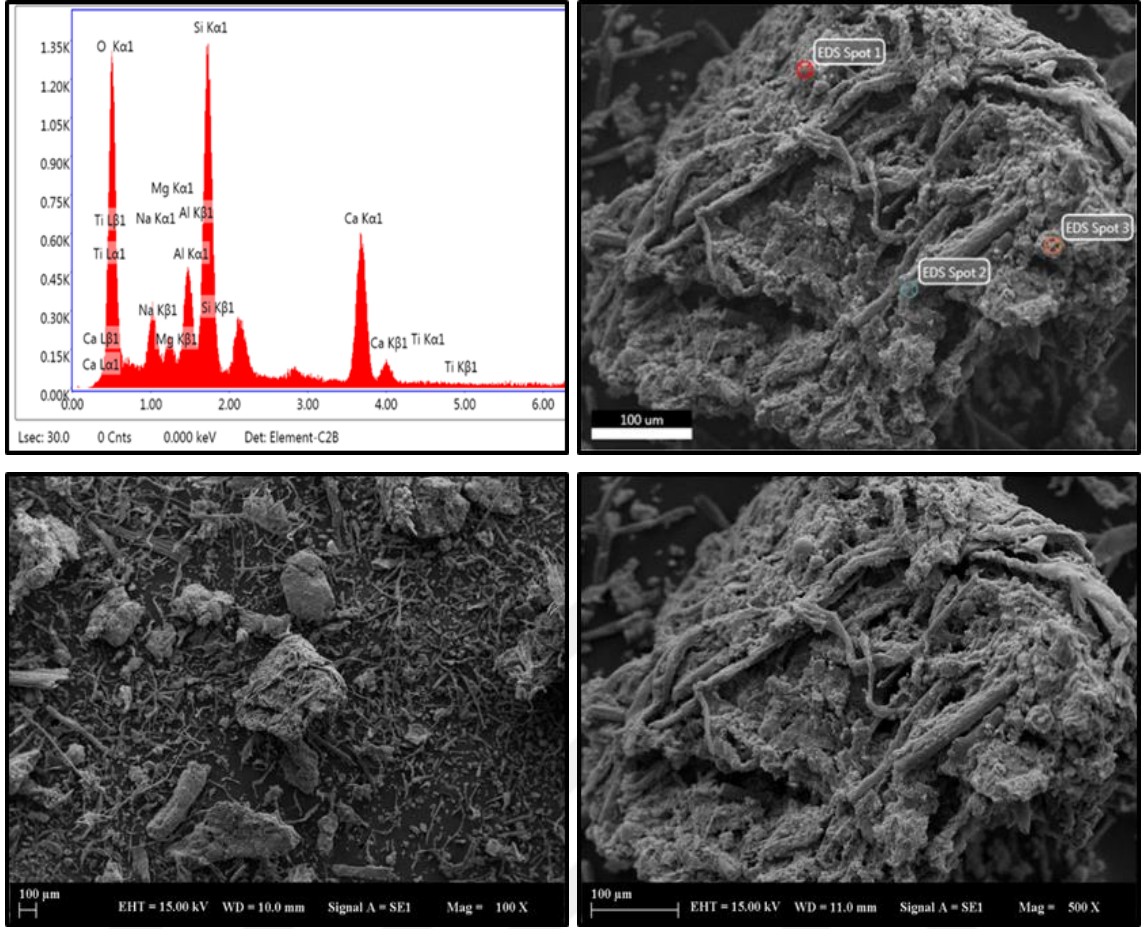
Tablo 4.12 ise kuru hava ile gazlaştırma sonrası ürüne ait EDS analiz sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4.12: Kuru hava ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürün EDS sonuçları.

Element	Ağırlık, %
O	5.34
Ca	74.63
Ti	5.40
Fe	14.46

Katı ürünlerin seçilen lokasyonlarındaki elementel kompozisyonları, EDS nokta analizleri ile belirlenmiştir. EDS analizlerinin kesin noktaların belirlenmesi için, seçilen konumlar, Şekil 4.40’ da sunulan SEM görüntülerinde sayılarla işaretlenmiştir. Tablo 4.12’ de yüzeydeki baskın elementler O, Ca ve Fe olarak görülmüştür. Birinci ana element, çoğunlukla kümeler halinde bulunan kalsiyumdur (Ca). Ca %74.63 olarak tespit edilmiş ve bu kümelerin diğer yapılar üzerinde çıkıntı yapan kalsiyum karbonatlar olması muhtemeldir (Karimi ve diğ., 2014). SEM görüntülerinde, polimerlerin pürüzsüz veya aşırı derecede hasar görmüş veya kopmuş lifleri ile plastik ve tekstil işlemlerinde kullanılan katkı maddelerinin işaretleri görülebilir.

Şekil 4.41, saf O₂ ile gerçekleştirilen atıktan türetilmiş yakıtın gazlaştırılmasıyla oluşan katı ürünün farklılık büyütme oranlarında SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 4.41: Saf O₂ ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürüne ait SEM-EDS sonuçları (0.05 L/dk, 900°C).

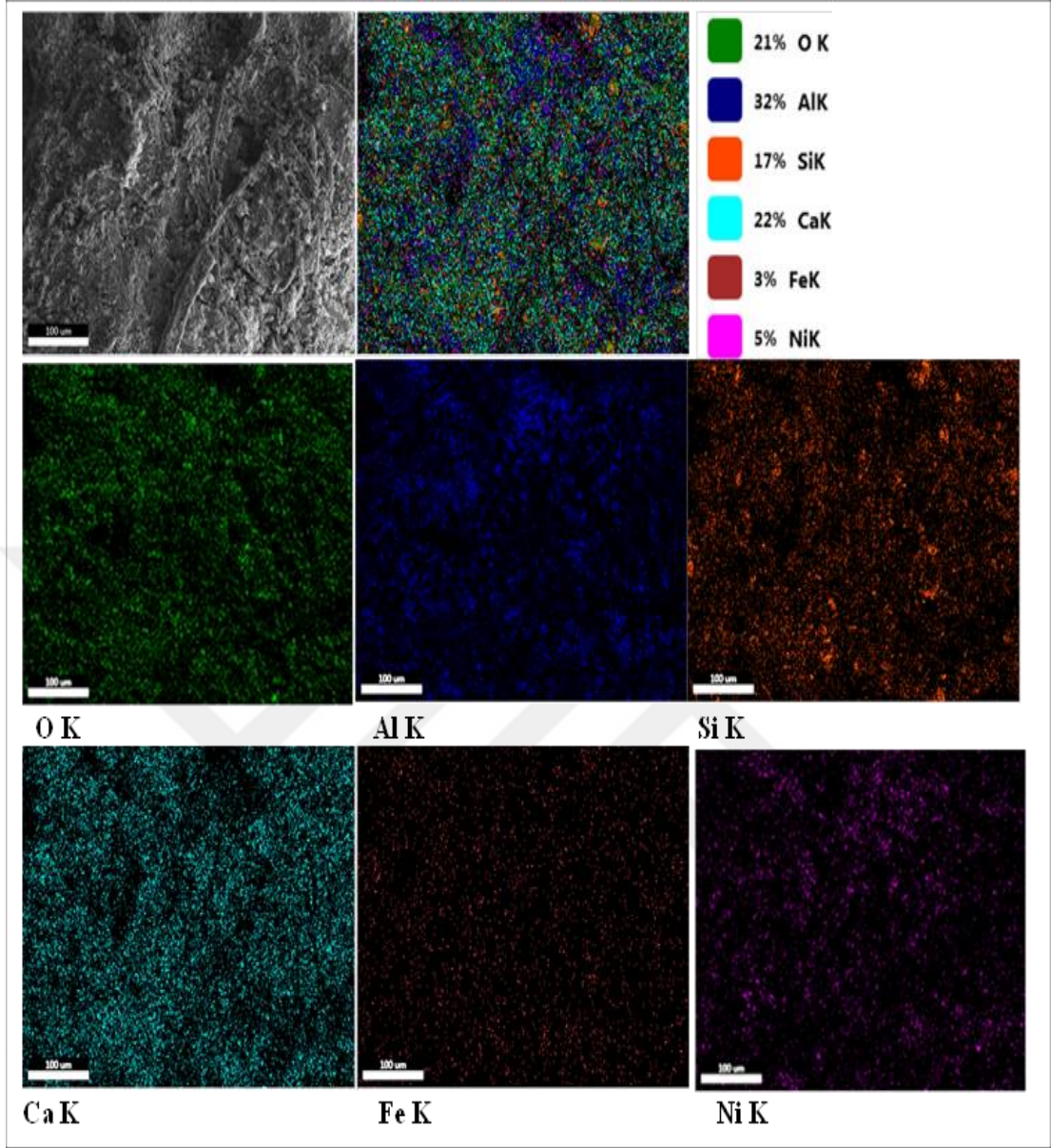
Tablo 4.13’ de saf O₂ ile gazlaştırma sonrası ürüne ait EDS analiz sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 4.13: Saf O₂ ile yapılan gazlaştırma sonrası katı ürün EDS sonuçları.

Element	Ağırlık, %
O	41.62
Na	6.49
Mg	2.41
Al	6.90
Si	20.01
Ca	22.34

Tablo 4.13’ de (Spot 2) O, Ca ve Si baskın olarak bulunurken daha az miktarda Na, Mg, Al bulunmuştur. Genel bir gözlem olarak, Al ve Ca çoğunlukla katı üründe kümeler halinde bulunurken, bu tür kümelerde bol miktarda oksijen (O) bulunması, onların güçlü asitliğini göstermektedir (You, 2010). Tespit edilen safsızlıklar, polimerlerin imalatında kullanılan elementlerle ilişkilidir. Kalsiyum en çok polimer formülasyonlarında dolgu maddesi ve pigment malzemesi olarak kullanılmaktadır (Smolinski ve diğ., 2022). Genel olarak, oluşan katı bileşenlerinin yüzeyinin gelişme derecesi çeşitlidir; bu, termal dönüşüme tabi tutulan malzemenin çeşitliliği ve analiz edilen numunenin ayrı ayrı bileşenlerinin farklı kimyasal bileşimleri ile açıklanabilir.

Nikel-Alüminyum bazlı katalizör malzeme yüzeylerinin SEM görüntüleri ve elementel haritalaması şekillerde sunulmuştur. Şekil 4.42 katalizör/ATY numune oranı 0,50 olan gazlaştırma sonrası katı ürünün SEM görüntüleri ve EDS haritalaması verilmiştir.



Şekil 4.42: Ni/Al katalizör ile gazlaştırma sonrası ürünün SEM görüntüsü, SEM-EDS haritalaması (Katalizör/Numune oranı: 0,50, 850° C ve 0.05 L/ dk kuru hava).

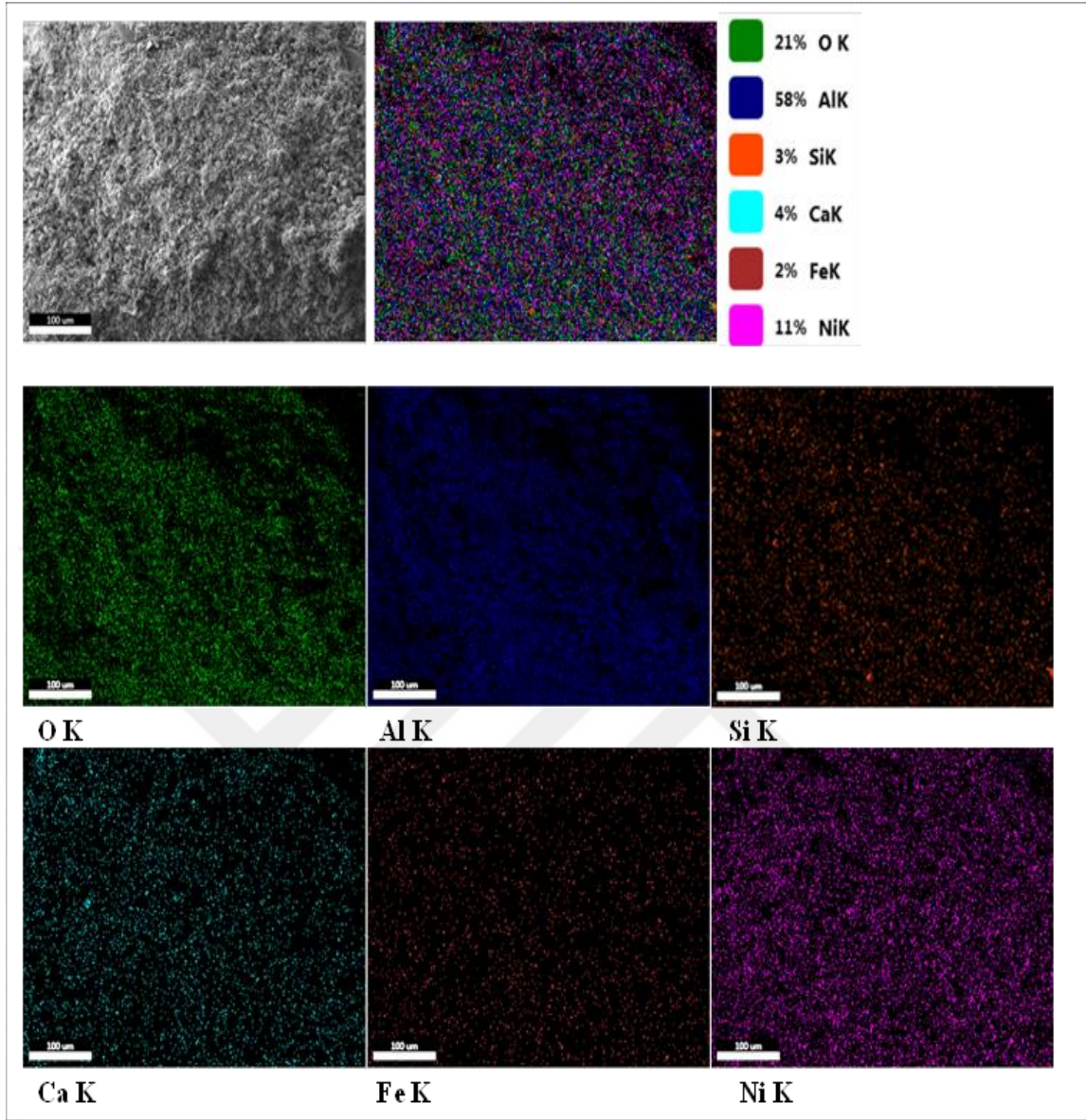
Tablo 4.14: Katalitik gazlaştırma sonrası ürünün elementel fraksiyonu.

Element	Ağırlık, %
O	29.13
Al	22.88
Si	8.71
Ca	22.46
Fe	1.55
Ni	15.27

Şekil 4.42, 100 büyütme faktörü ile Ni- Al katalizör ilavesiyle ATY gazlaştırma (Katalizör/ATY: 0,50, 850° C ve 0.05 L/ dk kuru hava) sonrası katı ürünün EDS haritalamasını göstermektedir. SEM görüntüsüne göre, karbon desteğin yüzeyinin gözenekli olduğu ve gözenegin iyi geliştiği, aktif bileşen Ni ve Al ‘ un ise karbon desteğin üzerine iyi bir şekilde adsorbe edildiği veya kaplandığı fark edilmiştir. Al, Ca, Ni, Si ve O elementlerinin baskın olarak varlığını görülmektedir. Tablo 4.14’ e göre Ni, O, Si, Ca ve Al' nin kütle fraksiyonları sırasıyla ağırlıkça %15.27, 29.13, 8.71, 22.46, 22.88 olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.43, 100 büyütme faktörü ile Ni-Al katalizör ilavesiyle ATY gazlaştırma (Katalizör/ATY: 0,75, 850° C ve 0.05 L/ dk kuru hava) sonrası katı ürünün elementel haritalamasını göstermektedir.





Şekil 4.43: Ni/Al katalizör ile gazlaştırma sonrası ürünün SEM görüntüsü, SEM-EDS haritalaması (Katalizör/Numune oranı: 0,75, 850° C ve 0.05 L/ dk kuru hava)

Tablo 4.15: Katalitik gazlaştırma sonrası ürünün elementel fraksiyonu.

Element	Ağırlık, %
O	16.18
Al	42.00
Ca	1.55
Fe	1.56
Ni	38.24

Tablo 4.15' e göre Ni, O, Ca, Al ve Fe'nin kütlece fraksiyonları sırasıyla ağırlıkça %38.24, 16.18, 1.55, 42.00 ve 1.57 'dir. Alüminyum (Al), en yaygın tespit edilen elementtir ve

genellikle kompakt ve düzgün parçalardan oluşan Ca ve C yapılarından ayrılır. Al, alüminyum içeriğinin önemsiz olduğu kalsiyum yapıları (kalsiyum karbonatlar) dışında her yerde bulunur ve tüm minerallere yayılır. Genel bir gözlem olarak, C, Al ve Ca çoğunlukla char içinde kümeler olarak bulunurken, Oksijen (O) bu tür kümelerde bol miktarda mevcuttur ve bu da onların güçlü asitliklerini göstermektedir (You, 2010).

Ayrıca, elementlerin ATY partikülünün yüzeyinde homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.42 ile karşılaştırıldığında, artan katalizör oranıyla birlikte Al bulunurluğu %22.88'den %42'ye yükselmiştir. Ni ise %15'den %38'e çıkmıştır. Katalizörün karakterize edilmesi için yapılan SEM ve SEM-EDS haritalama analizleri incelendiğinde katalizörün yüzey yapısı ve yüzeyde yer alan bileşenlerin dağılımları görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre O, Ni ve Al yüzeyde beklenildiği üzere büyük bir alan kaplamaktadır.

4.3.5. Soğuk Gaz Verimliliği (SGV) Sonuçları

Gazlaştırma deneyleri sonrasında elde edilen gaz hacmi, gaz ısı değeri ve yakıt ısı değeri hesaplanarak soğuk gaz verimliliği sonuçları Tablo 4.16' da verilmiştir. Gaz ısı değeri hesaplanmasında literatürde belirtilen şekilde oluşan sentez gazın alt ısı değeri kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

Tablo 4.16: Soğuk Gaz Verimliliği (SGV).

	Proses	Gaz hacmi (m ³ /kg)	Gaz Isıl değeri (kcal/m ³)	Yakıt Isıl Değeri (kcal/kg)	SGV (%)
700 °C	0.05 L/dk	0.48	2015	4117	23
	0.1 L/dk	0.45	2011	4117	22
	0.2 L/dk	0.34	1981	4117	16
	0.3 L/dk	0.30	1599	4117	12
800 °C	0.05 L/dk	0.58	2426	4117	34
	0.1 L/dk	0.50	2645	4117	32
	0.2 L/dk	0.32	2349	4117	18
	0.3 L/dk	0.30	1724	4117	13

Tablo 4.16 (devam): Soğuk Gaz Verimliliği (SGV).

900°C	0.05 L/dk	0.65	2542	4117	42
	0.1 L/dk	0.64	2310	4117	36
	0.2 L/dk	0.32	2242	4117	25
	0.3 L/dk	0.26	1702	4117	16
700°C	0.01 L/dk	0.58	2525	4117	36
800°C	0.01 L/dk	0.60	2474	4117	36
900°C	0.01 L/dk	0.68	2269	4117	37
*(Vamvuka vd., 2022)		-	2293	7165	30

Tablo 4.16' ya göre, sıcaklığın artışı gazlaştırma verimi üzerinde olumlu bir etki göstermiştir. 700 °C' de en yüksek SGV %23, 800 °C' de %34 ve 900 °C' de ise %36 olarak tespit edilmiştir.

4.4. GAZLAŞTIRMA VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.4.1. Korelasyon Analizi

Gazlaştırmada sıcaklık ile sentez gaz konsantrasyonu arasındaki ilişki Tablo 4.17' de gösterilmiştir. Tablo 4.18, sıcaklık, ajan debisi ve ısı değeri arasındaki korelasyonu göstermektedir.

Tablo 4.17: Sıcaklık ve gazlar arasındaki korelasyon.

Parametre		Sıcaklık	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂
Sıcaklık	Pearson	1	,729**	,800**	,449**	,612**
CO	Pearson	,729**	1	,829**	,700**	,740**
CO ₂	Pearson	,800**	,829**	1	,654**	,696**
CH ₄	Pearson	,449**	,700**	,654**	1	,582**
H ₂	Pearson	,612**	,740**	,696**	,582**	1

** . Korelasyon 0.01 seviyesinde anlamlıdır (2-tailed).

Sıcaklığın, gaz bileşenlerinin arasındaki korelasyonun pozitif değerde olması, aralarındaki doğru yönlü ilişkiyi doğrulanmıştır. Bu da, gazlaştırma için em önemli operasyonel

parametrelerden olan sıcaklığın, üretilen sentez gaz konsantrasyonu üzerindeki etkisini tekrar göstermektedir.

Tablo 4.18: Sıcaklık, ajan debisi ve ısı değer arasındaki korelasyon.

Parametre		Ajan debisi, L/dk	Sıcaklık, °C	Isıl değer (UID), kcal/m ³
Ajan debisi	Pearson	1	-,126**	,080**
Sıcaklık	Pearson	-,126**	1	,574**
Isıl değer (UID)	Pearson	,080**	,574**	1

** . Korelasyon 0.01 seviyesinde anlamlıdır.

Tablo 4.18’ de yer alan ısı değer ile iki önemli işletim parametresi olan ajan debisi ve sıcaklık arasında korelasyonun önceki deney sonuçlarına göre beklendiği gibi doğru yönlü bir ilişki olduğu görülmektedir.

4.4.2. Regresyon Analizi

Bağımlı değişken olarak seçilen ısı değerinin ile bağımsız değişken olarak seçilen sentez gaz bileşenlerinin (CO, CH₄ ve H₂) arasında regresyon analizi yapılmıştır. Model özeti ve regresyon analiz verileri Tablo 4.19 ve Tablo 4.20’ de sunulmuştur.

Tablo 4.19: Model özeti.

Model	R	R ²	Düzenlenmiş R ²
1	1,000 ^a	1,000	1,000

Tablo 4.20: Regresyon analizi.

Model	Standardize edilmemiş katsayılar		Standardize edilmiş katsayılar	t	Sig.
	B	Std. Hata	Beta		
1	Sabit (Constant)	,038	,008	4,548	,000
	CO	30,135	,001	,207	24730,199
	CH ₄	95,302	,001	,495	73450,704
	H ₂	30,500	,001	,458	50522,158

a. Bağımlı değişken: Isıl değer (kcal/m³)

Değişkenler arasında pozitif yönlü çok kuvvetli bir ilişki ($r=1,000$) mevcuttur. Belirlilik (determinasyon) katsayısı R^2 değeri 1,000 olarak tespit edilmiştir, bu da ısı değerindeki değişikliklerin tamamen sentez gazındaki gaz bileşenlerine bağlı olduğunu ispatlamaktadır. Tablo 4.21’de verilen analiz sonucuna göre matematiksel model aşağıda oluşturulmuştur.

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 \dots \quad (4.1)$$

$a = 0,038$, $b = 30,135$, $c = 95,302$ ve $d = 30,500$

Sabit değerin (p) 0,038 olması ve $p < 0,05$ için istatistiksel olarak anlamlıdır. Son durumda matematiksel denklem;

$$Y = 0,038 + 30,135 \times CO + 95,302 \times CH_4 + 30,500 \times H_2 \quad (4.2)$$

$$Isıl\ de\ğer\ \left(\frac{kcal}{m^3}\right) = 0,038 + 30,135 \times CO + 95,302 \times CH_4 + 30,500 \times H_2 \quad (4.3)$$

X_{CH_4} :Metan gazı

X_{H_2} : Hidrojen gazı

X_{CO} : Karbonmonoksit olarak ifade edilir.

4.4.3. ANOVA testi

Gazlaştırma deneyleri için limit sıcaklığın 600 °C ve parametre değişiminin ≥ 600 ve < 600 °C olduğu tek yönlü ANOVA test verileri sırasıyla Tablo 4.21’ de verilmiştir.

Tablo 4.21: Sıcaklık < 600 °C ve Sıcaklık ≥ 600 °C şartlarında Anova testi sonuçları.

Parametre	N	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	En düşük	En yüksek
Isıl değer <600	390	85,7795	211,19570	10,69431	,00	1530,00
(kcal/m ³) ≥ 600	2046	1267,2615	786,65647	17,39131	,00	3035,00
H ₂ /CO <600	390	,1110	,30955	,01567	,00	3,00
≥ 600	2046	2,3505	1,62727	,03598	,00	11,00
CO <600	390	,8692	1,81420	,09187	,00	8,00
≥ 600	2046	8,5904	5,37852	,11891	,00	26,00
CH ₄ <600	390	,4667	1,32900	,06730	,00	10,00
≥ 600	2046	4,8333	4,44010	,09816	,00	21,00

H₂	<600	390	,4949	1,32941	,06732	,00	11,00
	≥600	2046	17,9580	11,39219	,25186	,00	45,00

Tablo 4.21'e bakıldığında, CO gazının ≥600 °C durumunda, <600 °C durumuna kıyasla yaklaşık iki katı fazla olduğu açıkça görülmektedir. CH₄ için ise yaklaşık olarak aynı oranda artış gözlenmiştir. <600 °C ve ≥600 °C durumlarında sırasıyla; CH₄ konsantrasyonu 10 ve 21 olarak; H₂ konsantrasyonu ise sırasıyla 11 ve 45 olarak bulunmuştur. 700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda H₂ parametresinde gözle görülür bir artış gözlenmiştir. H₂/CO oranı için, sıcaklık 600 °C'nin üzerine çıktıkça bu oran daha fazla yükselmiştir. Sıcaklık 600 °C üzerine çıkmasıyla birlikte, sentez gaz ısı değerlerinin de arttığı görülmüştür. Deney verilerinin <600 °C olduğu şartlarda en düşük ısı değeri 1530 kcal/m³ ve ≥600 °C sıcaklıkta en yüksek ısı değeri 3035 kcal/m³ olduğu belirlenmiştir.

Gazlaştırma deneyleri için limit sıcaklığın 700 °C ve parametre değişiminin ≥700 ve <700°C olduğu tek yönlü ANOVA test verileri Tablo 4.23' de verilmiştir.

Tablo 4.22: Sıcaklık <700 °C ve Sıcaklık ≥700 °C şartlarında Anova testi sonuçları.

Parametre	N	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	En düşük	En yüksek	
Isıl değer (kcal/m³)	<700	579	433,8860	686,62290	28,53507	,00	2711,00
	>=700	1857	1278,9720	787,96799	18,28532	30,00	3035,00
H ₂ /CO	<700	579	,4917	,86788	,03607	,00	5,17
	>=700	1857	2,4598	1,63317	,03790	,00	11,00
CO	<700	579	2,5095	3,28694	,13660	,00	11,00
	>=700	1857	8,8648	5,48779	,12735	,00	26,00
CH ₄	<700	579	2,6546	4,39387	,18260	,00	18,00
	>=700	1857	4,5956	4,30688	,09994	,00	21,00
H ₂	<700	579	3,4508	6,44371	,26779	,00	33,00
	>=700	1857	18,8137	11,31951	,26268	,00	45,00

Tablo 4.22'de, CO gazının ≥700 °C durumundan, <700 °C durumuna 11' den 26 seviyesine kadar yükseldiği gözlenmiştir. CH₄ için ise daha düşük bir artış oranı gözlenmiştir. <700 °C ve ≥700 °C durumlarında; H₂ konsantrasyonu ise sırasıyla 33 ve 45 olarak tespit edilmiştir. H₂/CO oranı için, belirlenen limit değerinde yaklaşık 5'den 11'e yükselmiştir. Deney verilerinin <700 °C olduğu şartlarda maksimum ısı değeri 2711 kcal/m³ ve ≥700 °C şartlarda maksimum ısı değeri 3035 kcal/m³ e ulaştığı belirlenmiştir.

Gazlaştırma deneyleri için katalizör eşliğinde limit sıcaklığın 700 °C ve parametre değişiminin ≥ 700 olduğu tek yönlü ANOVA test verileri sırasıyla Tablo 4.23’ de verilmiştir.

Tablo 4.23: Değişen katalizör/ATY oranlarında Anova testi sonuçları.

Parametre	N	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	En düşük	En yüksek	
CO	0,00	79	16,1646	4,14924	,46683	8,00	23,00
	0,25	48	7,3542	6,31947	,91214	,00	18,00
	0,50	71	11,2817	2,39752	,28453	7,00	18,00
	0,75	68	10,7059	1,80430	,21880	6,00	13,00
	1,00	78	7,8974	3,31698	,37557	5,00	19,00
	1,25	73	7,7397	5,32559	,62331	2,00	20,00
CH ₄	0,00	79	4,2785	4,32327	,48641	1,00	17,00
	0,25	48	6,0625	7,05422	1,01819	,00	22,00
	0,50	71	7,9437	4,53837	,53861	3,00	22,00
	0,75	68	7,6471	3,28618	,39851	4,00	19,00
	1,00	78	7,2308	2,44908	,27730	2,00	12,00
	1,25	73	9,5342	5,79771	,67857	2,00	23,00
H ₂	0,00	79	23,4430	12,07641	1,35870	6,00	43,00
	0,25	48	20,3333	13,20595	1,90611	1,00	39,00
	0,50	71	34,3380	11,85380	1,40679	15,00	54,00
	0,75	68	43,2353	16,05784	1,94730	20,00	67,00
	1,00	78	33,1026	13,68058	1,54902	3,00	55,00
	1,25	73	31,3151	8,81268	1,03145	4,00	42,00
Isıl değer, kcal/m ³	0,00	79	1609,8987	723,60464	81,41188	519,00	2772,00
	0,25	48	1419,6667	1106,98597	159,77966	31,00	3122,00
	0,50	71	2144,4366	572,69438	67,96632	1106,00	3122,00
	0,75	68	2370,1176	670,41122	81,29930	1262,00	3328,00
	1,00	78	1936,7949	547,66127	62,01043	433,00	2686,00
	1,25	73	2097,0274	693,79540	81,20261	559,00	3251,00

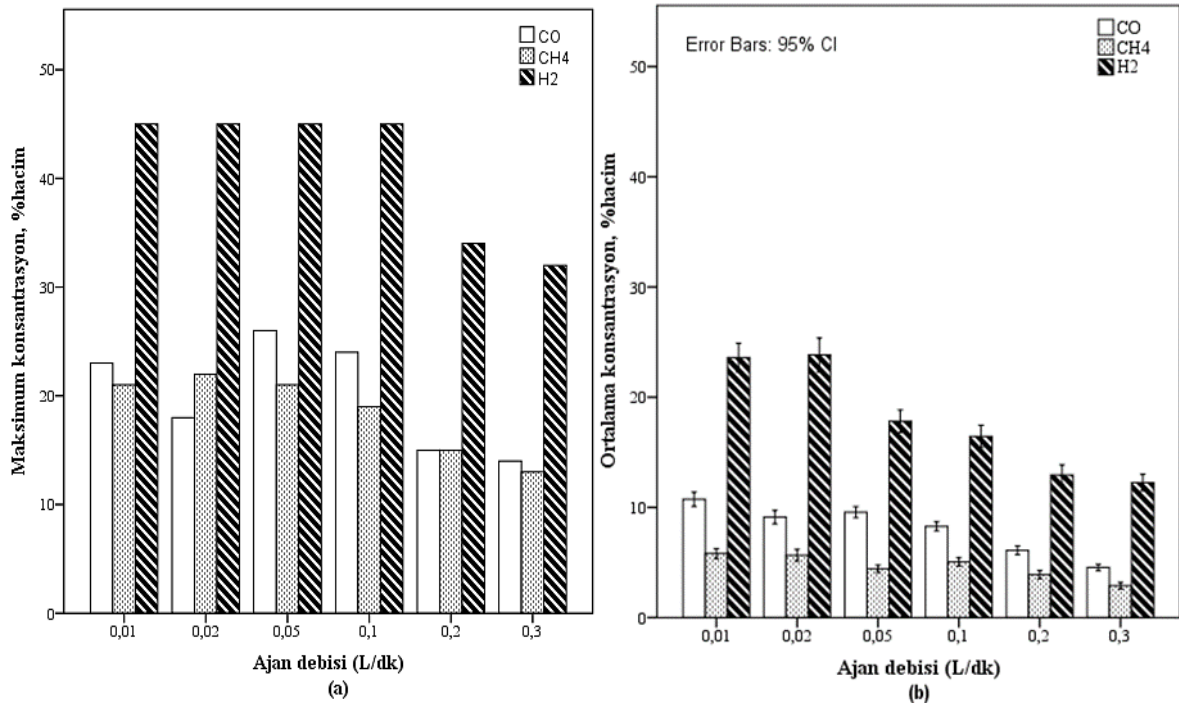
Tablo 4.23, değişen katalizör oranlarının sentez gaz dağılımı ve ısıl değer arasındaki ilişkiyi göstermektedir. CO konsantrasyonuna bakıldığında katalizör kullanılmayan deneyde %23 iken katalizör kullanımı ile bu değer de düşüş gözlenmiştir. CH₄ konsantrasyonu için %17-23 arasında bir artış söz konusudur. Katalizör/ATY oranının artışı olumlu etki göstermiştir. H₂

konsantrasyonu da benzer şekilde %43-67 arasında yüksek oranda artış göstermiştir. Sentez gaz oluşumuna katalizörün katkısı literatür sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Isıl değer sonuçları da, katalizör kullanımının ATY gazlaştırmasını güçlendirdiğini desteklemektedir. 2772-3251 kcal/m³ aralığında sahip ısıl değer oluşmuştur.

4.4.4. Gazlaştırma Parametrelerinin Etkisi

4.4.4.1. Gazlaştırma Ajan Debisinin Etkisi

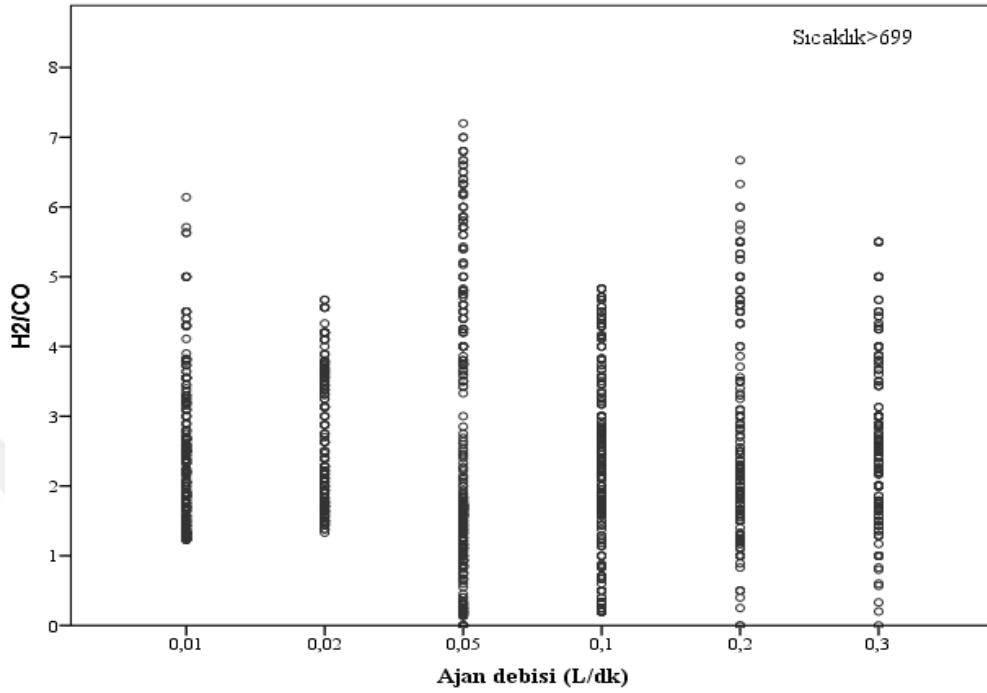
Gazlaştırma ajan debisinin en yüksek CH₄, CO ve H₂ gazlarının konsantrasyonundaki değişimi Şekil 4.44’ de gösterilmiştir. 0.01 ve 0.02 L/dk debiler saf oksijen ajanına ait debileri göstermektedir.



Şekil 4.44: Ajan gaz debisinin sentez gaz dağılımı üzerindeki etkisi. (a) Maksimum konsantrasyon, (b) Ortalama konsantrasyon.

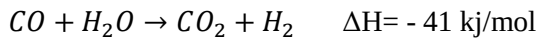
Şekil 4.44 incelendiğinde, saf O₂ için ajan debisinin 0,01-0.02 L/dk aralığında, kuru hava için ajan debisinin 0.05 ve 0.1 L/dk olduğu deneylerde CH₄, CO ve H₂ gaz hacimlerinin yüksek olduğu saptanmıştır. Düşük kuru hava ve saf oksijen debilerinde H₂ gazının hacimsel değerinin %45’e yükseldiği, CO gazının hacimsel olarak %26’ ya yaklaştığı ve CH₄ gazının hacimsel değerinin %21’e ulaştığı görülmüştür. Gazlaştırma deneylerinde CO, CH₄ ve H₂ gazlarının maksimum hacim yüzdeleri, kuru hava ajan akışının artmasıyla daha düşük değerlere ulaşmıştır. Ajan debisinin artışı, ortam şartlarını yakmaya zorlamıştır. Benzer sonuçlar Varank ve diğ (2021) ve Ongen, (2016) çalışmalarında tespit edilmiştir.

Şekil 4.45’de, ajan debisinin H₂/CO oranı değişimi üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekil sıcaklığın 700° C ve üzeri olan tüm durumlardaki deney verileri ile oluşturulmuştur.



Şekil 4.45: Ajan debisi değişiminin H₂/CO oranı üzerinde etkisi.

Bazı durumlarda, ürün gazlarını metanol ve sentetik doğal gaz gibi katma değerli ürünlere dönüştürmek için H₂ ve CO oranı önemlidir (Ali ve diğ., 2022). Kimya endüstrisinde, metanol ve saf nafta gibi ürünleri sentezlemek için 1 ile 2 arasındaki H₂/CO molar oranını kullanabilmelidir (Jia ve diğ., 2017). Su- gazı değişim reaksiyonu, gazlaştırma işleminin H₂/CO oranını artıracak şekilde artan H₂ içeriğine ve azalan CO içeriğine ulaşmasına yardımcı olur. CO, aşağıdaki reaksiyona bağlı olarak H₂ ve CO₂ üretmek için buharla reaksiyona girer (Chianese ve diğ., 2015).

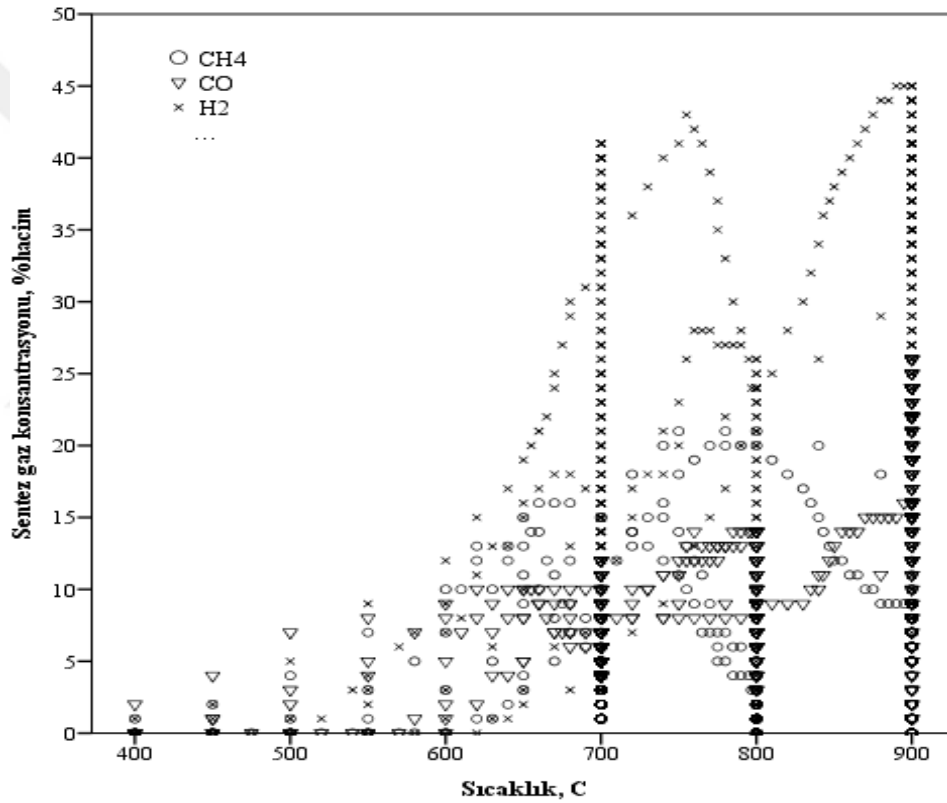


Su gazı değişimi için reaksiyonunun biraz ekzotermik olması gereklidir, çünkü bir gazlaştırıcıdan çıkan gaz halindeki ürün genellikle fazla miktarda karbon monoksit ve hidrojen daha az miktarda diğer içerir. Bu durumda 500 °C' ye kadar sentez gazı üretiminin bir parçası olarak CO' nun H₂' ye dönüşümü sağlanır. Ayrıca H₂/CO oranlarında artışa neden olmuştur.

Grafiğe göre H_2/CO oranı kuru hava ile 0.05 L/dk debide yaklaşık 7 iken debinin yükselmesi ile bu değer düşmüştür. Saf O_2 ile yapılan gazlaştırma deneylerinde ise 0.01 debide daha yüksek H_2/CO oranı gözlenmiştir. Ajan gaz debisinin artmasının H_2/CO oranının azalttığı tespit edilmiştir.

4.4.4.2. Sıcaklığın Etkisi

Bu çalışmada 700-900 °C sıcaklık aralığında gazlaştırma deneyleri yapılmıştır. Sıcaklık değişiminin hacimsel gaz dağılımına etkisi Şekil 4.46’ da gösterilmiştir. Sıcaklığın sentez gaz dağılımı üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için ortam şartları aynı tutulmuştur. Şekil, 0.05 L/dk kuru hava debisi ile değişen sıcaklık aralığında oluşturulmuştur.

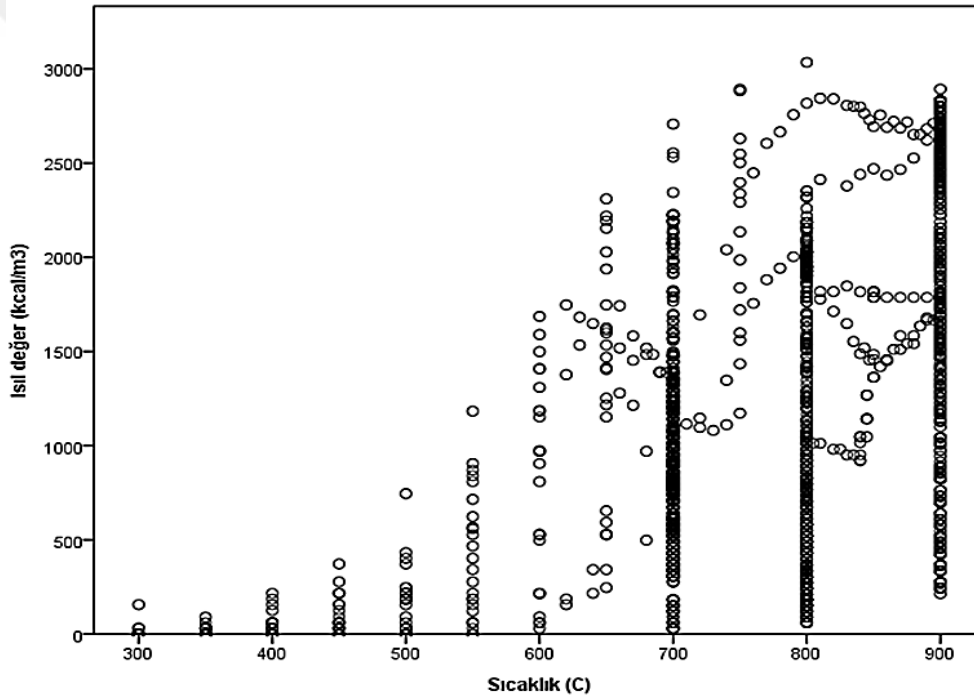


Şekil 4.46: Sıcaklık değişiminin CH_4 , CO ve H_2 gazlarına etkisi.

Gazlaştırma endotermik bir süreç olup, sıcaklık arttıkça bu reaksiyonlar güçlenmektedir. Su-gaz, su-gaz değişim, buhar reformasyonu ve Boudouard reaksiyonlarının tümü aynı anda meydana geldiğinden, reaktanların sıcaklık ve kısmi basınçları, üretilen gazdaki H_2 , CO , CO_2 ve C_nH_m konsantrasyonlarını ve oranlarını etkilemektedir (Olufemi, 2017). Bu nedenle, reaktör sıcaklığının sentez gazı bileşimleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Şekil 4.46 incelendiğinde, sıcaklığın 700'den 900°C'ye artması ile, H_2 içeriğinin hacimce %41'den %45 seviyesine yükselmiştir. CO %10'dan %15'e artış yönünde eğilim göstermiştir. H_2 oluşum

reaksiyonlarının (buhar reformu ve su-gaz reaksiyonları) etkin olduğu bölge, sıcaklığın 700 °C' nin üzerine çıktığı bölge olup, bu durum H₂ içeriğinin artmasına ve CH₄ konsantrasyonunun azalmasına neden olmuştur. Dahou ve diğ (2021) yüksek sıcaklığın, CH₄ ayrışması üzerinde önemli bir etkisi olduğunu çalışmaları ile göstermiştir. Daha yüksek sıcaklıklar, Şekil 4.46' da gösterildiği gibi, artan buhar ayrışması ve ürün gaz verimleri ile sonuçlanan termal parçalama ve buhar reformunu desteklenmiştir. Hem buhar reformasyonu hem de Boudouard reaksiyonları, 700°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda hakimdir ve CO konsantrasyonunda artışa neden olmaktadır (Alvarez ve diğ., 2014, Alipour Moghadam ve diğ., 2014).

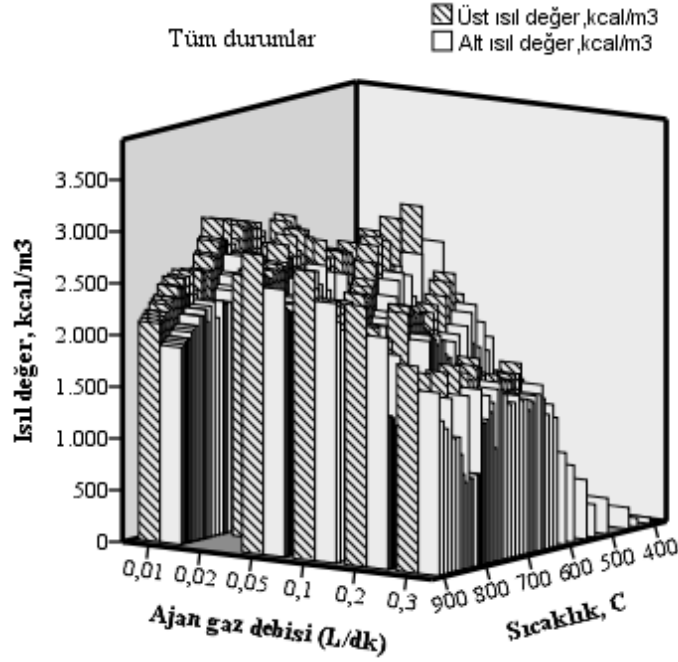
Şekil 4.47 sıcaklığın sentez gaz ısı değeri üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 4.47: Sıcaklık değişiminin ısı değeri üzerinde etkisi.

Şekil 4.47 incelendiğinde, 700°C' den 800 °C' ye sıcaklık artışının gazlaştırma sonuçlarını önemli ölçüde değiştirmedeği söylenebilir. Ancak, sıcaklığın 900 °C' ye ulaşmasıyla tüm gazlaştırma göstergeleri güçlü bir şekilde iyileştiği gözlenmiştir. Sentez gazı bileşiminin oluşumu, artan sıcaklıkla birlikte kalorifik değerdeki artışı açıklar. Sentez gaz ısı değeri 2246 kcal/m³, den 2844 kcal/m³, e yükselmiş ve bu durumda SGV' nin %20' den %40' a yükselmesi ile kazanç sağlanmıştır.

Sıcaklık ve ajan debisinin gazlaştırma verimini etkileyen önemli parametrelerden olduğu bilinmektedir. Bu parametrelerin ısı değerinde oluşturdukları değişim Şekil 4.48' de görülmektedir. Şekil, tüm deneysel durumlar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Şekildeki 0.01 L/dk ve 0.02 L/dk bölgesi saf oksijen ajanının bulunduğu deneyleri göstermektedir.

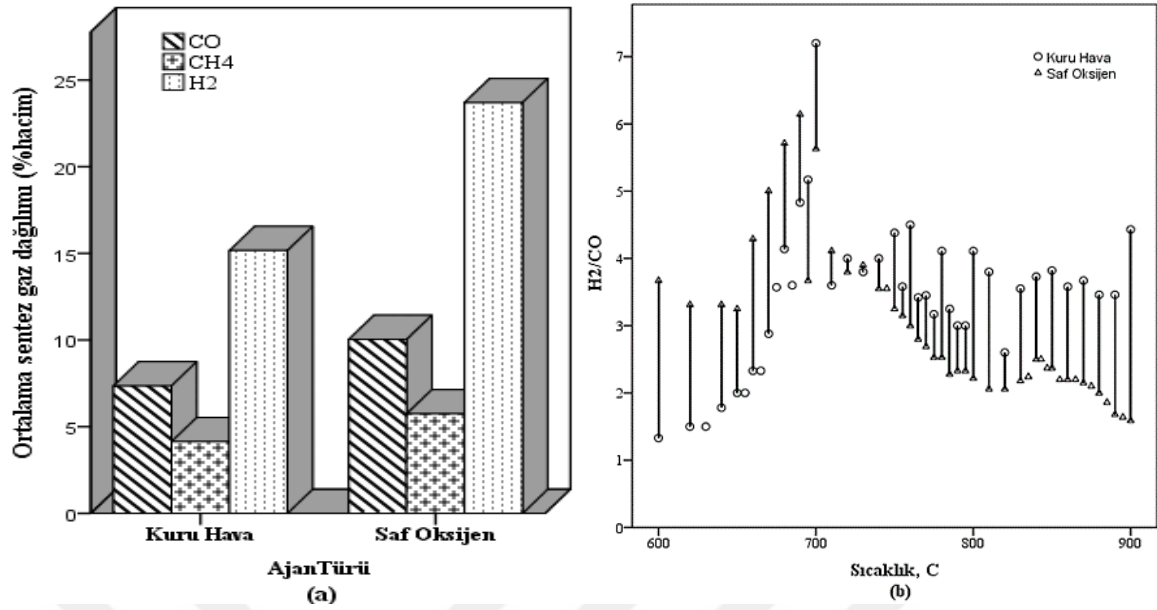


Şekil 4.48: Isıl değer, Ajan debisi ve Operasyon sıcaklığı etkisi.

Şekil 4.48' de, özellikle 0.05- 0.1 L/dk kuru hava debisinin ve eş değeri olan 0.01 L/dk saf oksijen debisinin ısı değer üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Yukarı çekişli gazlaştırıcıda gazlaştırma ajanı olarak 0.05 L/dk kuru hava ile 900 °C'de yaklaşık 2844 kcal/m³ kadar ısı değer tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda daha yüksek ısı değerlere ulaşılması artan metan konsantrasyonuna bağlı olarak görülmektedir. Optimum ajan debisi ile yapılan tüm deneylerde sıcaklığın artmasının hem üretilen gaz bileşimini hem de ısı değeri artırdığı belirlenmiştir.

4.4.4.3. Gazlaştırma Ajan Türlerinin Proses Üzerine Etkisi

Gazlaştırma ajanı olarak kuru hava ve saf oksijen kullanılan deneylerde, ajan türünün ortalama sentez gaz oluşumuna etkisi ve H₂/CO değişimindeki fonksiyonu Şekil 4.49' da verilmiştir.



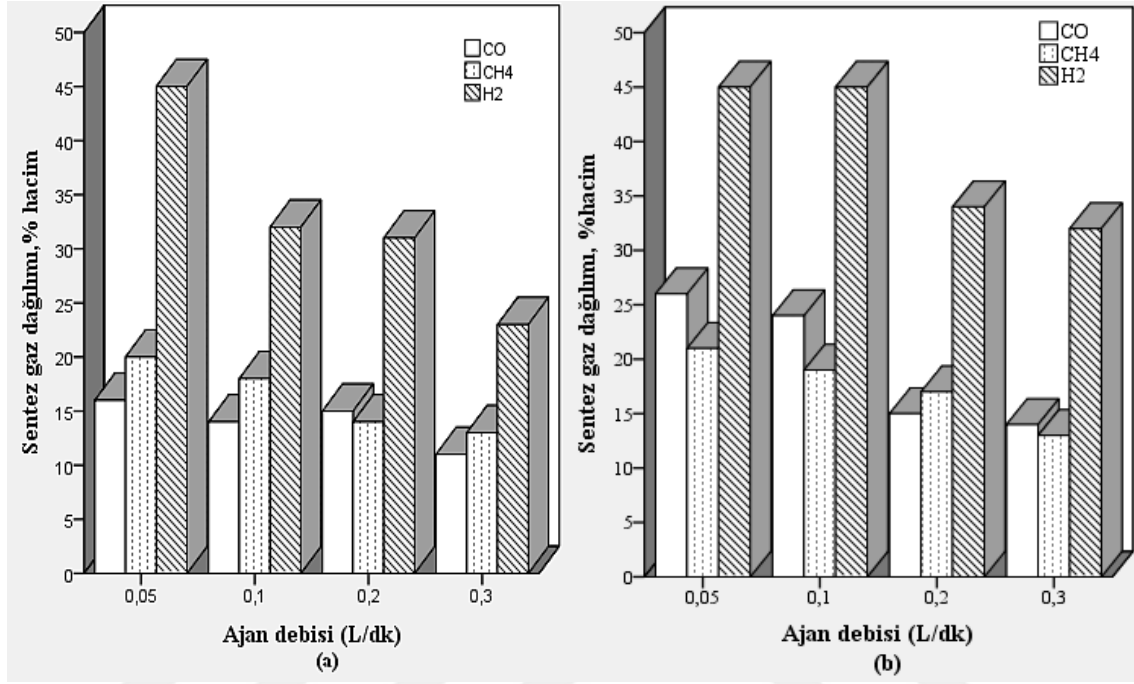
Şekil 4.49: Gazlaştırma ajan türünün etkisi. (a) Ortalama CO, CH₄ ve H₂ gazı konsantrasyonu, (b) H₂/CO.

Şekil 4.49 incelendiğinde, ortalama gaz dağılımları saf oksijen ajanı ile hacimsel olarak %25 H₂ gazına, %7 CH₄ gazına ve %12 CO gazına ulaştığı tespit edilmiştir. Kuru hava ile gerçekleştirilen gazlaştırma deneylerinde ortalama H₂ gazı konsantrasyonu %16 mertebesinde-dir. CH₄ ve CO ortalama konsantrasyonu sırasıyla %8 ve %4 seviyesinde tespit edilmiştir. Ajan olarak saf O₂ kullanımı gazlaştırmanın verimini artırdığı literatürde bulunan çalışmalarla desteklenmiştir. Saf O₂ ile yüksek bir reaksiyon hızı ve sıcaklık ortamı sağlanmıştır. Dolayısıyla, yüksek termal verimlilik elde edilmiştir (Niu ve diğ., 2013; Hameed ve diğ., 2021).

H₂/CO oranı, proses verimliliğini iyileştirmek ve sürdürmek için kullanılır. Üretilen sentez gazının metanol sentezinde ham madde geri kazanımı için alternatif bir süreç olarak uygulanma potansiyelinin değerlendirilmesi bir verimlilik kriteridir. Ajan türüne göre H₂/CO değişimine bakıldığında, kuru hava ile gerçekleştirilen gazlaştırma deneylerinde daha yüksek oran tespit edilmiştir. 800° C ile 900° C aralığında kuru hava ile deneylerde H₂/CO oranı yaklaşık 2.5 - 4 arasında değişmektedir. Saf O₂ deneylerinde ise 1.5-2 aralığında belirlenmiştir. Her iki ajan türünde H₂/CO oranını karşılamaktadır. H₂/CO oranı 3' ün üzerinde olması ise hidrojenle oldukça zengin olarak yorumlanabilmektedir.

4.4.4.4. Örnek Miktarının Etkisi

Çalışmalarda 20 g ve 40 g miktarlarda ATY örnekleri ile çalışılmıştır. Yakıt miktarının gazlaştırma üzerindeki etkisini sunmak amacıyla değişen kuru hava debilerine karşılık oluşan sentez gaz konsantrasyonu şekil 4.50’ de verilmiştir.



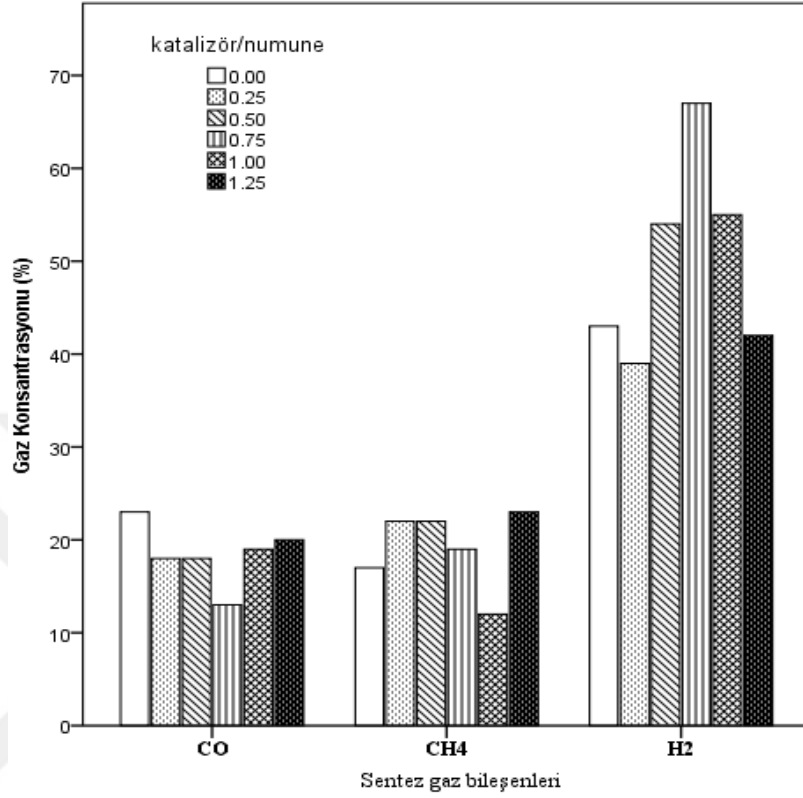
Şekil 4.50: Yakıt miktarının sentez gaz dağılımı üzerine etkisi. (a) 20 g ATY ve (b) 40 g ATY.

Şekil 4.50 incelendiğinde, 20 g ATY ile beslenen gazlaştırma deneylerinde oluşan H₂ konsantrasyonu 0.05 L/dk debide hacimce %45 seviyesinde iken 0.1, 0.2 ve 0.3 debide yaklaşık olarak sırasıyla %32, %31 ve %25 mertebesine ulaşmıştır. Ancak, 40 g ATY ile beslenen gazlaştırma denemelerinde H₂ konsantrasyonu yaklaşık olarak sırasıyla %44, %45, %35 ve %34 seviyelerinde görülmektedir. CO konsantrasyonları karşılaştırıldığında; 20 g ATY ile beslenen deneylerde en fazla %16 iken 40 g ATY kullanılan deneylerde %25’ in üzerine çıkmıştır. CH₄ konsantrasyonu içinde aynı yorumları yapmak mümkündür. Şekilde görülen sonuçlara göre yakıt miktarının artmasının sentez gaz oluşumu üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu söylenebilir.

4.4.4.5. Katalizör Etkisi

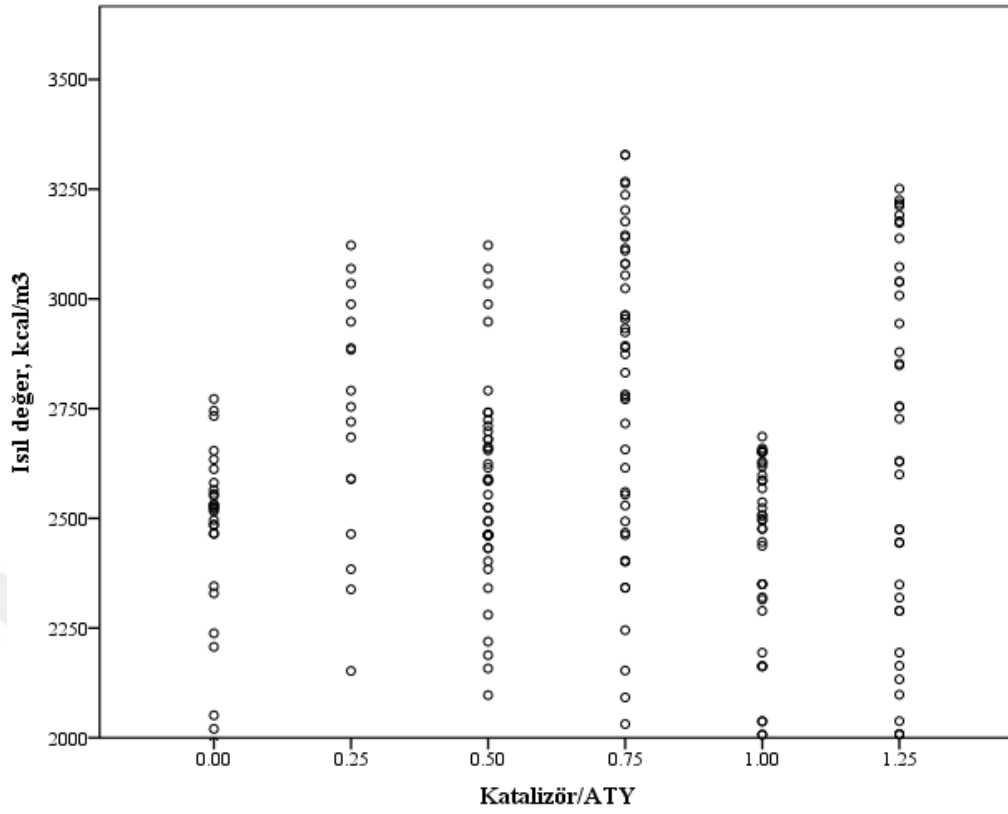
Katalizörün gazlaştırma üzerinde performansı Şekil 4.51 ve 4.52’ de verilmiştir. Kütlece belirlenen oranlardaki katalizör/numune kullanımının sentez gaz konsantrasyonu üzerindeki verimi Şekil 4.51’de, sentez gaz ısı değeri üzerindeki etkisi ise Şekil 4.52’ de sunulmuştur.

Tüm deneyler kuru hava ile 0.05 L/dk debide ve 850 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Şekilde 0.00 bölgesi katalizörsüz gazlaştırma deneyini göstermektedir.



Şekil 4.51: Ni-Al katalizörün sentez gaz konsantrasyonuna etkisi.

Şekil 4.50 incelendiğinde, aynı şartlarda yürütülen ve katalizör kullanılmayan gazlaştırma prosesinde H₂ gaz konsantrasyonu %43'tür. 0,50 kütleli oranında katalizör kullanımına bakıldığında H₂ konsantrasyonu %55 seviyesindedir. 0,75 oranında katalizör etkisinde ise H₂ konsantrasyonu %67 seviyesine kadar çıkmıştır. 1,00 katalizör/ numune oranında ise H₂ konsantrasyonu %57 seviyesine ulaşmıştır. 1,25 oranında ise konsantrasyon tekrar azalarak katalizör kullanılmayan değerlere yaklaşmıştır. Artan katalizör oranının sentez gaz konsantrasyonu üzerinde pozitif yönde etki oluşturduğu saptanmıştır. Uygun bir katalizör kullanılması halinde metan oluşumunun daha fazla olacağı varsayılmaktadır. Benzer şekilde, Zhang ve diğ. (2019) Ni/C destekli katalizörlerde nikel içeriğinin artmasıyla sentez gazındaki CH₄ ve H₂ konsantrasyonu önemli ölçüde arttığını, CO₂ konsantrasyonu nispeten stabil ve CO ve C_nH_m konsantrasyonu düşüş eğilimi olduğunu tespit etmişlerdir. Artan metan konsantrasyonu, katranın daha hafif bileşenlere ayrışması sonucu açıklanabilir (Suhaj ve diğ., 2019). Metalik nikelin düşük sıcaklıklarda metanlaşma reaksiyonunu destekleyebileceği bildirilmiştir (Stangeland ve diğ., 2017).



Şekil 4.52: Katalizörün ısı değeri üzerindeki etkisi (Sıcaklık ≥ 700 °C)

Şekil 4.51 'e göre, katalizörsüz gazlaştırma deneyinde ısı değeri 2772 kcal/m^3 iken bu değer Ni-Al katalizör ile gerçekleştirilen gazlaştırma deneylerinde 3328 kcal/m^3 seviyesine çıkmıştır. En yüksek ısı değeri katalizör/ATY oranının 0,75 olduğu deneyde tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar, katalizör sentez gaz oluşumu grafiğinde de tespit edilip yorumlanmıştır.

5. TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu kısmında 4. bölümde sunulan bulgular ışığında değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmada yapılan gazlaştırma deneyleri sonucu elde edilen bulguların güncel literatürle kıyaslanması yapılarak tartışılmıştır.

ATY karakterizasyon çalışmaları sonrası nem içeriği yaklaşık %4 olarak tespit edilmiştir. Düşük nem içeriğinin gazlaştırma işlemi için uygun olduğu bilinmektedir. Gazlaştırma yöntemiyle atığın termokimyasal olarak parçalanması için düşük miktarda nem içeriği ve kısıtlı oksijen kullandığından mevcut numunenin karakteri sistem verimliliğini desteklemektedir. Bir başka çalışmada kullanılan ATY'nin nem analizi sonucu % 5,8 olarak rapor edilmiş olup bu çalışmada kullanılan ATY ile benzerlik göstermektedir. (Wu ve diğ., 2016). Sharma ve diğ. (2022) ATY karakterizasyon çalışmasında nem içeriğinin artışı ile sentez gaz alt ısı değeri (LHV) düşme eğilimi gözlemlemiştir. %3 ile %18 arasında nem içeriğinin değişmesi ile gazlaştırma sonucu oluşan sentez gazın alt ısı değeri 4,32' den 3,51 MJ/Nm³ e düştüğü tespit etmişlerdir. Zang ve diğ. (2019), farklı oranlarda nem içeren atık lastiklerin gazlaştırılması sonucu sentez gaz üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Artan nem içeriği ile CO₂ ve hidrokarbon yüzdeleri artarken diğer tüm bileşimlerin yüzdelерinin azaldığını tespit etmişlerdir.

Karakterizasyon çalışmalarında uçucu madde %74,36 olarak tespit edilmiş olup, bu değere bağlı olarak gazlaşma performansının da yüksek olacağı belirlenmiştir. Yakıt olarak plastik kullanan bir çalışmada, uçucu madde yaklaşık %92 (çok yüksek) ve sabit karbon içeriği yaklaşık %3,1 (düşük) olarak tespit edilmiştir (Bungay, 2017).

Kullanılan ATY numunesinin kül içeriği yaklaşık %13 olarak tespit edilmiştir. Bu oranın fazla olması, ATY yakıtı bileşenlerinde, kâğıt gibi yüksek kül içeren farklı atık türlerinin fazla bulunmasına bağlanmıştır. Zhao ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada ATY içeriğindeki kâğıda bağlı olarak kül miktarını %17 olarak tespit etmişlerdir.

Elementel analiz sonucu numunede karbon %58 ve hidrojen %6,5 olarak tespit edilmiştir. Gazlaştırma işlemi sonrası oluşan katı ürünlere ait elementel analiz sonuçlarına bakıldığında

karbon (C) ve hidrojen (H) içeriğinin beklendiği gibi düştüğü tespit edilmiştir. Bu sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalar ile uyumluluk göstermektedir (Li ve diğ., 2021; Khosasaeng ve diğ., 2017).

ATY kalorifik değer 4117 kcal/kg (17.23 MJ/kg) olarak bulunmuştur. Yasar ve diğ. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, ATY numunenin kalorifik değeri 4340 kcal/kg olarak tespit edilmiştir. Kara ve diğ. (2011) kentsel katı atıktan üretilen ATY' nin bileşiminde, naylon, ambalaj, kağıt ve tetrapak içerdiği ve kalorifik değerini 3500 kcal/kg tespit etmişlerdir. Literatürde incelemeleri sonucunda kullanılan ATY' nin kalorifik değerinin pek çok çalışmada kullanılan ATY ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir (Alfè ve diğ., 2022; Akdag ve diğ., 2016). Genellikle, belediye atıkları için bildirilen ortalama değere göre daha yüksektir (15 MJ/kg altında) (Montejo vd., 2011; www.ieabioenergy.com). Diğer atık türleri için değerlendirildiğinde; arıtma çamuru (10,6 MJ/kg) (Migliaccio ve diğ., 2021), zeytin çekirdeği (Ganda ve diğ., 2022) ve işlenmiş kağıt çamurundan (11.1 MJ/kg) (Areprasert ve diğ., 2016) daha yüksek ısı değere sahiptir. Ancak; plastik atık ısı değerinden daha düşüktür (>40 MJ/kg) (Arena ve diğ., 2012).

Tokmurzin ve diğ. (2019) gazlaştırma ve piroliz davranışını değerlendirmek için termogravimetrik analiz (TGA) kullanarak ATY'nin termokimyasal özelliklerini, belediye atıklarının organik fraksiyonunu incelemiştir. TGA analizine göre, hem belediye atıkları hem de ATY için uçucu içerik 200°C' de salınmaya başlarken, uçucu maddeler sırasıyla 500 °C ve 700 °C' de tamamen uzaklaştırılmıştır. Yapılan tez çalışmasındaki TGA sonuçları literatür ile kıyaslandığında, ATY atıklarının TGA eğrileri ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir.

Tez çalışmasında, gazlaştırma sonucu oluşan sentez gaz kompozisyonlarına bakıldığında; H₂ oluşumunun sıcaklık ile arttığı yapılan deneylerde görülmüştür. Tez çalışması içerisinde gazlaştırma ürünlerinin kompozisyonunda 800 °C' de H₂ konsantrasyonu en fazla % 40 iken 900 °C' de maksimum % 45' e ulaşmıştır. Reform reaksiyonlarının sıcaklık ile arttığı çalışması ile de uyum göstermiştir (Nobre ve diğ., 2017; Sajid ve diğ., 2022). 900 ile 1400° C arasında değişen sıcaklıklarda yapılan başka bir gazlaştırma çalışmasında, H₂ konsantrasyonu %8' den %20' ye kadar artmıştır. Bu çalışma, yüksek sıcaklık ile hidrojen açısından daha yüksek konsantrasyona ulaşıldığını göstermektedir (Sharma ve diğ., 2022). Yapılan araştırmalarda, sabit yataklı reaktör sistemlerinde H₂ üretimi daha yüksek değerlerde bulunmuştur (Ozbas ve diğ., 2019; Hoang ve diğ., 2022; Zang ve diğ., 2019). Ayrıca siklon

ayırıcılı ve sirkülasyonlu reaktörlerin tasarımı, yüksek kalitede sentez gazı üretimine yol açmıştır.

Gazlaştırma ajan türünün, proses verimliliği üzerinde önemli düzeyde etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Tez çalışmasında kuru hava ve saf O₂ gazlaştırma ajanları olarak kullanılmıştır. Bulgularda, saf O₂ ajanının, ortalama sentez gaz konsantrasyonlarında daha yüksek değerler tespit edilmiştir. Benzer eğilim, saf O₂ ile gazlaştırma yapılan diğer çalışmalarda gözlenmiştir. Saf O₂ ile yüksek bir reaksiyon hızı ve sıcaklık ortamı sağlanmıştır. Dolayısıyla, yüksek termal verimlilik elde edilmiştir (Niu ve diğ., 2013; Hameed ve diğ., 2021).

Ajan gaz debisinin sentez gaz oluşumuna etkisi yapılan tez çalışmasında ayrıca izlenmiştir. Artan kuru hava debisinin gazlaştırma sonucu oluşan H₂, CO ve CH₄ gaz konsantrasyonlarında gözle görülür bir azalmaya neden olduğu ve ortam şartlarının yanmaya yaklaştığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, bulgular bölümünde SPSS ile de karşılaştırılmıştır. Gaz konsantrasyonu ve ajan debisi arasındaki ters orantı korelasyon ile tespit edilmiş olup, literatür çalışmaları ile de doğrulanabilmektedir (Ongen ve diğ., 2019; Ongen ve diğ., 2016; Tezer ve diğ., 2022).

Tez çalışması sonuçlarında soğuk gaz verimliliği (SGV) %12 - 42 aralığında bulunmuştur. En yüksek SGV ise 900 °C sıcaklıkta tespit edilmiştir. Nobre ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ATY' yi 300 °C' de karbonize ederek biyokütle peletleri için kömür olarak kullanmışlardır. Peletler, 800 ve 850 °C' de 1 kg/saat kabarcıklı-akışkan yataklı gazlaştırıcıda gazlaştırmaya tabi tutulmuştur. SGV %42 - 73 arasında bulunmuştur (Nobre ve diğ., 2017). Yapılan bir diğer çalışmada ATY gazlaştırma sonrası SGV %30.6 olarak bulunmuştur (Vamvuka vd., 2022). Khosasaeg ve diğ. (2017) aşağı akışlı gazlaştırıcıda ATY ile çalışmışlardır. Sentez gaz ısı değerini 5.87 MJ/Nm³ (1,404 kcal/m³) ve SGV ise %73.04 olarak tespit etmişlerdir (Khosasaeg ve diğ., 2017). Diğer çalışmada ise 600–900 °C aralığında, artan sıcaklıkla birlikte soğuk gaz veriminin en yüksek değeri 900 °C' de tespit etmişlerdir (Cai ve diğ., 2021).

Tez çalışmasında ağırlıkça %50 oranında karışık Ni-Al katalizörü kullanılmış olup, gazlaştırma üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Katalizör/ ATY numune oranının artması H₂ ve CO oluşumunu da arttırmıştır. H₂ konsantrasyonu katalizör kullanılmayan denemelerde en fazla %43 görülmüşken, optimum katalizör oranında %67' ye kadar yükselmiştir. Benzer eğilim yapılan literatür çalışmalarında gözlenmiştir. Irfan ve diğ. (2019), mermer tozu

katalizörü ile belediye atık gazlaştırılması üzerinde çalışmışlardır. Artan katalizör/ atık numune oranlarında H₂ gazının konsantrasyonunda önemli derecede artış tespit etmişlerdir. Suhaj ve diğ., (2019), lastik piroliz kömürü ile ATY gazlaştırılması çalışmasını gerçekleştirmiştir. Katalizör/ATY numune oranı azaldıkça oluşan sentez gaz içeriğindeki H₂ konsantrasyonu azalmıştır (Suhaj ve diğ., 2019). Gazlaştırma proseslerinde katalizör kullanımının düşük sıcaklıklarda gazlaştırma reaksiyonunu hızlandırması ve gaz bileşenlerinin oranını ayarlaması açısından gerekli olduğu düşünülmektedir (Jiang ve diğ., 2019; Ding ve diğ., 2017). Ayrıca, katalizör oranının artışı ile sentez gaz ısı değeri de arttığı ve gazlaştırma reaksiyonlarını güçlendirdiği Anova test ve grafiklerde gözlenmiştir. Ancak, katalizör/ATY oranını aşırı derecede artırmak, katalizörün kok oluşumu yoluyla devre dışı bırakılması ve gazlaştırmanın ısı ve kütle transferi sınırlamaları gibi nedenlerle H₂ içeriğinde azalma ile sonuçlanmıştır. Benzer sonuçlar literatür çalışmalarında tespit edilmiştir. (Cao ve diğerleri, 2021b; Ma ve diğerleri, 2019)

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fosil yakıtlara gelişmekte olan bir alternatif olarak, gazlaştırma yoluyla sentez gazı üretimi, bu çalışmada farklı gazlaştırıcı ajan türleri ve yakıt miktarı, olası gazlaştırma reaksiyonları, gazlaştırma reaksiyon parametreleri ve katalizör oranları açısından değerlendirilmiştir.

Çalışmada, gazlaştırma prosesi uygulanarak, atıktan türetilmiş yakıtlarda (ATY) hem atık minimizasyonu hem de enerji geri kazanımına yönelik denemeler yapılmıştır. Gazlaştırma deneyleri için, yukarı akışlı, sirkülasyonlu ve sabit yataklı bir çelik reaktör kullanılmıştır. Kuru hava ve saf oksijen olarak 2 farklı gazlaştırma ajanı kullanılmıştır.

Tuzla bölgesinde faaliyet göstermekte olan bir sanayi tesisinden alınan atıktan türetilmiş yakıt (ATY) numunelerinin gazlaştırılması sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel olarak anlamlandırılıp karşılaştırılabilmesi için SPSS 21 istatistiksel yazılım kullanılmıştır. Elde edilen verilere ait analiz sonuçları tablo ve grafikler halinde sunularak çalışmanın incelemesi ve değerlendirmesi yapılmıştır. Bulgular bölümünde verilen sonuçların değerlendirilmesi de SPSS 21 yazılım ile yürütülen korelasyon, regresyon ve ANOVA testleri ile doğrulanmıştır.

Böylece, hedeflenen hidrojen zengin sentez gaz üretimi için en iyi işletme şartları tespit edilmiştir. Ayrıca, sentez gazın ısı değeri ek olarak sentez gaz kompozisyon değişiminin operasyon şartlarına göre irdelenmiştir.

Atıktan türetilmiş yakıt (ATY) atıklara uygulanan termokimyasal işlem sonucunda elde edilen bulgular değerlendirildiğinde nihai deney sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

- ✓ 900 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneyler ile en yüksek sentez gaz dağılımı ve ısı değeri sonuçlarına ulaşılmıştır. Sıcaklık artışı ile sentez gaz ısı değeri de artmıştır.
- ✓ Yakıt olarak kullanılan örnek miktarı arttıkça sentez gaz dağılım miktarının hacimce arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- ✓ Çalışmalarda aynı şartlarda yürütülen deneylerde, optimum kuru hava debisi 0.05 ve 0.1 L/dk olarak belirlenmiştir. Saf oksijen debisi, optimum kuru hava debisi üzerinden 0.01 ve 0.02 L/dk olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Gazlaştırma ajan debisinin artması hem sentez gazın ısı değerinin hem de sentez gaz konsantrasyonunda düşüşe neden olmaktadır.
- ✓ Gazlaştırma performansını artırmak ve oluşan H_2 gazı yüzdesini artırmak amacıyla Ni-Al katalizörü kullanılmıştır. Özellikle H_2 ve CH_4 gazı oluşumunu desteklediği tespit edilmiştir. H_2 konsantrasyonu %67 ve CH_4 ise %23'e ulaşmıştır. Katalitik gazlaştırmanın hem sentez gaz üretimini hem de ısı değeri önemli derecede artırmada başarılı olduğu saptanmıştır.
- ✓ Katalitik gazlaştırma uygulamalarında katalizör oranı önemli bir parametredir. Farklı katalizör/yakıt numune oranlarında yürütülen çalışmalarda sentez gaz konsantrasyonları üzerindeki etkisi belirgin şekilde ortaya koymuştur. Gazlaştırmadan elde edilen sonuçların karşılaştırılması ile hidrojen açısından zengin sentez gazı üretmek için katalizör gazlaştırmasının daha etkili olduğunu göstermiştir.
- ✓ Gazlaştırmanın avantajlarından biri de yakmaya benzer şekilde katı atıkların hacmini azaltmada oldukça verimli bir yöntemdir. ATY gazlaştırılması ile ATY atıkların kütsel olarak ise %63-73 azaldığı tespit edilmiştir. Atık minimizasyonu sağlamada ATY gazlaştırmanın uygun bir yöntem olduğu söylenebilmektedir.

- ✓ Gazlaştırma verimini gösteren SGV değeri kuru hava ile yürütülen gazlaştırma deneylerinde daha yüksek sonuçlar göstermiştir. Kuru hava ile gerçekleştirilen gazlaştırma deneylerinde SGV %12-42 arasında bulunmuştur. Saf oksijen ajanı kullanılan gazlaştırma denemelerinde ise %36-37 aralığında hesaplanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma, günümüzde en yoğun enerji taşıyıcısı olarak bilinen hidrojenin ATY gibi karma atıklardan gazlaştırma ile yüksek hacimlerde üretilebileceğini ortaya koymuştur. Atıktan enerji (WtE) süreçlerinin uygulanması, atıkları faydalı enerji taşıyıcılarına dönüştürerek döngüsel ekonominin kapsayıcı hedeflerini desteklemektedir. Çalışma neticesinde elde edilen bulgularla ileriye yönelik analizler yapılabilir. ATY ile biyokütle yakıtın birlikte gazlaştırılmasının verimi incelenebilir. Ayrıca, ATY' nin gazlaştırmasında farklı katalizör uygulamaları denenmesi uygun görülebilir.

Bu yaklaşımların tamamı ülkemizin sıfır atık kapsamında uygulamaya çalıştığı birçok faaliyeti desteklemektedir. Özellikle sıfır atık teknolojilerinden birisi olan gazlaştırma ile gerek evsel gerekse sanayi kaynaklı atıkların ülke ekonomisine geri kazandırılmaları sağlanabilmekte ve iklim değişikliği ile mücadele hedeflerine de katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKLAR

Abbasi, G., Khoshalhan, F., & Hosseinienezhad, S. J. (2022). Municipal solid waste management and energy production: A multi-objective optimization approach to incineration and biogas waste-to-energy supply chain. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, 102809.

Abdallah, R., Juaidi, A., Assad, M., Salameh, T., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). Energy recovery from waste tires using pyrolysis: Palestine as case of study. *Energies*, 13(7), 1817.

Abouelsoud, A. M. (2020). Waste design using experimental design techniques. *Journal of Design Science and Applied Arts*, 1(1), 116-124. [https://doi: 10.21608/jdsaa.2020.70457](https://doi.org/10.21608/jdsaa.2020.70457)

Acar, C., & Dincer, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International journal of hydrogen energy*, 39(1), 1-12.

Adefeso, I. B., Rabi, A. M., & Ikhu-Omoregbe, D. I. (2015). Refuse-derived fuel gasification for hydrogen production in high temperature proton exchange membrane fuel cell base CHP system. *Waste and biomass valorization*, 6(6), 967-974.

Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Soltanian, S., Ghanavati, H., Dadak, A., 2019b. Comprehensive exergoeconomic analysis of a municipal solid waste digestion plant equipped with a biogas genset. *Waste Manag.* 87, 485–498.

Ahmed, T., Xiu, S., Wang, L., & Shahbazi, A. (2018). Investigation of Ni/Fe/Mg zeolite-supported catalysts in steam reforming of tar using simulated-toluene as model compound. *Fuel*, 211, 566-571.

Akdag, A.S.; Atımtay, A.; Sanin, F.D. (2016). Comparison of fuel value and combustion characteristics of two different RDF samples. *Waste Management*, 47, 217–224.

Akdoğan, Asuman ve Güleç, Sevcin (2005). Belediyelerde Katı Atık Yönetimi ve İl Belediyelerinde Gerçekleştirilen Ampirik Bir Çalışma. *Çağdaş Yerel Yönetimler Dergisi*, 14 (4), 51-78.

Aktan, M. (2020), *Kömür Gazlaştırma Ürünlerinin Gerçek Opsiyonlar Yöntemi İle Değerlemesi*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Alao, M. A., Popoola, O. M., & Ayodele, T. R. (2022). Waste-to-energy nexus: An overview of technologies and implementation for sustainable development. *Cleaner Energy Systems*, 100034.

Alauddin, Z. A. B. Z., Lahijani, P., Mohammadi, M., & Mohamed, A. R. (2010). Gasification of lignocellulosic biomass in fluidized beds for renewable energy development: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2852-2862.

Alfè, M., Gargiulo, V., Porto, M., Migliaccio, R., Le Pera, A., Sellaro, M., ... & Ruoppolo, G. (2022). Pyrolysis and Gasification of a Real Refuse-Derived Fuel (RDF): The Potential Use of the Products under a Circular Economy Vision. *Molecules*, 27(23), 8114.

Alfè, M., Gargiulo, V., Porto, M., Migliaccio, R., Le Pera, A., Sellaro, M., ... & Ruoppolo, G. (2022). Pyrolysis and Gasification of a Real Refuse-Derived Fuel (RDF): The Potential Use of the Products under a Circular Economy Vision. *Molecules*, 27(23), 8114.

Al-Hwayzee, M., 2016, *Design and development of gasification processes in fluidised bed chemical reactor engineering*, Doctoral dissertation, Cardiff University.

Ali, A. M., Inayat, M., Zahrani, A. A., Shahzad, K., Shahbaz, M., Sulaiman, S. A., & Sadig, H. (2022). Process optimization and economic evaluation of air gasification of Saudi Arabian date palm fronds for H₂-rich syngas using response surface methodology. *Fuel*, 316, 123359. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.123359>

Ali, J., Rasheed, T., Afreen, M., Anwar, M. T., Nawaz, Z., Anwar, H., & Rizwan, K. (2020). Modalities for conversion of waste to energy—Challenges and perspectives. *Science of The Total Environment*, 727, 138610.

Alipour Moghadam R, Yusup S, Azlina W, Nehzati S, Tavasoli A. (2014). Investigation on syngas production via biomass conversion through the integration of pyrolysis and air-steam gasification processes. *Energy Convers Manage*, 87, 670–5.

AlNouss, A., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2020). Production of syngas via gasification using optimum blends of biomass. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118499.

AlQattan, N., Acheampong, M., Jaward, F. M., Ertem, F. C., Vijayakumar, N., & Bello, T. (2018). Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven. *Renew Energy Focus*, 27, 97-110. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.09.005>.

Al-Salem, S., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G. ve Dutta, A., (2017), A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW), *Journal of Environmental Management*, 197, 177-198.

Alvarez, J., Kumagai, S., Wu, C., Yoshioka, T., Bilbao, J., Olazar, M., & Williams, P. T. (2014). Hydrogen production from biomass and plastic mixtures by pyrolysis-gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(21), 10883-10891.

Andrews, D., 2015. The circular economy, design thinking and education for sustainability. *Local Econ.* 30 (3), 305–315.

Areeprasert, C.; Scala, F.; Coppola, A.; Urciuolo, M.; Chirone, R.; Chanyavanich, P.; Yoshikawa, K. Fluidized bed co-combustion of hydrothermally treated paper sludge with two coals of different rank. *Fuel Process. Technol.* 2016, 144, 230–238.

ASTM D3172-13. (2021). Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke, ASTM International. <https://www.astm.org>

ASTM D3173 – 03, 2008. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, The American Society for Testing and Materials, the United States of America.

ASTM D3174-11, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal. <https://www.astm.org>

ASTM D3175-20, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. <https://www.astm.org>

ASTM D5865-13, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. <https://www.astm.org>

Atık Yönetimi Yönetmeliği. (02 Nisan 2015). T.C. Resmi Gazete, 29314, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>

Atıktan Türetilmiş Yakıt (ATY), Ek Yakıt ve Alternatif Hammadde Tebliği, (2014, 20 Haziran). Resmî Gazete (Sayı:29036).

Aydin, E. S., Yucel, O., & Sadikoglu, H. (2018). Numerical and experimental investigation of hydrogen-rich syngas production via biomass gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 1105–1115. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.013>

Aydin, E. S., Yucel, O., & Sadikoglu, H. (2019). Experimental study on hydrogen-rich syngas production via gasification of pine cone particles and wood pellets in a fixed bed downdraft gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(32), 17389-17396.

Balbay, S., Sarihan, A., Avsar, E. (2021). “Circular Economy / Industrial Sustainability” Approach in the World and in Turkey, *European Journal of Science and Technology*, (27), 557-569.

Bartela, Ł., Kotowicz, J., Remiorz, L., Skorek-Osikowska, A., Dubiel, K. (2017) Assessment of the economic appropriateness of the use of Stirling engine as additional part of a cogeneration system based on biomass gasification. *Renew Energy*, 112,425–443.

Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press, Kidlington, Oxford, UK.

Basu, P. (2018). Gasification Theory. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, 211–262. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00007-8>

Bello, A. S., Al-Ghouti, M. A., & Abu-Dieyeh, M. H. (2022). Sustainable and long-term management of municipal solid waste: A review. *Bioresource Technology Reports*, 101067.

Białowiec, A., Pulka, J., Stępień, P., Manczarski, P., & Gołaszewski, J. (2017). The RDF/SRF torrefaction: An effect of temperature on characterization of the product–Carbonized Refuse Derived Fuel. *Waste Management*, 70, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.020>.

Bioenergy, I. E. A. (2009). Bioenergy—a sustainable and reliable energy source. *International Energy Agency Bioenergy, Paris, France*.

Bourtsalas, A. T., Zhang, J., Castaldi, M. J., Themelis, N. J., & Karaiskakis, A. N. (2018). Use of non-recycled plastics and paper as alternative fuel in cement production. *Journal of cleaner production*, 181, 8-16.

Breeze, P. (2018). Waste to Energy Technologies. *Energy from Waste*, 29–37. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101042-6.00004-2>

Bulut, İ., (2017), Belediye Atıklarının Çimento Sektöründe evsel Aty Olarak Kullanılması, Atık Yönetimi Sempozyumu, 26 Şubat-02 Mart 2017, Antalya.

Bungay, V. C. (2017). Kinetic Study on the Pyrolysis and Gasification of Plastic Waste. *Chemical Engineering Transactions*, 56,193–198.

Burra, K. G., Hussein, M. S., Amano, R. S., & Gupta, A. K. (2016). Syngas evolutionary behavior during chicken manure pyrolysis and air gasification. *Applied Energy*, 181, 408-415.

Cai, J., Zeng, R., Zheng, W., Wang, S., Han, J., Li, K., ... & Tang, X. (2021). Synergistic effects of co-gasification of municipal solid waste and biomass in fixed-bed gasifier. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 1-12.

Cao, J. P., Ren, J., Zhao, X. Y., Wei, X. Y., & Takarada, T. (2018). Effect of atmosphere on carbon deposition of Ni/Al₂O₃ and Ni-loaded on lignite char during reforming of toluene as a biomass tar model compound. *Fuel*, 217, 515-521.

Cao, Y., Bai, Y., & Du, J. (2021). Study on gasification characteristics of pine sawdust using olivine as in-bed material for combustible gas production. *Journal of the Energy Institute*, 96, 168-172.

Capareda, S. C., & Maglinao, A. L. (2019). Advances in Biomass Power Generation Using Fluidized Bed Gasification Techniques: Update of Current State of the Art and Report of Challenges and Opportunities. In *2019 ASABE Annual International Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Chabhadiya, K., Srivastava, R. R., & Pathak, P. (2021). Growth projections against set-target of renewable energy and resultant impact on emissions reduction in India. *Environmental Engineering Research*, 26(2).

Chan, F. L., & Tanksale, A. (2014). Review of recent developments in Ni-based catalysts for biomass gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 428-438.. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.011>

Chan, W. P., Veksha, A., Lei, J., Oh, W. D., Dou, X., Giannis, A., ... & Lim, T. T. (2019). A hot syngas purification system integrated with downdraft gasification of municipal solid waste. *Applied Energy*, 237, 227-240.

Chanthakett, A., Arif, M. T., Khan, M. M. K., & Oo, A. M. T. (2021). Hydrogen production from municipal solid waste (MSW) for cleaner environment. In *Bioenergy Resources and Technologies* (pp. 261–289). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822525-7.00017-2>

Chen, G., Jamro, I. A., Samo, S. R., Wenga, T., Baloch, H. A., Yan, B., & Ma, W. (2020). Hydrogen-rich syngas production from municipal solid waste gasification through the application of central composite design: an optimization study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 33260-33273.

Chianese, S., Loipersböck, J., Malits, M., Rauch, R., Hofbauer, H., Molino, A., & Musmarra, D. (2015). Hydrogen from the high temperature water gas shift reaction with an industrial Fe/Cr catalyst using biomass gasification tar rich synthesis gas. *Fuel Processing Technology*, 132, 39-48.

Chiemchaisri, W., Chiemchaisri, C., Khananthai, U., Kumar, S., Bharti, A., & Fan, M. (2010). Role of final cover soil in regulating volatile organic compounds: emissions from solid waste disposal sites in developing countries. *International Journal of Environment and Pollution*, 43(1-3), 3-15.

Ciuta, S., Tsiamis, D., & Castaldi, M. J. (2018). Fundamentals of Gasification and Pyrolysis. *Gasification of Waste Materials: Technologies for Generating Energy, Gas, and Chemicals from Municipal Solid Waste, Biomass, Nonrecycled Plastics, Sludges, and Wet Solid Wastes*, 13–36. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812716-2.00002-9>

Cohce, M. K., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2010). Thermodynamic analysis of hydrogen production from biomass gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), 4970-4980.

Cortazar, M., Santamaria, L., Lopez, G., Alvarez, J., Zhang, L., Wang, R., ... & Olazar, M. (2023). A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification. *Energy Conversion and Management*, 276, 116496.

Couto, N., Silva, V., Monteiro, E., Rouboa, A., 2017. Exergy analysis of Portuguese municipal solid waste treatment via steam gasification. *Energy Convers. Manag.* 134, 235–246. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.12.040>.

Çelik, S. Ö. (2018). Atıktan türetilmiş yakıt: Yasal çerçeve, Avrupa'daki ve Türkiye'deki durum. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), 63-71.

Dahou, T., Defoort, F., Khiari, B., Labaki, M., Dupont, C., & Jeguirim, M. (2021). Role of inorganics on the biomass char gasification reactivity: A review involving reaction mechanisms and kinetics models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110136.

De, S., Agarwal, A. K., Moholkar, V. S., & Thallada, B. (2018). Coal and biomass gasification. *Recent Advances and Future Challenges; Springer Nature Singapore Pte Ltd.: Singapore*, 521.

Demir, G. K., Açma, H. H., & Yaman, S. (2018). Effect of functional group distribution on combustion characteristics of chars from Afsin Elbistan lignite and RDF. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(3), 320-324.

Demirbas, A. (2007). Effects of moisture and hydrogen content on the heating value of fuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 29(7), 649-655.

Demirtas G., 2019, Gasification of palm pruning waste. Yüksek lisans tezi, Namık Kemal Üniversitesi.

Deng, N., Li, D., Zhang, Q., Zhang, A., Cai, R., & Zhang, B. (2019). Simulation analysis of municipal solid waste pyrolysis and gasification based on Aspen plus. *Frontiers in Energy*, 13(1), 64-70.

Deng, W., Xu, K., Xiong, Z., Chaiwat, W., Wang, X., Su, S., ... & Xiang, J. (2019). Evolution of aromatic structures during the low-temperature electrochemical upgrading of bio-oil. *Energy & Fuels*, 33(11), 11292-11301. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03099>.

Ding, L., Dai, Z.H., Wei, J.T., Zhou, Z.J., Yu, G.S., (2017). Catalytic effects of alkali carbonates on coal char gasification. *J. Energy Inst.* 90, 588-601. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.05.003>

Dong, T. T., & Lee, B. K. (2009). Analysis of potential RDF resources from solid waste and their energy values in the largest industrial city of Korea. *Waste management*, 29(5), 1725-1731. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.022>.

dos Santos, R. G., & Alencar, A. C. (2020). Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(36), 18114-18132.

Edalatpour, M.A., Al-e-hashem, S.M.J.M., Karimi, B., Bahli, B., 2018. Investigation on a novel sustainable model for waste management in megacities: a case study in Tehran municipality. *Sustain. Cities Soc.* 36, 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.019>.

Elkhalifa, S., Al-Ansari, T., Mackey, H. R., & McKay, G. (2019). Food waste to biochars through pyrolysis: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 310-320.

Ellen Macarthur Foundation (Şubat, 2019). *Döngüsel ekonomi sistem diagramı*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>.

Engineering ToolBox, (2003). *Fuels - Higher and Lower Calorific Values*. https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html.

Engineering ToolBox, (2018). *Carbon Monoxide - Density and Specific Weight vs. Temperature and Pressure*. https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-monoxide-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2092.html

Eren, Z., & Erdoğan, E. (2018). Entegre atık yönetimi kapsamında ambalaj atıklarının ayrı toplanması: erzurum ili yakutiye ilçesi örneği. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 4(2), 82-88.

ETKB/EİGM (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı/Enerji İşleri Genel Müdürlüğü). 2019. Genel Enerji Denge Tabloları. ETKB/EİGM Web Sitesi: <<http://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tabloları/Denge-Tabloları>>, Erişim tarihi: 10.02.2020.

European Commission (Mart, 2020). *First circular economy action plan*. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm.

Evans, G., & Smith, C. (2012). 5.11-Biomass to Liquids Technology,” *Comprehensive Renewable Energy*, E.-CA Sayigh, ed. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00515-1>.

Farooq, A., Song, H., Park, Y. K., & Rhee, G. H. (2021). Effects of different Al₂O₃ support on HDPE gasification for enhanced hydrogen generation using Ni-based catalysts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(34), 18085-18092.

Feng, P., Lin, W., Jensen, P. A., Song, W., Hao, L., Li, S., & Dam-Johansen, K. (2020). Characterization of solid residues from entrained flow gasification of coal bio-oil slurry. *Energy & Fuels*, 34(5), 5900-5906.

Ferdan, T., Pavlas, M., Nevrlý, V., Šomplák, R., & Stehlík, P. (2018). Greenhouse gas emissions from thermal treatment of non-recyclable municipal waste. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 12(4), 815-831.

Ferreira, C. R., Infiesta, L. R., Monteiro, V. A., Starling, M. C. V., da Silva Junior, W. M., Borges, V. L., ... & Trovó, A. G. (2021). Gasification of municipal refuse-derived fuel as an alternative to waste disposal: Process efficiency and thermochemical analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 885-893.

Fremaux, S., Beheshti, S. M., Ghassemi, H., & Shahsavan-Markadeh, R. (2015). An experimental study on hydrogen-rich gas production via steam gasification of biomass in a research-scale fluidized bed. *Energy Conversion and Management*, 91, 427-432.

Furusawa, Y., Taguchi, H., Ismail, S. N., Thangavel, S., Matsuoka, K., & Fushimi, C. (2019). Estimation of cold gas efficiency and reactor size of low-temperature gasifier for advanced-integrated coal gasification combined cycle systems. *Fuel Processing Technology*, 193, 304-316.

Gaľko, G., Mazurek, I., Rejdak, M., Jagustyn, B., Hrabak, J., Ouadi, M., ... & Sajdak, M. (2022). Evaluation of alternative refuse-derived fuel use as a valuable resource in various valorised applications. *Energy*, 125920.

Ganda, E. T., Brachi, P., Urciuolo, M., Migliaccio, R., Coppola, A., Scala, F., ... & Ruoppolo, G. (2022). Catalytic pyrolysis of torrefied olive stone for production of potential petrochemical alternatives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.

Gao, N., Salisu, J., Quan, C., & Williams, P. (2021). Modified nickel-based catalysts for improved steam reforming of biomass tar: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111023.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E.J., 2017. The circular economy—a new sustainability paradigm? *J. Cleaner Prod.* 143, 757–768.

Gentil, E. C., Damgaard, A., Hauschild, M., Finnveden, G., Eriksson, O., Thorneøe, S., ... & Ii, R. (2010). Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. *Waste Management*, 30(12), 2636-2648.

Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *J. Clean. Prod.* 114 (2016) 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

Ghisellini, P., Ripa, M., Ulgiati, S., 2018. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *J. Clean. Prod.* 178, 618–643.

Global Syngas Technologies Council. *Biomass Gasification*. <https://www.globalsyngas.org/syngas-production/biomass-gasification>

Gollakota, A. R. K., Kishore, N., & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378-1392.. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>.

Gomez, E., Rani, D. A., Cheeseman, C. R., Deegan, D., Wise, M., & Boccaccini, A. R. (2009). Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. *Journal of hazardous materials*, 161(2-3), 614-626.

González, J. F., Román, S., Bragado, D., & Calderón, M. (2008). Investigation on the reactions influencing biomass air and air/steam gasification for hydrogen production. *Fuel Processing Technology*, 89(8), 764-772.

Gredinger, A., Spörl, R., & Scheffknecht, G. (2018). Comparison measurements of tar content in gasification systems between an online method and the tar protocol. *Biomass and Bioenergy*, 111, 301-307.

Gungor, A., Ozbayoglu, M., Kasnakoglu, C., Biyikoglu, A., & Uysal, B. (2011). Gasification process to produce synthesis gas. *Journal of Environmental Science & Engineering*, 5, 799-804.

Gurjar, R., Raychaudhuri, A., Bagchi, S., & Behera, M. (2021). Biomass to Fuel and Chemicals: Enabling Technologies. In *Biomass, Biofuels, Biochemicals* (pp. 57-90). Elsevier.

Gurjar, S. K., & Gaur, A. (2022). Application of remote sensing and GIS in integrated solid waste management-a short review. *Advanced Organic Waste Management*, 351-362.

Gündüzalp, A. A. & Güven, S. (2016). Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği. *Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi*, ISSN, 1304-2823, Ankara, s. 2-15.

Günkaya, Z., Özkan, M., Özkan, K., Bekgöz, B. O., Yorulmaz, Ö., Özkan, A., & Banar, M. (2022). Prediction of the proximate analysis parameters of refuse-derived fuel based on deep learning approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15.

Habibollahzade, A., Ahmadi, P., & Rosen, M. A. (2021). Biomass gasification using various gasification agents: Optimum feedstock selection, detailed numerical analyses and tri objective grey wolf optimization. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124718.

Halkos, G. E., & Petrou, K. N. (2016). Moving towards a circular economy: Rethinking waste management practices. *Journal of Economic and Social Thought*, 3(2), 220-240. <http://www.kspjournals.org/index.php/JEST/article/view/854/912>.

Hameed, Z., Aslam, M., Khan, Z., Maqsood, K., Atabani, A. E., Ghauri, M., ... & Nizami, A. S. (2021). Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: current status, hybrid technologies and innovative prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110375. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110375>.

Han, L., Liu, Q., Zhang, Y., Lin, K., Xu, G., Wang, Q., ... & Zhong, Y. (2020). A novel hybrid iron-calcium catalyst/absorbent for enhanced hydrogen production via catalytic tar reforming with in-situ CO₂ capture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(18), 10709-10723.

Hannan, M.A., Al Mamun, Abdulla, M., Hussain, A. Basri, H., Begum, R.A, A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management systems: issues and challenges, *Waste Manage.* (Oxford) (2015) Elsevier Ltd., doi:10.1016/j.wasman.2015.05.033.

Haryanto, A., Fernando, S., Murali, N., & Adhikari, S. (2005). Current status of hydrogen production techniques by steam reforming of ethanol: a review. *Energy & Fuels*, 19(5), 2098-2106.

Hervy, M., Remy, D., Dufour, A., & Mauviel, G. (2019). Air-blown gasification of Solid Recovered Fuels (SRFs) in lab-scale bubbling fluidized-bed: Influence of the operating conditions and of the SRF composition. *Energy Conversion and Management*, 181, 584-592.

Ho, G. S., Faizal, H. M., & Ani, F. N. (2017). Microwave induced plasma for solid fuels and waste processing: A review on affecting factors and performance criteria. *Waste Management*, 69, 423-430.

Hofbauer, H., & Materazzi, M. (2019). Waste gasification processes for SNG production. In *Substitute Natural Gas from Waste: Technical Assessment and Industrial Applications of Biochemical and Thermochemical Processes*, 105–160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815554-7.00007-6>

Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., & Kennedy, C. (2013). Environment: Waste production must peak this century. *Nature*, 502(7473), 615-617.

<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/06/20140620-8.htm> . Resmi Gazete Tarihi: 20.06.2014, Resmi Gazete Sayısı: 29036.

<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/04/20150402-2.htm>

Hussain, M., Zabiri, H., Uddin, F., Yusup, S., & Tufa, L. D. (2021). Pilot-scale biomass gasification system for hydrogen production from palm kernel shell (part A): steady-state simulation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-14.

Hydrogen Insights Report (Şubat, 2021). Hydrogen Council, McKinsey & Company <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>

Ibrahimoglu, B., & Yilmazoglu, M. Z. (2020). Numerical modeling of a downdraft plasma coal gasifier with plasma reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3532-3548. Available from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.198>.

IEA World Energy Balances, (2020). IEA Key World Energy Statistic. <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics>.

Ilyas, S., Kim, H., & Srivastava, R. R. (2020). Potential and transformational needs of alternative energy in developing countries. *Alternative Energy Resources*, 1-24.

Inayat, A., Khan, Z., Aslam, M., Shahbaz, M., Ahmad, M.M., Mutalib, M.A., Yusup, S., (2021). Integrated adsorption steam gasification for enhanced hydrogen production from palm waste at bench scale plant. *Int. J. Hydrog. Energy* 46 (59), 30581–30591.

Infiesta, L. R., Ferreira, C. R. N., Trovó, A. G., Borges, V. L., & Carvalho, S. R. (2019). Design of an industrial solid waste processing line to produce refuse-derived fuel. *Journal of Environmental Management*, 236, 715–719. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.017>

International Energy Agency, World Energy Outlook, 2014, https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO_2014_ES_English_WEB.pdf.

Irfan, M., Li, A., Zhang, L., Wang, M., Chen, C., & Khushk, S. (2019). Production of hydrogen enriched syngas from municipal solid waste gasification with waste marble powder as a catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(16), 8051-8061.

Islam, M. W. (2020). A review of dolomite catalyst for biomass gasification tar removal. *Fuel*, 267, 117095.

Iyamu, H., Anda, M., Ho, G. (2020). A review of municipal solid waste management in the BRIC and high-income countries: A thematic framework for low-income countries. *Habitat Int.* 95, 102097.

Janajreh, I., Adeyemi, I., Raza, S. S., & Ghenai, C. (2021). A review of recent developments and future prospects in gasification systems and their modeling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110505.

Jia, S., Ning, S., Ying, H., Sun, Y., Xu, W., & Yin, H. (2017). High quality syngas production from catalytic gasification of woodchip char. *Energy Conversion and Management*, 151, 457-464.

Jiang, Y., Yan, H., Guo, Q., Wang, F., & Wang, J. (2019). Multiple synergistic effects exerted by coexisting sodium and iron on catalytic steam gasification of coal char. *Fuel processing technology*, 191, 1-10. . <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.03.017>

Kabalina, N., Costa, M., Yang, W., Martin, A. (2017) Energy and economic assessment of a polygeneration district heating and cooling system based on gasification of refuse derived fuels. *Energy* 137,696– 705. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.110>.

Kabir, Z., Khan, I., 2020, Environmental impact assessment of waste to energy projects in developing countries: A guideline in the context of bangladesh, *Sustain. Energy Technol. Assess.* 37, 1–13.

Kalair, A. R., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A., Abas, N., & Khan, N. (2021). Waste to energy conversion for a sustainable future. *Heliyon*, 7(10), e08155.

Kalyani, K. A., & Pandey, K. K. (2014). Waste to energy status in India: A short review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>.

Kara, M. (2012). Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 21-28.

Kara, M., Günay, E., Tabak, Y., Durgut, U., Yıldız, Ş. & Enç, V. (2011). Development of Refuse Derived Fuel for Cement Factories in Turkey, *Combustion Science and Technology*, 183, 203–219.

Karimi, M., Habibi-Rezaei, M., Safari, M., Moosavi-Movahedi, A. A., Sayyah, M., Sadeghi, R., & Kokini, J. (2014). Immobilization of endo-inulinase on poly-D-lysine coated CaCO₃ micro-particles. *Food research international*, 66, 485-492.

Kayahan, U., Gül, S., Olgun, H.....& Atakül H. (2009). Enerji Enstitüsünde Kurulu 450 kWth Kapasiteli Akışkan Yatak Gazlaştırma/Yakma Sistemi ve İlk Sonuçlar. *Soma Havzası Linyit Rezervlerinin Enerjide Kullanım Semineri*, 16-18 Nisan 2009, Soma.

Khan, I., 2019. Power generation expansion plan and sustainability in a developing country: a multi-criteria decision analysis. *J. Cleaner Prod.* 220, 707–720. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.161>.

Khan, I., 2020a. Sustainability challenges for the south Asia growth quadrangle: a regional electricity generation sustainability assessment. *J. Cleaner Prod.* 243 (118639), 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118639>.

Khezri, R., Wan Ab Karim Ghani, W. A., Awang Biak, D. R., Yunus, R., & Silas, K. (2019). Experimental evaluation of napier grass gasification in an autothermal bubbling fluidized bed reactor. *Energies*, 12(8), 1517.

Khosasaeng, T., & Suntivarakorn, R. (2017). Effect of equivalence ratio on an efficiency of single throat downdraft gasifier using RDF from municipal solid waste. *Energy Procedia*, 138, 784-788.

Kiang, Y. H. (2018). *Fuel Property Estimation and Combustion Process Characterization: Conventional Fuels, Biomass, Biocarbon, Waste Fuels, Refuse Derived Fuel, and Other Alternative Fuels*. Academic Press.

Klinghoffer, N. B., Themelis, N. J., & Castaldi, M. J. (2013). Waste to energy (WTE): an introduction. In *Waste to energy conversion technology* (pp. 3-14). Woodhead Publishing.

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and Its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46.

Kozal, Ö. E. , Barbaros, R. F. (2020). Sürdürülebilirlik ve Döngüsellik: Kavramsal Bir Çerçeve. Sayın, F. (Ed.) *Döngüsel Ekonomi Makro ve Mikro İncelemeler* (ss.17-43). İzmir: Nobel Akademik Yayıncılık.

Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, 69, 407-422.

Kumari, P., & Mohanty, B. (2020). Hydrogen-rich gas production with CO₂ capture from steam gasification of pine needle using calcium oxide: Experimental and modeling study. *International Journal of Energy Research*, 44(8), 6927-6938.

Kungkajit, C., Prateepchaikul, G., & Kaosol, T. (2015). Influence of plastic waste for refuse-derived fuel on downdraft gasification. *Energy Procedia*, 79, 528-535.

Kushwah, A., Reina, T. R., & Short, M. (2022). Modelling approaches for biomass gasifiers: A comprehensive overview. *Science of The Total Environment*, 155243.

Kuspangaliyeva, B., Suleimenova, B., Shah, D., & Sarbassov, Y. (2021). Thermogravimetric study of refuse derived fuel produced from municipal solid waste of Kazakhstan. *Applied Sciences*, 11(3), 1219. <https://doi.org/10.3390/app11031219>

Lampropoulos, A., Kaklidis, N., Athanasiou, C., Montes-Morán, M. A., Arenillas, A., Menéndez, J. A., ... & Marnellos, G. E. (2021). Effect of Olive Kernel thermal treatment (torrefaction vs. slow pyrolysis) on the physicochemical characteristics and the CO₂ or H₂O gasification performance of as-prepared biochars. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 29126-29141.

Lee, D. J. (2022). Gasification of municipal solid waste (MSW) as a cleaner final disposal route: A mini-review. *Bioresource Technology*, 344, 126217.

Li, H., Mehmood, D., Thorin, E., Yu, Z. (2017). ScienceDirect Biomethane production via anaerobic digestion and biomass gasification Selection and/or peer-review under responsibility of ICAE. *Energy Procedia*, 105, 1172–1177. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.490>.

Li, T., Shoinkhorova, T., Gascon, J., Ruiz-Martinez, J., (2021b). Aromatics Production via Methanol-Mediated Transformation Routes. *ACS Catal.* 11 (13), 7780–7819.

Li, W., Yuan, Z., Chen, X., Wang, H., Wang, L., & Lou, Z. (2021). Green refuse derived fuel preparation and combustion performance from the solid residues to build the zero-waste city. *Energy*, 225, 120252.

Litvinenko, V., & Meyer, B. (2018). Syngas Utilization Technologies. In *Syngas Production: Status and Potential for Implementation in Russian Industry* (pp. 23-46). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70963-5_5

Liu, S., Zhu, J., Chen, M., Xin, W., Yang, Z., & Kong, L. (2014). Hydrogen production via catalytic pyrolysis of biomass in a two-stage fixed bed reactor system. *International journal of hydrogen energy*, 39(25), 13128-13135.

Liu, X., Shen, J., Guo, Y., Wang, S., Chen, B., Luo, L., & Zhang, H. (2023). Technical progress and perspective on the thermochemical conversion of kitchen waste and relevant applications: A comprehensive review. *Fuel*, 331, 125803.

Lu, R., Purushothama, S., Yang, X., Hyatt, J., Pan, W. P., Riley, J. T., & Lloyd, W. G. (1999). TG/FTIR/MS study of organic compounds evolved during the co-firing of coal and refuse-derived fuels. *Fuel Processing Technology*, 59(1), 35-50.

Lu, Y., Jin, H., & Zhang, R. (2019). Evaluation of stability and catalytic activity of Ni catalysts for hydrogen production by biomass gasification in supercritical water. *Carbon Resources Conversion*, 2(1), 95-101.

Ma, J., Zhang, M., Su, B., Wen, G., Yang, Y., Yang, Q., & Ren, Q. (2017). Numerical simulation of the entrained flow hydrolysis of coal in magnetically rotating plasma reactor. *Energy Conversion and Management*, 148, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.018>.

Ma, X., Zhao, X., Gu, J., & Shi, J. (2019). Co-gasification of coal and biomass blends using dolomite and olivine as catalysts. *Renewable Energy*, 132, 509-514.

Malinauskaitė, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., ... & Spencer, N. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 141, 2013-2044. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>.

Materazzi, M., Lettieri, P., Mazzei, L., Taylor, R., & Chapman, C. (2014). Tar evolution in a two stage fluid bed-plasma gasification process for waste valorization. *Fuel Processing Technology*, 128, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.06.028>.

Materazzi, M., Lettieri, P., Taylor, R., & Chapman, C. (2016). Performance analysis of RDF gasification in a two stage fluidized bed-plasma process. *Waste Management*, 47, 256-266.

Mathias, J. (Eylül, 2022). *FTIR oil analysis: how it works and when to use it*. <https://www.innovatechlabs.com/newsroom/2426/ftir-oil-analysis/>

McHenry, M., 2020. Research Institute for Sustainable Energy.

Memon, M.A., 2022. Integrated Solid Waste Management. Division of Technology, Industry, and Economics. United Nations. https://sustainabledevelopment.un.org/content/dsd/csd/csd_pdfs/csd-19/learningcentre/presentations/May%202%20am/1%20-%20Memon%20-%20ISWM.pdf

Menikpura, S. N. M., Gheewala, S. H., & Bonnet, S. (2012). Sustainability assessment of municipal solid waste management in Sri Lanka: problems and prospects. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 14, 181-192.

Menon, S. D., Sampath, K., & Kaarthik, S. S. (2021). Feasibility studies of coconut shells biomass for downdraft gasification. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3133-3137.

Microscopewiki (Ekim, 2022). *Scanning Electron Microscope (SEM)*. <https://microscopewiki.com/scanning-electron-microscope/#working-principle-of-sem>

Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., & Dincer, I. (2021). A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(50), 25385-25412.

Molino, A., Chianese, S., & Musmarra, D. (2016). Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, 25(1), 10-25.

Munajad, A., & Subroto, C. (2018). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy analysis of transformer paper in mineral oil-paper composite insulation under accelerated thermal aging. *Energies*, 11(2), 364. <https://doi.org/10.3390/en11020364>

Murphy, S., & Pincetl, S. (2013). Zero waste in Los Angeles: Is the emperor wearing any clothes?. *Resources, Conservation and Recycling*, 81, 40-51.

Mutlu, N., Tolay, M., Karaca, C., & Öztürk, H. H. Biyokütle Gazlaştırma Teknolojisindeki Gelişmeler. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 15(2), 53-59.

N. Abdoulmoumine, A. Kulkarni, S. Adhikari, Effects of temperature and equivalence ratio on mass balance and energy analysis in Loblolly pine oxygen gasification, *Energy Sci. Eng.* 4 (4) (2016) 256–268.

N. Okafor (2011). *The Disposal of Municipal solid waste*, Springer Science Business Media B.V, Environmental Microbiology of Aquatic and Waste System.

Naqvi, S. R., Prabhakara, H. M., Bramer, E. A., Dierkes, W., Akkerman, R., & Brem, G. (2018). A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resources, conservation and recycling*, 136, 118-129.

Narnaware, S. L., & Panwar, N. L. (2022). Biomass gasification for climate change mitigation and policy framework in India: A review. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100892.

Niu M, Huang Y, Jin B, Wang X. Simulation of syngas production from municipal solid waste gasification in a bubbling fluidized bed using aspen plus. *Ind Eng Chem Res* 2013;52:14768–75. <https://doi.org/10.1021/IE400026B>.

Nobre, C., Longo, A., Vilarinho, C., & Gonçalves, M. (2020). Gasification of pellets produced from blends of biomass wastes and refuse derived fuel chars. *Renewable Energy*, 154, 1294-1303. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.077>

Olatunji, O. O., Akinlabi, S. A., Mashinini, M. P., Fatoba, S. O., & Ajayi, O. O. (2018, October). Thermo-gravimetric characterization of biomass properties: A review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 423, No. 1, p. 012175). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/423/1/012175>.

Oliveira, M., Ramos, A., Ismail, T. M., Monteiro, E., & Rouboa, A. (2022). A Review on Plasma Gasification of Solid Residues: Recent Advances and Developments. *Energies*, 15(4), 1475.

Olufemi, A. S. (2017). Comparative study of temperature effect on gasification of solid wastes in a fixed bed. *Austin Chem. Eng*, 4, 1051.

Ongen, A. (2016). Methane-rich syngas production by gasification of thermoset waste plastics. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(3), 915-924.

Ongen, A., Ozcan, H. K., Elmaslar Ozbas, E., & Pangaliyev, Y. (2019). Gasification of waste tires in a circulating fixed-bed reactor within the scope of waste to energy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(6), 1281-1291.

Ouda, O. K. M., Raza, S. A., Nizami, A. S., Rehan, M., Al-Waked, R., & Korres, N. E. (2016). Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 61, 328340. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.005>.

Ouda, O. K., Raza, S. A., Al-Waked, R., Al-Asad, J. F., & Nizami, A. S. (2017). Waste-to-energy potential in the Western Province of Saudi Arabia. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 29(3), 212-220. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2015.02.002>.

Öngen A., 2010, *Endüstriyel Atıklardan Gazlaştırma ile Sentez Gaz Üretimi*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.

Parthasarathy, P., Narayanan, K.S., (2014). Hydrogen production from steam gasification of biomass: influence of process parameters on hydrogen yield—a review. *Renew. Energy* 66, 570–579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.025>.

Pathak, P., & Srivastava, R. R. (Eds.). (2021). *Alternative Energy Resources: The Way to a Sustainable Modern Society* (Vol. 99). Springer Nature.

Patil, B. S., & Singh, D. N. (2015). Study of sustainable engineered bioreactor landfill (SEBL) for small communities. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(1), 1-14.

Pavlas, M., Touš, M., Bébar, L., & Stehlík, P. (2010). Waste to energy—An evaluation of the environmental impact. *Applied Thermal Engineering*, 30(16), 2326-2332.

Perkins, G. (2020). Production of electricity and chemicals using gasification of municipal solid wastes. In *Waste biorefinery* (pp. 3-39). Elsevier.

Perna, A., Minutillo, M., Lubrano Lavadera, A., & Jannelli, E. (2018). Combining plasma gasification and solid oxide cell technologies in advanced power plants for waste to

energy and electric energy storage applications. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 73, 424-438. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.022>.

Phuphuakrat, T., Nipattummakul, N., Namioka, T., Kerdsuwan, S., & Yoshikawa, K. (2010). Characterization of tar content in the syngas produced in a downdraft type fixed bed gasification system from dried sewage sludge. *Fuel*, 89(9), 2278-2284.

Pieratti, E., Baratieri, M., Ceschini, S., Tognana, L., & Baggio, P. (2011). Syngas suitability for solid oxide fuel cells applications produced via biomass steam gasification process: Experimental and modeling analysis. *Journal of Power Sources*, 196(23), 10038-10049.

Pio, D. T., Tarelho, L. A. C., Tavares, A. M. A., Matos, M. A. A., & Silva, V. (2020). Co-gasification of refused derived fuel and biomass in a pilot-scale bubbling fluidized bed reactor. *Energy Conversion and Management*, 206, 112476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112476>.

Population Reference Bureau, World Population Factsheet (PDF), Population Reference Bureau, 2013, www.pbr.org.

Prado, E. S. P., Miranda, F. S., Petraconi, G., & Potiens Jr, A. J. (2020). Use of plasma reactor to viabilise the volumetric reduction of radioactive wastes. *Radiation Physics and Chemistry*, 168, 108625. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108625>

Pujara, Y., Govani, J., Chabhadiya, K., Patel, H., Vaishnav, K., & Pathak, P. (2020). Waste-to-energy: suitable approaches for developing countries. *Alternative Energy Resources*, 173-191.

Qazi, W. A., Abushammala, M. F., & Azam, M. H. (2018). Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. *Waste Management & Research*, 36(7), 594-605. <https://doi.org/10.1177/0734242X18777800>.

Qin, L., Xu, Z., Zhao, B., Zou, C., Chen, W., & Han, J. (2022). Kinetic study on high-temperature gasification of medical plastic waste coupled with hydrogen-rich syngas production catalyzed by steel-converter ash. *Journal of the Energy Institute*, 102, 14-21.

Rada, E.C., Ragazzi, M., Fedrizzi, P., Web-GIS oriented systems viability for municipal solid waste selective collection optimization in developed and transient economies, *Waste Manage. (Oxford)* 33 (4) (2013) 785– 792, [doi:10.1016/j.wasman.2013.01.002](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.002)

Rajaeifar, M.A., Ghanavati, H., Dashti, B.B., Heijungs, R., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., 2017. Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: a comparative review. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 79, 414–439.

Rajasekhar, M., Rao, N. V., Rao, G. C., Priyadarshini, G., & Kumar, N. J. (2015). Energy generation from municipal solid waste by innovative technologies-plasma gasification. *Procedia Materials Science*, 10, 513-518. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.094>

Rakesh, N., & Dasappa, S. (2018). A critical assessment of tar generated during biomass gasification-Formation, evaluation, issues and mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 1045-1064.

Ramos, A., Monteiro, E., Silva, V., & Rouboa, A. (2018). Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 380-398.

Reed, T. B., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Biomass Energy Foundation.

Ren, J., Cao, J. P., Zhao, X. Y., & Liu, Y. L. (2021). Fundamentals and applications of char in biomass tar reforming. *Fuel Processing Technology*, 216, 106782.

Ren, J., Liu, Y. L., Zhao, X. Y., & Cao, J. P. (2020). Methanation of syngas from biomass gasification: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4223-4243.

Rios, M. L. V., González, A. M., Lora, E. E. S., & del Olmo, O. A. A. (2018). Reduction of tar generated during biomass gasification: A review. *Biomass and bioenergy*, 108, 345-370.

Rodriguez-Alejandro, D. A., Nam, H., Maglinao Jr, A. L., Capareda, S. C., & Aguilera-Alvarado, A. F. (2016). Development of a modified equilibrium model for biomass pilot-scale fluidized bed gasifier performance predictions. *Energy*, 115, 1092-1108.

Rogoff, M. J., & Screve, F. (2019). *Waste-to-energy: technologies and project implementation*. Academic Press.

Rohatgi, A., 2017 Southeast Asia Renewables Market Outlook; Bloomberg New Energy Finance: UK.

Rossi, E., Pecorini, I., Iannelli, R., 2020. Methane oxidation of residual landfill gas in a full-scale biofilter: human health risk assessment of volatile and malodours compound emissions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 1–13 <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08773-6>.

Ruiz, J. A., Juárez, M. C., Morales, M. P., Muñoz, P., & Mendivil, M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174-183.

Saad, J. M., & Williams, P. T. (2016). Catalytic dry reforming of waste plastics from different waste treatment plants for production of synthesis gases. *Waste Management*, 58, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.011>

Saha, P., Uddin, M. H., & Reza, M. T. (2019). A steady-state equilibrium-based carbon dioxide gasification simulation model for hydrothermally carbonized cow manure. *Energy Conversion and Management*, 191, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.012>

Saidi, M., & Ghaffari, A. (2020). Waste management. *Design and Operation of Solid Oxide Fuel Cells: The Systems Engineering Vision for Industrial Application*, 395–444. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815253-9.00014-8>

Saidi, M., Gohari, M. H., & Ramezani, A. T. (2020). Hydrogen production from waste gasification followed by membrane filtration: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(5), 1529-1556.

Sajid, M., Raheem, A., Ullah, N., Asim, M., Rehman, M. S. U., & Ali, N. (2022). Gasification of municipal solid waste: Progress, challenges, and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112815.

Salihoğlu, G., Poroy, Z., & Salihoğlu, N. K. (2019). Kentsel atık yönetiminde yaşam döngüsü değerlendirmesi: Bursa analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(6), 692-699.

Sánchez, A., & Martín, M. (2022). Thermochemical processes. In *Sustainable Design for Renewable Processes*, 133-192. Elsevier.

Sanjaya, E., & Abbas, A. (2023). Plasma gasification as an alternative energy-from-waste (EFW) technology for the circular economy: An environmental review. *Resources, Conservation and Recycling*, 189, 106730.

Shareefdeen, Z., Elkamel, A., & Tse, S. (2015). Review of current technologies used in municipal solid waste-to-energy facilities in Canada. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(7), 1837-1846. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0904-2>.

Sharma, P., Sen, S., Sheth, P. N., & Mohapatra, B. N. (2022). Multizone model of a refused derived fuel gasification: A thermodynamic Semi-empirical approach. *Energy Conversion and Management*, 260, 115621.

Sıfır Atık, 2022. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://sifiratik.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 20.03.2022).

Silva, V., Contreras, F., & Bortoleto, A. P. (2021). Life-cycle assessment of municipal solid waste management options: A case study of refuse derived fuel production in the city of Brasilia, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123696.

Singh, P. P. (2022). Solid waste management through the concept of zero waste. In *Emerging Trends to Approaching Zero Waste* (pp. 293-318). Elsevier.

Slezak, R., Krzystek, L., & Ledakowicz, S. (2019). Steam gasification of pyrolysis char from spent mushroom substrate. *Biomass and Bioenergy*, 122, 336-342.

Smoliński, A., Wojtacha-Rychter, K., Król, M., Magdziarczyk, M., Polański, J., & Howaniec, N. (2022). Co-gasification of refuse-derived fuels and bituminous coal with oxygen/steam blend to hydrogen rich gas. *Energy*, 124210.

Sözer, M., Haykiri-Acma, H., & Yaman, S. (2022). Prediction of calorific value of coal by multilinear regression and analysis of variance. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(1).

Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438.

Stangeland, K., Kalai, D., Li, H., Yu, Z., (2017). The effect of temperature and initial methane concentration on carbon dioxide methanation on Ni based catalysts. *Energy Procedia*, 105, 2016–2021.

Statistics Knowledge Portal, (2022). *Correlation*.
https://www.jmp.com/en_ca/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation.html

Sugiura, K., Minami, K., Yamauchi, M., Morimitsu, S., & Tanimoto, K. (2007). Gasification characteristics of organic waste by molten salt. *Journal of Power Sources*, 171(1), 228-236.

Šuhaj, P., Haydary, J., Husár, J., Steltenpohl, P., & Šupa, I. (2019). Catalytic gasification of refuse-derived fuel in a two-stage laboratory scale pyrolysis/gasification unit with catalyst based on clay minerals. *Waste Management*, 85, 1-10.

Sun, J., Norouzi, O., Mašek, O. (2022). A state-of-the-art review on algae pyrolysis for bioenergy and biochar production. *Bioresour. Technol.* 346, 126258.

Syed-Hassan, S. S. A., & Fuadi, F. A. (2016). Catalytic steam reforming of biomass tar model compound using nickel and cobalt catalysts supported on palm kernel shell char. *Journal of chemical engineering of Japan*, 49(1), 29-34.
<https://doi.org/10.1252/jcej.15we053>

Tan, S., Hashim, H., Lee, C., Taib, M. R., & Yan, J. (2014). Economical and environmental impact of waste-to-energy (WTE) alternatives for waste incineration, landfill and anaerobic digestion. *Energy procedia*, 61, 704-708.

Tarakcıoğlu A., 2015, Gasification of some Turkish lignites in a fluidized bed gasifiers, Master Thesis, Hacettepe University Institute of Science and Technology.

Tezel, Ö., & YILDIZ, E. (2020). Sürdürülebilir Atık Yönetimi Uygulamalarında Dünya ve Türkiye Karşılaşması: EDİKAB Örneği. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 9(2), 35-48.

Tezer, O., Karabag, N., Ozturk, M. U., Ongen, A., & Ayol, A. (2022). Comparison of green waste gasification performance in updraft and downdraft fixed bed gasifiers. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Tezer, Ö., Karabağ, N., Öngen, A., & Ayol, A. (2023). Syngas production from municipal sewage sludge by gasification Process: Effects of fixed bed reactor types and gasification agents on syngas quality. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103042.

Tokmurzin, D., Aiymbetov, B., Abylkhani, B., Yagofarova, A., Sarbassov, Y., Inglezakis, V., ... & Pouloupoulos, S. G. (2019). Fixed-bed gasification and pyrolysis of organic fraction of MSW blended with coal samples. *Chemical Engineering Transactions*, 72, 163-168.

Tsui, T. H., & Wong, J. W. (2019). A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 1(3), 151-167.

Tzou, L., Liu, K. H., & Hu, A. H. (2019). The development of sustainable materials management (SMM) and circular economy in Taiwan. In *Waste Management and Resource Efficiency* (pp. 209-217). Springer, Singapore.

United Nations Environment Programme, 2009. *Developing integrated solid waste management plan training manual, volume 2 assessment of current waste management system and gaps therein*. DTI/1140/JP, UNEP DTIE International Environmental Technology Centre, Japan.

Valizadeh, S., Lam, S. S., Ko, C. H., Lee, S. H., Farooq, A., Yu, Y. J., ... & Park, Y. K. (2021). Biohydrogen production from catalytic conversion of food waste via steam and air gasification using eggshell-and homo-type Ni/Al₂O₃ catalysts. *Bioresource technology*, 320, 124313.

Vamvuka, D., Afthentopoulos, E., & Sfakiotakis, S. (2022). H₂-rich gas production from steam gasification of a winery waste and its blends with industrial wastes. Effect of operating parameters on gas quality and efficiency. *Renewable Energy*, 197, 1224–1232.

Vamvuka, D., Sfakiotakis, S. (2015). Gasification reactivity and mass spectrometric analysis of gases of energy crop chars under a CO₂ atmosphere, *Energy Fuel*, 29, 3215–3223.

Varank, G., Ongen, A., Guvenc, S. Y., Ozcan, H. K., Ozbas, E. E., & Can-Güven, E. (2022). Modeling and optimization of syngas production from biomass gasification. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3345-3358. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03374-3>

Veksha, A., Giannis, A., Oh, W. D., Chang, V. W. C., Lisak, G., & Lim, T. T. (2018). Catalytic activities and resistance to HCl poisoning of Ni-based catalysts during steam reforming of naphthalene. *Applied Catalysis A: General*, 557, 25-38.

Veleva, V. Bodkin, G. and Todorova, S. (2017). The Need For Better Measurement and Employee Engagement to Advance A Circular Economy: Lessons From Biogen's "Zero Waste" Journey. *Journal of Cleaner Production*, 154, 517-529.

Vounatsos, P., Atsonios, K., Itskos, G., Agraniotis, M., Grammelis, P., & Kakaras, E. (2016). Classification of Refuse Derived Fuel (RDF) and Model Development of a Novel Thermal Utilization Concept Through Air-Gasification. *Waste and Biomass Valorization*, 7(5), 1297–1308. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9520-6>

Vuppaladadiyam, A. K., Vuppaladadiyam, S. S. V., Awasthi, A., Sahoo, A., Rehman, S., Pant, K. K., ... & Leu, S. Y. (2022). Biomass pyrolysis: A review on recent advancements and green hydrogen production. *Bioresource Technology*, 128087.

Wall, D. (2012). *Export Gases and their Utilization Potential Technical and Economical Evaluation of selected Processes for Chemical Syngas Generation* (Doctoral dissertation, University of Leoben).

Wang, N., Mao, M., Mao, G., Yin, J., He, R., Zhou, H., ... & Zhi, K. (2021). Investigation on carbide slag catalytic effect of Mongolian bituminous coal steam gasification process. *Chemosphere*, 264, 128500.

Wang, Z., He, T., Qin, J., Wu, J., Li, J., Zi, Z., ... & Sun, L. (2015). Gasification of biomass with oxygen-enriched air in a pilot scale two-stage gasifier. *Fuel*, 150, 386-393.

Weiland, F., Hedman, H., Marklund, M., Wiinikka, H., Öhrman, O., & Gebart, R. (2013). Pressurized oxygen blown entrained-flow gasification of wood powder. *Energy & Fuels*, 27(2), 932-941.

Wilson, D.C., Rodic, L., 2015. Integrated sustainable waste management in developing countries. *Waste Resour. Manag.* 166 (2), 522–568

Wilson, D.C., Rodic, L., Cowing, M.J., Velis, C.A., Whiteman, A.D., Scheinberg, A., Vilches, R., Masterson, D., Stretz, J., Oelz, B., 2015. 'Wasteaware' benchmark indicators for integrated sustainable waste management in cities. *Waste Manage.* 35, 329–342. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.006>

Witjes, S., & Lozano, R. (2016). Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, 37-44.

World Energy Council, (Ekim, 2016). *World Energy Resources /2016* <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>

Wu, W., Zhou, X., Zhang, P., Liu, W., Danzeng, D., Wang, S., & Wang, Y. (2016). Study on characteristics of synthesis gas generation during catalytic gasification of municipal solid waste. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 505-513.

Xiang Y, Cai L, Guan Y, Liu W, Cheng Z, Liu Z. (2020). Study on the effect of gasification agents on the integrated system of biomass gasification combined cycle and oxy-fuel combustion. *Energy*, 206:118131.

Yamaguchi, A., Mimura, N., Shirai, M., & Sato, O. (2017). Bond cleavage of lignin model compounds into aromatic monomers using supported metal catalysts in supercritical water. *Scientific reports*, 7(1), 1-7.

Yan, J., Huang, Q., Lu, S., Li, X., & Chi, Y. (2016). Thermal treatment techniques: incineration, gasification, and pyrolysis. In *Sustainable Solid Waste Management* (pp. 149-185).

Yan, J., Huang, Q., Lu, S., Li, X., & Chi, Y. (2016). Thermal Treatment Techniques: Incineration, Gasification, and Pyrolysis. American Society of Civil Engineers.

Yang, P., Jia, D., Lin, B., Zhuang, X., & Bi, X. (2022). Microwave-assisted catalytic pyrolysis of refuse-derived fuel (RDF) to improve pyrolysis performance and biochar properties. *Fuel Processing Technology*, 227, 107129.

Yasar, A., Sadiq, K., Tabinda, A. B., Ghaffar, A., Rasheed, R., & Iqbal, A. (2021). Gasification of mixed waste at high temperature to enhance the syngas efficiency and reduce

gaseous emissions and tar production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-10. DOI: 10.1080/15567036.2021.1950237

Yin, Y., Yin, H., Wu, Z., Qi, C., Tian, H., Zhang, W., ... & Feng, L. (2019). Characterization of coals and coal ashes with high Si content using combined second-derivative infrared spectroscopy and Raman spectroscopy. *Crystals*, 9(10), 513. <https://doi.org/10.3390/cryst9100513>.

You S. (2010). Study on biomass char catalytic reforming technology of pyrolysis tar. Tianjin, PR China: Tianjin University.

Yucel, O., & Hastaoglu, M. A. (2016). Kinetic modeling and simulation of throated downdraft gasifier. *Fuel Processing Technology*, 144, 145-154.

Zang, G., Jia, J., Shi, Y., Sharma, T., & Ratner, A. (2019). Modeling and economic analysis of waste tire gasification in fluidized and fixed bed gasifiers. *Waste Management*, 89, 201-211.

Zeng, X., Fang, M., Lv, T., Tian, J., Xia, Z., Cen, J., & Wang, Q. (2022). Hydrogen-rich gas production by catalytic steam gasification of rice husk using CeO₂-modified Ni-CaO sorption bifunctional catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 441, 136023.

Zero Waste International Alliance, Zero Waste Definition, (Aralık, 2018). <https://zwia.org/zero-waste-definition>.

Zhai M, Liu J, Wang Z, Guo L, Wang X, Zhang Y, Dong P, Sun J. (2017). Gasification characteristics of sawdust char at a hightemperature steam atmosphere. *Energy*;128,509-18.

Zhang, L., Wu, W., Siqu, N., Dekyi, T., & Zhang, Y. (2019). Thermochemical catalytic-reforming conversion of municipal solid waste to hydrogen-rich synthesis gas via carbon supported catalysts. *Chemical Engineering Journal*, 361, 1617–1629. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.115>

Zhang, Z., Liu, L., Shen, B., Wu, C. (2018). Preparation, modification and development of Ni-based catalysts for catalytic reforming of tar produced from biomass gasification. *Renew Sustain Energy Rev*,94,1086–109.

Zhao, X. Y., Ren, J., Cao, J. P., Wei, F., Zhu, C., Fan, X., ... & Wei, X. Y. (2017). Catalytic reforming of volatiles from biomass pyrolysis for hydrogen-rich gas production over limonite ore. *Energy & Fuels*, 31(4), 4054-4060.

Zhou, X., Liu, W., Zhang, P., & Wu, W. (2016). Study on Heavy Metals Conversion Characteristics During Refused Derived Fuel Gasification Process. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 514–519. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.070>

Żogała, A., (2014) Equilibrium Simulations of Coal Gasification – Factors Affecting Syngas Composition, *Journal of Sustainable Mining*, 13(2), 30-38.

% 12	% 10	% 1	% 3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	% 7
2	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	% 1
3	Submitted to Anadolu University Öğrenci Ödevi	<% 1
4	muhendislik.cu.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
5	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<% 1
6	Submitted to Bursa Teknik Üniversitesi Öğrenci Ödevi	<% 1
7	avesis.iuc.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
8	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	<% 1
9	polen.itu.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1

ETİK KURUL İZİN YAZISI

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Şeyma MERCAN



KURUM İZNİ YAZILARI

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Şeyma MERCAN

