T.C.

İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MOBİLYA ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN YAKIT PELETLERİN TERMOKİMYASAL PROSESLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kemal PARLAK

DANIŞMAN
Prof. Dr. Nural YILGÖR

Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Orman Ürünleri Kimyası ve Teknolojisi Programı

İSTANBUL-2022

Bu çalışma, 5.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Orman Endüstri Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Nural YILGÖR(Danışman)

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Orman Fakültesi

Prof. Dr. Gamze VARANK

Yıldız Teknik Üniversitesi

İnşaat Fakültesi

Doç. Dr. Atakan ÖNGEN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Mühendislik Fakültesi

Unvan Adı SOYADI

Üniversite

Fakülte

Unvan Adı SOYADI

Üniversite

Fakülte

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin FYL-2021-35741 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

"Mobilya Atıklarından Elde Edilen Yakıt Peletlerin Termokimyasal Proseslerle Değerlendirilmesi" adlı bu çalışma İ.Ü.-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Orman Endüstri Mühendisliği Programı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Yapılan bu çalışma ile gündelik hayatımızda problem haline gelen ahşap mobilya atıkları sorununa bir nebze olsun ışık tutarak, bilime ve insanlığa katkı sağlanmak amaçlanmıştır.

Bu konu üzerine çalışmaya yönlendirip varolan güncel sorunlara ışık tutmayı ve insanlığa fayda sağlamayı amaçlayan, fikirleri ile yol gösteren, bilimsel görüşleri ile aydınlatan, aydınlık bir gelecek yaratmaya çabalayan ve üzerimde çok emeği olan saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Nural YILGÖR'e ve saygıdeğer hocam Doç. Dr. Atakan ÖNGEN'e en içten samimi teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma süresince bağımlı veya bağımsız bir şekilde görüş ve uzmanlıklarından faydalandığım ve belirli fikirlerin olgunlaşmasında katkıda bulunan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Celil ATİK'e ve Prof. Dr. Gülnur MERTOĞLU ELMAS'a teşekkür ederim.

Çalışmanın gerçekleşmesinde ahşap atık mobilya örneklerinin toplanmasında, temin edilmesinde katkılarını esirgemeyen ve destek olan Beşiktaş Belediyesi'ne, Orman Genel Müdürlüğü'ne ve Beşiktaş Belediyesi Çevre Koruma ve Kontrol Müdürlüğü Müdürü Ali Osman ASILSOY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerini esirgemeyen, samimi ortam yaratan ve her zaman yanımda olan annem Gülen PARLAK'a, babam Abbas PARLAK'a, ablam Sedef KARTAL'a, kardeşim Onur PARLAK'a ve diğer aile fertlerime teşekkür ederim.

Bu süreç içerisinde yanım olan, biraz olsun farklı bakmayı ve düşünmemi sağlayan arkadaşlarım; Gökhan ÖNCEL'e, Mustafa GENÇ'e, Uğur Kaan KAPTAN'a ve Evren ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2021 Kemal PARLAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xiv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xviii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **4**
2.1. ATIK KAVRAMI 4
2.1.1. Atık Yönetimi 4
2.1.2. Sürdürülebilir Atık Yönetimi 5
2.1.3. Sıfır Atık Yaklaşımı 6
2.2. AHŞAP MOBİLYA ATIKLARI 7
2.2.1. Mobilya Atıklarının Potansiyeli 8
2.2.2. Türkiye'de Mobilya Üretimi ve Tüketimi 10
2.3. PELET ÜRETİMİ 11
2.3.1 Pelet Üretimi için Biyokütle Kullanımı 12
2.3.2. Pelet Üretim Aşamaları ve Mekanizması 14
2.3.3. Peletleme Sürecini Etkileyen Faktörler 15
2.3.4. Dünya'da ve Türkiye'de Pelet Kullanımı 17
2.4. ENERJİ KAVRAMI 19
2.4.1. Dünya'da ve Türkiye'de Enerji 20
2.4.2. Atıktan Enerji 22
2.5.TERMOKİMYASAL SÜREÇLER 22
2.5.1. Yakma 22
2.5.2. Sıvılaştırma 23
2.5.3. Piroliz 23
2.5.4. Gazlaştırma 24

2.5.4.1. Gazlaştırma prosesinin mekanizması *24*
2.6. LİTERATÜR ÖZETİ 24
3. MALZEME VE YÖNTEM 32
3.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER VE HAZIRLIK SÜRECİ 32
3.1.1. Materyallerin Öğütülmesi 32
3.2. AHŞAP MOBİLYA ATIKLARININ PELETLENMESİ 34
3.3. DENEYSEL YÖNTEMLER 35
3.3.1. Nem Miktarı Tayini 35
3.3.2. Kül Miktarı Tayini 35
3.3.3. Uçucu Madde Tayini 35
3.3.4. Sabit Karbon 36
3.3.5. Elementel Analiz 36
3.3.6. Termogravimetrik Analiz (TGA) 36
3.3.7. FTIR-ATR Analizi 37
3.3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi 38
3.3.9. Isıl Değer Analizleri 39
3.3.10. Gaz Analizleri 39
3.3.11. Isıl Değerlerin Hesaplanması 40
3.3.12. Reaktör Tasarımı 41
3.3.13. Gaz Toplama Torbası 42
3.3.14. Gaz Hacminin Hesaplanması 42
3.3.15. Soğuk Gaz Verimliliği 43
3.3.16. İstatistiksel Veri Analizi 43
4. BULGULAR 46
4.1. AHŞAP MOBİLYA ATIK KARAKTERİZASYONU 46
4.2. GAZLAŞTIRMA DENEYLERİ 52
4.2.1. Masif Atık Numunesi Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları 52
4.2.1.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları *52*
4.2.1.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları *58*
4.2.2. Yonga Levha Atık Numunesi Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları 61
4.2.2.1.Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları *61*
4.2.2.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları *67*
4.2.3. Masif Atık Numunesinin Piroliz Ön işlemli Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları 70

4.2.4. Yonga Levha Atık Numunesinin Piroliz Ön işlemli Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları 73
4.2.5. Masif Atık Numunesinden Üretilen Peletlerin Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları 76
4.2.5.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları 77
4.2.5.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları 79
4.2.6. Yonga Levha Atık Numunesinden Üretilen Peletlerin Gazlaştırılması Sentez Gaz Analiz Sonuçları 81
4.2.6.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları 81
4.2.6.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları 83
4.3. GAZLAŞTIRMA ÜRÜN ANALİZLERİ 85
4.3.1. Soğuk Gaz Verimliliği Sonuçları 85
4.3.2. Gazlaştırma Sonucu Oluşan Katı Ürünlerin Isıl Değerleri 86
4.3.2. Katı Ürünlerin Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi Görüntüleri 87
4.4. GAZLAŞTIRMA VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ 100
4.4.1. Korelasyon Analizi 101
4.4.2. Regresyon Analizi 101
4.4.3. ANOVA testi 103
4.4.4. Gazlaştırma Parametrelerinin Etkisi 107
4.4.4.1. Gazlaştırma Ajan Debisinin Etkisi 108
4.4.4.2. Sıcaklığın Etkisi 110
4.4.4.3. Yakıt Türünün Etkisi 112
4.4.4.4. Farklı Gazlaştırma Ajan Türlerinin Proses Üzerine Etkisi 115
4.4.4.5. Örnek Miktarının Etkisi 116
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 119
KAYNAKLAR 128
EKLER 138
ÖZGEÇMİŞ 144

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Sürdürülebilir Atık Yönetimi Hiyerarşisi (Adipah ve Kwame, 2018). 6

Şekil 2.2: Mobilya Atık Örnekleri (Başakşehir Belediyesi, 2019; Vender, 2019). 8

Şekil 2.3: 2006-2015 Türkiye Mobilya Üretimi (MÜSİAD, 2018). 10

Şekil 2.4: 2006-2015 Türkiye Mobilya Tüketim Miktarı (MÜSİAD, 2018). 11

Şekil 2.5: Odunsu ve Odunsu Olmayan Pelet Örnekleri. 12

Şekil 2.6: Pelet üretim aşamaları (Küçükkaya, 2019). 14

Şekil 2.7: Pelet üretim mekanizmaları (Stelte vd., 2012). 15

Şekil 2.8: Biyokütlenin silindir kalıplarına sıkıştırılması (Stelte vd. 2012).....15

Şekil 2.9: Avrupa'daki Pelet Üretim Miktarı (Calderon vd., 2019). 17

Şekil 2.10: Avrupa'daki Pelet Tüketim Miktarı (Calderon vd., 2019). 18

Şekil 2.11: Dünya'daki Pelet Üretim ve Tüketim Miktarları (Calderon vd., 2019) 18

Şekil 2.12: Küresel Pelet Üretiminin Evrimi (Calderon vd., 2019). 19

Şekil 2.13: 1995-2020 yılları arasında gerçekleşen dünya enerji tüketimi (BP, 2021).....20

Şekil 2.14: 1995-2020 yılları arasında gerçekleşen küresel birincil enerji payları (BP, 2021). 21

Şekil 2.15: Türkiye'de tüketilen enerjinin kaynakları (KPMG, 2020). 22

Şekil 3.1: Beşiktaş belediyesi çevre mühendisliği tarafından toplanan ahşap mobilya örnekleri. 32

Şekil 3.2: Yongalama makinası.....33

Şekil 3.3: Ahşap mobilya atıklarının yongalanmadan önceki görüntüleri. 33

Şekil 3.4: Ahşap mobilya atıklarının yongalanmış görüntüleri. 33

Şekil 3.5: Öğütücü cihazı. 34

Şekil 3.6: Pelet makinası. 34

Şekil 3.7: Nem tayini yapılan örnekler. 35

Şekil 3.8: Kül analiz cihazı. 35

Şekil 3.9: Thermo-Flash 2000 elementel analiz cihazı. 36

Şekil 3.10: Termogravimetrik (TGA) analiz cihazı. 37

Şekil 3.11: FTIR-ATR cihazı. 38

Şekil 3.12: Taramalı elektron mikroskobu cihazı. 39

Şekil 3.13: Bomba kalorimetre cihazı. 39

Şekil 3.14: ABB sürekli gaz analizör cihazı. 40

Şekil 3.15: Laboratuvarda kullanılan reaktör düzeneği. 41

Şekil 3.16: Reaktör sisteminin tanıtımı. 42

Şekil 3.17: Gaz toplama torbası. 42

Şekil 3.18: Gaz hacmi ölçüm yöntemi (Kaya, 2016). 43

Şekil 4.1: Ahşap mobilya atık örneklerinin FTIR analiz sonuçları. 47

Şekil 4.2: 10 °C / dk sıcaklık hızında masif atık örneğin hava ortamındaki termogravimetrik analizi. 48

Şekil 4.3: 10°C / dk sıcaklık hızında masif atık numunesinin azot gazı ortamındaki termogravimetrik analizi. 49

Şekil 4.4: 10 °C / dk sıcaklık hızında yonga levha atık numunesinin hava ortamındaki termogravimetrik analizi. 50

Şekil 4.5: 10°C / dk sıcaklık hızında yonga levha atık numunesinin azot gazı ortamındaki termogravimetrik analizi. 51

Şekil 4.6: Masif atık örneğinin 0.05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 53

Şekil 4.7: Masif atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 54

Şekil 4.8: Masif atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 55

Şekil 4.9: Masif atık örneğinin 0.4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 56

Şekil 4.10: Masif atık örneğinin 0.05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 57

Şekil 4.11: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 58

Şekil 4.12: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 59

Şekil 4.13: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 60

Şekil 4.14: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 61

Şekil 4.15: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 62

Şekil 4.16: Yonga levha atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 63

Şekil 4.17: Yonga levha atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 64

Şekil 4.18: Yonga levha atık örneğinin 0,4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 65

Şekil 4.19: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 66

Şekil 4.20: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 67

Şekil 4.21: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 68

Şekil 4.22: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 69

Şekil 4.23: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 70

Şekil 4.24: Masif atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 71

Şekil 4.25: Masif atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 72

Şekil 4.26: Masif atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 73

Şekil 4.27: Yonga levha atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 74

Şekil 4.28: Yonga levha atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 75

Şekil 4.29: Yonga levha atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 76

Şekil 4.30: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 77

Şekil 4.31: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 78

Şekil 4.32: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 79

Şekil 4.33: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 80

Şekil 4.34: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 82

Şekil 4.35: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 83

Şekil 4.36: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 84

Şekil 4.37: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 85

Şekil 4.38: Katı ürünlerin (biochar) kalorifik değeri. 86

Şekil 4.39: Masif atık örneği ısıl işlem görmemiş TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)). 87

Şekil 4.40: Yonga levha atık örneğinin ısıl işlem görmemiş TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)). 88

Şekil 4.41: Masif atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)). 89

Şekil 4.42: Masif atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....90

Şekil 4.43: Masif atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....91

Şekil 4.44: Yonga levha atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....92

Şekil 4.45: Yonga levha atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....93

Şekil 4.46: Yonga levha atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....94

Şekil 4.47: Masif atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....95

Şekil 4.48: Masif atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....96

Şekil 4.49: Masif atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....97

Şekil 4.50: Yonga levha atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....98

Şekil 4.51: Yonga levha atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....99

Şekil 4.52: Yonga levha atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800))....100

Şekil 4.53: Gazlaştırma ajan debisinin hacimsel olarak en yüksek CH_4, CO ve H_2 gazlarına etkisi....108

Şekil 4.54: Gazlaştırma ajan debisinin ortalama CH_4, CO ve H_2 gazlarına etkisi. 109

Şekil 4.55: Ajan debisi değişiminin H_2/CO ve H_2 hacimsel yüzdesine etkisi. 109

Şekil 4.56: Ajan debi değişiminin gaz dağılımı ve ısıl değer üzerine etkisi. 110

Şekil 4.57: Sıcaklık değişiminin CH_4, CO ve H_2 gazlarına etkisi.....111

Şekil 4.58: Sıcaklık değişiminin ısıl değer ve H_2/CO oranı üzerine etkisi. 111

Şekil 4.59: Yakıt türü değişiminin hacimsel olarak en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi. 112

Şekil 4.60: Yakıt türü değişiminin hacimsel olarak ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi. 113

Şekil 4.61: Yakıt türü değişiminin gaz dağılımı ve sıcaklık üzerine etkisi.....113

Şekil 4.62: Yakıt türünün hacimsel olarak en yüksek H_2 gazına ve en yüksek ısıl değeri üzerine etkisi.....114

Şekil 4.63: Yakıt türünün hacimsel olarak ortalama H_2 gazına ve ortalama ısıl değeri üzerine etkisi.....114

Şekil 4.64: Gazlaştırma ajan türünün en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi. 115

Şekil 4.65: Gazlaştırma ajan türünün ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi. 116

Şekil 4.66: Örnek miktarının hacimsel olarak en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi. 117

Şekil 4.67: Örnek miktarının hacimsel olarak ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi. 117

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Hidrojen, Metan ve Karbonmonoksit gazlarına ait yoğunluk ve ısıl değer hesaplamaları (URL1). 40

Tablo 3.2: Deneyde uygulanan parametreler ve deneylerin kodlanması.....45

Tablo 4.1: Ahşap mobilya atıkların elementel analizi ve kalorifik değeri. 46

Tablo 4.2: Ahşap mobilya atık örneklerinin kimyasal analizi. 46

Tablo 4.3: Ahşap mobilya atık örneklerinin FTIR değerlendirme sonuçları.....47

Tablo 4.4: Ahşap mobilya atıklarının hava ve azot gazı ortamındaki termal bozunma aralıkları ve ağırlık kayıpları. 51

Tablo 4.5: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....52

Tablo 4.6: Masif atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....53

Tablo 4.7: Masif atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....54

Tablo 4.8: Masif atık örneğinin 0,4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....55

Tablo 4.9: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....56

Tablo 4.10: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....57

Tablo 4.11: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....58

Tablo 4.12: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....59

Tablo 4.13: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.....60

Tablo 4.14: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 61

Tablo 4.15: Yonga levha atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 62

Tablo 4.16: Yonga levha atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 63

Tablo 4.17: Yonga levha atık örneğinin 0,4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 64

Tablo 4.18: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 65

Tablo 4.19: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 66

Tablo 4.20: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 67

Tablo 4.21: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 68

Tablo 4.22: Yonga levha atık numunesinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları. 69

Tablo 4.23: Masif atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 70

Tablo 4.24: Masif atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 71

Tablo 4.25: Masif atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 72

Tablo 4.26: Yonga levha atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 74

Tablo 4.27: Yonga levha atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 75

Tablo 4.28: Yonga levha atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 76

Tablo 4.29: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 77

Tablo 4.30: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 L/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 78

Tablo 4.31: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 79

Tablo 4.32: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 80

Tablo 4.33: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 81

Tablo 4.34: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 82

Tablo 4.35: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 83

Tablo 4.36: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi. 84

Tablo 4.37: Yapılan deneylerin soğuk gaz verimliliği sonuçları 85

Tablo 4.38: Deney parametrelerinin korelasyon analizi. 101

Tablo 4.39: Model özeti ve regresyon analizi 102

Tablo 4.40: Regresyon analizi. 102

Tablo 4.41: Isıl değer <600 °C ve ≥600 °C şartlarına göre Anova testi sonuçları. 103

Tablo 4.42: Isıl değer <700 °C ve ≥700 °C şartlarına göre Anova testi sonuçları. 104

Tablo 4.43: Isıl değer <800 °C ve ≥800 °C şartlarına göre ANOVA testi sonuçları. 105

Tablo 4.44: Isıl değerin 600-900 °C sıcaklık şartlarına göre Anova testi sonuçlarının karşılaştırılması 106

Tablo 5.1: Kimyasal analiz ve ısıl değer sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması. 119

Tablo 5.2: Gazlaştırma verilerinin literatür ile karşılaştırılması.....123

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
CO	: Karbonmonoksit gazı
CH_4	: Metan gazı
CO	: Karbon monoksit
CO_2	: Karbon dioksit
H_2	: Hidrojen gazı
W	: Watt
N_2	: Azot gazı
O_2	: Oksijen gazı
g	: Gram
t	: Ton

Kısaltmalar	Açıklama
ANOVA	: Analysis of Variance- Değişkenlik Analizi
AB	: Avrupa Birliği
EAY	: Entegre Atık Yönetimi
EPA	: Çevre Koruma Ajansı(Environmental Protection Agency)
FTIR	: Fourier Transform Infrared Spektrometri
OYLL	: Orta Yoğunluklu Lif Levha (Medium Density Fiberboard)
YLL	: Yönlendirilmiş Lif Levha (Oriented Strand Board)
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
ABB	: ASEA Brown Boveri

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MOBİLYA ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN YAKIT PELETLERİN TERMOKİMYASAL PROSESLERLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Kemal PARLAK

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nural YILGÖR

Bu tez çalışması ile ahşap mobilya atıklarının termokimyasal yöntemler ile katma değeri yüksek ve çevre dostu ürünlere dönüştürülerek değerlendirilebilme olanakları araştırılmıştır. Beşiktaş Belediyesi Çevre Müdürlüğü tarafından kentsel atık olarak toplanan mobilya atıklarından, yonga levha masa ve masif ahşap masa atıkları temin edilmiştir. Bu iki farklı atık örneklerinde piroliz ön işlemli gazlaştırma ve gazlaştırma işlemleri yapılmıştır. Deneyler, yukarı akışlı sabit yataklı reaktörde, 700, 800 ve 900°C sıcaklıkta, kuru hava ve saf oksijen ajan ortamında ve farklı akış debi parametrelerinde gazlaştırma ve piroliz ön işlemli gazlaştırma işlemleri şeklinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ahşap mobilya atık örneklerinin optimum gazlaştırma deney parametreleri belirlenmiştir. Örneklerin karakterizasyonunu ortaya çıkarmak için nem tayini, kül miktarı tayini, uçucu organik madde tayini, sabit karbon miktarı, FTIR, TEM ve TGA analizleri yapılmıştır.

Masif atık örneği deneyleri sonucunda hidrojen gazının hacimce %51'lere ulaştığı, metan gazının hacimce %26'lara ulaştığı ve karbonmonoksit gazının hacimce %33'lere ulaştığı ve ısıl değerin 3878 kcal/m^3 olduğu tespit edilmiştir. Yonga levha atık örneği deneyleri sonucunda hidrojen gazının hacimce %46'lara ulaştığı, metan gazının hacimce %42'lere ulaştığı ve

karbonmonoksit gazının hacimce %24'lere ulaştığı ve ısıl değerin 5531 kcal/m^3 olduğu belirlenmiştir. Masif pelet atık örneği deneyleri sonucunda hidrojen gazının hacimce %57'lere ulaştığı, metan gazının hacimce %34'lere ulaştığı ve karbonmonoksit gazının hacimce %38'lere ulaştığı ve ısıl değerin 5005 kcal/m^3 olduğu tespit edilmiştir. Yonga levha pelet atık örneği deneyleri sonucunda hidrojen gazının hacimce %51'lere ulaştığı, metan gazının hacimce %19'lara ulaştığı ve karbonmonoksit gazının hacimce %33'lere ulaştığı ve ısıl değerin 3469 kcal/m^3 olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, belediyelere katı atık yükü oluşturan masif atık örnekleri ve yonga levha atık örneklerinin, pelet haline getirildikten sonra termokimyasal işlemler ile daha etkin bir şekilde değerlendirilebileceği kanaatine varılmıştır.

Aralık 2021, 166 sayfa.

Anahtar kelimeler: Ahşap mobilya atıkları, Piroliz, Gazlaştırma, Pelet, Termokimyasal

SUMMARY

M.Sc. THESIS

THESIS TITLE

Kemal PARLAK

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Forest Industry Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Nural YILGÖR

In this thesis study, the possibilities of converting wooden furniture wastes into high-value-added and environmentally friendly products with thermochemical methods were investigated. Particleboard table and solid wood table wastes were obtained from furniture wastes collected as urban waste by the Environment Directorate of Beşiktaş Municipality. In these two different waste samples, pyrolysis pretreatment gasification and gasification processes were carried out. The experiments were carried out as gasification and pyrolysis pretreatment gasification processes in an updraft fixed bed steel reactor, at 700, 800, and 900 °C, in the presence of dried air and pure oxygen agent and at different flow rate parameters. According to the results obtained, optimum gasification experiment parameters for wooden furniture waste samples were determined. In order to reveal the characterization of the samples, moisture content, ash content, volatile organic matter, fixed carbon, FTIR-ATR, SEM, and TGA analyses were performed.

As a result of the solid waste sample experiments, it was determined that hydrogen gas reached 51% by volume, methane gas reached 25% by volume, carbon monoxide gas reached 33% by volume, and the heating value was 3878 kcal/m^3. As a consequence of the particleboard waste sample experiments, it was determined that hydrogen gas reached 46% by volume, methane gas reached 42% by volume, carbon monoxide gas reached 24 % by volume, and the heating value

was 5531 kcal/m^3. As a result of the solid wood waste pellet sample experiments, it was determined that hydrogen gas reached 57% by volume, methane gas reached 34% by volume, carbon monoxide gas reached 38% by volume, and the heating value was 5005 kcal/m^3. As a consequence of the particleboard waste pellet sample experiments, it was determined that hydrogen gas reached 51% by volume, methane gas reached 19% by volume, carbon monoxide gas reached 33% by volume, and the heating value was 3469 kcal/m^3.

In conclusion, it was concluded that solid waste samples and particleboard waste samples, which constitute solid waste load for municipalities, can be evaluated more effectively with thermochemical processes after they are pelletized.

December 2021, 166 pages.

Keywords: Furniture waste, Pyrolysis, Gasification, Pellet, Thermochemical

1. GİRİŞ

Enerji, insanoğlu yaşamının içerisinde en temel ihtiyaçlardan biri haline gelen, insanlığın ilerlemesinde sanayileşme, şehirleşme ve endüstrileşmeyle birlikte artış gösteren ve artık günümüzde vazgeçilmez olan temel bir kavramdır. Dünya nüfusunun artmasıyla süregelen enerji ihtiyacına olan talebin karşılanmasında sonlu olan fosil kaynakların (kömür, doğalgaz ve petrol vb.) bundan böyle yeterli olamayacağı, bu kaynakların kullanılmaya devam edilmesi durumunda günümüzde yaşadığımız sera gazı emisyonları problemlerinin daha yoğun olacağı bilinen bir gerçektir.

İnsanların yaşam döngüsü içerisinde çeşitli faaliyetler sonucu kullanmış oldukları ürünlerin ömrünü tamamlaması ile atıklar oluşur. Küreselleşen dünyada teknolojik gelişmelerin artması, tüketim alışkanlıklarının değişmesi enerji tüketimini ve ortaya çıkan atık miktarını da arttırmaktadır. Konvansiyonel enerji üretim yöntemleri ile fosil yakıtların kullanılmaya devam etmesi çevre kirliliğinin artmasında büyük rol oynamaktadır. Fosil kaynakların kullanılmaya devam edilmesi ile ortaya çıkan sera gazı etkilerinin daha yaygın şekilde hissedilmesi ve buna bağlı olarak çevre kirliliğindeki yoğun artış, atık yükünün artması gibi insan hayatını olumsuz olarak etkileyen faktörler insanları daha temiz bir çevre yaratmaya yöneltmiştir. Bunun sonucunda sera gazı emisyonlarını azaltacak önlemlerin alınması ve temiz enerji elde ederek daha yaşanılası bir çevre yaratma isteği çok daha fazla talep edilir olmuştur. Bu nedenle hem atıkların akıllı çözümler ile daha etkin kullanılıp atık yükünün azaltılması, hem de sera gazı emisyonlarının oluşturduğu bu etkiyi olabildiğince azaltmak için Türkiye ve Dünya politikalarının yenilenebilir enerjiye yönelmesi kaçınılmaz olmuştur.

Yenilenebilir enerji, kaynağında azalmadan sürekli olarak kendini yenileyen doğal çevreden ulaşılan bir enerji türüdür diye tanımlanabilir. Temiz çevre bilincinin artması ile birlikte fosil yakıtlara olan geleneksel bağımlılıkların karbondioksit emisyonlarına, sera gazı sorunlarına ve çevre kirliliğine yol açtığına olan inanç giderek artmaktadır ve insanlardaki bu farkındalık her geçen gün arttığı için devletlerin ve yerel yönetimlerin yenilenebilir enerji yönelimi de artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına bakıldığında rüzgâr, güneş, biyokütle, okyanus (gelgit ve dalga), jeotermal, hidrojen ve hidroelektrik enerji kaynakları sayılabilir. Bu enerji kaynakları teknolojinin gelişmesiyle birlikte günümüzde daha etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Owusu ve Asumadu-Sarkodie, 2016).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının günümüzde ihtiyaç duyulan tüm enerjiyi karşılaması mümkün gözükmemektedir. Ayrıca bugünkü teknolojiler ile kısa ve orta vadede ileriye yönelik artan arzı karşılaması da mümkün gözükmemektedir. Dünya üzerinde halen fosil kaynaklar birincil enerji kaynakları olarak kullanılmaya devam edecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanılmasında ülkelerin gelişmişlik düzeyleri ve toplumların bilinçlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının da sürdürülebilir olarak dengelenmesi ön plana çıkmaktadır. Sürdürülebilirlik, var olan kaynağın gelecek nesillere de etkin bir şekilde kullanım sağlaması, sosyal, kültürel, çevresel olarak da kaynakların korunmasını ifade etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının çevre (ekolojik denge) ve insan açısından etkilenmemesi (aşırı tüketim) için bu kaynakların sürdürülebilirliğinin sağlanması gerekmektedir.

Biyokütle enerjisi, yenilenebilir enerjiler arasında büyük potansiyele sahip olan ve yaygın olarak kullanılan kaynaklardan biridir. Yakın gelecekte enerji elde etmede biyokütlenin daha etkin bir rol oynayacağı düşünülmektedir. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında; ısınma, elektrik üretimi ve ulaşım gibi birçok farklı amaç için kullanılabilmesinin yanı sıra sıvı forma çevrilen tek enerji türüdür. Biyokütle, kolay yetiştirilebilen, bol miktarda bulunan, karbon emisyonlarına nötr etki yapan, ülkelerin fosil kaynaklara olan bağımlılıklarının azalmasına katkı sağlayan, kırsal alanlarda iş imkanları yaratan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır (Wang vd., 2020).

Biyokütle enerjisi, klasik ve ileri teknolojik uygulamalar ile gündelik yaşantımızda büyük bir yer kapsamaktadır. İnsanların en temel ihtiyaçlarından biri olan ısınma, kırsal kesimlerde halen biyokütlenin yakılması sonucu elde edilmektedir. İnsan ihtiyaçlarının artması, nüfusun artması, teknolojinin gelişmesi, tüketimin artması her alanda olduğu gibi ormancılık ve tarımsal faaliyetleri de arttırmıştır. Bu bağlamda, endüstriyel atıklar, ormancılık ve tarımsal atıklar ciddi bir potansiyele sahip biyokütle kaynaklarıdır (Toklu, 2017). Ayrıca, biyokütleyi işleyen endüstriyel sektörler tarafından oluşturulan ürünler ve kullanıcılar tarafından kullanım ömrünü tamamladığı için elden çıkarılan (ikincil tüketim sonucu) katı biyokütle atıkları (organik atıklar, mobilya atıkları vb.) da mevcuttur.

Oluşan katı biyokütle atıkların termokimyasal süreçler (piroliz, gazlaştırma) ile katı, sıvı ve gaz formuna çevrilerek daha etkin değerlendirilmesi mümkündür. Biyokütle enerjisi, elektrik üretmek, ısı üretmek, yakıt üretmek, kimyasal ürünler elde etmek gibi birçok enerji ihtiyacını

karşılamak için kullanılabilir. Biyokütlenin katma değerli ürünlere çevrilmesi termokimyasal yöntemler olan piroliz ve gazlaştırma ile mümkündür (Öngen vd., 2019).

Mobilya sektörünün ülkemizde en gelişmiş sektörlerden biri olması ve üretimde yoğun bir rekabet olması mobilya satın alımını daha kolaylaştırmış ve tüketici eskiden belki ömür boyu kullanmayı düşünerek aldığı mobilyayı artık moda ve trendlere göre satın alır hale gelmiştir. Bu durum da mobilya atıkları olarak adlandırılabilecek bir katı atık yükü oluşturmaktadır. Diğer pek çok atığa kıyasla hacimce oldukça büyük olan bu atıkların atılması, toplanması, depolanması ve bertaraf edilmesi yerel belediyeler için büyük bir sorun teşkil etmeye başlamıştır.

Bu çalışmada ikincil tüketim sonucu oluşan ve belediyeler tarafından toplanan mobilya atıklarının termokimyasal yöntemler(piroliz-gazlaştırma) ile katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, bu çalışma ile mobilya atıklarından emisyon değeri düşük, katma değeri yüksek ürünler elde etmek ve ülkemizde yürütülen “Sıfır Atık” projesine katkı sağlamak amaçlanmaktadır. Mobilya atıklarının etkin bir şekilde atıktan enerji ve atıktan katma değerli bir ürünler haline dönüştürülmesinin ülke ekonomisine sağlayacağı katkıların yanı sıra, emisyon yükünün azaltarak temiz çevre yaratmada önemli katkıları olacağı düşünülmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ATIK KAVRAMI

İnsanların sosyal ve ekonomik aktiviteleri sonucu faydalı ömrünü tamamlayarak bulunduğu ortamdan uzaklaştırılan malzemeler, atık olarak nitelendirilir. Bu tanım dikkate alındığında atıklar, evsel, ticari ve endüstriyel faaliyetler sonucu oluşmaktadır (Öngen vd., 2019).

Modern toplumlarda sanayi ve endüstrideki gelişmeler, beraberinde üretimin artmasını ve maliyetlerin düşmesini sağlamış böylece mal ve hizmetlerin tüketici ile çok daha seri şekilde buluşması gerçekleşmiştir. Ayrıca, endüstriyelleşen toplumlarda şehirleşme düzeyi hızla artış göstermiş ve insanların satın alma gücü artmıştır. Günümüzde satın alma davranışları sadece ihtiyaçtan kaynaklanmamakta olup refah düzeyindeki artışlar beraber moda ve trendler tarafından yönlendirilmektedir. Gerek refah düzeyindeki artış gerekse teknolojik gelişmeler tüketici alışkanlıklarının değişmesine neden olarak daha fazla atığın çıkmasına yol açmıştır. Artan atık miktarı ise şu an etkisi giderek daha yoğun bir şekilde hissedilen küresel ısınma ve iklim krizi gibi olumsuzluklara sebep olmaktadır. Bu yüzden atıkların kaynağında azaltılmasının, tekrar kullanılmasının, geri kazanılmasının ya da mümkünse geri dönüştürülebilir ikame bir benzeri ile değiştirilmesinin önemi her geçen gün artmaktadır.

2.1.1. Atık Yönetimi

Atık yönetimi hiyerarşisi; kaynağında azaltma, yeniden kullanma, geri dönüştürme ve geri kazanıma yönelik kaynak kullanım verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için uluslararası kabul görmüş, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde uygulanan bir stratejidir. Bu strateji ile yakma ve depolama alanlarında biriktirmek gibi bertaraf yöntemlerinin daha az tercih edilmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda atık yönetimi hiyerarşisi, kaynak kullanım verimliliğini en üst düzeye çıkarmaya vurgu yaparak, atıkların önlenmesi ve en aza indirilmesine öncelik verilmesi, ayrıştırma uygulanması, yeniden kullanma ve geri dönüştürme etkinliğinin artırılmasına teşvik edilmesi, güvenli atık nakliyesi ve bertarafın entegre bir şekilde uygulanmasına odaklanmaktadır (Pharino, 2017).

Entegre atık yönetimi (EAY), katı atık yönetimi bertarafının artan zorlukları ile birlikte gelişmekte olan bir sistemdir ve yalnızca insan sağlığının korunması açısından değil, aynı zamanda çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan da gelişmiş ülkelerin mega kentlerde

uygulamakta olduğu bir yöntemdir (Asefi vd., 2020; Turcott Cervantes vd., 2018). EAY, uygulamalı olarak operasyonel verimliliği sağlamak ve çevresel riski azaltmak için atık azaltma, geri dönüşüm, geri kazanım, arıtma ve atık bertarafını içermektedir. Bunun yanı sıra bu sistem, birbirleriyle ilişkili süreçleri atık yönetimi zincirinin tamamına entegre ederek verimli bir katı atık yönetimi oluşturmayı amaçlamaktadır (Asefi ve Lim, 2017). Etkili bir EAY sisteminin tasarlanması, kentsel sistemlerin artan karmaşıklığı ve teknik, ekonomik, sosyal ve çevresel faktörleri içeren farklı yapılar barındırdığı için yönetmesi zor bir sistemdir. Atık yönetimine uygun teknoloji ve yöntemlerin seçilmesi, seçilen yöntemlerin etkin bir şekilde uygulanması, çevresel riskleri önlemek ve sürdürülebilir bir atık yönetimi için son derece önemlidir (Ramos vd., 2020).

Atık yönetimi stratejileri arasında son yıllarda kimyasal teknolojiler ile değerli ürünler elde etme, yakma yerine termokimyasal yöntemlerin kullanılması ile atıktan çevre dostu enerji üretilmesi ve/veya katma değeri yüksek yeni ürünler elde edilmesi büyük önem kazanmaktadır. Atıktan bu şekilde enerji ve katma değeri yüksek ürünlerin elde edilmesinin, sürdürülebilir enerji elde etmede ve ülkelerin ekonomilerine ciddi katkılar sağlamada önemli rol oynayacağı düşünülmektedir (Abdel-Shafy ve Mansour, 2018).

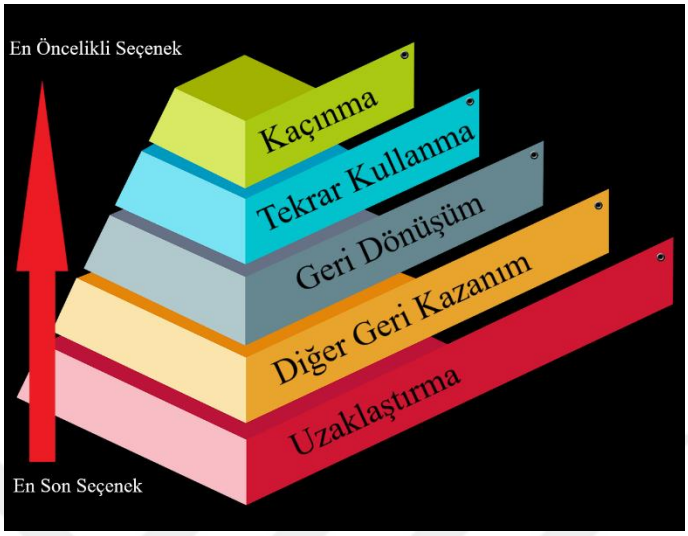
2.1.2. Sürdürülebilir Atık Yönetimi

Sürdürülebilir atık yönetimi, kaynakların etkin kullanılması, çevrenin korunması, sosyal, ekonomik ve ekolojik gereksinimlerin korunması açısından önemlidir. Sürdürülebilir atık yönetimi hem insan yaşamı üzerine hem de çevrenin korunması için gelecek nesillere daha uygun bir ortam yaratmak üzere kaynakların, enerjinin ve altyapının verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesini amaçlamaktadır.

Sürdürülebilir Atık Yönetimi değerlendirme yöntemlerine bakıldığında; ekserji analizi, yaşam döngüsü değerlendirilmesi, eksternal yaşam döngüsü, analitik hiyerarşik süreç, yaşam döngüsü maliyeti ve indirgenmiş nakit akışı yöntemleri gibi analizlerin uygulandığı görülmektedir. Ayrıca, bu analizler enerji üretimi, sürdürülebilir enerji ve iklim değişikliği etkisinin değerlendirilmesine dair yol göstermektedir (Cucchiella vd., 2017).

Sürdürülebilir atık yönetimi aşağıdaki Şekil 2.1'de belirtilen hiyerarşik yapıya sahiptir. Bu süreçler kendi içerisinde birbirleri ile bağlantılıdırlar. Bu sıralamaya bakıldığında; kaçınma,

tekrar kullanma, geri dönüşüm, diğer geri kazanım, uzaklaştırma bağlamında öncelikli seçenekten tercih edilmeyene doğru olduğu görülmektedir.



Şekil 2.1: Sürdürülebilir Atık Yönetimi Hiyerarşisi (Adipah ve Kwame, 2018).

2.1.3. Sıfır Atık Yaklaşımı

Sıfır atık kavramı, 20. yüzyılda atık miktarındaki artışın çevre üzerindeki etkisinin yoğun bir şekilde hissedilmesi ile birlikte devletlerin ve yerel yönetimlerin atık yönetiminde depolama ve yakma gibi insan sağlığı ve çevre açısından olumsuz yöntemlerin bertaraf edilmesini sağlayacak atık yönetiminde yeni strateji ve uygulamaların geliştirilmesiyle ortaya çıkmıştır.

Sıfır atık yaklaşımı, atık bertaraf sistemlerine ilişkin kaygıların artması, küresel ısınma ve doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel ölçekli çevre sorunlarının ekolojik endişeleri artırması, teknoloji alanındaki ilerlemelerin atık yönetiminde yeni katkılar yaratması, ülkelerin atık yönetimi kaygıları içerisine girerek sadece yakma ve bertaraf yöntemiyle atığı yönetmek değil, ayrıca bu atığın hem ekonomik hem de çevresel açıdan değerlendirilmesi, atığın önlenmesi, azaltılması, tekrar kullanılması ile ekolojik denge üzerinde olumsuz bir yük oluşturmayacak noktaya ulaşmasını hedeflemektedir (Bilgili, 2020).

Atıkların değersiz bir materyal olarak uzaklaştırılması gerektiği algısından kaçınarak tekrardan bir kaynak olarak görülmesi, tasarlanması, kullanılması ve değerlendirilmesi yaklaşımının benimsenmesi sıfır atık yaklaşımının esasını oluşturmaktadır.

Sıfır atık yaklaşımında yakma ve depolama gibi bertaraf yöntemleri kullanılmadan değerlendirilmek istenen atıkların, piroliz ve gazlaştırma gibi termokimyasal prosesler ile

atıktan enerji elde etmede kullanılmasının yanı sıra bu işlemler sırasında oluşan katı, sıvı ve gaz ürünlerin farklı sektörlerde hammadde ya da yan ürün olarak değerlendirilebilmesi sıfır atık yaklaşımını tam olarak desteklemektedir. Bir diğer etkileri ise atık hacminin ve ağırlığının azaltılması, yüksek sıcaklıklarda mikrobiyal stabilizasyonu sağlaması, ekonomik değeri olan ürünlere dönüştürülebilmesi, depolama ve yakma sistemlerinin yükünün azaltılmasıdır (Öngen ve Arayici, 2015).

2.2. AHŞAP MOBİLYA ATIKLARI

Ahşap mobilya atıkları, kullanım ömrünü tamamlamış, tüketicinin elinden çıkardığı, atıl durumda olan sağlam ya da parçalanmış durumdaki mobilyalar olarak tanımlanabilir. Pek çok sektörde olduğu gibi mobilya sektöründe de gelişen teknolojilere bağlı olarak seri üretimin artması ile üretilen mobilya miktarı artmıştır. Bu da tüketicideki tüketim algısını değiştirmiştir ve tüketici tarafından mobilyanın daha kolay ulaşılabilir bir ürün olmasını sağlamıştır. Mobilya atıkları, yerel yönetimler/belediyeler tarafından toplanmaktadır ve diğer pek çok atık ile kıyaslandığında hacimce büyük, ağır ve yer kaplayan bu atıklar depolama ve toplamada ciddi sorunlar oluşturmaktadır.

Mobilya sektörü insanın yaşam alanlarını ilgilendiren ev, ofis, taşıt, bahçe gibi birçok alanda son kullanım ürünlerini oluşturan ve çeşitli sektörlere ara ürün temin eden sanayi olarak bilinmektedir. Bunun yanı sıra inşaat, gemi sanayi, metal, plastik ve cam sanayi gibi toplamda yirmi alt sektör ile etkileşim halinde bulunduğu ve bu sektörleri desteklediği düşünülmektedir (TOBB, 2017).

Ahşap mobilya atıkları yapı itibariyle ana kütle olarak masif, yonga levha, lif levha, melamin kaplı orta yoğunluklu lif levha, suntalam, kontrplak, panel denilen ahşap ve ahşap türevli yapılardan olmasının yanı sıra kendi içerisinde vernik, cila, boya, yapıştırıcı olarak tutkal, sertleştirici malzemeler, katkı maddeleri, melamin emdirilmiş kâğıtlar, PVC kaplamalar da ihtiva etmektedir (Köseoğlu, 2015). Ayrıca, yapı bağlantı elemanları olarak çivi, vida, metal aksamlar da kullanılmaktadır. Mobilya atık örnekleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Mobilya Atık Örnekleri (Başakşehir Belediyesi, 2019; Vender, 2019).

Ahşap Mobilya atıkları sadece ahşaptan oluşmayıp metal, plastik ve tekstil gibi birden fazla farklı malzemeyi de içerebilmektedir. Mobilyaları parçalara ayırmak ve her türlü malzemeyi ayrı ayrı işlemek zaman alıcı ve pahalıdır. Bu malzemelerin geri dönüştürülmesi imkânsız olduğu gibi tekrardan tamir edilip kullanılması da çoğu zaman maliyetli olabilmektedir.

Mobilya atıklarında bulunan üre, melamin ve formaldehitli tutkallar, boya, yüzey kaplama malzemeleri, sertleştiriciler, yangından koruyucu kimyasal içeren mobilyalar rastgele atıldığında bu kimyasalların zamanla su ve toprakla karışması kaçınılmaz olacaktır. Ayrıca, bu atıkların insanlar tarafından ısınma amaçlı olarak kullanılması çeşitli kimyasal maddelerin atmosfere salınacağı ve sera gazı emisyonlarına katkı sağlayacağı bilinmektedir. Bu atıkların atık ayrıştırma tesis sahalarında toplanarak ayrıştırılması, sınıflandırılması ve tekrardan geri kazanılması veya piroliz, gazlaştırma gibi termokimyasal işlemler ile temiz enerji elde ederek farklı ürünlere dönüştürülmesi ülke ekonomisine ve çevre sağlığına katkı sağlayacağı gibi sıfır atık yaklaşımına da uygun olacaktır.

2.2.1. Mobilya Atıklarının Potansiyeli

Dünyada üretilen mobilya atıklarının ¼'i AB ülkelerinde üretilmektedir ve mobilya atık miktarı yıllık 10,78 milyon tondur (Demirarslan ve Demirarslan, 2020). Her yıl AB ülkelerindeki üreticiler ve tüketiciler tarafından 10 milyondan fazla mobilya parçası atılmakta ve bu atıklar depolamaya veya yakmaya götürülmektedir. AB ülkelerinde mobilya atıklarının %80-90'ı

depolama veya yakma tesislerine gönderilmiş, %10'luk bir kısım geri dönüştürülmüştür (Forrest vd., 2017).

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı olan EPA'ya göre, Amerika'da 2018 yılına ait ev halkından toplanan mobilya atığının yaklaşık olarak 12,2 milyon ton olduğu belirtilmektedir ve bu miktarın orta ve uzun vadede artış gösterebileceği söylenmektedir (EPA, 2018). Ayrıca, bu mobilya atıklarının 40 bin tonunun geri dönüştürüldüğünü, 2,36 milyon ton atığın enerji olarak geri kazanıldığını, 9,68 milyon tonunun ise düzenli atık depo sahalarında depolandığını belirtmişlerdir (EPA, 2018).

Fransa'da her yıl 2 milyon ton mobilya atığı oluşmaktadır ve bu atıklar yakma ve depolama alanlarında bertaraf edilmektedir. Finlandiya'da ise her yıl yaklaşık 100 bin ton mobilya atığının meydana geldiği ve bu atıkların %70-80'inin yeniden kullanıldığı belirtilmektedir (Demirarslan ve Demirarslan, 2020).

Gelişmiş ülkelerde mobilya atıklarının potansiyeline bağlı yapılmış çeşitli analizler ve çalışmalar mevcutken, ülkemizde böyle bir potansiyelin net bir şekilde ortaya konulduğu herhangi bir çalışmanın yapılmadığını söylemek mümkündür. Ülkemizde, İstanbul gibi büyük şehirlerde yapılan atık karakterizasyonu çalışmalarında ahşap atık miktarının %6'lık bir kısmı temsil ettiğini söylemek mümkündür. Ayrıca, Beşiktaş Belediyesi, Ataşehir Belediyesi ve İstanbul Büyükşehir Belediye Çevre Daire Başkanlığı Birimlerindeki yetkililer ile görüşüldüğünde;

- Atıkların belediyelere maddi anlamda ciddi yük oluşturduğu
- Sağlam mobilyaların sosyal kuruluşlara verildiği
- Bu iki Belediye tarafından günde ortalama 2-3 kamyon ahşap mobilya atığı toplandığı
- Mobilya atıklarının sınıflandırılması, ayrıştırılması, geri kazanımı ve geri dönüşümünün yapılabileceği bir alanın tahsis edilmediği ifade edilmiştir.

Bu maddeler dikkate alındığında ahşap mobilya atıkları üzerine ülkemizde bir ayrıştırma, sınıflandırma, geri kazanım veya geri dönüşüm tesisinin bulunmadığı, İstanbul'da toplamda 39 ilçe belediye olduğu düşünüldüğünde, günlük ortalama 78-117 kamyon civarında ahşap mobilya atığının çıkma potansiyelinin olduğu söylenebilir.

Ülkemizde bazı belediyeler tarafından mobilya atıklarının sosyal yardım amaçlı olarak ihtiyaç sahibi insanlara sobalarda yakmak üzere verildiği bilinmektedir. Oysa bu atıkların ülkemize katma değer sağlayacak ve sıfır atık hedefine ulaşması yönünde katkıda bulunacak şekilde değerlendirilmesi daha doğru olacaktır (Başakşehir Belediyesi, 2019).

2.2.2. Türkiye'de Mobilya Üretimi ve Tüketimi

Türkiye mobilya endüstrisi, genellikle geleneksel yöntemlerle çalışan atölye tipi küçük ölçekli işletmelerin ağırlıkta olduğu, buna karşın son dönemlerde küçük işletmelerin yanı sıra orta ve büyük ölçekli işletmelerin de sayısında ciddi artış gözlendiği bir sektördür (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021). Bu işletmeler pazarın yoğunlaştığı ve orman ürünleri endüstrisinin yoğun olduğu İstanbul, Ankara, Bursa (İnegöl), Kayseri, İzmir ve Adana gibi büyük şehirlerde bulunmaktadır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021).

Türkiye'de mobilya sektörünün, gerçekleşen arz ve talebe göre diğer sektörlerden daha hızlı büyüdüğü, dolayısıyla bu büyümenin mobilya atık miktarında da artış sağlayacağı düşünülebilir (T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018).

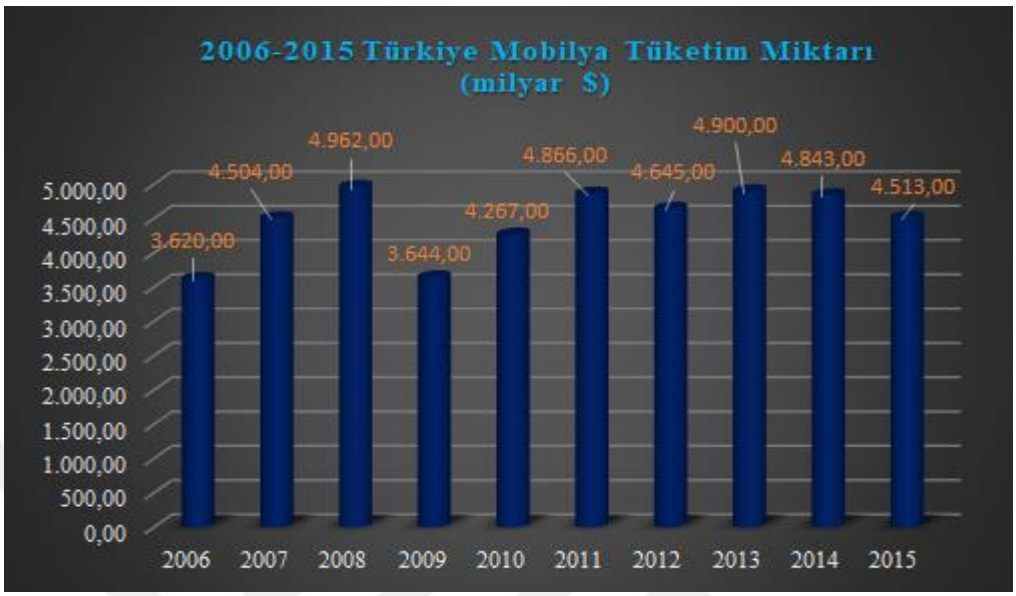
Şekil 2.3'de 2006'da mobilya üretimi 3.790 milyar USD iken bu oran 2015'te 5.749 USD'a yükselmiştir. Günümüzde bu oranın daha yüksek miktarlara yükseldiğini ve artan ihracat ile daha da yükselebileceğini söylemek mümkündür.



Şekil 2.3: 2006-2015 Türkiye Mobilya Üretimi (MÜSİAD, 2018).

Şekil 2.4'e bakıldığında mobilya tüketim miktarının 2006'da 3.620 milyar USD iken 2015'te 4.513 milyar USD'a yükseldiğini ve bu oranın ilerleyen yıllarda nüfus artışına paralel olarak

artış göstereceğini söylemek mümkündür. Mobilya üretim ve tüketimindeki artışın beraberinde mobilya atık miktarında da artış getireceği açıktır.



Şekil 2.4: 2006-2015 Türkiye Mobilya Tüketim Miktarı (MÜSİAD, 2018).

2.3. PELET ÜRETİMİ

Biyokütle materyalinin basınç altında silindirik bir forma sahip homojen yapıya getirilmesi işlemine peletleme denir. Pelet, küçük silindirik bir forma sahip ve EN ISO 17225-2 standartlarına uygun olarak genellikle 5,6 - 9,8 mm çapında, 3,15 - 40 mm uzunluğunda yenilenebilir bir yakıttır. Biyokütle materyalinin peletlenmesi ile yoğunluk 40 - 250 kg/m³'ten 600 - 800 kg/m³'e kadar artmakta, hacimsel ısı değeri artmakta, taşıma ve depolama maliyetleri azalmakta, yanma özellikleri iyileşmekte, atmosfere salınan parçacık emisyonları düşmekte ve homojen yapıda iyi özelliklere sahip bir biyoyakıt oluşturulmaktadır (Küsek vd., 2015). Pelet üretimi genellikle ısıtma veya elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Odunsu ve odunsu olmayan pelet örnekleri Şekil 2.5'de gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Odunsu ve Odunsu Olmayan Pelet Örnekleri.

Pelet üretiminin avantajlarına bakıldığında aşağıdaki maddeleri sıralamak mümkündür (Neidermeier vd., 2020).

- Pelet yakıtlarının doğrudan yakılarak değerlendirilebilmesinin yanı sıra özel reaktörlerde termokimyasal yöntemler (yanma, gazlaştırma, piroliz veya karbonizasyon) uygulanarak daha etkin şekilde değerlendirilebilmesi de mümkündür
- Peletleme ile depolama ve taşıma hacminin azaltılması mümkündür
- Peletleme ile taşıma maliyetlerinin azaltılması ve taşıma işlerinin kolaylaştırılması mümkündür
- Pelet haline getirilmiş biyokütlenin enerji yoğunluğu/hacim oranının artırılması mümkündür
- Peletleme, sera gazı emisyonunun azaltılmasına katkı sağlamaktadır
- Peletleme ile yenilenebilir enerji üretiminde sürdürülebilirlik mümkündür
- Sosyal ormancılıkta ve endüstriyel ormancılıkta istihdam olanakları yaratması mümkündür
- Fosil yakıtlara olan bağımlılığın ve enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlaması mümkündür.

2.3.1 Pelet Üretimi için Biyokütle Kullanımı

Pelet; odun talaşı, odun tozu, ağaç kabuğu, kozalak, tarımsal atıklar, yıllık bitkiler, enerji bitkileri (buğday çimi, filotu vb.), fındık, badem, ceviz, kestane kabukları gibi biyokütlelerden üretilebilmektedir (Küsek vd., 2015). Kısacası, teorik olarak her türlü biyokütle pelet üretimi

için değerlendirilebilir. Pelet üretiminde biyokütle olarak odun; kimyasal bileşimi, hammadde potansiyeli, doğal bağlayıcı olarak lignin ihtiva etmesi, düşük kül içeriği, yüksek kütle yoğunluğu ve yüksek mekanik dayanıklılığı özellikleri ile daha uygun olduğu için tercih edilmektedir.

Biyokütle olarak odun, pelet üretimi için ana hammaddeyi temsil etmektedir. Birincil kaynak olarak orman kesim atıkları (ağaç dalları, ağaç tepeleri, kütükler vb.), kereste artıkları ve kısa sürede yetişen özel enerji ormanlarından elde edilen hammaddeler değerlendirilmektedir. İkincil kaynak olarak orman endüstrisinde üretilen toz, talaş ve kabuk gibi proses atıkları ve geri dönüştürülmüş odun atıkları (inşaat ve yıkım atıkları vb.) kullanılmaktadır. Ayrıca, son dönemlerde orman kütük artıklarından veya özel ormancılık plantasyonlarından da pelet üretimi yapılabilmektedir (Picchio vd., 2020).

Küresel odun pelet endüstrisi 2017 raporuna göre Avrupa'da odun peletlerin çoğunluğu ladin ve çam tozlarından üretilmiştir (Junginger vd., 2017). Birçok avrupa ülkesi odun peletlerini tamamen endüstriyel atık odun ve kereste fabrikası odun atıklarından üretmektedir (Junginger vd., 2017). 2014 verilerine göre Avrupa'da 980.000 t ile Ukrayna tarımsal pelet üretiminde ilk sırada yer alırken Polonya 53.000 t tarımsal pelet üretimi ile onu takip eden ülke olmuştur (Junginger vd., 2017). Ukrayna'da tarımsal pelet üretiminde ayçiçek kabuğu ilk sırada yer alırken bunu saman, mısır ve ayçiçek sapları izlemektedir (Junginger vd., 2017). İngiltere'de üretilen odun peletleri ham kereste, talaş ve yongalardan üretilmektedir (Junginger vd., 2017).

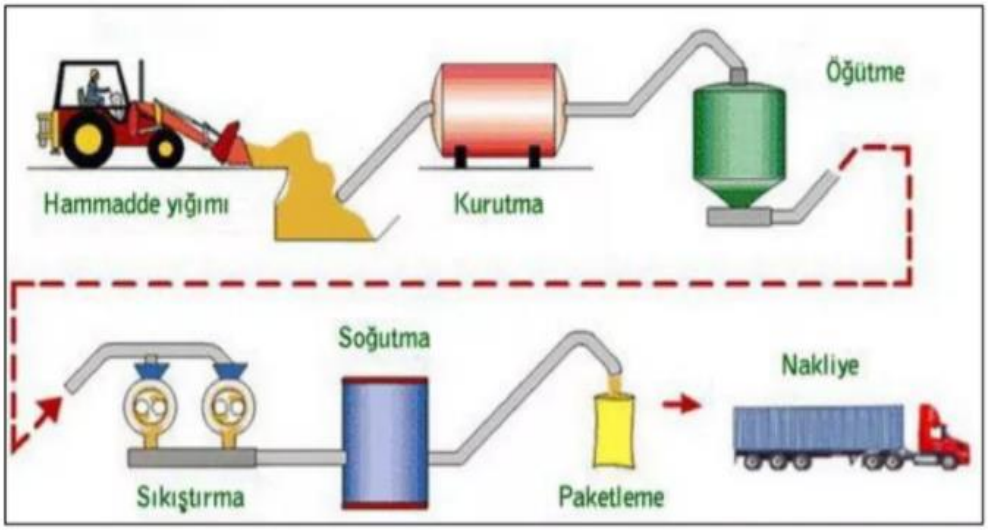
Biyokütle olarak tarımsal atıkların da potansiyel olarak önemli bir biyokütle kaynağını temsil etmesi, pelet üretiminde oduna alternatif bir hammadde kaynağı olarak düşünülebilir. Tarımsal peletlerin kalitesi odun peletleri kalitesinden daha düşüktür ve düşük kütle yoğunluğu, yüksek kül içeriği ve düşük kalori gibi olumsuz özelliklere sahiptir (Picchio vd., 2020). Olası çözüm olarak, odunsu ve odunsu olmayan biyokütle karıştırılarak pelet kalitesi arttırılabilir (Picchio vd., 2020).

Türkiye'deki firmalar genellikle kereste endüstrisindeki atık odunları, odun tozlarını ve talaşlarını kullanmaktadır. Bunun dışında bölgesel olarak zeytin atıkları, fındık atıkları ve çay atıkları gibi tarımsal atıklar ve çeşitli orman endüstrisi atıkları da kullanılmaktadır (Karaca, 2021). Bazı durumlarda işletmeler fiyatı ucuz olduğu için mobilya üretimi sırasında açığa çıkan orta yoğunluklu lif levha ve yonga levha tozlarını da kullanmaktadırlar. Orta yoğunluklu lif

levha ve yonga levha tozları kimyasal madde ihtiva ettiği için üretilen peletlerin yakıt olarak kullanılması çevreye zarar verebilecek emisyonlara yol açmaktadır (Karaca, 2021).

2.3.2. Pelet Üretim Aşamaları ve Mekanizması

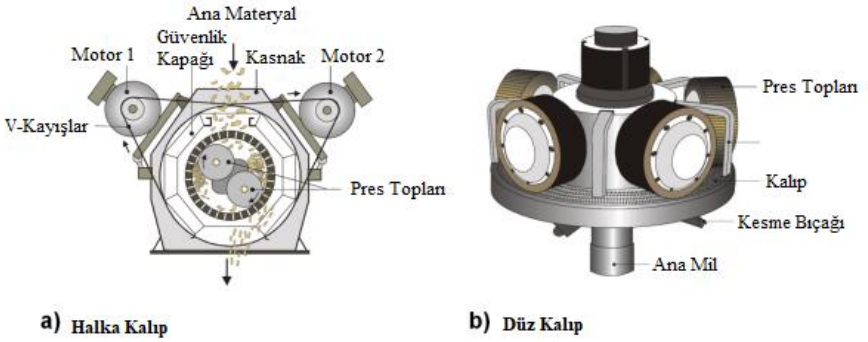
Toz, talaş veya önceden işlenmiş belirli bir rutubet içeriğine sahip biyokütlenin yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altında birkaç milimetre boyutundaki bir delikten geçirilerek küçük silindirler halinde pelet üretilmesi ile pelet elde edilmektedir.



Şekil 2.6: Pelet üretim aşamaları (Küçükkaya, 2019).

Pelet üretimi, genellikle

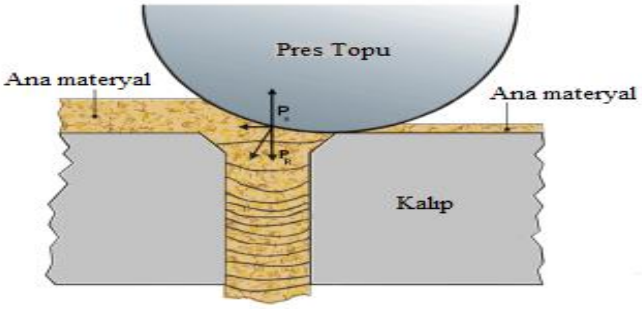
Şekil **2.6**'daki adımları izlemektedir. Bu adımlar; hammadde tedariki, kurutma ve muhtemelen ara depolama, taş, metal vb. kirlilikler için eleme, istenilen boyutlara getirmek için öğütme ve tekrar depolama, iklimlendirme, hammaddenin preslenerek pelet haline getirilmesi, üretilen peletlerin soğutulması, depolama, paketleme ve dağıtım aşamalarından oluşmaktadır.



Şekil 2.7: Pelet üretim mekanizmaları (Stelte vd., 2012).

Peletler, genellikle silindirik pres kanallarına ve kanallara akmaya zorlayan merdanelere sahip bir kalıptan geçirilerek üretilir. Pres kanalındaki çelik yüzey ile biyokütle arasındaki sürtünme nedeniyle yüksek bir karşı basınç ve bunun sonucunda ısı oluşur (Stelte vd., 2012). Kalıp,

Şekil 2.7'de gösterildiği gibi halka veya düz bir plaka şeklinde olabilmektedir. Ana milin döndürülmesiyle biyokütle parçacıkları metal kalıbın içerisindeki alanlara sıkıştırılmaktadır. Şekil 2.8'de biyokütlenin silindir kalıplarına sıkıştırılması gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Biyokütlenin silindir kalıplarına sıkıştırılması (Stelte vd. 2012).

2.3.3. Peletleme Sürecini Etkileyen Faktörler

Pelet kalitesi; partikül boyutu dağılımı, nem içeriği, kullanılan hammaddenin yapısı ve kimyasal özellikleri, kalıp sıcaklığı, uygulanan basınç, ilave edilen katkı maddeleri ve uygulama süresi gibi birçok parametreden etkilenmektedir.

Peletleme basıncı doğrudan kontrol edilememektedir. Ancak, hammaddeye bağlı olarak pelet cihazına ve işlem parametrelerine bağlıdır (Nielsen vd., 2020). Peletleme basıncı 210-450 MPa

aralığına kadar çıkabilmektedir (Nielsen vd., 2020). Peletleme basıncının hammaddenin lif yönünden de etkilendiği söylenilmektedir (Nielsen vd., 2020). Uzun liflerin olduğu yönlendirmelerin kısa liflere oranla basınç miktarının daha fazla olduğu bilinmektedir (Nielsen vd., 2020).

Pelet cihazındaki proses sıcaklığı; hammadde giriş sıcaklığına, baskı kanallarındaki sürtünmeye ve hammadde nem içeriğine bağlıdır (Nielsen vd., 2020). Kalıp sıcaklığının yüksek sıcaklık uygulamalarında daha etkin bir bağlanma sağladığı çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir (Nielsen vd., 2020).

Hammadde olarak lignoselülozik malzemelerin lignin ihtiva etmesi yapıya bağlayıcı özellik katmaktadır. Öte yandan yüksek miktardaki ekstraktif madde içeriği, hammadde yüzeyinde yağlayıcı özellik gösterdiği için sürtünmeyi azaltmaktadır ve buna bağlı olarak peletleme basıncı da düşmektedir (Nielsen vd., 2020).

Biyokütlede boyut küçültme yığın yoğunluğunu artırmaktadır ve bu da peletleme sırasında biyokütlenin akışkanlığını artırmaktadır (Pradhan vd., 2018). Biyokütlenin partikül boyutu, toplam yüzey alanını ve peletleme öncesi partiküller arası bağlanma temasını artırdığı için önemlidir. Parçacık boyutunun azalması peletleme basıncını artırmaktadır (Pradhan vd., 2018).

Biyokütledeki nem miktarı bir bağlayıcı görevi görmektedir ve biyokütle türüne göre etkisi değişmektedir (Pradhan vd., 2018). Biyokütledeki nem içeriği, peletleme sırasında nişasta jelatinleşmesini, protein denatürasyonunu ve lif çözünürleştirme sürecini kolaylaştırmaktadır (Pradhan vd., 2018).

Peletlerin ince parçalara ayrılmamasını sağlamak, pelet kalitesini iyileştirmek ve üretim ekipmanındaki aşınmayı azaltmak için bir bağlayıcı gerekmektedir (Pradhan vd., 2018). Nişasta, bitkisel yağ, bentonit, sülfit likörü, kraft pişirme çözeltisinden elde edilen lignince zengin siyah çözelti, dolomit, melas gibi bağlayıcılar kullanılmaktadır (Pradhan vd., 2018).

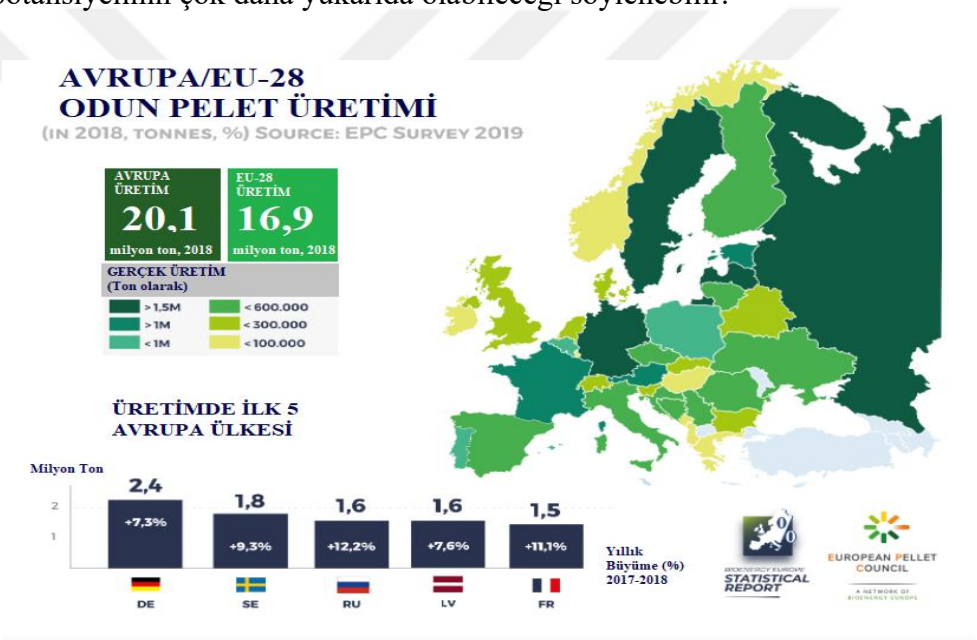
Pres silindirlerinin dönüş hızı, pres kanalı tasarımının etkisi, pres silindiri ile kalıp arasındaki boşluk ve besleme stoğu özellikleri de peletleme sürecini etkilemektedir (Pradhan vd., 2018).

2.3.4. Dünya'da ve Türkiye'de Pelet Kullanımı

Dünya üzerinde pelet üretimi 2012'de yaklaşık 20 milyon ton iken 2018'de bu miktar 55 mil. t yaklaşmıştır ve bu miktarın içerisinde bazı ülkelerin verileri bulunmamaktadır. Şekil 2.9'a bakıldığında üretimin ağırlıkla Avrupa ülkeleri tarafından yapıldığını ve kuzey Amerika ülkelerinin de ciddi bir seviyede üretim yaptığını söylemek mümkündür.

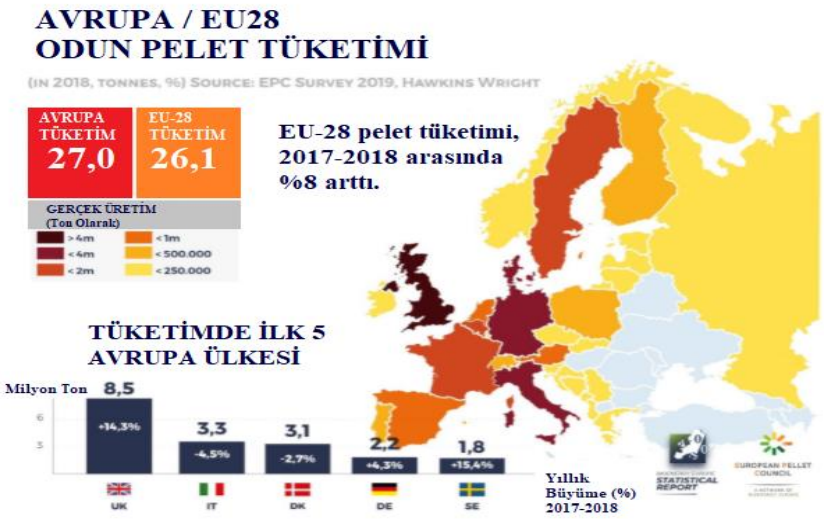
Pelet tüketimine bakıldığında ise yine zirveyi 27 mil. t tüketim ile Avrupa ülkeleri almaktadır ve beraberinde 4,8 mil. t ile Asya ülkeleri takip etmektedir.

Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11 verileri 2018 yılına ait olduğu için günümüzde bu üretim ve tüketim potansiyelinin çok daha yukarıda olabileceği söylenebilir.



Şekil 2.9: Avrupa'daki Pelet Üretim Miktarı (Calderon vd., 2019).

Şekil 2.9'e bakıldığında Avrupa'daki pelet üretimi en fazla sırasıyla Almanya, İsveç, Rusya, Letonya ve Fransa olduğu görülmektedir.



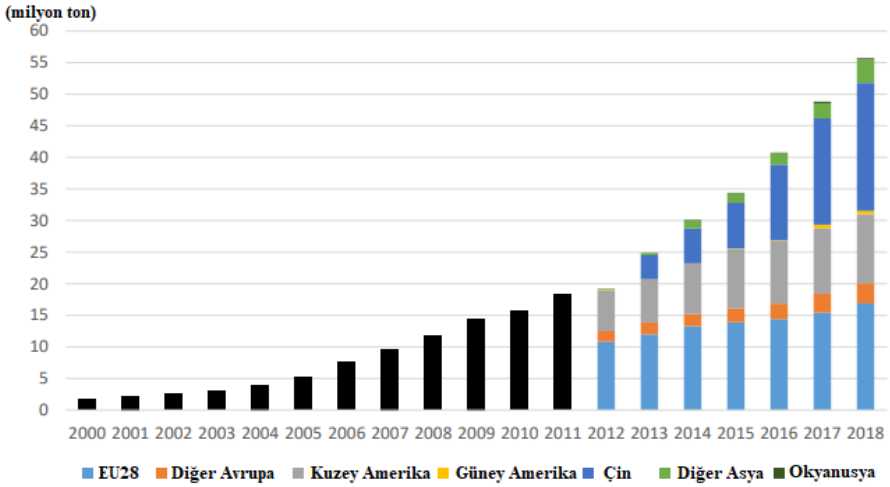
Şekil 2.10: Avrupa'daki Pelet Tüketim Miktarı (Calderon vd., 2019).

Türkiye'de çok bakir bir sektör olmasının yanı sıra yaklaşık olarak 30 adet küçük ölçekli işletmeler tarafından pelet üretimi yapılmaktadır (Karaca, 2021). Türkiye'deki pelet üretimi ve tüketimi üzerine herhangi bir bilgi bulunmamaktadır.

Şekil 2.10'a bakıldığında Avrupa'daki pelet tüketimi en fazla sırasıyla İngiltere, İtalya, Danimarka, Almanya ve İsveç tarafından yapıldığı görülmektedir.



Şekil 2.11: Dünya'daki Pelet Üretim ve Tüketim Miktarları (Calderon vd., 2019)



Şekil 2.12: Küresel Pelet Üretiminin Evrimi (Calderon vd., 2019).

Şekil 2.12'de 2000-2018 yılları arasındaki pelet üretiminin ülkelere göre dağılımını göstermektedir.

2.4. ENERJİ KAVRAMI

Enerji kavramı**,** fizikte iş yapabilme kapasitesi olarak bilinmesinin yanı sıra termodinamik yasalarına göre yoktan var edilemez, varken yok edilemez, ancak farklı türlere dönüştürülebilir olarak da tanımlanmaktadır (Yılmaz ve Kalkan, 2017). Enerji türleri; potansiyel, kinetik, ısı, kimyasal, dalga, gelgit, jeotermal, manyetik, elektrik, nükleer ve atom enerji olarak sınıflandırılmaktadır (Kamran ve Fazal, 2021). Bütün bu enerji türleri farklı enerji türlerine dönüştürülebilmektedir.

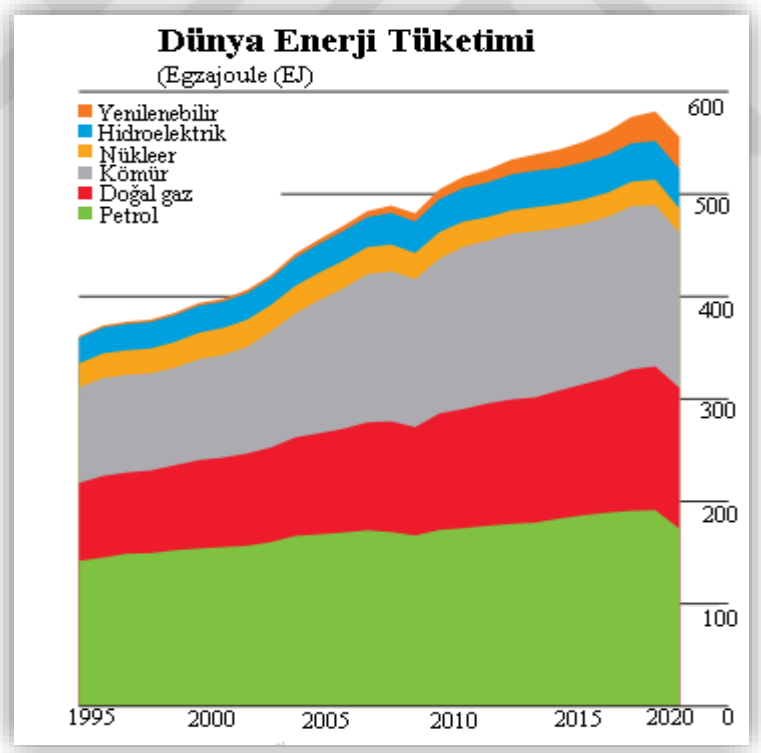
İnsanlar ilk kez ateşi tutuşturmayı öğrendiğinden beri, enerji ve yakıtlar insan uygarlığının evriminde hayati bir rol oynamıştır. Birincil enerji kaynağı olarak odun, 1700'lü yıllara kadar kullanılmıştır ve 1780'lerde kömür yerini devralmıştır (Kamran ve Fazal, 2021). Buhar motorları, petrol çıkarma ve arıtma tekniklerindeki gelişmelerin yanı sıra teknolojinin de ilerlemesiyle fosil yakıtlar da kullanılmaya başlanmıştır (Kamran ve Fazal, 2021). Fosil yakıtlarla enerji ihtiyacının %80'ini karşılamaya geçiş iki yüzyılda gerçekleşirken, odundan kömüre geçiş ise binlerce yıl sürmüştür (Kamran ve Fazal, 2021). Teknoloji evrimi ve hızlı nüfus artışı, ülkeleri gelecekteki ihtiyaçları karşılamak için çeşitli sürdürülebilir alternatif enerji biçimlerini kullanmaya yönlendirmiştir (Kamran ve Fazal, 2021)

Yapılan çalışmalara göre, dünya enerjisinin %80'i yenilenemeyen kaynaklar olan petrol, kömür ve doğal gazdan alınmaktadır (Kamran ve Fazal, 2021). Bu fosil yakıtlar sınırlı miktardadır ve bu eğilim devam ederse kısa sürede tükenebileceği söylenmektedir. Fosil yakıtların katlanarak

artan dünya nüfusunun talebini karşılaması mümkün gözükmemektedir. Aynı şekilde CO_2 gibi emisyonlar da aşırı fosil yakıt kullanımı nedeniyle tehlikeli eşiklere ulaşmaya ve iklim değişikliğine gibi olumsuz etkilere neden olmaya devam etmektedir. Sorunlara neden olan sadece sera gazları değil, bu yakıtlar ayrıca çevreyi önemli ölçüde bozan kükürt, nitrojen ve karbon oksitleri de bırakmaktadır(Kamran ve Fazal, 2021). Bu nedenle, bu büyük bağımlılıktan kurtulmak, sürdürülebilir bakış açısının yanı sıra çevresel faktörler açısından da üstün olan alternatif teknolojileri kullanmak ve sürdürülebilir olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek gerekmektedir (Kamran ve Fazal, 2021).

2.4.1. Dünya'da ve Türkiye'de Enerji

Şekil 2.13'e bakıldığında, 1995-2020 yılları arasında Dünya üzerinde tüketilen birincil enerji kaynaklarının petrol, doğalgaz, kömür, nükleer, hidroelektrik ve yenilenebilir enerji olduğu görülmektedir. Bu verilere göre, enerji talebi yıllara göre artış göstermektedir.

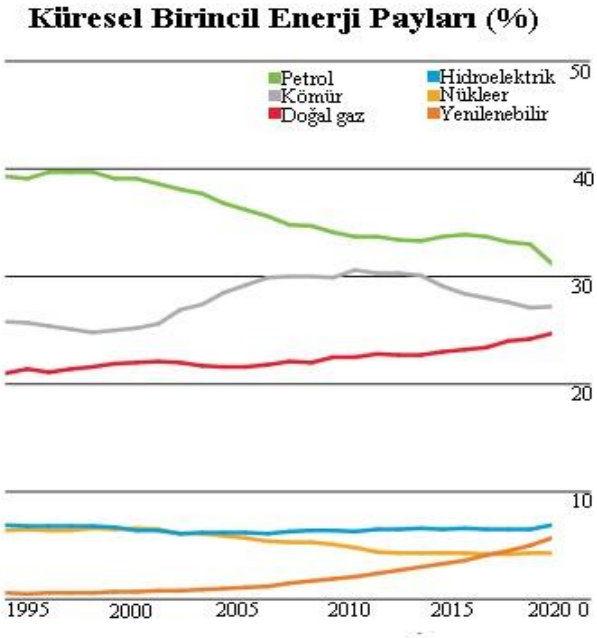


Şekil 2.13: 1995-2020 yılları arasında gerçekleşen dünya enerji tüketimi (BP, 2021).

Şekil 2.14'de bakıldığında, 1995-2020 yılları arasında küresel olarak petrol tüketiminin azaldığı, kömür tüketiminin artış gösterip tekrar düşüşe geçtiği, doğalgazın artışa geçtiği, hidroelektrik

enerjisinin sabit oranda ilerlediği, nükleer payının hafif azaldığı ve yenilenebilir enerjinin artışa geçtiği görülmektedir.

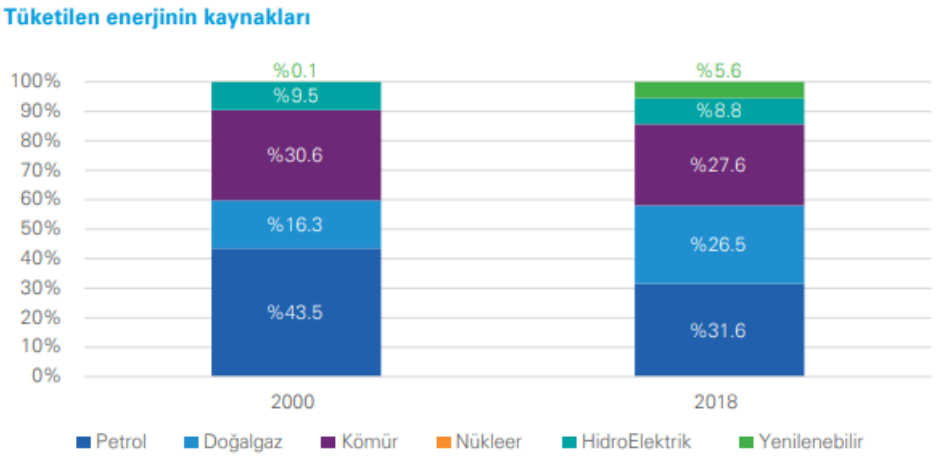
Birincil enerji tüketimi 2020 yılına göre %4,5 azalmıştır ve bu, 2009 yılından bu yana enerji tüketimindeki ilk düşüş olmuştur (BP, 2021). Petrol, enerji tüketiminde en büyük paya (%31,2) sahip olmaya devam etmektedir (BP, 2021). Kömür, 2020'deki en büyük ikin yakıt olup, toplam birincil enerji tüketiminin %27,2'sini oluşturmaktadır (BP, 2021). Doğal gaz ve yenilenebilir enerji payı ise sırasıyla %24,7 ve %5,7 ile yüksek seviyelere ulaşmıştır (BP, 2021). Ayrıca, yenilenebilir enerji payı, nükleer enerji payının önüne geçmiştir (BP, 2021).



Şekil 2.14: 1995-2020 yılları arasında gerçekleşen küresel birincil enerji payları (BP, 2021).

Türkiye toplam kurulu gücü, Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketinin 2021 yılında yayınladığı rapora göre 99.374,3 MW'dir ve bu gücün %31,68'i hidroelektrik, %25,70'i doğalgaz, %19,83'ü yenilenebilir, %20,45'i kömür ve %2,4'ü ise diğer kaynaklardır (TEİAŞ, 2021).

Şekil 2.15'e bakıldığında, 2000 ve 2018 yıllarına ait Türkiye'de tüketilen enerjinin kaynakları gösterilmiştir. Bu veriler karşılaştırıldığında, petrol ve kömür gibi fosil kaynakların kullanımının azaldığı, doğalgaz kullanımının 2018'de %10,2'i arttığı ve 2021 yılında %0,8 azaldığı, hidroelektrik ve yenilenebilir enerji kaynak kullanımının arttığı görülmektedir.



Şekil 2.15: Türkiye'de tüketilen enerjinin kaynakları (KPMG, 2020).

2.4.2. Atıktan Enerji

Atıktan enerji kavramı; nüfus artışı, sanayileşme ve hızla artan kentleşme sonucu ortaya çıkan katı atık kütlenin termal(yakma, piroliz ve gazlaştırma) ve biyolojik yöntemler (anaerobik çürütme ve katı atık depolama) ile enerjiye dönüştürülmesidir (Mukherjee vd., 2020). Atıklar, verimli atıktan enerjiye dönüşüm teknolojileri ile enerjiye dönüştürülebilmektedirler. Atıklar bu yöntemler ile değerlendirilerek atık yönetimine, artan enerji talebine ve çevresel kaygıları azaltmasına katkı sağlamaktadırlar (Mukherjee vd., 2020).

2.5.TERMOKİMYASAL SÜREÇLER

2.5.1. Yakma

Yakma, biyokütleden yararlanmanın en yaygın yoludur. Yakıtların yakılarak enerjiye dönüştürülmesi, klasik olarak bilinen bir yöntemdir. Yakma işleminin etkinliği; yakıtın ısıl değerine, nem içeriğine, yakıt-hava oranına ve biyokütlenin karakteristiğine göre değişim göstermektedir ve yakma, dünyadaki çoğu elektrik enerjisi üretiminin temeli olarak da bilinmektedir (Sagastume Gutiérrez vd., 2020). Yanma, düşük maliyeti ve biyokütle enerjisini ısı ve güce dönüştürme kolaylığı nedeniyle en yaygın olarak kullanılmaktadır (Glushkov vd., 2021). Ayrıca, yanmayı diğer enerji üretim teknolojileri ile entegre etmek daha ucuzdur (Glushkov vd., 2021).

2.5.2. Sıvılaştırma

Sıvılaştırma, büyük yapılı moleküllerin düşük sıcaklık, yüksek basınç ve katalizör etkisiyle bozundurularak küçük moleküllü sıvı ürünler elde edilmek için uygulanan termokimyasal yöntemlerden biridir (Ramirez ve Rainey, 2019). Piroliz ve sıvılaştırma proses olarak birbirine yakındır, fakat sıvılaştırma işleminde biyokütlenin nem içeriğinin yüksek olması önemli değildir. Sıvılaştırma ile karbonhidratlardan şekerler ve ligninden fenolik bileşikler üretilebilmektedir.

2.5.3. Piroliz

Piroliz, oksijen yokluğunda 400-1300 °C sıcaklık aralığında gerçekleşen, gelişmiş bir ısıl işlem yöntemidir (Kumar ve Samadder, 2017). Piroliz verimi ve kalitesi, ısıtma hızına, işlem sıcaklığına ve kalma süresine bağlı olarak değişmektedir. Piroliz, yalnızca yanma ve gazlaştırma işlemlerinin bir parçası değil, aynı zamanda bu işlemlerin her ikisinin ilk aşamasıdır.

Çalışma koşullarına bağlı olarak, piroliz yavaş, hızlı ve flaş piroliz olarak sınıflandırılmaktadır. Yavaş piroliz, ana ürünü katı kömür olmak üzere, nispeten düşük ısıtma hızında, düşük sıcaklıkta(400-550 °C) ve uzun kalma sürelerinde çalışmaktadır (Uddin vd., 2018). Hızlı piroliz daha yüksek ısıtma hızında, yüksek sıcaklıkta (850-1250°C), düşük kalış süresinde ve yüksek biyoyağ (%50-70) verimiyle sonuçlanmaktadır (Uddin vd., 2018). Flash pirolizi ise özel reaktörlerde en yüksek ısıtma hızında, yüksek sıcaklıkta (1050-1300 °C) ve en kısa kalma süresinde gerçekleşmektedir ve yüksek biyoyağ verimi (%75-80) ile sonuçlanmaktadır (Uddin vd., 2018).

Biyokütlede uygulanan piroliz yöntemlerinde yüksek enerji verimliliği elde etmek, biyokütle türü, parçacık boyutu, reaksiyon koşulları, reaktör tipi ve katalizör gibi birçok parametreye bağlıdır (Yogalakshmi vd., 2021). Biyokütledeki nem miktarının yüksek olması katran oluşumuna sebep olabilmektedir (Yogalakshmi vd., 2021). Biyokütledeki nem içeriği pirolizde önemli bir dezavantajdır ve nem içeriği %30'dan az olan biyokütle seçimi daha fazla tercih edilmektedir (Yogalakshmi vd., 2021). Biyokütle boyutu ise önemli bir piroliz parametresi olarak kabul edilir ve küçük boyutlar tercih edilir (Yogalakshmi vd., 2021).

Kalma süresine bakıldığında, kısa kalma süresi biyoyağ verimini, kalma süresindeki artış ise kömür ve gaz miktarını artırmaktadır (Yogalakshmi vd., 2021). Isıtma hızı, piroliz ürünlerinin verimi ve dağılımını büyük ölçüde belirlemektedir (Yogalakshmi vd., 2021). Piroliz aşamasında oluşan nihai ürünlerin kalitesi sıcaklığa bağlıdır (Yogalakshmi vd., 2021).

2.5.4. Gazlaştırma

Günümüzde gazlaştırma, biyokütle ve atıklardan sürdürülebilir bir şekilde enerji üretmek için dünya üzerinde yerleşik olarak görülen bir tekniktir. Nihai ürünü, motorlara yakıt ikmali, sanayi ve ulaşım sektörü gibi çeşitli amaçlarla kullanılabilen sentetik bir gazdır. Gazlaştırma, karbon içeren lignoselülozik malzemelerin indirgeyici koşullar altında ve yüksek sıcaklıkta (>650 °C), yanıcı bir gaz karışımına dönüştürülmesi olarak da tanımlanır.

Gazlaştırma, oksijenden yoksun bir atmosferde molekülleri elementlerine parçalayan ve daha sonra güç üretimi için kullanılabilecek H_2, CO, CO_2 ve kısa dallanmış hidrokarbonlardan oluşturmaktadır ve bu yöntem ile geri kazanılan enerji, yanma ve piroliz gibi diğer termokimyasal tekniklerden daha iyidir (Ramos vd., 2019).

2.5.4.1. Gazlaştırma prosesinin mekanizması

Gazlaştırma ile CO, H_2, CO_2, H_2O ve CH_4'e ek olarak, gerçek gazlaştırıcılar önemli hafif hidrokarbonlar, katran ve kömür üretir. Gazlaştırma mekanizması, birincil piroliz ürünleri (kalıcı gazlar, yoğunlaşabilir aromatikler ve kömür) üreten ilk piroliz adımıyla başlar. İkincil reaksiyonlar daha sonra aromatikleri ve kömürü küçük miktarlarda da olsa gazlara dönüştürür.

2.6. LİTERATÜR ÖZETİ

Mobilya atıklarının piroliz ve gazlaştırma yöntemleriyle değerlendirilmesi konusunda ulusal ve uluslararası literatüre bakıldığında birçok çalışmanın yapıldığı görülmüştür.

Aslan ve diğ. (2018), orta yoğunluklu lif levha piroliz ürünlerinin karakterizasyonunu ve termokinetik analizini incelemişlerdir. Bu çalışmada, orta yoğunluklu lif levhanın termal davranışı TG/DSC, birincil ayrışma aşamasında oluşan gaz ürünleri TGA ile birleştirilmiş FTIR spektrofotometresi ile analiz edilmiştir. Birincil ayrışmanın 190-425 °C'de oluştuğu, maksimum ayrışma sıcaklığında fenolik, alkol ve aldehit piklerinin tespit edildiği vurgulanmıştır. Py-GC/MS cihazı ile, birincil olarak yoğunlaşmayan piroliz ürünleri olarak

fenolleri, ketonları ve halka bileşikleri belirlenmiştir. Ortalama piroliz kinetiği aktivasyon enerjisi 127,40 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma ile orta yoğunluklu lif levha atıklarının termokimyasal yöntemler ile yenilenebilir yakıt olarak kullanılabileceği ve çevre problemleri yaratmayacağı vurgulanmıştır (Aslan vd., 2018).

Ferrerira ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, orta yoğunluktaki lif levha atıklarının piroliz değişkenlerini; sıcaklığını (450-600 °C), reaktörde kalma süresini (9-15-34 dk) ve reaktör tipini (vidalı konveyörlü pilot ölçekli) belirlemişlerdir. Piroliz veriminin sıcaklık ve reaktörde kalma süresinden etkilendiğini ve bunun sonucunda katı veriminin %17,3 ile %39,7 arasında değiştiğini, biyoyağ veriminin %23,9 ile %40 arasında değiştiğini, yakıt gazının ise %34,6 ile %50,7 arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Ticari olarak kullanılan aktif karbon yüzey alanına uygun aktif karbonu; 15 dk, 450 - 600 °C şartlarında elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ayrıca, bu koşullarda kömür yüzey alanlarının istenen özellikleri gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir. Proses enerji verimliliğini hesapladıklarında; %41,4 yakıt gazı, %35,5 katı ve %25,2 biyoyağ verimliliği elde etmişlerdir. Sıcaklık ve reaktörde kalma süresinin artmasıyla katı veriminin azaldığını, biyo-yağ ve yakıt gazı veriminin arttığını gözlemlemişlerdir. Katı ürünün kalorifik değerinin 29,915 kJ/kg (450 °C - 15dk), 32,800 kJ/ kg (600 °C - 15dk), biyoyağ kalorifik değerinin 26,963 kJ/kg olduğunu tespit etmişlerdir. Orta yoğunluklu lif levha atıklarına piroliz işlemi uygulanarak alternatif değerli ürünler elde etmişlerdir ve piroliz ürünlerinin (katı ve biyoyağ) enerji amaçlı ve kimya endüstrisinde kullanılabileceğini vurgulamışlardır (Ferreira vd., 2015).

Moreno ve Font (2015), mobilya odun atıklarının pirolizini, termokimyasal dönüşüm süreci olarak önemli ve yanma sürecinde bir adım olması nedeniyle incelemişlerdir. Mobilya odun atıklarının katkı maddeleri ve inorganik elementler içerdiğini, bu katkı maddelerinin ısıl işlemlerde değişikliğe neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada TGA'nın farklı dinamik ve dinamik + izotermik analizleri, TG-MS, TG-FTIR analizleri ve element analizleri yapılmıştır. İşlem görmemiş masif malzeme ile mobilya odun atıklarını kıyaslamışlardır. Maksimum gaz oluşumunun 360 °C'de gerçekleştiğini ve lignin bozunma sürecinin yanma ile geniş aralıklara yayılarak gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Uçucu ve yarı uçucu bileşikleri belirlemeye yönelik çalışmalarını ise 500 - 850 °C'de laboratuvar ölçekli boru şeklindeki reaktörde gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma neticesinde; mobilya atığının kalorifik değeri 15,8 MJ/kg, masif odunun kalorifik değeri 19,5 MJ/kg olarak bulunmuştur. Mobilya atığında yapılan element analizinde titanyum değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Mobilya atık örneği

pirolizinde NH_3 değeri yüksek oranda bulunurken, masif atık pirolizinde NH_3 değeri ihmal edilebilir düzeyde olduğunu tespit etmişlerdir ve mobilyalardaki bu azot içeriğinin reçinelerden kaynaklı olabileceğini belirtmişlerdir (Moreno ve Font, 2015).

Özçiftçi ve Günay (2013), yapmış oldukları piroliz çalışmasında; 400, 500 ve 600 °C sıcaklıklarda sarıçam odun atıklarını incelemişlerdir. Çalışmada sabit yataklı reaktör ile, Na_2CO_3, K_2CO_3 bazik tuzları ve $FeCI_3$ katalizörlerinin etkisini, 5 °C/dk ısıtma hızında ve 30ml/dk azot gazı(N_2) akış hızında belirlemişlerdir. Sarıçam odun talaşı atıklarının, sıcaklık ve katalizör tipinin piroliz ürünleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sarıçam mobilya atıkları ile yapılan bu çalışmada kimyasal, elementel ve 1H-NMR analizleri yapılmıştır. Ayrıca, kullanılan katalizörlerin sıvı verimine çok önemli bir etki oluşturmadığı, bununla birlikte Na_2CO_3 ve K_2CO_3 gibi bazik tuzların varlığında elde edilen biyoyağların özelliklerinde iyileşmeler sağlandığı ve sıcaklığın piroliz ürün verimini etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir (Özçifçi ve Özbay, 2013).

Uzun ve Kanmaz (2014), biyoyağ üretimi için mobilya atığı olan sarıçam talaşının katalitik pirolizini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, sıcaklık (400, 450, 500 ve 500 °C), katalizör (HZSM-5, HY, MCM-41), reaktör türü (sabit yataklı) ve parçacık boyutu (0,752 mm) belirlenmiştir. En yüksek biyoyağ verimi katalizör kullanılmadan 550 °C'de %42 olarak elde edilmiştir. Katalizör kullanılan piroliz işlemlerinde ise verimin %37,48, %30,04 ve %29,23'e düştüğü belirtilmiştir. FTIR, element, GC-MS ve TG analizleri yapılmıştır. Sonuç olarak, bir katalizörün kullanılmasının daha çok istenen kısımları(hidrokarbonlar) ve nispeten daha az istenen kısımları (oksijen gruplar ve ağır organikler) artırdığı görülmüştür. Elde edilen biyoyağların sıvı yakıt ve reçine üretiminde kullanılabileceği belirtilmiştir (Uzun ve Kanmaz, 2014).

Martins Mayer ve diğ. (2018), orta yoğunluktaki lif levhaların dünya çapında yüksek üretime sahip olduğunu ve toksik potansiyele sahip olmaları nedeniyle atık bertaraflarının endişe kaynağı olduğunu belirtmişlerdir. Araştırıcılar 4 farklı orta yoğunluklu lif levha atık ürünün (melamin, melamin olmadan okaliptüs ve sarıçam) katalitik pirolizini gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmada, orta yoğunluklu lif levha atıklarının katalitik ve termal hızlı pirolizlerini gerçekleştirmişlerdir ve sentetik zeolitlerin (HZSM-5S, Fe5S, Nb5S, Ni5S, Zn5S, Co5S) katalizör olarak etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada katalizörlerin monoaromatik hidrokarbonları (%23,77 - 47,61) ve çok halkalı aromatik hidrokarbonları (%0,66 – 5,07)

artırdığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, yapılan bu çalışma ile katalitik piroliz ile hidrokarbonlarda, yakıt bileşimine daha çok benzeyen bir ürüne dönüşen artış sağlanmıştır (Martins Mayer vd., 2018).

Özbay ve diğ. (2011), atık melamin kaplı yonga levhaların piroliz çalışmasında, katalizör tipi Lewis asitleri ($AICI_3$, $TiCI_4$ ve $FeCI_3$), bazlar (NaOH, KOH) ve bazik tuzları (Na_2CO_3 ve K_2CO_3) kullanmışlardır. Bu çalışmayı 400-500-600-700 °C sıcaklıkta ve sabit yataklı reaktör kullanarak bir saat işlem süresinde gerçekleştirmişlerdir. Sıvı verimi %34,9 - 46.4, gaz verimi %16,1 - 32,5 ve katı verimi %25,7 - 41,4 olarak bulunmuştur. Bulguların katalizör ve sıcaklık ile değiştiği gözlenmiştir. Katalizör ve sıcaklığın, piroliz sonucu oluşan ürünlerin dağılımına ve biyoyağ bileşimi üzerine olan etkileri tartışılmıştır. Sonuç olarak, melamin kaplı yonga levhaların pirolizinden elde edilen biyoyağın çok çeşitli oksijenli hidrokarbonlar içerdiği, fenollerin test edilen tüm çalışmalar için biyoyağlarda tanımlanan bileşikler olduğu, Lewis asitleri beraberliğinde üretilen biyoyağlarda aldehit içeriğinin bulunduğu, öte yandan, bazlar ve bazik tuzlar ile yapılan işlemlerde aldehit içeriğinin bulunmadığı belirlenmiştir. En yüksek sıvı verimini 600 °C sıcaklıkta ve katalizör olarak NaOH'in kullanılması durumunda elde ettiklerini vurgulamışlardır (Özbay vd., 2011).

Özbay ve diğ. (2015), mobilya atıklarından sarıçam talaşının, 500 °C sıcaklıkta, sabit yataklı reaktörde, sıcaklık artışı 5 °C/dk olacak şekilde bir saat işlem süresi içerisinde pirolizini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmada, odun atıklarından elde edilen piroliz ürün verimleri ve biyo-kömür özelliklerindeki farklılıkların açıklaması üzerinde durulmuş ve potansiyel bir enerji olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Katı olarak elde edilen ürünlerde, FTIR, elementel ve kimyasal analizler yapılmıştır. Mobilya atıklarının piroliz yöntemi ile katı yakıta dönüştürülmesinin uygulanabilir bir teknoloji olduğunu, oluşan katının aktif karbon ve enerji olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır (Özbay vd., 2015).

Han ve diğ. (2015), atık orta yoğunluklu lif levha ve yonga levhaların kinetiğini ve oluşan piroliz ürünlerini incelemişlerdir. Orta yoğunluklu lif levha ve yonga levhalar kriyojenik öğütme ile parçacık boyutları <300mm olacak şekilde öğütülmüşlerdir. Ayrıca ticari olarak selüloz, hemiselüloz ve lignin tozlarını ayrı ayrı kıyaslamak için de piroliz yapmışlardır. Aktivasyon enerjisi değerlerini orta yoğunluklu lif levha için 166 - 372 kJ/mol aralığında belirlemişlerdir. İzotermal piroliz ile 300 °C'de hemiselülozdan elde edilen piroliz ürünleri ile

hammaddenin 400 °C'de elde edilen piroliz ürünlerinin benzer dağılım gösterdiği belirlenmiştir ve 600 °C'lere çıkıldığında gaz ürünlerindeki verimin arttığı saptanmıştır (Han vd., 2015).

Jindal ve Jha (2016), farklı türlerdeki odunlardan üretilmiş mobilya atıklarını, farklı alkali katalizörleri (NaOH, Na_2CO_3, KOH ve K_2CO_3) eşliğinde, 280 °C'de ve 15 dk süre ile kesintili reaktör yardımıyla çalışarak hidrotermal sıvılaşma üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çıkan ürünlerin verimini değerlendirmek için GC-MS, FTIR ve elementel analizleri gerçekleştirmişlerdir. En yüksek biyoyağ veriminin %34,9 olduğunu ve en düşük kalıntı veriminin %6,8 olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, alkali katalizörün etkisiyle üretilen biyoyağların karbon, hidrojen içeriğinin zengin olduğunu ve oksijen seviyesinin azaldığını vurgulamışlardır (Jindal ve Jha, 2016).

Zhang ve diğ. (2016), Kavak ve Üre Formaldehit reçinesi ile yapılan yonga levha atıklarının piroliz sürecini ve ürün özelliklerini araştırmışlardır. Piroliz işlemi sıcaklık (600 °C), sıcaklık artışı (5 °C/dk), inert gaz ve akış hızı (argon gazı 100 ml/dk) koşullarında laboratuvar ölçekli boru şeklinde bir reaktörde gerçekleştirmişlerdir. TG-FTIR, GC-MS ve elementel analizleri yapmışlardır. Yapılan çalışmada, kavak ve ÜF reçine ile karşılaştırıldığında, yonga levha pirolizinin daha fazla biochar ve daha az uçucu madde ürettiğini, kavağın pirolizinde CH_4, CO, CO_2 gibi gaz ürünlerinin bulunduğunu, N (Azot) bileşiklerinin ÜF reçinesinin ana uçucu ürünleri olduğunu belirtmişlerdir. Üre reçine ilavesinin yonga levhada azotlu bileşiklerin miktarında %23,40'lık artışa sebep olduğu vurgulanmıştır (Zhang vd., 2016).

Kazimierski ve diğ. (2020), mobilya atıklarından dumansız yakıt üretimi için 4 farklı ürün (çam talaşı tozu, yönlendirilmiş yonga levha, orta yoğunluklu lif levha, Yonga levha) üzerinde yavaş ve hızlı piroliz işlemi gerçekleştirmişlerdir. Piroliz işlemi; sıcaklık (600 °C), ısıtma hızı (15 °C/dk ve 100 °C/dk), azot atmosferinde laboratuvar ölçekli bir fırının içine yerleştirilmiş bir kesikli reaktör şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada, yavaş ve hızlı piroliz katı verimlerini ve elementel analizlerini karşılaştırmışlardır. Katı verimi incelendiğinde; orta yoğunluklu lif levha (yavaş %31,4, hızlı %24,4), yönlendirilmiş yonga levha (yavaş %37, hızlı %23,3), Sarıçam talaşı (yavaş %29,6, hızlı %19,6), Yonga levha (yavaş %31,8, hızlı %25,1) verimlerini elde etmişlerdir ve sıcaklığın artış hızından etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda, mobilya atıklarının dumansız kömür olarak sınıflandırılacak özelliklere uygun karakterizasyonda olması nedeniyle düşük emisyonlu yakıta dönüştürülmesinin uygun olacağını belirtmişlerdir (Kazimierski vd., 2020).

Ahmed ve diğ. (2020), mobilya endüstrisinden akasya ağacı talaş atıklarını biochar ve biyoyağ olarak değerlendirmek amacıyla araştırmışlardır. Yapılan çalışmada; BET, TEM, FTIR, TGA, elementel analizler yapmışlardır. Piroliz işlemini; sıcaklık (400 – 500 - 600 °C), azot gazı akış hızı (300 cm^3/dk), biyokütle besleme hızı (180 g/saat), vidalı konveyörün dönüşü (4,5 RPM), malzemelerin kalma süresi (5 dk) ve biyokütle parçacık boyutu (0,5-1,0 mm) gibi parametreleri dikkate alarak vidalı reaktörde gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonunda, 400 °C'de %51,85 biochar, %29,40 biyoyağ, %16,70 yoğunlaştırılamayan gazlar, 500 °C'de %35,23 biochar, %45,10 biyoyağ, %19,67 yoğunlaştırılamayan gazlar, 600 °C'de %29,72 biochar, %31,81 biyoyağ, %38,47 yoğunlaştırılamayan gazlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Sıcaklık artmasıyla gaz ürünlerinde ve oluşan biochar yüzey alanlarında artış gözlemlendiğini belirtmişlerdir (Ahmed vd., 2020).

Moralı ve diğ. (2016), gürgen (C*arpinus betulus* L.) talaşından biyoyağ ve biochar üretebilmek için yavaş piroliz işlemi uygulamışlardır. Yavaş piroliz işlemini; sıcaklık (400 - 600 °C), ısıtma hızı (10-50 °C/dk) ve azot gazı akış hızı (50 - 150 cm^3/dk) parametrelerini dikkate alarak yapmışlardır. Oluşan biochar ve biyoyağ özelliklerini FTIR, GC/MS, 1H NMR, TEM ve BET gibi çeşitli analizler ile incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, maksimum biyoyağ verimine; ısıtma hızı (30 °C/dk), akış hızı (100 cm^3/dk), sıcaklık (550 °C) koşullarında ulaşılırken, maksimum biochar verimine; ısıtma hızı (10 °C/dk), akış hızı (50 cm^3/dk), sıcaklık (400 °C) koşullarında ulaşmışlardır. Sonuç olarak, gürgen talaşının yavaş pirolizi ile elde edilen biocharın yakıt uygulamalarının hem potansiyele sahip olduğunu hem de çevre için uygun olduğunu belirtmişlerdir (Moralı vd., 2016).

Ayiania ve diğ. (2019), ekonomik büyüme ile birlikte sürekli artan kentsel atıkların düzenli depolama alanlarını hacimce dolduran odun ve odun esaslı ürünlerin katma değerli ürünlere dönüştürülmesi için piroliz işlemi uygulamışlardır. Atık olarak; ahşap paletler, işlenmiş ahşap, kereste fabrikasındaki kesilmiş uçlar, kontrplak, yonga levha, boyalı ahşap ve mobilyaları kullanmışlardır. Piroliz işlemini; parçacık boyutu (yaklaşık 1mm), sıcaklık (400 ve 600 °C) azot akış hızı (300 ml/dk) koşullarında kaşık reaktörde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, atık olarak nitelendirilen mobilya ürünlerinden temiz kullanılabilir biochar elde etmeye odaklanıldığını belirtmişlerdir. Boyalı mobilyalardan ve işlenmiş ahşaptan yapılan biocharda yüksek konsantrasyonlarda civa (Hg) ve arsenik (As) bulduklarını ve eser metallerin giderilmesi için asit ile yıkamanın en etkili yol olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, boyalı mobilya ve işlenmiş mobilyaların biochar olarak kullanılmadan önce çok iyi karakterizasyonunun

yapılması gerektiğini ve çevreye zarar verebilecek olan eser metallerden arındırılması gerektiğini vurgulamışlardır (Ayiania vd., 2019).

Vongsvarnrungruang ve diğ. (2018), siklon reaktörde gazlaştırma işlemi ile atık odun talaşının yakıt gaz ürününe dönüştürülmesi sırasında gazlaştırma parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Parametrelere bakıldığında; performans, gaz bileşimi (CO, CO_2, CH_4, H_2 ve C_nH_m) ve hidrojen dönüşümleri açısından değerlendirmişlerdir. Gazlaştırma işlemini; sıcaklık (700 – 800 - 900 °C), partikül boyutu (120 - 150 μm), gazlaştırma ajanı (azot ve saf oksijen), biyokütle besleme hızı (0,32- 0,47 kg/saat) ve debi hızı (0,15, 0,30, 0,45, 0,60) gibi parametrelerini dikkate alarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda, yüksek performanslı sentez gazı üreten koşullarda akış hızı 0,45'te, sıcaklık 900 °C'de elde edildiğini, toplam karbon ve hidrojen dönüşümlerinin sırasıyla %90 ve %60 olduğunu belirlemişlerdir (Vongsvarnrungruang vd., 2018).

Foong ve diğ. (2021) yapmış oldukları çalışmada yonga levha, kontrplak ve lif levha örneklerine piroliz işlemi uygulamışlardır. 250 - 550 °C sıcaklıkta gerçekleştirdikleri piroliz sonrasında ortaya çıkan piroliz ürünlerini incelemişlerdir (Foong vd., 2021).

Han ve diğ. (2015), yonga levha ve orta yoğunluklu lif levha örneklerini 300 - 600 °C sıcaklık aralığında piroliz işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda, yonga levha ve orta yoğunluklu lif levha örnekleri piroliz özelliklerinin benzer sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir (Han vd., 2015).

Alam ve diğ. (2020), katı atık depolamadan geri kazanılmış katı yakıtlar ile çam odununu belirli oranlarda harmanlayarak 950 °C sıcaklıkta gazlaştırma işlemi yapmışlardır. Dolomit ve kireç gibi mineraller ekleyerek gazlaştırma performansının iyileştirilmesini sağlamışlardır (Tanvir Alam vd., 2020).

Hu ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada arıtma çamuru ile çam odununun birlikte gazlaştırılmasını incelemişlerdir. Katalitik gazlaştırma işlemini 600 - 900 °C sıcaklık aralığında yapmışlardır. NiO/değiştirilmiş dolomit katalizörü ile katran veriminin azaldığını ve kuru gaz veriminin arttığını belirtmişlerdir (Hu vd., 2016).

Literatür incelendiğinde, orman ürünleri sektöründe oluşan atıklardan birçok çalışma yapılmıştır fakat ikincil tüketim sonucu oluşan belediyeler tarafından toplanan mobilya atıkları üzerine, sentez gazı ile ilgili bir çalışmaya rastlanmamıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER VE HAZIRLIK SÜRECİ

Çalışmada kullanılan numuneler Beşiktaş Belediyesi Çevre Müdürlüğü tarafından, kentsel atık olarak toplanan mobilya atıklarından temin edilmiştir. Bu atıklar içerisinden yonga levha masa ve masif ahşap dolap atığı çalışmada kullanılmıştır. Burada örnek seçilirken farklı malzeme yapısında iki örnek seçilmeye çalışılmıştır. Yonga levha içeriği çeşitli ahşap tutkalları ile yongalanmış ağaç malzemenin basınç altında prenslenmesiyle elde edildiği için masif örneğe göre daha heterojen bir yapı göstermektedir. Çalışmada kullanılan bu örnekler üzerinde nem tayini, sabit karbon hesaplaması, uçucu organik madde tayini, yanma kaybı ve kül tayini analizleri yapılmıştır. Şekil 3.1'de temin edilen ahşap mobilya atık örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Beşiktaş belediyesi çevre mühendisliği tarafından toplanan ahşap mobilya örnekleri.

3.1.1. Materyallerin Öğütülmesi

Çalışmada temin edilen ahşap mobilya atıkları üzerinde bulunan metal aksamlardan ayrıldıktan sonra kalan ahşap kısım, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Orman Fakültesi ahşap atölyesindeki Vecoplan Hacker marka yongalama makinesinde yonga boyutlarına indirgenmiştir. Şekil 3.2'de yongalama makinası, Şekil 3.3'de ahşap mobilya atıklarının yongalamadan önceki görüntüleri ve Şekil 3.4'de ahşap mobilya atıklarının yongalanmış görüntüleri bulunmaktadır.



Şekil 3.2: Yongalama makinası.



a-) Masif atık örneği

b-) Yonga levha atık örneği

Şekil 3.3: Ahşap mobilya atıklarının yongalanmadan önceki görüntüleri.



a-) Masif atık örneği

b-) Yonga levha atık örneği

Şekil 3.4: Ahşap mobilya atıklarının yongalanmış görüntüleri.

Yongalama sonrasında, kimyasal analizler için öğütme işlemi laboratuvarda bulunan Retsch marka öğütücü ile yapılmıştır. TAPPI T257 cm-85 (2012) standardına göre analiz örnekleri hazırlanmıştır. Öğütücü Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Öğütücü cihazı.

3.2. AHŞAP MOBİLYA ATIKLARININ PELETLENMESİ

Yongalanmış ahşap mobilya atıkları elektrik enerjisi ile çalışan, motor gücü 4 kW ve üretim kapasitesi 60-80 kg/h olan Şekil 3.6'da gösterilen makinada peletlenmiştir. Dairesel delikli düz sıralı kalıba sahip bu disklerin delik çapı 6 mm ve kalıp boyu 21,90 mm'dir.

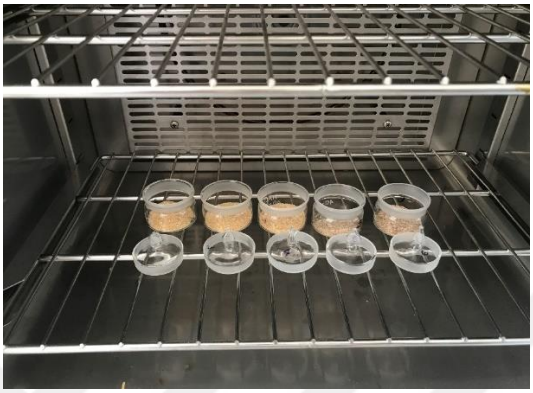


Şekil 3.6: Pelet makinası.

3.3. DENEYSEL YÖNTEMLER

3.3.1. Nem Miktarı Tayini

Masif atık örneği ve yonga levha atık örneği nem içerikleri TAPPI T258 om-2 (2006) standardına göre belirlenmiştir. Şekil 3.7'de nem tayini yapılan örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Nem tayini yapılan örnekler.

3.3.2. Kül Miktarı Tayini

Masif atık örneği ve yonga levha atık örneği kül içerikleri TAPPI T211 om-12 (2012) standardına göre 525±25 °C sıcaklıkta belirlenmiştir. Şekil 3.8' de kül analiz cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Kül analiz cihazı.

3.3.3. Uçucu Madde Tayini

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

3.3.4. Sabit Karbon

Sabit karbon değeri, aşağıda belirtilen Denklem 3.1'deki hesaplama ile yapılmıştır (ASTM D3172-13, 2020).

$$\% \text{ Sabit Karbon} = 100 - (\%\text{Nem Miktarı} + \%\text{Kül Miktarı } \%\text{Uçucu Madde Miktarı}) \quad (3.1)$$

3.3.5. Elementel Analiz

Tez kapsamında kullanılan atıklara ve termokimyasal işlemler sonucu elde edilen katı ürünlere elementel analizi yapılarak atıkların içerisinde bulunan C, H, N ve S yüzdeleri tespit edilmiştir. Elementel analiz deneyleri İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan, Thermo-Flash 2000 CHN-S elementel analiz cihazı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.9'da elementel analiz cihazı gösterilmiştir.

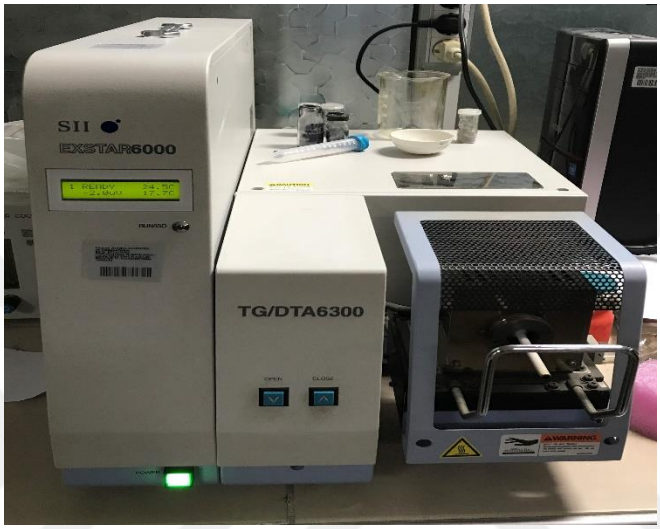


Şekil 3.9: Thermo-Flash 2000 elementel analiz cihazı.

3.3.6. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Bu çalışmada termogravimetrik analiz, elde edilen 2 farklı mobilya atığının termal bozunma davranışlarını incelemek için yapılmıştır. Bu yöntem ile malzemenin sıcaklığı artarken malzemede oluşan madde kayıpları ölçülebilmektedir. Ayrıca, malzemenin uçucu madde miktarı, nem miktarı ölçümleri de yapılabilmektedir. Termogravimetrik analiz (TGA), bir numunenin kütlesinin belirli bir eğimdeki sıcaklık artışına bağlı olarak, belirli bir zaman sürecindeki değişimini ölçmek amacıyla uygulanan bir yöntemdir. TGA ile kütle değişiklikleri, sıcaklık kararlılığı, oksidasyon/indirgeme davranışı, ayrışma gibi fiziksel olaylar hakkında bilgi sağlanabilir (Garcia-Herrera ve Price, 2020; Hashemifard vd., 2020). Bu işlem sırasında uygulamaya maruz bırakılan numune, meydana gelen termokimyasal reaksiyonlar sonucunda

çeşitli katı ve gaz halindeki ürünlerin oluşacağı bir dönüşüme uğrar (Garcia-Herrera ve Price, 2020; Hashemifard vd., 2020). TGA'da bu gaz halindeki yan ürünler uzaklaştırılır ve numunenin kalan kütlesindeki değişiklikler kaydedilir (Garcia-Herrera ve Price, 2020; Hashemifard vd., 2020). TGA Analizleri, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarından hizmet alımı şeklinde yaptırılmıştır. Şekil 3.10'da TGA analiz cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.10: Termogravimetrik (TGA) analiz cihazı.

3.3.7. FTIR-ATR Analizi

FTIR-ATR Analizi, çalışmada kullanılan ahşap mobilya atıklarının kimyasal karakterizasyonunu belirlemek için yapılmıştır. IR spektroskopisi; moleküllerdeki çeşitli bağların titreşim frekanslarını ölçmektedir ve moleküldeki fonksiyonel gruplar hakkında bilgi vermektedir. Bu yöntem ile moleküler bağ karakterizasyonu tanımlanarak katı, sıvı ve gaz halindeki organik bileşiklerin yapısındaki fonksiyonel gruplar belirlenmektedir. İki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu ve bağlanma yerleri saptanarak, herhangi bir maddeye ait bileşiklerin yapısında bulunan fonksiyonel grupların dalga boyuna göre absorblama ve geçirgenlik değerleri tespit edilebilmektedir. Kısaca tanımlamak gerekirse IR spektroskopisi ile molekül içi bağlar üzerine düşürülen kızılötesi ışınların, bağların titreşim ve dönme hareketleri ile soğurulmasına dayanır. Ancak bu olay sadece dipol momente sahip polar moleküllerde gözlemlenir. Katı, sıvı ve gaz numunelerinden kızılötesi spektrumu elde edilmesiyle uygulanan bir tekniktir (Köseoğlu, 2015; Aydın, 2020).

IR incelemeleri, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü Orman Ürünleri Kimyası ve Teknolojisi Anabilim dalında bulunan ATR-birimi (Universal ATR Diamond Zn/Se) ile kombine edilmiş Perkin Elmer 100 FT-IR Spektrofotometre cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mobilya atık örnekleri ve deneyler sonrası elde edilen katı örnekler, 650 ile 4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında 4 cm^{-1} çözünürlüğünde incelenmiştir. Şekil 3.11'de FTIR-ATR cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.11: FTIR-ATR cihazı.

3.3.8. Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi

TEM Analizi, katı yüzeylerin morfolojisini ve ayrıntılı yüzey yapısını karakterize etmek için kullanılan bir tekniktir. TEM yönteminde, yüksek enerjili bir elektron demeti numune yüzeyini tarayarak üç boyutlu net görüntüleri, büyük çözünürlük ve alan derinliği ile elde edilebilmektedir. TEM 'de görünür ışıktan daha kısa elektron dalga boylarına dayalı olarak çok daha yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturmak için hızlandırılmış elektron ışın demetleri, elektrostatik ve elektromanyetik lensler kullanılmaktadır (Cooke vd., 1996; Parvez, 2019; Yan, 2019).

Tez çalışmasında kullanılan numunelerin ve deneyler sonucunda elde edilen katı örneklerin morfolojik yapılarının karakterize edilmesi için TEM analizi yapılmıştır. TEM Analizleri, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan FEI Quanta Feg 450 marka cihaz ile hizmet alımı yoluyla yapılmıştır. Şekil 3.12'de tez çalışmalarında kullanılan taramalı elektron mikroskobu gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Taramalı elektron mikroskobu cihazı.

3.3.9. Isıl Değer Analizleri

Tez çalışmasındaki atık numunelerde ve deneyler sonrası oluşan katı numunelerde ısıl değer analizleri yapılmıştır. Bu deneyler ASTM D5865-13 (2013) standardına göre yapılmıştır. Bu analiz, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan IKA C200 Bomba Kalorimetresi cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.13'de tez çalışmalarında kullanılan bomba kalorimetre cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3.13: Bomba kalorimetre cihazı.

3.3.10. Gaz Analizleri

Deney sırasında oluşan sentez gazları, yine Çevre Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan ABB AO2020 model sürekli gaz analizörü cihazında, CO, CO_2, H_2, CH_4 ve O_2

miktarlarının hacimsel yüzde olarak ölçümü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Gaz analiz ölçüm değerleri ALPteknik yazılımı ile bilgisayar üzerinden takip edilmiş ve bilgisayarda kayıt altına alınmıştır. Şekil 3.14'de ABB sürekli gaz analizörü gösterilmiştir.



Şekil 3.14: ABB sürekli gaz analizör cihazı.

3.3.11. Isıl Değerlerin Hesaplanması

Yapılan deney işlemleri sonucunda oluşan CO, CH_4 ve H_2 verilerinin ısıl değerlerinin matematiksel olarak hesaplanmasında Tablo 3.1'de belirtilen değerler referans alınarak yapılmıştır.

Tablo 3.1: Hidrojen, Metan ve Karbonmonoksit gazlarına ait yoğunluk ve ısıl değer hesaplamaları (URL1).

Gazlar	Yoğunluk	Üst Isıl Değer				Alt Isıl Değer			
	kg/m³	MJ/kg	MJ/m³	kcal/m³	kcal/kg	MJ/kg	MJ/m³	kcal/m³	kcal/kg
Hidrojen (H_2)	0,090	141,7	12,7	3050	33889	120,0	10,8	2570	28555
Metan (CH_4)	0,716	55,5	39,8	9530	13284	50,0	35,8	8570	11946
Karbonmonoksit (CO)	1,140	10,1	12,6	3014	2411	10,1	12,6	3014	2411

Örneğin; sentez gaz içerisinde %20 H_2, %10 CO ve %5 CH_4 bulunduğunda, üst ısıl değeri hesaplamak için Tablo 3.1'de bulunan veriler referans alınarak;

Üst Isıl Değer = (CO x3014 + CH_4 x 9530 + H_2 x 3050) / 100 = 1387,9 kcal/m^3 olarak hesaplanmaktadır.

3.3.12. Reaktör Tasarımı

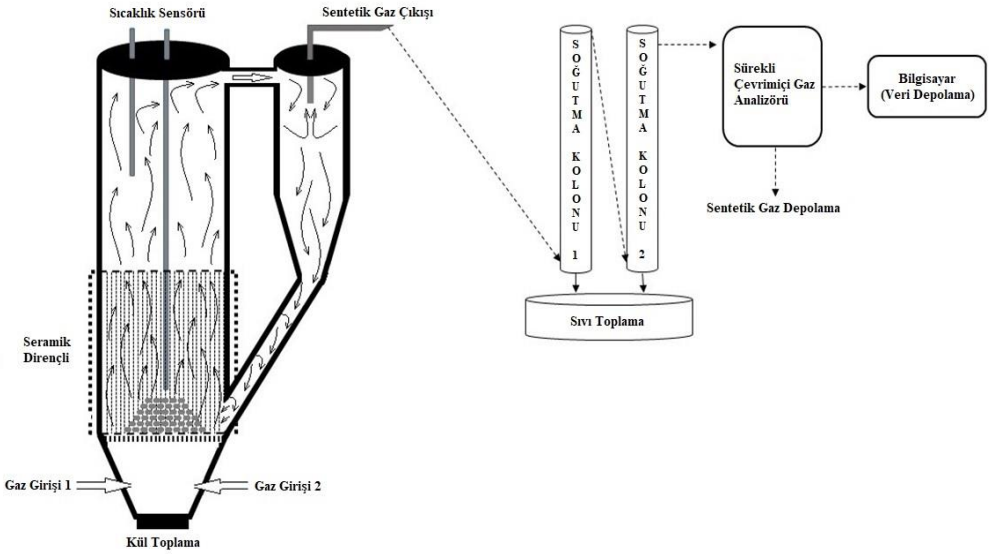
Gazlaştırma deneyleri, siklon ünitesi ile sirkülasyonu sağlanmış iç çapı 8 cm, yüksekliği 50 cm ve 2 L hacimli olan yukarı akışlı sabit yataklı çelik reaktör kullanılarak yapılmıştır. Isıtma hızı anlık olarak kontrol edilmiştir. Reaktörde deney işlemi esnasında oluşan gaz kaçaklarını engellemek üzere saf grafit veya grafit-kurşun sarmal contalar kullanılmıştır.

Reaktör üzerinde iki adet gaz girişi ve oluşan sentez gazın dışarıya çıkmasına olanak sağlayan çıkış hattı bulunmaktadır. Deney uygulanırken reaktörün iç sıcaklığı termokupol ile ölçülmüştür. Reaktörde kullanılan siklon ünitesinin amacı uçucu kül formlarının üretilen gazdan ayrılmasının sağlanmasıdır.

Deney sırasında reaktörden çıkan sentez gazlar soğutma kolonlarından geçerken bir kısmı yoğunlaşıp sıvı hale geçerek iki erlen mayere toplanmıştır. Soğutma kanallarından yoğunlaşmayıp çıkan gazlar ise belirli filtrelerden geçirilerek ABB sürekli gaz analizörüne aktarılmıştır. Bu cihaz sayesinde sentez gaz içeriğinde bulunan CO, CO_2, H_2, CH_4 ve O_2 miktarlarının hacimsel yüzde olarak ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.15'de deney sırasında kullanılan reaktör görseli, Şekil 3.16 ise reaktör sisteminin tanıtımı bulunmaktadır.



Şekil 3.15: Laboratuvarda kullanılan reaktör düzeneği.



Şekil 3.16: Reaktör sisteminin tanıtımı.

3.3.13. Gaz Toplama Torbası

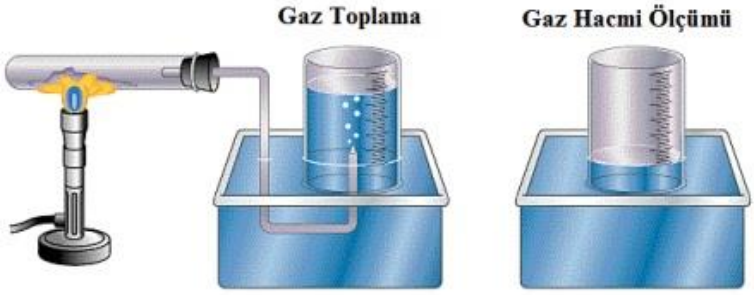
40 l hacme sahip Tedlar örnekleme torbası, deneyler sonucunda ortaya çıkan sentez gazının ABB sürekli gaz analizöründen geçirildikten sonra cihaz çıkışından üretilen gazı depolamak için kullanılmaktadır. Tez çalışmasında deney aşamasında oluşan sentez gazları bu torba ile toplanmıştır. Torba görselleri Şekil 3.17'de gösterilmektedir.



Şekil 3.17: Gaz toplama torbası.

3.3.14. Gaz Hacminin Hesaplanması

Yapılan deneylerde sentez gaz hacminin belirlenmesi için oluşan ürün gaz toplama torbasına toplanmıştır ve Şekil 3.18'de gösterilen su taşırma yöntemi uygulanarak yaklaşık hacmi hesaplanmıştır.



Şekil 3.18: Gaz hacmi ölçüm yöntemi (Kaya, 2016).

3.3.15. Soğuk Gaz Verimliliği

Bir gazlaştırıcının performansı genellikle soğuk gaz verimliliği ile ifade edilmektedir (Güngör A. vd., 2011). Soğuk gaz terimi, gazın ortam sıcaklığına soğutulduğu ve katran buharlarının uzaklaştırıldığı durumu ifade etmektedir (Güngör A. vd., 2011).

$$\text{Soğuk gaz verimliliği} = \frac{\text{Sentez gazın hacmi(m3/s)} \quad \text{x Üst Isıl Değer (sentez gaz)}}{m\ (yakıtın\ kütlesi) x\ Üst\ Isıl\ Değer\ (yakıt)} \qquad (3.2)$$

Yukarıda verilen denklem gazlaştırma deneyleri sonucunda oluşan gazın dönüşüm oranlarını bulmak için uygulanmıştır.

3.3.16. İstatistiksel Veri Analizi

Yapılan gazlaştırma deneyleri sonucunda verilerin anlamlandırılması, farklılıkların ortaya çıkarılması ve sonuçların irdelenmesi için Windows 10 uyumlu SPSS 21.8 (Statistical Package for Social Sciences) istatistik veri analiz programı kullanılarak yapılmıştır. Gazlaştırma verileri yazılıma aktarıldıktan sonra regresyon, korelasyon ve ANOVA analizleri yapılarak sonuçlar irdelenmiştir.

Regresyon analizi ile bağımsız değişkenler kullanılarak bağımlı değişkenler üzerine ilişkiler incelenir ve fonksiyonel olarak mevcut veriler içerisinde en iyi modeli kurar. Korelasyon analizi ise bağımlı ve bağımsız değişkenlerin yönünü, şiddetini ve değişkenler arasındaki doğru ve anlamlı bir ilişkinin olup olmadığı incelenmektedir. Korelasyon katsayısı r harfi ile ifade edilmektedir ve bu değer pearson katsayısı olarak bilinmesinin yanı sıra -1 ile +1 arasında değerler almaktadır. R değeri, pozitif yönde ilerlerse değerlerin birbirleriyle yakın bir ilişkisi

olduğu, negatif yönde ilerlerse birbirleriyle uzak bir ilişkisi olduğu ve sıfıra yakın değerler alması halinde bir ilişkinin olmadığı şeklinde yorumlanmaktadır.

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.

3.3.17. Deneylerde Uygulanan Parametreler ve Deneylerin Kodlanması

Bu çalışmada 32 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde uygulanan parametreler ve deneylerin kodlanması Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Deneyde uygulanan parametreler ve deneylerin kodlanması

Örnek	Ajan	Sıcaklık	Debi	Numaralandırma
Masif	Kuru hava	700	0,05	**M1**
Masif	Kuru hava	700	0,1	**M2**
Masif	Kuru hava	700	0,2	**M3**
Masif	Kuru hava	700	0,4	**M4**
Masif	Kuru hava	800	0,05	**M5**
Masif	Kuru hava	900	0,05	**M6**
Yonga Levha	Kuru hava	700	0,05	**Y1**
Yonga Levha	Kuru hava	700	0,1	**Y2**
Yonga Levha	Kuru hava	700	0,2	**Y3**
Yonga Levha	Kuru hava	700	0,4	**Y4**
Yonga Levha	Kuru hava	800	0,05	**Y5**
Yonga Levha	Kuru hava	900	0,05	**Y6**
Masif	Saf Oksijen	700	0,1	**M7**
Masif	Saf Oksijen	800	0,1	**M8**
Masif	Saf Oksijen	900	0,1	**M9**
Yonga Levha	Saf Oksijen	700	0,1	**Y7**
Yonga Levha	Saf Oksijen	800	0,1	**Y8**
Yonga Levha	Saf Oksijen	900	0,1	**Y9**
Masif (2 saat Piroliz+ gazlaştırma)	Azot+ Kuru Hava	500-800	0,1 Azot, 0,05 kuru hava	**M10**
Masif (4 saat Piroliz+ gazlaştırma)	Azot+ Kuru Hava	500-800	0,1 Azot, 0,05 kuru hava	**M11**
Masif (6 saat Piroliz+ gazlaştırma)	Azot+ Kuru Hava	500-800	0,1 Azot, 0,05 kuru hava	**M12**
Yonga Levha (2 saat Piroliz+ gazlaştırma)	Azot+ Kuru Hava	500-800	0,1 Azot, 0,05 kuru hava	**Y10**
Yonga Levha (4 saat Piroliz+ gazlaştırma)	Azot+ Kuru Hava	500-800	0,1 Azot, 0,05 kuru hava	**Y11**
Yonga Levha (6 saat Piroliz+ gazlaştırma)	Azot+ Kuru Hava	500-800	0,1 Azot, 0,05 kuru hava	**Y12**
Masif Pelet	Kuru Hava	800	0,05	**MP1**
Masif Pelet	Kuru Hava	900	0,05	**MP2**
Yonga Levha Pelet	Kuru Hava	800	0,05	**YP1**
Yonga Levha Pelet	Kuru Hava	900	0,05	**YP2**
Masif Pelet	Saf Oksijen	800	0,1	**MP3**
Masif Pelet	Saf Oksijen	900	0,1	**MP4**
Yonga Levha Pelet	Saf Oksijen	800	0,1	**YP3**
Yonga Levha Pelet	Saf Oksijen	900	0,1	**YP4**

4. BULGULAR

4.1. AHŞAP MOBİLYA ATIK KARAKTERİZASYONU

Deneyde kullanılan ahşap mobilya atık numunelerinin elementel analizi ve ısıl değer analizi sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: Ahşap mobilya atıkların elementel analizi ve kalorifik değeri.

Deney Adı	**Elementel Analiz**				**Isıl Değer Analizi**
Numune	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	Isıl Değer (kcal/kg)
Masif Atık	48,13*	6,32*	0,35*	0,18*	4453
Yonga Levha Atığı	44,70*	5,32*	2,32*	0,17*	4217

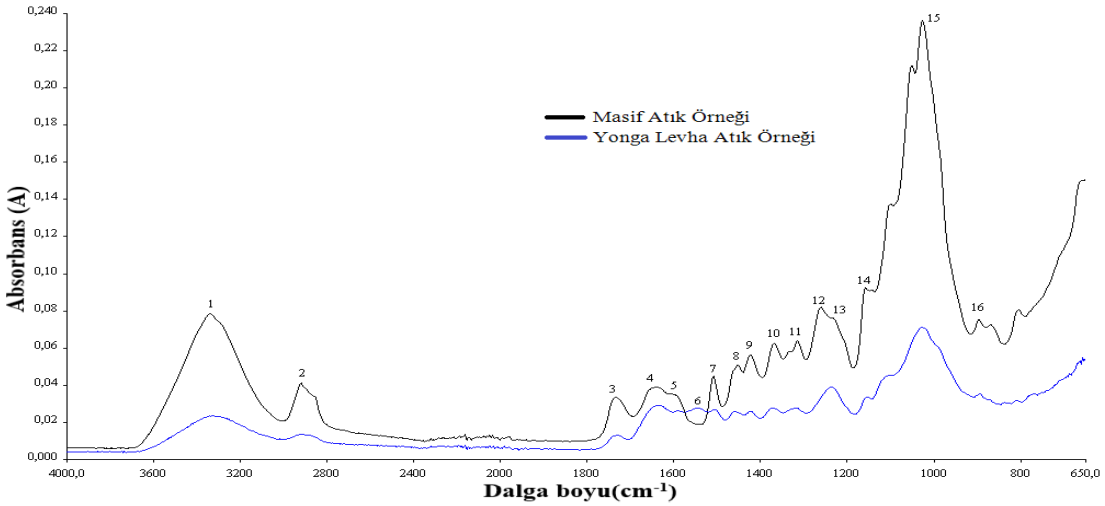
*Referans alınmıştır (Chen vd., 2016; Özbay vd., 2011).

Deneyde kullanılan ham numunelerin kül, yanma kaybı, uçucu madde tayini ve sabit karbon ölçümleri yapılmıştır ve kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2: Ahşap mobilya atık örneklerinin kimyasal analizi.

Deney Adı	**Kimyasal Analizler, % ağırlık**				
Numune	Nem	Kül (O_2'li)	Yanma kaybı	Uçucu Madde	Sabit Karbon
Masif Atık	7,32	0,37	99,63	78,82	13,49
Yonga Levha Atığı	7,57	2,34	97,66	71,29	18,80

Ahşap mobilya atık örneklerinin FTIR analiz spektrumları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Tablo 4.3'de ise ahşap mobilya atık örneklerinin FTIR değerlendirme sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Ahşap mobilya atık örneklerinin FTIR analiz sonuçları.

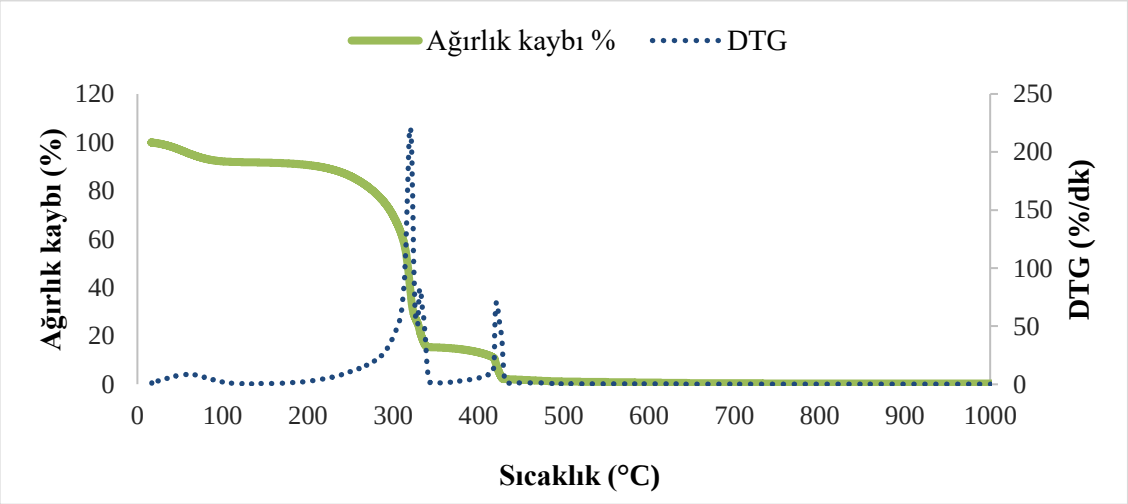
Tablo 4.3: Ahşap mobilya atık örneklerinin FTIR değerlendirme sonuçları.

Numara	**Dalga boyu (cm^{-1})**	**Fonksiyonel Grup**	**Bulunduğu Örnek***
1	3336	Bağlı hidroksil gruplarının O-H ve gerilimi	1,2
2	2916	Yan zincirlerin aromatik metoksil, metil ve metilen gruplarında simetrik CH gerilmesi	1,2
3	1734	C=O gerilimi (ksilanların bulunduğunu gösteriyor) Odun ve kabuk için karakteristik hemiselüloz spektrumu	1,2
4	1641	H-O-H vibrasyonu (bağlı su molekülerinden kaynaklanan) Şeker yapıtaşları arasındaki β glikozidik bağın varlığını gösteriyor	1,2
5	1592	Aromatik iskelet + C=O gerilmesi S≥G	1,2
6	1544	C=O peptid bağları (NH-CO-NH-)	2
7	1507 1501	Aromatik halka yapısından kaynaklanan vibrasyon (Lignin varlığını gösteriyor)	1 2
8	1458 1451	CH_2 lignin ve hemiselülozdan kaynaklı deformasyon	2 1
9	1423	Düzlem deformasyonunda C-H ile birlikte aromatik halka vibrasyonu + Lignin ve karbonhidratlarda C-H deformasyonu	1,2
10	1367	Lignin ve karbonhidratlardaki C-H deformasyonu	1,2
11	1314	Selülozda C-H vibrasyonu + C_1-O vibrasyonu siringil türevlerinden kaynaklı	1,2
12	1259	Ksilanlardaki asetil ve karboksil vibrasyonu ve lignindeki C=O geriliminden kaynaklanan vibrasyon	1
13	1233	C-O-C selüloz ve hemiselülozlardan kaynaklı vibrasyon	1,2
14	1155	Hemiselülozlar ve selülozdaki O-H birleşim bandı	1,2
15	1026	C=O gerilimi (selüloz, lignin ve hemiselülozlarda)	1,2
16	895	C-H selüloz deformasyonu	1,2

*1: masif mobilya atığı, 2: yonga levha mobilya atığı

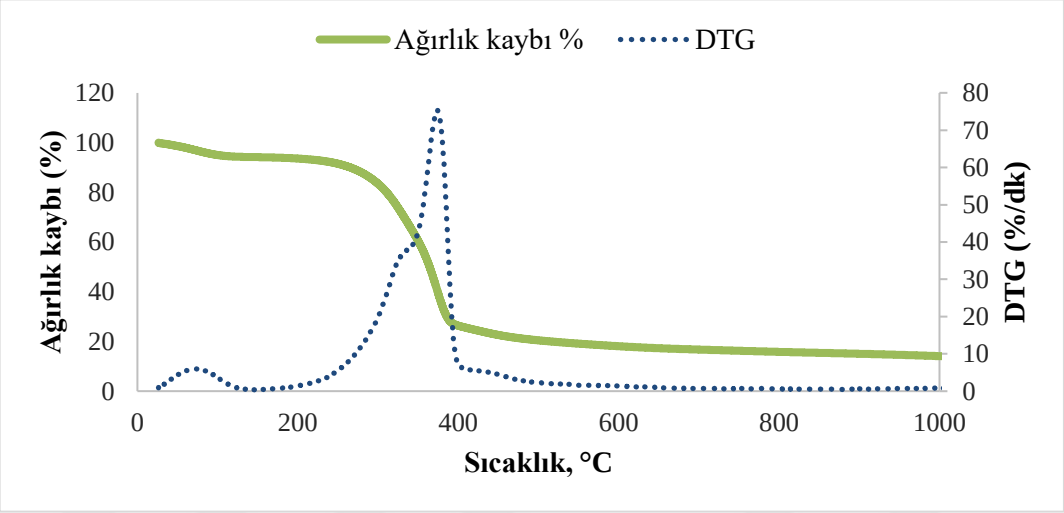
Çalışmada incelenen masif ve yonga levha mobilya atıklarının spektrumlarına bakıldığında 1734 cm^{-1}-895 cm^{-1} aralığında oduna ait parmak izi bölgesi olarak adlandırılan (1800 cm^{-1} ile 650 cm^{-1} aralığında) bölgedeki tüm pikler gözlenmiştir. 1026 cm^{-1}'de gözlenen pik selüloz, lignin ve hemiselülozlarda bulunan C=O gerilimini göstermektedir. Ayrıca, 1734 cm^{-1}'de hemiselülozlardaki C=O gerilimini gösteren pik gözlenmiştir. Yine, odunun temel polimerlerinden olan lignine ait aromatik iskeleti temsil eden absorbans 1792 cm^{-1} dalga boyunda gözlenmiştir. Masif mobilya atığında, yine lignindeki aromatik halka yapısından kaynaklanan vibrasyonu gösteren 1507 cm^{-1} dalga boyunda absorbans oluşumu gözlenirken, aynı yapı yonga levha atığı için 1501 cm^{-1} dalga boyunda gözlenmiştir. Ancak, yonga levha mobilya atığında 1544 cm^{-1} dalga boyunda tespit edilen absorbansın odun ve kabuğa ait olmadığı görülerek literatürden araştırılmış ve bu tür yapıların C=O peptit bağları (NH-CO-NH-) yonga levha üretimi sırasında kullanılan tutkallardaki serbest NH_2 ile aldehit grupları arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu oluştuğu bilgisine ulaşılmıştır (Dorieh vd., 2018; Zorba vd., 2008). Şekilde 7 numara ile gösterilen ve lignindeki aromatik halka yapısından kaynaklanan absorbans değerinin masif örnekte çok güçlü olduğu gözlenmiştir. Bu durum, bu örneğin iğne yapraklı bir ağaç türü olduğunu göstermektedir. TEM incelemelerinde masif örneğin iğne yapraklı bir türe ait olduğu gözlenmiştir. FTIR-ATR bulguları ile uyumlu sonuç elde edilmiştir.

Ahşap mobilya atıklarının termogravimetrik analizleri azot gazı ve hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen grafikler Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de verilmişlerdir.



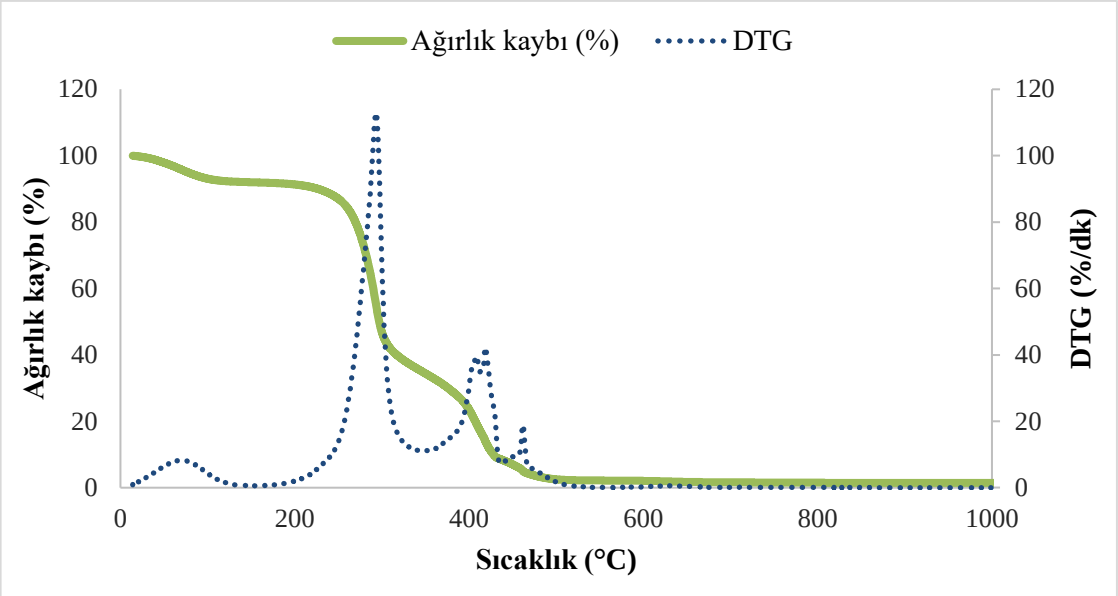
Şekil 4.2: 10 °C / dk sıcaklık hızında masif atık örneğin hava ortamındaki termogravimetrik analizi.

Şekil 4.2 incelendiğinde, 10 °C/dk artış hızı uygulanan TGA analizinde masif atık örneğinin hava ortamında termal bozunması gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik eğriler incelendiğinde, biyokütlenin bozunmasının üç bölgede olduğu görülmektedir. Masif atıkların hava ortamında yakılması ile ilk ağırlık kaybı 17-150 °C sıcaklık aralığında hammaddenin yapısında bulunan nemin uzaklaşması sonucunda %8,43 olarak, ikinci ağırlık kaybı ise piroliz bölgesi olarak tanımlanan 176-574 °C aralığında %90,79 olarak ve son olarak karbonlaşma kısmındaki üçüncü ağırlık ağırlık kaybı ise 574-1026 °C aralığında %0,51 olarak belirlenmiştir.



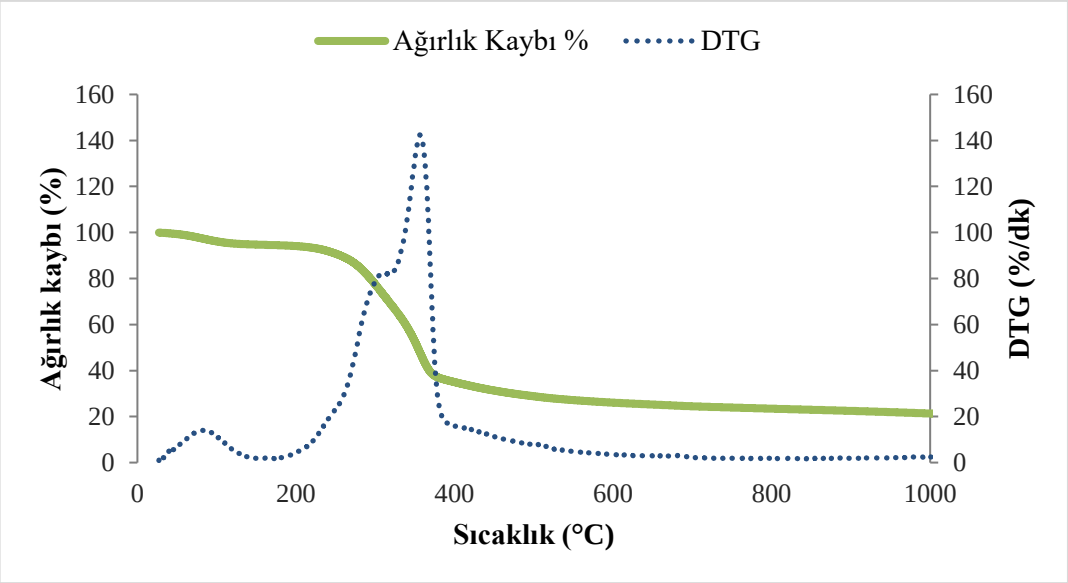
Şekil 4.3: 10°C / dk sıcaklık hızında masif atık numunesinin azot gazı ortamındaki termogravimetrik analizi.

Şekil 4.3 incelendiğinde, 10 °C/dk artış hızı uygulanan TGA analizinde masif atık örneğinin azot gazı ortamında termal bozunması gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik eğriler incelendiğinde, biyokütlenin bozunmasının üç bölgede olduğu görülmektedir. Masif atıkların azot ortamında yakılması ile ilk ağırlık kaybı 26-142 °C sıcaklık aralığında hammaddenin yapısında bulunan nemin uzaklaşması sonucunda %5,79 olarak, ikinci ağırlık kaybı ise piroliz bölgesi olarak tanımlanan 209-544 °C aralığında %73,77 olarak ve son olarak karbonlaşma kısmındaki üçüncü ağırlık ağırlık kaybı ise 544-1026 °C aralığında %5,52 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.4: 10 °C / dk sıcaklık hızında yonga levha atık numunesinin hava ortamındaki termogravimetrik analizi.

Şekil 4.4 incelendiğinde, 10 °C/dk artış hızı uygulanan TGA analizinde yonga levha atık örneğinin hava ortamında termal bozunması gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik eğriler incelendiğinde, biyokütlenin bozunmasının üç bölgede olduğu görülmektedir. Yonga levha atıkların hava ortamında yakılması ile ilk ağırlık kaybı 14-177 °C sıcaklık aralığında hammaddenin yapısında bulunan nemin uzaklaşması sonucunda %8,26 olarak, ikinci ağırlık kaybı ise piroliz bölgesi olarak tanımlanan 212-555 °C aralığında %88,7 olarak ve son olarak karbonlaşma kısmındaki üçüncü ağırlık ağırlık kaybı ise 555-1025 °C aralığında %0,74 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.5: 10°C / dk sıcaklık hızında yonga levha atık numunesinin azot gazı ortamındaki termogravimetrik analizi.

Şekil 4.4 incelendiğinde, 10 °C/dk artış hızı uygulanan TGA analizinde yonga levha atık örneğinin azot gazı ortamında termal bozunması gerçekleştirilmiştir. Termogravimetrik eğriler incelendiğinde, biyokütlenin bozunmasının üç bölgede olduğu görülmektedir. Yonga levha atıkların azot ortamında yakılması ile ilk ağırlık kaybı 27-175 °C sıcaklık aralığında hammaddenin yapısında bulunan nemin uzaklaşması sonucunda %5,16 olarak, ikinci ağırlık kaybı ise piroliz bölgesi olarak tanımlanan 234-554 °C aralığında %65,38 olarak ve son olarak karbonlaşma kısmındaki üçüncü ağırlık ağırlık kaybı ise 554-1025 °C aralığında %6,06 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.4'de ahşap mobilya atıklarının hava ve azot ortamındaki termal davranışları verilmiştir.

Tablo 4.4: Ahşap mobilya atıklarının hava ve azot gazı ortamındaki termal bozunma aralıkları ve ağırlık kayıpları.

Örnek	**HAVA ORTAMI**			**AZOT (N_2) ORTAMI**		
Masif Atık	I. Faz (17-150 °C)	II. Faz (176-574 °C)	III. Faz (574-1026 °C)	I. Faz (26-142 °C)	II. Faz (209-544 °C)	III. Faz (544-1026 °C)
Ağırlık Kaybı (%)	8,43	90,79	0,51	5,79	73,77	5,52
Yonga Levha Atığı	I. Faz (14-177°C)	II. Faz (212-555 °C)	III. Faz (555-1025 °C)	I. Faz (27-175 °C)	II. Faz (234-554 °C)	III. Faz (554-1025 °C)
Ağırlık Kaybı (%)	8,26	88,7	0,74	5,16	65,38	6,06

4.2. GAZLAŞTIRMA DENEYLERİ

Bu deneylerde masif ve yonga levha ahşap atıklar yonga formunda çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda optimum koşullar belirlenmiş ve bu atıklardan daha sonra üretilen peletlere optimum koşullar uygulanmıştır.

4.2.1. Masif Atık Numunesi Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları

Bu deneylerde saf oksijen ve kuru hava olmak üzere iki farklı ajan kullanılmıştır.

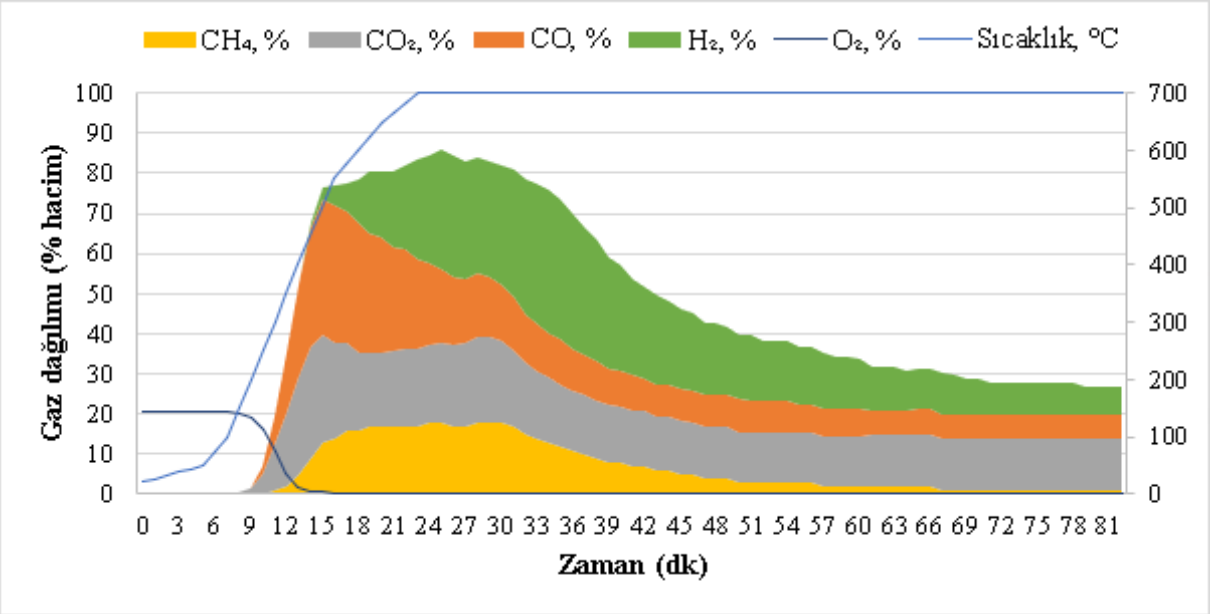
4.2.1.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

Masif atık örneğinin yukarı akışlı reaktörde gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 75 g numune kullanılmıştır. Deney sırasında gazlaştırma ajanı olarak kuru hava kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 l/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.6'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.5: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (21-41 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
13,49	0	10,5	34	28	18	36

Şekil 4.6'ya bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 25. dakikada %36 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 16.dakikada %34 hacimsel oranıyla CO ve 24. dakikada %18 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 25. dakikada %85'lere çıktığı ve 33. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



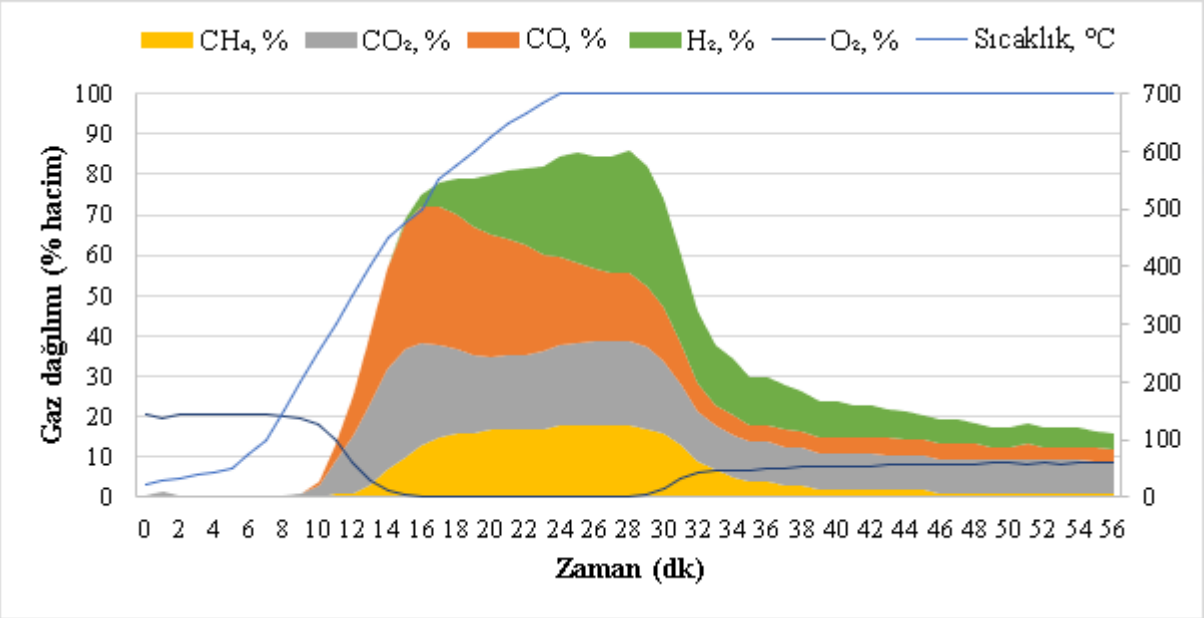
Şekil 4.6: Masif atık örneğinin 0.05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,1 l/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.7'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.6: Masif atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (20-33 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
14,21	0	12,35	34	27	18	30

Şekil 4.7'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 26. dakikada %30 ile CO olduğu görülmektedir ve bunu 28. dakikada %30 hacimsel oranıyla H_2 ve 28. dakikada %18 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 25. dakikada %84'lere çıktığı ve 30. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



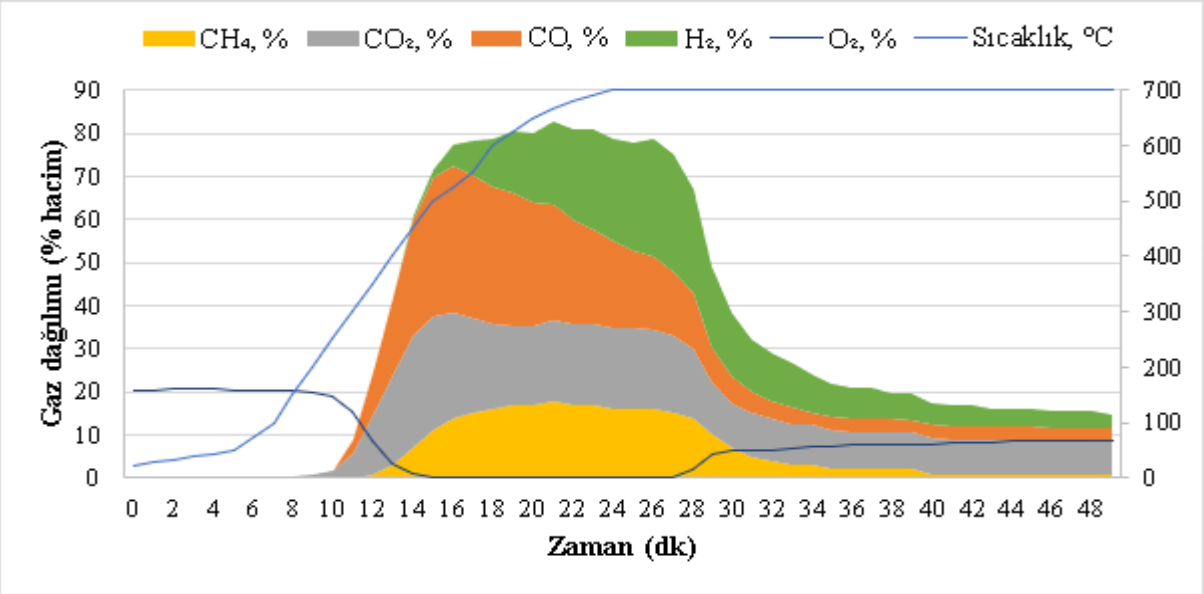
Şekil 4.7: Masif atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0.2 l/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.8'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.7: Masif atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (19-30 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
14,87	0	13,1	34	27	18	27

Şekil 4.8'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 16. dakikada %30 ile CO olduğu görülmektedir ve bunu 21. dakikada %27 hacimsel oranıyla H_2 ve 21. dakikada %18 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 21. dakikada %81'lere çıktığı ve 27. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



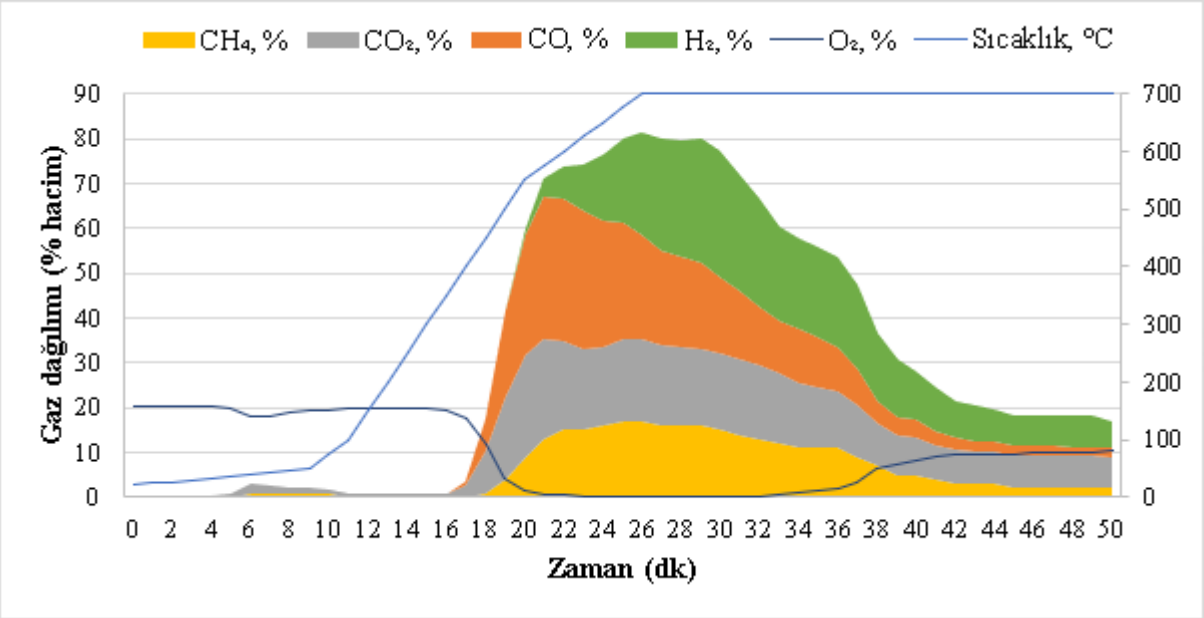
Şekil 4.8: Masif atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0.4 l/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.9'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.8: Masif atık örneğinin 0,4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (23-37 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
15,85	0	8,85	32	23	17	28

Şekil 4.9'a bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 21. dakikada %32 ile CO olduğu görülmektedir ve bunu 26. dakikada %28 hacimsel oranıyla H_2 ve 25. dakikada %17 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 26. dakikada %81'lere çıktığı ve 30. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.9: Masif atık örneğinin 0.4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Masif atık numunesinde 700 °C sıcaklıkta yapılan deneyler sonucunda optimum kuru hava debisinin 0,05 l/dk olduğu belirlenmiştir.

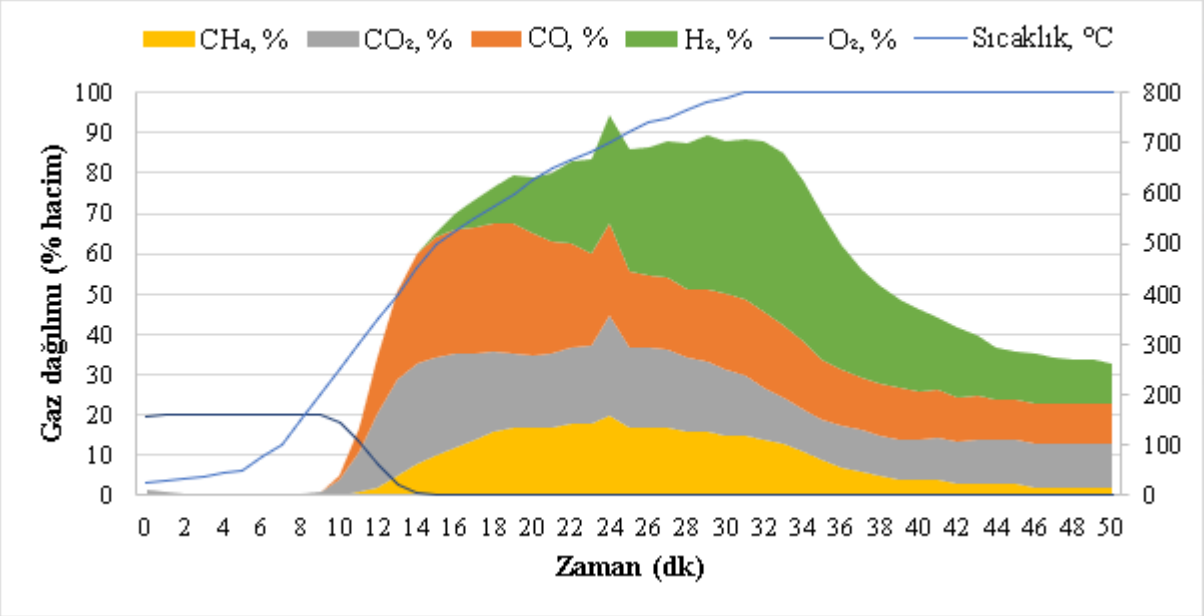
Gazlaştırma ajan debisinin 0.05 l/dk olarak seçildiği, 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.10'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.9: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (24-40 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
12,65	0	16	32	25	20	43

Şekil 4.10'a bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 24. dakikada %43 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 24. dakikada %32 hacimsel oranıyla CO ve 24. dakikada %20

hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 24. dakikada %93'lere çıktığı ve 33. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



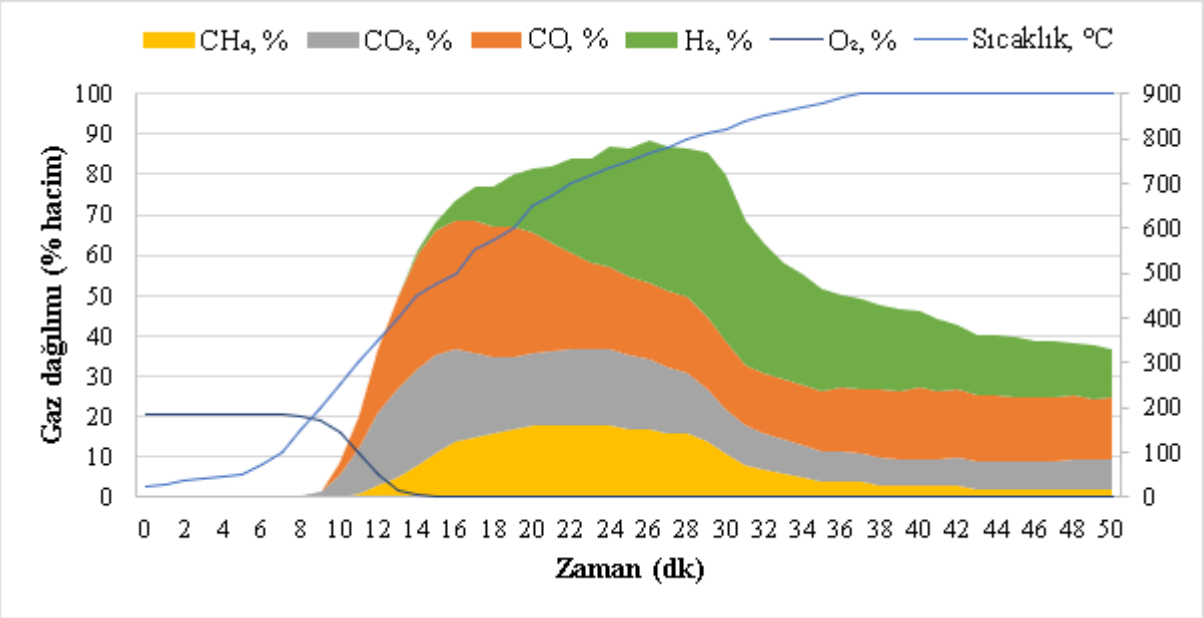
Şekil 4.10: Masif atık örneğinin 0.05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0.05 l/dk olarak seçildiği, 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.11'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.10: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (23-36 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
12,23	0	7,35	33	24	18	41

Şekil 4.11'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 26. dakikada %41 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 16. dakikada %33 hacimsel oranıyla CO ve 20. dakikada %18 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 26. dakikada %87'lere çıktığı ve 30. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.11: Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

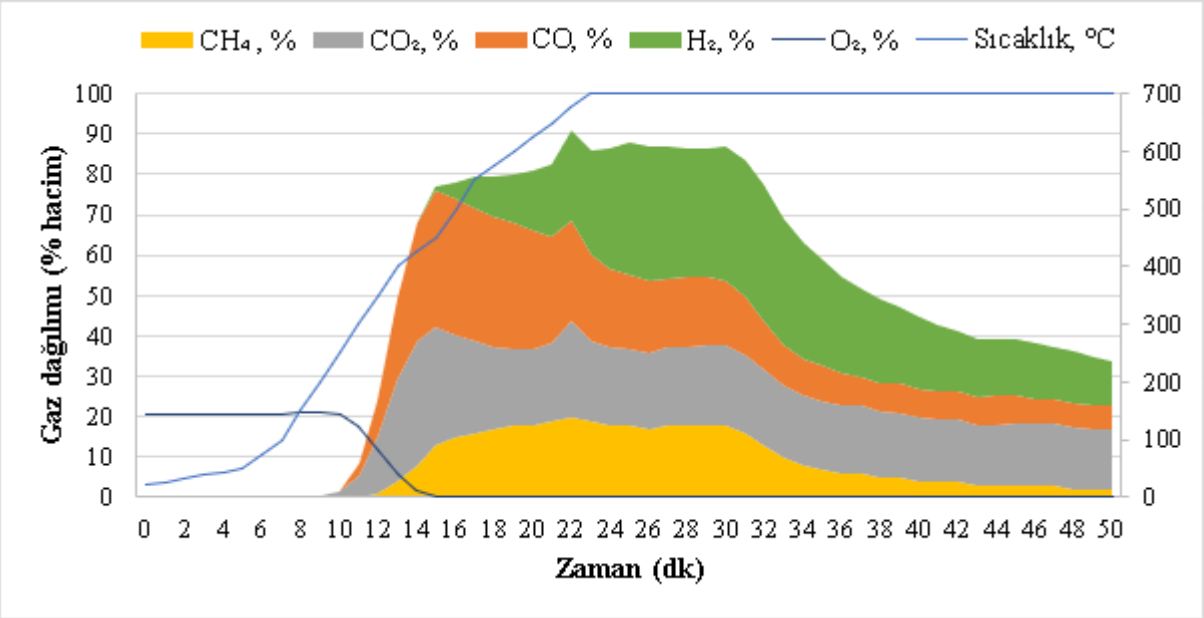
4.2.1.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

Masif atık örneğinin yukarı akışlı reaktörde saf oksijen ile gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 75 g numune kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.11'de verilmiştir. Şekil 4.12'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.11: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (22-37 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
13,88	0	13,2	34	31	20	34

Şekil 4.12'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek 15.dakikada %30 ile CO ve 22.dakikada H_2'nin olduğu görülmektedir ve bunu 22. dakikada %20 hacimsel oranıyla CH_4 gazının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 22. dakikada %90'lara çıktığı ve 31. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



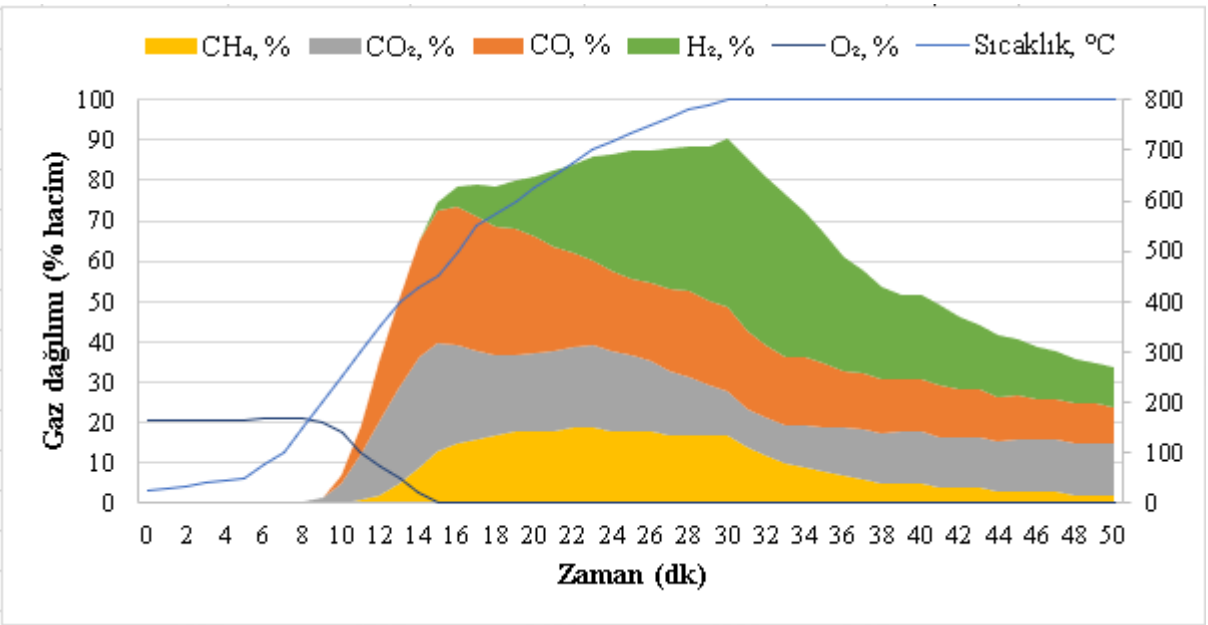
Şekil 4.12: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.13'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.12: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (22-37 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
13,42	0	13,6	34	27	19	43

Şekil 4.13'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 30. dakikada %43 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 14. dakikada %34 hacimsel oranıyla CO ve 22. dakikada %19 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 30. dakikada %90'lara çıktığı ve 31. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



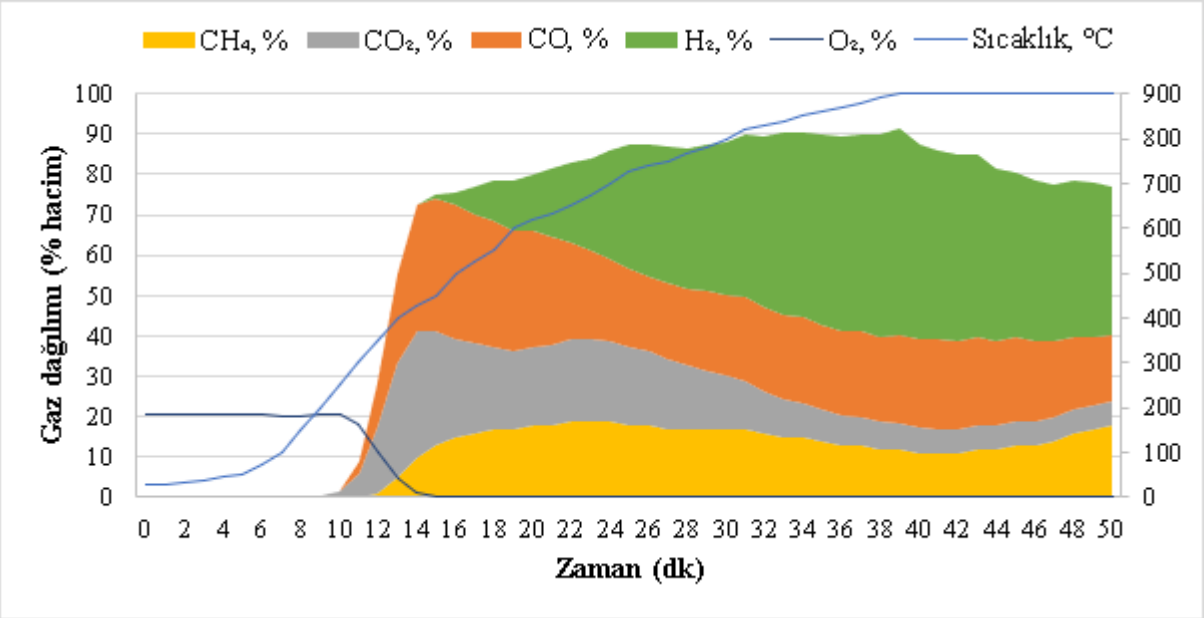
Şekil 4.13: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.13'de verilmiştir. Şekil 4.14'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.13: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (22-37 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
16,8	0	7,5	33	31	27	51

Şekil 4.14'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 39. dakikada %51 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 14. dakikada %33 hacimsel oranıyla CO ve 23. dakikada %27 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 39. dakikada %91'lere çıktığı ve 40. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.14: Masif atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.2.2. Yonga Levha Atık Numunesi Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları

Bu deneylerde saf oksijen ve kuru hava olmak üzere farklı ajan kullanılmıştır.

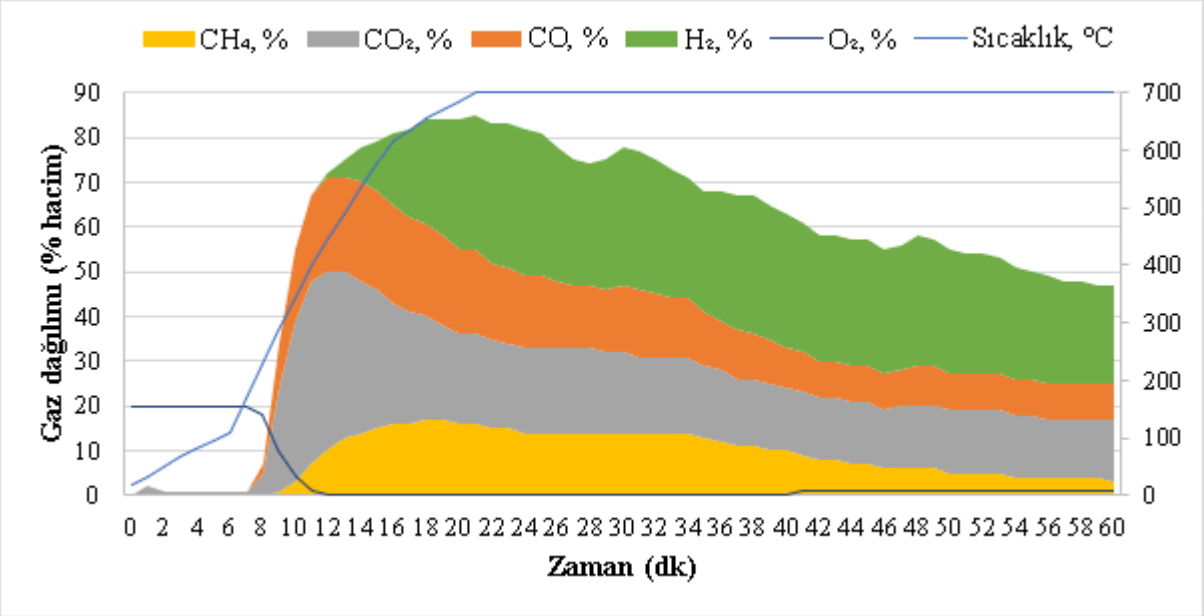
4.2.2.1.Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

Yonga levha atık numunesinin yukarı akışlı reaktörde gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 50 g numune kullanılmıştır. Deney sırasında gazlaştırma ajanı olarak kuru hava kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 l/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.14'de verilmiştir. Şekil 4.15'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.14: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
16,78	0	-	22	41	17	33

Şekil 4.15'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 21. dakikada %33 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 11. dakikada %22 hacimsel oranıyla CO ve 18.dakikada %17 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 21. dakikada %85'lere çıktığı ve 30. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



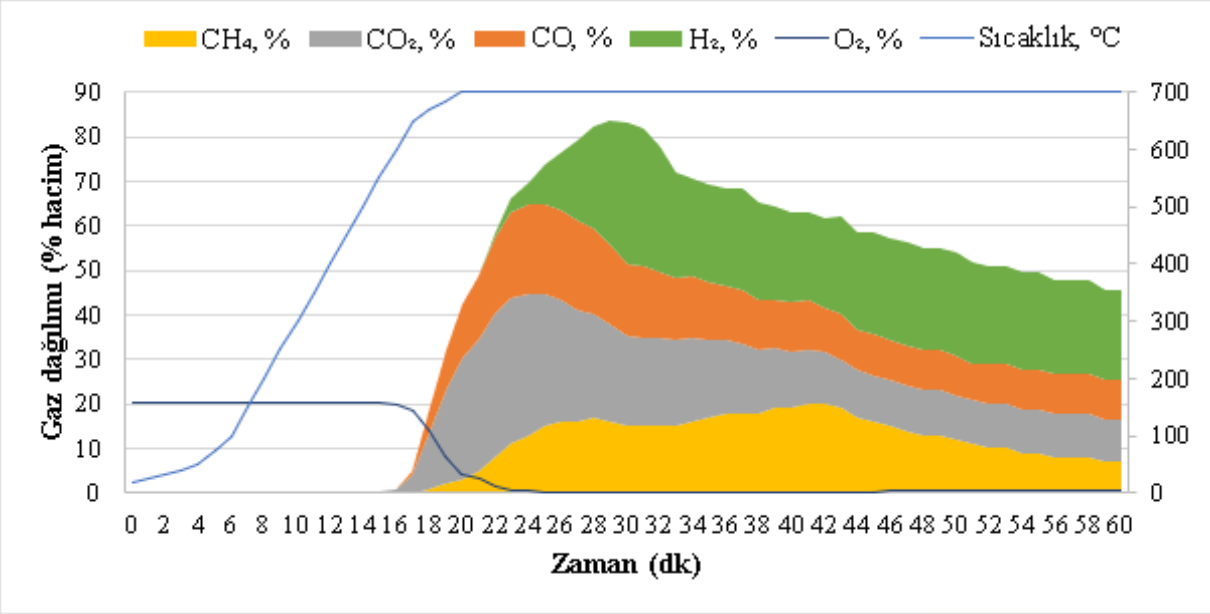
Şekil 4.15: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0.1 l/dk olarak seçildiği, 50 g deney numunesinin kullanıldığı, 700°C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.15'de verilmiştir. Şekil 4.16'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.15: Yonga levha atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
13	0	-	20	33	17	32

Şekil 4.16'ya bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 27. dakikada %32 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 24. dakikada %20 hacimsel oranıyla CO ve 42. dakikada %17 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 27. dakikada %84'lere çıktığı ve 31. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.16: Yonga levha atık örneğinin 0,1 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

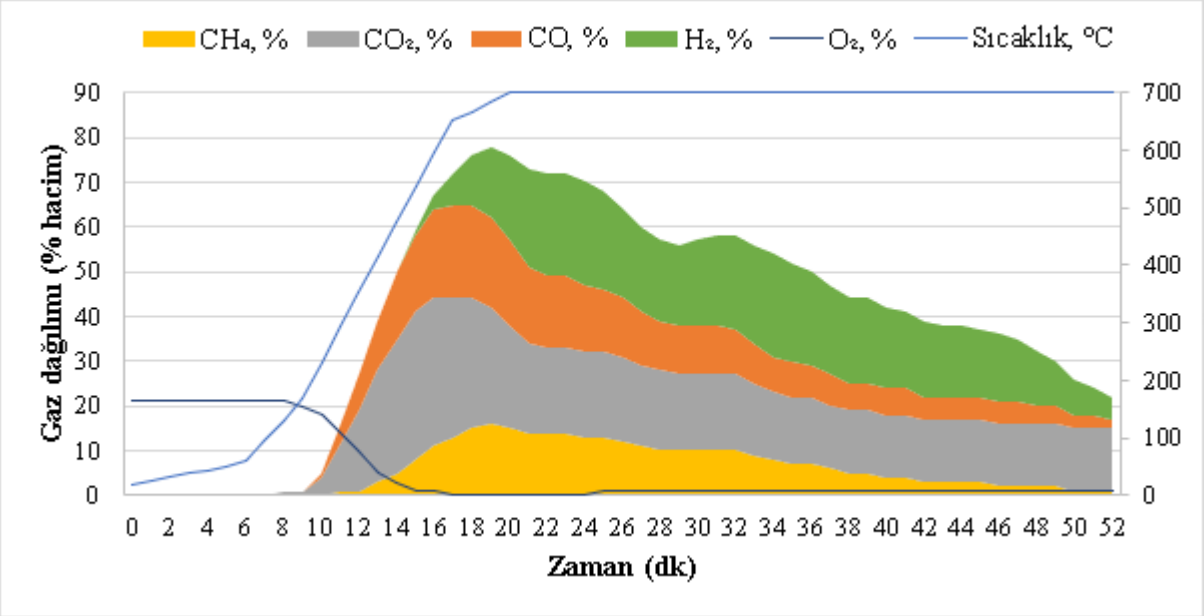
Gazlaştırma ajan debisinin 0,2 l/dk olarak seçildiği, 50 g deney numunesinin kullanıldığı, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.16'da verilmiştir. Şekil 4.17'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.16: Yonga levha atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
13	0	-	21	33	16	23

Şekil 4.17'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 19. dakikada %23 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 15. dakikada %21 hacimsel oranıyla CO ve 19. dakikada %16

hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 19. dakikada %78'lere çıktığı ve 24. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



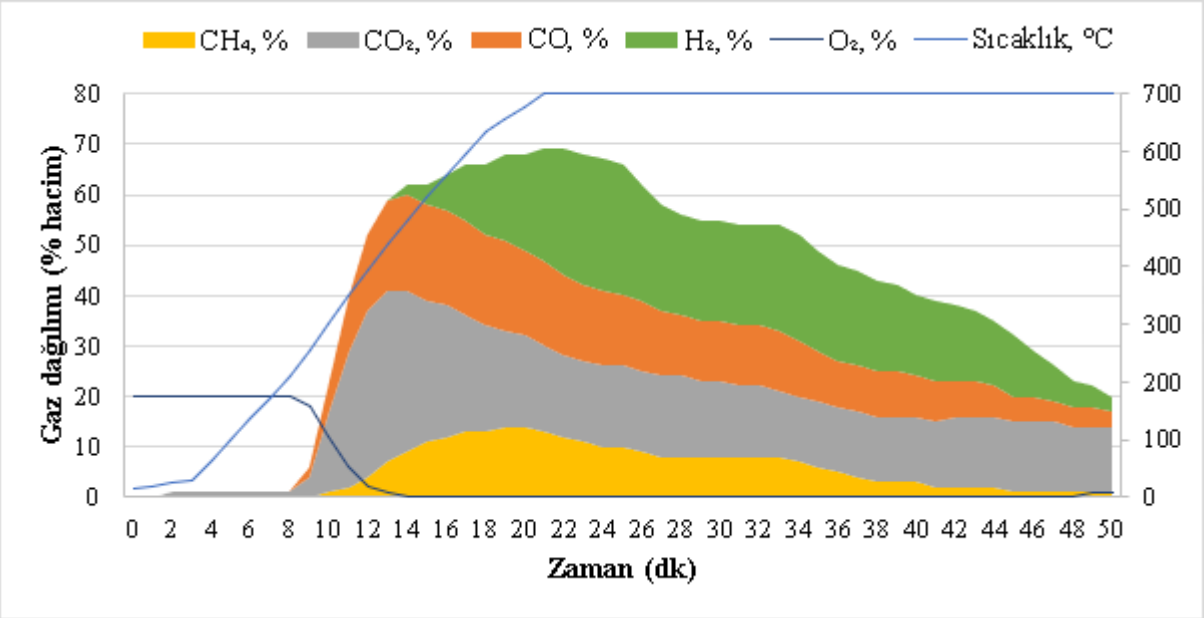
Şekil 4.17: Yonga levha atık örneğinin 0,2 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0.4 l/dk olarak seçildiği, 75 g deney numunesinin kullanıldığı, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.17'de verilmiştir. Şekil 4.18'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.17: Yonga levha atık örneğinin 0,4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
20	0	-	19	34	14	26

Şekil 4.18'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 21. dakikada %26 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 13. dakikada %19 hacimsel oranıyla CO ve 19. dakikada %14 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 21. dakikada %79'lara çıktığı ve 26. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.18: Yonga levha atık örneğinin 0,4 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Yonga levha atık numunesinde 700 °C sıcaklıkta yapılan deneyler sonucunda optimum kuru hava debisinin 0,05 l/dk olduğu belirlenmiştir.

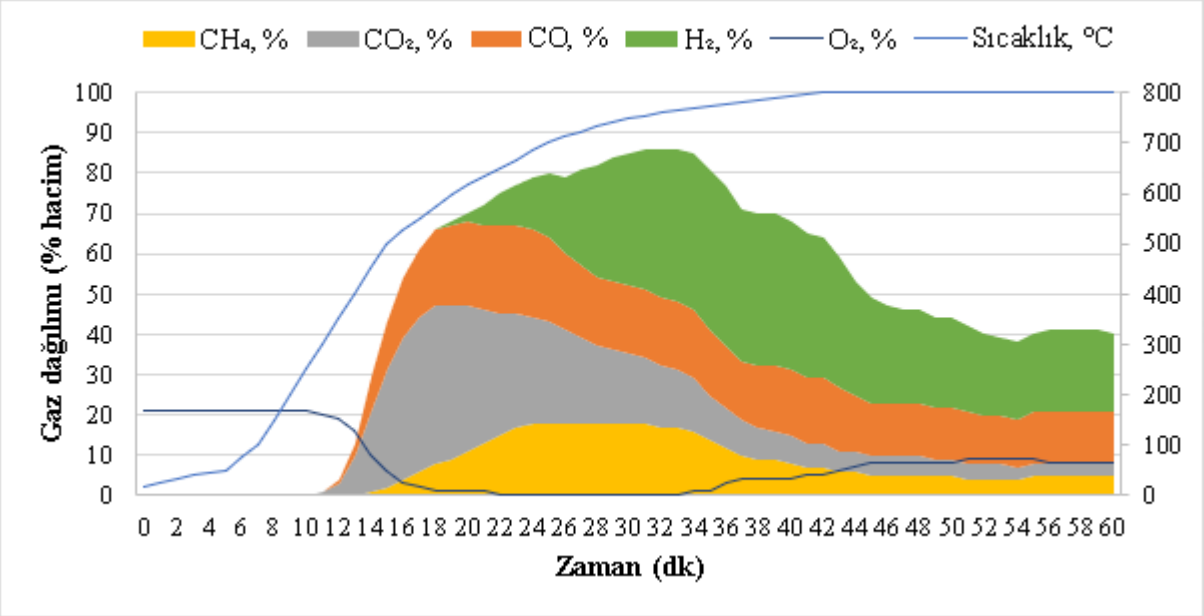
Gazlaştırma ajan debisinin 0.05 l/dk olarak seçildiği, 75 g deney numunesinin kullanıldığı, 800°C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.19'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.18: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (29-48 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
18,62	0	8,5	22	39	18	40

Şekil 4.19'a bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 30. dakikada %40 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 17. dakikada %22 hacimsel oranıyla CO ve 24. dakikada %18

hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 30. dakikada %85'lere çıktığı ve 34. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



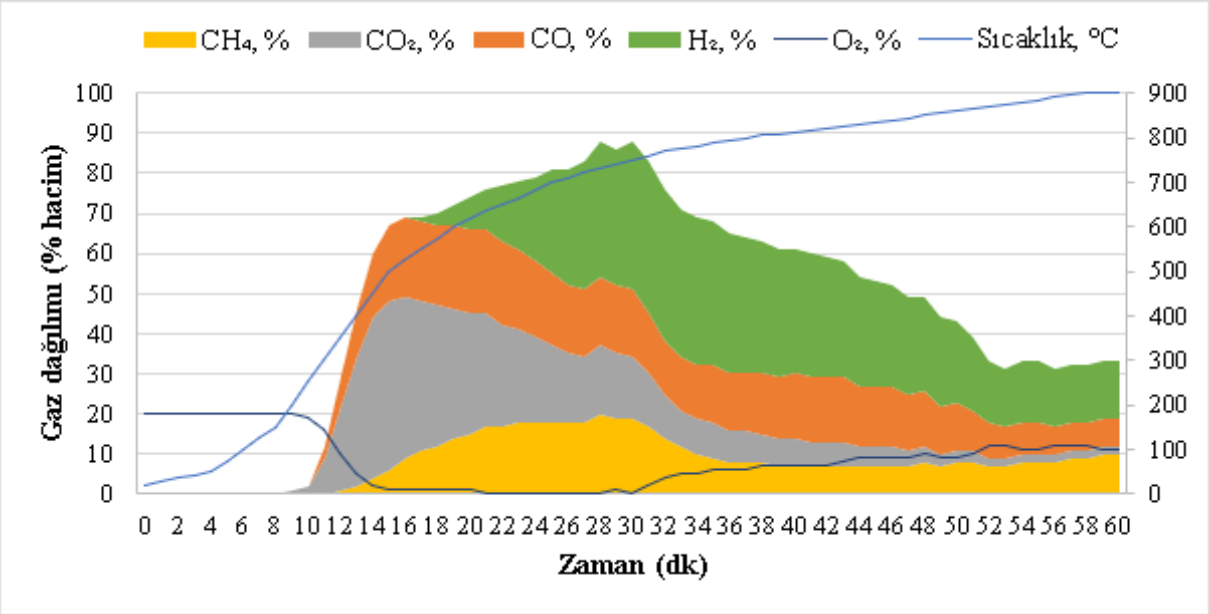
Şekil 4.19: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 l/dk olarak seçildiği, 75 g deney numunesinin kullanıldığı, 900°C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.20'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.19: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (28-48 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
19,73	0	9,35	21	42	20	38

Şekil 4.20'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 28. dakikada %38 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 15. dakikada %21 hacimsel oranıyla CO ve 28. dakikada %20 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 28. dakikada %88'lere çıktığı ve 31. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.20: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.2.2.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

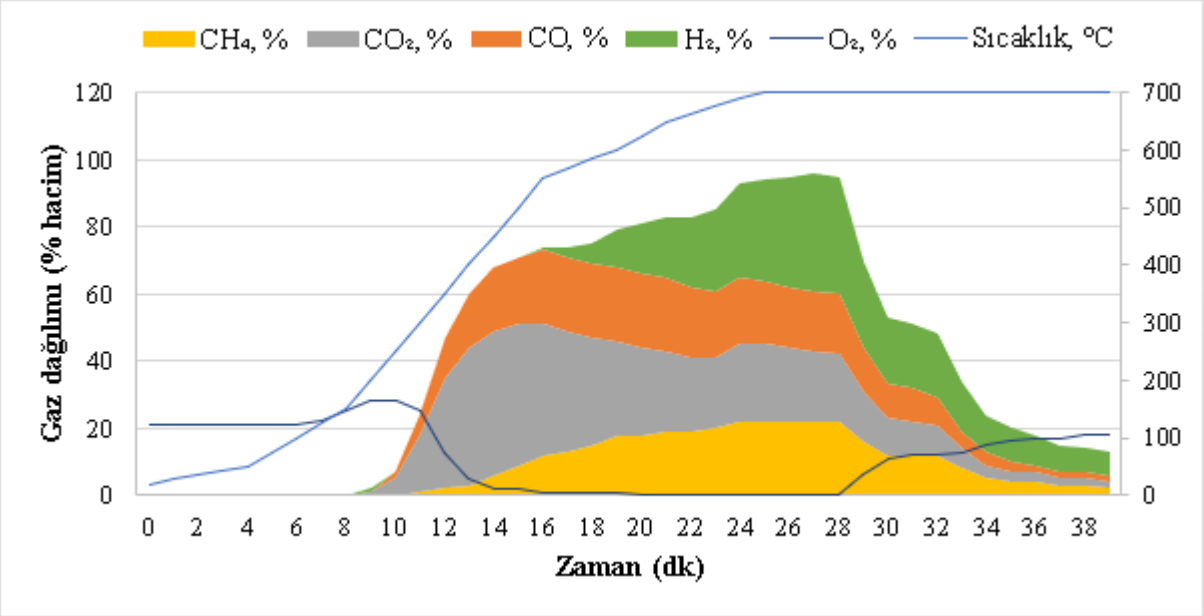
Yonga levha atık örneğinin yukarı akışlı reaktörde saf oksijen ile gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 75 g numune kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 700 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.21'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.20: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (23-33 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
20	0	5,5	22	43	22	35

Şekil 4.21'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 27. dakikada %35 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 16. dakikada %22 hacimsel oranıyla CO ve 28. dakikada %18

hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 27. dakikada %94'lere çıktığı ve 29. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



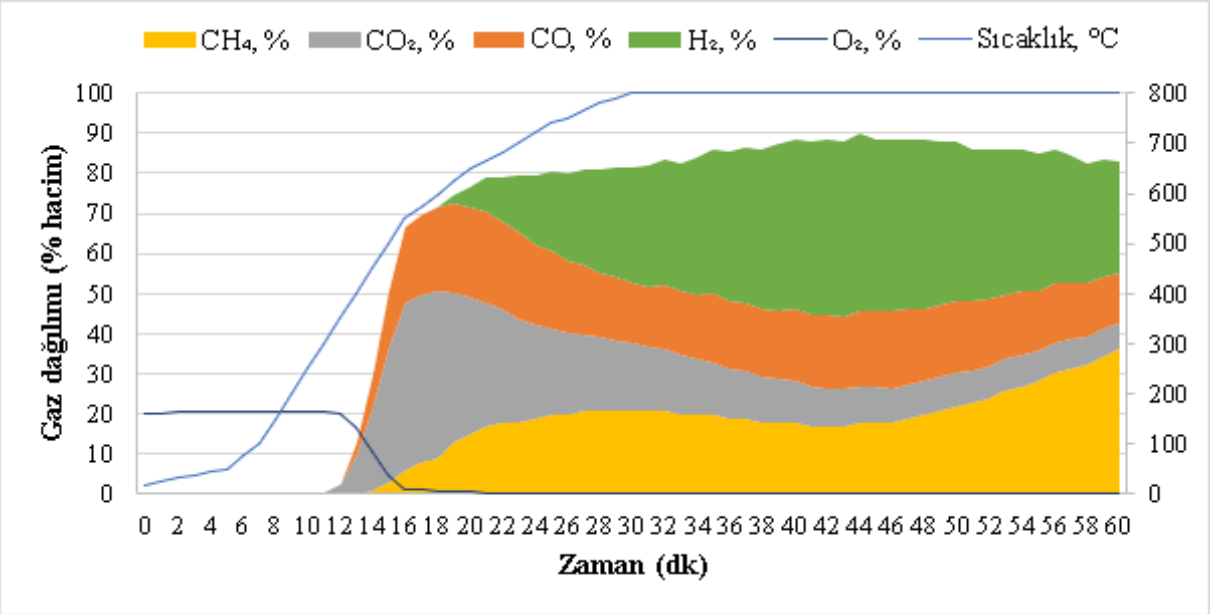
Şekil 4.21: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0.01 l/dk olarak seçildiği, 75 g deney numunesinin kullanıldığı, 800°C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.21'de verilmiştir. Şekil 4.22'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.21: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
21,37	0	-	23	42	21	44

Şekil 4.22'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 44. dakikada %44 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 18. dakikada %23 hacimsel oranıyla CO ve 60. dakikada %21 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 44. dakikada %90'lara çıktığı ve 56. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



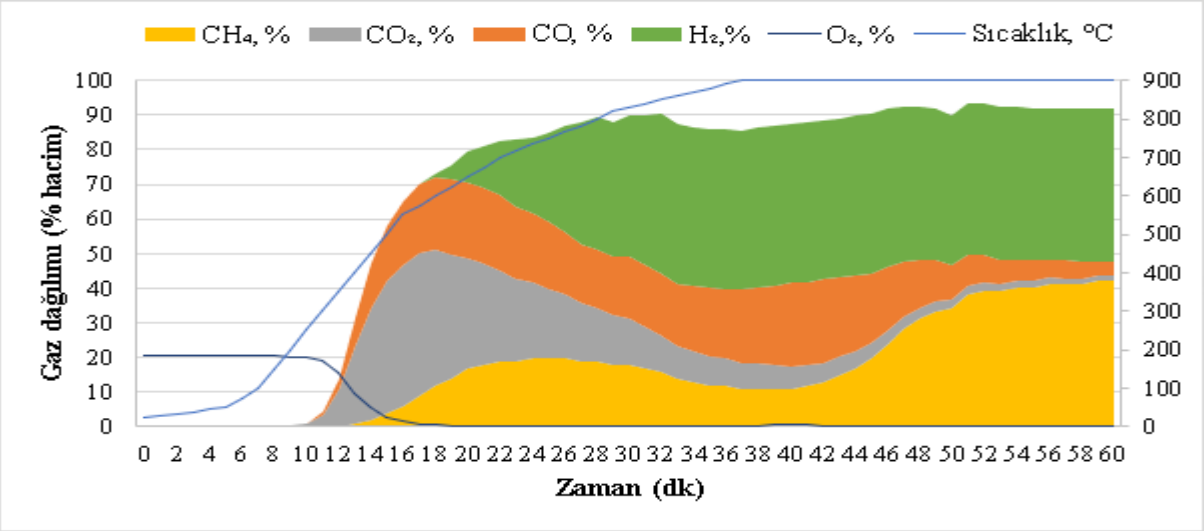
Şekil 4.22: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 75 g deney numunesinin kullanıldığı, 900°C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.22'de verilmiştir. Şekil 4.23'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.22: Yonga levha atık numunesinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırması maksimum sentez gaz dağılımı ve katı-sıvı kalıntı analiz sonuçları.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (24-50 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO_2 (%) hacim**	**CH_4 (%) hacim**	**H_2 (%) hacim**
25	0	9	22	41	20	46

Şekil 4.23'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 50. dakikada %46 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 18. dakikada %22 hacimsel oranıyla CO ve 58. dakikada %20 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 50. dakikada %92'lere çıktığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.23: Yonga levha atık örneğinin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.2.3. Masif Atık Numunesinin Piroliz Ön işlemli Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları

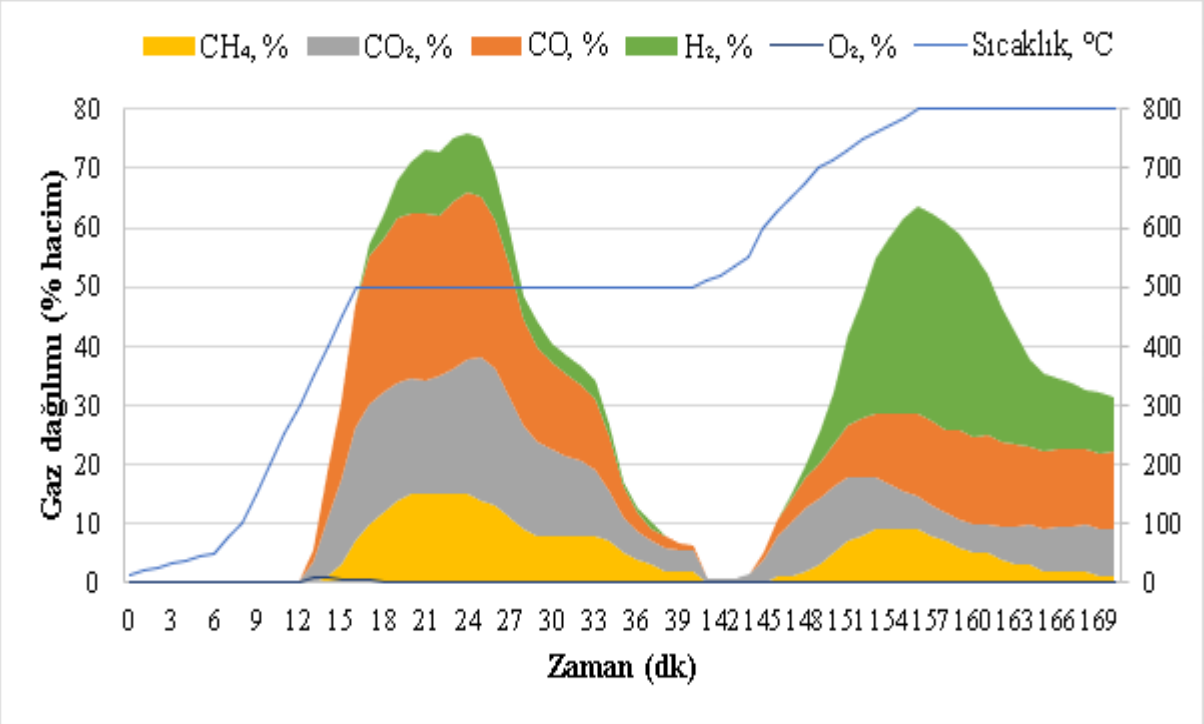
Piroliz ön işlemli gazlaştırma parametreleri önceden yapılmış olan gazlaştırma deneylerinden optimum şartlar belirlenerek yapılmıştır. Bu deneyler yukarı akışlı reaktörde gerçekleşmiştir ve 75 g deney numunesi kullanılmıştır. Masif atık örneğine 500 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat olmak üzere 1 l/dk debili N_2 ortamında ön piroliz işlemleri uygulanmıştır. 2, 4 ve 6 saatlik ön piroliz işlemlerinden sonra deney numuneleri 800 °C sıcaklıkta, 0,05 l/dk debili kuru hava ortamında gazlaştırılmıştır.

800°C sıcaklıkta sürdürülen, 1 l/dk debili N_2 gaz ortamında 2 saat ön piroliz işlemi uygulanan piroliz ön işlemli gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.23'de verilmiştir. Şekil 4.24'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.23: Masif atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (153-163 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
12,15	0,22	6,4	28	24	15	35

Şekil 4.24'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 157. dakikada %35 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 24. dakikada %28 hacimsel oranıyla CO ve 20. dakikada %18 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonuna bakıldığında ise 24. dakikada %75'lere ulaştığı görülmüştür.



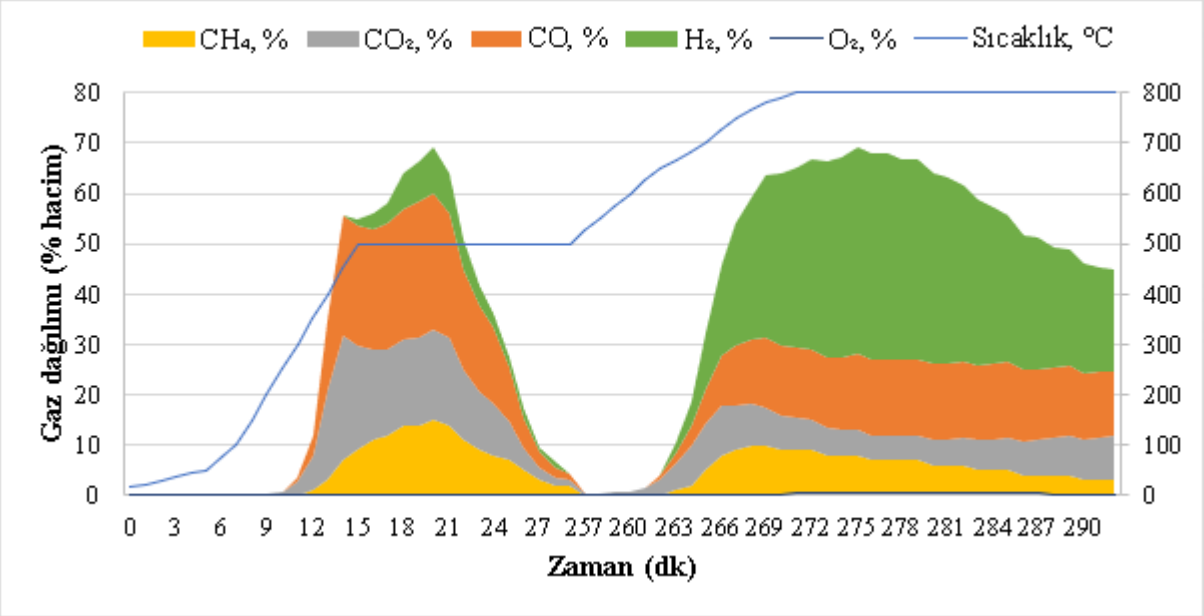
Şekil 4.24: Masif atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

800°C sıcaklıkta sürdürülen, 1 l/dk debili N_2 gaz ortamında 4 saat ön piroliz işlemi uygulanan piroliz ön işlemli gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.24'de verilmiştir. Şekil 4.25'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.24: Masif atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (266-287 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
13,45	0,21	4,6	27	25	15	41

Şekil 4.25'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 275. dakikada %41 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 21. dakikada %27 hacimsel oranıyla CO ve 20. dakikada %15 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun 21.dakikada ve 275. dakikada %70'lere ulaştığı ve 279. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.25: Masif atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

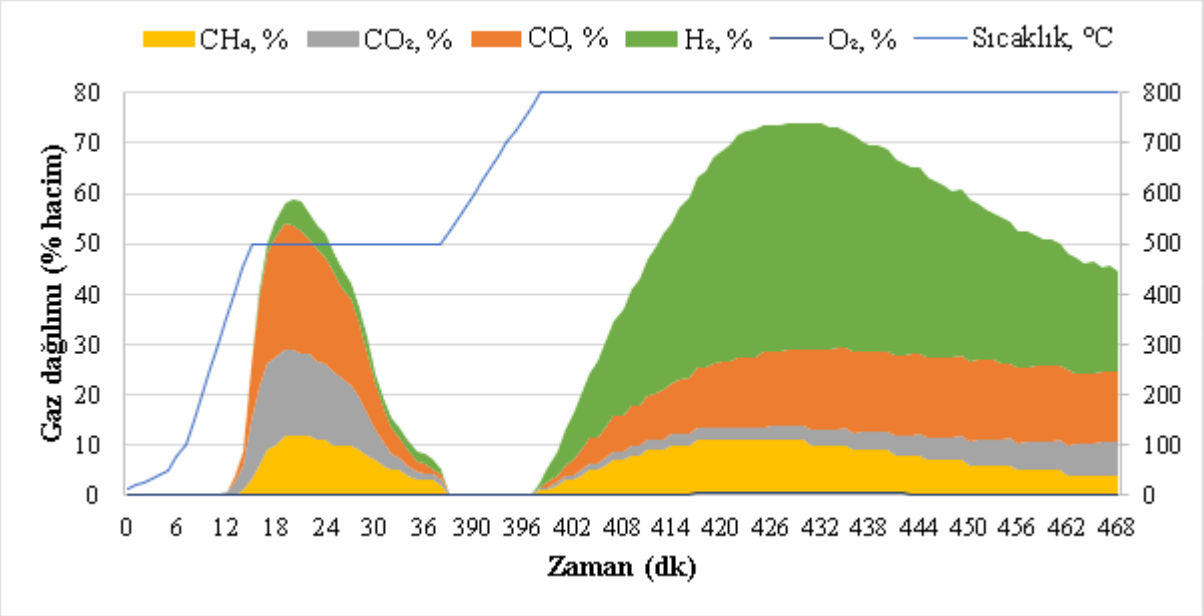
800°C sıcaklıkta sürdürülen, 1 l/dk debili N_2 gaz ortamında 6 saat ön piroliz işlemi uygulanan piroliz ön işlemli gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.25'de verilmiştir. Şekil 4.26'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.25: Masif atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
14,03	0,3	-	25	17	12	45

Şekil 4.26'ya bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 426. dakikada %45 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 21. dakikada %25 hacimsel oranıyla CO ve 20.dakikada %12

hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun ise 426. dakikada %74'lere ulaştığı ve 435. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.26: Masif atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.2.4. Yonga Levha Atık Numunesinin Piroliz Ön işlemli Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları

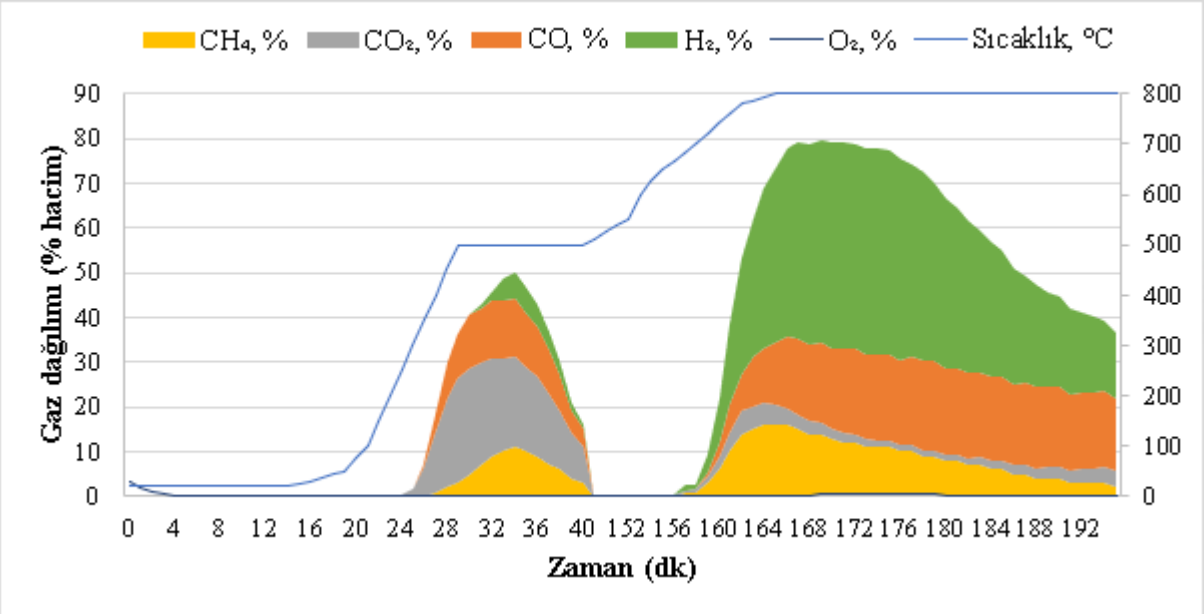
Piroliz ön işlemli gazlaştırma parametreleri önceden yapılmış olan gazlaştırma deneylerinden optimum şartlar belirlenerek yapılmıştır. Bu deneyler yukarı akışlı reaktörde gerçekleşmiştir ve 75 g deney numunesi kullanılmıştır. Yonga levha atık örneğine 500 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat olmak üzere 1 l/dk debili N_2 ortamında ön piroliz işlemleri uygulanmıştır. 2, 4 ve 6 saatlik ön piroliz işlemlerinden sonra deney numuneleri 800 °C sıcaklıkta, 0,05 l/dk debili kuru hava ortamında gazlaştırılmıştır.

800°C sıcaklıkta sürdürülen, 1 l/dk debili N_2 gaz ortamında 2 saat ön piroliz işlemi uygulanan piroliz ön işlemli gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.26'da verilmiştir. Şekil 4.27'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.26: Yonga levha atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (159 - 195 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
18,55	1,25	6,85	20	24	16	46

Şekil 4.27'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 166. dakikada %46 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 165. dakikada %20 hacimsel oranıyla CO ve 164. dakikada %16 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun ise 166. dakikada %79'lara ulaştığı ve 177. dakikada azaldığı tespit edilmiştir.



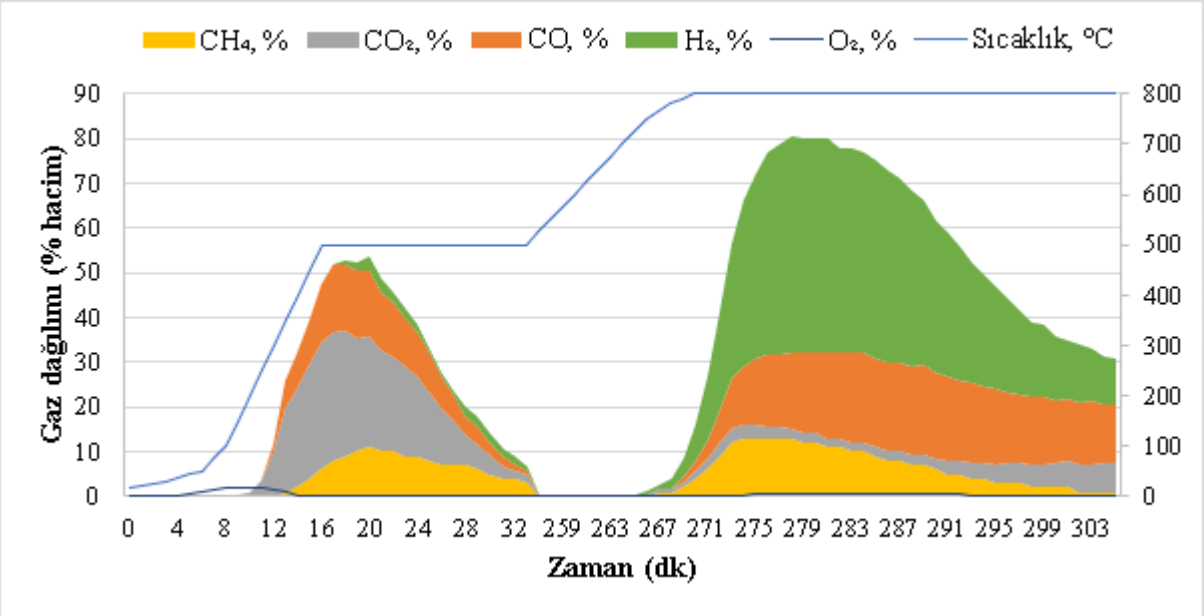
Şekil 4.27: Yonga levha atık örneğinin 2 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

800°C sıcaklıkta sürdürülen, 1 l/dk debili N_2 gaz ortamında 4 saat ön piroliz işlemi uygulanan piroliz ön işlemli gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.27'de verilmiştir. Şekil 4.28'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.27: Yonga levha atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (271 - 297 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
19,31	0,17	3	20	29	13	48

Şekil 4.28'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 279. dakikada %48 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 275. dakikada %20 hacimsel oranıyla CO ve 274. dakikada %13 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun 4 saatlik piroliz ön işleminden sonra %80'lere ulaştığı ve 284. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.28: Yonga levha atık örneğinin 4 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

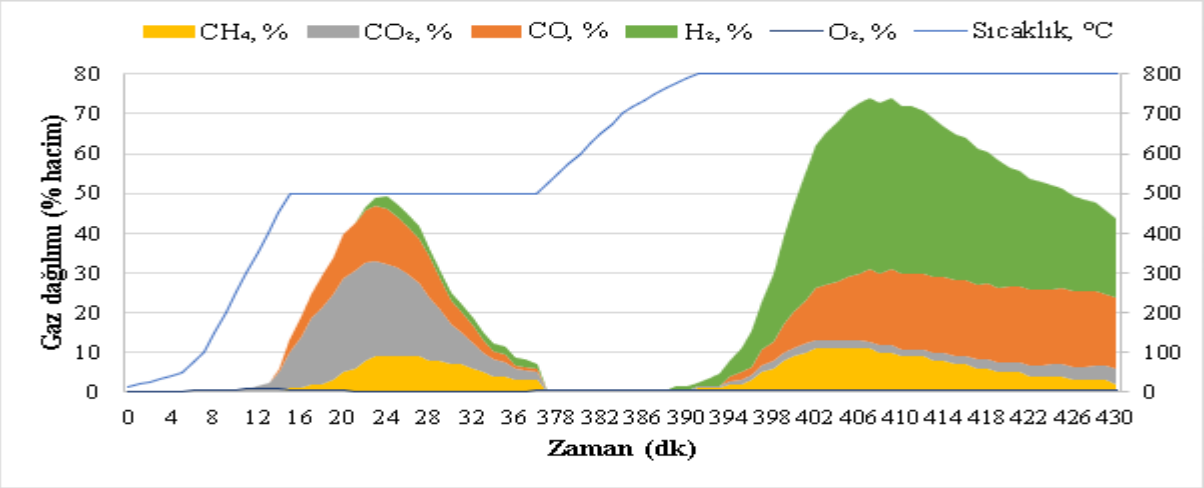
800°C sıcaklıkta sürdürülen, 1 l/dk debili N_2 gaz ortamında 6 saat ön piroliz işlemi uygulanan piroliz ön işlemli gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve

katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.28'de verilmiştir. Şekil 4.29'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.28: Yonga levha atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
19,11	0,3	-	19	25	11	43

Şekil 4.29'a bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 406. dakikada %43 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 409. dakikada %19 hacimsel oranıyla CO ve 402. dakikada %11 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun 6 saatlik piroliz ön işleminden sonra 406. dakikada %74'lere ulaştığı ve 412. dakikada azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.29: Yonga levha atık örneğinin 6 saat piroliz ön işlemli gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.2.5. Masif Atık Numunesinden Üretilen Peletlerin Gazlaştırması Sentez Gaz Analiz Sonuçları

Bu deneylerde masif atık örneğinden elde edilen pelet ile çalışılmıştır.

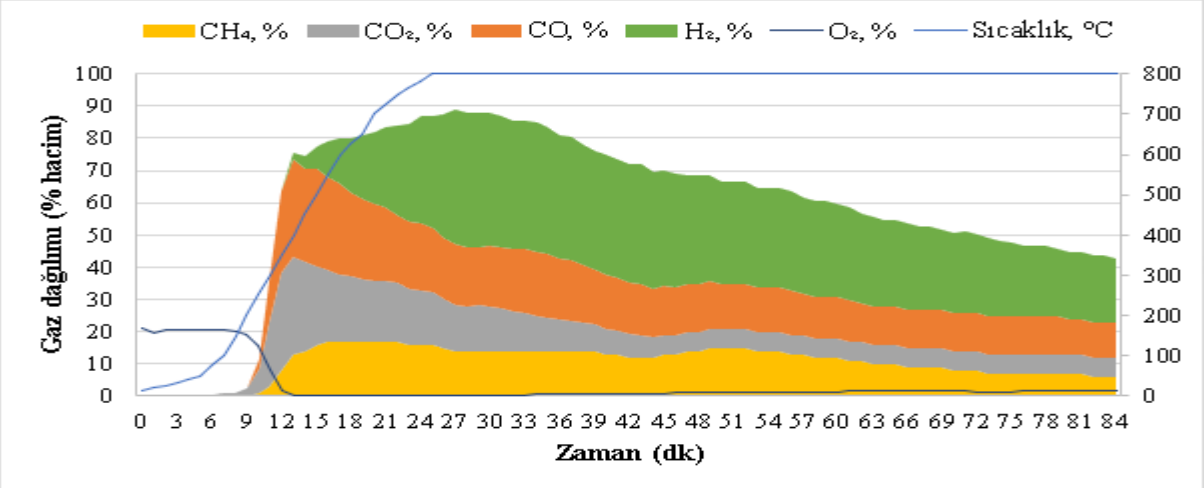
4.2.5.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

Masif atık örneğinden üretilen peletlerin gazlaştırma parametreleri önceden yapılmış olan gazlaştırma deneylerinden optimum şartlar belirlenerek yapılmıştır. Masif atık peletlerin yukarı akışlı reaktörde gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 150 g numune kullanılmıştır. Deney sırasında gazlaştırma ajanı olarak kuru hava kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 l/dk olarak seçildiği, 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.29'da verilmiştir. Şekil 4.30'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.29: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (19-39 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
31,14	0	14,75	30	28	17	42

Şekil 4.30'a bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 28. dakikada %42 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 13. dakikada %30 hacimsel oranıyla CO ve 15. dakikada %17 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun ise 28. dakikada %88'lere ulaştığı ve 35. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



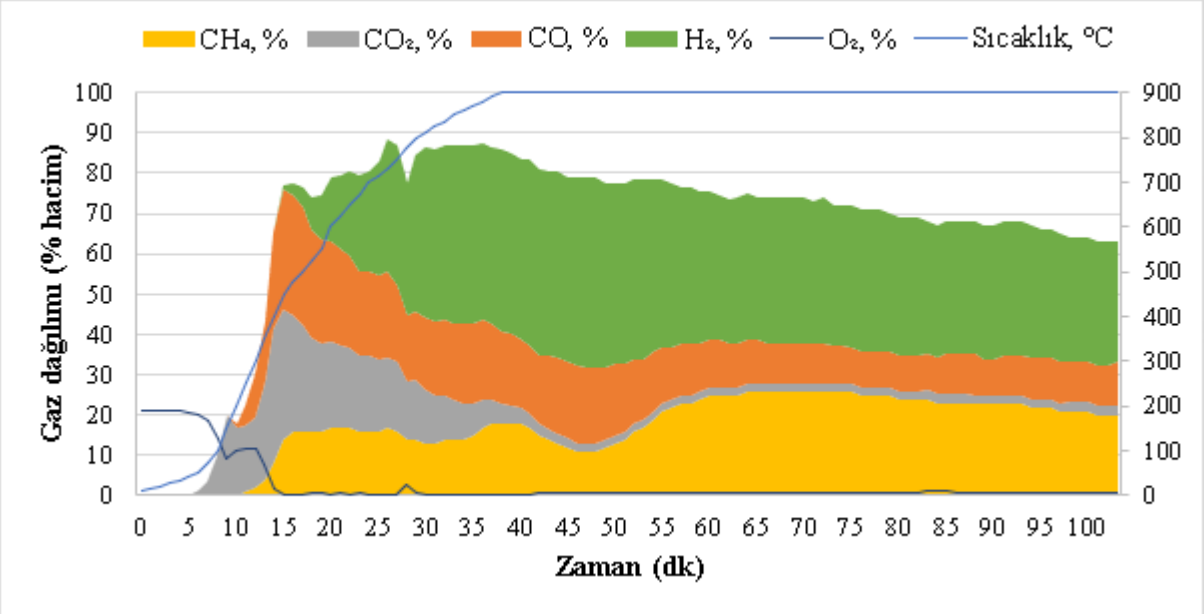
Şekil 4.30: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 l/dk olarak seçildiği, 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.30'da verilmiştir. Şekil 4.31'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.30: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 L/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (23-44 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
33,61	0	17	30	33	26	47

Şekil 4.31'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 30.dakikada %47 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 15. dakikada %30 hacimsel oranıyla CO ve 64.dakikada %26 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun ise 26. dakikada %88'lere ulaştığı ve 40. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.31: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

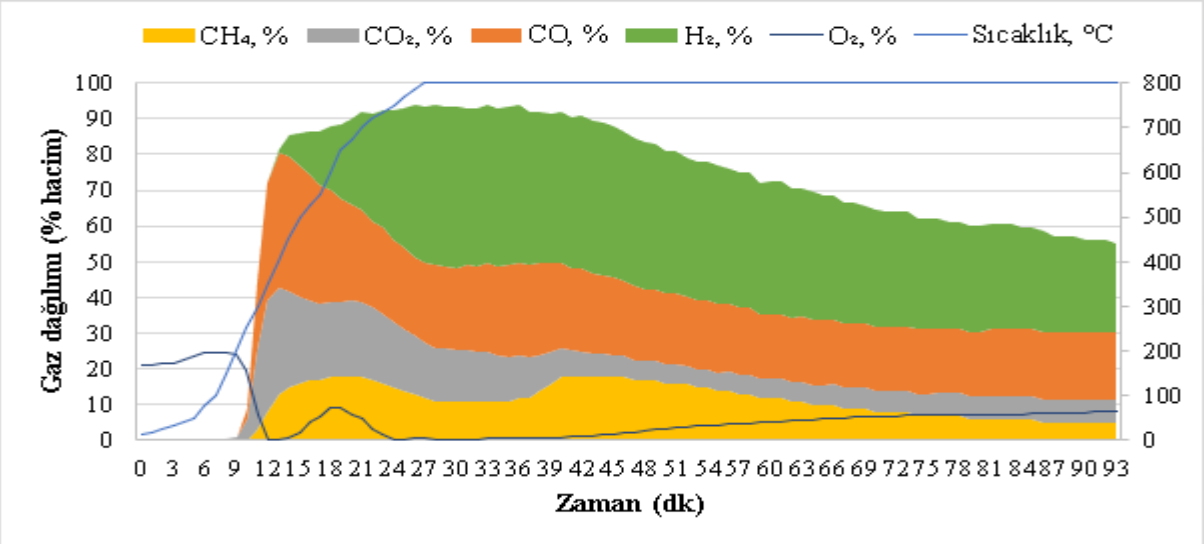
4.2.5.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

Masif atık örneğinden üretilen peletlerin gazlaştırma parametreleri önceden yapılmış olan gazlaştırma deneylerinden optimum şartlar belirlenerek yapılmıştır. Masif atık peletleri yukarı akışlı reaktörde saf oksijen ile gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 150 g numune kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.31'de verilmiştir. Şekil 4.32'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.31: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (19-33 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
29,15	0	17,5	38	31	18	45

Şekil 4.32'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 27. dakikada %45 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 14. dakikada %38 hacimsel oranıyla CO ve 40. dakikada %18 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun ise 21. dakikada %92'lere ulaştığı ve 43. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



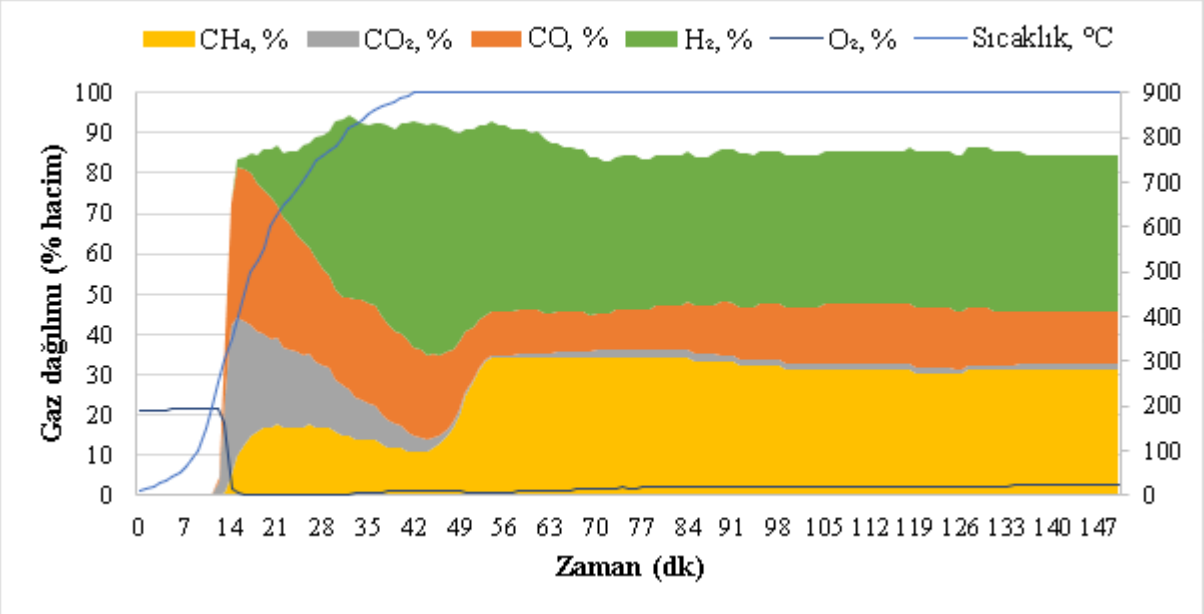
Şekil 4.32: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.32'de verilmiştir. Şekil 4.33'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.32: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (25-46 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
37,23	0	11,9	38	37	34	57

Şekil 4.33'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 43. dakikada %57 ile H_2 olduğu görülmüştür ve bunu 15. dakikada %38 hacimsel oranıyla CO ve 53.dakikada %34 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun ise 34. dakikada %94'lere ulaştığı ve 61. dakikadan sonra yavaşça azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.33: Masif atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.2.6. Yonga Levha Atık Numunesinden Üretilen Peletlerin Gazlaştırılması Sentez Gaz Analiz Sonuçları

Bu deneylerde yonga levha atığından elde edilen pelet ile çalışılmıştır.

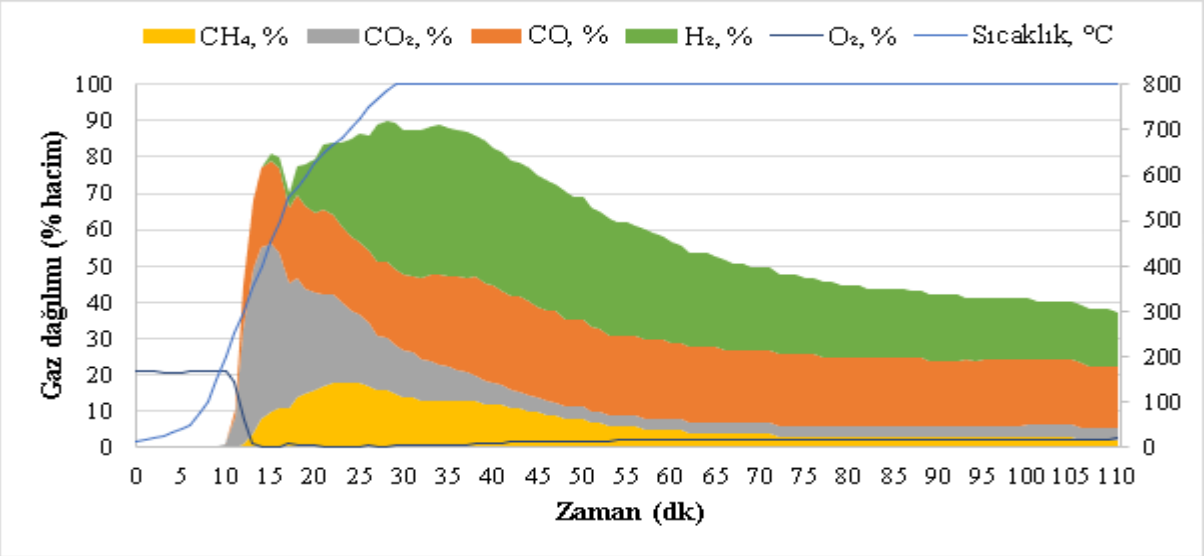
4.2.6.1. Kuru Hava Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

Yonga levha atık örneğinden üretilen peletlerin gazlaştırılma parametreleri önceden yapılmış olan gazlaştırma deneylerinden optimum şartlar belirlenerek yapılmıştır. Yonga levha atık peletleri yukarı akışlı reaktörde gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 150 g numune kullanılmıştır. Deney sırasında gazlaştırma ajanı olarak kuru hava kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 l/dk olarak seçildiği, 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.33'de verilmiştir. Şekil 4.34'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.33: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (22-45 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
35,97	0	9,4	23	47	18	41

Şekil 4.34'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 29. dakikada %41 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 37. dakikada %23 hacimsel oranıyla CO ve 22. dakikada %18 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun ise 29. dakikada %90'lara ulaştığı ve 41. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



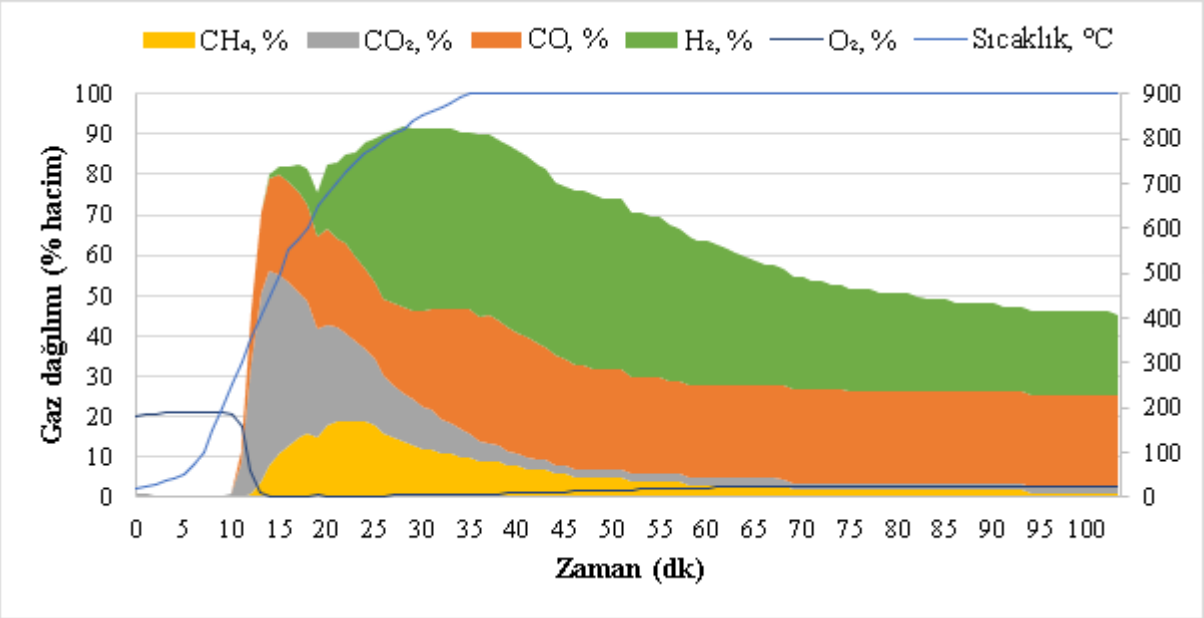
Şekil 4.34: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,05 l/dk olarak seçildiği, 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.34'de verilmiştir. Şekil 4.35'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.34: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (21-41 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
34,41	0	17,75	31	48	19	45

Şekil 4.35'e bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 29. dakikada %45 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 36. dakikada %31 hacimsel oranıyla CO ve 21.dakikada %19 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun ise 26. dakikada %91'lere ulaştığı ve 39. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.35: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.2.6.2. Saf Oksijen Ajanı ile Gazlaştırma Sonuçları

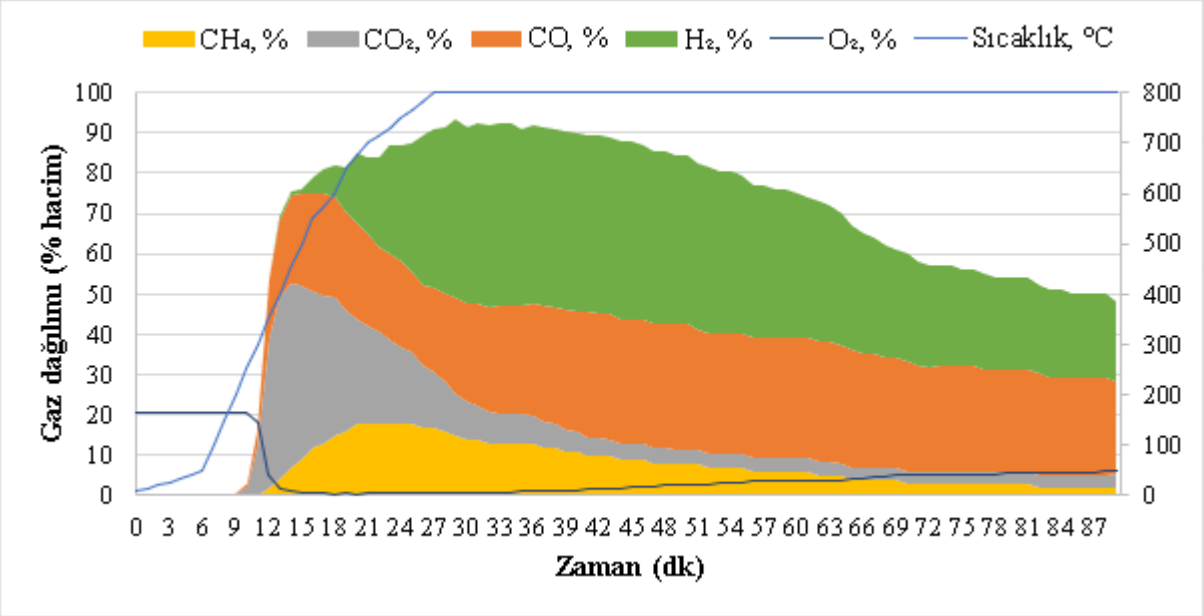
Yonga levha atık örneğinden üretilen peletlerin gazlaştırma parametreleri önceden yapılmış olan gazlaştırma deneylerinden optimum şartlar belirlenerek yapılmıştır. Yonga levha atık peletleri yukarı akışlı reaktörde saf oksijen ile gerçekleşen gazlaştırma deneyinde 150 g numune kullanılmıştır. Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 800 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.35'de verilmiştir. Şekil 4.36'da ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.35: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (21-36 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
36,37	2,40	8,55	31	46	18	45

Şekil 4.36'ya bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 29. dakikada %45 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 40. dakikada %31 hacimsel oranıyla CO ve 20. dakikada %18

hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonun ise 31. dakikada %92'lere ulaştığı ve 40. dakikadan sonra azaldığı tespit edilmiştir.



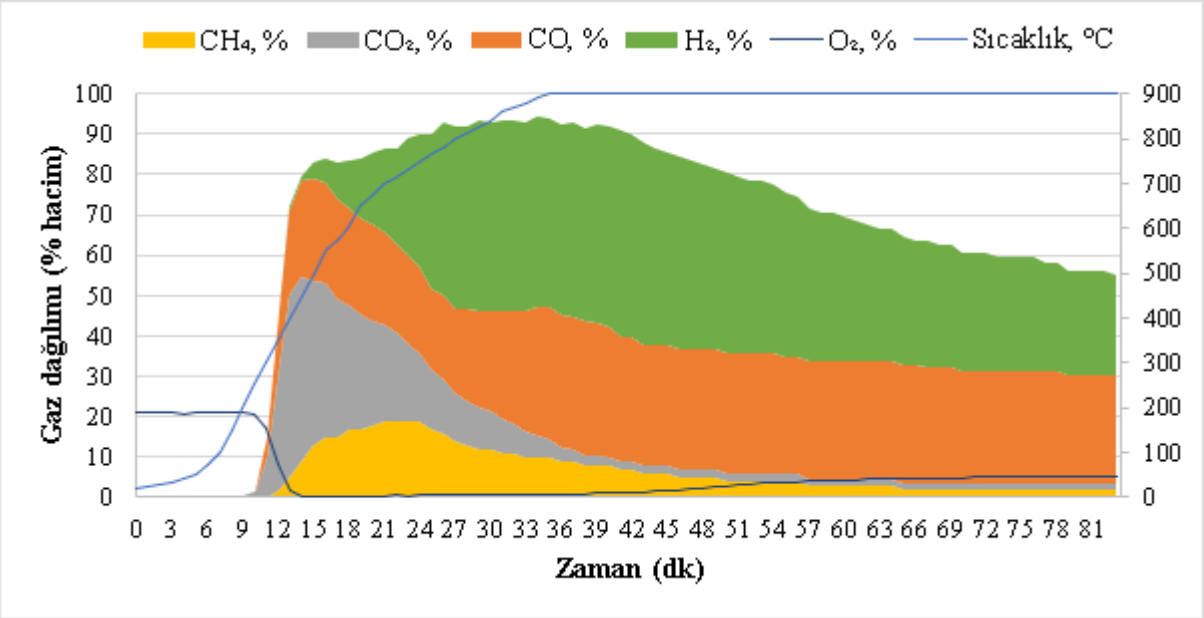
Şekil 4.36: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 800 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Gazlaştırma ajan debisinin 0,01 l/dk olarak seçildiği, 900 °C sıcaklıkta sürdürülen gazlaştırma deneyi ile ilgili sentez gazların en yüksek verileri, oluşan sıvı ve katı kalıntı miktarları ve ortalama toplanan gaz hacmi Tablo 4.36'da verilmiştir. Şekil 4.37'de ise sıcaklık ve zamana bağlı olarak deney aşamasında oluşan gaz dağılım yüzdeleri verilmiştir.

Tablo 4.36: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

Deney Adı	**Sentez Gaz ve Katı-Sıvı Analiz Sonuçları**					
Katı Kalıntı (g)	**Sıvı Kalıntı (g)**	**Ortalama Toplanan Gaz Hacmi (l) (21-36 dk)**	**CO (%) hacim**	**CO2 (%) hacim**	**CH4 (%) hacim**	**H2 (%) hacim**
35,6	2,30	11,1	33	45	19	51

Şekil 4.37'ye bakıldığında, sentez gaz içeriğinin en yüksek oranda 40. dakikada %51 ile H_2 olduğu görülmektedir ve bunu 38. dakikada %33 hacimsel oranıyla CO ve 21. dakikada %19 hacimsel oranıyla CH_4 gazlarının izlediği belirlenmiştir. Gaz kompozisyonunun ise 27. dakikada %93'lere ulaştığı ve 41. dakikadan sonra azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.37: Yonga levha atık örneğinden üretilen peletin 0,01 l/dk debili saf oksijen ajanı ile 900 °C sıcaklıkta gazlaştırılmasının zamana ve sıcaklığa bağlı sentez gaz analizi.

4.3. GAZLAŞTIRMA ÜRÜN ANALİZLERİ

Gazlaştırma sonucu oluşan katı ürünler üzerinde analizler yapılmıştır. Alt başlıklarda bu analizler detaylıca sunulmuştur.

4.3.1. Soğuk Gaz Verimliliği Sonuçları

Gazlaştırma deneyleri sonrasında elde edilen gaz hacmi, gaz ısıl değeri ve yakıt ısıl değeri hesaplanarak soğuk gaz verimliliği sonuçları Tablo 4.37'de verilmiştir. Gaz ısıl değer hesaplanmasında toplanan sentez gazın en yüksek üst ısıl değeri kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

Tablo 4.37: Yapılan deneylerin soğuk gaz verimliliği sonuçları

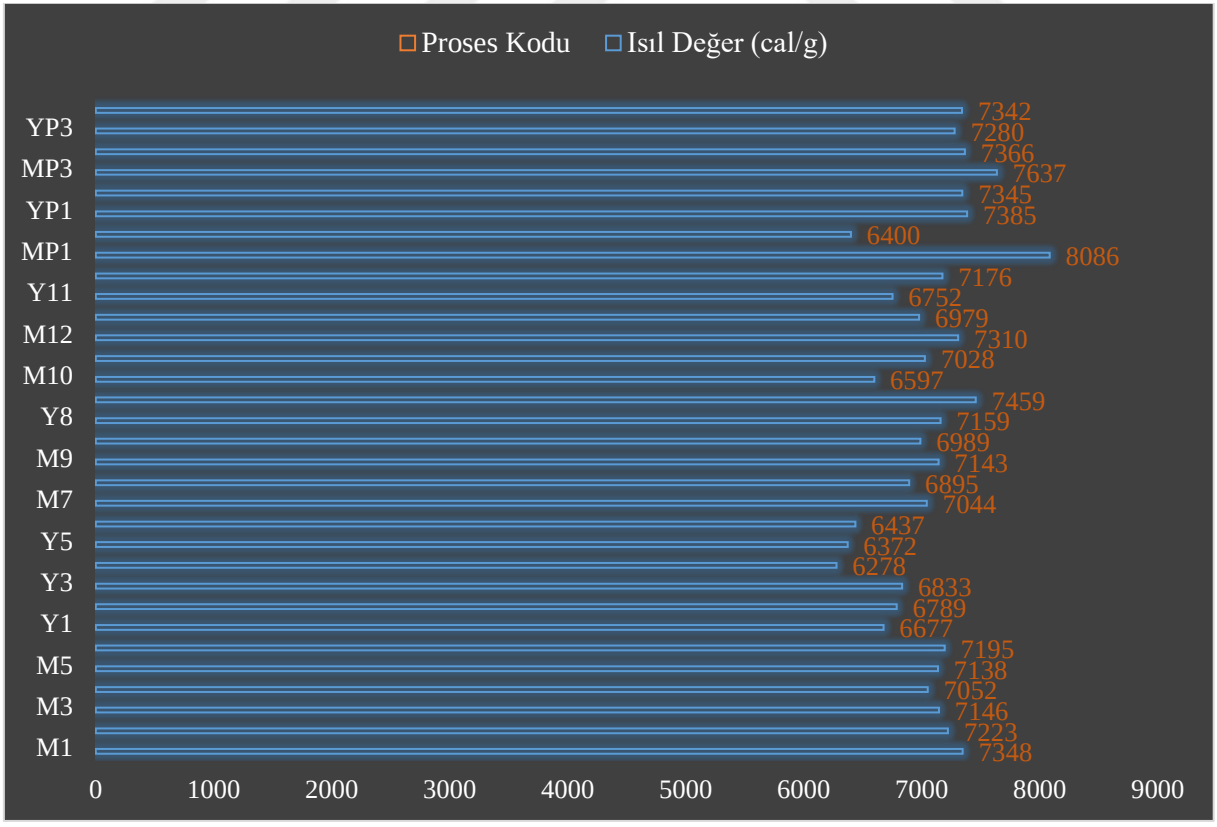
Proses	**Gaz Hacmi, (m^3)**	**Gaz Isıl Değer, ($kcal/m^3$)**	**Yakıt Isıl Değer, (kcal/kg)**	**Soğuk Gaz Verimliliği (%)**
M1	0,15	3172	4453	11
M2	0,16	3142	4453	11
M3	0,17	3108	4453	12
M4	0,13	3014	4453	9
M5	0,21	3226	4453	15
M6	0,15	3260	4453	11
M7	0,17	3330	4453	13
M8	0,19	3534	4453	15
M9	0,13	3848	4453	11

Tablo 4.37(devam):

M10	0,15	2609	4453	9
M11	0,16	2518	4453	9
Y5	0,13	3295	4217	10
Y6	0,14	3455	4217	11
Y7	0,15	3706	4217	13
Y9	0,12	4853	4217	14
Y10	0,12	3288	4217	9
Y11	0,13	3215	4217	10
MP1	0,14	3187	4453	10
MP2	0,15	3630	4453	12
MP3	0,16	3322	4453	12
MP4	0,14	3410	4453	11
YP1	0,13	3347	4217	10
YP2	0,12	3386	4217	10
YP3	0,15	3494	4217	12

4.3.2. Gazlaştırma Sonucu Oluşan Katı Ürünlerin Isıl Değerleri

Gazlaştırma deneyleri sonucunda katı ürünler oluşmuştur ve bu ürünlere ait kalorifik değerleri Şekil 4.38'de gösterilmiştir.

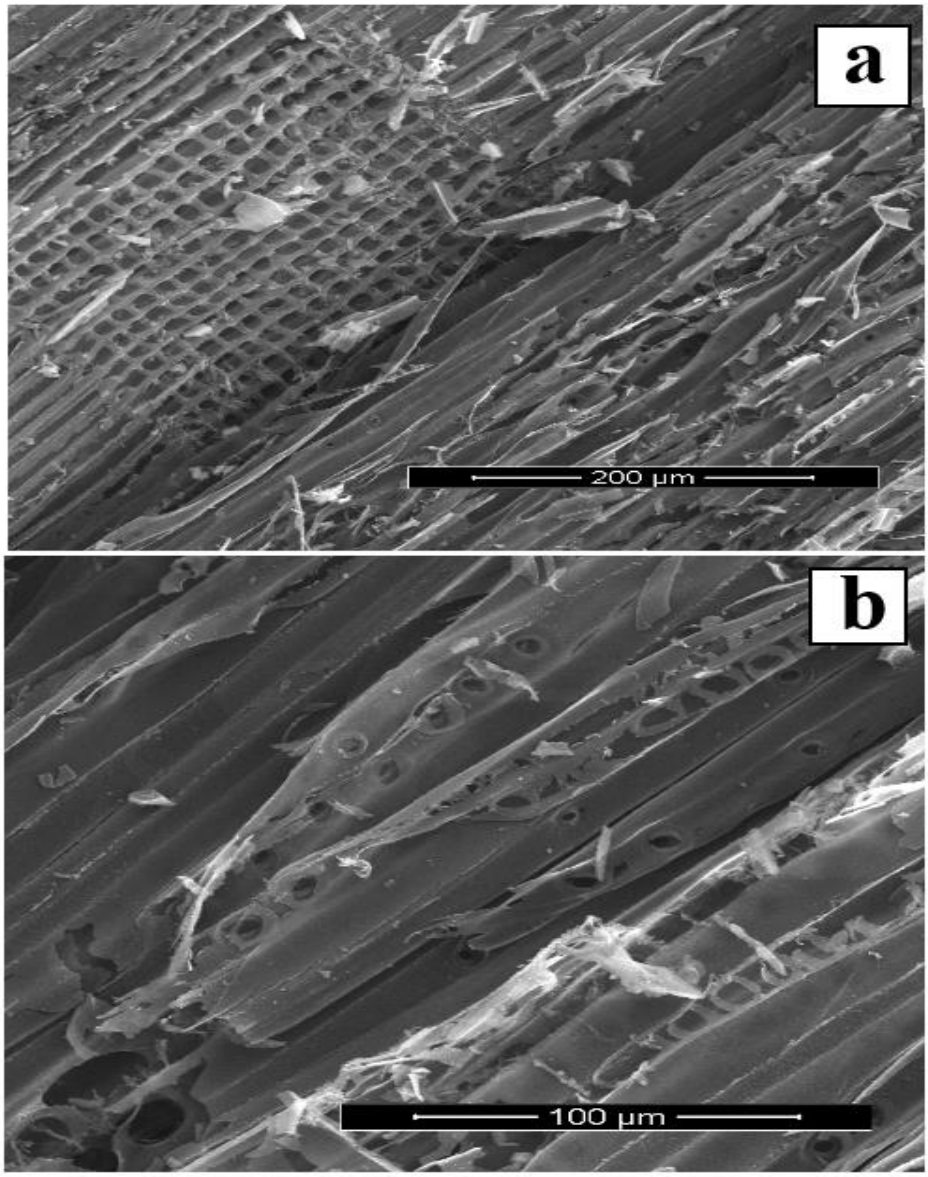


Şekil 4.38: Katı ürünlerin (biochar) kalorifik değeri.

4.3.2. Katı Ürünlerin Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi Görüntüleri

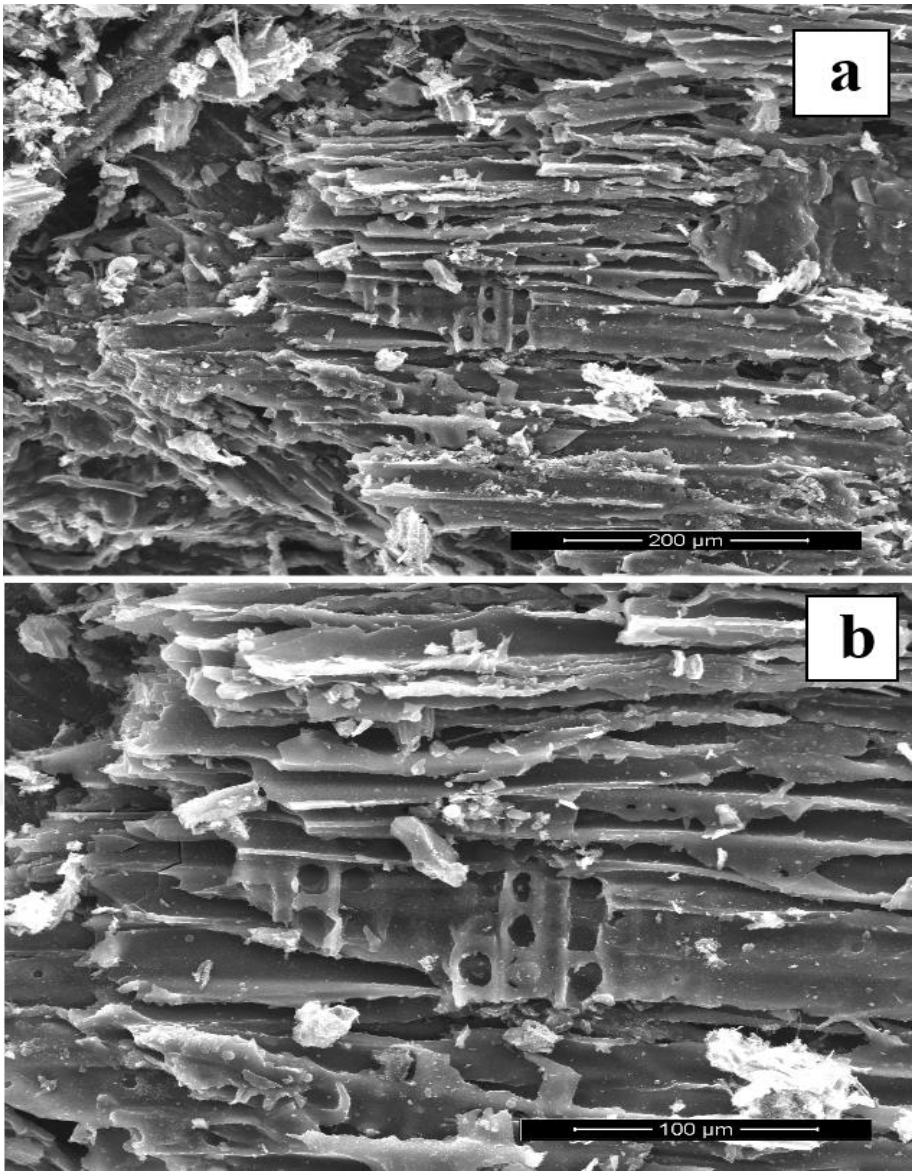
Yapılan termokimyasal işlemler sonucunda katı ürün olarak bilinen biochar elde edilmiştir. Bu kısımda katı ürünlerin görsel olarak yorumlanması ve farklılıkların ortaya konulması için taramalı elektron mikroskobu kullanılarak örnekler üzerinde incelemeler yapılmıştır.

Şekil 4.39'da ısıl işlem görmemiş masif atık örneğinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.



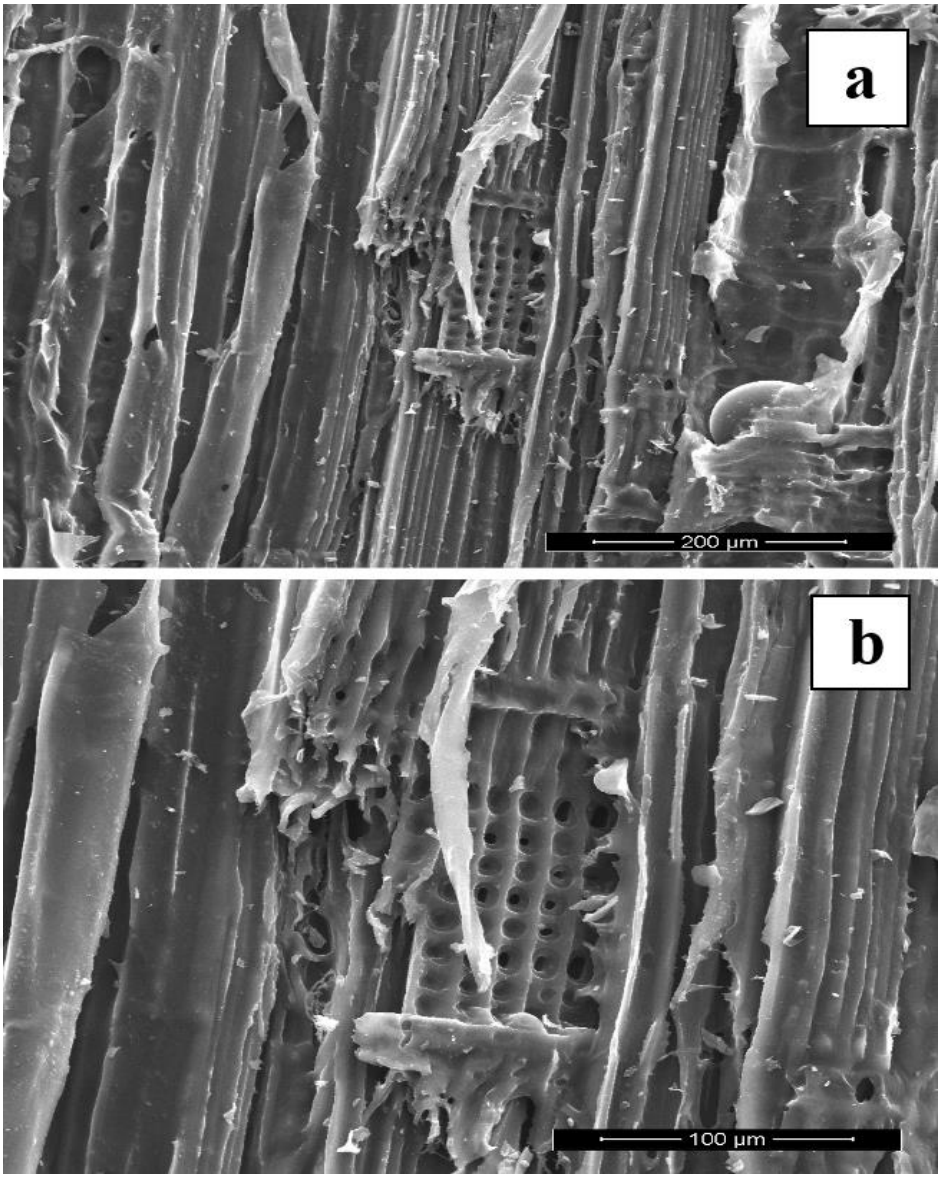
Şekil 4.39: Masif atık örneği ısıl işlem görmemiş TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.40'da ısıl işlem görmemiş masif atık örneğinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.



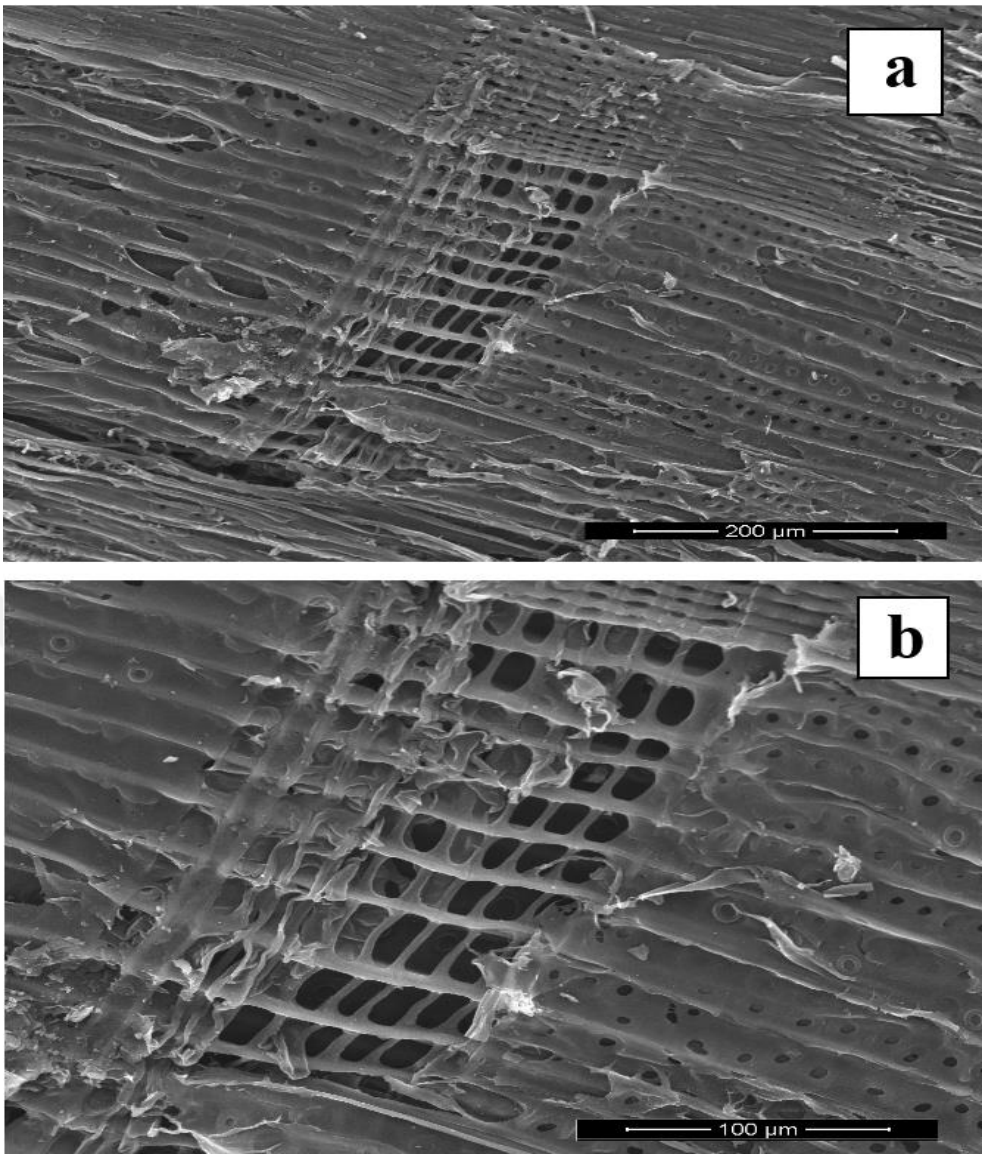
Şekil 4.40: Yonga levha atık örneğinin ısıl işlem görmemiş TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.41' de masif atık örneğinin 700° C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



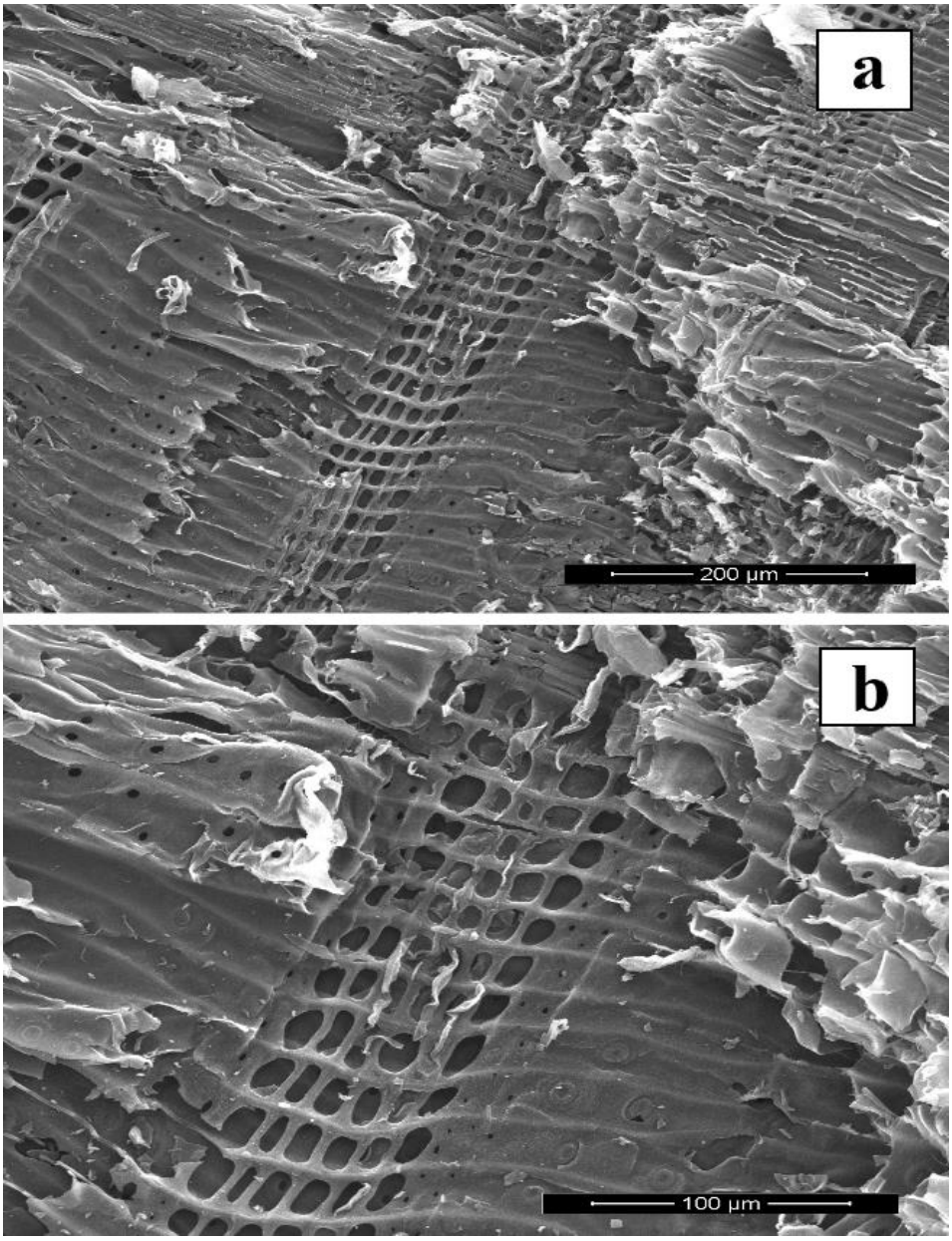
Şekil 4.41: Masif atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.42'de masif atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



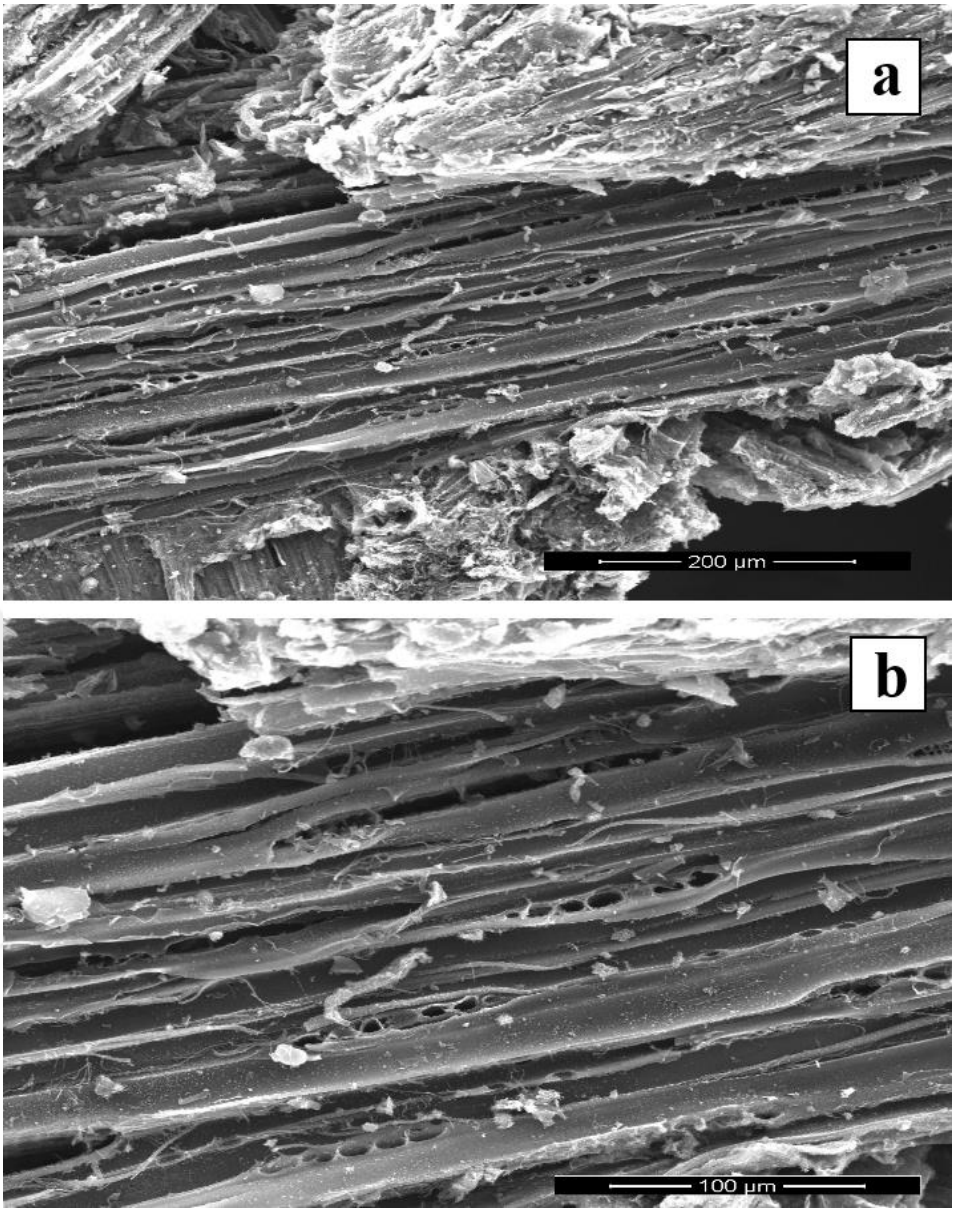
Şekil 4.42: Masif atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.43'de masif atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



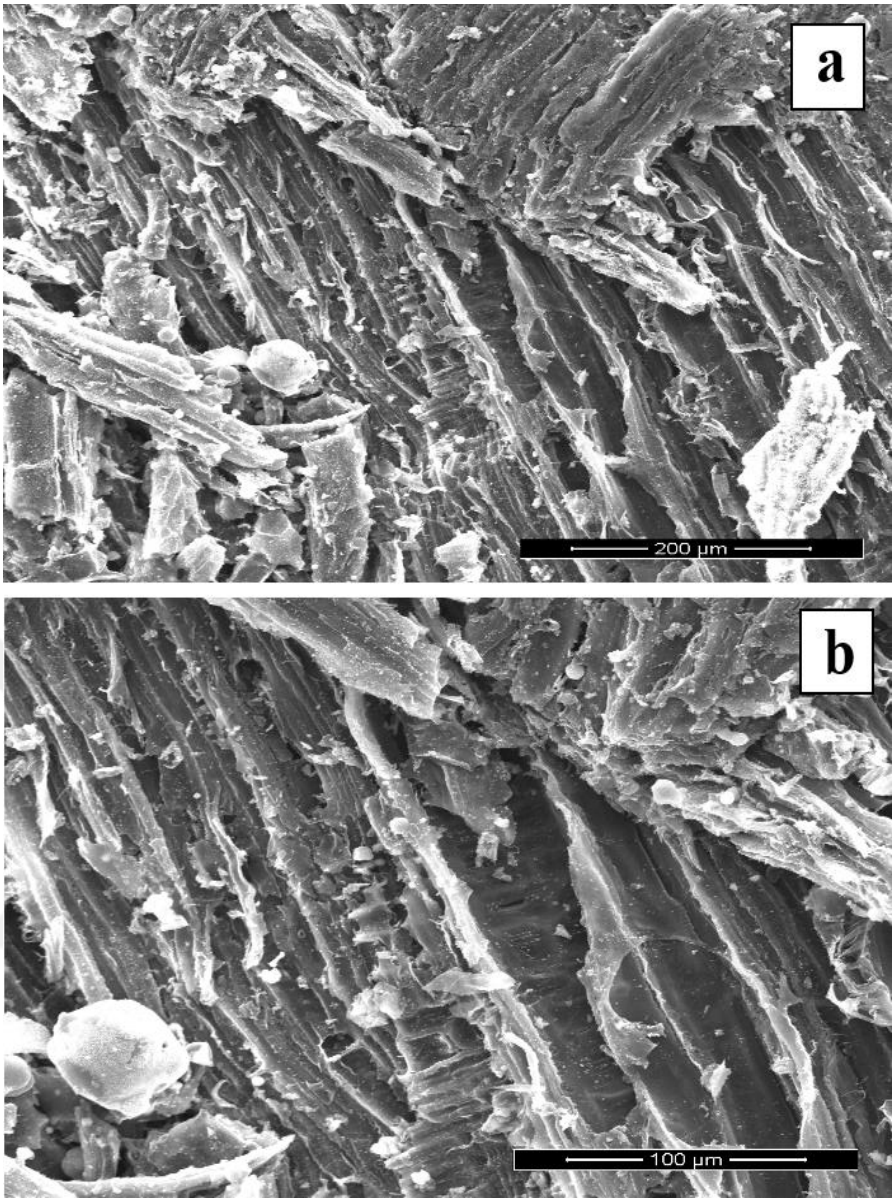
Şekil 4.43: Masif atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.44'de yonga levha atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



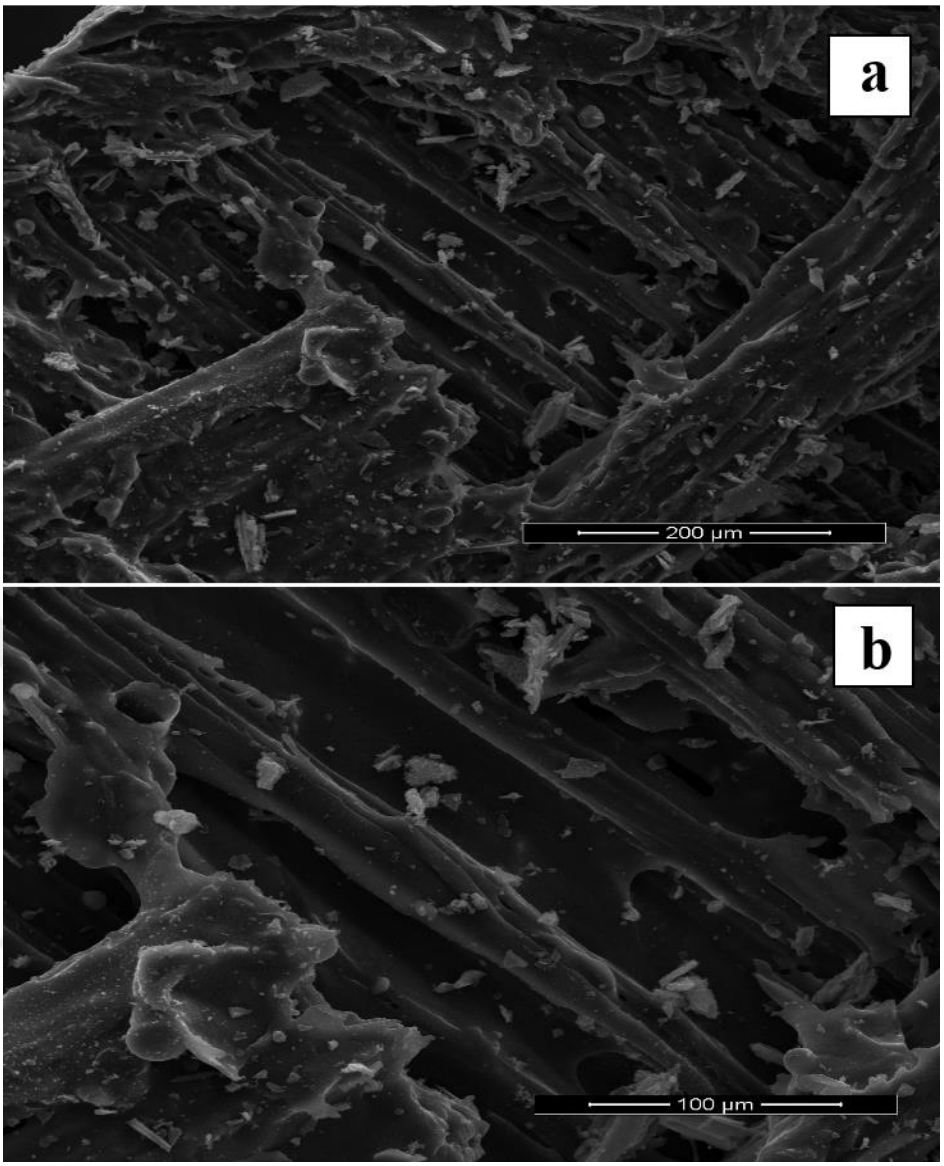
Şekil 4.44: Yonga levha atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.45'de yonga levha atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



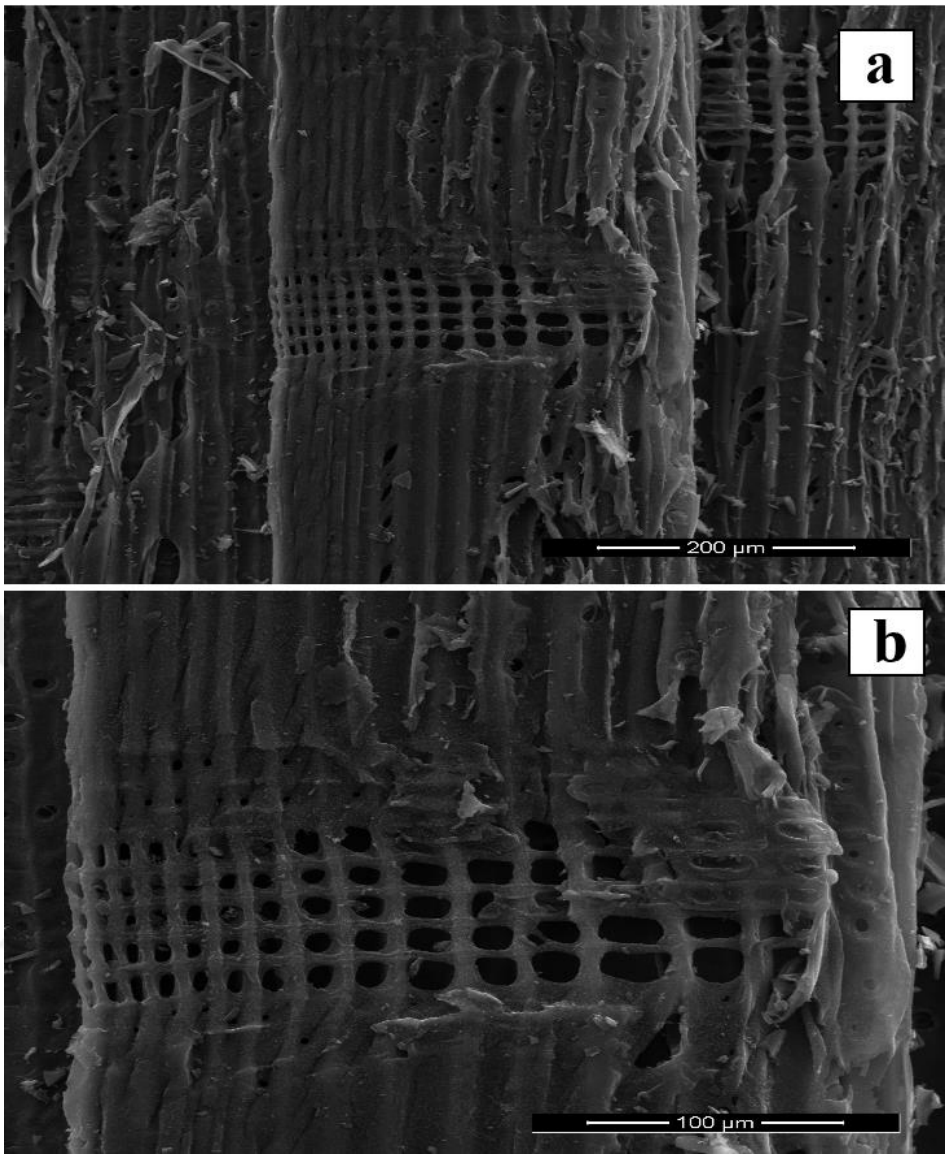
Şekil 4.45: Yonga levha atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.46'da yonga levha atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



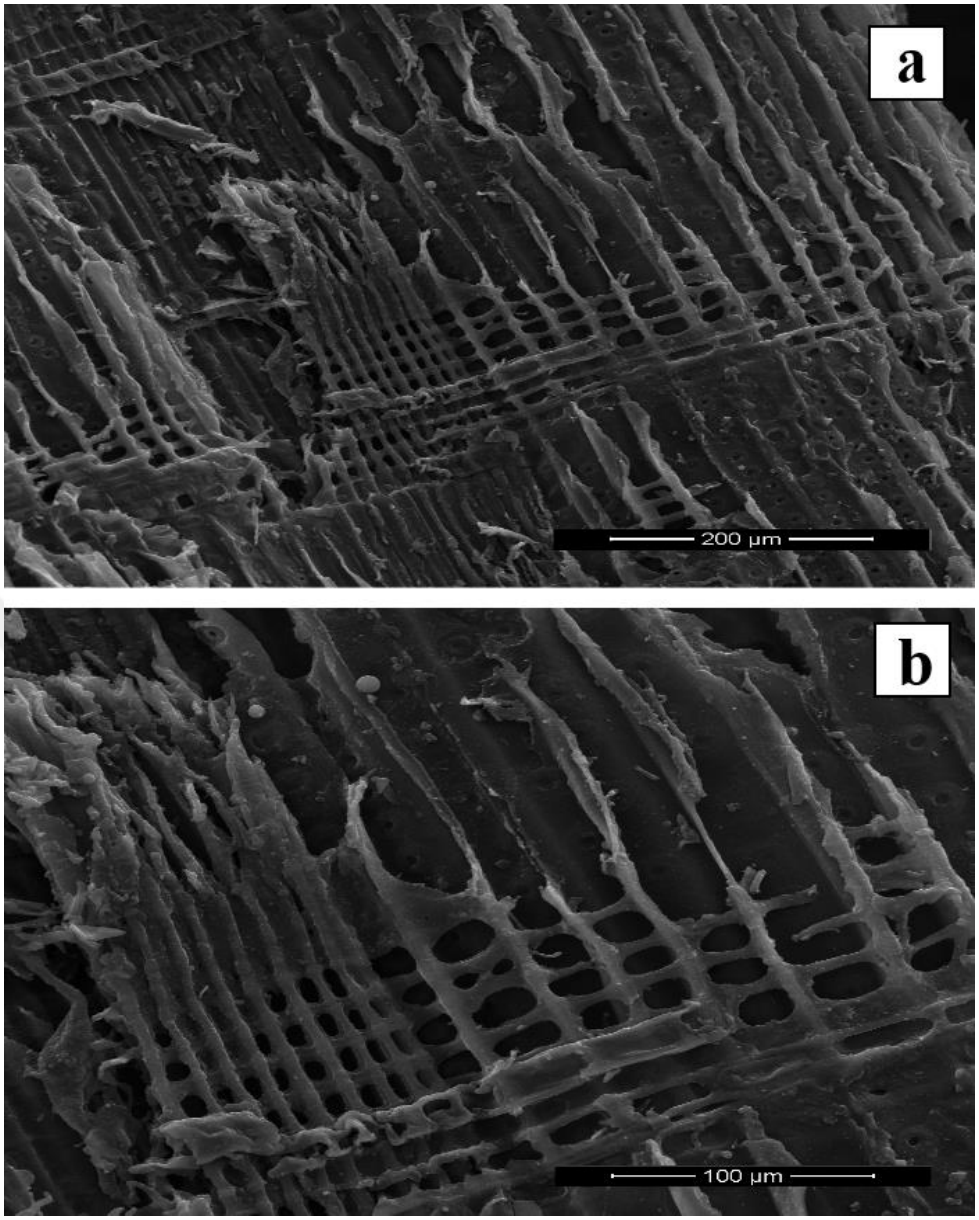
Şekil 4.46: Yonga levha atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve kuru hava ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.47'de masif atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



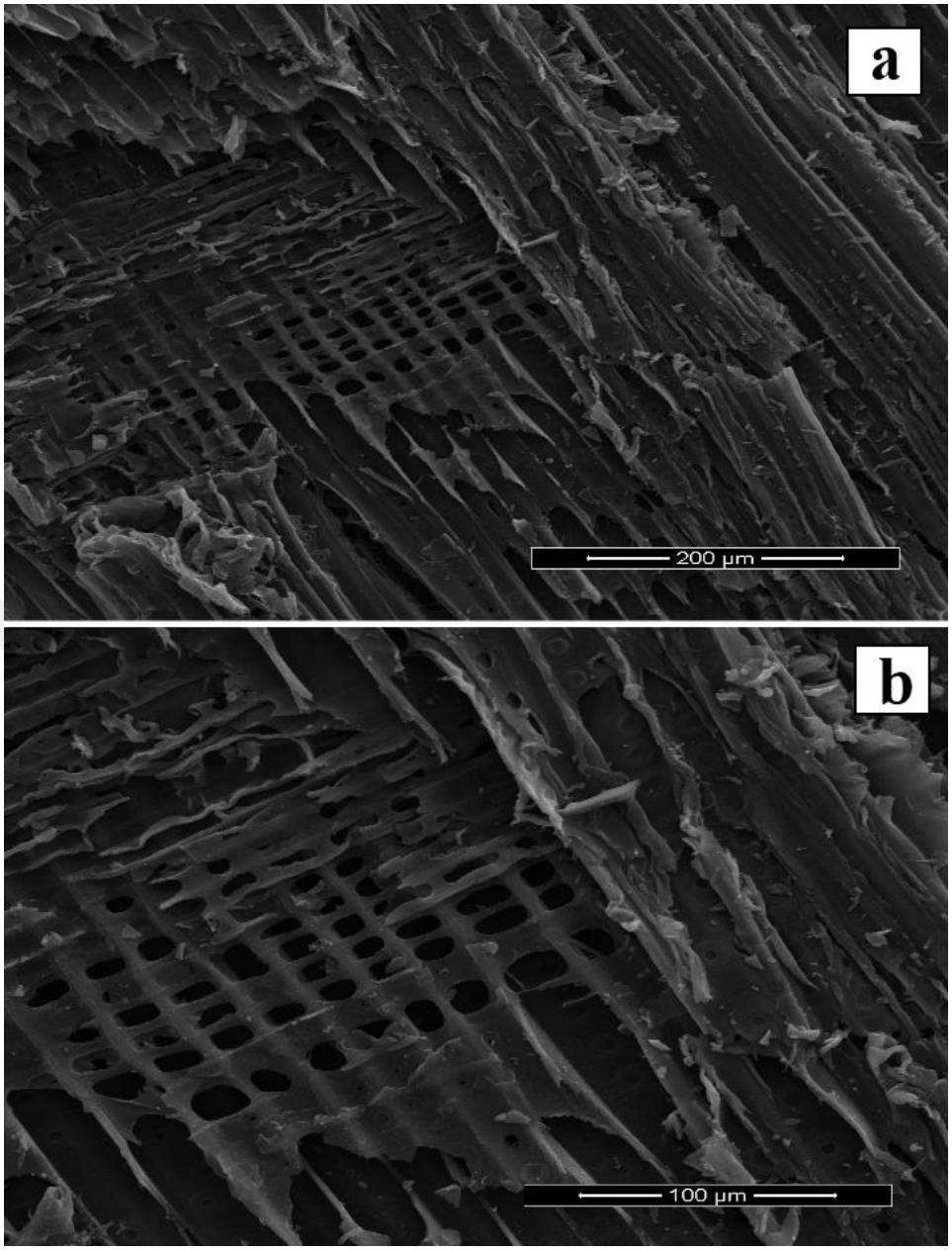
Şekil 4.47: Masif atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.48'de masif atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



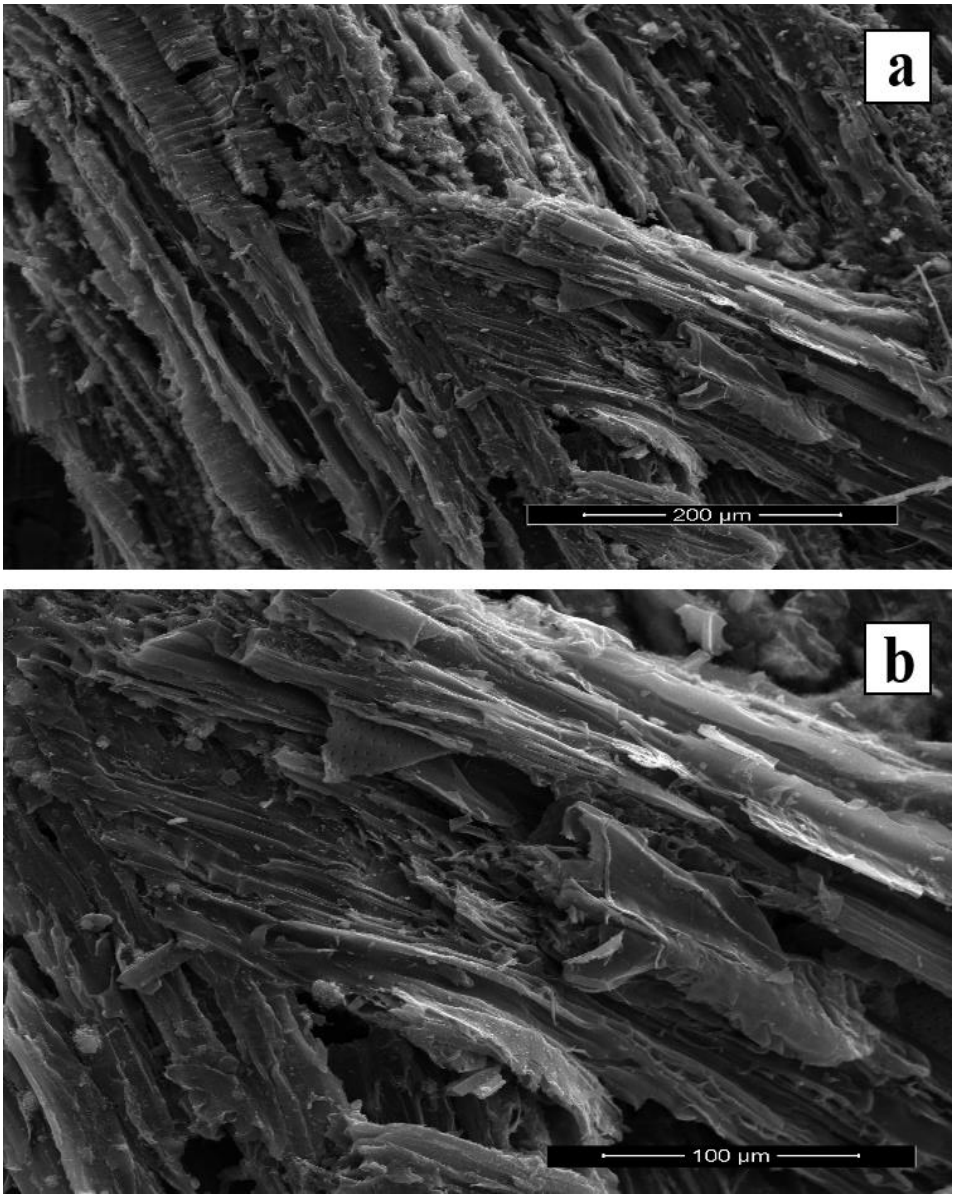
Şekil 4.48: Masif atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.49'da masif atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



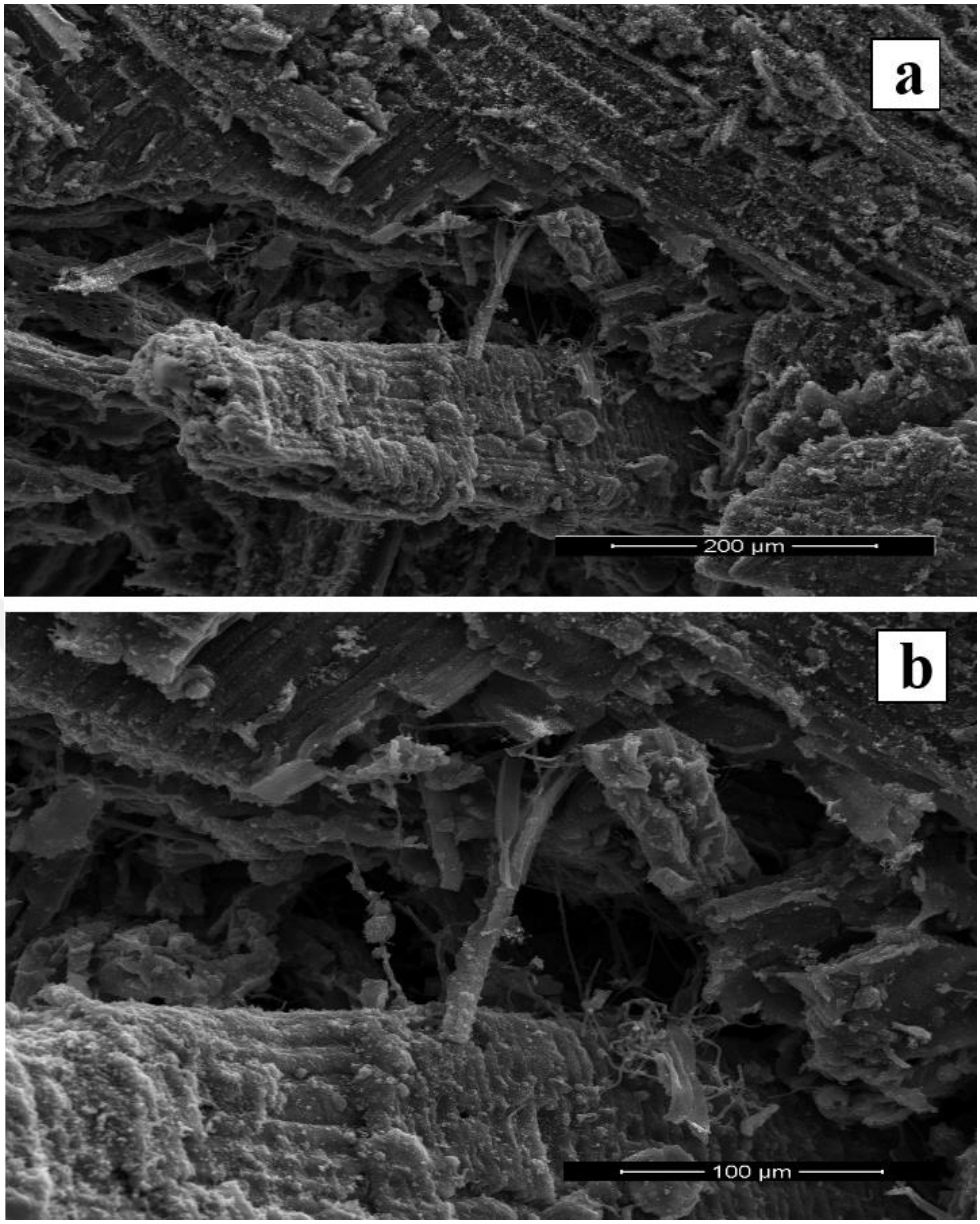
Şekil 4.49: Masif atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.50'de yonga levha örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



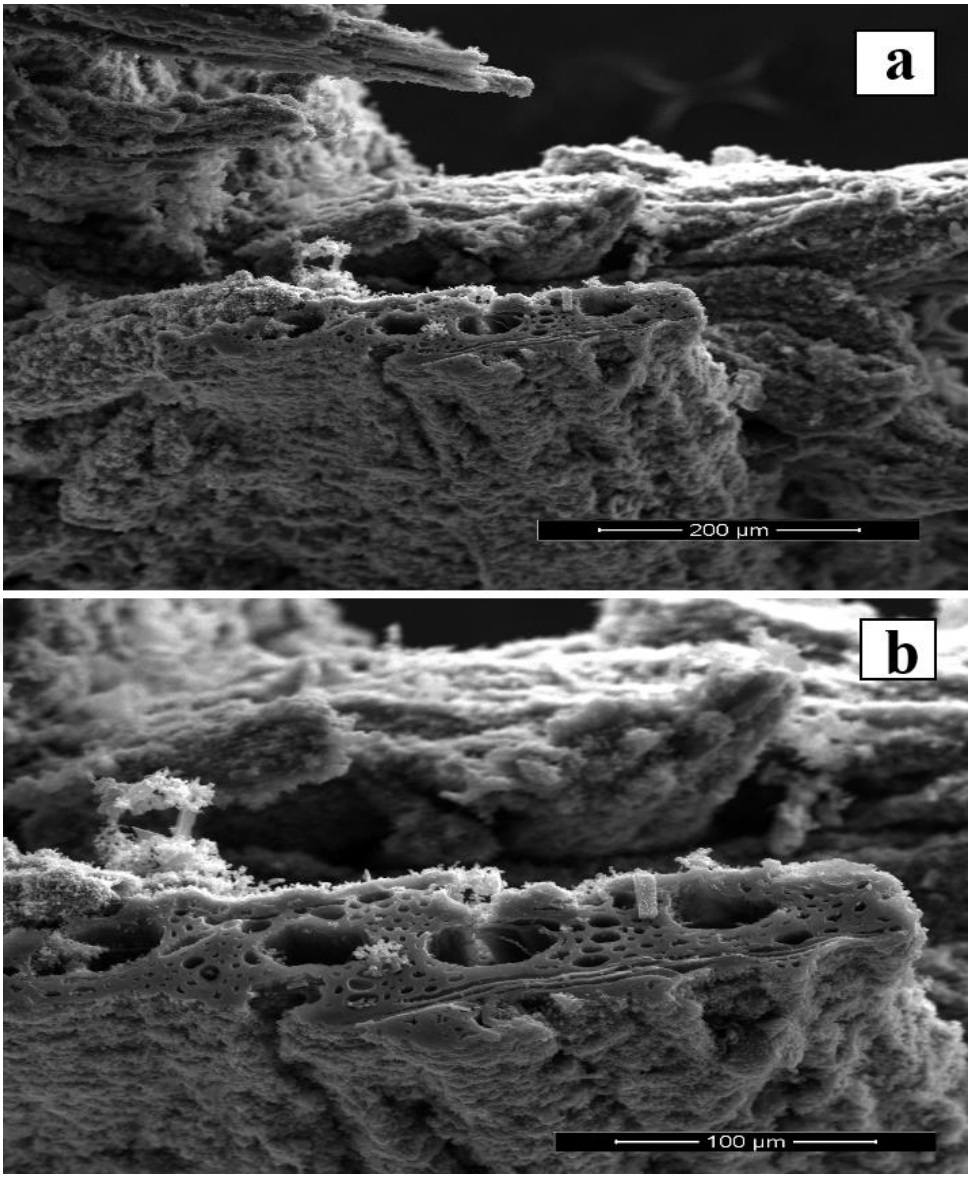
Şekil 4.50: Yonga levha atık örneğinin 700 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.51'de yonga levha örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.51: Yonga levha atık örneğinin 800 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

Şekil 4.52'de yonga levha örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.52: Yonga levha atık örneğinin 900 °C sıcaklıkta ve saf oksijen ortamında gazlaştırılması sonucu oluşan katı ürünün TEM görüntüleri ve büyütme oranları (a(x400) ve b(x800)).

4.4. GAZLAŞTIRMA VERİLERİNİN İSTATİSTİKSEL AÇIDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deneysel işlemlerden sonra elde edilen verilerin anlamlılığını tartışmak, parametrelerin birbirleri arasında bir bağıntı yakalamak, varsa model kurmak, sentez gaz oluşumuna etki eden parametreleri detaylıca incelemek, ısıl değer ve diğer bağımlı ve bağımsız değişkenleri detaylandırmak üzere ANOVA testi, korelasyon analizi ve regresyon analizi yapılmıştır.

4.4.1. Korelasyon Analizi

Bu çalışmada deney parametrelerinin aralarında bir anlamlılığın olduğunu belirlemek için korelasyon analizi yapılmıştır ve Tablo 4.38'de deney parametrelerinin korelasyon analizi verilmiştir.

Tablo 4.38: Deney parametrelerinin korelasyon analizi.

Parametreler	**Debi (l/dk)**	**Sıcaklık (°C)**	**CO**	**CH4**	**H2**	**Isıl Değer (kcal/m^3)**
Debi (l/dk)	1	-,519**	-,601**	-,514**	-,667**	-,652**
Sıcaklık (°C)	-,519**	1	,531**	,568**	,759**	,705**
CO	-,601**	,531**	1	,328**	,635**	,584**
CH_4	-,514**	,568**	,328**	1	,682**	,940**
H_2	-,667**	,759**	,635**	,682**	1	,872**
Isıl Değer (kcal/m^3)	-,652**	,705**	,584**	,940**	,872**	1

**Korelasyon 0,01 seviyesinde anlamlıdır (2-tailed).

Tablo 4.38'e bakıldığında, sıcaklığın ajan debisi ile negatif yönde ilişkisi olduğu, CO, CH_4 ve H_2 gazları ile pozitif yönde ilişkisi olduğu ve ısıl değer ile de pozitif yönde ilişkisi olduğu görülmektedir. Ajan debisinin CO, CH_4 ve H_2 ile negatif yönde ve ısıl değer ile negatif yönde ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık, CH_4 ve H_2 değişkenlerinin ısıl değer ile pozitif yönde güçlü bir ilişkisi olduğu görülmüştür.

4.4.2. Regresyon Analizi

Bağımlı değişken olarak seçilen ısıl değerin ve bağımsız değişken olarak seçilen CO hacimsel yüzdesi, H_2 hacimsel yüzdesi ve CH_4 hacimsel yüzdesi parametrelerinin arasında regresyon analizi yapılmıştır. Model özeti ve regresyon analiz sonuçları Tablo 4.39 ve Tablo 4.40'da verilmiştir.

Tablo 4.39: Model özeti ve regresyon analizi

Model Özeti				
Model	**R**	**R²**	**Düzenlenmiş R²**	**Sig. (anlamlılık, P)**
1	1,000[a]	1,000	1,000	0,000[a]
a. Predictors: (Constant), H_2 hacimsel yüzdesi, CO hacimsel yüzdesi, CH_4 hacimsel yüzdesi				

Tablo 4.40: Regresyon analizi.

Katsayılar[a]						
Model		**Standardize edilmemiş katsayılar**		**Standardize katsayılar**	**t**	**Sig.**
		B	**Std. Hata**	**Beta**		
1	(Katsayı)	-0,007	0,005		-1,294	0,196
	CO	30,139	0,001	0,171	59518,282	0,000
	CH_4	95,301	0,000	0,679	224026,582	0,000
	H_2	30,501	0,000	0,300	81001,221	0,000

a. Bağımlı değişken: Isıl Değer (kcal/m^3)

Bağımlı değişken olan ısıl değer ile bağımsız değişken olan sentez gazların (CO, CH_4 ve H_2) arasında pozitif yönde ve çok güçlü düzeyde anlamlı bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Modelin açıklama gücü olarak ifade edilen R^2 değeri 1,000 olup, bağımlı değişken olan ısıl değerde gerçekleşecek değişimlerin %100 oranında bağımsız değişkenler olan sentez gazlarına bağlı olduğu belirlenmiştir. Tablo 4.40'da verilen regresyon analizi sonucunda matematiksel model aşağıda oluşturulmuştur.

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + \cdots \tag{4.1}$$

a = -0,007 b=30,139 c= 95,301 d= 30,501

$$Y = -0{,}007 + 95{,}301X_{CH_4} + 30{,}5011X_{H_2} + 30{,}139X_{CO} \tag{4.2}$$

Denklem 4.2'de belirtilen sabit değer -0,007 için p>0,05 olduğundan anlamlı bir fark oluşturmamaktadır. Bu nedenle düzenlenen nihai matematiksel model;

$$\text{Sentez Gaz Isıl Değer (kcal/m}^3) = 95{,}301X_{CH4} + 30{,}501X_{H2} + 30{,}139X_{CO} \quad (4.3)$$

X_{CH4}: Sentez gaz içerisinde hacimsel olarak CH_4 gazının yüzdesi

X_{H2}: Sentez gaz içerisinde hacimsel olarak H_2 gazının yüzdesi

X_{CO}: Sentez gaz içerisinde hacimsel olarak CO gazının yüzdesi

4.4.3. ANOVA testi

Sıcaklığın 600-900 °C aralıkta değişmesiyle ısıl değer, CO, CH_4, H_2 ve H_2/CO arasındaki bağıntı ANOVA analizi yapılarak Tablo 4.41, Tablo 4.42, Tablo 4.43 ve Tablo 4.44'de verilmiştir.

Tablo 4.41: Isıl değer <600 °C ve ≥600 °C şartlarına göre Anova testi sonuçları.

Parametreler		N	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	En Düşük	En Yüksek
Isıl Değer (kcal/m³)	<600	2056	218,2904	566,92127	12,50291	0,00	3072,00
	≥600	2707	2522,0714	1364,49536	26,22575	0,00	5531,00
	Toplam	4763	1527,6197	1580,83138	22,90579	0,00	5531,00
CO	<600	2056	2,6367	7,32770	0,16161	0,00	38,00
	≥600	2707	13,1917	7,23728	0,13910	0,00	35,00
	Toplam	4763	8,6355	8,95953	0,12982	0,00	38,00
CH_4	<600	2056	1,3059	3,32670	0,07337	0,00	17,00
	≥600	2707	14,1300	12,00065	0,23065	0,00	46,00
	Toplam	4763	8,5944	11,26798	0,16327	0,00	46,00
H_2	<600	2056	0,4713	1,50268	0,03314	0,00	15,00
	≥600	2707	25,5039	12,41698	0,23866	0,00	57,00
	Toplam	4763	14,6983	15,56763	0,22557	0,00	57,00
H_2/CO	<600	2056	0,0348	0,15370	0,00339	0,00	2,00
	≥600	2707	3,0297	6,08119	0,11688	0,00	46,00
	Toplam	4763	1,7369	4,81927	0,06983	0,00	46,00

Tablo 4.42: Isıl değer <700 °C ve ≥700 °C şartlarına göre Anova testi sonuçları.

Parametreler		N	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	En Düşük	En Yüksek
Isıl Değer (kcal/m³)	<700	2194	343,5871	788,47251	16,83326	0,00	3553,00
	≥700	2569	2538,8176	1372,04916	27,06996	0,00	5531,00
	Toplam	4763	1527,6197	1580,83138	22,90579	0,00	5531,00
CO	<700	2194	4,4899	9,61257	0,20522	0,00	48,00
	≥700	2569	6,7064	5,38374	0,10622	0,00	33,00
	Toplam	4763	5,6854	7,70740	0,11168	0,00	48,00
CH_4	<700	2194	2,0501	4,65560	0,09939	0,00	22,00
	≥700	2569	14,1833	12,21046	0,24091	0,00	46,00
	Toplam	4763	8,5944	11,26798	0,16327	0,00	46,00
H_2	<700	2194	1,1928	3,73943	0,07983	0,00	29,00
	≥700	2569	26,2324	12,18785	0,24046	0,00	57,00
	Toplam	4763	14,6983	15,56763	0,22557	0,00	57,00
H_2/CO	<700	2194	0,0652	0,21098	0,00450	0,00	2,00
	≥700	2569	3,1646	6,21317	0,12258	0,00	46,00
	Toplam	4763	1,7369	4,81927	0,06983	0,00	46,00

Tablo 4.43: Isıl değer <800 °C ve ≥800 °C şartlarına göre ANOVA testi sonuçları.

Parametreler		N	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	En düşük	En yüksek
Isıl Değer (kcal/m3)	<800	2869	634,1771	1009,41199	18,84531	0,00	3707,00
	≥800	1894	2880,9918	1304,00236	29,96321	125,80	5531,00
	Toplam	4763	1527,6197	1580,83138	22,90579	0,00	5531,00
CO	<800	2194	3,7106	8,62671	0,18417	0,00	38,00
	≥800	2569	12,8416	6,84709	0,13509	0,00	33,00
	Toplam	4763	8,6355	8,95953	0,12982	0,00	38,00
CH_4	<800	2869	3,3409	5,70970	0,10660	0,00	22,00
	≥800	1894	16,5523	12,83802	0,29499	1,00	46,00
	Toplam	4763	8,5944	11,26798	0,16327	0,00	46,00
H_2	<800	2869	5,1785	9,30936	0,17380	0,00	43,00
	≥800	1894	29,1188	11,52993	0,26493	1,00	57,00
	Toplam	4763	14,6983	15,56763	0,22557	0,00	57,00
H_2/CO	<800	2869	0,4875	0,86427	0,01614	0,00	4,50
	≥800	1894	3,6295	7,16545	0,16465	0,00	46,00
	Toplam	4763	1,7369	4,81927	0,06983	0,00	46,00

Tablo 4.44: Isıl değerin 600-900 °C sıcaklık şartlarına göre Anova testi sonuçlarının karşılaştırılması.

Parametreler		N	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	En Düşük	En Yüksek
Isıl Değer (kcal/m³)	<600	2056	218,2904	566,92127	12,50291	0,00	3072,00
	≥600	2707	2522,0714	1364,49536	26,22575	0,00	5531,00
	<700	2194	343,5871	788,47251	16,83326	0,00	3553,00
	≥700	2569	2538,8176	1372,04916	27,06996	0,00	5531,00
	<800	2869	634,1771	1009,41199	18,84531	0,00	3707,00
	≥800	1894	2880,9918	1304,00236	29,96321	125,80	5531,00
	<900	3851	1125,5465	1365,84296	22,00969	0,00	5357,00
	≥900	912	3225,4090	1268,85279	42,01591	221,00	5531,00
CO	<600	2056	2,6367	7,32770	0,16161	0,00	38,00
	≥600	2707	13,1917	7,23728	0,13910	0,00	35,00
	<700	2194	3,7106	8,62671	0,18417	0,00	38,00
	≥700	2569	12,8416	6,84709	0,13509	0,00	33,00
	<800	2869	5,2374	8,53055	0,15926	0,00	38,00
	≥800	1894	13,7830	6,90444	0,15865	0,00	33,00
	<900	3851	7,6323	9,05188	0,14587	0,00	38,00
	≥900	912	12,8717	7,14934	0,23674	0,00	33,00
CH_4	<600	2056	1,3059	3,32670	0,07337	0,00	17,00
	≥600	2707	14,1300	12,00065	0,23065	0,00	46,00
	<700	2194	2,0501	4,65560	0,09939	0,00	22,00
	≥700	2569	14,1833	12,21046	0,24091	0,00	46,00
	<800	2869	3,3409	5,70970	0,10660	0,00	22,00
	≥800	1894	16,5523	12,83802	0,29499	1,00	46,00
	<900	3851	5,9839	9,29710	0,14982	0,00	46,00

Tablo 4.44 (devam):

CH_4	≥900	912	19,6173	12,16351	0,40277	1,00	43,00
H_2	<600	2056	0,4713	1,50268	0,03314	0,00	15,00
	≥600	2707	25,5039	12,41698	0,23866	0,00	57,00
	<700	2194	1,1928	3,73943	0,07983	0,00	29,00
	≥700	2569	26,2324	12,18785	0,24046	0,00	57,00
	<800	2869	5,1785	9,30936	0,17380	0,00	43,00
	≥800	1894	29,1188	11,52993	0,26493	1,00	57,00
	<900	3851	10,6637	13,72815	0,22122	0,00	54,00
	≥900	912	31,7346	10,53528	0,34886	1,00	57,00
H_2/CO	<600	2056	0,0348	0,15370	0,00339	0,00	2,00
	≥600	2707	3,0297	6,08119	0,11688	0,00	46,00
	<700	2194	0,0652	0,21098	0,00450	0,00	2,00
	≥700	2569	3,1646	6,21317	0,12258	0,00	46,00
	<800	2869	0,4875	0,86427	0,01614	0,00	4,50
	≥800	1894	3,6295	7,16545	0,16465	0,00	46,00
	<900	3851	0,8698	1,08429	0,01747	0,00	5,00
	≥900	912	5,3984	9,99177	0,33086	0,00	46,00

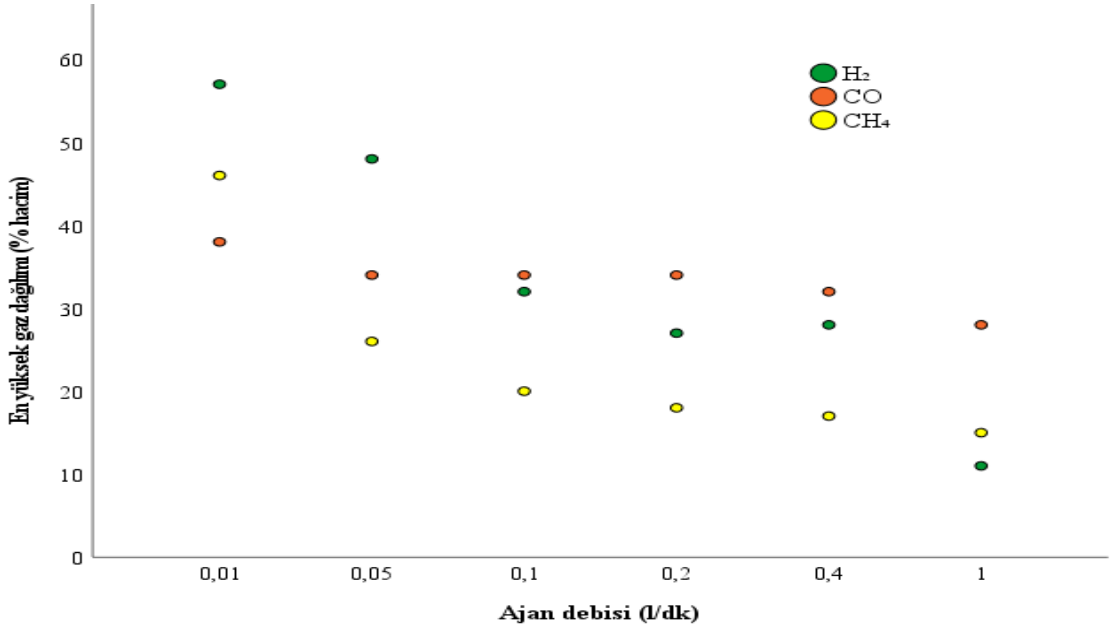
Tablo 4.44'e bakıldığında, sıcaklığın artırılmasıyla CO, CH_4 ve H_2 hacimsel değerlerinin arttığı ve buna bağlı olarak ısıl işlem değerlerinin de arttığı görülmüştür. Deney verilerinin ≥600 °C sıcaklıkta ortalama ısıl değerin 2522 kcal/m³ olduğu, ≥700 °C sıcaklıkta ortalama ısıl değerin 2538 kcal/m³ olduğu, ≥800 °C sıcaklıkta ortalama ısıl değerin 2880 kcal/m³ olduğu ve ≥900 °C olduğu sıcaklıkta ortalama ısıl değerin 3225 kcal/m^3 olduğu belirlenmiştir.

4.4.4. Gazlaştırma Parametrelerinin Etkisi

Bu kısımda deneylere etki eden gazlaştırma parametreleri incelenmiştir. Bu parametreler, ajan debisi, sıcaklık, yakıt miktarı, yakıt türü, ajan türüdür.

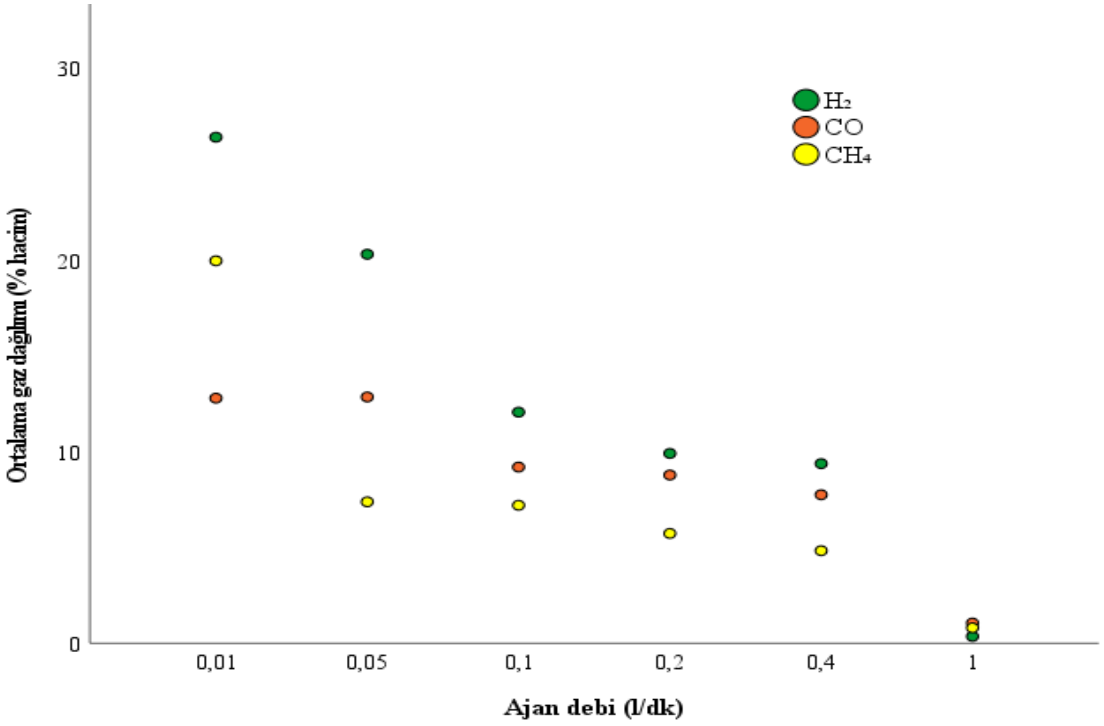
4.4.4.1. Gazlaştırma Ajan Debisinin Etkisi

Çalışmada gazlaştırma ajanı olarak kuru hava ve saf oksijen seçilmiştir. Saf oksijen ajanı ile 0,01 l/dk olarak ve kuru hava ile 0,05, 0,1, 0,2, 0,4 l/dk şeklinde debiler ile çalışılmıştır. Piroliz ön işlemli gazlaştırma denemelerinde ise ajan olarak azot ve kuru hava kullanılmıştır. Azot ajanı 1 l/dk ve kuru hava ajanı 0,05 l/dk olarak seçilmiştir. Gazlaştırma ajan debisinin en yüksek CH_4, CO ve H_2 gazlarının hacimsel yüzdelerine etkisi Şekil 4.53'de ve ortalama CH_4, CO ve H_2 gazlarının hacimsel yüzdelerine etkisi ise Şekil 4.54'de verilmiştir.



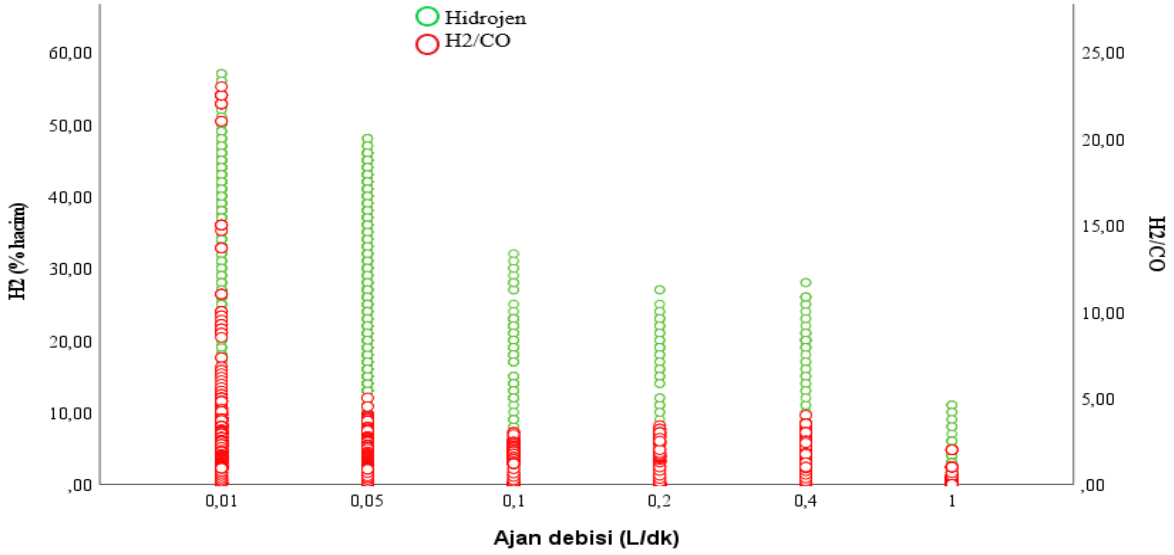
Şekil 4.53: Gazlaştırma ajan debisinin hacimsel olarak en yüksek CH_4, CO ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.53'e bakıldığında, ajan debisinin 0,01-0,05 l/dk aralığında, CH_4, CO ve H_2 gaz hacimlerinin daha yüksek olduğu, 0,01 l/dk debide H_2 gazının hacimsel değerinin %57'ye yükseldiği, CO gazının hacimsel olarak %40'lara yaklaştığı ve CH_4 gazının hacimsel değerinin %50'lere yaklaştığı görülmüştür. Ajan debi artışının hacimsel olarak gaz dağılım miktarını düşürdüğü tespit edilmiştir.



Şekil 4.54: Gazlaştırma ajan debisinin ortalama CH_4, CO ve H_2 gazlarına etkisi.

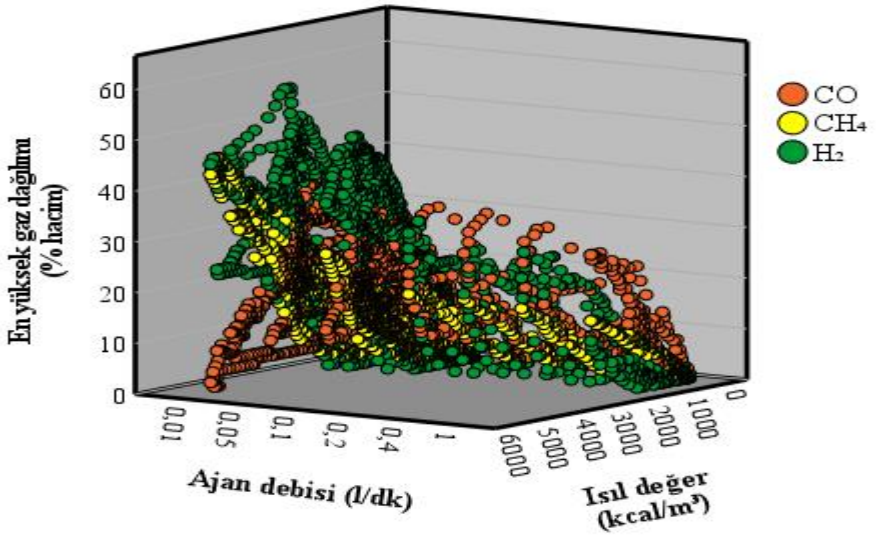
Şekil 4.54'e bakıldığında ortalama CH_4, CO ve H_2 gaz hacim değerlerinin, Şekil 4.53'da verilen en yüksek CH_4, CO ve H_2 gaz hacim değerleri ile benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.55: Ajan debisi değişiminin H_2/CO ve H_2 hacimsel yüzdesine etkisi.

Şekil 4.55'e bakıldığında, ajan debisinin düşük olduğu 0,01 l/dk aralığında, H_2 değeri ve H_2/CO oranının yükseldiği, ajan debisinin artmasıyla H_2 değeri ve H_2/CO oranının azaldığı, 0,01 l/dk

ajan debisinde H_2 gazının hacimsel olarak %60'lara yükseldiği ve H_2/CO oranının 0,01 l/dk'da en yüksek 25 değerine ulaştığı tespit edilmiştir.

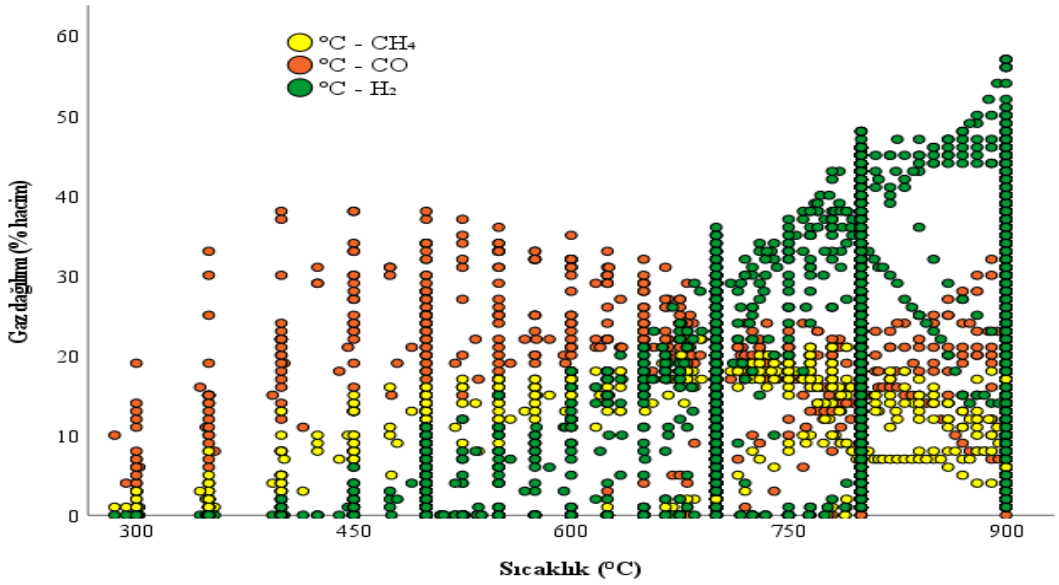


Şekil 4.56: Ajan debi değişiminin gaz dağılımı ve ısıl değer üzerine etkisi.

Şekil 4.56'da görüldüğü gibi, ajan debisinin azalması ile ısıl değerin ve hacimsel gaz dağılımlarının yükseldiği, ajan debi artışında ise ısıl değer ve hacimsel gaz dağılımının azaldığı belirlenmiştir.

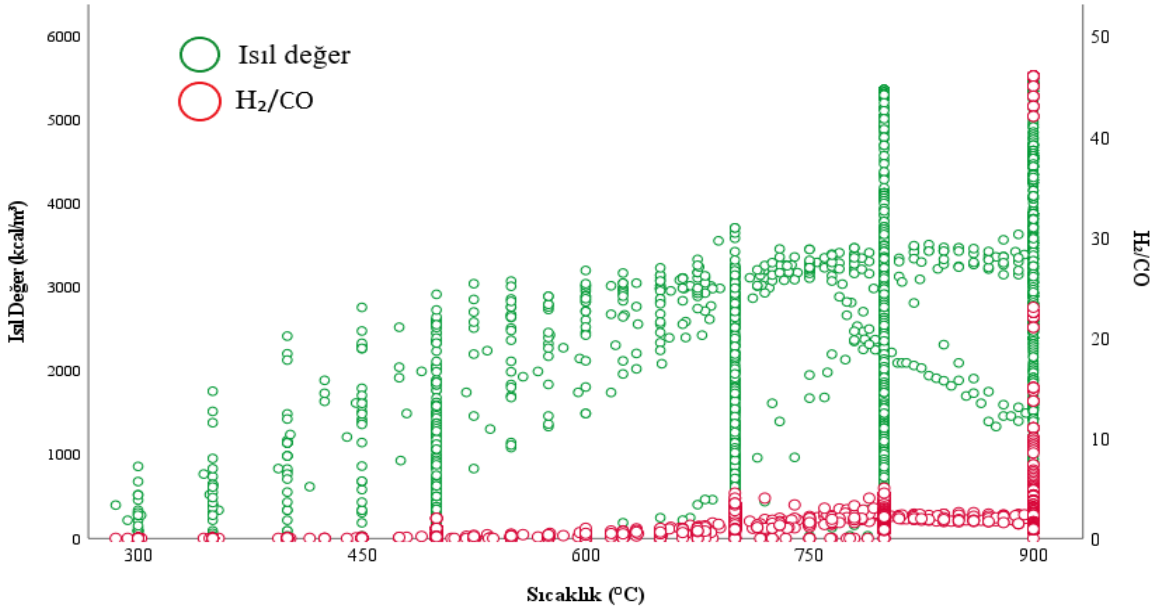
4.4.4.2. Sıcaklığın Etkisi

Bu çalışmada 700-900 °C sıcaklık aralığında çalışılmıştır. Piroliz ön işlemli gazlaştırma denemelerinde ise 500 °C'de piroliz işlem sıcaklığı uygulanmıştır. Sıcaklık değişiminin hacimsel gaz dağılımına etkisi Şekil 4.57'de belirtilmiştir.



Şekil 4.57: Sıcaklık değişiminin CH_4, CO ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.57'ye bakıldığında, sıcaklık artışı ile CH_4, CO ve H_2 gazlarının hacimsel olarak yükseldiği görülmüştür ve bu artış ile H_2 gazının hacimsel olarak %60'lara, CO gazının hacimsel olarak %40'lara ve CH_4 gazının ise hacimsel olarak %50'lere ulaştığı belirlenmiştir.

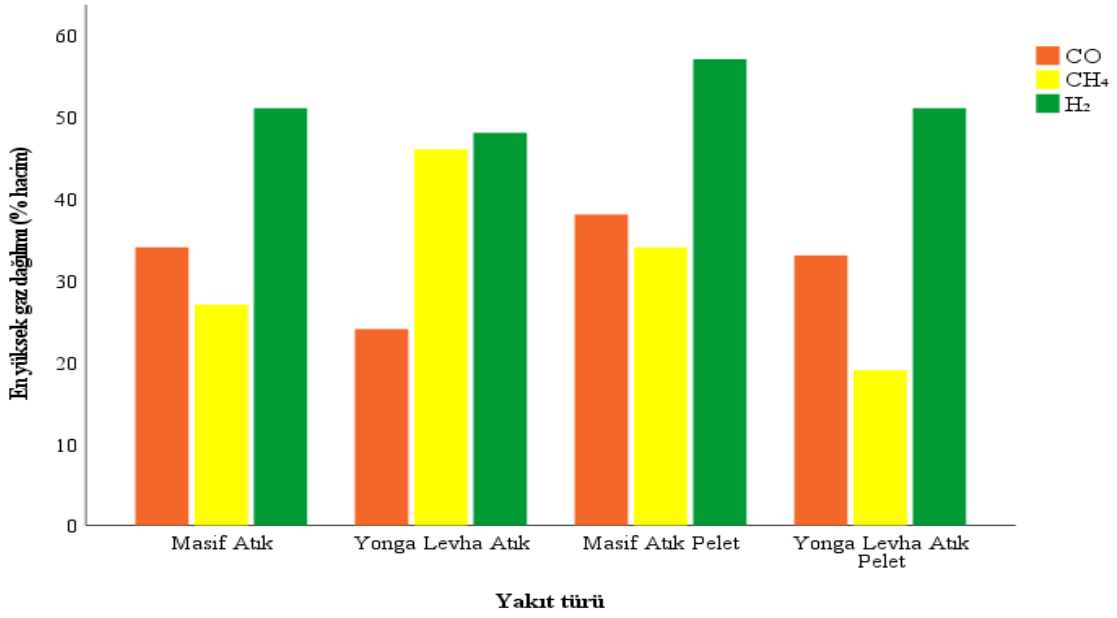


Şekil 4.58: Sıcaklık değişiminin ısıl değer ve H_2/CO oranı üzerine etkisi.

Şekil 4.58'e bakıldığında, sıcaklık artışı ile ısıl değer ve H_2/CO oranının arttığı görülmüştür ve 900°C sıcaklıkta ısıl değerin 5500 kcal/m³'lere ve H_2/CO oranının ise 25'lere ulaştığı belirlenmiştir.

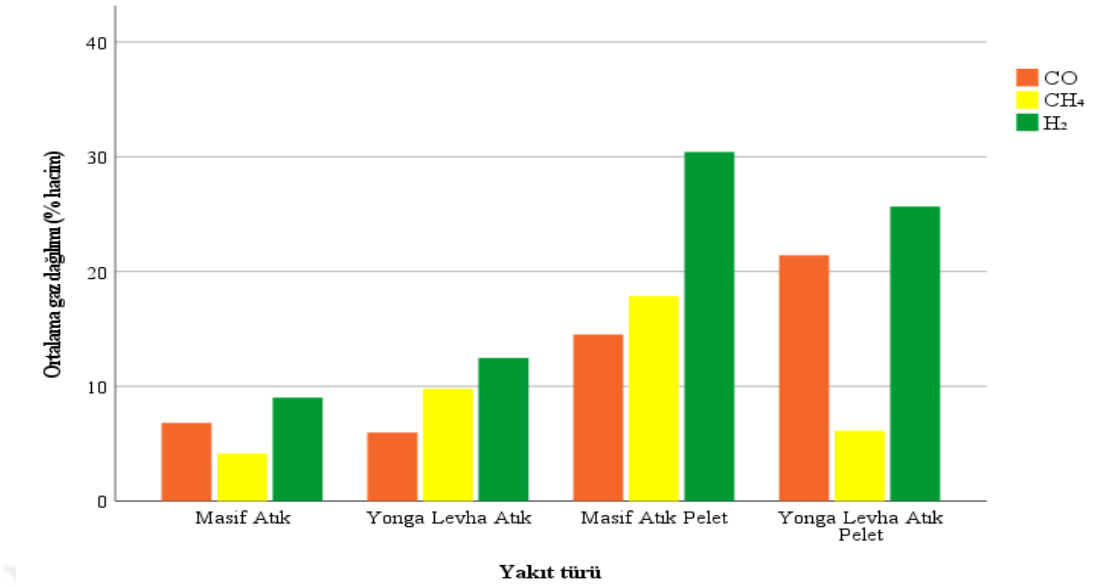
4.4.4.3. Yakıt Türünün Etkisi

Yakıt türü olarak masif atık, yonga levha atığı, masif atık peleti ve yonga levha atığı peleti kullanılmıştır. Yakıt türü değişiminin hacimsel olarak en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına olan etkisi Şekil 4.59'da ve hacimsel olarak ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına olan etkisi Şekil 4.60'de verilmiştir.



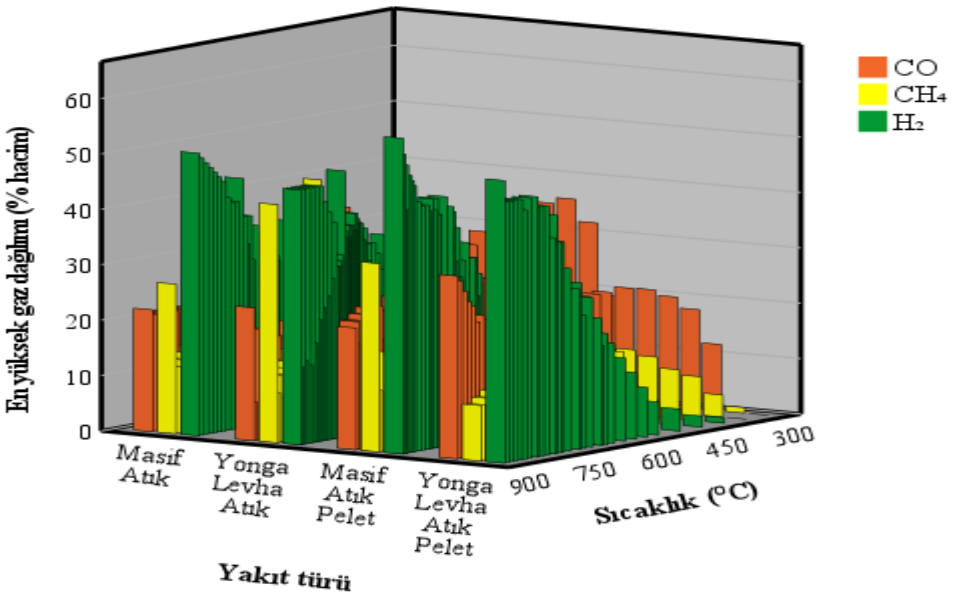
Şekil 4.59: Yakıt türü değişiminin hacimsel olarak en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.59'a bakıldığında, masif atık türünde yaklaşık olarak %50 H_2, %28 CH_4 ve %35 CO olduğu, yonga levha atık türünde yaklaşık olarak %48 H_2, %46 CH_4 ve %26 CO olduğu, masif atık pelet türünde yaklaşık olarak %57 H_2, %35 CH_4 ve %38 CO ve yonga levha atık pelet türünde ise yaklaşık olarak %51 H_2, %20 CH_4 ve %34 CO olduğu tespit edilmiştir.



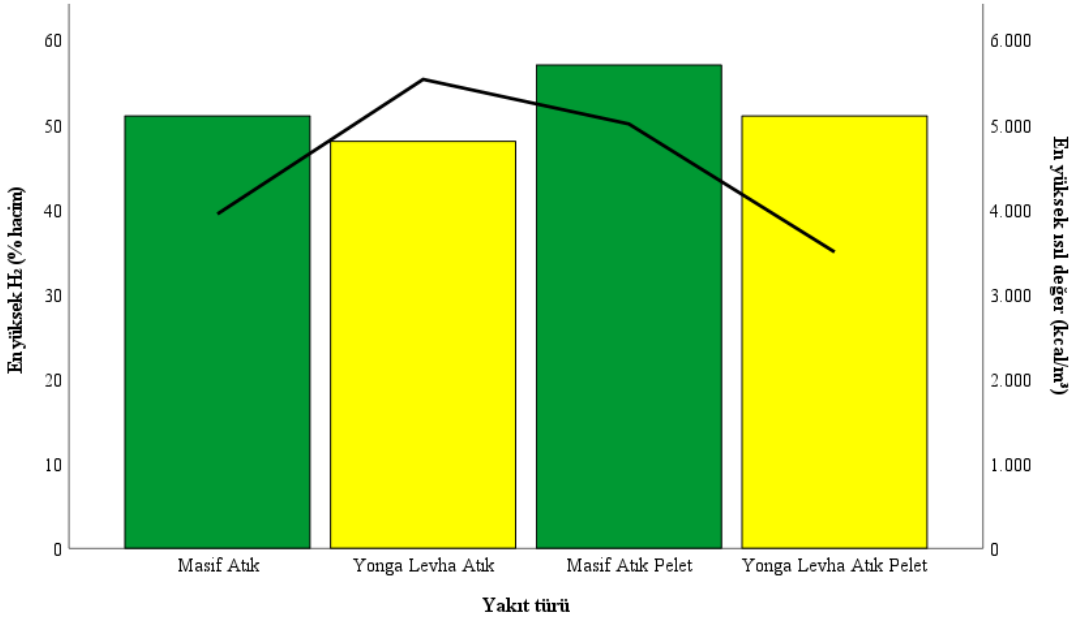
Şekil 4.60: Yakıt türü değişiminin hacimsel olarak ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.60'a bakıldığında, ortalama hacimsel değerlerin masif atık türünde yaklaşık olarak %10 H_2, %4 CH_4 ve %7 CO şeklinde olduğu; yonga levha atık türünde ise yaklaşık olarak %13 H_2, %11 CH_4 ve %6 CO olduğu görülmüştür. Öte yandan ortalama hacimsel değerlerin masif atık pelet türünde yaklaşık olarak %30 H_2, %18 CH_4 ve %14 CO şeklinde; yonga levha atık pelet türünde ise yaklaşık olarak %26 H_2, %6 CH_4 ve %22 CO şeklinde olduğu belirlenmiştir.



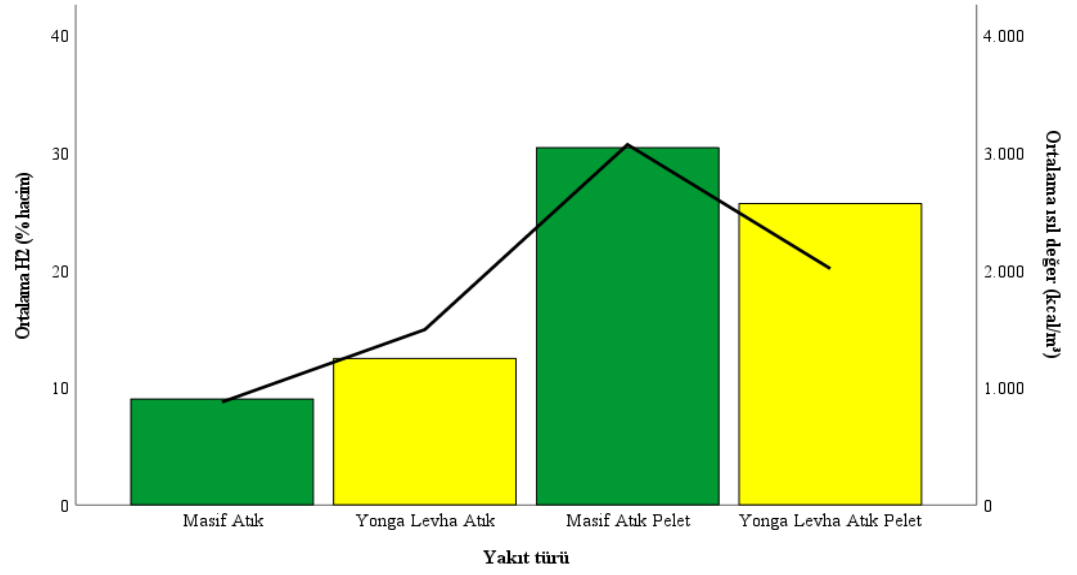
Şekil 4.61: Yakıt türü değişiminin gaz dağılımı ve sıcaklık üzerine etkisi.

Şekil 4.61'e bakıldığında, sıcaklık artışı ile beraber yakıt türlerindeki hacimsel gaz dağılımlarının artış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.62: Yakıt türünün hacimsel olarak en yüksek H_2 gazına ve en yüksek ısıl değeri üzerine etkisi.

Şekil 4.62 incelendiğinde, masif atığın hacimsel olarak en yüksek %50 H_2 ve 5100 kcal/m^3'lere, yonga levha atığın %48 H_2 ve 4800 kcal/m^3'lere, masif pelet atığın %57 H_2 ve 5750 kcal/m^3'lere ve yonga levha pelet atığın ise %51 H_2 ve 5150 kcal/m^3'lere ulaştığı gözlenmiştir.

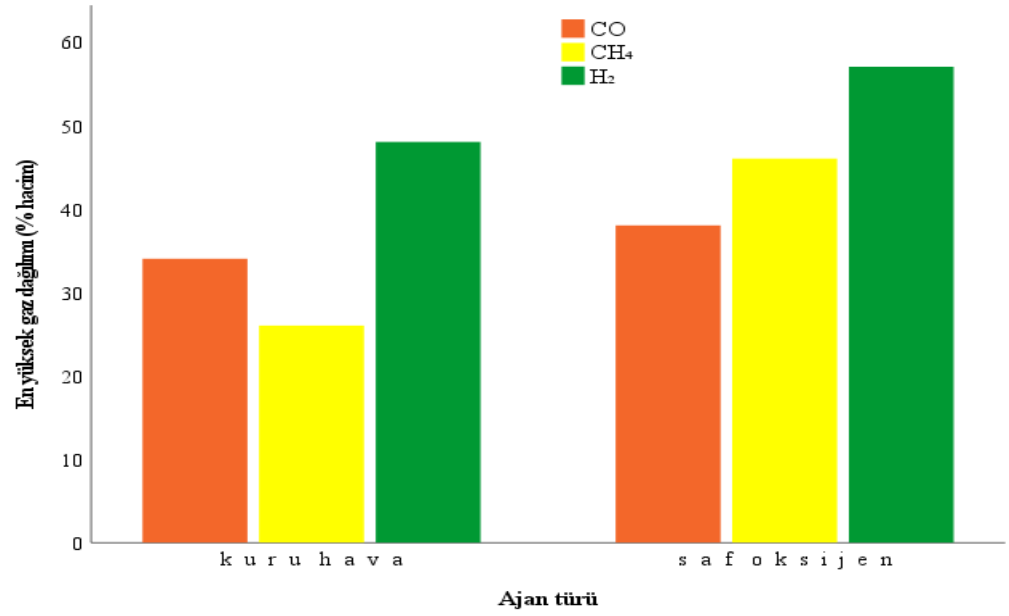


Şekil 4.63: Yakıt türünün hacimsel olarak ortalama H_2 gazına ve ortalama ısıl değeri üzerine etkisi.

Şekil 4.63 incelendiğinde, masif atığın ortalama hacimsel değeri olarak %8 H_2 ve 850 kcal/m³'lere, yonga levha atığın %15 H_2 ve 1600 kcal/m³'lere, masif pelet atığın %32 H_2 ve 3250 kcal/m³'lere ve yonga levha pelet atığın ise %27 H_2 ve 2750 kcal/m³'e ulaştığı gözlenmiştir.

4.4.4.4. Farklı Gazlaştırma Ajan Türlerinin Proses Üzerine Etkisi

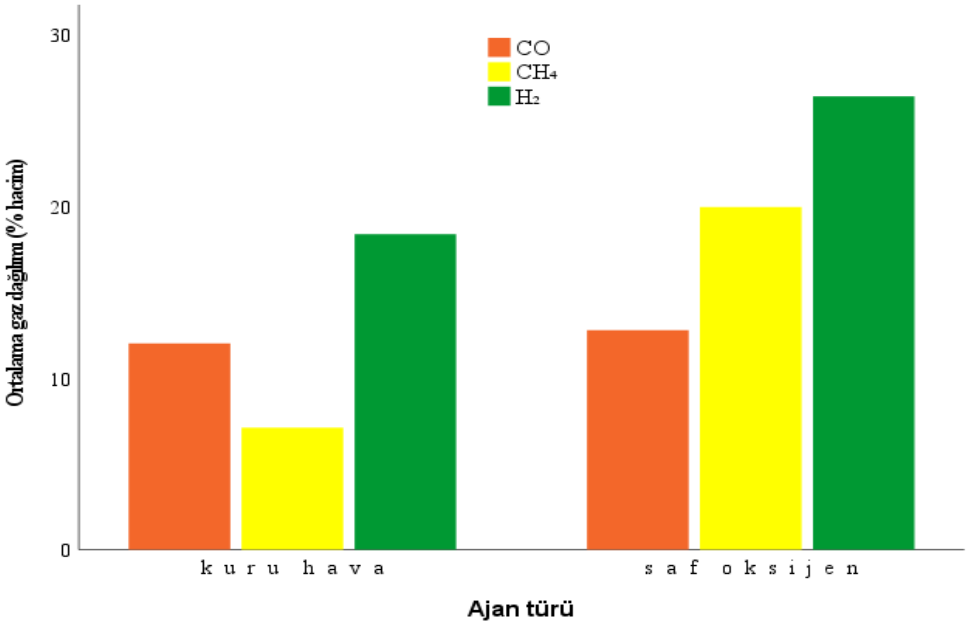
Deneylerde gazlaştırma ajanı olarak kuru hava ve saf oksijen kullanılmıştır. Ajan türünün hacimsel olarak en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi Şekil 4.64'de verilmiştir.



Şekil 4.64: Gazlaştırma ajan türünün en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.64'de gazlaştırma ajanı olarak saf oksijen kullanıldığında, CO, CH_4 ve H_2 gaz dağılımının kuru hava ajanından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Gazlaştırma ajan türünün hacimsel olarak ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi Şekil 4.65'de verilmiştir.



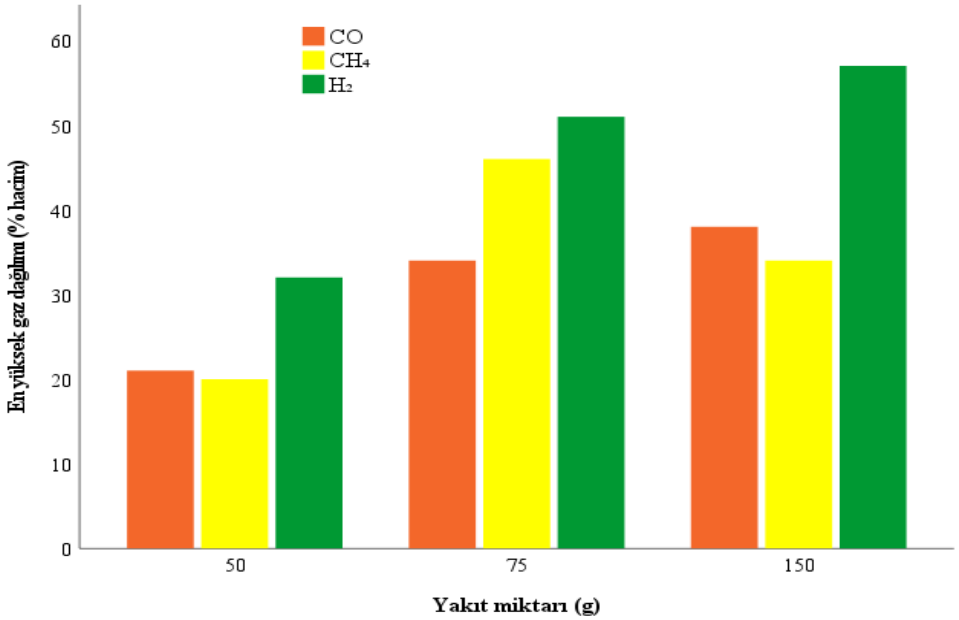
Şekil 4.65: Gazlaştırma ajan türünün ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.65 incelendiğinde, ortalama gaz dağılımlarının saf oksijen ajanı ile hacimsel olarak %26 H_2 gazına, %20 CH_4 gazına ve %13 CO gazına ulaştığı tespit edilmiştir.

4.4.4.5. Örnek Miktarının Etkisi

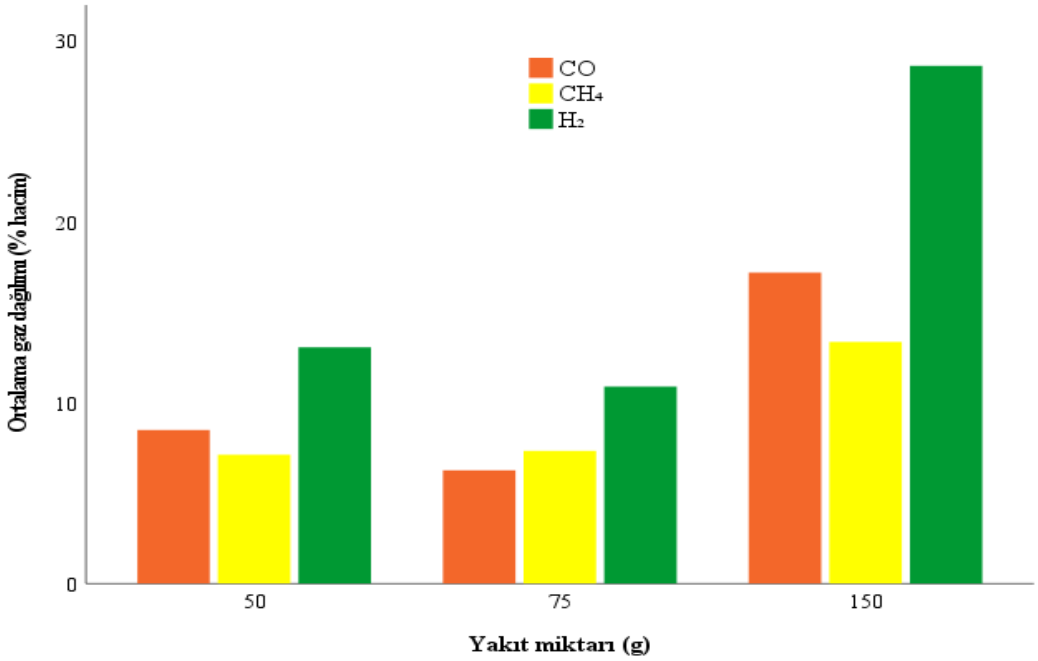
Çalışma sırasında 50, 100 ve 150 g miktarlarda örnekler ile çalışılmıştır. Optimum parametreleri belirlenen örnekler üzerindeki gazlaştırma denemelerinde 150 g pelet örnekleri kullanılmıştır.

Yakıt miktarının hacimsel olarak en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi Şekil 4.66'de verilmiştir.



Şekil 4.66: Örnek miktarının hacimsel olarak en yüksek CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.66'ya bakıldığında, örnek miktarı arttıkça hacimsel olarak CO, CH_4 ve H_2 gazlarının da arttığı görülmüştür. Gazlaştırma deneylerinde örnek miktarı olarak 150 g örnek kullanıldığında, hacimsel olarak en yüksek %57 H_2, %32 CH_4 ve %37 CO gazlarının oluştuğu belirlenmiştir.



Şekil 4.67: Örnek miktarının hacimsel olarak ortalama CO, CH_4 ve H_2 gazlarına etkisi.

Şekil 4.67'ye bakıldığında, örnek miktarının 75 g olarak kullanılması durumunda elde edilen CO, CH_4, H_2 gazlarının beklendiği şekilde artış göstermediği fakat 150 g örnek kullanılması

durumunda ortalama gaz dağılımının beklendiği şekilde artış gösterdiği tespit edilmiştir. Gazlaştırma deneyleri sonucunda yakıt olarak 150 g örnek kullanıldığında, hacimsel olarak ortalama %28 H_2, %14 CH_4 ve %18 CO gazlarının oluştuğu belirlenmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, ahşap mobilya atıkları termokimyasal ısıl işlemler olan ön işlemli piroliz ve gazlaştırma süreçleri ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, iki farklı hammaddenin karakterizasyonları ortaya çıkarılmış, ön işlemli piroliz ve gazlaştırma için uygun parametreler belirlenmiştir.

Tablo 5.1: Kimyasal analiz ve ısıl değer sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması.

Kimyasal Analiz ve Isıl Değer Sonuçları						
Örnek	**Nem Miktarı (%)**	**Uçucu Organik Madde* (%)**	**Sabit Karbon Miktarı (%)**	**Kül Miktarı (%)**	**Isıl Değer (MJ/kg)**	**Kaynak**
Yonga Levha	4,1	64,4	27,5	4	17,72	(Foong vd., 2021)
Yonga Levha	8,1	71,2	18,6	2,1	16,9	(Park vd., 2011).
Yonga Levha	-	70,4	27,7	1,8	17,50	(Han vd., 2015).
Orta yoğunluklu lif levha	-	71,4	27,3	1,3	14,96	(Han vd., 2015).
Çam talaşı	4,54	82,18	16,13	1,69	16,91	(Hu vd., 2016).
Çam talaşı	1,4	81,52	16,65	0,43	19,38	(Alam vd., 2020).
Masif Atık	-	81,7	17	1,3	18,7	(Vonk vd., 2019).
Kayın odunu	-	74	24,6	0,4	19,20	(Nhuchhen ve Salam, 2012).
Kavak odunu	-	82,32	16,35	1,33	19,38	(Nhuchhen ve Salam, 2012).
Ladin odunu	-	70,2	28,3	1,5	20,10	(Nhuchhen ve Salam, 2012).
Odun kabuğu	-	66,6	31,8	1,6	20,50	(Nhuchhen ve Salam, 2012).
Masif Atık	**7,32**	**78,82**	**13,49**	**0,37**	**18,64**	**Tez örnekleri**
Yonga Levha	**7,57**	**71,29**	**18,8**	**2,34**	**17,65**	**Tez örnekleri**

*900°C'de inert ortamda termal bozunma sonucu oluşan uçucu organik madde miktarını temsil etmektedir.

Tablo 5.1'de kimyasal analiz ve ısıl değer sonuçlarının literatür ile karşılaştırılması verilmiştir.

Foong ve diğ, (2021) yapmış oldukları çalışma ile yonga levha örneğini incelemişlerdir ve bu örnek üzerinde %4,1 nem miktarı, %64,4 uçucu madde miktarı, %27,5 sabit karbon oranı, %4 kül miktarı ve 17,72 MJ/kg ısıl değeri sonuçlarına ulaşmışlardır (Foong vd., 2021).

Park ve diğ. (2011), yonga levha örneği üzerinde yapmış oldukları deneyler sonucunda, %8,1 nem miktarı, %71,2 uçucu organik madde, %18,6 sabit karbon, %2,1 kül miktarı ve 16,9 MJ/kg ısıl değer sonuçlarını elde etmişlerdir (Park vd., 2011).

Han ve diğ. (2015), orta yoğunluklu lif levha ve yonga levha örnekleri üzerinde termokimyasal işlemler yapmışlardır ve bu örnekler üzerinde yapmış oldukları kimyasal analizler sonucunda, %70,4 uçucu organik madde orta yoğunluklu lif levha örneğinde, %71,4 uçucu organik madde miktarı yonga levha örneğinde ulaşmışlardır. Kül miktarları oranlarına bakıldığında, yonga levha örneğinde %1,8 ve orta yoğunluklu lif levha örneğinde ise %1,3 olarak belirlenmiştir. Sabit karbon miktarları incelendiğinde, yonga levha örneğinde %27,7 ve orta yoğunluklu lif levha örneğinde ise %27,3 olduğunu tespit etmişlerdir. Isıl değerler sonuçlarına bakıldığında, yonga levha örneğinde 17,50 MJ/kg, orta yoğunluklu lif levha örneğinde ise 14,96 MJ/kg olarak tespit etmişlerdir (Han vd., 2015).

Hu ve diğ. (2016), çam talaşı üzerinde yapmış oldukları kimyasal analizler sonucunda, nem miktarını %4,54, uçucu organik madde miktarını %82,18, sabit karbon oranını %16,13, kül miktarını %1,69 ve ısıl değeri ise 16,91 MJ/kg olarak belirlemişlerdir (Hu vd., 2016).

Tanvir Alam ve diğ. (2020), çam talaşı örneği üzerinde yapmış oldukları deneyler sonucunda, %1,4 nem miktarı, %81,52 uçucu organik madde, %16,65 sabit karbon, %0,43 kül miktarı ve 19,38 MJ/kg ısıl değer sonuçlarını elde etmişlerdir (Tanvir Alam vd., 2020).

Vonk ve diğ. (2019), masif atık örneği üzerinde kimyasal analizler yapmışlardır ve bu örnek üzerinde, uçucu organik madde miktarını %81,7, sabit karbon oranını %17, kül miktarını %1,3 ve ısıl değerini ise 18,7 MJ/kg olarak tespit etmişlerdir (Vonk vd., 2019).

Nhuchhen ve Salam (2012), bazı ağaç türleri arasında kimyasal analizlerin karşılaştırmasını yaparak incelemişlerdir (Nhuchhen ve Abdul Salam, 2012). Kayın odunu kimyasal analizlerine bakıldığında, %66,6 uçucu organik madde miktarı, %31,8 sabit karbon oranı, %0,4 kül miktarı ve 19,20 MJ/kg ısıl değer sonuçlarına ulaşmışlardır (Nhuchhen ve Abdul Salam, 2012). Kavak odunu kimyasal analizleri incelendiğinde, uçucu organik madde miktarının %82,32, sabit

karbon oranının %16,35, kül miktarının %1,33 ve ısıl değerin ise 19,38 MJ/kg olduğunu tespit etmişlerdir (Nhuchhen ve Abdul Salam, 2012). Ladin odunu kimyasal analizlerine bakıldığında, %74 uçucu organik madde miktarı, %24,6 sabit karbon oranı, %1,5 kül miktarı ve 20,10 MJ/kg ısıl değer sonuçlarına ulaşmışlardır (Nhuchhen ve Abdul Salam, 2012). Odun kabuğu kimyasal analizleri incelendiğinde, uçucu organik madde miktarının %82,32, sabit karbon oranının %16,35, kül miktarının %1,6 ve ısıl değerin ise 20,50 MJ/kg olduğunu belirlemişlerdir (Nhuchhen ve Abdul Salam, 2012).

Tez çalışmasındaki örneklerden masif atık örneği kimyasal analizlerine bakıldığında, nem miktarının %7,32, uçucu organik madde miktarının %78,82, sabit karbon oranının %13,49, kül miktarının %0,37 ve ısıl değerin ise 18,64 MJ/kg olarak belirlenmiştir. Yonga levha atık örneği kimyasal analizleri incelendiğinde, nem miktarının %7,57, uçucu organik madde miktarının %71,29, sabit karbon oranının %18,8, kül miktarının %2,34 ve ısıl değerin ise 17,65 MJ/kg olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, literatür çalışmaları ile kıyaslandığında yakın ve eşdeğer sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir. Yonga levha örneğinde kullanılan hammadde türü, tutkal miktarı ve kaplama çeşitlerinden ötürü kimyasal analizlerde küçük farklılıkların olduğu söylenebilir. Masif atık örneğinde ise hammadde türünün kimyasal yapısından dolayı kimyasal analizler arasında farklılıkların olduğu ifade edilebilir.

Foong ve diğ. (2021) kontrplak, yonga levha ve orta yoğunluklu lif levha örnekleri üzerinde 20 °C/dk artış hızında inert ortamda termogravimetrik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yonga levha örneğinde 250-550°C sıcaklık aralığında, kontrplak ve orta yoğunluklu lif levha örneğinden daha az ağırlık kaybı meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Buharlaşma aşaması olarak bilinen 170-600 °C sıcaklık aralığında, örnekler üzerinde ağılıkça sırasıyla %64,4 yonga levha, %67,8 orta yoğunluklu lif levha örneği ve %69,1 kontrplak olmak üzere ağırlık kaybının meydana geldiğini belirlemişlerdir (Foong vd., 2021).

Foong ve diğ. (2021), hemiselülozun termal kararlılığının, yapısı itibariyle selüloz ve ligninden çok daha düşük olduğunu ve 170-310 °C sıcaklıkta ayrıştığını belirtmişlerdir. Selülozun yapı itibariyle lineer ve dallanmamış bir polimer olması nedeniyle hemiselülozlardan daha yüksek termal kararlılık gösterdiğini ve 280-400 °C sıcaklıkta termal bozunmaya uğradığını ifade etmişlerdir (Foong vd., 2021).

Zhan ve diğ. (2019) üre formaldehit tutkallarının 177-457 °C sıcaklık aralığında termal bozunmaya uğradıklarını belirtmişlerdir (Zhan vd., 2019).

Xu ve diğ. (2021)'nin yapmış oldukları çalışmada, hemiselülozun 220- 315 °C sıcaklıkta bozunduğunu, selülozun 300-400°C sıcaklıkta bozunduğunu ve ligninin ise 200-500 °C sıcaklıkta bozunduğunu belirtmişlerdir (Xu vd., 2021). Lignin türevli aromatik bileşiklerin sıcaklık artışıyla 900°C sıcaklıklara kadar bozunmaya devam edebileceğini de ifade etmişlerdir (Xu vd., 2021). Yapılan bu çalışma ile üre formaldehit tutkallarının, odun ve ahşap mobilya atıklarının inert ortamda termogravimetrik analizlerini incelemişlerdir (Xu vd., 2021). Farklı sıcaklık hızları sonucunda ortalama üre formaldehit tutkallarının 194-348 °C aralığında bozunma gösterdiğini, üre formaldehit bulunan ahşap malzemelerde üre formaldehitin daha erken termal bozunmaya uğradığını ve TGA sonuçlarının odun ve ahşap mobilya atıkları ile yakın sonuçlar gösterdiklerini ifade etmişlerdir(Xu vd., 2021).

Yapılmış olan bu çalışmadaki TGA sonuçları literatür ile kıyaslandığında, odun ve ahşap mobilya atıkları gibi lignoselülozik malzemelerin TGA eğrileri ile benzer sonuçlar verdiği ve yapı içerisindeki polimer yapıların literatür ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir.

Saito ve Arima (2002) biochar üzerine 2000 °C ve 2500 °C sıcaklıkta ısıl işlem uygulamışlardır (Saito ve Arima, 2002). TEM analizlerine baktıklarında, ısıl işlemin odun hammaddesi üzerinde anatomik özelliklerini görsel olarak değiştirmediğini, iskelet yapının korunduğunu belirtmişlerdir (Saito ve Arima, 2002).

Cetin ve diğ. (2005) yapmış oldukları piroliz çalışması ile çam odunu üzerinde ısıl işlemlerin malzemenin morfolojik yapısını nasıl değiştirdiğini incelemişlerdir (Cetin vd., 2005). Düşük ısıtma hızında, malzemenin doğal gözenekleri uçucu bileşiklerin salınımına izin verdiği için malzemenin morfolojik yapısının değişmediğini tespit etmişlerdir (Cetin vd., 2005). Yüksek sıcaklık ve yüksek bar basınçta odun malzemenin hücre duvarlarının inceldiğini ve gözenek yapısının genişlediğini ifade etmişlerdir (Cetin vd., 2005).

Soni ve Karmee (2020) yapmış oldukları çalışmada TEM analizlerini incelediklerinde, termokimyasal işlem sonucu uçucu madde salınımının etkisiyle malzeme gözeneklerinin genişlediğini ve çok sayıda arttığını tespit etmişlerdir (Soni ve Karmee, 2020).

Muvhiiwa ve diğ. (2019) yapmış oldukları çalışmada, odun peletlerinin piroliz ve gazlaştırılmasından elde edilen biocharları incelemişlerdir (Muvhiiwa vd., 2019). 400-600 °C aralığındaki sıcaklıkta piroliz uygulanan odun peletlerinin biocharı incelendiğinde, gözeneklerin birbirine benzemeyen yapılar gösterdiği belirlenmiştir (Muvhiiwa vd., 2019). 700°C sıcaklıkta farklı oksijen akışında işlem görmüş biocharları incelediklerinde oksijen

akışının gözenek miktarını artırdığını tespit etmişlerdir (Muvhiiwa vd., 2019). 700-1000 °C sıcaklık aralığında oluşan biocharlar incelendiğinde ise sıcaklık artışıyla gözenek yapısının genişlediğini ve yüzey alanının arttığını belirtmişlerdir (Muvhiiwa vd., 2019). Bu biocharlar üzerinde BET analizleri yaparak yüzey genişliği ve gözenek çaplarını da incelemişlerdir (Muvhiiwa vd., 2019).

Bu çalışmadaki biochar örnekleri, literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırıldığında paralel sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir.

Tablo 5.2'de deneyler sonucunda elde edilen en yüksek sonuçların literatür çalışmaları ile karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 5.2: Gazlaştırma verilerinin literatür ile karşılaştırılması.

Örnek	**H_2 (%)**	**CO (%)**	**CH_4 (%)**	**H_2/CO**	**Sıcaklık (°C)**	**Ajan türü**	**Reaktör tipi**	**Isıl Değer (MJ/kg)**	**Kaynak**
Çam odunu	26	28	9	1,38	800	Su buharı	Akışkan yataklı	16,91	(Hu ve diğ. 2016)
Odun peleti	27	34	4	1,05	1046	Hava	Aşağı akışlı, sabit yataklı	18,69	(Aydin ve diğ. 2019)
Çam kozalağı	24	31	4	1,1	1046	Hava	Aşağı akışlı, sabit yataklı	16,25	(Aydin ve diğ. 2019)
Odun peleti	21	25	5	-	790	Buhar	Akışkan yataklı	-	(Rasmussen ve Aryal, 2020)
Çam odunu	37	36	12	1,2	900	Buhar	Katalitik reaktör	-	(Hu ve diğ. 2021).
Çam odunu	37	42	12	1,54	850	Su buharı	Sabit yataklı	18,60	(Liu ve diğ. 2019)
Odun talaşı	10	22	3	-	-	Hava	Aşağı akışlı sabit yataklı	17,53	(Sulaiman ve diğ. 2018).
Masif Atık	**51**	**33**	**26**	**4,11**	**900**	**Saf oksijen**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**18,64**	**Tez Örnekleri**
Yonga Levha	**46**	**24**	**42**	**2,56**	**900**	**Saf oksijen**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**17,65**	**Tez Örnekleri**
Masif Atık Pelet	**57**	**38**	**34**	**4,27**	**900**	**Saf oksijen**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**18,64**	**Tez Örnekleri**
Yonga Levha Pelet	**51**	**33**	**19**	**2,14**	**900**	**Saf oksijen**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**17,65**	**Tez Örnekleri**

Tablo 5.2 (devam):

Masif Atık	**41**	**33**	**18**	**2,41**	**900**	**Kuru Hava**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**18,64**	**Tez Örnekleri**
Yonga Levha	**38**	**21**	**20**	**2,92**	**900**	**Kuru Hava**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**17,65**	**Tez Örnekleri**
Masif Atık Pelet	**47**	**30**	**26**	**3,89**	**900**	**Kuru Hava**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**18,64**	**Tez Örnekleri**
Yonga Levha Pelet	**45**	**32**	**19**	**2,16**	**900**	**Kuru Hava**	**Yukarı akışlı, sabit yataklı**	**17,65**	**Tez Örnekleri**

Hu ve diğ. (2016) yapmış oldukları çalışmada çam odunu örneğine gazlaştırma işlemi yapmışlardır. Deney parametreleri olarak 800 °C sıcaklıkta ve su buharı ajanı ile çalışmışlardır (Hu vd., 2016). Gazlaştırma işlemini akışkan yataklı reaktörde gerçekleştirmişlerdir (Hu vd., 2016). Deney sonucunda hacimsel olarak %26 H_2 gazını, hacimsel olarak %28 CO gazını ve hacimsel olarak %9 CH_4 gazını elde etmişlerdir (Hu vd., 2016). Deney sırasında en yüksek H_2/CO oranını 1,38 olarak tespit etmişlerdir(Hu vd., 2016).

Aydin ve diğ. (2019), aşağı akışlı sabit yataklı reaktörde odun peletinin ve çam kozalağının gazlaştırma işlemini gerçekleştirmişlerdir (Aydin vd., 2019). 1046 °C sıcaklıkta ve hava ajanı ile işlem yapmışlardır (Aydin vd., 2019). Odun peletlerinin gaz dağılımı incelendiğinde, hacimsel olarak %27 H_2 gazı, hacimsel olarak %34 CO gazı ve hacimsel olarak %4 CH_4 gazının oluştuğunu tespit etmişlerdir (Aydin vd., 2019). Çam kozalaklarına bakıldığında ise hacimsel olarak %24 H_2 gazı, hacimsel olarak %31 CO gazı ve hacimsel olarak %4 CH_4 gazı elde etmişlerdir (Aydin vd., 2019). H_2/CO oranı incelendiğinde, bu oranı odun peletinde 1,05, çam kozalağında ise 1,1 olarak bulduklarını belirtmişlerdir (Aydin vd., 2019).

Rasmussen ve Aryal (2020) yapmış oldukları çalışmada akışkan yataklı reaktörde buhar işlemi ile gazlaştırma gerçekleştirmişlerdir (Rasmussen ve Aryal, 2020). Bu işlemi 790°C sıcaklıkta yapmışlardır (Rasmussen ve Aryal, 2020). Odun peleti sentez gaz dağılımına bakıldığında, hacimsel olarak %21 H_2 gazının, hacimsel olarak %25 CO gazının ve hacimsel olarak %5 CH_4 gazının oluşturduğunu ifade etmişlerdir (Rasmussen ve Aryal, 2020).

Hu ve diğ. (2021), katalitik reaktörde çam odunu örneğine 900°C sıcaklıkta gazlaştırma işlemi uygulamışlardır (Hu vd., 2021). Deney sırasında ajan olarak buhar kullanmışlardır (Hu vd., 2021). Sentez gaz dağılımı incelendiğinde, hacimsel olarak %37 H_2 gazı, hacimsel olarak %36

CO gazı ve hacimsel olarak %12 CH_4 gazı elde etmişlerdir. H_2/CO oranını ise 1,2 olarak bulmuşlardır (Hu vd., 2021).

Liu ve diğ. (2019), çam odunu örneğine 850 °C sıcaklıkta ve sabit yataklı reaktörde gazlaştırma işlemi gerçekleştirmişlerdir (Liu vd., 2019). Deney sırasında ajan olarak su buharı kullanmışlardır (Liu vd., 2019). Sentez gaz dağılımı incelendiğinde, hacimsel olarak %37 H_2 gazı, hacimsel olarak %42 CO gazı ve hacimsel olarak %12 CH_4 gazının oluşturduğunu belirtmişlerdir. H_2/CO oranını ise 1,54 olarak tespit etmişlerdir (Liu vd., 2019).

Sulaiman ve diğ. (2018), aşağı akışlı sabit yataklı reaktörde odun talaşı örneğine gazlaştırma işlemi yapmışlardır (Sulaiman vd., 2018). Ajan olarak hava kullanmışlardır. Sentez gaz dağılımı incelendiğinde, hacimsel olarak %10 H_2 gazı, hacimsel olarak %22 CO gazı ve hacimsel olarak %3 CH_4 gazı elde etmişlerdir (Sulaiman vd., 2018).

Bu tez çalışmasında masif atık, yonga levha atık, masif pelet atığı ve yonga levha pelet atık örneklerine yukarı akışlı reaktörde 900 °C sıcaklıkta gazlaştırma işlemi yapılmıştır. Bu kısımda deney sırasında ajan olarak saf oksijen kullanılan örnekler değerlendirilmiştir. Masif atık örneğinin sentez gaz dağılımına bakıldığında, hacimsel olarak %51 H_2 gazı, hacimsel olarak %33 CO gazı ve hacimsel olarak %26 CH_4 gazı tespit edilmiştir. H_2/CO oranı ise 4,11 olarak bulunmuştur. Yonga levha atık örneğinin sentez gaz dağılımına bakıldığında, hacimsel olarak %46 H_2 gazı, hacimsel olarak %24 CO gazı ve hacimsel olarak %42 CH_4 gazı elde edilmiştir. H_2/CO oranı ise 2,56 olarak bulunmuştur. Masif pelet atık örneğinin sentez gaz dağılımına bakıldığında, hacimsel olarak %57 H_2 gazı, hacimsel olarak %38 CO gazı ve hacimsel olarak %34 CH_4 gazı tespit edilmiştir. H_2/CO oranı ise 4,27 olarak bulunmuştur. Yonga levha pelet atık örneğinin sentez gaz dağılımı incelendiğinde, hacimsel olarak %51 H_2 gazı, hacimsel olarak %33 CO gazı ve hacimsel olarak %19 CH_4 gazı elde edilmiştir. H_2/CO oranı ise 2,14 olarak bulunmuştur.

Bu tez çalışmasında masif atık, yonga levha atık, masif pelet atığı ve yonga levha pelet atık örneklerine yukarı akışlı reaktörde 900 °C sıcaklıkta gazlaştırma işlemi yapılmıştır. Bu kısımda deney sırasında ajan olarak kuru hava kullanılan örnekler değerlendirilmiştir. Masif atık örneğinin sentez gaz dağılımına bakıldığında, hacimsel olarak %41 H_2 gazı, hacimsel olarak %33 CO gazı ve hacimsel olarak %18 CH_4 gazı tespit edilmiştir. H_2/CO oranı ise 2,41 olarak bulunmuştur. Yonga levha atık örneğinin sentez gaz dağılımına bakıldığında, hacimsel olarak %38 H_2 gazı, hacimsel olarak %21 CO gazı ve hacimsel olarak %20 CH_4 gazı elde edilmiştir.

H_2/CO oranı ise 2,92 olarak bulunmuştur. Masif pelet atık örneğinin sentez gaz dağılımına bakıldığında, hacimsel olarak %47 H_2 gazı, hacimsel olarak %30 CO gazı ve hacimsel olarak %26 CH_4 gazı tespit edilmiştir. H_2/CO oranı ise 3,89 olarak bulunmuştur. Yonga levha pelet atık örneğinin sentez gaz dağılımı incelendiğinde, hacimsel olarak %45 H_2 gazı, hacimsel olarak %32 CO gazı ve hacimsel olarak %19 CH_4 gazı elde edilmiştir. H_2/CO oranı ise 2,16 olarak bulunmuştur.

Ahşap mobilya atıklarına uygulanan termokimyasal işlemler sonucunda elde edilen bulgular değerlendirildiğinde nihai deney sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

- 0,01 debili saf oksijen ajanı kullanılan deneylerde en yüksek gaz dağılımı ve ısıl değer sonuçlarına ulaşılmıştır. Kuru hava ajanı ile yapılan deneylerde 0,05 debinin uygun olduğu ve 0,01 debili saf oksijen ajanı ile yapılan deney sonuçlarına yakın değerlerin elde edildiği tespit edilmiştir.
- 900 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneyler ile en yüksek sentez gaz dağılımı ve ısıl değer sonuçlarına ulaşılmıştır. Sıcaklık ile birlikte H_2/CO oranı da artmıştır.
- Masif atık örneği deneyleri sonucunda en yüksek sentez gaz ve ısıl değer sonuçlarına 900°C sıcaklık ve 0,01 debili saf oksijen şartlarında ulaşılmıştır. Bu koşullarda hidrojen gazının hacimce %51'lere ulaştığı, metan gazının hacimce %26'lara ulaştığı ve karbonmonoksit gazının hacimce %33'lere ulaştığı ve ısıl değerin 3878 kcal/m³ olduğu tespit edilmiştir.
- Yonga levha atık örneği deneyleri sonucunda en yüksek sentez gaz ve ısıl değer sonuçlarına 900°C sıcaklık ve 0,01 debili saf oksijen şartlarında ulaşılmıştır. Bu koşullarda hidrojen gazının hacimce %46'lara ulaştığı, metan gazının hacimce %42'lere ulaştığı ve karbonmonoksit gazının hacimce %24'lere ulaştığı ve ısıl değerin 5531 kcal/m³ olduğu belirlenmiştir.
- Masif pelet atık örneği deneyleri sonucunda en yüksek sentez gaz ve ısıl değer sonuçlarına 900 °C sıcaklık ve 0,01 debili saf oksijen şartlarında ulaşılmıştır. Bu koşullarda hidrojen gazının hacimce %57'lere ulaştığı, metan gazının hacimce %34'lere ulaştığı ve karbonmonoksit gazının hacimce %38'lere ulaştığı ve ısıl değerin 5005 kcal/m^3 olduğu tespit edilmiştir.
- Yonga levha pelet atık örneği deneyleri sonucunda en yüksek sentez gaz ve ısıl değer sonuçlarına 900 °C sıcaklık ve 0,01 debili saf oksijen şartlarında ulaşılmıştır. Bu koşullarda hidrojen gazının hacimce %51'lere ulaştığı, metan gazının hacimce %19'lara

ulaştığı ve karbonmonoksit gazının hacimce %33'lere ulaştığı ve ısıl değerin 3469 kcal/m³ olduğu belirlenmiştir.

- Örnek miktarı arttıkça sentez gaz dağılım miktarının hacimce arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Pelet haline getirilen masif atık ve yonga levha atık örneklerinin, ana örneklerden daha yüksek ısıl değerlere ulaştığı ve daha yüksek sentez gaz dağılımı gösterdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, belediyelere katı atık yükü oluşturan masif atık örnekleri ve yonga levha atık örneklerinin, pelet haline getirildikten sonra termokimyasal işlemler ile daha etkin bir şekilde değerlendirilebileceği kanaatine varılmıştır. Ayrıca, pelet haline getirildikten sonra bu ürünlerin gerek depolama ve gerekse taşıma süreçlerinde daha avantajlı olacağı görülmektedir. Özellikle büyük şehirlerde ciddi bir potansiyeli olan ahşap mobilya atıklarının termokimyasal işlemler ile değerlendirilmesi ve peletlenerek yakıt olarak kullanılması son derece faydalı olacaktır.

Bu çalışmanın genişletilerek elde edilen biocharların aktif karbon elde edilmesi amacıyla değerlendirilebilmesi için BET analizi yapılması hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

Abdel-Shafy, H.I., Mansour, M.S.M., 2018. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. Egypt. J. Pet. 27, 1275–1290. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003

Adipah, S., Kwame, O.N., 2018. A Novel Introduction of Municipal Solid Waste Management. J. Environ. Sci. Public Heal. 03. https://doi.org/10.26502/jesph.96120055

Ahmed, A., Abu Bakar, M.S., Sukri, R.S., Hussain, M., Farooq, A., Moogi, S., Park, Y.K., 2020. Sawdust pyrolysis from the furniture industry in an auger pyrolysis reactor system for biochar and bio-oil production. Energy Convers. Manag. 226, 113502. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113502

Asefi, H., Lim, S., 2017. A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management. J. Clean. Prod. 166, 1131–1143. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.061

Asefi, H., Shahparvari, S., Chhetri, P., 2020. Advances in sustainable integrated solid waste management systems: lessons learned over the decade 2007–2018. J. Environ. Plan. Manag. https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1714562

Aslan, D.I., Özoğul, B., Ceylan, S., Geyikçi, F., 2018. Thermokinetic analysis and product characterization of Medium Density Fiberboard pyrolysis. Bioresour. Technol. 258, 105–110. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.126

ASTM D3172-13, 2020, Standard practice for proximate analysis of coal and coke, https://www.astm.org.

ASTM D3175-20, 2020, Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke, https://www.astm.org.

ASTM D5865-13, 2020, Standard test method for gross calorific value of coal and coke, https://www.astm.org.

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. Int. J. Hydrogen Energy 44, 17389–17396. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.175

Ayiania, M., Terrell, E., Dunsmoor, A., Carbajal-Gamarra, F.M., Garcia-Perez, M., 2019. Characterization of solid and vapor products from thermochemical conversion of municipal solid waste woody fractions. Waste Manag. 84, 277–285. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.042

Başakşehir Belediyesi, 2019, https://www.basaksehir.bel.tr/eski-mobilyalar-yurekleri-de-isitiyor, [Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2021].

Bilgili, M.Y., 2020. Sifir Atik YaklaşimininKökenleri VeGünümüzdeki Anlami. İstanbul Ticaret Üniversitesi Sos. Bilim. Derg. 683–703. https://doi.org/10.46928/iticusbe.787711

BP, 2021. Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets . and authoritative publications in the field of energy. BP Energy Outlook 2021 70, 8–20.

Cetin, E., Gupta, R., Moghtaderi, B., 2005. Effect of pyrolysis pressure and heating rate on radiata pine char structure and apparent gasification reactivity. Fuel 84, 1328–1334. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.07.016

Chen, D., Li, Y., Deng, M., Wang, J., Chen, M., Yan, B., Yuan, Q., 2016. Effect of torrefaction pretreatment and catalytic pyrolysis on the pyrolysis poly-generation of pine wood. Bioresour. Technol. 214, 615–622. https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.04.058

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M., 2017. Sustainable waste management: Waste to energy plant as an alternative to landfill. Energy Convers. Manag. 131, 18–31. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.012

Demirarslan, K.O., Demirarslan, D., 2020. Günümüzün Farklı Bir Problemi Olarak Mobilya Atıkları ve Çevresel Etkileri. Int. J. Adv. Eng. Pure Sci. 33, 97–105. https://doi.org/10.7240/jeps.748061

Dorieh, A., Mahmoodi, N., Mamaghani, M., Pizzi, A., Mohammadi Zeydi, M., 2018. Comparison of the properties of urea-formaldehyde resins by the use of formalin or urea formaldehyde condensates. J. Adhes. Sci. Technol. 32, 2537–2551. https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1492780

EPA, 2018, https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/durable-goods-product-specific-data, [Ziyaret Tarihi: 15 Kasım 2021].

Ferreira, S.D., Altafini, C.R., Perondi, D., Godinho, M., 2015. Pyrolysis of Medium Density Fiberboard (MDF) wastes in a screw reactor. Energy Convers. Manag. 92, 223–233. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.032

Foong, S.Y., Liew, R.K., Lee, C.L., Tan, W.P., Peng, W., Sonne, C., Tsang, Y.F., Lam, S.S., 2021. Strategic hazard mitigation of waste furniture boards via pyrolysis: Pyrolysis behavior, mechanisms, and value-added products. J. Hazard. Mater. 421, 126774. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.126774

Forrest, A., Hilton, M., Ballinger, A., Whittaker, D., 2017. Circular Economy Opportunities in the Furniture Sector. Eur. Environ. Bur. 55.

Glushkov, D.O., Nyashina, G.S., Anand, R., Strizhak, P.A., 2021. Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass. Process Saf. Environ. Prot. 156, 43–56. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.039

Güngör A., Ozbayoglu A.M., Kasnakoglu C., Biyikoglu A., Uysal B.Z., 2011. Determination of Air/Fuel and Steam/Fuel Ratio for Coal Gasification Process to Produce Synthesis Gas. J. Environ. Sci. Eng. 5, 799–804.

Han, T.U., Kim, Y.M., Watanabe, C., Teramae, N., Park, Y.K., Kim, S., Lee, Y., 2015. Analytical pyrolysis properties of waste medium-density fiberboard and particle board. J. Ind. Eng. Chem. 32, 345–352. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.09.008

Hu, J., Jia, Z., Zhao, S., Wang, W., Zhang, Q., Liu, R., Huang, Z., 2021. Activated char supported Fe-Ni catalyst for syngas production from catalytic gasification of pine wood. Bioresour. Technol. 340, 125600. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125600

Hu, M., Gao, L., Chen, Z., Ma, C., Zhou, Y., Chen, J., Ma, S., Laghari, M., Xiao, B., Zhang, B., Guo, D., 2016. Syngas production by catalytic in-situ steam co-gasification of wet sewage sludge and pine sawdust. Energy Convers. Manag. 111, 409–416. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.064

Jindal, M.K., Jha, M.K., 2016. Catalytic Hydrothermal Liquefaction of Waste Furniture

Sawdust to Bio-oil. Indian Chem. Eng. 58, 157–171. https://doi.org/10.1080/00194506.2015.1006145

Junginger, M., Thrän, D., Schaubach, K., Schipfer, F., Wild, M., Wild, M., 2017. The Hotspots of the Global Wood Pellet Industry and Trade 2017.

K N, Y., T, P.D., P, S., S, K., R, Y.K., Varjani, S., AdishKumar, S., Kumar, G., J, R.B., 2022. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. Chemosphere 286, 131824. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131824

Kamran, M., Fazal, R.M., 2021. Renewable Energy Conversion Systems. Elsevier Ltd, Chennai, India.

Kaya, E., 2016, *Evsel arıtma çamurları ve atık yağlardan termokimyasal yöntemlerle hidrojen gazı üretimi,* Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi.

Kazimierski, P., Hercel, P., Januszewicz, K., Kardaś, D., 2020. Pre-treatment of furniture waste for smokeless charcoal production. Materials (Basel). 13, 1–11. https://doi.org/10.3390/ma13143188

Köseoğlu, Y., 2015, *Türkiye'deki odun bazlı levha endüstrisinde atıkların tanımı, sınıflandırılması ve analiz yöntemleri,* Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi.

Kumar, A., Samadder, S.R., 2017. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. Waste Manag. 69, 407–422. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046

Küçükkaya, E., 2019, https://www.enerjiportali.com/pelet-yakit-nedir-nerelerde-kullanilir/, [Ziyaret Tarihi: 14 Kasım 2021].

Küsek, G., Güngör, C., Öztürk, H.H., Akdemir, S., 2015. Biopellet Production from Agricultural Residues. Uludag Univ. Ziraat Fak. Derg. 29, 137–145.

Liu, Q., Hu, C., Peng, B., Liu, C., Li, Z., Wu, K., Zhang, H., Xiao, R., 2019. High H2/CO ratio syngas production from chemical looping co-gasification of biomass and polyethylene with CaO/Fe2O3 oxygen carrier. Energy Convers. Manag. 199, 111951. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111951

Martins Mayer, F., Teixeira, C.M., Andrade Pacheco, J.G., Telles de Souza, C., de Vila Bauer, D., Bastos Caramão, E., da Silveira Espíndola, J., Trierweiler, J.O., Perez Lopez, O.W., Alcaraz Zini, C., 2018. Characterization of analytical fast pyrolysis vapors of medium-density fiberboard (mdf) using metal-modified HZSM-5. J. Anal. Appl. Pyrolysis 136, 87–95. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.019

Moralı, U., Yavuzel, N., Şensöz, S., 2016. Pyrolysis of hornbeam (Carpinus betulus L.) sawdust: Characterization of bio-oil and bio-char. Bioresour. Technol. 221, 682–685. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.081

Moreno, A.I., Font, R., 2015. Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved. J. Anal. Appl. Pyrolysis 113, 464–473. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.03.008

Mukherjee, C., Denney, J., Mbonimpa, E.G., Slagley, J., Bhowmik, R., 2020. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. Renew. Sustain. Energy Rev. 119, 109512. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109512

MÜSİAD, 2018. DTM Mobilya Ve Orman Urunleri Sektörel Raporu.

Muvhiiwa, R., Kuvarega, A., Llana, E.M., Muleja, A., 2019. Study of biochar from pyrolysis and gasification of wood pellets in a nitrogen plasma reactor for design of biomass processes. J. Environ. Chem. Eng. 7, 103391. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103391

Neidermeier, A., Danks, C., Coleman, K., Wallin, K., 2020. Forest pests and wood pellets: A literature review of the opportunities and risks in the United States' northeastern forests. For. Ecol. Manage. 476, 118415. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118415

Nhuchhen, D.R., Abdul Salam, P., 2012. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. Fuel 99, 55–63. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.04.015

Nielsen, S.K., Mandø, M., Rosenørn, A.B., 2020. Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. Powder Technol. 364, 971–985. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051

Öngen, A., Arayici, S., 2015. Monitoring of waste gasification products: solid, liquid and

syngas. Hittite J. Sci. Eng. 2, 97–102. https://doi.org/10.17350/hjse19030000015

Öngen, A., Karabağ, N., Hunce, S.Y., Özcan, H.K., Özbaş, E.E., Aydın, S., 2019. An Assessment of Pyrolysis Process for the Treatment of Agricultural and Forest Wastes 97–110. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95888-0_9

Owusu, P.A., Asumadu-Sarkodie, S., 2016. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. Cogent Eng. 3. https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990

Özbay, G., Kökten, E.S., Ozcifci, A., Toker, H., 2015. Bio-char production from pyrolysis of furniture products waste. 27th Int. Conf. Res. Furnit. Ind. 27, 2013–2016.

Özbay, G., Özçifçi, A., Karagöz, S., 2011. Catalytic Pyrolysis of Waste Melamine Coated Chipboard. Environ. Prog. Sustain. Energy 32, 156–161. https://doi.org/10.1002/ep.10612

Özçifçi, A., Özbay, G., 2013. Mobilya endüstrisi atiklarindan katalitik piroliz yöntemi ile biyoyakit üreti mi. J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ. 28, 473–479.

Park, H.J., Heo, H.S., Yoo, K.S., Yim, J.H., Sohn, J.M., Jeong, K.E., Jeon, J.K., Park, Y.K., 2011. Thermal degradation of plywood with block polypropylene in TG and batch reactor system. J. Ind. Eng. Chem. 17, 549–553. https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2010.11.002

Pharino, C., 2017. Integrated Waste Management System Overview 1–13. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4631-5_1

Picchio, Rodolfo, Latterini, Francesco, Venanzi, Rachele, Stefanoni, Walter, Suardi, Alessandro, Tocci, Damiano, Pari, Luigi, 2020. Pellet production from woody and non-woody feedstocks : A review on biomass quality evaluation. Energies 1–20.

Pradhan, P., Mahajani, S.M., Arora, A., 2018. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. Fuel Process. Technol. 181, 215–232. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021

Ramirez, J.A., Rainey, T.J., 2019. Comparative techno-economic analysis of biofuel production through gasification, thermal liquefaction and pyrolysis of sugarcane bagasse. J. Clean. Prod. 229, 513–527. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.017

Ramos, A., Monteiro, E., Rouboa, A., 2019. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 110, 188–206. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.048

Ramos, D., Afonso, P., Rodrigues, M.A., 2020. Integrated management systems as a key facilitator of occupational health and safety risk management: A case study in a medium sized waste management firm. J. Clean. Prod. 262. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121346

Rasmussen, N.B.K., Aryal, N., 2020. Syngas production using straw pellet gasification in fluidized bed allothermal reactor under different temperature conditions. Fuel 263. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116706

Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J.J., Hens, L., Vandecasteele, C., 2020. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. J. Clean. Prod. 269, 122317. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317

Saito, Y., Arima, T., 2002. Growth of cone-shaped carbon material inside the cell lumen by heat treatment of wood charcoal. J. Wood Sci. 48, 451–454. https://doi.org/10.1007/BF00770709

Soni, B., Karmee, S.K., 2020. Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust. Fuel 271, 117570. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117570

Stelte, W., Sanadi, A.R., Shang, L., Holm, J.K., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U.B., 2012. Recent developments in biomass pelletization - a review. BioResources 7, 4451–4490. https://doi.org/10.15376/biores.7.3.stelte

Sulaiman, S.A., Roslan, R., Inayat, M., Yasin Naz, M., 2018. Effect of blending ratio and catalyst loading on co-gasification of wood chips and coconut waste. J. Energy Inst. 91, 779–785. https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.05.003

Tanvir Alam, M., Park, S.W., Lee, S.Y., Jeong, Y.O., de Girolamo, A., Seo, Y.C., Choi, H.S., 2020. Co-Gasification of Treated Solid Recovered Fuel Residue by Using Minerals Bed

and Biomass Waste Blends. Energies 2020, Vol. 13, Page 2081 13, 2081. https://doi.org/10.3390/EN13082081

TAPPI T211 om-12, 2012, Ash in wood, pulp, and paper, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA.

TAPPI T257 cm-02, 2012, Sampling and preparing wood for analysis, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA.

TAPPI T258 om-2, 2006, Basic density and moisture in pulpwood, TAPPI Press, Atlanta, GA, USA.

T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2018, Mobilya çalışma grubu raporu, https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2018/10/10_MobilyaCalismaGurubuRaporu.pdf, [Ziyaret Tarihi: 20 Kasım 2021].

T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021, Mobilya sektör raporu, https://ticaret.gov.tr/data/5b87000813b8761450e18d7b/Mobilya%20Sektör%20Raporu%202021.pdf, [Ziyaret Tarihi: 20 Kasım 2021].

TEİAŞ, 2021, Türkiye kurulu güç raporları, https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari, [Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2021].

TOBB, 2017, Türkiye mobilya ürünleri meclisi sektör raporu, https://tobb.org.tr/Documents/yayinlar/2018/MobilyaSektorleriMeclisi.PDF, [Ziyaret Tarihi: 24 Kasım 2021].

Toklu, E., 2017. Biomass energy potential and utilization in Turkey. Renew. Energy 107, 235–244. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008

Turcott Cervantes, D.E., López Martínez, A., Cuartas Hernández, M., Lobo García de Cortázar, A., 2018. Using indicators as a tool to evaluate municipal solid waste management: A critical review. Waste Manag. 80, 51–63. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.046

Uddin, M.N., Techato, K., Taweekun, J., Rahman, M.M., Rasul, M.G., Mahlia, T.M.I., Ashrafur, S.M., 2018. An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies. Energies 11. https://doi.org/10.3390/en11113115

URL1, https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html,

[Ziyaret Tarihi: 25 Kasım 2021].

Uzun, B.B., Kanmaz, G., 2014. Catalytic pyrolysis of waste furniture sawdust for bio-oil production. Waste Manag. Res. 32, 646–652. https://doi.org/10.1177/0734242X14539787

Vender,M., 2019, https://blog.handkrafted.com/landfill-australias-underground-furniture-movement/, [Ziyaret Tarihi: 12 Kasım 2021].

Vongsvarnrungruang, A., Atong, D., Sricharoenchaikul, V., 2018. Gasification of Furniture Waste Sawdust in a Cyclone Gasifier. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 146. https://doi.org/10.1088/1755-1315/146/1/012041

Vonk, G., Piriou, B., Felipe Dos Santos, P., Wolbert, D., Vaïtilingom, G., 2019. Comparative analysis of wood and solid recovered fuels gasification in a downdraft fixed bed reactor. Waste Manag. 85, 106–120. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.12.023

Wang, Z., Bui, Q., Zhang, B., Pham, T.L.H., 2020. Biomass energy production and its impacts on the ecological footprint: An investigation of the G7 countries. Sci. Total Environ. 743, 140741. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140741

Xu, D., Yang, L., Zhao, M., Zhang, J., Syed-Hassan, S.S.A., Sun, H., Hu, X., Zhang, H., Zhang, S., 2021. Conversion and transformation of N species during pyrolysis of wood-based panels: A review. Environ. Pollut. 270, 116120. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.116120

Yılmaz, S., Kalkan, D.K., 2017. Enerji Güvenliği Kavrami: 1973 Petrol Krizi Işığında Bir Tartışma. Uluslararası Kriz ve Siyaset Araştırmaları Derg. 1, 169–199.

Zhan, H., Zhuang, X., Song, Y., Liu, J., Li, S., Chang, G., Yin, X., Wu, C., Wang, X., 2019. A review on evolution of nitrogen-containing species during selective pyrolysis of waste wood-based panels. Fuel 253, 1214–1228. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.05.122

Zhang, Y., He, Z.B., Xue, L., Chu, D.M., Mu, J., 2016. Influence of a urea-formaldehyde resin adhesive on pyrolysis characteristics and volatiles emission of poplar particleboard. RSC Adv. 6, 12850–12861. https://doi.org/10.1039/c5ra18068f

Zorba, T., Papadopoulou, E., Hatjiissaak, A., Paraskevopoulos, K.M., Chrissafis, K., 2008.

Urea-formaldehyde resins characterized by thermal analysis and FTIR method. J. Therm. Anal. Calorim. 92, 29–33. https://doi.org/10.1007/s10973-007-8731-2

EKLER

EK-1. Masif atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması sonuçlarının veri seti.

Zaman, dk	Sıcaklık, °C	CO, %	CO_2, %	CH_4, %	O_2, %	H_2, %
0	23	0	0	0	21	0
1	27	0	0	0	21	0
2	32	0	0	0	21	0
3	38	0	0	0	21	0
4	44	0	0	0	21	0
5	50	0	0	0	21	0
6	75	0	0	0	21	0
7	100	0	0	0	21	0
8	150	0	0	0	20	0
9	200	0	1	0	19	0
10	250	2	5	0	16	0
11	300	7	11	1	11	0
12	350	15	18	2	5	0
13	400	23	24	5	2	0
14	450	30	28	9	1	1
15	500	34	27	13	0	3
16	550	34	24	14	0	5
17	575	33	22	16	0	7
18	600	32	19	16	0	11
19	625	30	18	17	0	15
20	650	29	18	17	0	16
21	666	26	19	17	0	19
22	682	25	19	17	0	21
23	700	22	19	17	0	25
24	700	20	19	18	0	27
25	700	18	20	18	0	30
26	700	17	20	17	0	30
27	700	16	21	17	0	29
28	700	16	21	18	0	29
29	700	15	21	18	0	29
30	700	14	20	18	0	30
31	700	13	19	17	0	32
32	700	12	18	15	0	34
33	700	12	17	14	0	35
34	700	11	16	13	0	36

EK-1 (devam):

35	700	11	15	12	0	35
36	700	10	15	11	0	34
37	700	10	15	10	0	32
38	700	10	14	9	0	30
39	700	9	14	8	0	28
40	700	9	14	8	0	26
41	700	9	14	7	0	24
42	700	8	14	7	0	23
43	700	8	13	6	0	22
44	700	8	13	6	0	21
45	700	8	13	5	0	20
46	700	8	13	5	0	19
47	700	8	13	4	0	18
48	700	8	13	4	0	18
49	700	8	13	4	0	17
50	700	8	13	3	0	16
51	700	8	12	3	0	16
52	700	8	12	3	0	15
53	700	8	12	3	0	15
54	700	8	12	3	0	15
55	700	7	12	3	0	14
56	700	7	12	3	0	14
57	700	7	12	2	0	14
58	700	7	12	2	0	13
59	700	7	12	2	0	13
60	700	7	12	2	0	12
61	700	6	13	2	0	11
62	700	6	13	2	0	11
63	700	6	13	2	0	11
64	700	6	13	2	0	10
65	700	6	13	2	0	10
66	700	6	13	2	0	10
67	700	6	13	1	0	10
68	700	6	13	1	0	10
69	700	6	13	1	0	9
70	700	6	13	1	0	9
71	700	6	13	1	0	8
72	700	6	13	1	0	8
73	700	6	13	1	0	8
74	700	6	13	1	0	8
75	700	6	13	1	0	8
76	700	6	13	1	0	8

EK-2: Yonga levha atık örneğinin 0,05 l/dk debili kuru hava ajanı ile 700 °C sıcaklıkta gazlaştırılması sonuçlarının veri seti.

Zaman, dk	Sıcaklık, °C	CO, %	CO_2, %	CH_4, %	O_2, %	H_2, %
0	18	0	0	0	20	0
1	34	0	2	0	20	0
2	50	0	1	0	20	0
3	66	0	1	0	20	0
4	80	0	1	0	20	0
5	94	0	1	0	20	0
6	108	0	1	0	20	0
7	167	0	1	0	20	0
8	226	2	5	0	18	0
9	285	10	23	1	10	0
10	344	16	36	3	4	0
11	402	19	41	7	1	0
12	446	21	40	10	0	1
13	490	21	37	13	0	4
14	534	22	34	14	0	8
15	576	22	31	15	0	11
16	617	22	27	16	0	16
17	634	21	25	16	0	20
18	657	21	23	17	0	23
19	670	20	21	17	0	26
20	685	19	20	16	0	29
21	700	19	20	16	0	30
22	700	17	20	15	0	31
23	700	17	19	15	0	32
24	700	16	19	14	0	33
25	700	16	19	14	0	32
26	700	15	19	14	0	30
27	700	14	19	14	0	28
28	700	14	19	14	0	27
29	700	14	18	14	0	29
30	700	15	18	14	0	31
31	700	15	17	14	0	31
32	700	14	17	14	0	30
33	700	13	17	14	0	29
34	700	13	17	14	0	27
35	700	12	16	13	0	27
36	700	11	16	12	0	29
37	700	11	15	11	0	30

EK-2 (devam):

38	700	10	15	11	0	31
39	700	10	15	10	0	30
40	700	9	14	10	0	30
41	700	9	14	9	1	29
42	700	8	14	8	1	28
43	700	8	14	8	1	28
44	700	8	14	7	1	28
45	700	8	14	7	1	28
46	700	8	13	6	1	28
47	700	8	14	6	1	28
48	700	9	14	6	1	29
49	700	9	14	6	1	28
50	700	8	14	5	1	28
51	700	8	14	5	1	27
52	700	8	14	5	1	27
53	700	8	14	5	1	26
54	700	8	14	4	1	25
55	700	8	14	4	1	24
56	700	8	13	4	1	24
57	700	8	13	4	1	23
58	700	8	13	4	1	23
59	700	8	13	4	1	22
60	700	8	14	3	1	22
61	700	8	14	3	1	22
62	700	8	14	3	1	21
63	700	8	13	3	1	21
64	700	8	13	3	1	20
65	700	8	13	3	1	20
66	700	8	13	3	1	20
67	700	8	13	3	1	20
68	700	8	13	3	1	19
69	700	8	13	3	1	19
70	700	8	13	2	1	18
71	700	8	13	2	1	18
72	700	8	13	2	1	18
73	700	8	13	2	1	18
74	700	8	13	2	1	17
75	700	8	13	2	1	17
76	700	8	13	2	1	17
77	700	8	13	2	1	17
78	700	8	13	2	1	16
79	700	8	13	2	1	16

EK-2 (devam):

80	700	8	13	2	1	16
81	700	8	13	2	1	16
82	700	8	13	2	1	16
83	700	8	13	2	1	16
84	700	8	13	2	1	15
85	700	8	13	2	1	15
86	700	8	13	2	1	15
87	700	8	13	2	1	15
88	700	8	13	2	1	15
89	700	8	13	2	1	15
90	700	8	13	2	1	15
91	700	8	13	2	1	15
92	700	8	13	2	1	15
93	700	8	13	1	1	15
94	700	8	13	1	1	14
95	700	8	13	1	1	14
96	700	8	13	1	1	14
97	700	8	13	1	1	14
98	700	8	13	1	1	14
99	700	8	13	1	1	14
100	700	8	13	1	1	14
101	700	8	13	1	1	13
102	700	8	13	1	1	13
103	700	8	13	1	1	13
104	700	8	13	1	1	13
105	700	8	13	1	1	13
106	700	8	13	1	1	13
107	700	8	13	1	1	13
108	700	8	13	1	1	13
109	700	8	13	1	1	13
110	700	8	13	1	1	13
111	700	8	13	1	1	13
112	700	8	13	1	1	13
113	700	8	13	1	1	12
114	700	8	13	1	1	12
115	700	8	13	1	1	12
116	700	8	13	1	1	12
117	700	8	13	1	1	12
118	700	8	13	1	1	12
119	700	8	13	1	1	12
120	700	8	13	1	1	12
121	700	8	13	1	1	12

EK-2 (devam):

122	700	8	13	1	1	12
123	700	8	13	1	1	12
124	700	8	13	1	1	12
125	700	8	13	1	1	12
126	700	8	13	1	1	11
127	700	8	13	1	1	11
128	700	8	13	1	1	11
129	700	8	13	1	1	11
130	700	8	13	1	1	11
131	700	8	13	1	1	11
132	700	8	13	1	1	11
133	700	8	13	1	1	11
134	700	8	13	1	1	11
135	700	8	13	1	1	11
136	700	8	13	1	1	11
137	700	8	13	1	1	11
138	700	8	13	1	1	11
139	700	8	13	1	1	11
140	700	8	13	1	1	10
141	700	8	13	1	1	10
142	700	8	13	1	1	10
143	700	8	13	1	1	10
144	700	8	13	1	1	10
145	700	8	13	1	1	10
146	700	8	13	1	1	10
147	700	7	13	1	1	10
148	700	8	13	1	1	10
149	700	8	13	1	1	9
150	700	8	13	1	1	9