

**T.C.**  
**EGE ÜNİVERSİTESİ**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**SENTEZ GAZININ İÇTEN YANMALI MOTOR  
PERFORMANSINA ETKİSİ**

Bahadır Han SABANLI

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı  
Enerji Teknolojisi Yüksek Lisans Programı

İzmir  
2019



**KABUL ONAY SAYFASI**

Bahadır Han SABANLI tarafından yüzsek lisans tezi olarak sunulan ‘‘Sentez Gazının İçten Yanmalı Motor Performansına Etkisi’’ başlıklı bu alışma E Lisansüstü Eğitim ve đretim Yönetmeliđi ile E Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve đretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 17/07/2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri yeleri:**

**Jüri Bařkanı : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ERYAŞAR**  
**Raportör ye : Prof. Dr. Günnur KOAR**  
**ye : Pro. Dr. Nurdan BÜYÜKKAMACI**

**İmza**



**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ****ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Sentez Gazının İçten Yanmalı Motor Performansına Etkisi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

17/08/2019

Bahadır Han SABANLI



**ÖZET****SENTEZ GAZININ İÇTEN YANMALI MOTOR PERFORMASINA  
ETKİSİ**

SABANLI, Bahadır Han

Yüksek Lisans Tezi Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ERYAŞAR

Haziran 2019, 94 sayfa

Biyokütle dönüşüm yöntemlerinden biri olan gazlaştırma prosesi ile çeşitli biyokütle kaynakları doğrudan kullanılabilen gaz ürüne dönüştürülmektedir. Gazlaştırma prosesi sonunda elde edilen sentez gazı ısı ve güç sistemlerinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, çam talaşı ve atık motor yağının gazlaştırılması ile elde edilen sentez gazının içten yanmalı gaz motorunda kullanılarak motor verimi ve egzoz emisyonlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Denemeler öncesinde tez materyali olan çam talaşı ve atık motor yağının nem, kül ve uçucu katı madde, sabit karbon oranı ve elementel analizleri gerçekleştirilmiştir. Denemeler sonunda elde edilen sentez gazının içeriği ve kalorifik değeri belirlenmiştir. Üretilen sentez gazı ile beslenen içten yanmalı gaz motorunun emisyon analizleri yapılarak egzoz gazı içerisindeki gaz konsantrasyonları ve motor yanma verimi saptanmıştır. Motorun 5kW<sub>e</sub> yükte, tükettiği sentez gazı miktarı 4.5 m<sup>3</sup>/saat olarak belirlenmiş ve tam yükteki maksimum elektrik çevrimi %27 olarak hesaplanmıştır. 15 saatlik sürekli çalıştırma sonucunda, motor parçalarında ve bujilerde önemli bir sorun gözlenmemiştir. Küçük güçlü sistemlerin, özellikle kırsal kesimde, elektrik üretim amaçlı kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Gazlaştırma, sentez gazı, içten yanmalı motor, motor verimi.





**ABSTRACT****THE EFFECT OF SYNTHESIS GAS ON INTERNAL COMBUSTION  
ENGINE PERFORMANCE**

SABANLI, Bahadır Han

MSc in Solar Energy

Supervisor: Assoc. Dr. Ahmet ERYAŞAR

July 2019, 94 pages

Various biomass sources are directly converted into gas products with the gasification process, which is one of the biomass conversion methods, that can be used. Synthesis gas which is obtained as a result of gasification process, is used as fuel in heat and power systems.

In this thesis, it is aimed to investigate engine efficiency and exhaust emissions by using synthesis gas obtained from gasification of pine sawdust and waste engine oil in internal combustion gas engine. Before the experiments the moisture, ash, volatile solids, constant carbon content and elemental analysis of pine sawdust and waste engine oil were performed.

As a result of experiments, the content and calorific value of the synthesis gas were determined. Emission analysis of the internal combustion gas engine fed by the synthesis gas produced was conducted for determining gas concentrations in exhaust gas and engine combustion efficiency. The amount of synthesis gas consumed by the engine at 5kWe load was determined as 4.5 m<sup>3</sup> / hour and the maximum efficiency at full load was calculated as 27%.15 hours of continuous operation, no significant problems were observed in engine parts and plugs. It has been concluded, that small power systems can be used for electricity generation, especially in rural areas.

**Keywords:** Gasification, pine sawdust and waste engine oil, internal combustion gas engine.



## ÖNSÖZ

Biyokütle, dünya genelinde yaygın olarak bulunabilen ve sürdürülebilir bir şekilde üretilen yenilenebilir doğal kaynaktır. Isı ve güç üretimi için biyokütle kaynaklarının hammadde olarak kullanıldığı proseslerde, çeşitli termokimyasal dönüşüm yöntemleri uygulanmaktadır. Bu termokimyasal dönüşüm yöntemleri içerisinde yer alan gazlaştırma/piroliz yöntemi, diğer dönüşüm yöntemlerine göre sahip olduğu avantajlar sayesinde ön plana çıkmaktadır. Biyokütleyi gazlaştırma yöntemi, gelecek vadeden ve biyokütlenin doğrudan yakılmasına alternatif bir seçenek sunmaktadır. Aynı zamanda gazlaştırma prosesi sonucunda katma değeri yüksek ürünler elde edilmektedir. Bu çalışmada, biyokütle dönüşüm yöntemlerinden biri olan gazlaştırma prosesinden elde edilen sentez gazının içten yanmalı gaz motorunda, motor verimi ve egzoz emisyonlarına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

İZMİR

17/07/2019

Bahadır Han SABANLI



## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| İÇ KAPAK.....   | i            |
| KABUL ONAY SAYFASI .....                                    | iii          |
| ÖZET .....  | vii          |
| ABSTRACT .....  | ix           |
| ÖNSÖZ.....  | xi           |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....                                    | xiii         |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                       | xv           |
| TABLolar DİZİNİ .....                                       | xvi          |
| 1. GİRİŞ.....   | 1            |
| 2. GENEL BİLGİLER .....                                     | 3            |
| 2.1 Biyokütle Enerjisi.....                                 | 3            |
| 2.2 Biyokütle Dönüşüm Yöntemleri .....                      | 4            |
| 2.2.1 Biyokimyasal Yöntemler .....                          | 6            |
| 2.2.2 Termokimyasal prosesler .....                         | 6            |
| 2.3 Reaktör Tipleri.....                                    | 14           |
| 2.3.1 Sabit yataklı reaktörler .....                        | 15           |
| 2.3.2 Akışkan yataklı reaktörler .....                      | 21           |
| 2.3.3 Plazma reaktörler .....                               | 25           |
| 2.4 Sentez Gazının Arıtılması.....                          | 25           |
| 2.5 Sentez Gazı Kullanım Alanları .....                     | 27           |
| 2.5.1 Sıvı Yakıt ve Kimyasal Üretiminde Kullanımı.....      | 27           |
| 2.5.2 Isı ve Güç Uygulamalarında Kullanımı .....            | 28           |
| 2.6 Sentez Gazının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı ..... | 33           |
| 3. GEREÇ VE YÖNTEM .....                                    | 38           |
| 3.1 Gereç .....   | 38           |
| 3.2 Yöntem .....  | 38           |
| 3.2.1 Hammadde Analizleri.....                              | 38           |
| 3.2.2 Gazlaştırma / Piroliz Sisteminin Kurulumu .....       | 42           |
| 3.2.3 Gaz Motoru.....                                       | 48           |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. BULGULAR.....</b>  | <b>52</b> |
| <b>4.1 Hammaddenin Özellikleri .....</b>                       | <b>52</b> |
| <b>4.2 Hammaddelerin Termogravimetrik Analizleri .....</b>     | <b>52</b> |
| <b>4.3 Üretilen Sentez Gazının Analizi .....</b>               | <b>54</b> |
| <b>4.4 Motorun Verim ve Egzoz Emisyon Analizleri .....</b>     | <b>55</b> |
| <b>4.5 Sentez Gazının Motor Aksamına Etkisi .....</b>          | <b>57</b> |
| <b>5. SONUÇ VE TARTIŞMA .....</b>                              | <b>60</b> |
| <b>5.1 Gazlaştırma Aşamasında Karşılaşılan Sorunlar .....</b>  | <b>60</b> |
| <b>5.2 Termogravimetrik Analiz Sonuçları.....</b>              | <b>63</b> |
| <b>5.3 Sentez Gazı Analiz Sonuçları.....</b>                   | <b>64</b> |
| <b>5.4 Motorun Verim ve Emisyon Analizleri Sonuçları .....</b> | <b>65</b> |
| <b>5.5 Tarım Motor Aksamına Etkisi .....</b>                   | <b>66</b> |
| <b>6. ÖNERİLER .....</b>                                       | <b>67</b> |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>                                   | <b>69</b> |
| <b>TEŞEKKÜR.....</b>   | <b>78</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>79</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1 Biyokütle dönüşüm yöntemleri .....                             | 6  |
| Şekil 2.2 Gazlaştırıcı Reaktörlerinin Sınıflandırılması.....             | 14 |
| Şekil 2.3 Yukarı Akışlı Gazlaştırıcı.....                                | 17 |
| Şekil 2.4 Aşağı Akışlı Gazlaştırıcı.....                                 | 18 |
| Şekil 2.5 Çapraz Akışlı Gazlaştırıcı.....                                | 20 |
| Şekil 2.6 Kabarcıklı Akışkan Yataklı Reaktör.....                        | 23 |
| Şekil 2.7 Dolaşımli akışkan yataklı reaktör .....                        | 24 |
| Şekil 2.8 Birincil tar giderim metodu .....                              | 26 |
| Şekil 2.9: İkincil tar giderim metodu.....                               | 26 |
| Şekil 3.1 Çam talaşı ve atık motor yağı .....                            | 38 |
| Şekil 3.2 Fişek rezistanslı reaktör .....                                | 43 |
| Şekil 3.3 İkinci gazlaştırma sistemi .....                               | 44 |
| Şekil 3.4 Atık yağ beslemede kullanılan peristaltik pompa.....           | 44 |
| Şekil 3.5 Serpantin reaktör, tüp fırın ve pompa.....                     | 45 |
| Şekil 3.6 Atık motor yağı deposu ve terazi.....                          | 46 |
| Şekil 3.7 Monopomp pompa.....  | 46 |
| Şekil 3.8 Kapalı genleşme tankları .....                                 | 47 |
| Şekil 3.9 Gazometre ve Tesisat.....                                      | 48 |
| Şekil 3.10 Gaz Motoru ve Jeneratör .....                                 | 50 |
| Şekil 3.11 Jeneratör Bileşenleri .....                                   | 50 |
| Şekil 4.1 Atık motor yağının Termogravimetrik analiz sonucu .....        | 53 |
| Şekil 4.2 Ham çam talaşının Termogravimetrik analiz sonucu .....         | 53 |
| Şekil 4.3 Gaz motorunun bujileri.....                                    | 57 |
| Şekil 4.4 Silindir alt duvarındaki tar kalıntıları .....                 | 58 |
| Şekil 4.5 Silindir Üst duvarındaki tar kalıntıları.....                  | 58 |
| Şekil 4.6 Silindir Yan duvarındaki tar kalıntıları.....                  | 59 |
| Şekil 5.1 Gazometre suyu taşınarak tıkanan reaktör.....                  | 61 |
| Şekil 5.2 Gaz çıkış hattındaki tıkanıklık ve sızıntı yapan reaktör ..... | 62 |

**TABLULAR DİZİNİ**

|  |    |
|--|----|
| <b>Tablo 2.1</b> Proseslere göre piroliz ürünleri .....                        | 9  |
| <b>Tablo 2.2</b> Hızlı Piroliz Yağının Tipik Özellikleri.....                  | 10 |
| <b>Tablo 2.3</b> Gazlaştırma ürünlerinin doğal gaz ile karşılaştırılması ..... | 15 |
| <b>Tablo 2.4</b> Değişken yük altında motor performansı .....                  | 36 |
| <b>Tablo 3.1</b> Kullanılan Motorun Teknik Özellikleri.....                    | 49 |
| <b>Tablo 3.2</b> Jeneratör Bileşenleri .....                                   | 51 |
| <b>Tablo 4.1</b> Ham madde ve elementel analiz sonuçları .....                 | 52 |
| <b>Tablo 4.2</b> Sentez gazının analiz sonuçları .....                         | 54 |
| <b>Tablo 4.3</b> Motor egzoz emisyon değerleri .....                           | 56 |



## 1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun giderek artması ve bu artışa paralel olarak sanayileşme, nedeniyle, enerjiye olan ihtiyaç da giderek artış eğilimi göstermektedir. Geçmişte ve günümüzde enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılamakta olan fosil kaynaklı yakıtlar çevresel sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca, fosil kaynaklar yenilenemez kaynaklar olduğundan giderek doğal sınırlarına yaklaşmaktadırlar. Bu nedenlerin yanı sıra petrol fiyatlarındaki artış, enerji güvenliği ve enerji bağımlılığı göz önüne alındığında, fosil yakıtlara alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları giderek önem kazanmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, biyokütle kaynakları tüm yenilenebilir enerji üretiminin %70'ini ve Dünya enerji talebinin %10'una kadarını da karşılayabilmektedir (Motta et al., 2018). Biyokütle ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki en belirgin fark, biyokütle kaynaklarının doğrudan yakıt olarak kullanılabilmesidir. Biyokütle kaynakları, fosil yakıtlara alternatif olabilecek ve fosil yakıtların kullanıldığı teknolojilerde doğrudan veya çok küçük modifikasyonlar ile kullanılacak tek yenilenebilir enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Bunun yanında, biyokütle kaynakları, ihtiyaç anında ısı, elektrik veya sıvı yakıt olarak kullanılmak üzere depolanabilen tek yenilenebilir enerji kaynağı olarak da bilinmektedir. (Strzalka et al., 2017). Günümüzde biyokütle kaynaklarından, daha yüksek katma değerli ürünlere dönüşüm için kullanılan çeşitli dönüşüm yöntemleri mevcuttur. Bu dönüşüm yöntemleri, termokimyasal, biyokimyasal ve fizikokimyasal yöntemler olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir. Bu üç ana başlık altında en çok gelecek vaat eden teknolojiler termokimyasal dönüşüm teknolojileri olarak bilinmektedir. Bunun temel nedeni, termokimyasal dönüşüm yöntemleri ile elde edilen ürün veya ürünlerin, hali hazırda oturmuş fosil kaynak tabanlı güç/enerji üretim sistemlerinde küçük modifikasyonlar yapılarak kullanılabilmesidir. Özellikle, şebekeden bağımsız küçük ölçekli sistemlerde kullanılabilmesi, tarımsal ve endüstriyel atıklar gibi geniş hammadde yelpazesine, yüksek çevrim verimine ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip olması gibi nedenlerden dolayı gazlaştırma yöntemi diğer termokimyasal yöntemlere kıyasla öne çıkmaktadır. Ayrıca, üretilen sentez gazının düşük tar konsantrasyonu ve düşük partikül madde miktarına sahip olması gazlaştırma yöntemini avantajlı kılmaktadır

(Martinez et al., 2012). Biyokütlenin gazlaştırılması yöntemi ile üretilen sentez gazı, genellikle elektrik ve ısı enerjisi üretmeyi sağlayan, içten yanmalı motorlar veya türbinlerden oluşan kojenerasyon sistemlerinde kullanılmaktadır. Gazlaştırma prosesi birçok avantaja sahip olsa da üretilen sentez gazındaki kirlilik düzeyi nedeniyle gazın kullanımını kısıtlayan önemli bir dezavantaja da sahiptir. Bu dezavantaj nedeni ile, sentez gazının içten yanmalı motorlarda kullanımından önce temizlenmesi bir gereklilik haline gelmektedir (Osikowska et al., 2017). İçten yanmalı motorların, merkezi olmayan elektrik üretiminde önemli rol oynayacağı öngörülmektedir. Ayrıca, gaz motorlarının, yüksek verimlilik ve güç ile düşük çevresel etkilere sahip olmaları, güç üretiminde kilit role sahip olmalarını sağlamaktadır (Pirker and Wimmer, 2017). Kojenerasyon santrallerinde, fosil yakıtlar yerine biyokütle kaynakları kullanıldığında CO<sub>2</sub> emisyonuna bağlı çevresel etkiler ciddi bir şekilde azaltılabilir. Bunun yanında, fosil yakıtların yerine biyokütle kaynaklarının kullanımı sera gazı emisyonunun azaltılmasının yanı sıra, enerji güvenliği ve bağımsızlığını da sağlamaktadır (Strzalka et al., 2017).

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların amacı, tarımsal ve endüstriyel atık/artıklar olan çam talaşı ve atık motor yağlarının birlikte gazlaştırma/pirolizi ile sentez gazına dönüştürülmesi ve bu gazın içten yanmalı gaz motorlarında kullanımında motor performansına etkisinin ve motor aksamında oluşabilecek sorunların gözlemlenmesidir. Böylece hali hazırda atık/artık durumunda olan hammaddelerin katma değeri daha yüksek ürünlere dönüştürülerek, enerji üretiminde değerlendirilmesi sağlanırken, enerji dönüşümü için kullanılan kojenerasyon ünitelerinde çıkabilecek sorunlar ve bu sorunlara çözüm önerileri getirilmesi amaçlanmıştır..

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Biyokütle Enerjisi

Biyokütle, yüz yıllık periyottan daha kısa sürede yenilenebilen, karada ve suda yetişen bitkiler, hayvansal atıklar, gıda endüstrisi ve orman yan ürünleri ile kentsel atıkları içeren, biyolojik kökenli, fosil olmayan tüm organik madde kitlesi olarak tanımlanmakta ve bu kaynaklardan elde edilen enerjiye de biyokütle enerjisi adı verilmektedir (Koçar vd., 2010).

Biyokütle kaynakları, kentsel atıklar, orman atık/artıkları, tarımsal artıklar ve enerji bitkileri olmak üzere dört kategori altında incelenebilir. Bu kategoriler ise boyutlarına ve durumlarına göre, granürel materyal (genellikle  $>0,5$  mm), toz materyal (genellikle  $<0,5$  mm) ve çamur olarak üçe ayrılabilir. (Dai et al., 2012). Biyoyakıtlar, bitkiler gibi organik materyallerin hasatları sonucu oluşan biyokütleden elde edilen yenilenebilir enerji formlarıdır. Tarımsal faaliyetler sonucunda oluşan atık/artıklar, ulaşım, ısınma ve elektrik gibi ihtiyaçlarda kullanılmak üzere, biyoyakıt üretimi için önemli bir enerji kaynağı olmasının yanında ekonomi, toplum ve çevre için daha çevreci bir çözüm sunmaktadır (Ghani et al., 2018).

Birçok yenilenebilir enerji kaynağı arasında, biyokütle enerjisi tüm yenilenebilir enerji üretiminin %70'inden fazlasını, karşılayabilmektedir. Ayrıca biyokütle, depolanabilen, taşınabilen ve hasat edildiği yerden uzak olan yerlerde kullanılabilen, katı sıvı ve gaz yakıtlar gibi çeşitli yakıt potansiyeline sahiptir. Bunların yanında, yakıtların yanması sırasında atmosfere salınan CO<sub>2</sub>, yine bitkiler tarafından emildiği için toplam CO<sub>2</sub> salınımı sıfır olarak kabul edilebilir. Bu nedenden dolayı, küresel ısınmayı da dolaylı yoldan engellemektedir (Motta el al., 2018).

Biyokütle, dünya enerji arzının %10 ila %14 kadarını karşılayabileceği tahmin edilen en büyük enerji kaynakları arasındadır. Geçtiğimiz birkaç yıl içerisinde birçok ülke, biyokütle kaynaklarından yenilenebilir enerji üretimini arttırmak için politikalar

oluşturmuştur. Örneğin Avrupa Birliği, 2020 yılına kadar toplam akaryakıt tüketiminin %10'luk payını biyoyakıtlardan karşılama, ABD 2022 yılına kadar 136 milyar litre biyoyakıt üretme ve Çin 2020 yılına kadar toplam benzin tüketiminde %10'luk etanol kullanma hedefi koymuştur (Liu et al., 2014).

Biyokütle kaynakları, kömür ve petrolden sonra, organik ve doğal materyallerden elde edilen, en büyük kaynaklardır (Mehrpooya et al., 2018). Biyokütle kaynaklarıyla diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki temel fark, biyokütle kaynaklarının doğrudan veya çevrim ile yakıt olarak kullanılabilme olasılığıdır. Biyokütle, karbon kaynaklı ve direk olarak fosil yakıtların yerine kullanılacak tek yenilenebilir enerji kaynağıdır. Biyokütle aynı zamanda, ihtiyaç olduğu zaman yakıt, ısı ve elektrik enerjisi üretmek üzere depolanabilen tek yenilenebilir enerji kaynağıdır (Strzalka et al., 2017).

Biyokütle kullanımı göz önüne alındığında, sürdürülebilir tarımın sağlanmasının yanında tüm biyoenerji tedarik zincirlerinin optimizasyonu için önemli sorunlar bulunmaktadır. Bu önemli sorunlardan bazıları, termokimyasal dönüşüm ile enerji elde etmek, su ve kimyasal kullanımı, ekonomik durum, artan dünya nüfusu, iklim değişikliği ve biyolojik çeşitlilik olarak söylenebilir. Biyokütle kaynaklarının düşük yoğunlukları ve yüksek nem içerikleri, nakliye ve ön işlem için kapsamlı gereksinimlere yol açabildiği için lojistik maliyetleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Biyokütlenin enerji üretimi için kullanımıyla ilgili düşünülmesi gereken diğer önemli bir konu da gıda üretimi ile rekabettir (Cucek et al., 2012).

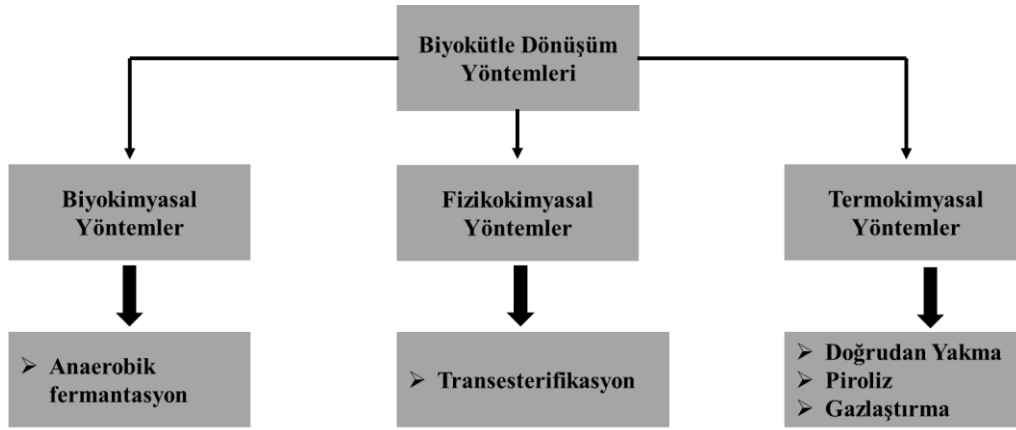
## **2.2 Biyokütle Dönüşüm Yöntemleri**

Biyokütlenin iri ve uygunsuz biçimi, fosil yakıtlardan biyokütle kaynaklarına doğru oluşacak olan hızlı bir geçişin önündeki en büyük engeldir. Gaz ve sıvı yakıtların aksine biyokütle kaynakları kolaylıkla işlenememekte, depolanamamakta veya taşınamamaktadır. Bu nedenler biyokütlenin sıvı ve gaz yakıtlara dönüşümü için büyük bir ihtiyaç oluşturmaktadır (Basu 2010). Biyokütle kaynaklarını daha değerli bir ürüne dönüştürmek için uygulanabilecek çeşitli biyokütle dönüşüm teknolojileri mevcuttur. Bu dönüşüm yöntemleri, termokimyasal, biyokimyasal ve

fizikokimyasal yöntemler olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir (Bridgwater 2012). Biyokütle üzerine hangi dönüşüm yönteminin uygulanacağını belirlerken, dikkat edilmesi gereken en önemli faktör biyokütlenin türü olmalıdır.

Tarımsal ve orman kalıntılarında oluşan biyokütle kaynakları, genellikle hayvan yemi olarak veya ısınma ihtiyacı için kullanılmaktadır. Bunun yanında atık/artık olan biyokütle, yakıt, ısı veya elektrik enerjisi gibi formlara dönüştürülerek kullanılabilir. Bununla birlikte, yüksek nem içeriği biyokütlenin başlıca dezavantajlarından birisini oluşturmaktadır. Genellikle, yüksek nem içeriğine sahip biyokütle kaynakları biyokimyasal dönüşüm yöntemleriyle biyoyakıt üretimi için uygundur. Nem içeriği %30'un altında olan biyokütle kaynaklarının ise piroliz, gazlaştırma gibi yakıt ve kimyasal üretimi için uygun olduğu bilinmektedir. (Prakash et al., 2017).

Şekil 2.1'de biyokütle kaynaklarının, katma değeri yüksek ürünlere dönüştürülmesinde kullanılan dönüşüm teknolojileri belirtilmiştir. Biyokütlenin termokimyasal dönüşümü, kullanılan şartlara bağlı olarak petrol ve doğalgaz endüstrisine benzer sıvı, katı ve gaz ürünler üretme avantajına sahip olduğundan üzerinde en çok çalışma yapılan teknolojilerden biridir. Ek olarak, biyokütlenin termal dönüşümü ile elde edilen ürünler, çok az bir modifikasyonla, halihazırda oturmuş bir teknoloji olan petrol altyapısına kolaylıkla entegre edilebilecektir. (Asomaning et al., 2018).



Şekil 2.1 Biyokütle dönüşüm yöntemleri

## 2.2.1 Biyokimyasal Yöntemler

### 2.2.1.1 Anaerobik fermentasyon

Anaerobik fermentasyon, biyogaz ve fermente gübre üretimi için, hayvan dışkı, tarımsal atık/artıklar, enerji bitkileri ve gıda atıkları gibi materyallerin bakteriler tarafından, oksijensiz ortamda çürütüldüğü bir süreçtir (Popa and Volf., 2018). Bu bozunma sonucunda organik gübre ve biyogaz açığa çıkmaktadır. Anaerobik fermentasyon sırasında uçucu katının yaklaşık olarak %30-60 kadarı biyogaza dönüşmektedir. (Koçar vd., 2010). Anaerobik fermentasyon sonucunda oluşan biyogazın içeriğinde %40-70 CH<sub>4</sub>, %30-60 CO<sub>2</sub>, %1-2'den az H<sub>2</sub>, %1 - 10 CO, %4'ün altında N<sub>2</sub> ve hammaddeye bağlı olarak 100-500 ppm H<sub>2</sub>S bulunmaktadır (Eryaşar, 2007). Anaerobik fermentasyon, atık arıtma ve yenilenebilir enerji üretimi gibi alanlarda gelecek vaat eden bir teknolojidir. Hayvan atıkları, patojenleri azaltmak ve metan gibi biyoenerji üretimi için anaerobik fermentasyon yöntemiyle işlenmektedir (Zhang et al., 2017).

### 2.2.2 Termokimyasal prosesler

Doğrudan yakma, piroliz ve gazlaştırma, ticari uygulamalarda ısı ve güç üretimi için biyokütle kaynaklarının kullanıldığı üç temel termokimyasal yöntemdir.

Biyokütlenin doğrudan yakılması oksijen varlığında, gazlaştırma ve piroliz ise kısmi oksijen veya oksijensiz ortamda, inert atmosferde gerçekleştirilir. Yakıt olarak biyokütle kaynağı kullanılarak, sentez gazı, sıvı yakıt, ısı ve elektrik formunda enerji üretimi için, gazlaştırma, piroliz ve doğrudan yakma üzerine çeşitli çalışmalar yürütülmektedir (Shabbir and Mirzaeian, 2016).

Lignoselülozik biyokütle, dünyanın birçok bölgesinde büyük miktarlarda, sürdürülebilir bir şekilde üretilen, yenilenebilir doğal bir kaynaktır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri orman ve tarım arazilerinden yılda 1,3 milyar ton kuru lignoselülozik biyokütle üretme potansiyeline sahiptir. Bu miktar, 2014 yılında toplam ABD elektrik üretiminin yaklaşık %50'si olan 2 trilyon kWh elektriğe eşdeğer miktardadır. (Zhao et al., 2017).

#### **2.2.2.1 Doğrudan yakma**

Doğrudan yakma biyokütle enerji dönüşümü için önemli bir seçenektir ve insan medeniyetinin başlangıcından beri, insanın ateşi keşfettiği zamandan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Biyokütlenin doğrudan yakılması halen dünyada birçok kırsal bölgede birincil enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Biyokütlenin en yaygın kullanımı, odun olarak ev tipi sobalar gibi küçük ölçekli uygulamalardır. Büyük ölçekli ticari kullanım ise özellikle ısıtma ve elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Ancak doğrudan yakma yöntemi günümüzde biyokütleden enerji elde etmek için etkili bir yöntem değildir (Basu, 2013). Ancak, biyokütlenin, direk yakılması sonucunda, elektrik üretimi için uygun, makul yükseklikte termal enerji (800-1600 °C) üretilmektedir (Brown, 2011).

Doğrudan yanma prosesi, yakıt, enerji ve çevre arasındaki etkileşim olarak düşünülebilir. Yakıt, fazla hava ile yakılarak ısı üretilir, burada fazla hava, yakıt ve oksijen arasında kimyasal bir reaksiyon başlatan oksijen kaynağı olarak işlev görmekte ve bu reaksiyonun sonucu enerji açığa çıkmaktadır (Baskar 2012).

Doğrudan yakma ile elde edilen enerji genellikle odun ve odun artıkları gibi biyokütle kaynaklarından (%64) üretilmektedir. Bunu kentsel katı atıklar (%24) ve tarımsal atık/artıklar (%5) takip etmektedir. Biyokütle kaynakları, büyüme sırasında karbondioksiti absorbe eder ve yanma sırasında içerdiği karbondioksiti atmosfere bırakır. Bu nedenle, biyokütle enerjisi atmosferdeki karbondioksitin geri dönüşümüne yardımcı olur ve net sera etkisi sıfır olarak kabul edilebilir (Abuelnuor et al., 2014).

#### **2.2.2.2 Piroliz**

Piroliz, biyokütleyi zengin hidrokarbonlu gaz karışımı ve karbonca zengin katı tortu gibi daha yararlı materyallere dönüştürmek için düşük sıcaklıklarda gerçekleşen yavaş bir kimyasal reaksiyondur. Piroliz, oksijen yokluğunda meydana gelen termal ayrışma olarak da tanımlanabilmektedir. Pirolizin ana ürünleri, reaktör sıcaklığına, ısıtma hızına, materyal boyutuna ve kullanılan katalizöre göre değişmektedir. Biyokütle kaynaklarının pirolizinden, diğer organik bileşenlerin yanında ana ürün olarak elde edilen sentez gazı, içerisinde başlıca CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> kompozisyonlarını içermektedir. (Saidur et al., 2011).

Piroliz prosesinde, düşük işlem sıcaklığı ve materyalin reaktörde uzun süre beklemesi biyokömür oluşumu için, yüksek sıcaklıklar ve daha uzun bekleme süresi biyokütlenin gaza dönüşmesi, orta dereceli sıcaklıklar ve kısa bekleme süresi sıvı oluşumu için uygundur. Piroliz prosesinde, bu üç ürün daima üretilir ancak işlem parametrelerinin ayarlanmasıyla, oranlar geniş bir aralıkta değişebilir. Tablo'1 de sıcaklıklara ve bekleme sürelerine göre piroliz ürünleri gösterilmiştir (Bridgwater, 2010).



**Tablo 2.1** Proseslere göre piroliz ürünleri

| Proses      | Sıcaklık     | Sıvı                             | Katı | Gaz |
|-------------|--------------|----------------------------------|------|-----|
| Hızlı       | ~ 500 °C     | %75                              | %12  | %13 |
| Yavaş       | ~ 290 °C     | Yalnızca yoğunlaşma durumunda %5 | %80  | %20 |
| Gazlaştırma | ~ 750-900 °C | %5                               | %10  | %85 |

Hızlı piroliz sıvıları, fosil kaynaklı sıvı yakıtlara potansiyel bir alternatif olabilir. Yapılan çalışmalarda, farklı ölçekli kazanlar, içten yanmalı motorlar ve gaz türbinleri kullanılarak yapılan testler sonucu piroliz sıvılarının standart veya modifiye ekipmanlarda verimli bir şekilde kullanılabilirdiği gözlemlenmiştir. Bu testler aynı zamanda, çoğunlukla piroliz sıvısının olağan dışı yakıt özelliklerinden kaynaklanan bazı zorlukları da tanımlamıştır (Chiaramonti et al., 2005).

Biyokütlenin pirolizi ile üretilen biyo-yağ, piroliz yağı, pirolitik yağ veya sıvı odun yağı olarak adlandırılmakta ve genellikle koyu kahverengi bir formda bulunmaktadır. (Isahak et al., 2012). Ayrıca, biyo-yağ, su (%10-30) ve çok sayıda organik molekülün (%70-90) karışımı olarak düşünülebilmektedir. Bu moleküller, asitler, alkoller, ketonlar, aldehitler, fenoller, esterler, eterler, şekerler, furanlar, azot ve ne olduğu henüz bilinmeyen diğer çok işlevli bileşikler gibi çeşitli türleri içermektedirler (Braumakis et al., 2014).

Biyo-yağ, kazanlar, fırınlar, motorlar ve türbinler olmak üzere birçok uygulamada yakıt olarak kullanılabilir. Gıda kaynaklı ürünler, reçineler, tarım kimyasalları, gübreler ve emisyon kontrol ajanları dahil olmak üzere kimyasal madde üretilebilecek veya ekstrakt edilebilecek çok geniş bir hammadde yelpazesi bulunmaktadır. Biyo-yağın ulaşım araçlarında kullanımının sağlanması teknik olarak mümkün olsa da ekonomik olarak fizibil değildir (Bridgwater and Peacocke, 2000).

Piroliz yağının özellikleri, madeni yağlardan çok farklıdır. Büyük miktarlarda oksitlenmiş bileşenlerin bulunması nedeniyle, yağ polar bir yapıya sahiptir ve hidrokarbonlar ile kolayca karışmaz. Yağ, içeriğinde, düşük pH'a nedeni, olan organik asitler (formik ve asetik asit gibi) ve su bulundurmaktadır. Piroliz yağının

(biyo-yağların) su içeriği yaklaşık ağırlıkça %15-35'dir. Ayrıca, piroliz yağının çok zayıf ateşlenme özelliği dizel motorlarda kullanımını zorlaştırmaktadır. Hızlı piroliz yağının tipik özellikleri Tablo'2 de gösterilmiştir (Beld et al., 2012)

**Tablo 2.2** Hızlı Piroliz Yağının Tipik Özellikleri

| <b>Piroliz yağı içeriği</b> | <b>Birim</b>      | <b>Miktar</b> |
|-----------------------------|-------------------|---------------|
| Su içeriği                  | Ağırlıkça%        | 20-30         |
| Kül içeriği                 | Ağırlıkça%        | 0.01-0.2      |
| Katı içeriği                | Ağırlıkça%        | <0.5          |
| Yoğunluk                    | kg/m <sup>3</sup> | 1100-1300     |
| Alt Isıl Değer              | Mj/kg             | 13-18         |
| pH                          | -                 | 2-3           |
| Kinematik viskozite(40°C)   | cSt               | 15-35         |

### 2.2.2.3 Gazlaştırma

Gazlaştırma prosesi, biyokütle kaynaklarını, birincil ürün olan ve doğrudan kullanılabilen gaz ürüne dönüştürmektedir. Proses, katı veya sıvı gibi yan ürünleri minimize edip gaz ürün miktarını arttırmak için yüksek sıcaklıklar ve uzun reaksiyon süreleriyle gerçekleştirilmektedir. Gazlaştırma prosesi, yüksek yanma sıcaklığı, yüksek yanma verimi, daha kontrollü yanma ve düşük emisyonlar gibi özellikleriyle doğrudan yakma yöntemine göre birçok avantaj sunmaktadır (Bridgwater, 1994).

Gazlaştırma, karbonlu maddelerin (biyokütle, kömür ve plastikler), hava, buhar, oksijen, CO<sub>2</sub> veya bunların karışımı gibi bir gazlaştırma ajanı varlığında, gaz haline dönüştürüldüğü termokimyasal kısmi oksidasyon işlemidir. Ana ürünü sentez gazı olarak adlandırılan gaz ürün başlıca H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> gazlarından oluşmakta ve bunun yanında, biyoçar, kül, tar ve yağlar da yan ürünleri oluşturmaktadır (Ruiz et al., 2012).

Gazlaştırma prosesi, piroliz işleminden daha yüksek sıcaklıklarda (700-900°C) gerçekleşir ve temel olarak kalıcı gazların (ham biyo-sentez gazları) yanı sıra ikincil ve üçüncül katran bileşiklerini üretmek için, piroliz (birincil) katranının daha fazla kırılması ile tanımlanabilir. Alternatif olarak, plazma gazlaştırma teknolojisi kullanılarak da biyokütleden sentez gazı üretilebilir. Bu işlem, plazma sentez gazı üretmek için biokütleyi ayrıştırmak için kullanılmaktadır (Aneke and Wang, 2017).

Biyokütle kaynağının, en temel kullanım alanı olan ısı ve elektrik enerjisi üretimi için doğrudan yakılmasının yanı sıra, gazlaştırma yöntemi ile değerlendirilmesi biyokütle için önemli bir teknolojidir. Bu proses, farklı ürün çeşitlerinin yanı sıra, hammadde kullanımında da yüksek esneklik sunmaktadır. Prensipte olarak, tüm biyokütle türleri gazlaştırma yöntemi ile başlıca hidrojen, karbondioksit ve metandan oluşan bir ürün gazına dönüştürülebilir. Bu gaz üründen, ısı, elektrik (güç), biyoyakıt, hidrojen ve biyometan gibi her türlü enerji veya enerji taşıyıcılarının yanı sıra kimyasal ürünler de elde edilebilmektedir. Mevcut biyokütle kaynaklarının kullanımı yüksek verimli ve sürdürülebilir olmalıdır. Gazlaştırma yöntemi biyokütle kaynaklarının kullanımı açısından yüksek potansiyel ve yüksek proses verimi sunmaktadır (Heidenreich et al., 2016).

Gazlaştırma, tüm canlılar tarafından üretilen yenilenebilir biyokütle kaynağını kullanabilen ve böylece dünyanın her yerinde bulunabilecek, gelecek vaat eden teknolojilerden birisidir. Gazlaştırma olarak adlandırılan, biyokütleyi gaz yakıtıya dönüştürme işlemi, biyokütle kaynaklı güç üretimi için anahtar teknolojidir. Türbinler veya içten yanmalı motorlarda kullanılmak üzere optimum yakıt gazı bileşimini üretmek için, gazlaştırıcı tipleri (yukarı ve aşağı akışlı), gazlaştırma ajanı (hava, buhar ve oksijen), sıcaklık, basınç ve hava-yakıt oranını içeren parametrelerin optimizasyonu büyük önem taşımaktadır (Asadullah, 2013).

Chen ve arkadaşlarının (2017), kurutulmuş fermente gübrenin gazlaştırılmasına yönelik yaptığı çalışmada, yüksek kül içeriğine sahip olan fermente gübrenin, aşağı akışlı sabit yataklı bir gazlaştırıcıda, 600 ila 800°C arasında değişen sıcaklıklarda ve 0,25 ila 0,30 aralığında değişen hava eşdeğerlik oranında gazlaştırma prosesi uygulanmıştır. Sonuçlarda, reaktörde kül tutulması gözlemlenmediği için 800°C ve

0,25-0,30 aralığındaki hava eşdeğerlik oranındaki fermente gübre gazlaştırması uygulamaları fizibil olarak görülmüştür. Orta değerdeki hava eşdeğer oranının, gaz kalitesini ve soğuk gaz verimini arttırdığı gözlemlenmiş ve 0,28 hava eşdeğer oranında optimum alt ısıl değer 4,78 MJ/Nm<sup>3</sup> ve soğuk gaz verimi %67,01 olarak gözlemlenmiştir. Yüksek hava eşdeğer oranının gaz verimini arttırdığı ve tar konsantrasyonunu düşürdüğü gözlemlenmiş ve çalışma için, hava eşdeğerlik oranı 0,30 optimum değer olarak seçilmiştir. Optimum koşullarda gaz verimi 2,15 Nm<sup>3</sup>/kg ve tar konsantrasyonu 1,61 g/Nm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir. 1,03 ila 1,08 arasında değişen molar H<sub>2</sub>/CO oranı 800°C'de elde edilmiş ve üretilen gaz kimyasal sentez prosesleri için uygun bulunmuştur. Gazlaştırmanın yan ürünleri olan biyokömür ve külün tarım uygulamalarında gübre olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Gao ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada, ceviz talaşının gazlaştırılmasında daha az tar ve daha yüksek kaliteli gaz elde etmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca, hava/yakıt oranının gazlaştırma özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, yakıt enjeksiyonu, reaktör duvarı 800°C'ye geldiğinde başlamıştır ve test 30 dakika sürmüştür. Talaşın proximate analizi sonucunda %44,28 C, 5.53 H ve 39.08 O<sub>2</sub> içeriğine sahip olduğu saptanmıştır. Bunun yanında, ultimate analiz sonuçlarında %77,80 uçucu katı, %14,37 sabit karbon, %5,87 nem içeriği, %1,96 kül içeriği ve 15,90 MJ/kg alt ısıl değere sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada hava akış debisini 18,3 ile 27,8 m<sup>3</sup>/h ve yakıt beslemesini 19,4 kg/h seviyelerinde tutarak beş farklı deney yapılmıştır. Sonuç olarak hava fazlalık katsayısının 0.23, 0.26, 0.29, 0.32, 0.35 değerlerinde olduğu görülmüştür. Hava fazlalık katsayısının 0.32 olduğu zaman karbon dönüşümü ve soğuk gaz verimliliğinin sırasıyla %94,2 ve %63 değerleriyle maksimum olduğu görülmüştür. Hava fazlalık katsayısı 0,32'den az olduğunda karbon dönüşümünün artışı, biyoçar ve gazın heterojen reaksiyonlarına bağlı olduğu, ancak hava fazlalık katsayısı 0,32'den yüksek olduğunda gaz akışının artmasıyla partiküllerin işlem sürelerinin azalması nedeniyle karbon dönüşümünün azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca optimal alt ısıl değer için (5,7 MJ/Nm<sup>3</sup>) hava fazlalık katsayısı 0,26 olarak tespit edilmiştir.

Bhoi ve arkadaşları (2018), kentsel katı atıklar ile biyokütle atığı olan dallı darı bitkisinin birlikte gazlaştırılmasının sentez gazı verimine, tar konsantrasyonuna ve

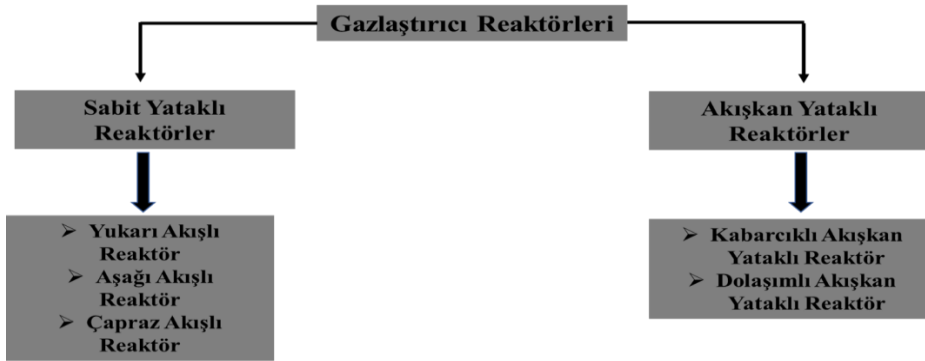
sentez gazının ısıl değerine etkilerini incelemişlerdir. Kentsel katı atıklar bölgeden pelet haline getirilmiş şekilde temin edilmiştir. Denemeler %0, %20 ve %40 kentsel atık / dallı darı olacak şekilde 2 tekerrürlü gerçekleştirilmiştir. Gazlaştırma prosesi 700°C ile 900°C aralığında gerçekleştirilmiştir. %0, %20 ve %40 oranlarındaki hammadde karışımlarından üretilen sentez gazının üst ısıl değeri sırasıyla 6.2, 6.5 ve 6.7 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. İçten yanmalı motor uygulamaları için yakıtın üst ısıl değerinin çok önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Hammadde karışımındaki kentsel katı atık oranı arttıkça, üretilen sentez gazındaki tar içeriği, %0 kentsel atıklı karışım kullanıldığında 26,1 g/Nm<sup>3</sup> iken %40 kentsel atıklı karışımında 9,9 g/Nm<sup>3</sup>'lük bir değere ulaşarak önemli ölçüde azalma gösterdiği belirtilmiştir.

Patel ve arkadaşlarının (2016), odun artıkları ile kömürün birlikte gazlaştırması üzerine yaptıkları çalışmada, karışım oranının gazın ısıl değeri, özgül gaz verimi, özgül yakıt tüketim oranı ve cüruf oluşumuna etkisi, çeşitli sıcaklık değerlerinde incelenmiştir. Gazlaştırma prosesinden önce örnekler farklı oranlarda (%10-20-30 ağırlıkça odun) karışımlar halinde hazırlanmıştır. Odun oranının %30 olduğu durumda gazlaştırıcıda cüruf oluşumunun ihmal edilebilir seviyeye geldiği tespit edilmiş ve yakıt karışımındaki odun artışının bu orandan yukarıya taşınmamasına karar verilmiştir. Gazlaştırma prosesi, basit uygulaması, stabil olması ve düşük tar içerikli gaz üretim özelliklerinden dolayı içten yanmalı motorlara uygun olan, 10 kWe gücünde, aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcıda atmosferik basınç altında gerçekleşmiştir. Çalışmada, sentez gazının soğutulmasının enerji yoğunluğunu arttırdığı gibi aynı zamanda motorun hacimsel verimini de iyileştirdiği belirtilmektedir. Bunun yanında, gazlaştırıcıdan üretilen sentez gazının önemli miktarda tar, toz ve partikül içerdiği ve bu kirleticilerin motor aksamına zararlı olduğu ve gazlaştırıcıdan çıkan sentez gazının yanma odasına enjekte edilmeden önce temizlenmesi ve soğutulmasının gerektiği belirtilmektedir. Hammadde yüklemesi 11,12 kg/h ile 10,01 kg/h aralığında karışım oranına bağlı olarak değiştirilmiştir. Yine karışımın oranına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin 1,56 kg/kWh ile 1,81 kg/kWh, gaz veriminin 2,57-2,81 Nm<sup>3</sup>/kg aralığında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 30/70'lik karışımında alt ısıl değer 4,44 MJ/Nm<sup>3</sup> ve üst ısıl

değer 4,75 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. %30 karışım oranında, yalnızca kömüre kıyasla, alt ısıl değer %6,31 oranında arttığı gözlemlenmiştir.

### 2.3 Reaktör Tipleri

Gazlaştırıcılar genellikle hammaddenin ve üretilen sentez gazının akış düzenine göre sınıflandırılmaktadırlar. Gazlaştırıcı tipleri genel olarak sabit yataklı ve akışkan yataklı gazlaştırıcılar olmak üzere 2 ana başlık altında incelenmektedir (Agarwal et al., 2018). Sabit yataklı gazlaştırıcılar en basit teknolojiye sahiptirler. Bu sayede hammadde, yalnızca oksidan ve hammadde miktarı kontrolü altında, kurutma, piroliz, gazlaştırma ve yanma işlemlerinden geçerler. Sabit yataklı reaktörlerde hammadde, kurutma, piroliz, gazlaştırma ve yanma yataklarında hareket ettiğinden dolayı, sabit yataklı reaktörler bazı kaynaklarda hareketli yataklar olarak da adlandırılabilir. Akışkan yataklı reaktörlerde ise yatak hammaddeyi düşük basınçlı bir gaz veya hava ile akışkanlaştırarak reaksiyon için hammadde ile oksidanın daha fazla temas etmesine olanak sağlar. Sabit yataklı gazlaştırıcılar yukarı (Updraft), aşağı (Downdraft) ve çapraz (crossdraft) akışlı olmak üzere 3, akışkan yataklı gazlaştırıcılar ise kabarcıklı (Bubbling) yataklı ve dolaşimli (Circulating) yataklı olmak üzere 2 kategori altında incelenmektedir. Yatakların sınıflandırılması Şekil 2.2’de sunulmuştur (Widjaya et al., 2018).



Şekil 2.2 Gazlaştırıcı Reaktörlerinin Sınıflandırılması

Ayrıca gazlaştırma ortamına bağlı olarak (Hava, oksijen veya buhar), üretilen gazın içeriği ve kalorifik değeri de değişiklik gösterebilmektedir. Hava ortamında

gazlaştırma, motorlarda ve kazanlarda yakıt olarak kullanılabilen, yaklaşık %50 azot içeren, düşük ısıl değere (5000 ila 6000 kJ/kg veya 3 ila 6 MJ/m<sup>3</sup>) sahip gaz üretir. Oksijen ortamında gazlaştırmada ise azot gibi seyrelticilerden arındırılmasının sonucu olarak daha yüksek ısıl değere (yaklaşık 15000 kJ/kg veya 10 ila 12 MJ/m<sup>3</sup>) sahip gaz üretilir. Ancak bu değer halen ısıl değeri 50000 kJ/kg (40 MJ/m<sup>3</sup>) olan doğal gazın ısıl değerinden oldukça düşüktür. Tablo 2.3'de gazlaştırma ürünlerinin ısıl değerlerinin ve bileşiminin, doğal gaz ile karşılaştırılması verilmiştir (Basu 2006).

**Tablo 2.3** Gazlaştırma ürünlerinin doğal gaz ile karşılaştırılması

| Yakıtlar                      | Hacimce Oran (%) |                               |                |    |                 |       | Alt Isıl Değer (kJ/kg) |
|-------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------|----|-----------------|-------|------------------------|
|                               | CH <sub>4</sub>  | C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> | H <sub>2</sub> | CO | CO <sub>2</sub> | Diğer |                        |
| Hava ortamında gazlaştırma    | 1                | -                             | -              | 25 | 7               | 49    | 5000                   |
| Oksijenli ortamda gazlaştırma | 5                | -                             | -              | 60 | 3               | 2     | 15000                  |
| Doğal gaz                     | 97,3             | 2,4                           | -              | -  | -               | 0,74  | 55000                  |

### 2.3.1 Sabit yataklı reaktörler

Sabit yataklı reaktörler en eski gazlaştırıcılar olarak bilinirler. Genel olarak yukarı akışlı, aşağı akışlı ve çapraz akışlı olmak üzere üç ana grup altında incelenmektedirler. Sabit yataklı reaktörler 10 MW'a kadar olan küçük çaplı uygulamalar için uygun olması nedeniyle genellikle biyokütle kaynaklarını, merkezi olmayan enerji üretimi için kullanırlar (Agarwal et al., 2018). Gazlaştırıcıların isimleri reaktif materyalin akış yönüne göre belirlenmektedir. Karşı akımlı kütle akışı, hammadde ve reaktif malzemenin (hava veya buhar gibi) zıt yönlerde akması anlamına gelir ve yukarı akış olarak adlandırılır. Bu akışın tam tersi, yani hammadde ile reaktif materyalin aynı yönde akması ise aşağı akış olarak belirtilmektedir (Warnecke, 2000). Yukarı akışlı ve aşağı akışlı reaktörler, gazlaştırıcı tipleri arasından en yavaş tepki süresine sahiptirler ve değişen yüklemelerde iyi sonuçlar vermeleri beklenemez. Ayrıca hem yukarı akışlı hem de akışkan yataklı reaktörlerden elde edilen gaz, büyük oranlarda tar içermektedir. Bunun bir sonucu

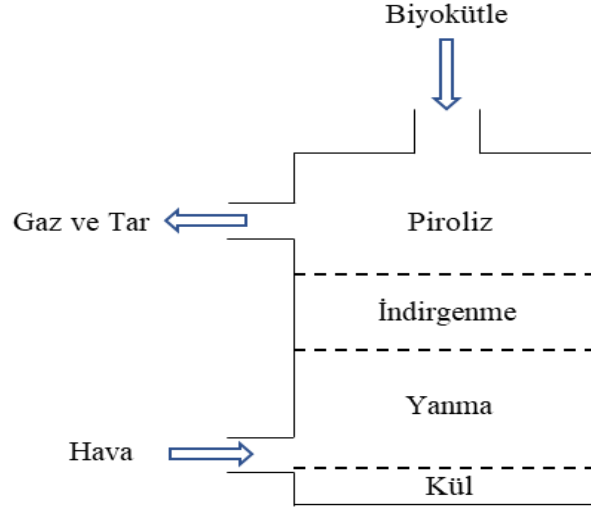
olarak bu tip reaktörlerin motor uygulamaları için kullanımı uygun değildir (Reed and Das 1988).

Sabit yataklı gazlaştırıcılar, kurulumu basit olan, yüksek karbon dönüşüm oranları, düşük gaz debisi ve uzun bekleme süreleri ile küçük ölçekte çalışan reaktör tipleridir. Bu gazlaştırıcı tiplerinde, sentez gazının karışımını da etkileyen, tardan etkilenildiği rapor edilmiştir. Ancak, tar kontrol tekniklerindeki son gelişmeler güvenilir seçenekler sağlamaktadır. Öte yandan, akışkan yataklı gazlaştırıcılar, düzgün ve hızlı ısı transferi, reaktör içerisindeki parçacık karakteri açısından, sabit yataklı reaktörlere göre avantajlıdır. Ancak akışkan yataklı gazlaştırıcılar, küçük biyokütle parçacık boyutu gerektirir ve bu gereklilik yüksek enerji tüketimi ve maliyetini de beraberinde getirmektedir (Sansaniwal et al., 2017).

### **2.3.1.1 Yukarı akışlı reaktörler**

Yukarı akışlı gazlaştırıcılarda hammadde (biyokütle) gazlaştırıcının üst kısmından ve gazlaştırıcı ortam (hava, oksijen veya buhar) ise gazlaştırıcının alt kısmından beslenir. Üretilen sentez gazı reaktörü üst taraftan terk ederken oluşan katı maddeler reaktörün dibinde birikmektedir. Yukarı akışlı gazlaştırıcı şekli ve gazlaştırma evreleri Şekil 2.3'de sunulmuştur. Oksijen ile hammaddenin birleştiği yer olan ızgarada sıcaklık en yüksek seviyelere ulaşmakta ve yanmayı sağlamaktadır. Sıcak gaz, endotermik gazlaşma reaksiyonlarına ısı sağlayarak reaktörün üst kısımlarına doğru hareket etmekte ve biyokütlenin düşük sıcaklıklarda (200-500°C) pirolize olmasını sağlamaktadır. Proseste birincil tar bu sıcaklık aralığında oluşmaktadır. Oluşan bu tarın daha soğuk olan yukarı bölgelere hareket etmesi nedeniyle, birincil tar, ikincil tara veya gaz ürüne dönüşmemektedir. Bu nedenle yukarı akışlı gazlaştırıcılar en yüksek tar üretimini yapmaktadırlar. Bu tip gazlaştırıcılarda genellikle hammaddenin kütlece %10'u ile %20'si tara dönüşmektedir (Basu, 2010).





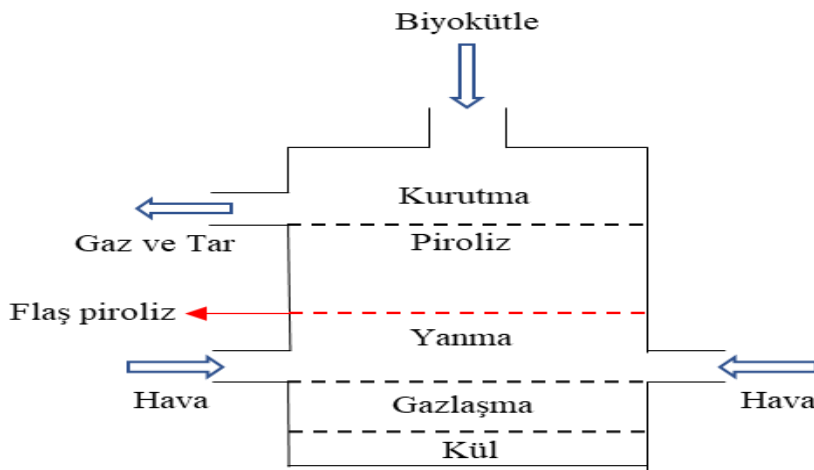
Şekil 2.3 Yukarı Akışlı Gazlaştırıcı

Yukarı akışlı gazlaştırmada, hava/oksijen/buhar ile materyal, 1000-1400°C sıcaklıklarda, bir ızgaranın üzerinde temas ederek gaz üretir. Akmakta olan biyokütleden geçen bu sıcak gaz, biyokütleyi ardışık olarak daha düşük sıcaklıklarda pirolize eder ve sonunda biyokütleyi kurutur. Yukarı akışlı gazlaştırıcılar, gazın doğrudan yanması için kullanılacak olan sistemlerde kullanışlı olsa da yüksek tar seviyesi, gazın başka amaçlarda kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Milne and Evans, 1998).

10 MW<sub>t</sub> altındaki kapasitelerde ısıl uygulamalar için yukarı akışlı reaktörler en yaygın reaktör tipi olarak bilinmektedir. Çünkü bu tip reaktörlerde gaz, reaktörden nispeten düşük sıcaklıklarda çıkar. Ayrıca termal veriminin yüksek olması nedeniyle reaktör, nem oranı %50'ye kadar olan biyokütlenin ön kurutma işlemi olmadan gazlaşmasını sağlamaktadır. Bunun yanında bu reaktör tipinde hammaddenin parçacık boyutu kritik önem taşımamaktadır. Yukarı akışlı reaktörlerde diğer reaktör tiplerine göre daha fazla tar üretilmektedir. Ancak bu durum ısıtma uygulamaları için, yeterli tesisat yapıldığı takdirde bir sorun oluşturmamaktadır. Ancak bu reaktör tipi, kapsamlı bir tar temizliği gerektirdiğinden dolayı güç uygulamaları için iyi bir aday olamamaktadır (Beenackers, 1999).

### 2.3.1.2 Aşağı akışlı reaktörler

Şekil 2.4’de gösterildiği gibi, aşağı akışlı gazlaştırıcılarda hammadde ve gaz aşağıya doğru hareket etmekte ve sıcaklığın en yüksek olduğu nokta aşağı yanma bölgesi olarak bilinmektedir. Aşağı akışlı reaktörlerde, tar oluşumu, hammadde besleme noktasına yakın ve daha düşük sıcaklıklarda (200-500°C) olan kurutma bölgesinde meydana gelmekte ve oluşan tar, havadaki oksijenle birlikte aşağıya doğru daha sıcak bölgeye hareket etmektedir. Bu hareket sayesinde, ortamdaki oksijen varlığı ve yüksek sıcaklık sayesinde, tar, sıcaklığı 500°C ile 700°C aralığındaki besleme parçacıkları arasında kolayca alev alabilmekte ve gaz sıcaklığını 1000 °C ile 1400 °C’ye kadar yükseltebilmektedir. Bu olay “flaş piroliz” olarak adlandırılmaktadır. Bu sayede tar, en yüksek sıcaklık bölgesinden geçerken oksijen ile temas halinde yoğuşamayan gazlara dönüşebilmektedir (Basu, 2010). Böylece birincil tarların yaklaşık %0,1’i ikincil tarlara dönüştürülmekte ve geri kalanlar yanarak gazlaştırmaya enerji sağlamaktadır. Bu nedenden dolayı, aşağı akışlı gazlaştırıcılar  $<1\text{g}/\text{Nm}^3$  üretim miktarıyla en düşük tar üretimine sahiptirler. Aşağı akışlı gazlaştırıcılardaki düşük tar seviyeleri bu tip reaktörleri, temiz gaz kullanımını gerektiren durumlar için kullanılabilir hale getirmektedir (Milne and Evans, 1998).

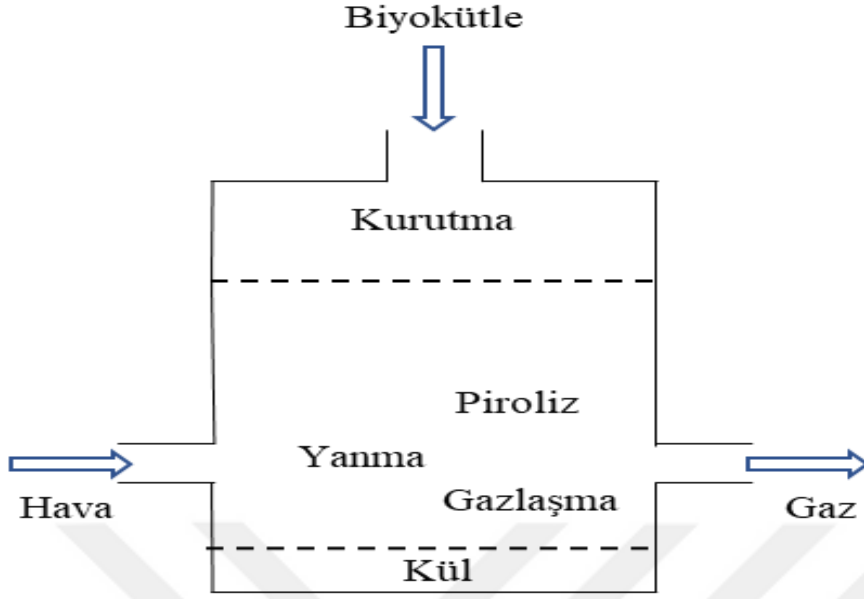


Şekil 2.4 Aşağı Akışlı Gazlaştırıcı

Aşağı akışlı gazlaştırıcılar genellikle kapasiteleri 10 kW'tan 1 MW'a kadar olan küçük ölçekli uygulamalar için daha uygundur. Bu tip reaktörlerin, bazı küçük/orta ölçekli ticari uygulamalarda, elektrik üretiminde yakıt olarak biyokütle kaynaklarını kullandığı bilinmektedir. Aşağı akışlı gazlaştırıcılar, imalatı ve işletiminin kolay olmasının yanında üretilen gazın tar oranının düşük olmasından dolayı çok ilgi görmektedir. Bununla birlikte, düşük kütle yoğunluğuna sahip hammaddeler için aşağı akışlı reaktörlerin, ızgara blokajı, kanallama ve köprüleme gibi dezavantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Aşağı akışlı gazlaştırıcıların bir diğer dezavantajı ise yalnızca düşük nem oranına sahip hammaddeler için uygun olmalarıdır. Nem içeriği %30'dan daha yüksek olan hammaddelerin kullanımı durumunda, üretilen sentez gazının kalitesi ve dolayısıyla gazlaştırma verimliliğinin düştüğü bilinmektedir (Susastriawan et al., 2017).

### **2.3.1.3 Çapraz akışlı reaktörler**

Çapraz akışlı gazlaştırıcılar, hammaddenin üstten beslendiği ve oksidanın reaktörün yan kısmından bir enjektör ile enjekte edildiği reaktörler olarak bilinmektedir. Bu tip gazlaştırıcılar, genellikle kül içeriği çok düşük olan hammaddelerin gazlaştırılması için kullanılmaktadır. Şekil 2.5'de gösterildiği gibi, aşağı ve yukarı akışlı reaktörlerin aksine çapraz akışlı reaktörler, üretilen sentez gazını, reaktöre yan taraftan verilen havanın karşı duvarından dışarıya salmaktadır. Bu yapılandırma nedeniyle çapraz akışlı reaktörler aynı zamanda yan akışlı olarak da adlandırılabilir.



Şekil 2.5 Çapraz Akışlı Gazlaştırıcı

Yüksek hızlı hava, gazlaştırıcıya ızgara üzerinde belirli bir yükseklikte ayarlanmış olan enjektörden girmekte ve enjektör ucunun önündeki aşırı oksijen hammaddenin bir kısmının yanmasını (oksidasyonunu) sağlamaktadır. Bu sayede, 1500°C'nin üstünde, çok yüksek sıcaklıkta bir yanma bölgesi oluşturulmaktadır. Yanma bölgesinde üretilen ısı, piroliz bölgesine hareket etmekte ve bu bölgeden geçen taze hammaddenin pirolize olmasını sağlamaktadır (Basu, 2010).

Diğer sabit yataklı gazlaştırıcılardan farklı olarak, çapraz akışlı gazlaştırıcılar ayrı bir kül tablasına, yanma ve gazlaştırma bölgesine sahiptirler. Çapraz akışlı gazlaştırıcıların ana avantajları, yüke karşı hızlı tepki vermeleri, esnek gaz üretimi, kısa başlangıç zamanı, kuru hava akımıyla uyumluluğu ve düşük yüksekliğe sahip olmasıdır. Bu tip gazlaştırıcıların, yüksek tar içeriği ve çok küçük parçacık boyutlarında çalışmak için uygun olmadığı belirtilmektedir. Ayrıca, yalnızca yatak geçirgenliğinin iyi olması ve literatürde bu gazlaştırıcılar için çok fazla çalışma olmaması nedeniyle yalnızca birkaç uygulamaya sahip oldukları bilinmektedir (Sansaniwal et al., 2017).

### 2.3.2 Akışkan yataklı reaktörler

Sabit yataklı reaktörlerin eksikliklerinin giderilmesi amacıyla akışkan yataklı reaktörler tasarlanmıştır. Akışkan yataklı reaktörlerde, kum, kireçtaşı, beyaz mermer ve olivin gibi yataklar, hava, oksijen veya buhar ile akışkanlaştırılır. Bu reaktörler biyokütle ve yatak malzemesinin erime sıcaklığının altında çalışmaktadır. Akışkan yataklı reaktörler, sabit yataklılardan daha iyi karıştırma kapasitesi ve daha yüksek ısı transfer hızına sahiptirler. Bunun sonucu olarak, daha yüksek reaksiyon ve dönüşüm oranı sağlayan stabil bir reaktör ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, akışkan yataklı gazlaştırıcılar, sabit yataklı gazlaştırıcılara göre daha yüksek kütle akış hızına, hammadde esnekliğine, daha az tar ve partikül üretimine sahiptirler (Motta et al., 2018).

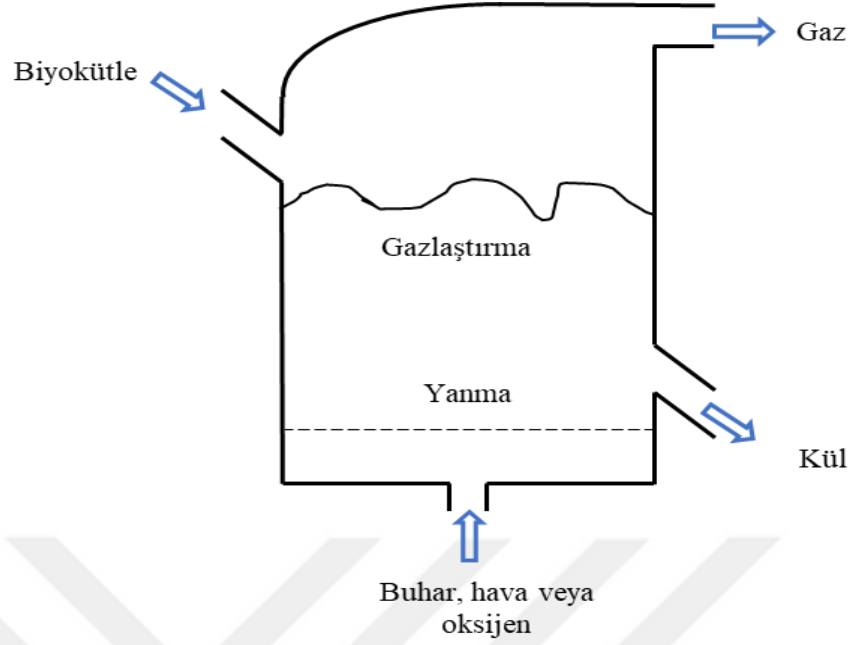
Akışkan yataklı reaktörlerin çalışma sıcaklıkları, genellikle 800 ile 900 °C aralığında olup, kullanılan yatağın erime noktasına göre değişmektedir. Bu nedenle, böylesine düşük sıcaklıklardaki gazlaşma, herhangi bir katalizör kullanılmadığı sürece kimyasal dengeye ulaşamamaktadır. Kimyasal dengenin sağlanamamasının bir nedeni de kısa gaz bekleme süresi olarak bilinmektedir. Bu nedenlerden dolayı, akışkan yataklı reaktörlerde üretilen gazın hidrokarbon içeriği sabit yataklı gazlaştırıcıların seviyesine inmektedir. Bununla birlikte, bu tip gazlaştırıcıların karbon dönüşüm verimi %95 olup, sabit yataklı gazlaştırıcılara göre nispeten daha yüksektir. Ayrıca, akışkan yataklı reaktörler, mükemmel karışım özellikleri, tasarımları, daha çeşitli hammadde türü ve boyutu ile çalışabilmeleri açısından büyük ölçekli uygulamalar için uygundur (Sansaniwal et al., 2017).

Akışkan yataklı reaktörler, yatağın akış hızına bağlı olarak, kabarcıklı akışkan yataklar ve dolaşımli akışkan yataklar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Dolaşımli akışlı reaktörler, katı partikülleri gaz akışı ile yukarı yönde sürükleyerek, daha yüksek akış hızlarında (genellikle 3-10 m s<sup>-1</sup>) çalışırken, baloncuklu reaktörler nispeten daha düşük akış hızlarında (genellikle 1 m s<sup>-1</sup> altında) çalışmaktadır. Bu parçacıklar, sirküle olan gazdan ayrılarak tekrar yatağın altına dönmektedir. Her iki reaktörde de bir yakıtın gaz ürüne dönüştürülmesi sırasındaki reaksiyonların çoğu,

yoğun yatak bölgesinde gerçekleşmektedir. Akışkan yataklı reaktörlerin en zayıf noktaları, yüksek oranda kül ve alkali metaller içeren hammaddeler kullanıldığında ortaya çıkmaktadır. Hammadde içeriğindeki, alkali metallerin oranı yüksek olduğunda, bu bileşikler yatak malzemesinde veya yakıt külünün kendisinde bulunan silika ile ötektikler oluşturabilmektedir. Oluşan ötektikler saf silikadan daha düşük erime noktasına sahiptir ve bu nedenle reaktör proses sıcaklığına gelmeden erimeye başlarlar. Bu erime sonucunda yapışkanlığa neden olur ve partiküllere yapışarak daha büyük toprakların oluşmasına yol açar. Bu toprakların varlığı reaktörün hidrodinamiklerini önemli ölçüde değiştirmekte ve sonunda reaktörün akışkanlığının giderek çökmesine (defluidization) neden olmaktadır. (Siedlecki et al., 2011).

### **2.3.2.1 Kabarcıklı akışkan yataklı reaktörler**

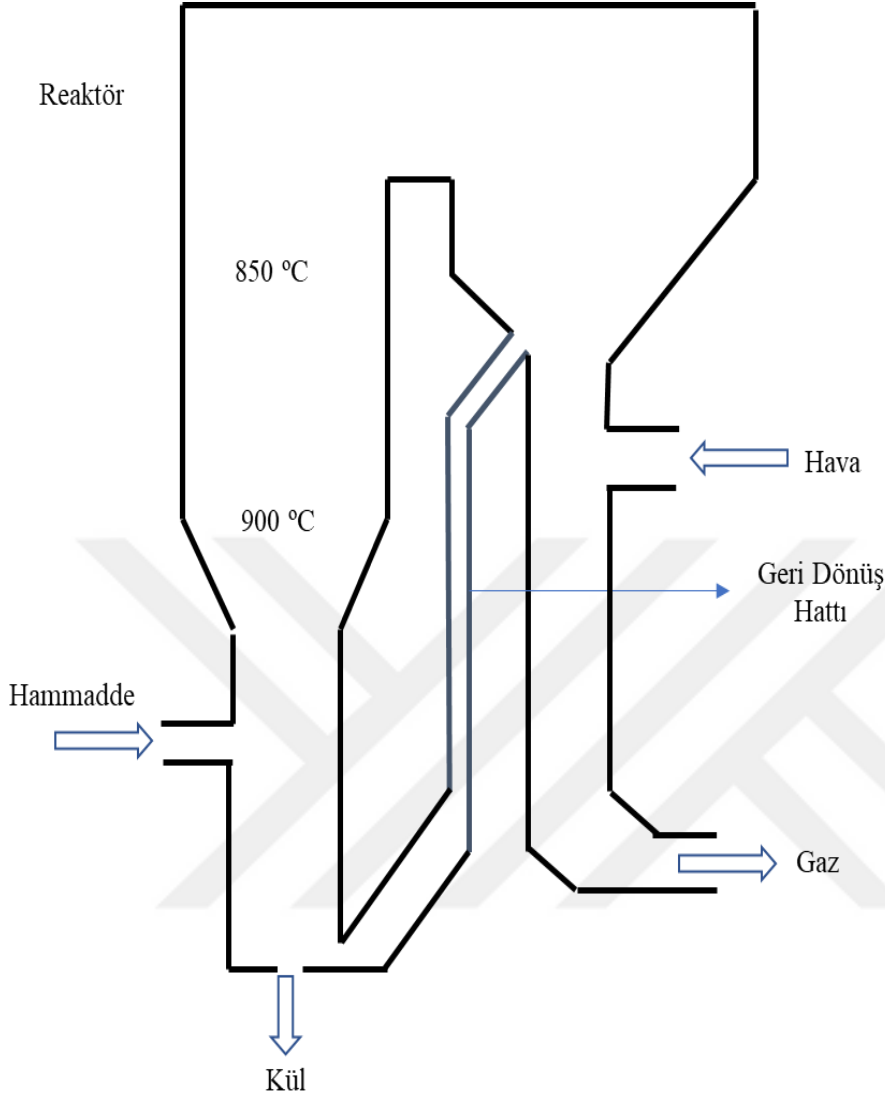
Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcılar, biyokütlenin gazlaştırılması için en basit ve muhtemelen en uygun maliyetli reaktörler olarak belirtilmektedir. Bu tip reaktörlerde, pülverize edilmiş (toz haline getirilmiş) kaynaklar dahil olmak üzere, çok çeşitlilikteki ve boyuttaki biyokütle kaynakları hammadde olarak kullanılabilir. Ayrıca, bu reaktörler hammadde ile yatak arasında yüksek oranda ısı transferi sağlamak ve bu transferi yatak boyunca üniform halde devam ettirmektedir (Alauddin et al., 2010). Kabarcıklı bir akışkan yatakta, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, üstten veya yandan beslenen hammadde, akışkan yatağın gövdesinde hızlı bir şekilde karışmaktadır. Gazlaştırma ajanı (hava, oksijen, buhar veya bunların karışımı) reaktörün alt kısmından gönderilerek, ayrıca akışkanlaştırıcı görevi görmektedir. Akışkan yataklı gazlaştırıcılar, kül birikmesini önlemek için genel olarak 800 ile 1000 °C sıcaklık aralığında çalışmaktadırlar. Bu sıcaklık, biyokütle, katı atık ve linyit gibi reaktif yakıtlar için kullanılabilir derecededir (Basu, 2010).



Şekil 2.6 Kabarcıklı Akışkan Yataklı Reaktör

### 2.3.2.2 Dolaşımli akışkan yataklı reaktörler

Dolaşımli akışkan yataklı gazlaştırıcılar, biyokütle gazlaştırma prosesinde uzun gaz bekleme süresine sahip olduğu için özel bir cazibeye sahiptir. Bu özellikle yüksek uçucu madde oranına sahip hammaddeler için çok uygun olabilmektedir. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi dolaşımli akışkan yataklı reaktörler, tipik olarak bir yükseltici, bir siklon ve bir katı geri dönüşüm cihazından oluşmaktadır. Kabarcıklı akışkan yataklar 0.5 ile 1 m/s akış hızına sahipken dolaşımli akışkan yataklar 3.5 ile 5,5 m/s değerleri ile çok daha fazla akış hızına sahiptirler. Dolaşımli akışkan yataklı reaktörler, hammadde ve uygulamaya göre 800 ile 1000 °C sıcaklık aralığında çalışmaktadır (Basu, 2010).



**Şekil 2.7** Dolaşimli akışkan yataklı reaktör

Dolaşimli akışkan yataklı reaktörlerde, kabarcıklı akışkan yataklı reaktörlere göre, hava çok daha yüksek bir hızda ızgara boyunca etki etmektedir. Izgaranın fırının tepesine kadar uzanması sayesinde kabarcıklı akışkan yataklara göre çok daha az yoğunlukta bir yatak elde edilmektedir. Bunun bir sonucu olarak da katı partiküller sürekli olarak fırından bertaraf edilmektedir. Bu katılar, bir gaz-katı seperatöründe yakalanmakta ve yeterince yüksek oranda yatağın tabanına döndürülmektedir. Bu sayede katılar tekrar ayrıştırılabilmektedir.



### 2.3.3 Plazma reaktörler

Katı, sıvı ve gazın yanı sıra plazma maddenin dördüncü hali olarak bilinmektedir. Bir gaz çok yüksek sıcaklıklara ısıtıldığı zaman (10000 °C) maddenin plazma durumu belirir ve yüksek oranda iyonlaşmış hale gelir ve böylece elektrik iletimi gerçekleştirilebilir. Bu yüksek sıcaklıklar, iki elektrot arasında oluşturulan ark sayesinde elde edilebilmektedir. Plazmanın yüksek sıcaklığı, reaktöre beslenen hammaddenin hemen hemen elementel formunda bozunmasına olanak sağlamaktadır. Plazma reaktörlerin bir diğer avantajı ise toksik bileşiklerin güvenli elementlere ayrışmasını sağlaması olarak belirtilmektedir (Nicodeme et al., 2018).

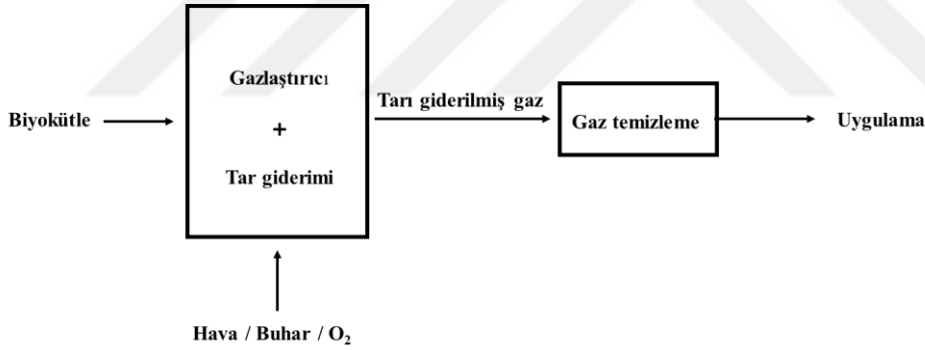
### 2.4 Sentez Gazının Arıtılması

Gazlaştırmada kirletici terimi, partiküller, tar olarak bilinen yoğuşabilen organik bileşimler, amonyak (NH<sub>3</sub>) gibi azotlu bileşimler ve hidrojen siyanür (HCN), hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), karbonil sülfür (COS), karbon disülfür (CS<sub>2</sub>) gibi sülfür içerikli organik bileşikler, hidrojen halojenürler ve hidrojen klorür (HCl), klor (Cl) gibi halojenler ve sodyum (Na) ve potasyum (K) gibi iz elementleri tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu kirletici maddeler, biyokütle içerisindeki uçucu organik ve inorganik bileşenlerden kaynaklanır ve bu yüzden sentez gazında geniş çapta değişebilen konsantrasyonlarda bulunmaktadır. Diğer kirleticilerle karşılaştırıldığında, tar birim gaz kütlede en çok bulunan kirletici olarak görülmektedir. Bu yüzden tar, gaz iyileştirme çalışmalarının odak noktası olmuştur (Abdoulmoumine et al., 2015).

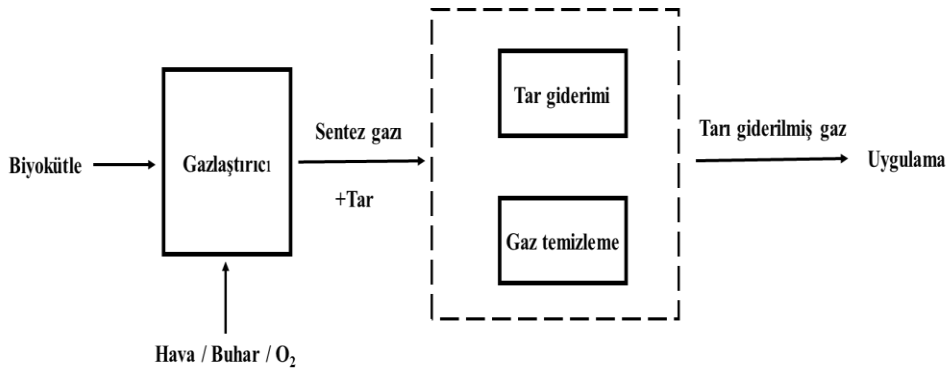
Biyokütlenin gazlaştırma prosesinin en büyük sorunu tarın oluşumuyla ilintilidir. Tarın oluşumu, üretilen gazın daha düşük bir ısıl değere sahip olmasının yanında 350 °C'nin altındaki çalışmalarda yoğuşma sonucu kirlilik oluşturarak proseste sorunların çıkmasına neden olabilmektedir (Hurley et al., 2011). Daha genel bir tanımla tar, yoğuşabilen karmaşık bir hidrokarbon karışımıdır. Tar hem içten yanmalı motorlarda hem de kimyasal sentez reaksiyonlarında en istenmeyen bileşendir (Cui et al., 2010). Tarın varlığı gazlaştırma sistemlerinde, borular ve

filtrelerde tıkanıklık ve ısı iletim veriminin azalması gibi prosesi etkileyebilecek sorunlara neden olmaktadır. Tar tolerans sınırı, sentez gazının uygulama alanına göre değişiklik göstermektedir. Bu tolerans limitleri; kompresör uygulamaları için  $\sim 500$  mg/Nm<sup>3</sup>, içten yanmalı motorlar için  $\sim 100$  mg/Nm<sup>3</sup> ve doğrudan yanmalı endüstriyel gaz türbini uygulamaları için  $\sim 5$  mg/Nm<sup>3</sup> olarak bilinmektedir (Filippis et al., 2015).

Ekonomik ve optimize edilmiş bir şekilde tar giderimi için eski metotların geliştirilme çalışmaları devam etmektedir. Tar miktarının önemli ölçüde giderildiğini iddia eden bazı karmaşık seçenekler mevcuttur. Ancak, tar giderimi metodunun, üretilen gazın yapısını etkilememesi, ekonomik ve fizibil olmasından daha önemlidir. Mevcut tüm yöntemler, birincil ve ikincil tar giderim metodu olmak üzere, şekil 2.8 ve şekil 2.9'de gösterildiği gibi, tarın giderildiği yere bağlı olarak (gazlaştırıcının içerisinde ve dışarısında olmak üzere) iki şekilde kategorize edilmektedir (Devi et al., 2003).



Şekil 2.8 Birincil tar giderim metodu



Şekil 2.9: İkincil tar giderim metodu

Biyokütle dönüşümünde kullanılmakta olan termal proseslerin geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir. Bu proseslerdeki en önemli problemlerden birisi üretilen sentez gazının içeriğindeki tar varlığı olarak bilinmektedir. Tar varlığının, içten yanmalı motorlara, gaz türbinlerine ve diğer makinelere zarar verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle sentez gazı içeriğindeki tarın temizliği ve azaltılması birçok araştırmmanın hedefi olmuştur. Gazlaştırma prosesi yalnızca çok düşük miktarlarda tar üretmektedir ve tar üretimini önlemek için büyük bir potansiyele sahiptir (Henriksen et al., 2006).

## **2.5 Sentez Gazı Kullanım Alanları**

Sentez gazı, biyoyakıt (metanol ve etanol), amonyak, hidrojen, sentetik doğal gaz ve dimetil eter gibi katma değerli ürünler elde etmek için kullanıldığı gibi ısı ve elektrik enerjisi üretimi için de kullanılmaktadır. Bu ürünlerin üretimi sentez gazının bileşimi ile doğrudan ilgilidir (Toro et al., 2018).

### **2.5.1 Sıvı Yakıt ve Kimyasal Üretiminde Kullanımı**

Kimyasal bileşimi sayesinde sentez gazı, birçok uygulama alanına sahiptir. 2006 yılında en yüksek hacimli sentez gazı, amonyak sentezinin ardından petrol rafine proseslerinde hidrojen gazı kaynağı olarak ve metanol üretiminde reaksiyon başlatıcı olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, 2040 yılına gelindiğinde, sentez gazı talebinin özellikle, yakıt ve yenilenebilir kimyasal sektörlerinde olacağı tahmin edilmektedir. Sentez gazı, ısı ve elektrik enerjisi üretiminde kullanıldığı gibi sıvı yakıt üretiminde de kullanılmaktadır. Bunun yanında, Fischer-Tropsch gibi gazdan sıvı üretimi ve biyo metanolden yakıt üretimi gibi prosesler sayesinde sentez gazı sıvı yakıt üretiminde giderek önemli hale gelecektir (Nicodeme et al., 2018).

Fischer-Tropsch sentezi için tipik çalışma sıcaklığı 200°C ile 350°C, basıncı ise 25 ile 60 bar arasındadır. Bu işletim parametreleri, hafif sentetik ham yağdan, hafif olefinlere ve mumsu ağır hidrokarbonlara kadar geniş bir hidrokarbon yelpazesinin üretimine olanak sağlamaktadır. Ham yağın, hidrokraking veya izomerleştirilmesi, olefinleri parçalamak için ideal bir besleme stoku olan dizel yakıt, yağlama yağları

veya neftyağına yol açmaktadır. Dizel üretimi için ideal sıcaklık 220°C ile 250°C aralığında iken benzin ve hafif olefinleri oluşturmak için 330°C ila 350°C arasında yüksek bir sıcaklık gerekmektedir (Nicodeme et al., 2018).

### **2.5.2 Isı ve Güç Uygulamalarında Kullanımı**

Biyokütleyi gazlaştırmanın temel avantajı, daha önce yeterli verim elde edilemeyen, merkezi olmayan kombine ısı ve güç (kojenerasyon) santrallerinin kurulmasına olanak sağlamasıdır. Geleneksel teknolojiye kıyasla, yüksek güç verimliliği potansiyeli (35-40%) nedeniyle biyokütle gazlaştırıcısı ve gaz motorunun kombinasyonu küçük ölçekli tesisler için gelecek vadeden bir alternatiftir. Sentez gazı hali hazırda çoğu durumda kojenerasyon sistemlerinde ısı ve elektrik enerjisi üretimi için yakıt olarak kullanılmaktadır. Sentez gazı, ayrıca kimyasal ürün sentezi veya biyoyakıt üretimi için kullanılabilir (Strzalka et al, 2017).

Kombine ısı ve güç sistemleri için biyokütlenin gazlaştırılması, özellikle güç çıkışı 10 MWe'dan daha düşük olan, küçük ölçekli santraller için gelecek vadeden bir teknolojidir ve biyokütlenin doğrudan yakılmasına cazip bir alternatif sunmaktadır. Biyokütle gazlaştırma ile gaz motorlarının kombinasyonu olan kombine ısı ve güç (kojenerasyon) üniteleri, %35-40'lık bir verim potansiyeli ile, küçük ölçekli biyokütleden güce dönüşüm proseslerinde mantıklı bir seçimdir ve konvansiyonel teknolojiler ile rahatlıkla rekabetçi olabilmektedir. Gelişmekte olan gazlaştırma teknolojisi, daha önce küçük ölçekte yeterince verimli olamamış, merkezi olmayan santrallerin kurulabilmesini mümkün kılmaktadır. Biyokütlenin yüksek verimle, merkezi olmayan kojenerasyon ünitelerinde kullanılabilirliği, bölgesel ısıtmanın yaygın olarak uygulandığı bölgelerde cazip olmaktadır. Gazlaştırma yönteminin yeni santrallerde kullanılmasının yanında, halihazırda doğal gazla beslenen kojenerasyon santrallerinin, biyokütle gazlaştırma ile gaz motoru kombinasyonuna dönüştürülmesi için çok büyük bir potansiyel mevcuttur (Thomsen et al., 2011).

Biyokütlenin gazlaştırılması ile üretilen gaz, özellikle elektrik erişimi olmayan kırsal bölgelerde, içten yanmalı motorlar veya türbinlerde güç üretimi için kullanılabilir. 2000 yılında İsveç'in Varnamo şehrinde yapılan bir çalışma sonucu pilot ölçekli bir gazlaştırma santrali kurulmuştur. Bu tesis yaklaşık 18 MW<sub>t</sub> eşdeğeri kadar odun atıklarını kullanarak 6 MWh elektrik (4 MW<sub>e</sub> gaz türbini ve 2 MW<sub>e</sub> buhar çevrimi olmak üzere) ve 9 MWh ısı enerjisi üretmeyi başarmıştır. Üretilen sentez gazının alt ısıl değeri yaklaşık 5-6 MJ/Nm<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir (Anis and Zainal 2011).

Lim ve Alimuddin'in (2008) yapmış oldukları çalışmada akışkan yataklı gazlaştırıcıların, özellikle tarımsal endüstriden kaynaklı biyokütle kaynaklarının bol olduğu ve elektriğe erişimin zor olduğu üçüncü dünya ülkelerinde, kırsal alanlar için potansiyel bir teknoloji olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, 733°C yatak sıcaklığında ve yakıt fazlalık katsayısı 0,23 olan bir reaktörden üretilen gazın kalorifik değeri 4.74 MJ/m<sup>3</sup>, sistemin verimi %61,32 ve sistemin termal gücü ise 355,55 kW<sub>t</sub> olarak tespit edilmiştir. Kırsal bölgeler için bu termal güçten, bir dizel motor kullanılarak 100 kW<sub>e</sub> güç üretilebileceği ve bu gücün 100 hanenin elektrik ihtiyacını karşılamak için yeterli olduğu belirtilmektedir.

Aneke ve Wang'ın (2017) yaptığı çalışmada, Aspen Plus® ile tar giderimi ve plazma gazlaştırma işlemi için plazma reaktör ile biyokütle gazlaştırma modelleri oluşturulmuş ve termodinamik olarak analiz edilmiştir. Analizler, plazma teknolojisinin gaz türbini uygulaması için, tar içeriği kabul edilebilir düzeyde olan, sentez gazı üretebileceğini göstermektedir. Ancak bu, büyük bir enerji tüketimini beraberinde getirmektedir. Plazma gazlaştırma prosesinin termodinamik verimi %37,3 iken plazma tar giderimi ile kombine biyokütle gazlaştırma prosesinin termodinamik verimi %43,6 olarak bulunmuştur. Plazma gazlaştırma prosesi için kaydedilen düşük verimliliğin, biyokütlenin gazlaştırılması için gerekli olan yüksek sıcaklığa ulaşmak için gereken yüksek elektrik enerjisinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı belirtilmektedir. Düşük verimliliğin bir sonucu olarak, ham sentez gazından tar temizliği veya plazma gazlaştırmanın teknolojik olarak mümkün olsa da gaz türbini uygulamasına sentez gazı üretmek için uygun bir yol olmadığı raporlanmaktadır. Bununla birlikte, eğer plazma reaktörünün elektrik enerjisi, rüzgâr

ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından, ihtiyaç fazlası enerji üretildiği dönemlerde, karşılabilir ise enerji depolama için uygun bir seçenek olabileceği belirtilmektedir.

Indrawan ve arkadaşlarının (2017), düşük kaliteli biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesi amacıyla yaptıkları çalışmada biyokütle hammaddesi olarak, bölgede bolca bulunmasından dolayı dallı darı bitkisi tercih edilmiştir. Gazlaştırma prosesi için 60 kW kapasiteli patentli bir gazlaştırıcı kullanılmış ve üretilen sentez gazının alt ısı değerinin yaklaşık 7 MJ/Nm<sup>3</sup> olduğu tespit edilmiştir. Doğal gaz beslemeli, buji ateşlemeli, içten yanmalı 10 kW kapasiteli bir motor, hava-yakıt oranını ölçmek / kontrol etmek için ve doğrudan, üretilen sentez gazını yakıt olarak kullanabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Ayrıca, motorun operasyonel özelliklerini değerlendirmek için, motor yükü, bir elektrik yük bankası ile regüle edilmiştir. Motor emisyon ve performansını değerlendirmek için referans besleme olarak, (alt ısı değeri 37,79 MJ/Nm<sup>3</sup> olan) doğal gaz kullanılmıştır. Sentez gazı kullanılarak, maksimum yükte (5kW), net elektrik verimi %21,3 ve özgül yakıt sarfiyatı 1,9 kg / kWh olarak görülürken aynı yükte doğal gaz için elektrik verimi %22,7 ve özgül yakıt sarfiyatı ise 0,3 kg/kWh olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında, motorun NO<sub>x</sub> ve HC emisyonlarının besleme gazından ve yükten önemli ölçüde etkilendiği, ayrıca, CO ve SO<sub>2</sub> emisyonları yük değişiminden önemli ölçüde etkilenmezken, CO<sub>2</sub> emisyonunun artan yük ile önemli ölçüde yükseldiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, mevcut doğal gaz beslemeli, buji ateşlemeli motor ile gazlaştırma sisteminin birleştirilmesinin, yüksek verim ve düşük emisyonlar ile off-grid güç uygulamalarına destek olarak sürdürülebilir enerji üretebilmesine imkan sağlayacağı belirtilmiştir.

Homdoun ve arkadaşlarının (2015), tarımsal kökenli biyokütlenin aşağı akışlı bir gazlaştırıcı vasıtasıyla buji ateşlemeli motorlarda yakıt olarak kullanılması üzerine yaptığı çalışmada; 0,6 L, tek silindirli, sıkıştırma ateşlemeli, atmosferik bir motor, buji ateşlemeli motora dönüştürülmüş ve 5 kW'lık bir dinamometreye bağlanmıştır. 9,7:1 ile 17:1 arasında değişen sıkıştırma oranının, 1000 ile 2000 rpm arasında değişen motor devirlerinin ve %20 ile %100 aralığındaki yüklerin, motor torku, güç çıkışı, termal verim, özgül yakıt sarfiyatı ve emisyonlar açısından motor

performansına etkisi araştırılmıştır. Modifiye edilmiş motorun, sentez gazıyla yüksek sıkıştırma oranlarında benzinden daha iyi çalışabildiği gözlemlenmiştir. Termal verimlilik, orijinal dizel motordan %11,3 daha düşük olarak tespit edilmiştir. Maksimum gücün 3.17 kW olduğu ve en iyi özgül yakıt tüketiminin 0,74 kg/kWh ve maksimum verimin %23,9 olduğu gözlemlenmiştir. Motorun egzoz gazı emisyon yoğunluğunun dizel motora göre daha düşük olduğu ancak CO emisyonunun daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Raman ve Ram (2013), yakıt olarak %100 sentez gazı kullanılan, içten yanmalı bir motorun kapasitesinin %7 ila %97'si aralığında değişen yükler altındaki performansını gözlemleyen çalışmalarında, aşağı akışlı bir gazlaştırıcının, odun talaşından ürettiği, kalorifik değeri 5.6 MJ/Nm<sup>3</sup> olan sentez gazını, içten yanmalı motoru beslemek için kullanmıştır. İçten yanmalı motor ise, 75 kW<sub>e</sub> gücündeki bir jeneratör bağlanmıştır. Bir hidrolik hız kontrol ünitesi, motor sentez gazıyla çalışırken, motor devrini 1500 rpm de tutmak için ayarlanmıştır. Çalışmada, motor yükünün %85'in üzerinde olduğu durumlarda güç üretim verimi yaklaşık %20 olarak elde edilmiştir. Yükleme oranına bağlı olarak (%7 ile %97 arasında) motor veriminin %3,1-20,7 arasında ve motorun özgül yakıt sarfiyatının 1,2 kg/kWh ile 7,9 kg/kWh aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Sentez gazının, motorun güç üretme verimliliğini etkileyen; volümetrik verim, yakıt karışımının enerji yoğunluğu, adyabatik alev sıcaklığı, sıkıştırma oranı ve genişleme oranı gibi faktörler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Volümetrik verimlilik, genişleme oranı, sıkıştırma oranı ve termal verimlilik arasındaki ilişkiler kurulmuş ve doğrulanmıştır. Çalışmada, sentez gazı motorunun performansı, yakıt girişi ve güç çıkışı analizleri, değişken çalışma yükleri altında gözlemlenmiştir.

Shah ve arkadaşları'nın (2010), biyokütle kaynaklı sentez gazı ile çalışan, buji ateşlemeli, motor tahrikli bir jeneratörün performansı ve emisyonları üzerine yaptığı çalışmada, 18kW<sub>e</sub> gücünde ve 30 ila 60 Nm<sup>3</sup>/saat debi kapasiteli bir gazlaştırıcı kullanılmıştır. Gazlaştırma için hammadde olarak bölgeden temin edilen kereste talaşı kullanılmıştır. Üretilen sentez gazının bileşimi; %16,2-24,2 CO, %13-19,4 H<sub>2</sub>, %1,2-6,4 CH<sub>4</sub>, %9,3-13,8 CO<sub>2</sub> ve kalanı N<sub>2</sub> olarak bulunmuştur. Sentez gazının alt ısıl değeri 5.79 MJ/Nm<sup>3</sup> olup bu değer benzin için 32,2 MJ/l olarak belirlenmiştir.

Çalışmada, 5,5kW gücündeki bir jeneratör, %100 sentez gazı ile değişken gaz akışlarında kullanılmak üzere modifiye edilmiştir. Daha sonra elde edilen veriler, aynı şartlardaki benzin uygulamasındaki değerler ile karşılaştırılmıştır. Sentez gazı kullanıldığında maksimum güç çıkışı 1392 W olurken, benzinli uygulama için bu değer 2451 W (1,8 kat daha yüksek) olarak tespit edilmiştir. Bunun yanında sentez gazının yoğunluğunun ( $1,7 \text{ kg/m}^3$ ), benzinin yoğunluğundan ( $720 \text{ kg/m}^3$ ) 423 kat daha düşük olduğu ve her iki yakıt için, jeneratörün maksimum elektrik gücü çıkışındaki verimliliğin aynı olduğu gözlemlenmiştir. Jeneratör egzozundaki CO ve  $\text{NO}_x$  emisyonlarının sentez gazı uygulamasında benzin uygulamasına göre sırasıyla, %30-96 ve %54-84 oranında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ancak sentez gazı uygulamasındaki  $\text{CO}_2$  emisyonunun, benzin uygulamalarına göre önemli ölçüde (%33-167) yüksek olduğu görülmüştür.

Marculescu ve ark. (2016), gıda endüstrisi atıklarının enerjiye dönüştürülmesine yönelik çalışmalarında, aşağı akışlı gazlaştırma reaktörü ve içten yanmalı motor sistemleri kullanarak atıktan enerji üretimini amaçlamışlardır. Çalışmada hammadde olarak %42 oranında nem içeren et ve kemik atıkları kullanılmıştır. Doğrudan üretim bandından alınan atıkların, kurutma ve öğütme aşamalarından sonra elementel analizi sonucunda, %41,5 C, %6 H, %4,3 N ve yaklaşık %20,9  $\text{O}_2$  içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında sülfür veya klor elementlerine rastlanmamıştır. Gazlaştırma prosesi sonucu, içeriği %19,1'e kadar CO, %17'ye kadar  $\text{H}_2$  ve %1,6'ya kadar  $\text{CH}_4$  olan kaliteli sentez gazı üretilebildiği gözlemlenmiştir. Sentez gazının alt ısı değerinin konfigürasyona bağlı olarak 4 ile  $6.7 \text{ MJ/Nm}^3$  aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çalışmada buji ateşlemeli motorun sentez gazının kullanımına bağlı performansı doğal gaz ve biyogaz ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, motor jeneratörü çıkışı, sentez gazına ve verimliliğine göre gözlemlenmiş ve verimliliği yaklaşık %24 olan doğal gaza kıyasla, sentez gazı kullanımının verimi %18,2'ye düşürebildiği belirtilmiştir. Jeneratörün elektrik çıkışının, gazlaştırma koşullarına bağlı olarak 42 kW ile 48 kW aralığında değişeceği belirtilmektedir. Çalışmanın sonucu olarak gıda endüstrisi atıklarının, alternatif yakıt ve 1 MW'ın altındaki güç üretimi için yenilenebilir enerji kaynağı olarak imkân sağladığı öne sürülmektedir.



Dasappa ve arkadaşları (2011), 100 kWe güç çıkışına sahip olan bir motorda, sentez gazı kullanımının uzun süreli etkilerini araştırmak üzere, motorun 1000 saatlik testini ve bu test sonucunda sentez gazı kullanımının etkilerini incelenmiştir. Bu kapsamda, aşağı akışlı ve çift hava girişli gazlaştırma sisteminde üretilen sentez gazı, 6 silindirli, 4 zamanlı, soğutucu gaz motoru sonrası turbo şarjlı, buji ateşlemeli bir motorda yakıt olarak kullanılmaktadır. Sistemde, 350 kg/saat gaz üretmek için yaklaşık 135 kg/saat pelet halindeki biyokütle kaynağı kullanıldığı belirtilmiştir. Motorun egzoz gazını kullanan bir kurutucu biyokütleyi %12'den daha az nem seviyesine getirmek için, materyalin nemine bağlı olarak, 2 ile 4 saat aralığında kurutma işlemi için kullanılmıştır. Üretilen sentez gazının içeriği, %18 CO %18 H<sub>2</sub>, %0,4 CH<sub>4</sub>, %9 CO<sub>2</sub> ve geri kalanı N<sub>2</sub> olarak tespit edilmiş ve gazın kalorifik değeri yaklaşık 4.5 MJ/kg olarak bulunmuştur. Gaz içerisindeki ortalama partikül miktarı 19 mg/m<sup>3</sup> iken tar miktarı 10 mg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. 1000 saatlik denemede ortalama yük yaklaşık 85 kWe olarak tespit edilmiş ve jeneratörden üretilen elektrik enerjisi şebekeye verilmiştir. Çalışma sırasında motorun egzoz emisyonları ölçülmüş ve CO değeri 10.410 mg/m<sup>3</sup> ve NO<sub>x</sub> değeri 126 mg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Çalışmada, biyokütlenin özgül yakıt tüketimi 1,36 kg/kWh (brüt) olarak tespit edilmiştir. Kullanılan biyokütlenin kalorifik değeri 15 MJ/kg olarak ölçülmüş ve biyokütleden elektrik enerjisine dönüşüm verimi yaklaşık %18 olarak görülmüştür. Bu verim değerinin 500 kWe civarındaki daha büyük santraller için %25 ila %30 aralığında değişeceği ve yakıt olarak kömür kullanan 100 MWe gücündeki santrallerde verimim %34 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, sentez gazı kullanıldığında jeneratör verimi %25 olarak tespit edilmiştir.

## 2.6 Sentez Gazının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanımı

Bhaduri ve ark. (2017), sentez gazının, içten yanmalı motorlarda vuruntuyu önlemek için, soğutulması gerektiğini belirtmektedir. Ancak, bu soğutma işlemi aynı zamanda sentez gazı içerisindeki tarın yoğuşmasına neden olacağından dolayı sistem tesisatında tıkanıklık yaratabileceği ve bakım maliyetlerinin önemli ölçüde artabileceği belirtilmektedir. Çalışmada, gazlaştırıcıdan çıkan tarlı sentez gazı soğutulmadan, yaklaşık 250 °C'de, doğrudan içten yanmalı motora gönderilmiş ve böylece tarın yoğuşmasıyla oluşacak problemlerden kaçınılmıştır. Yüksek besleme

sıcaklığına dayanıklılığı nedeniyle çalışmada homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motor kullanılmıştır. Motorun silindir hacmi 435 cm<sup>3</sup>, sıkıştırma oranı 12 ve çalışma devri 1500 rpm de sabit ve bu kondisyonda yakıt tüketimi 2 ile 3 Nm<sup>3</sup>/saat olarak belirtilmiştir. Motora yakıt olarak beslenen sentez gazının içeriği, motorun stabil çalışmasına rağmen deney boyunca değişiklik göstermiştir ve tar içeriği yaklaşık 20 mg/Nm<sup>3</sup> olarak gözlemlenmiştir. Sentez gazı motora verilmeden önce homojen hale getirilmek için 10 litrelik bir depoda hava ile karıştırılmıştır. Sentez gazı ile çalışan motorun veriminin %33 ile %39 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. 24 saatlik deneyin sonunda, piston ve silindirde minimal tar tortuları gözlemlenmiştir. Ayrıca, tarın bazı uçucu katı haldeki formları sentez gazının hava ile karışmasından önceki yere yerleştirilen çekvalfde de gözlemlenmiştir. Piston ve silindir kafalarında kahverengi renk değişimi gözlemlenmiştir. Ancak, bu değişimin olağan olan, yağ içeriğindeki tortularla da ilişkilendirilebileceği belirtilmiştir.

Tsiakmakis ve arkadaşları (2014), üzüm, şeftali ve zeytin çekirdeklerinin gazlaştırılması sonucunda elde edilen sentez gazının, içten yanmalı motor performansına etkisini araştırmak üzere akışkan yataklı bir gazlaştırıcı ve tek silindirli içten yanmalı bir gaz (propan) motorunu birleştirmiştir. Sentez gazları ve propan ağırlıkça %55 oranında karıştırılıp, motora beslenmiş ve farklı devirlerde motor performansı gözlemlenmiştir. Ünitenin elektriksel güç çıkışı 1.3 – 4.7 kW, termal güç çıkışı ise 4 – 12.5 kW olarak belirtilmiştir. Ayrıca, sistemin yakıt tüketimi 0.59 – 1.9 m<sup>3</sup>/saat ve toplam verimi yaklaşık %90 olarak belirtilmiştir. (Propan referans alınarak). Ayrıca, çalışmada, zeytin çekirdeğinin alt ısıl değeri 5,4 MJ/kg, şeftali çekirdeğinin 6,96 MJ/kg, üzüm çekirdeğinin 4,52 MJ/kg olarak ve referans yakıt olarak kullanılan propanın ise 46,3 MJ/kg olarak belirtilmektedir. Sentez gazlarının kalorifik değerlerinin, propana göre düşük olmasının nedeninin içerdikleri N<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> gazları olduğu belirtilmektedir. Bunun yanında, zeytin, şeftali ve üzümde elde edilen sentez gazlarının ve propanın elektrik çevrim verimi sırasıyla, %23,2, %26,2, %23,4 ve %23 olarak tespit edilmiştir. Ek olarak, zeytin şeftali, üzüm ve propan için motorun elektriksel güç çıkışı (kW<sub>e</sub>) / özgül yakıt sarfiyatı (g/kW<sub>h</sub>)

sırasıyla, 3.55 / 546.64, 3.68 / 498.28 3.56 /546.61 ve 3.90 /290.7 olarak gözlemlenmiştir.

Rinaldini ve arkadaşları (2017), turbo şarj dizel motorlarda sentez gazı ve dizel yakıt karışımının kullanımına yönelik deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma kapsamında, nem içeriği yaklaşık %20 olan çam ve kavak cipsleri, maksimum gaz debisi 60 Nm<sup>3</sup>/saat olan aşağı akışlı bir gazlaştırıcıya yakıt olarak beslenerek sentez gazı üretiminde kullanılmıştır. Çalışmada, 4 silindirli, 2.8 L silindir hacmine sahip maksimum enjeksiyon basıncı 160 Mpa, sıkıştırma oranı 17,5:1 ve maksimum güç çıkışı 130 kW (3800 rpm'de) olan bir dizel motor kullanılmıştır. Motora yakıt olarak beslenen sentez gazının alt ısıl değeri 4,65 MJ/kg ve dizel yakıtın alt ısıl değeri 42,5 MJ/kg olup yoğunlukları sırasıyla 1,09 kg/m<sup>3</sup> ve 838 kg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Sentez gazının üst ısıl değerinin yaklaşık 5 MJ/Nm<sup>3</sup> olmasından dolayı sentez gazı kullanıldığında maksimum elde edilecek güç yaklaşık 82,5 kW olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, motor çevrim veriminin %30 olduğu göz önünde bulundurulduğunda sentez gazından maksimum güç üretiminin yaklaşık 25 kW olacağı belirtilmektedir. Çalışma, standart dizel yakıt ve dizel/sentez gazı ile 3000 rpm sabit motor hızında ve 50-100-300 Nm (16-31-94 kW) olmak üzere farklı yükler altında yürütülmüştür. 3 yük altında da dizel yakıtın oranı azaltılırken, sentez gazı oranı artırılmış ve karışım oranlarının motor performansına etkileri gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, 50 ve 100 Nm yükte %30 dizel yakıt miktarı azaltılmasının, sentez gazının miktarının %30 artması ile karşılanabilmekteyken, 300 Nm yükte %30 dizel yakıt miktarının azaltılmasının %25 sentez gazı miktarının artışı ile karşılandığı gözlemlenmiştir. Motorun maksimum verim değerine 300 Nm yükte ve %27 sentez gazı / dizel yakıt değişiminde ulaşılmıştır. Ayrıca, çalışma sonucunda, dizel yakıt miktarının sert şekilde düşmesine rağmen silindir iç basıncında önemli bir değişiklik olmadığı rapor edilmiştir. Böylece, sentez gazının standart dizel motorlarda büyük bir değişiklik yapılmadan kullanımının mümkün olduğu belirtilmektedir. Bir diğer umut verici çıktı ise, %27 değişim oranında motor veriminin %5'e kadar arttığı ve bu verim artışının dizel yakıtın daha hızlı yanmasının sonucu olduğudur. Böylece, sentez gazının yalnızca dizel yakıt kullanımının azalmasını sağlamakla kalmayıp aynı zamanda yanma kalitesini de arttırdığı raporlanmaktadır.

Munoz ve arkadaşlarının (2000), tarımsal atıklar ve orman artıklarının gazlaştırılması sonucu elde edilen, düşük kalorifik değere sahip, sentez gazlarının içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması üzerine yaptıkları çalışmada, tek silindirli, 4 zamanlı, 270 cc süpürme hacimli, 6,6 kW (@3600 rpm) maksimum güç çıkışlı, 19,1 Nm (@2500 rpm) maksimum torca ve 8,2:1 sıkıştırma oranına sahip bir gaz motoru kullanmışlardır. Çalışmada motor %60-%85 ve %100 yük altında çalıştırılmış ve motor performansı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, farklı yüklerde maksimum güç, maksimum tork ve maksimum egzoz sıcaklıkları motor hızına göre belirlenmiş ve tablo 2.4’de sunulmuştur.

**Tablo 2.4** Değişken yük altında motor performansı

| Yük (%) | Maksimum güç (kW/rpm) |             | Maksimum tork (Nm/rpm) |             | Maksimum Egzoz sic. (°C/rpm) |             |
|---------|-----------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
|         | Benzin                | Sentez Gazı | Benzin                 | Sentez Gazı | Benzin                       | Sentez Gazı |
| 60      | 3.4/2750              | 1.5/2000    | 15.9/1750              | 7/2000      | 771/3600                     | 663/3200    |
| 85      | 5/3250                | 2.2/3000    | 19/2000                | 9/2000      | 792/3600                     | 674/2750    |
| 100     | 6.7/3600              | 2.3/2500    | 21/2500                | 9/2500      | 770/3600                     | 634/2000    |

Çalışmanın sonucu olarak sentez gazının benzinle olan kıyaslamasında, tork veya güç kayıplarının çok fazla olmadığı vurgulanmaktadır. Egzoz gazı sıcaklığının, sentez gazı kullanıldığında daha düşük seviyelerde olmasından dolayı motorun termal stresinin daha az olacağı belirtilmektedir. Ayrıca, sentez gazı kullanıldığında HC ve CO emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı ancak CO<sub>2</sub> emisyonunun arttığı raporlanmıştır. Sonuç olarak mevcut LPG ve doğal gaz motorlarının sentez gazı ile çalıştırılmasının küçük optimizasyonlarla mümkün olduğu belirtilmektedir.

Bhattacharya ve arkadaşları (2001), kömür ve hindistan cevizi kabuğunun birlikte gazlaştırılması sonucu elde edilen sentez gazının içten yanmalı bir dizel motor performansı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla, 2.5 L hacminde, 3 silindirli, 18.5:1 sıkıştırma oranında, maksimum devri 2500 rpm ve 36.6kW maksimum güç çıkışına sahip bir motor kullanmışlardır. Gazlaştırıcı 500°C ve 0,79

$\text{Nm}^3/\text{dk}$  gaz debisine sahip olacak şekilde dizayn edilmiştir. Üretilen sentez gazının net kalorifik değerinin 4.12- 5.29  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$  aralığında değiştiği belirtilmektedir. Çalışmada motor 1500 rpm 'de sabit tutulup farklı yükler altında çalıştırılmıştır. Sentez gazının temizlendikten sonra motora (%81 sentez gazı, %19 dizel olmak üzere) beslenmesiyle motor tarafından çekilen hava miktarının azaldığı buna bağlı olarak hava – yakıt oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece, yüksek devirlerde iki yakıtın da tam yanmasının sağlanması için gerekli olan hava miktarının da azaldığı raporlanmaktadır. Sonuç olarak, yalnızca dizel yakıt kullanıldığında maksimum yükte üretilen güç 14.54  $\text{kW}_e$  iken, yakıt karışımından elde edilen güç 11.44  $\text{kW}_e$  olarak gözlemlenmiştir. Böylece, yalnızca dizel yakıt kullanıldığında motor verimi %22,41 iken, karışım yakıt kullanıldığında verim %14,71 olarak belirlenmiştir.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

#### 3.1 Gereç

Tez kapsamında yapılan çalışmada gazlaştırma materyali olarak Şekil 3.1’de görülen çam talaşı ve atık motor yağı kullanılmıştır. Atık motor yağı TEKSAN Jeneratör ’den, talaş ise İzmir Bornova’da lokal bir marangoz haneden temin edilmiştir. Bu iki atığın gazlaştırılması / pirolizi ile gaz motorunu besleyecek olan sentez gazı üretilmiştir.



Şekil 3.1 Çam talaşı ve atık motor yağı

#### 3.2 Yöntem

##### 3.2.1 Hammadde Analizleri

Numunelerin analizleri üçer tekrarlı olarak Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü BESTMER (Biyokütle Enerji Sistemleri ve Teknolojileri Merkezi) enstrümantal analiz laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

### **3.2.1.1 Nem Tayini**

Yaklaşık 1 gr ağırlığındaki numuneler, sıcaklığı 105 °C olan, Nüve FN 500 marka/model etüvde içerisinde yaklaşık 24 saat bekletilmiştir. 24 saatlik işlem sonunda numuneler etüvden alınarak desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Bu işlem sonunda numunenin kütle kaybı belirlenmiş ve eşitlikte gösterildiği gibi nem içerikleri (%) hesaplanmıştır (TS 1562).

$$\text{Nem içeriği (\%)} = 100 - 100 \times (m_i \div m_s) \quad (1)$$

Bu eşitlikte;  $m_i$ :Etüv öncesi numune ağırlığı

$m_s$ :Etüv sonrası numune ağırlığı olarak verilmiştir.

### **3.2.1.2 Kül Analizi**

Yaklaşık 1 gr ağırlığındaki numuneler, Magmatherm MT 1100-5-U8 marka/model kül fırın içerisinde, önce 250 °C sıcaklıkta 1 saat, daha sonra 550 °C sıcaklıkta 2 saat bekletildikten sonra desikatörde soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işlemi sonunda tartım yapılmış ve kül miktarı (%) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$\text{Kül miktarı (\%)} = (m_2 \div m_1) \times 100 \quad (2)$$

Bu eşitlikte;  $m_1$ :Kül fırını öncesi numune ağırlığı

$m_2$ :Kül fırını sonrası numune ağırlığı olarak verilmiştir.

### **3.2.1.3 Uçucu Katı Madde Analizi**

Yaklaşık 1 gr ağırlığındaki numuneler, 2540 E standart metoduna göre, sıcaklığı 900°C olan, Magmatherm MT 1100-5-U8 marka/model kül fırına konulmuş ve 7 dakika bekletilmiştir. Daha sonra kül fırından çıkarılan numuneler desikatörde

soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işleminden sonra numuneler tartılarak uçucu katı madde miktarı (%) aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$Uçucu\ katı\ madde\ miktarı\ (\%) = 100 - (m_n \div m_m) \times 100 \quad (3)$$

Bu eşitlikte;  $m_n$ : Kül fırını öncesi numune ağırlığı

$m_m$ : Kül fırını sonrası numune ağırlığı olarak verilmiştir

### **3.2.1.4 Sabit Karbon Oranı**

Sabit karbon oranı analizinde kullanılan numunenin nemi uzaklaştırıldığı için sabit karbon oranı belirlenirken nem miktarı ihmal edilir. Bu doğrultuda sabit karbon oranı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$\% Sabit\ karbon = 100 - (\%Kül\ miktarı + \%Uçucu\ madde\ miktarı) \quad (4)$$

### **3.2.1.6 Termogravimetrik Analiz**

Gazlaştırma / piroliz için kullanılan atık motor yağının, çam talaşının ve proses sonrasına elde edilen kömürün, sıcaklık artışına göre kütle kaybının belirlenmesi için SETERAM Labsys EVO marka/model Termogravimetrik Analiz (TGA) cihazı kullanılmıştır.

### **3.2.1.7 Elementel Analiz**

Gazlaştırma/piroliz sisteminde kullanılacak olan hammaddelerin C, H, N ve S içeriğini belirlemek için Leco Truspec CHN-2007S marka/model elementel analiz cihazı kullanılmıştır. Analizler ASTM D-4373 ve ASTM D-4239 metotlarına göre ve 3 paralel olarak yapılmıştır. C, H, N ve S yüzdeleri belirlendikten sonra sonuç yüzden çıkarılarak oksijen miktarı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanmıştır. Analizde kullanılan numunelerin nemi alındığı için oksijen miktarı belirlenirken sadece kül oranına yer verilmiştir.



$$\%O = 100 - (\%K\ddot{u}l\ miktar\ i + \%C + \%H + \%N + \%S) \quad (5)$$

### **3.2.1.8 Sentez Gazının İçeriğinin ve Kalorifik Değeri Belirlenmesi**

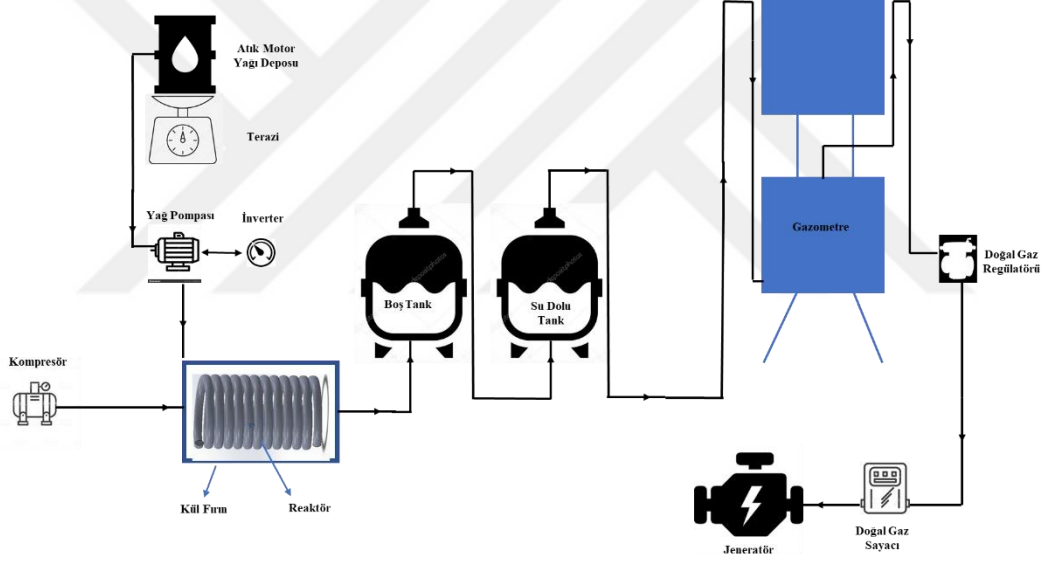
Motorda kullanılmak üzere, gazlaştırma / piroliz yöntemi ile üretilen sentez gazının içeriğindeki O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, N<sub>2</sub> oranları ve sentez gazının kalorifik değeri MRU marka Micro-GC syngas analizör cihazı ile ölçülmüştür. Bunun yanında, portatif cihazı doğrulamak amacıyla sentez gazının içeriği Scion 456 marka/model Gaz Kromatografisi (GC) Cihazı-RGA cihazı kullanılarak ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### **3.2.1.9 Egzoz Emisyon Ölçümleri**

Yakıt olarak sentez gazı ile beslenen içten yanmalı gaz motorunun egzoz emisyon değerleri, MRU marka OPTIMA7 model portatif baca gazı analizörü ile ölçülmüştür.

### 3.2.2 Gazlaştırma / Piroliz Sisteminin Kurulumu

Çalışmada kurulan gazlaştırma / piroliz sisteminin çalışma şeması Şekil 3.2’de sunulmuştur. Sistem, atık motor yağının depolandığı varil, yağ tüketimini tespit etmek için kullanılan terazi, yağı istenilen debide reaktöre besleyen invertörlü yağ pompası, reaktöre hava besleyen kompresör, kül fırın, reaktör, sentez gazındaki kirleticileri temizleyen boş ve su dolu 2 adet tank, sentez gazını depolamak için gazometre, motorun tükettiği gaz miktarını tespit etmek için doğal gaz sayacı, sentez gazını motora istenilen basınçta beslemek için doğal gaz regülatörü ve jeneratörden oluşmaktadır.



Şekil 3.2 Gazlaştırma/ Piroliz Sistemi Şeması

Gazlaştırma denemeleri ilk olarak çam talaşını gaz ürüne dönüştürmek üzere gerçekleştirilmiştir. Çam talaşının gazlaştırılmasında ilk olarak Şekil 3.3 ’de gösterilen, her biri 800 W gücünde 9 adet fişek rezistanslı, 30 kg talaş kapasiteli bir reaktör kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Fişek rezistanslı reaktör

Talaş ve atık motor yağının birlikte gazlaştırma deneylerinde kullanılan İkinci sistem Şekil 3.4 'de görüldüğü gibi 310 kalite çelik malzemeden, yaklaşık 3 lt hacminde bir reaktör ve 5 kW gücünde bir kül fırından oluşmaktadır. Reaktöre atık motor yağı beslemek için ise Şekil 3.5' de görüldüğü gibi WATSON MARLOW marka peristaltik pompa kullanılmıştır. Atık motor yağı reaktöre üstten giriş yaparak reaktör tabanından yaklaşık 5 cm yukarıda kalacak şekilde dizayn edilen yağ besleme hattından beslenmiştir. Atık motor yağı beslemesi, çam talaşının gazlaşması sona erdikten sonra başlatılmıştır. Bu sistemde, çam talaşı motor yağı için bir yatak vazifesi görmesi amacı ile kullanılmıştır.



Şekil 3.4 İkinci gazlaştırma sistemi



Şekil 3.5 Atık yağ beslemede kullanılan peristaltik pompa

Atık motor yağının gazlaştırma deneme sistemi, Şekil 3.6 'da görüldüğü gibi, yaklaşık 2 L hacminde 310 kalite çelikten imal edilmiş serpantin reaktör , 5 kW gücünde tüp fırın ve atık yağı beslemek için kullanılan monopomp pompadan oluşmaktadır.



Şekil 3.6 Serpantin reaktör, tüp fırın ve pompa

Atık motor yağı reaktöre, Şekil 3.7 'deki gibi 30 litre kapasiteli bir yağ deposundan beslenmekte ve beslenen yağın debisi depo altına yerleştirilen BRADER marka tartı vasıtasıyla kütle kaybına göre belirlenmektedir. Reaktöre yağ besleme için Şekil 3.8 'de gösterilen, İŞMAKSAN marka, 1000d/d, 24 bar basma kapasitesi ve 10 l/saat maksimum debiye sahip, monopomp bir pompa kullanılmıştır. Sistemde tıkanıklıkların oluşmaması için gereken havayı sisteme beslemek için, STANLEY marka 5 lt hazneli ve 10 bar basma kapasiteli bir kompresör ve hava akışını istenilen seviyede tutabilmek için GILMONT marka bir flowmetre kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Atık motor yağı deposu ve terazi



Şekil 3.8 Monopomp pompa

Fırın 900 - 1200 °C sıcaklığında çalışmakta ve atık motor yağı fırının içindeki reaktöre, fırın 900°C'ye ulaştığında beslenmektedir. Pompa, atık yağı, 8 mm çapında paslanmaz çelik bir cidarlı boru vasıtasıyla reaktörün en sıcak olan bölgesi yani fırın sıcaklığının en yüksek olduğu noktadan beslemektedir. Motor yağının reaktöre girmeden önce ısınmasını önlemek amacı ile yağ besleme hattındaki boru cidarında şebeke suyu dolaştırılmaktadır. Üretilen sentez gazı Şekil 3.9'de gösterilen, demir doğal gaz hattı ile önce içerisi boş olan 1. kapalı genişleme tankına daha sonra içerisi su dolu olan 2. Kapalı genişleme tankına girmektedir. Böylece, sentez gazı aynı zamanda hem temizlenmekte hem de soğutulmaktadır. Kapalı genişleme tankını terk eden sentez gazı 8 m yüksekliğindeki gazometre üzerinden kompozit malzemedir

oluşan tesisat ile dolaştırılarak Şekil 3.10’da gösterilen gazometrede depolanmaktadır.



Şekil 3.9 Kapalı genişleme tankları



**Şekil 3.10** Gazometre ve Tesisat

### 3.2.3 Gaz Motoru

Gazometre çıkışından, doğal gaz regülatörü ile 21mbar basınca düşürülen sentez gazı plastik hortum vasıtasıyla motora beslenmektedir. Deneyde kullanılan gaz motoru (jeneratör), Resim 3.10’da gösterilen, Briggs & Stratton Vanguard (040495) marka/model, 6.5 kWe gücünde, 2 V-Twin silindirli bir motor olup teknik detayları tablo 3.1’de sunulmuştur. Ayrıca, jeneratör bileşenleri resim 3.11’de ve parçaların isimleri tablo 3.2’de belirtilmiştir. Motorun yakıt tüketimi, gaz giriş hattının önüne takılan bir doğal gaz sayacı yardımı ile belirlenmiştir. Motora giren ve motor çıkışında elde edilen enerjiden yola çıkarak motorun verim hesabı eşitlik 6’ya

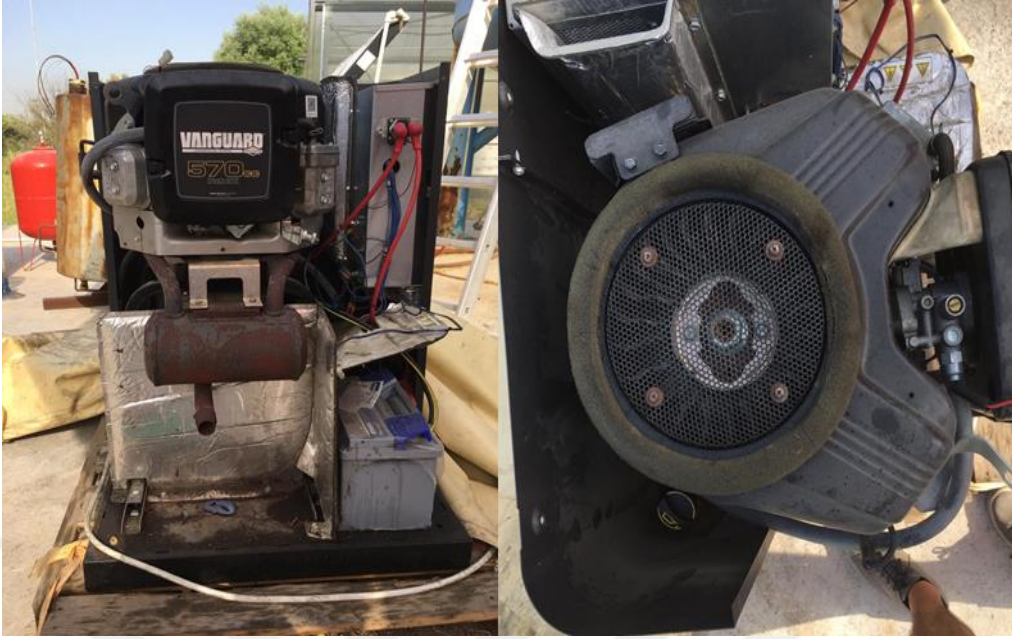


göre yapılmıştır. Ayrıca, deney sonrasında gaz motoru üzerindeki bujiler sökülerek üzerindeki kirlilik gözlemlenmiştir. Sökülen buji deliklerinden, kamera yardımı ile piston içerisinin görüntüleri de alınmıştır.

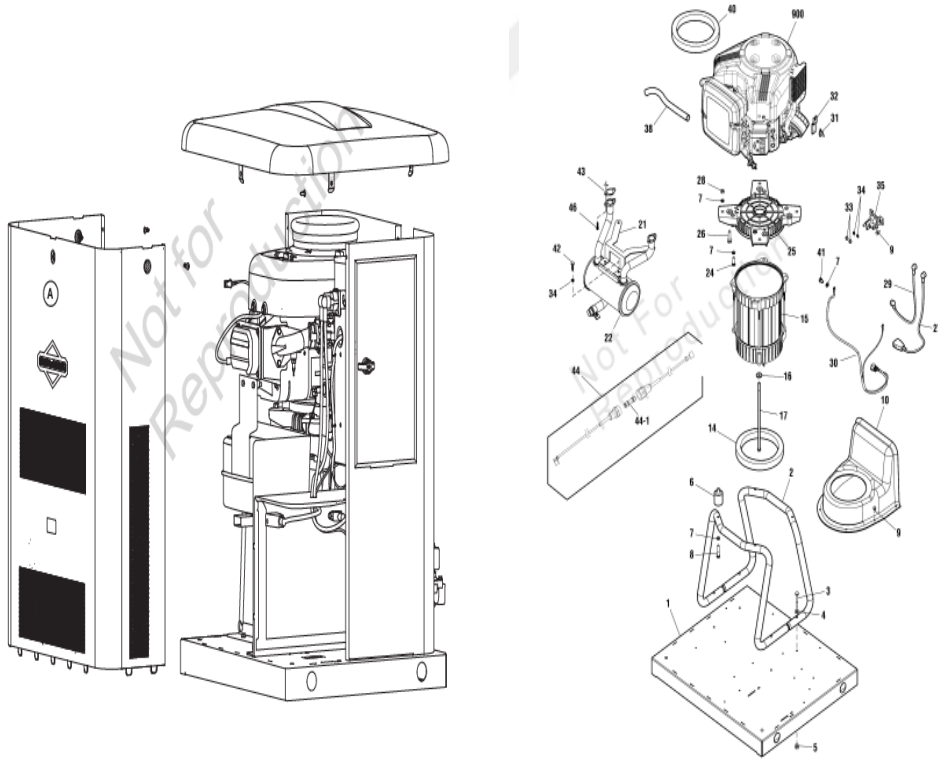
$$\text{Motor verimi} = \frac{\text{Motor ışından alınan enerji}}{\text{Sentez Gazından elde edilen enerji}} \quad (6)$$

**Tablo 3.1** Kullanılan Motorun Teknik Özellikleri

| <b>Motor Özellikleri</b>                    | <b>Briggs &amp; Stratton Vanguard</b> |
|---|---------------------------------------|
| <b>Silindir Sayısı</b>                      | 2, V-Twin                             |
| <b>Motor Hızı</b>                           | 3000 RPM                              |
| <b>Silindir apı (mm)</b>                   | 71,882                                |
| <b>Strok (mm)</b>                           | 70,104                                |
| <b>Silindir Hacmi (cc/l)</b>                | 570/0,57                              |
| <b>Voltaj</b>                               | 230                                   |
| <b>Max. Güç ıkışı</b>                      | 6,5 kW <sub>e</sub>                   |
| <b>Tam Yükte Yakıt Sarfıyatı (Doğalgaz)</b> | 5,09 m <sup>3</sup> /saat             |



Şekil 3.11 Gaz Motoru ve Jeneratör



Şekil 3.12 Jeneratör Bileşenleri

**Tablo 3.2** Jeneratör Bileşenleri

| <b>Numara</b> | <b>Bileşen</b>             | <b>Numara</b> | <b>Bileşen</b>           |
|---------------|----------------------------|---------------|--------------------------|
| 1.            | Altılık                    | 27.           | Kablo                    |
| 2.            | Beşik                      | 28.           | Altıgen vida             |
| 3.            | Altıgen başlı kapak vidası | 29.           | Starter selenoid kablosu |
| 4.            | Düz rondela                | 30.           | Akü negatif kablosu      |
| 5.            | Vida, Flanş                | 31.           | Kontak                   |
| 6.            | Vibrasyon takozu           | 32.           | Kontak plakası           |
| 7.            | Rondela                    | 33.           | Vida                     |
| 8.            | Altıgen başlı kapak vidası | 34.           | Rondela                  |
| 9.            | Civata                     | 35.           | Starter selenoidi        |
| 10.           | Kanal                      | 38.           | Yağ hortumu              |
| 14            | Sızdırmazlık contası       | 40.           | Conta                    |
| 15.           | Alternatör                 | 41.           | Vida                     |
| 16.           | Rondela                    | 42.           | Altıgen başlı vida       |
| 17.           | Civata                     | 43.           | Egzoz contası            |
| 21.           | Askı aparatı               | 44.           | Sigorta koruması         |
| 22.           | Susturucu                  | 44.1          | Sigorta                  |
| 24.           | Altıgen başlı kapak vidası | 45.           | Vida                     |
| 25.           | Motor adaptörü             | 46            | Motor                    |
| 26.           | Vida                       |               |                          |

## 4. BULGULAR

### 4.1 Hammaddenin Özellikleri

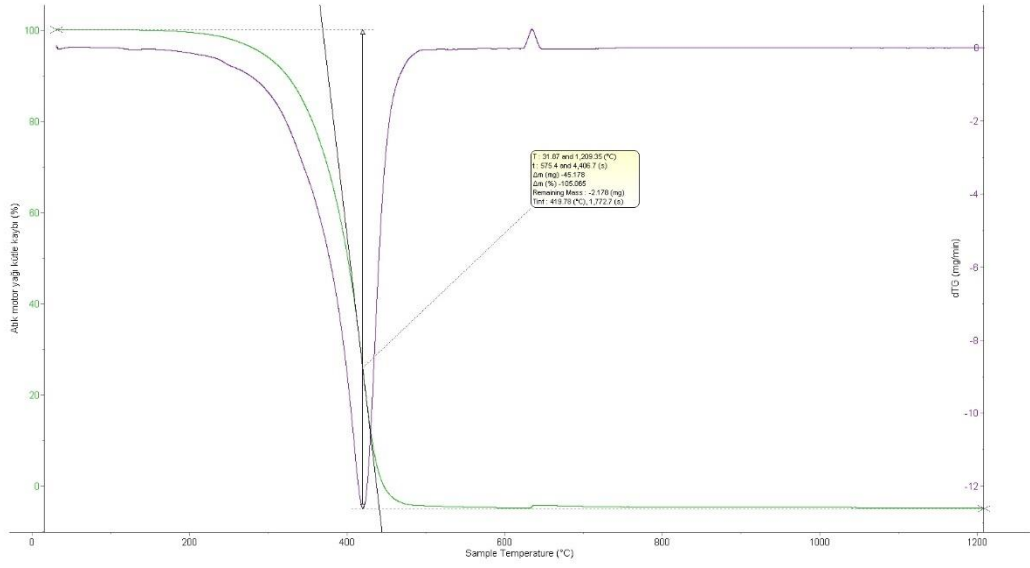
Yapılan analizle sonucunda atık motor yağı ve çam talaşının nem, kül, uçucu katı ve sabit karbon miktarı belirlenmiştir. Ayrıca, atık motor yağı ve çam talaşının elementel analizi yapılarak karbon, hidrojen, oksijen, kükürt ve azot içerikleri ve hammaddelerin ısı değerleri için bomba kalorimetre cihazında belirlenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 4.1’de sunulmuştur.

**Tablo 4.1** Ham madde ve elementel analiz sonuçları

|                 | Nem (%) | Kül (%) | Uçucu madde (%) | Sabit karbon (%) | C (%) |
|-----------------|---------|---------|-----------------|------------------|-------|
| Atık motor yağı | 3,32    | 0,001   | 96,68           | 3,319            | 79,27 |
| Çam talaşı      | 6,8     | 0,44    | 86,5            | 13,06            | 51,3  |

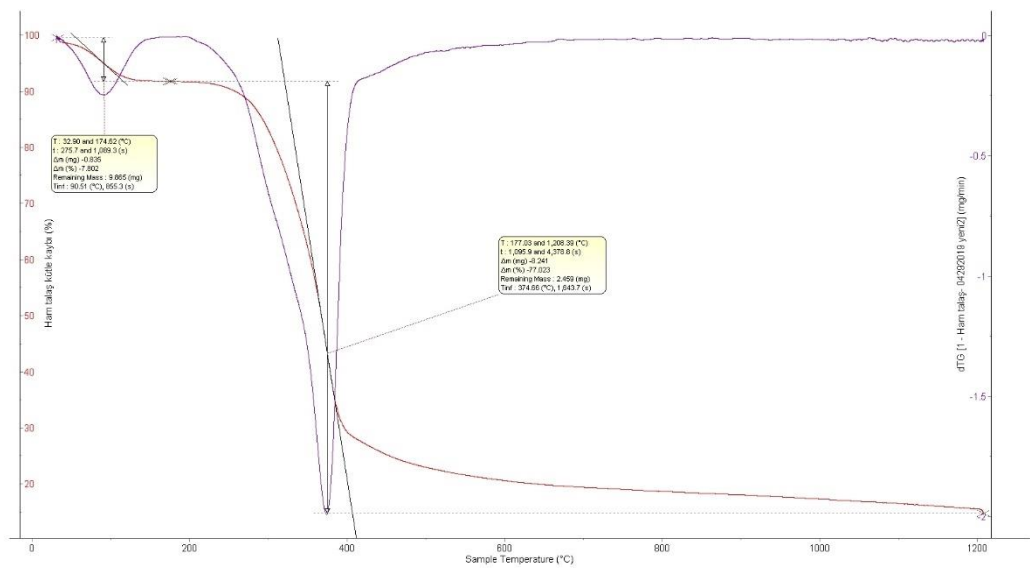
### 4.2 Hammaddelerin Termogravimetrik Analizleri

Atık motor yağının sıcaklığın 1200 °C’ye kadar çıkarıldığı, termogravimetrik analizleri sonucunda şekil 4.1’de de görüldüğü gibi materyal kütle kaybının tek bölgede oluştuğu ve 150 - 450°C aralığında toplam kütle kaybının tamamının bu aralıkta olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1 Atık motor yağının Termogravimetrik analiz sonucu

Çam talaşının TGA analizi sonucunda şekil 4.2’de görüldüğü gibi kütle kaybının iki ana bölgeye ayrıldığı görülmektedir. Sıcaklığın yaklaşık 100°C’ye kadar olduğu ilk bölgede kütle kaybının, çam talaşı içeriğindeki nemin buharlaşması nedeniyle yaklaşık %8 olduğu görülmektedir. Sıcaklığın 100 – 380 °C aralığında olduğu ikinci bölgede ise çam talaşı için maksimum kütle kaybı gerçekleştiği görülmektedir. Bu kayıp toplam kütle için %77’sini oluşturmaktadır.



Şekil 4.2 Ham çam talaşının Termogravimetrik analiz sonucu

### 4.3 Üretilen Sentez Gazının Analizi

Gazlaştırma/piroliz sisteminden üretilen sentez gazının içeriğindeki O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> oranları ve kalorifik değeri analiz sonuçları **Tablo 4.2'** de sunulmuştur. 1. ve 2. analizler çam talaşı ve atık motor yağının analiz sonuçlarını vermektedir. 3. analiz ise yalnızca çam talaşının gazlaştırması sonucu elde edilen sentez gazının değerlerini göstermektedir.

**Tablo 4.2** Sentez gazının analiz sonuçları

| ANALİZ / DEĞER                      | 1. Analiz | 2. Analiz | 3. Analiz |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| O <sub>2</sub> (%)                  | 0,17      | 0,664     | 1,18      |
| CO <sub>2</sub> (%)                 | 12,47     | 9,17      | 23,02     |
| CO (%)                              | 3,36      | 5,53      | 23,1      |
| H <sub>2</sub> (%)                  | 30,57     | 29,37     | 27,84     |
| C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> (%)   | 41,34     | 36,52     | 12,81     |
| N <sub>2</sub> (%)                  | 23,09     | 18,746    | 12,05     |
| Net Kalorifik Değer (MJ/kg)         | 26,1      | 23,3      | 10,7      |
| Alt Isıl Değer (kJ/m <sup>3</sup> ) | 18481     | 16962     | 10539     |

Atık motor yağı, çam talaşı ve birlikte gazlaştırma prosesleri sonucu oluşan sentez gazları aynı gazometrede depolandığı için elde edilen 1. analiz sonuçları hem talaşın hem de motor yağının gazlaştırılması sonucunda elde edilen sentez gazının ortalama değerini, 2. analiz yalnızca motor yağından elde edilen sentez gazının değerlerini ve 3. analiz ise yalnızca çam talaşının gazlaştırılmasından elde edilen sentez gazının değerlerini göstermektedir.

#### 4.4 Motorun Verim ve Egzoz Emisyon Analizleri

Üretilen sentez gazı ile beslenen motorun tam yük altında emisyon analizleri sonucunda egzoz gazı içerisindeki CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> konsantrasyonları ve motor yanma verimi saptanmış ve veriler çizelde **Tablo 4.3**'de sunulmuştur. Tablo 4.3'de sunulan analizlerden 1.si motorun rölanti (yüksüz) haldeki emisyon analizleri diğer 5 analiz ise motorun tam yük durumundaki emisyon analizlerini göstermektedir. Motorun 5kW<sub>e</sub> yükte tükettiği sentez gazı miktarının 3.5 ile 4,5 m<sup>3</sup>/saat aralığında gaz kompozisyonuna bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Böylece, motorun tam yükteki elektrik çevrim veriminin yaklaşık %21 ile %27 aralığında olduğu hesaplanmıştır.

**Tablo 4.3** Motor egzoz emisyon değerleri

| <b>Analiz/<br/>Değer</b>           | <b>1.Analiz<br/>(Yüksüz)</b> | <b>2. Analiz</b> | <b>3.Analiz</b> | <b>4.Analiz</b> | <b>5.Analiz</b> | <b>6.Analiz</b> |
|------------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>O<sub>2</sub> (%)</b>           | 13,7                         | 2,6              | 3,3             | 3,5             | 3,4             | 0,4             |
| <b>CO<sub>2</sub> (%)</b>          | 0,80                         | 10,1             | 9,86            | 10,11           | 10,08           | 6,47            |
| <b>CO (ppm)</b>                    | >4000                        | 2243             | 1613            | 1321            | 1929            | >4000           |
| <b>NO (ppm)</b>                    | 70                           | 1473             | 1081            | 1208            | 1141            | 267             |
| <b>NO<sub>2</sub> (ppm)</b>        | 27                           | 124              | 127             | 128             | 135             | 26              |
| <b>NO<sub>x</sub> (ppm)</b>        | 97                           | 1596             | 1208            | 1336            | 1277            | 292             |
| <b>SO<sub>2</sub> (ppm)</b>        | 615                          | 0                | 2               | 0               | 0               | 244             |
| <b>CH<sub>4</sub> (ppm)</b>        | 25020                        | 1560             | 4250            | 3220            | 2540            | 4210            |
| <b>Yanma<br/>Verimi (%)</b>        | 75,8                         | 75,1             | 74,8            | 74,7            | 74,7            | 80,8            |
| <b>Fazla Hava</b>                  | 187                          | 14               | 18              | 20              | 19              | 1,02            |
| <b>Egzoz Gazı<br/>sıcaklığı °C</b> | 278,2                        | 588,6            | 575,8           | 576,3           | 579,5           | 501,6           |



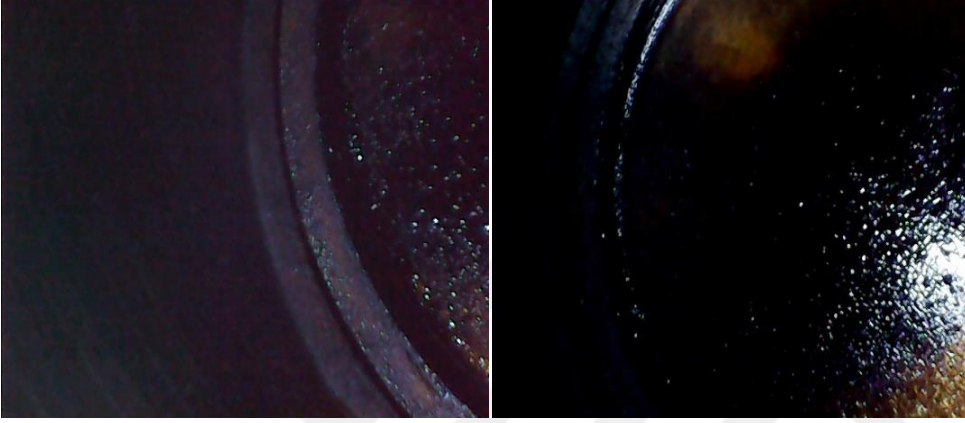
#### 4.5 Sentez Gazının Motor Aksamına Etkisi

Atık motor yağı ve çam talaşının gazlaştırılması sonucunda elde edilen sentez gazı, içten yanmalı gaz motorunda yakıt olarak kullanılmış ve sentez gazının içten yanmalı motor aksamındaki etkileri incelenmiştir. Deney boyunca, gaz motoru sentez gazı beslenerek tam yükte (5kWe), 15 saat çalıştırılmıştır. Bu çalışma süresince, gaz motorunun egzoz emisyonları ve sentez gazının RGA (Rafine Gaz Analizi) analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda, gaz motoru üzerindeki bujiler sökülüp ve incelenmiştir. (Şekil 4.3). Gaz motorunun, sentez gazı ile çalışmasının buji üzerinde ciddi bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

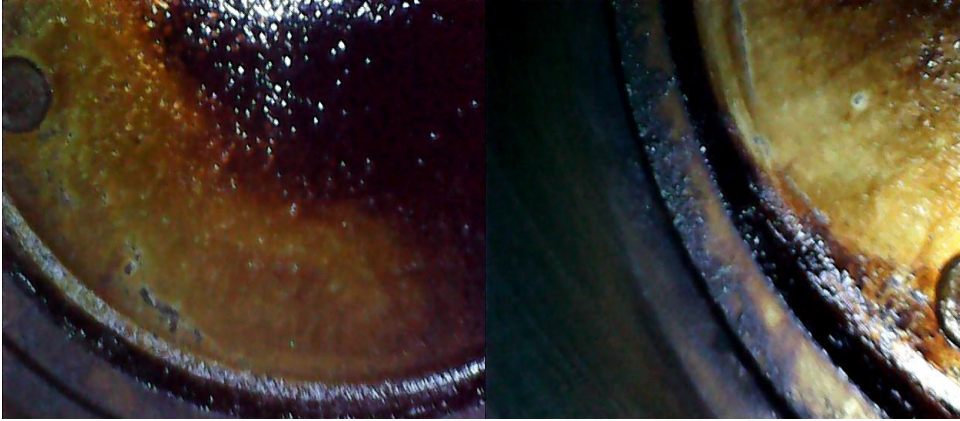


Şekil 4.3 Gaz motorunun bujileri

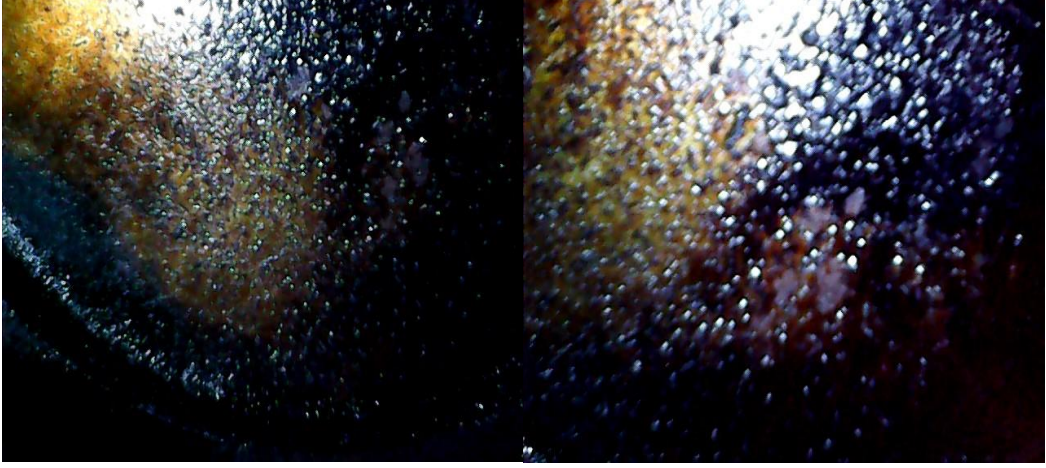
Gaz motorunun sentez gazı ile denemelerinden sonra, buji yuvalarından endoskop kamera vasıtası ile görüntüler alınmıştır. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi silindir alt duvarları üzerinde motor yağlama yağının yanısıra, yoğun tar etkilerine rastlanmıştır. Benzer olarak, Şekil 4.5 ve 4.6 da silindir üst duvarı ve yan duvarındaki tar birikintileri görülmektedir.



Şekil 4.4 Silindir alt duvarındaki tar kalıntıları



Şekil 4.5 Silindir Üst duvarındaki tar kalıntıları



**Şekil 4.6** Silindir Yan duvarındaki tar kalıntıları

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA

### 5.1 Gazlaştırma/Piroliz Aşamasında Karşılaşılan Sorunlar

Gazlaştırma denemeleri ilk olarak çam talaşını gaz ürüne dönüştürmek üzere gerçekleştirilmiştir. Çam talaşından elde edilen sentez gazının alt ısıl değeri 10539 kJ/Nm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Çam talaşının gazlaştırılmasında ilk olarak Şekil 3.2 'de gösterilen, her biri 800 W gücünde 9 adet fişek rezistanslı, 30 kg talaş kapasiteli bir reaktör kullanılmıştır. Ancak, rezistanslar gazlaştırma için gereken sıcaklığa erişmekte yetersiz kalmışlardır. Reaktör sıcaklığı 450 °C'yi aşamamış dolayısıyla gazlaştırma deneyleri gereğinden fazla sürmüştür sistem verimi önemli ölçüde düşmüştür. Bunun nedeni araştırıldığında, rezistansların 7'sinin bir süre sonra işlevlerini yerine getirmediği gözlemlenmiştir. Bu soruna ve istenilen sıcaklıklara ulaşılamamasına çözüm olarak, 8 adet 2 elemanlı 1600 W gücünde ve 1 adet 3 elemanlı 2400 W gücünde olmak üzere toplam 15200 W gücünde yeni rezistanslar sipariş edilmiştir. Ancak sipariş süreci uzun sürdüğü için ve reaktöre materyal doldurma boşaltma işleminin operasyonel anlamda zorluk teşkil etmesinden dolayı ikinci bir sistem devreye alınmıştır.

Devreye alınan ikinci sistem Şekil 3.3' da görüldüğü gibi 310 kalite çelik malzemeden, yaklaşık 3 lt hacminde bir reaktör ve 5 kW gücünde bir kül fırından oluşmaktadır. Ayrıca, eski reaktörde materyal doldurma/boşaltmada oluşan zorlukların giderilmesine yönelik olarak ve atık motor yağının temas ettiği sıcak yüzey alanını arttırmak amacıyla, reaktör yalnızca başlangıçta çam talaşı ile doldurulmuş, talaşın gazlaşması bittiğinde (gaz çıkışı durduğunda), reaktöre dışarıdan peristaltik pompa aracılığıyla atık motor yağı beslenmiştir. Bu sistemde, ilk karşılaşılan sorun, Şekil 5.1' de gösterildiği gibi, gaz çıkış hattının gazometre su seviyesinin altında kalmasından ve gazometredeki çekvalfin tar nedeni ile işlevini yitirmesinden dolayı reaktörün içerisine gazometre suyu taşınması, dolayısıyla sistemin çalışmasını önlemesidir. Bu sorun gaz çıkış hattının gazometre boyunca yaklaşık 8 m yükseltilmesiyle çözülmüştür. Peristaltik pompa ile atık motor yağı besleme işleminde, atık motor yağı kurum formuna dönüşmüş, katılaşmış ve

yağ besleme hattında tıkanıklığa sebep olmuştur. Tıkanıklığın sonucu olarak, peristaltik hortum basınca dayanamayıp yırtılmıştır. Bu sorun üzerine yapılan inceleme ve araştırmalar sonucunda atık yağın düşük sıcaklıklarda kurum formuna dönüştüğü, katılaştığı ve tesisatda tıkanıklığa sebep olduğu anlaşılmıştır. Reaktöre yağ besleme hattında sıcaklığın gazlaşma için düşük olması nedeni ile oluşan kurumun yağ besleme hattını tıkadığı anlaşılmıştır. Ayrıca bu katılaşma, tüm yağ besleme hattında gerçekleşmiş ve yağ beslemesini engellemiştir.



**Şekil 5.1** Gazometre suyu taşınarak tıkanan reaktör

Bu soruna çözüm olarak 24 bar basma kapasiteli bir monopomp pompa temin edilmiştir. Pompa devreye alınana kadar deneyler aksamıştır. Deney sürecinde, aynı şebekeden enerji alan ve eş zamanlı olarak çalışan, sera iklimlendirme sistemi ile reaktörün eş zamanlı çalışmasından dolayı şebeke yükü kaldıramamış ve deneyler yaklaşık 30 gün aksamıştır. Monopomp ile yapılan deneylerde, pompa çıkışı hortum ile reaktöre bağlanıp yağ beslemesi yapılmıştır. Ancak bir süre sonra yağ besleme hortumunun yırtıldığı gözlemlenmiştir. Bunun, reaktör içerisindeki buharlaşmanın yağ besleme hattının sıcaklığını arttırmasından dolayı olduğu tespit edilmiştir. Bu soruna çözüm olarak reaktörün yağ besleme hattı girişine çek valf takılıp hortumla

atık motor yağı buharının direk teması engellenmiştir. Monopomp ile yapılan deneylerde, daha önceki deneylerde karşılaşılan, tıkanıklık sorunları görülmüştür. Bu soruna, yağ besleme hattının çapının küçük olmasının neden olduğu düşünülmüş ve çözüm olarak reaktörün alt kısmına kadar olan yağ besleme hattı kesilerek yağ reaktöre flanştan direk olarak beslenmiştir. Kesilen hattın beslenen atık motor yağı, reaktörün üst kısımlarında sıcaklığın daha düşük olması nedeniyle kuruma dönüşerek gazometreye giden gaz hattının, Şekil 5.2' deki gibi, tıkanmasına sebebiyet vermiştir ve bu tıkanıklık reaktör basıncının artmasına yol açmıştır. Artan reaktör basıncından dolayı reaktörün alt kısmında yırtık meydana gelmiş, kaçaklar oluşmuş ve reaktör tabanından oluşan sızıntıdan dolayı yanma oluşmuştur. Bu soruna çözüm olarak reaktör tabanı tekrar kaynatılmıştır.



**Şekil 5.2** Gaz çıkış hattındaki tıkanıklık ve sızıntı yapan reaktör

Laboratuvar ortamında yapılan deneyler sonucunda reaktörün, kül fırının dışında kalan kısımlarında, sıcaklığın yeteri kadar yüksek olmamasından dolayı tıkanıklık meydana geldiği kanısına varılmıştır. Bu soruna çözüm olarak, yüzey alanının artması, dolayısıyla materyalin ısı transferinin de artırılması için serpantin şeklinde yeni bir reaktör tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Bu imalat sürecinde de çalışmalar aksamış gazlaştırma işlemi yapılamamıştır. Serpantin reaktör denemelerinde de sitem kurum yapmış tıkanıklıklar oluşmuştur. Bu sorun araştırıldığında tıkanıklığa yalnızca sıcaklığın değil, atık motor yağının çok yüksek karbon içeriğinden dolayı, gazlaştırma ortamında yeteri kadar oksijen/havanın

olmamasının da etkisi olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca gazometreye bağlı olan, flexible borudan oluşan gaz tesisatında yırtıklar meydana gelmiş bu sorunun giderilmesi için stabil gaz tesisatı gerektiği kanısına varılmıştır. Bunun üzerine, yeni bir gaz tesisatı ve gaz/kurum temizleme sistemi kurulmuştur. Elde edilen sentez gazının kalorifik değerinin artırılması ve prosesin kolaylaşması için yapılan bu çalışmalar sonucunda, kalorifik değeri yaklaşık  $18500 \text{ kJ/Nm}^3$  olan ve kg atık yağ başına yaklaşık  $1 \text{ m}^3$  gaz verimine sahip sentez gazı üretilenmiştir. Çam talaşı için bu değerler yaklaşık  $10539 \text{ kJ/Nm}^3$  ile  $400 \text{ lt/kg}$  olarak tespit edilmiştir.

## 5.2 Termogravimetrik Analiz Sonuçları

Atık motor yağının TGA analizi sonucunda, kütle kaybının  $150 - 450 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığındaki tek bölgede olduğu tespit edilmiştir. Bu kütle kaybının, atık motor yağının buharlaşmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Benzer olarak, Fernandes et al. (2018) çalışmasında, atık motor yağının TGA analizi sonucunda, atık motor yağının kütle kaybının %91'lik kısmının  $100 - 350 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında ve %7'lik kısmının  $350 - 450 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında gerçekleştiğini raporlamışlardır. Uçar ve ark. (2016), atık motor yağının TGA analizi sonucunda dekompozisyonun  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de başladığını ve  $425 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de son bulduğunu raporlanmıştır. Ayrıca, maksimum kütle kaybının  $315 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de gerçekleştiği belirtilmektedir. Guo et al. (2014) yaptıkları çalışmada atık motor yağının termogravimetrik analizleri sonucunda kütle kaybının %81,7'nin  $160 - 340^\circ\text{C}$  aralığında atık motor yağının daha küçük hidrokarbonlara parçalanması ve buharlaşması ile ikinci kütle kaybının ise %18,3'lük kısım ile  $340 - 520 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında piroliz gazlarının yanmasıyla oluşan kayıplar olarak belirtilmektedirler.

Çam talaşının TGA analizi sonucunda, kütle kaybının  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan ve  $100 - 380 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında olmak üzere iki ana bölgede oluştuğu tespit edilmiştir. Sıcaklığın  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar olan kısmında %8'lik bir kayıp gözlemlenmiştir. İkinci bölgede ise kütle kaybı %77 olarak tespit edilmiştir. Benzer olarak, Ma et al. (2019) çalışmasında, odun talaşının TGA analizi sonucu kütle kaybının yaklaşık %79,1'inin  $177- 377 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında gerçekleştiğini belirtmiştir. Yoon et al. (2019), meşe odunu ile yaptığı çalışmada, meşe odununun TGA analizi sonucunda, kütle kaybının %65'lik kısmının,  $170 - 352 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında gerçekleştiği raporlanmıştır. Varma et al.

(2019) odun talaşının termogravimetrik analizini yapmış ve sıcaklığın 33 – 200 °C aralığındayken kütle kaybının %6 olduğunu ve düşük sıcaklıktaki bu kaybın nedeninin, hafif uçucu bileşenler ve talaş içerisindeki nemden kaynaklandığını raporlamıştır. İkinci bölge olan, 200 – 344 °C aralığında oluşan kütle kaybı yaklaşık %52.56 olarak belirtilmiştir. Çalışmada, üçüncü bölge 344 °C’de başlayıp 500°C’de bitmekte ve bu bölge boyunca kütle kaybının %38,34 olduğu belirtilmektedir. Ayrıca 500 °C’nin üstünde oluşan kütle kaybının %1 seviyelerinde olduğunu ve 800 °C’ye kadar olan kısmın da neredeyse kütle sabit kaldığını belirtmektedir. Mallick et al. (2018) çalışmasında, talaşın kütle kaybının %78,71’lik kısmının 280 – 360 °C olan ikinci bölgede oluştuğunu raporlamıştır.

### 5.3 Sentez Gazı Analiz Sonuçları

Atık motor yağı ve çam talaşının gazlaştırması sonucunda elde edilen sentez gazının alt ısıl değeri  $18481 \text{ kJ/Nm}^3$ , yalnızca atık motor yağının gazlaştırılmasıyla elde edilen sentez gazının alt ısıl değerinin  $16962 \text{ kJ/Nm}^3$  ve yalnızca talaşın gazlaştırılmasından elde edilen sentez gazının alt ısıl değerinin  $10539 \text{ kJ/Nm}^3$  olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, atık motor yağı ve çam talaşından elde edilen karışım gazının  $C_xH_y$  yüzdesi, yalnızca talaştan elde edilen sentez gazının yaklaşık 3.5 katı gibi bir farkla dikkat çekmektedir. Ayrıca, karışım gazının  $CO_2$  içeriği talaş gazının yaklaşık yarısı,  $CO$  içeriği ise yaklaşık 7 katı kadar daha az olduğu ve  $H_2$  oranının çok az bir fark ile fazla olduğu analizler sonucunda belirlenmiştir.

Lim ve Zainal’ın (2008), yaptıkları çalışmada, biyokütle kaynağından üretilen sentez gazı kalorifik değeri  $4,74 \text{ MJ/m}^3$ , Indrawan ve arkadaşlarının (2017), düşük kaliteli biyokütle kaynaklarının gazlaştırılmasından elde edilen sentez gazının kalorifik değeri  $7 \text{ MJ/m}^3$  ve Raman ve Ram (2013), çalışmalarında odun talaşının gazlaştırılması ile  $5,6 \text{ MJ/Nm}^3$  kalorifik değere sahip sentez gazı elde edildiği raporlanmıştır. Ayrıca, Uçar ve ark. (2016), atık motor yağının pirolizinden elde ettikleri sentez gazının kalorifik değerinin  $28,8 \text{ MJ/Nm}^3$  olduğunu raporlamışlardır.

Tez çalışması kapsamında atık motor yağı ve çam talaşı birlikte gazlaştırılması ile elde edilen sentez gazı kalorifik değeri  $18,481 \text{ MJ/Nm}^3$  olan bir sentez gazı



üretimiştir. Üretilen gazın kalorifik değeri literatürle karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Üretilen sentez gazının kalorifik değeri yüksek olmasının nedeninin, sentez gazı içerisindeki yüksek  $C_xH_y$  ve  $H_2$  kompozisyonu olduğu düşünülmektedir.

#### 5.4 Motorun Verim ve Emisyon Analizleri Sonuçları

Yapılan analizler sonucunda, atık motor yağı ve çam talaşının gazlaştırılması ile elde edilen sentez gazının içten yanmalı bir gaz motorunda kullanımının etkileri incelenmiştir. Motorun 5 kW<sub>e</sub> yük altında, saatte tükettiği sentez gazı miktarının 3.5 m<sup>3</sup> ile 4,5 m<sup>3</sup> aralığında, gaz kompozisyonuna bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda hesaplamalar yapılmış ve motorda, yakıt olarak sentez gazı kullanımıyla verim ve emisyonunda olan etkiler incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, elektrik çevrim veriminin %21 ile %27 aralığında, sentez gazı kompozisyonuna göre değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Egzoz gazında bulunan, CO<sub>2</sub>, CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gazlarının emisyon analizleri yapılmış ve ortalama değerler sırasıyla, %9,32, 1776 ppm, 1034 ppm, 108 ppm, 1142 ppm, 2 ppm ve 2796 ppm olarak tespit edilmiştir.

Dasappa ve arkadaşları (2011), 100 kW<sub>e</sub> kapasiteye sahip içten yanmalı bir motoru, ortalama %85 yükte, 4.5 MJ/kg kalorifik değere sahip sentez gazı ile beslemiş ve çalışma sonucunda, motor veriminin yaklaşık %25 olduğunu, CO emisyonunun 10410 mg/m<sup>3</sup> (~9090 ppm) ve NO<sub>x</sub> emisyonunun ise 126 mg/Nm<sup>3</sup> (~65 ppm) olduğunu rapor etmişlerdir.

Homdoug ve arkadaşları (2015), yaptıkları çalışmada biyokütle kaynaklı sentez gazının 600 cc hacminde, 3,17 kW<sub>e</sub> maksimum güç çıkışlı gaz motorunda yakıt olarak kullanımı sonucunda, elektrik çevrim veriminin %23,09 olduğunu belirtmişlerdir. Benzer olarak, Indrawan ve arkadaşlarının (2017), 7 MJ/Nm<sup>3</sup> kalorifik değere sahip sentez gazı ile çalıştırdıkları motor 5 kW<sub>e</sub> yükte %21,3 elektrik çevrim verimine ulaşırken bu değeri doğal gaz kullanıldığında %22,7 olduğu raporlanmıştır.

Ayrıca, Raman ve Ram (2013), 5,6 MJ/Nm<sup>3</sup> alt ısıl değere sahip sentez gazı ile çalışan, 75 kW<sub>e</sub> gücündeki içten yanmalı bir motoru, %7 ile %97 aralığında değişken yükler altında çalıştırmış ve değişen yüklere göre motor çevrim veriminin %3,1 ile %20,7 arasında, yakıt sarfiyatının ise 2,79 m<sup>3</sup>/saat ile 15,525 m<sup>3</sup>/saat aralığında değiştiğini belirtmektedir.

Literatür çalışmalarından görüldüğü üzere, tez çalışması kapsamında atık motor yağı ve çam talaşından üretilen sentez gazının kalorifik değeri, yalnızca biyokütle kaynakları kullanılarak üretilen sentez gazı çalışmalarından önemli ölçüde fazla olduğu, ayrıca bu gaz ile beslenen içten yanmalı motorun veriminin diğer çalışmalara çok yakın olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, içten yanmalı motorun NO<sub>x</sub> emisyonunun diğer çalışmalardan oldukça fazla iken CO emisyonunun nispeten daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, sentez gazı kompozisyonunun sürekli değişmesi nedeni ile yakıtın tam yanmasını sağlayacak stoichiometric yakıt hava oranı sağlanamamasıdır. Bunun sonucu olarak, sentez gazı kompozisyonuna göre zengin yanma veya fakir yanma gerçekleşmektedir. Zengin veya fakir yanma, egzoz emisyonu değerlerini etkilemektedir.

## **5.5 Tarım Motor Aksamına Etkisi**

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere, sentez gazının, gaz motorunda yakıt olarak kullanımının bujiler üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi silindir içerisinde ciddi tar izlerine rastlanmıştır. Bunun temel nedeninin, sentez gazı içerisindeki tarın yeteri kadar giderilmemesidir. Bhaduri ve ark. (2017), sentez gazının içten yanmalı gaz motorunda kullanımı sonucunda piston ve silindir kafalarında kahverengi renk değişimi oluştuğunu raporlamıştır. Ancak, bu değişimin olağan olan, yağ içeriğindeki tortularla da ilişkilendirilebileceğini belirtilmişlerdir.

## 6. ÖNERİLER

Atık motor yağı ve çam talaşının gazlaştırılma/piroliz çalışmalarında, özellikle kırsal kesim ve şebekeye erişimi olmayan yerlerde ısı ve güç sistemleri için kullanılabilir bir gaz elde etmek amaçlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, atık motor yağından elde edilen sentez gazının alt ısıl değerinin yaklaşık  $18.5 \text{ MJ/m}^3$  gibi oldukça yüksek bir değere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, çam talaşından elde edilen sentez gazının alt ısıl değeri yaklaşık  $10.5 \text{ MJ/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Bu değerler, doğalgaz ile karşılaştırıldığında ( $\sim 35 \text{ MJ/m}^3$ ) oldukça düşük kalmaktadır. Ancak, doğalgazın maliyeti ve kaynakta dışa bağımlılık düşünüldüğünde yerli kaynakların kullanımı önem kazanmaktadır. Bunun yanında, atık motor yağının çevresel sorunlara yol açtığı ve temiz yakma teknolojilerine ihtiyaç duyulduğu bir gerçektir. Gazlaştırma/piroliz teknolojisinin, düşük emisyon ve yüksek verime sahip olması, ayrıca zengin hammadde yelpazesi diğer dönüşüm yöntemlerinden bir adım önde olmasını sağlamaktadır.

Yapılan çalışmalar sonucunda sentez gazının, içten yanmalı motor performansında önemli ölçüde bir azalmaya neden olmadığı ve özellikle şebekeye uzak kırsal bölgelerde gerek biyokütle kaynaklı gerekse endüstriyel atıklardan elde edilen sentez gazının halihazırda kullanılan gaz motorlarında kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Küçük ölçekli sistemlerde elektrik çevrim verimi gaz kalitesi ve konsantrasyonuna göre %21 ile %27 aralığında değişiklik göstermekte iken bunun yanında egzoz emisyonlarının da fosil yakıtlara göre nispeten daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, egzoz sıcaklıklarının ortalama  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  olduğu tespit edilmiştir. Jeneratör egzozundan atık olarak çıkan bu ısı, jeneratör ünitelerinin kojeneratör sistemlerine çevrilmesiyle faydalı ısı enerjisi haline dönüştürülebilir. Bu ısı sıcak su veya diğer ısıtma uygulamaları için kullanılabilir. Bunun yanında, elektrik verimi %27'ye kadar çıkarken bu verim kojenerasyon ünitelerinde toplam olarak %80'e kadar çıkabilmektedir.

Ancak sentez gazının içten yanmalı gaz motorlarında kullanımı, motor aksamında bazı sorunlara yol açabilmektedir. Bu sorunların temel nedeni, sentez gazı

içerisindeki başta tar olmak üzere kirletici maddelerdir. Sentez gazı içerisindeki tar, silindir ve piston yüzeyine sıvanarak motor aksamında tortu halinde kalıntılar bırakmaktadır. Bu kalıntılar, ilerleyen zamanlarda silindirde kor haline gelip tutuşarak vuruntuya sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca, yapılan çalışmada ve literatür araştırmalarında görüldüğü üzere, atık motor yağının atmosferik basınç altında, kademeli olarak sıcaklığa maruz kalmasının, atık motor yağının buharlaşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, atık motor yağının gazlaştırılması basınç altında veya ani ısıtma ile gerçekleştirileceği düşünülmektedir. Aksi takdirde, buharlaşan atık motor yağı, gaz motoruna beslendiğinde, motor aksamında tar ile birlikte tortu haline gelip vuruntu gibi sorunları meydana getirmektedir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, atık motor yağının gazlaştırma/piroliz sistemlerinde kullanımındaki sorunların çözülmesine yönelik, sistem geliştirme ve iyileştirme çalışmalarına öncelik verilecektir. Motorda oluşan ve gaz içerisindeki tardan kaynaklandığı düşünülen tortuları gidermek için, gaz üretimi ve giderimi aşamalarında kontrollü denemelere yoğunlaşılacak ve elde edilen veriler ışığında, kırsal kesimde kullanılabilirliği olan kompakt bir sistemin oluşturulması amaçlanacaktır. Çünkü tez verileri, atık motor yağından elde edilen sentez gazının, doğalgazla ekonomik olarak rekabet edebilir olduğunu, doğal gazın olmadığı yerlerde ise büyük bir avantaja sahip olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdoulmoumine, N., Adhikari, S., Kulkarni, A. and Chattanathan, S.,** 2015, A review on biomass gasification syngas cleanup, *Applied Energy*, 155, 294-307p.
- Abuelnour, A., Wahid, M., Hosseini, S., Saat, A., Saqr, K., Sait, H. and Osman, M.,** 2014, Characteristics of biomass in flameless combustion: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 363-370p.
- Ahrenfeldt, J., Thomsen, T., Henriksen, U. and Clausen, L.,** 2013, Biomass gasification cogeneration e A review of state of the art technology and near future perspectives, *Applied Thermal Engineering*, 50, 1407-1417p.
- Aneke, M. and Wang, M.,** 2017, Thermodynamic Comparison of alternative Biomass Gasification Techniques for producing Syngas for Gas Turbine Application, *Energy Procedia*, 142, 829-834p.
- Aneke, M. and Wang, M.,** 2017, Thermodynamic Comparison of alternative Biomass Gasification Techniques for producing Syngas for Gas Turbine Application, *Energy Procedia*, 142, 829-834p.
- Anis, S. and Zainal, Z.,** Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2355-2377p.
- Asadullah, M.,** 2014, Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 201-215p.
- Asomaning, J., Haupt, S., Chae, M. and Bressler, D.,** 2018, Recent developments in microwave-assisted thermal conversion of biomass for fuels and chemicals, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 642-657p.
- Baskar, C., Baskar, S. and Dhillon, R.,** 2012, *Biomass Conversion*, New York, ISBN 978-3-642-28417-5, 1-11p.
- Basu, P.,** 2006, *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, Halifax

**KAYNAKLAR (devam)**

- Basu, P.**, 2010, Biomass Gasification and Pyrolysis, London, ISBN 978-0-12-374988-8, 1-30p.
- Basu, P.**, 2013, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, London, ISBN: 978-0-12-396488-5, 300-360p.
- Beenackers, A.**, 1999, Biomass Gasification in Moving Beds, A Review of European Technologies, Renewable Energy, 16, 1180-1186p.
- Beld, B., Holle, E. and Florijin, J.**, 2012, The use of pyrolysis oil and pyrolysis oil derived fuels in diesel engines for CHP applications, Applied Energy, 102, 190-197p.
- Bhaduri, S., Berger, B., Pochet, M., Jeanmart, H., Contino, F.**, 2017, HCCI engine operated with unscrubbed biomass syngas, Fuel Processing Technology, 157, 52-58p.
- Bhattacharya, S., Hla, S., Pham, H.**, 2001, A study on a multi-stage hybrid gasifier-engine system, Biomass and Bioenergy, 21, 445-460p.
- Bhoi, P., Huhnke, R., Kumar, A. and Indrawan, N.**, 2018, Co-gasification of municipal solid waste and biomass in a commercial scale downdraft gasifier, Energy, 163, 513-518p.
- Braimakis, K., Atsonios, K., Panopoulos, K., Karellas, S. and Kakaras, E.**, 2014, Economic evaluation of decentralized pyrolysis for the production of bio-oil as an energy carrier for improved logistics towards a large centralized gasification plant, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 35, 54-72p.
- Bridgwater, A. And Peacocke, G.**, 2000, Fast pyrolysis processes for biomass, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4, 1-73p.
- Bridgwater, A.**, 1994, Advances in thermochemical biomass conversion, United Kingdom, ISBN 978-94-010-4582-7
- Bridgwater, A.**, 2010, Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, Biomass and Bioenergy, 38, 68-94p.

**KAYNAKLAR (devam)**

- Brown, R., 2011,** Thermochemical Processing of Biomass, United Kingdom, ISBN 978-0-470-72111-7
- Chen, G., Guo, X., Cheng, Z., Yan, B., Dan, Z. and Ma, W., 2017,** Air gasification of biogas-derived digestate in a downdraft fixed bed gasifier, Waste Management, 69, 162-169p.
- Chiaramonti, D., Oasmaa, A. and Solantatusta, Y., 2007,** Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 1056-1086p.
- Chiaramonti, D., Oasmaa, A. and Solantausta, Y., 2007,** Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 1056-1086p.
- Cucek, L., Varbanov, P., Klemes, J. and Kravanja, Z., 2012,** Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains, Energy, 44, 135-145p.
- Cui, H., Turn, S., Keffer, V., Evans, D., Tran, T. and Foley, M., 2010,** Contaminant estimates and removal in product gas from biomass steam gasification, Energy Fuels, 24, 1222-1233p.
- Dai, J., Cui, H. and Grace, J., 2012,** Biomass Feeding for Thermochemical Reactors, Progress in Energy and Combustion Science, 38, 716-736p.
- Dasappa, S., Subbukrishna, D., Suresh, K., Paul, P., Prabhu, G., 2011,** Operational experience on a grid connected 100 kWe biomass gasification power plant in Karnataka, India, Energy for Sustainable Development, 15, 231-239p.
- De, S., Agarwal, A., Moholkar, V., Thallada, B., 2018,** Coal and Biomass Gasification, Singapore, ISSN 2522-8366p.

**KAYNAKLAR (devam)**

- Devi, L., Ptasinski, K. and Janssen, F.,** 2003, A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes, *Biomass and Bioenergy*, 24, 125-140p.
- Fillippis, P., Scarsella, M., Caprariis, B. and Uccellari, R.,** 2015, Biomass gasification plant and syngas clean-up system, *Energy Procedia*, 75, 240-245p.
- Fernandes, S., Silva, H. and Oliveira, J.,** 2018, Developing enhanced modified bitumens with waste engine oil products combined with polymers, *Construction and Building Materials*, 160, 714-724p.
- Gao, J., Zhao, Y., Sun, S., Che, H., Zhao, G. and Wu, J.,** 2012, Experiments and numerical simulation of sawdust gasification in an air cyclone gasifier, *Chemical Engineering Journal*, 213, 97-103p.
- Ghani, N., Vogiatzis, C. and Szmerekovsky, J.,** 2018, Biomass feedstock supply chain network desing with biomass conversion incentives, *Energy Policy*, 116, 39-49p.
- Guo, H., Peng, F., Zhang, H., Xiong, L., Li, S., Wang, C., Wang, B., Chen, X. and Chen, Y.,** 2014, Production of hydrogen rich bio-oil derived syngas from co-gasification of bio-oil and waste engine oil as feedstock for lower alcohols synthesis in two-stage bed reactor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 9200-9211p.
- Henriksen, U., Ahrenfeldt, J., Jensen, T., Gobel, B., Bentzen, J., Hindsgaul, C. and Sorensen, L.,** 2006, The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier, *Energy*, 31, 1542-1553p.
- Heidenreich, S., Müller, M. and Foscolo, P.,** 2016, *Advanced Biomass Gasification*, London, ISBN: 978-0-12-804296-0.
- Homdoun, N., Tippiyawong, N. and Dussadee, N.,** 2015, Performance and emissions of a modified small engine operated on producer gas, *Energy Convesion and Management*, 94, 286-292p.



**KAYNAKLAR (devam)**

- Hurley, S., Xu, C., Preto, F., Shao, Y., Li, H., Wang, J. and Tourigny, G.,** 2012, Catalytic Gasification of Woody Biomass in an Air-Blown Fluidized-Bed Reactor Using Canadian Limonite Iron Ore as The Bed Material, *Fuel*, 91, 170-176p.
- Indrawan, N., Thapa, S., Bhoi, P., Huhnke, R. and Kumar, A.,** 2017, Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass, *Energy Conversion and Management*, 148, 593-603p.
- Isahak, W., Hisham, M., Yarmo, M. and Hin, T.,** 2012, A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5910-5923p.
- Koçar, G., Eryaşar, A., Ersöz, Ö., Arıcı, Ş. ve Durmuş, A.,** 2010, *Biyogaz Teknolojileri*, Ege Üniversitesi Basımevi, ISBN 978-605-61108-0-1, İzmir, 251s.
- Lim, M. and Alimuddin, Z.,** 2008, Bubbling fluidized bed biomass gasification- Performance, process, findings and energy analysis, *Renewable Energy*, 33, 2339-2343p.
- Liu, T., Mcconkey, B., Huffman, T., Smith, S., Macgregor, B., Yemshanov, D. and Kulshreshtha, S.,** 2014, Potential and impacts of renewable energy production from agricultural biomass in Canada, *Applied Energy*, 130, 222-229p.
- Ma, J., Luo, H., Liu, Z., Li, D., Gai, G. and Jiao, W.,** 2019, Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of the hydrochars derived from co-hydrothermal carbonization of sawdust and sewage sludge using thermogravimetric analysis, *Bioresource Technology*, 282, 133-141p.
- Mallick, D., Poddar, M., Mahanta, P. and Moholkar, V.,** 2018, Discernment of synergism in pyrolysis of biomass blends using thermogravimetric analysis, *Bioresource Technology*, 261, 294-305p.

**KAYNAKLAR (devam)**

- Marculescu, C., Cenuşa, V., Alexe, F.,** 2016, Analysis of biomass and waste gasification lean syngases combustion for power generation using spark ignition engines, *Waste Management*, 47, 133-140p.
- Merhpooya, M., Khalili, M. and Sharifzadeh, M.,** 2018, Model development and energy and exergy analysis of the biomass gasification process (Based on the various biomass sources), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 869-887p.
- Milne, T., Evans, R. and Abatzoglu, N.,** 1998, Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion, Colorado.
- Motta, I., Miranda, N., Filho, R. And Maciel, M.,** 2018, Biomass gasification in fluidized beds: A review of biomass moisture content and operating pressure effects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 998-1023p.
- Motta, I., Miranda, N., Filho, R., Maciel, M.,** 2018, Biomass gasification in fluidized beds: A review of biomass moisture content and operating pressure effects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 998-1023p.
- Munoz, M., Moreno, F., Roy, J., Ruiz, J., Arauzo, J.,** 2000, Low heating value gas on spark ignition engines, *Biomass and Bioenergy*, 18, 431-439p.
- Nicodeme, T., Berchem, T., Jacquet, N., Richel, A.,** 2018, Thermochemical conversion of sugar industry by-products to biofuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 151-159p.
- Osikowska, A., Kotowicz, J., Uchman, W.,** 2017, Thermodynamic assessment of the operation of a self-sufficient, biomass based district heating system integrated with a Stirling engine and biomass gasification, *Energy*, 141, 1764-1778p.
- Patel, V., Patel, D., Varia, N., Patel, R.,** 2017, Co-gasification of lignite and waste wood in a pilot-scale (10 kWe) downdraft gasifier, *Energy*, 119, 834-844p.

**KAYNAKLAR (devam)**

- Popa, V. and Volf, I.**, 2018, Biomass as Renewable Raw Material to Obtain Bioproducts of High-Tech Value, Amsterdam, ISBN: 987-0-444-63774-1, 20-27p.
- Prakash, M., Sarkar, A., Sarkar, J., Mondal, S. and Chakraborty, J.**, 2017, Proposal and design of a new biomass based syngas production system integrated with combined heat and power generation, *Energy*, 133, 986-997p.
- Raman, P. and Ram, N.**, 2013, Performance analysis of an internal combustion engine operated on producer gas, in comparison with the performance of the natural gas and diesel engines, *Energy*, 63, 317-333p.
- Reed, T. and Das, A.**, 1998, Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Colorado.
- Rinaldini, C., Allesina, G., Pedrazzi, S., Matarelli, E., Savioli, T.**, 2017, Experimental investigation on a Common Rail Diesel engine partially fuelled by syngas, *Energy Conversion and Management*, 138, 526-537p.
- Ruiz, J., Juarez, M., Morales, M., Munoz, P. and Mendivil, M.**, 2013, Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174-183p.
- Saidur, R., Abdelaziz, E., Demirbas, A., Hossain, M. and Mekhilef, S.**, 2011, A review on biomass as a fuel for boilers, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2262-2289p.
- Sansaniwal, S., Pal, K., Rosen, M., Tyagi, S.**, 2017, Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 363-384p.
- Sansaniwal, S., Rosen, M. and Tyagi, S.**, 2017, Global Challenges in The Sustainable Development of Biomass Gasification: an Overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 23-43p.

**KAYNAKLAR (devam)**

- Shabbir, I. and Mirzaeian, M.**, 2016, Feasibility analysis of different cogeneration systems for a paper mill to improve its energy efficiency, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 16535-16548p.
- Shah, A., Srinivasan, R., To, S. and Columbus, E.**, 2010, Performance and emissions of a spark-ignited engine driven generator on biomass-based syngas, *Bioresource Technology*, 101, 4656-4661p.
- Siedlecki, M., Jong, W. and Verkooijen, A.**, 2011, Fluidized Bed Gasification as a Mature and Reliable Technology for the Production of Bio-Syngas and Applied in the Production of Liquid Transportation Fuels—A Review, *Energies*, 4, 389-434p.
- Strzalka, R., Schneider, D. and Eicker, U.**, 2017, Current status of bioenergy technologies in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 801-820p.
- Susastriawan, A., Saptodi, H., Purnomo**, 2017, Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 989-1003p.
- Toro, J., Perez, Y. and Alzate, C.**, 2018, Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material, *Electronic Journal of Biotechnology*, 33, 52-62p.
- Toro, J., Perez, Y., Alzate, C.**, 2018, Evaluation of biogas and syngas as energy vectors for heat and power generation using lignocellulosic biomass as raw material, *Electronic Journal of Biotechnology*, 33, 52-62p.
- Tsiakmakis, S., Mertzis, D., Dimaratos, A., Toumasatos, Z., Samaras, Z.**, 2014, Experimental study of combustion in a spark ignition engine operating with producer gas from various biomass feedstocks, *Fuel*, 122, 126-139p.
- Uçar, S., Özkan, A. ve Karagöz, S.**, 2016, Co-pyrolysis of waste polyolefins with waste motor oil, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 119, 233-241p.

**KAYNAKLAR (devam)**

- Varma, A., Singh, L., Shankar, R. and Mondal, P.,** 2019, Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products, 89, 224-235p.
- Warnecke, R.,** 2000, Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier, Biomass and Bioenergy, 18, 489-497p.
- Widjaya, E., Chen, G., Bowtell, L., Hills, C.,** 2018, Gasification of non-woody biomass: A literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, 184-193p.
- Yoon, K., Oh, J., Tsang, D., Know, E. and Song, H.,** 2019, Catalytic thermolysis of oak sawdust using Fe-based catalyst and CO<sub>2</sub>, Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 32, 269-275p.
- Zhang, N., Peng, H., Li, Y., Yang, W., Zou, Y. and Duan, H.,** 2018, Ammonia determines transcriptional profile of microorganisms in anaerobic digestion, Brazilian Journal of Microbiology, 49, 770-776p.
- Zhao, X., Liu, W., Deng, Y. and Zhu, J.,** 2017, Low-temperature microbial and direct conversion of lignocellulosic biomass to electricity: Advances and challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 268-282p.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her konuda destek olan, bilgi birikimi ile bana yok gösteren ve yüksek lisansım süresince danışmanlığımı üstlenen, fikir ve tavsiyeleriyle çalışmalarına yön veren değerli danışmanım Dr.Öğr.Üy. Ahmet ERYAŞAR'a ve değerli katkılarından dolayı tez çalışması süresince desteğini eksik etmeyen değerli hocam Prof. Dr. Günnur KOÇAR'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneyisel çalışmalarım boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen Ar. Gör. Şefik ARICI, Uzman Dr. Gül BAYRAKÇ, Teknisyen Özkan KUPLAY, Galip TURHAN ve Ali ARVALLI'ya, Teşekkür ederim.

İki senelik yüksek lisans sürecinde bana yardımcı ve destek olan çalışma arkadaşım , Beril GÜNDOĞAN, Benginur BAŞTABAK, Elif GÖDEKMERDAN, Sevim ÖZGÜL ve Banu ASLAN'a, yardım ve desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak hayatım boyunca, bana maddi ve manevi her daim destek olan ve kararlarımda beni destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bahadır Han SABANLI

İzmir/2019

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad ve Soyad:** Bahadır Han SABANLI

**Doğum yeri ve tarihi:** İzmir-22/06/1993

**Telefon:** +90 507 930 86 05

**Adres:**7365/1 sok no: 25 Daire 8 Bayraklı/İzmir

**E-mail:** bhan.sabanli@gmail.com

### Eğitim Bilgileri

**2017-2019:** Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü Tezli Yüksek Lisans Programı

**2011-2016:** Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta.