

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AFŞİN ELBİSTAN LİNYİT KÖMÜRÜ VE RDF'DEN ÜRETİLEN YARIKOK  
KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIMLARININ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gülşen KURT**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kimya Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AFŞİN ELBİSTAN LİNYİT KÖMÜRÜ VE RDF'DEN ÜRETİLEN YARIKOK  
KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIMLARININ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gülşen KURT  
506121016**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kimya Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hanzade AÇMA**

**HAZİRAN 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506121016 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gülşen KURT**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**AFŞİN ELBİSTAN LİNYİT KÖMÜRÜ VE RDF'DEN ÜRETİLEN YARIKOK KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIMLARININ BELİRLENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Hanzade AÇMA**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Güldem ÜSTÜN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Didem ÖZÇİMEN**      .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **4 Mayıs 2015**  
**Savunma Tarihi :**      **10 Haziran 2015**



*Sevgili aileme, hocalarıma ve arkadaşlarıma,*



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam süresince, bilgilerini ve yardımlarını esirgemeyen, manevi desteklerini her an hissettiğim değerli hocam Prof. Dr. Hanzade AÇMA'ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve yardımlarıyla katkıda bulunan, laboratuvar çalışmalarında yardım aldığım Kimya Yük. Müh. Ayşen AKTÜRK'e, Kimya Yük. Müh. Seza Özge GÖNEN'e, Dr. Murat ALKAN'a, bilgilerini ve dostluklarını paylaşan ve her zaman yanımda olan Arş. Gör. Demet YENİALACA ÖZALTUN ve Kimya Yük. Müh. Ferda CİVAN'a, Kimya Müh. Şenol DEMİR'e sonsuz teşekkür ederim.

Tüm öğrenim hayatım boyunca maddi, manevi büyük fedakârlıklar yaparak benim bu noktaya gelmemi sağlayan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2015

Gülşen KURT  
Kimya Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|                                                                                                |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                     | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                              | ix   |
| KISALTMALAR .....                                                                              | xi   |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                                           | xiii |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                             | xv   |
| ÖZET.....                                                                                      | xvii |
| SUMMARY.....                                                                                   | xix  |
| 1.GİRİŞ .....                                                                                  | 1    |
| 2. KÖMÜR.....                                                                                  | 3    |
| 2.1 Kömürün Yapısı .....                                                                       | 3    |
| 2.2 Kömürün Oluşumu ve Kömürleşme Süreci .....                                                 | 4    |
| 2.3 Kömürün Kullanımını Belirleyen Önemli Özellikleri.....                                     | 4    |
| 2.3.1 Nem.....                                                                                 | 5    |
| 2.3.2 Uçucu madde .....                                                                        | 5    |
| 2.3.3 Karbon ve hidrojen içeriği .....                                                         | 6    |
| 2.3.4 Kül .....                                                                                | 6    |
| 2.3.5 Isıl değer .....                                                                         | 7    |
| 2.3.6 Azot içeriği .....                                                                       | 7    |
| 2.3.7 Oksijen içeriği.....                                                                     | 8    |
| 2.3.8 Kükürt içeriği.....                                                                      | 8    |
| 2.3.9 Mineral madde .....                                                                      | 9    |
| 2.4 Kömürün Önemi .....                                                                        | 9    |
| 3. RDF (REFUSE DERIVED FUEL-ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT) .....                                    | 13   |
| 3.1 RDF'yi Oluşturan Atıklar.....                                                              | 14   |
| 3.2 RDF'nin Sınıflandırması .....                                                              | 16   |
| 3.3 RDF Üretimi.....                                                                           | 18   |
| 3.4 RDF Üretiminin Çevresel Etkileri.....                                                      | 20   |
| 3.4.1 VOC, koku ve toz .....                                                                   | 20   |
| 3.4.2 Atıksu.....                                                                              | 20   |
| 3.5 RDF'nin Önemi .....                                                                        | 20   |
| 4. KÖMÜR YARIKOKU VE RDF YARIKOKU KARIŞIMLARININ YANMASI.....                                  | 23   |
| 4.1 Kömür ve RDF'nin Yanması.....                                                              | 23   |
| 4.2 Uçucu maddenin yanması .....                                                               | 24   |
| 4.3 Yarıkokun yanması.....                                                                     | 24   |
| 4.4 Kömür Yarıkoku ve RDF Yarıkoku Karışımlarının Yanması .....                                | 26   |
| 4.4.1 Kömür yarıkoku-RDF yarıkoku karışımlarının yanmasını etkileyen faktörler.....            | 26   |
| 4.4.2 Kömür yarıkoku-RDF yarıkoku karışımlarının yakılmasının kirletici oluşumuna etkisi ..... | 28   |

|                                                                   |            |
|-------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5. KÖMÜR, RDF VE KARIŞIMLARI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR</b> | <b>29</b>  |
| <b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>                                     | <b>31</b>  |
| 6.1 Kullanılan Numunelerin Tanıtılması ve Uygulanan Ön İşlemler   | 33         |
| 6.2 Kömür ve RDF Yarıkoklarının Elde Edilmesi                     | 35         |
| 6.3 Kısa Analiz                                                   | 35         |
| 6.4 Elementel Analiz                                              | 36         |
| 6.5 Isıl Değer Analizi                                            | 36         |
| 6.6 Termal Analiz                                                 | 37         |
| 6.7 FTIR Analizi                                                  | 38         |
| 6.8 X-Işını Difraktometresi (XRD)                                 | 38         |
| 6.9 X-Işını Floresan Spektrometresi (XRF)                         | 38         |
| 6.10 Yüzey Alanı Ölçümü (BET)                                     | 39         |
| 6.11 Tanecik Boyutu Analizi                                       | 39         |
| 6.12 Mikroyapısal Analiz (SEM)                                    | 39         |
| <b>7. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI VE YORUMLANMASI</b>         | <b>41</b>  |
| 7.1 Isıl Değer Analiz Sonuçları                                   | 42         |
| 7.2 Kısa Analiz Sonuçları                                         | 44         |
| 7.3 Elementel Analiz Sonuçları                                    | 46         |
| 7.4 Termal Analiz Sonuçları                                       | 48         |
| 7.4.1 KA ve KY numunelerinin termal analiz sonuçları              | 48         |
| 7.4.2 RA ve RY numunelerinin termal analiz sonuçları              | 53         |
| 7.4.3 Karışımların termal analiz sonuçları                        | 57         |
| 7.5 FTIR Analizi Sonuçları                                        | 61         |
| 7.5.1 KA ve KY numunelerinin FTIR analizi sonuçları               | 64         |
| 7.5.2 RA ve RY numunelerinin FTIR analizi sonuçları               | 71         |
| 7.5.3 Karışımların FTIR analizi sonuçları                         | 79         |
| 7.6 XRD Analizi Sonuçları                                         | 85         |
| 7.6.1 KA ve KY numunelerinin XRD analizi sonuçları                | 85         |
| 7.6.2 RA ve RY numunelerinin XRD analizi sonuçları                | 86         |
| 7.6.3 Karışımların XRD analizi sonuçları                          | 87         |
| 7.7 XRF Analizi Sonuçları                                         | 88         |
| 7.7.1 KA ve KY numunelerinin XRF analizi sonuçları                | 88         |
| 7.7.2 RA ve RY numunelerinin XRF analizi sonuçları                | 89         |
| 7.7.3 Karışımların XRF analizi sonuçları                          | 90         |
| 7.8 BET Analizi Sonuçları                                         | 93         |
| 7.9 Tanecik Boyutu Analizi Sonuçları                              | 95         |
| 7.10 SEM Analizi Sonuçları                                        | 96         |
| <b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER</b>                                       | <b>101</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                  | <b>103</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                   | <b>107</b> |

## **KISALTMALAR**

|             |                                              |
|-------------|----------------------------------------------|
| <b>ASTM</b> | : American Society for Testing and Materials |
| <b>BET</b>  | : Brauner-Emmet-Teller                       |
| <b>DTG</b>  | : Derivative Thermogravimetry                |
| <b>DTA</b>  | : Differential Thermal Analysis              |
| <b>DSC</b>  | : Differential Scanning Calorimetry          |
| <b>FTIR</b> | : Fluorescence Transform Infrared            |
| <b>ISO</b>  | : International Standards Organization       |
| <b>KA</b>   | : Kömür Ana Numune                           |
| <b>KY</b>   | : Kömür Yarıkok                              |
| <b>MTEP</b> | : Milyon Ton Eşdeğeri Petrol                 |
| <b>RA</b>   | : RDF Ana Numune                             |
| <b>RY</b>   | : RDF Yarıkok                                |
| <b>SEM</b>  | : Scanning Electron Microscopy               |
| <b>TG</b>   | : Thermogravimetry                           |
| <b>TGA</b>  | : Thermogravimetric Analysis                 |
| <b>XRD</b>  | : X-ray Diffraction                          |
| <b>XRF</b>  | : X-ray Fluorescence                         |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 7.1 : Numune adları ve kodları.....                               | 41 |
| Çizelge 7.2 : Numunelerin ısııl değ er analiz sonuçları.....              | 44 |
| Çizelge 7.3 : Numunelerin kısa analiz sonuçları.....                      | 46 |
| Çizelge 7.4 : Numunelerin elementel analiz sonuçları.....                 | 47 |
| Çizelge 7.5 : KA ve KY numunelerinin yanma özellikleri.....               | 52 |
| Çizelge 7.6 : RA ve RY numunelerinin yanma özellikleri.....               | 57 |
| Çizelge 7.7 : Karışımların yanma özellikleri.....                         | 60 |
| Çizelge 7.8 : FTIR dalga numarası aralıkları ve fonksiyonel grupları..... | 61 |
| Çizelge 7.9 : KA ve KY numunelerinin XRF analizi sonuçları.....           | 91 |
| Çizelge 7.10 : RA ve RY numunelerinin XRF analizi sonuçları.....          | 92 |
| Çizelge 7.11 : Karışımların XRF analizi sonuçları.....                    | 93 |
| Çizelge 7.12 : Numunelerin BET analizi sonuçları.....                     | 95 |
| Çizelge 7.13 : Numunelerin tanecik boyutu analizi sonuçları.....          | 96 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1 : RDF örneği .....                                                               | 13 |
| Şekil 3.2 : RDF üretim prosesi .....                                                       | 19 |
| Şekil 4.1 : Heterojen yarıkok yanma mekanizması .....                                      | 25 |
| Şekil 6.1 : Ana numunelere ve üretilen yarıkoklara uygulanan analizlerin akım şeması ..... | 32 |
| Şekil 6.2 : Yarıkok karışımlarına uygulanan analizlerin akım şeması .....                  | 33 |
| Şekil 6.3 : Yatay boru fırın.....                                                          | 35 |
| Şekil 6.4 : TA marka, SDT Q600 model termal analiz cihazı.....                             | 36 |
| Şekil 6.5 : Leco TruSpec® CHN model elementel analiz cihazı ve S modülü .....              | 36 |
| Şekil 6.6 : IKA C2000 model kalorimetre .....                                              | 37 |
| Şekil 7.1 : KA ve KY numunelerinin TG eğrileri.....                                        | 48 |
| Şekil 7.2 : KA ve KY numunelerinin DTG eğrileri.....                                       | 49 |
| Şekil 7.3 : KA ve KY numunelerinin DTA eğrileri.....                                       | 50 |
| Şekil 7.4 : KA ve KY numunelerinin DSC eğrileri.....                                       | 51 |
| Şekil 7.5 : RA ve RY numunelerinin TG eğrileri.....                                        | 53 |
| Şekil 7.6 : RA ve RY numunelerinin DTG eğrileri.....                                       | 54 |
| Şekil 7.7 : RA ve RY numunelerinin DTA eğrileri.....                                       | 55 |
| Şekil 7.8 : RA ve RY numunelerinin DSC eğrileri.....                                       | 56 |
| Şekil 7.9 : Karışımların TG eğrileri.....                                                  | 58 |
| Şekil 7.10 : Karışımların DTG eğrileri.....                                                | 58 |
| Şekil 7.11 : Karışımların DTA eğrileri.....                                                | 59 |
| Şekil 7.12 : Karışımların DSC eğrileri.....                                                | 59 |
| Şekil 7.13 : KA numunesinin FTIR spektrumu.....                                            | 64 |
| Şekil 7.14 : KY400 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 65 |
| Şekil 7.15 : KY500 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 66 |
| Şekil 7.16 : KY600 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 67 |
| Şekil 7.17 : KY700 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 68 |
| Şekil 7.18 : KY800 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 69 |
| Şekil 7.19 : KY900 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 70 |
| Şekil 7.20 : KA ve KY numunelerinin FTIR spektrumları.....                                 | 71 |
| Şekil 7.21 : RA numunesinin FTIR spektrumu.....                                            | 72 |
| Şekil 7.22 : RY400 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 73 |
| Şekil 7.23 : RY500 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 74 |
| Şekil 7.24 : RY600 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 75 |
| Şekil 7.25 : RY700 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 76 |
| Şekil 7.26 : RY800 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 77 |
| Şekil 7.27 : RY900 numunesinin FTIR spektrumu.....                                         | 78 |
| Şekil 7.28 : RA ve RY numunelerinin FTIR spektrumları.....                                 | 79 |
| Şekil 7.29 : 10 RY400+90 KY800 numunesinin FTIR spektrumu.....                             | 80 |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 7.30 :</b> 20 RY400+80 KY800 numunesinin FTIR spektrumu..... | 81  |
| <b>Şekil 7.31 :</b> 30 RY400+70 KY800 numunesinin FTIR spektrumu..... | 82  |
| <b>Şekil 7.32 :</b> 40 RY400+60 KY800 numunesinin FTIR spektrumu..... | 83  |
| <b>Şekil 7.33 :</b> 50 RY400+50 KY800 numunesinin FTIR spektrumu..... | 84  |
| <b>Şekil 7.34 :</b> Karışımların FTIR spektrumları.....               | 85  |
| <b>Şekil 7.35 :</b> KA ve KY numunelerinin XRD analizleri.....        | 86  |
| <b>Şekil 7.36 :</b> RA ve RY numunelerinin XRD analizleri.....        | 87  |
| <b>Şekil 7.37 :</b> Karışımların XRD analizleri.....                  | 88  |
| <b>Şekil 7.38 :</b> KA numunesinin SEM görüntüsü.....                 | 97  |
| <b>Şekil 7.39 :</b> KY numunelerinin SEM görüntüleri.....             | 98  |
| <b>Şekil 7.40 :</b> RA numunesinin SEM görüntüsü.....                 | 99  |
| <b>Şekil 7.41 :</b> RY numunelerinin SEM görüntüleri.....             | 99  |
| <b>Şekil 7.42 :</b> Karışımların SEM görüntüleri.....                 | 100 |

## **AFŞİN ELBİSTAN LİNYİT KÖMÜRÜ VE RDF'DEN ÜRETİLEN YARIKOK KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIMLARININ BELİRLENMESİ**

### **ÖZET**

Ülkemizde artan enerji ihtiyacı ve petrol, doğalgaz rezervlerinin kısıtlı oluşu buna karşı linyit kömürünün rezervlerinin fazla olmasından dolayı, gelecekte linyit kömürünün öneminin daha da artacağı öngörülmektedir. Ülkemizde kaliteli linyitlerden nem, kül ve kükürt içeriği yüksek, ısı değeri düşük olan kalitesiz linyitlere kadar çok çeşitli kömürler bulunmaktadır. Ancak, düşük kaliteli linyitlerin toplam rezerv içindeki payı oldukça yüksektir. Uygun koşulların sağlanamadığı yakma sistemlerinin kullanılması, kömürden enerji üretim verimini önemli ölçüde düşürmekte ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu çerçevede, düşük kaliteli linyit potansiyelinin değerlendirilmesi için uygun teknolojilerin geliştirilmesi, ülkemizin öncelikli enerji politikaları arasında yer almaktadır.

RDF; evsel, ticari veya endüstri proseslerinden çıkan tehlikeli ve tehlikesiz atıkların, geri kazanılabilen malzemeleri (cam, plastik, metal vb.) ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan yanabilir özelliğe sahip geri dönüşümsüz malzemeden türetilen alternatif katı yakıttır. Ülkemiz biyokütle potansiyeli içinde RDF'nin payı oldukça yüksektir. RDF'nin kömürle birlikte kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması konusunda önemli bir seçenek sunmaktadır.

Kömür ve RDF'den enerji üretimi dünya genelinde yaygın olarak yakma yoluyla sağlanmaktadır. Kömür ve RDF'den üretilen yarıkoklardan birlikte yakma yoluyla kaliteli yakıt üretilir. Kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku yakan yakma sistemlerinin ticari boyuttaki modellenmesi, tasarımı ve işletilmesi için kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku karışımlarının yanma davranımları ve aralarındaki etkileşimin bilinmesi gereklidir.

Bu çalışmada, düşük kaliteli Afşin Elbistan linyit kömürü ve RDF (Refuse Derived Fuel-Atıklardan Türetilmiş Yakıt) kullanılarak kaliteli yakıt üretmek hedeflenmiştir. Kömür ve RDF'den farklı sıcaklıklarda (400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C) yarıkoklar üretilmiş ve ısı değeri en yüksek olan kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku seçilerek, farklı oranlarda RDF yarıkoku içeren (%10, %20, %30, %40, %50) karışımlar hazırlanmıştır.

Linyit kömürü ve RDF ana numunesine, yarıkoklarına ve farklı oranlarda hazırlanan karışımlarına yanma davranımlarını belirlemek amacıyla farklı analizler (kısa analiz, elementel analiz, ısı değeri analizi, FTIR, XRD, XRF, SEM, BET ve tanecik boyutu analizleri) uygulanmıştır. Ayrıca, aynı numunelere yanma davranımlarını belirlemek amacıyla termal analizler (TGA, DTA, DSC, DTG) uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, Afşin Elbistan linyit kömürü ve RDF'den üretilen yarıkok karışımlarından yüksek ısı değeri yakıt üretimi gerçekleştirilmiştir.



## **DETERMINATION COMBUSTION BEHAVIOR OF CHARS PRODUCED FROM AFSIN ELBISTAN LIGNITE COAL AND RDF**

### **SUMMARY**

The big part of the world energy requirement, which increases in parallel with population and industrialization, is provided from fossil fuels. The difference between energy supply and consumption in our country increases every year and accordingly, our foreign dependence on energy in terms of sources increases as well. Today, issues which are dealing with the environmental pollution resulting from production and consumption of fossil fuels and restricted reserves of fossil resources are the most important problems.

Coal which is a kind of sedimentary rock has a very important share of world energy production. Also, coal is the most important energy source of Turkey and most of the Turkish coal's are low quality lignites having high ash, sulfur, moisture content and low heating value. The amount of low quality lignites in the total lignite reserves is extremely high. Using inconvenient combustion systems causes significant reduction in the efficiency of energy production from coal and also environmental pollution. Coal burning is a major contributor to global warming. Thus, the development of appropriate technologies for the evaluation of low-quality lignite potential must be one of the most important energy policy of our country. Electricity generation using coal burning produces approximately twice the greenhouse gases per kilowatt compared to generation using natural gas.

Refuse-Derived Fuel (RDF) is a kind of alternative solid fuel that is obtained by proper methods out of domestic waste, industrial waste and toxic waste, and has calorific value. Recycling waste, reuse of waste and use of those that have calorific value allows significant decrease in the waste amount that will be sent for storage, and such practice enables a management that complies with the strategy developed by European Union in the subject of waste management. RDF production and use needs to be reformed and standardized within this scope.

Refuse-derived fuel typically consists of pelletized or fluffy MSW that remains after the removal of noncombustible materials such as ferrous materials, glass, grit, and other noncombustible materials. The remaining material is then called RDF.

Energy production through the direct combustion of coal and RDF is the oldest known method. In recent years, combustion systems for burning coal-RDF blends together, are being developed.

Energy production from coal and RDF is widely provided by combustion. Co-combustion of coal and RDF blends gains more importance in terms of the utilization of low quality coals and RDF economically and reducing the total pollutant emissions. Investigation of the combustion behaviour and combustion kinetics of

coal-RDF blends is essential for the modelling, design and operation of the combustion systems at industrial scale.

Co-combustion means simultaneous combustion of two or more fuels in the same plant for energy production. Although this mode of combustion has been applied for many years, the interest has been enhanced recently.

Co-combustion can be carried out in various ways for various purposes. A coarse classification could be as follows, covering new plants as well as existing ones converted for the purpose. First, a small amount (a few percent of total fuel power) of biofuel or waste is fired together with coal in a boiler, originally designed for coal.

Turkey's large lignite reserves and agricultural wastes, which are important with regard to reduce our energy dependency, are widely evaluated by burning together. In this study, instead of the raw coal and RDF, coal and RDF char, which have higher calorific values are burned together.

Various governments worldwide are beginning to put regulations in place and to encourage development of more sustainable sources of power generation in order to protect populations worldwide from the immediate harmful effects on life and health, and to protect the environment for future generation.

RDF is appeared to be an important feedstock for three main reasons.

First, it is a renewable resource that could be sustainably developed in the future. Second, it appears to have formidably positive environmental properties, reduced greenhouse gas (GHG) emissions, possibly reduced NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> depending on the fossil fuels displaced. However, it also has negative impacts, such as emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons including polycyclic aromatic hydrocarbons, dioxins, furans, volatile organic compounds and heavy metals especially when combusted in traditional stoves.

The purpose is to get rid of waste or to replace coal by RDF utilisation. Second, a small amount of fuel with a high heating value is fired together with a fuel having a low heating value that needs thermal support to attain a desired combustion temperature. Third, spontaneous use of co-combustion with fuels in any ratio, depending on price, availability and local supply conditions.

The first type is of greatest significance due to its potential ability to reduce the consumption of coal, thereby decreasing the emissions of greenhouse gases. It is of interest to assess the possibility and reliability of such utilisation of RDF and waste in a plant designed for the base fuel (normally coal). Secondly, addition of high-value fuel to a low-value one, or in general terms, combination of any fuels with different properties, may have useful secondary consequences, such as reduction of emissions or improving reliability of operation.

Coal and RDF are quite different in composition. Co-firing RDF with coal has the capability to reduce both NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> levels from existing pulverized coal fired power plants.

This could enhance the interest for combinations of fuels, because certain fuel constituents may influence each other, "synergy effects" may take place, leading to an improvement of operation of a boiler and to avoidance of inconveniences related to some fuels.

Residues from agricultural production and processing industries are readily available in large quantities and solid wastes are generated by every social activity.

Combustion of these residues can reduce the volume of wastes, allowing for energy recovery and increase of economic returns to rustic communities. Co-combustion of solid residues and wastes with coal in existing power plants is a most interesting option, because apart from the environmental benefits it offers technical and economic benefits, by replacing part of conventional energy sources, while at the same time using existing infrastructures.

The knowledge of the behaviour of coal and RDF during combustion not only separately but also together, is essential, as interactions may occur between them that may affect the overall efficiency of the process. It is necessary to know the combustion behaviour and kinetics of RDF-coal or RDF char-coal char blends for the designing of combustion systems to be used. Combustion characteristics of a fuel before it is used in energy production can be determined by using thermo-analytical techniques such as TG, DTG, DSC and DTA which cover a wide range of applications in research, development and economic assessment of fuels. They have been used in a wide variety of areas related to proximate analysis, coal reactivity and heat effects associated with coal pyrolysis, combustion and heat of hydrogenation. Although thermogravimetric analysis technique (TGA) operates in a different condition compared to a real combustor, it provides a rapid and reliable quantitative method for thermochemical processes.



## 1.GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve gelişen teknolojiye paralel olarak, enerjiye olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Günümüzde kullanılan enerjinin büyük bir kısmı; petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır.

Fosil enerji kaynaklarının önemli bir kısmı belirli coğrafyalarda sınırlı rezervlere sahiptir ve yakın bir gelecekte tükeneceği öngörülmektedir. Dünya genelinde, enerji ihtiyacını ithal yoluyla karşılayan ülkelerin sayısı, enerji ihraç eden ülkelere göre çok fazladır. Bu durumdaki ülkelere, enerjide dışa bağımlılık nedeni ile ülkelerin ekonomik ve siyasi durumları olumsuz yönde etkilenmekte ve sürdürülebilir gelişme sağlamaları güçleşmektedir (Shi ve diğ, 2013).

Ayrıca, fosil enerji kaynaklarının kullanımı sonucunda atmosfere salınan kirleticiler, sera etkisi ve küresel ısınmaya bu da, iklim değişikliği, buzulların erimesi, yağış rejimlerinin değişmesi, kuraklığın oluşması, orman ve bitki çeşitliliğinin azalması, çeşitli hastalıkların ortaya çıkması gibi çok önemli sorunlara neden olmaktadır (Nithikul, 2007; Toftegaard ve diğ, 2010).

Bu nedenlerden dolayı; çevre dostu, temiz, kolay bulunabilir, yenilenebilir, sürdürülebilir ve ekonomik alternatif enerji kaynaklarının kullanımı giderek önem kazanmaktadır. Ancak; alternatif enerji kaynakları, yüksek maliyet ve teknik risklerden dolayı fosil yakıtlarla rekabet mücadelesi vermektedir (Burnley ve diğ, 2011).

Bu çalışmada, ülkemizde ve dünya genelinde, enerji üretiminde önemli paya sahip bir fosil yakıt olan kömür kullanılmıştır. Ülkemizde artan enerji ihtiyacı ve petrol, doğalgaz rezervlerinin kısıtlı oluşu buna karşı linyit kömürünün rezervlerinin fazla olmasından dolayı, gelecekte linyit kömürünün öneminin daha da artacağı öngörülmektedir. Ülkemizde kaliteli linyitlerden nem, kül ve kükürt içeriği yüksek, ısı değeri düşük olan kalitesiz linyitlere kadar çok çeşitli kömürler bulunmaktadır. Ancak, düşük kaliteli linyitlerin toplam rezerv içindeki payı oldukça yüksektir. Uygun koşulların sağlanamadığı yakma sistemlerinin kullanılması, kömürden enerji

Üretim verimini önemli lde düşürmekte ve evre kirliliğine neden olmaktadır. Bu çerçevede, düşük kaliteli linyit potansiyelinin değerlendirilmesi için uygun teknolojilerin geliştirilmesi, ülkemizin öncelikli enerji politikaları arasında yer almaktadır.

RDF; evsel, ticari veya endüstri proseslerinden çıkan tehlikeli ve tehlikesiz atıkların, geri kazanılabilen malzemeleri (cam, plastik, metal vb.) ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan yanabilir özelliğe sahip geri dönüşümsüz malzemeden türetilen alternatif katı yakıttır. Ülkemiz biyokütle potansiyeli içinde RDF'nin payı oldukça yüksektir. RDF'nin kömürle birlikte yakılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması konusunda önemli bir seçenek sunmaktadır (Wei ve diğ, 2009).

Nispeten az bir sermaye yatırımı gerektiren bu teknoloji, birçok ülkede uygulanan en ekonomik CO<sub>2</sub> emisyonu azaltma yöntemleri arasındadır. RDF'nin kömürle birlikte yakılmasını cazip kılan diğer unsurlar ise, temin kolaylığı, enerji üretim maliyeti ve verimliliğidir (Wan ve diğ, 2008).

Atıkların geri dönüşümü, yeniden kullanımı depolamaya gönderilecek atık miktarında ciddi oranda azalma sağlamakta ve böylece atık bertarafı sağlanmaktadır. Bu uygulama atık yönetimi alanında Avrupa Birliği tarafından geliştirilen strateji ile uyumlu bir yönetime imkan vermektedir. RDF retimi ve kullanımının bu çerçevede yeniden ele alınarak killendirilmesi ve standardize edilmesi gerekmektedir (Suksankraisorn ve diğ, 2004).

## **2. KÖMÜR**

Kömür, çoğunlukla organik ve inorganik kalıntıların fiziksel ve kimyasal olarak değişimi ile meydana gelen, kahverengi ve siyah renkte, yanabilen ve homojen özellik göstermeyen katı fosil bir kayadır (Ruppert, 2002; Kural, 1998).

Kömürlerin bileşimleri ve özellikleri, kendisini oluşturan organik ve inorganik bileşiklere ve kömürleşme derecesine bağlı olarak değişmektedir (Krevelen, 1993).

### **2.1 Kömürün Yapısı**

Kömür esas olarak organik kısmı oluşturan maseraller ve inorganik kısmı oluşturan su ile minerallerden oluşmaktadır (Karayığit ve Köksoy, 1998).

Kömürün içerdiği organik kısım, değişik bitki dokularının kömürleşmesinden oluşmuştur. Kömürde biçim ve yapısı mikroskobik olarak tanımlanabilen en küçük organik birime maseral adı verilir. Maseraller; vitrinit, liptinit ve inertinit olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Farklı koşullarda oluşan maserallerin fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olabilmektedir (Kural, 1998).

Kömür, tümüyle organik madde içermez ve çeşitli mineralleri de içerir. İnorganik maddeler, belirli kristal yapısı olan katılar, çözünmüş tuzlar veya kömürlerin içinde bulunan organometalik bileşiklerden oluşur (Karayığit ve Köksoy, 1998).

Bu inorganik maddeler, kökenlerine göre üç grupta sınıflandırılırlar:

- Kömürün gözenekleri içerisinde çözünmüş tuzlar ve diğer inorganik maddeler,
- Kömür maserallerinin organik bileşenleriyle birleşmiş inorganik maddeler,
- Kristal yapıda olan veya olmayan inorganik tanecikler (Ruiz ve Crelling, 2008).

## 2.2 Kömürün Oluşumu ve Kömürleşme Süreci

Kömür; uygun şartların sağlanması ile, bataklık ortamlarda bitki parçalarının bozunması, parçalanması bazı kimyasal reaksiyonlar sonucu bu organik malzemenin fiziksel ve kimyasal değişimlere uğraması sonucu meydana gelir (Ünalan, 2010).

Genellikle, bitkisel maddeler veya bitki parçaları uygun bataklık ortamlarda birikip, çökelir ve jeolojik olaylarla birlikte yer altına gömülürler. Bu organik kütleler, gömüldükten sonra, önceleri gömülmenin oluşturduğu basınç, daha sonra da ortamın sıcaklığından etkilenirler. Bu etkilenme sonucu organik maddenin bünyesinde fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelir (Özpeker, 1998).

Sıcaklık ve basınç şartlarının bu organik maddeleri etkilemesi sonucu, bu ortamdan, sırası ile önceleri (turbadan - taşkömürü aşamasına kadar) su ve su buharı, CO<sub>2</sub>, CO; (taşkömürü aşamasında) CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> ve en ileri aşamalarda H<sub>2</sub> (antrasit aşamasında) uzaklaşır. Bu şartların dışında (volkanik faaliyet, fay hareketleri, radyoaktif elementlerin bulunduğu ortamlarda) yerin sıcaklığı olağanüstü bir şekilde ve normalden çok fazla bir şekilde artmaktadır. Sıcaklık, süre ve basınç arttıkça önceleri “Turba”, sonra “Linyit”, daha sonra “Alt bitümlü kömür”, sonra “Taşkömürü”, “Antrasit” ve en sonunda şartlar uygun olursa “Grafit”e dönüşür. Bu ilerleyen olgunlaşma sürecine “Kömürleşme”, her seviyeye de “Kömürleşme derecesi (Rank)” denilmektedir (Anonim, 2009).

Kömürleşmeyi etkileyen temel değişkenler, sıcaklık, süre, basınç, tektonik olaylar, kıvrımlar, faylar ve radyoaktivitedir (Özpeker, 1998).

Bu değişkenlerden en önemlisi sıcaklıktır. Sıcaklıkla kimyasal kömürleşme hızlanır ve kömürleşme derecesi artar (Kural, 1998).

## 2.3 Kömürün Kullanımını Belirleyen Önemli Özellikleri

Kömürün daha kaliteli ve verimli bir şekilde kullanımını sağlamak için, özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Kömürün, yakma sistemlerinde ve çevre üzerinde yarattığı sorunları azaltmak amacıyla yapılan çalışmaların verimli olabilmesi için sahip olduğu özelliklerin bilinmesi gereklidir.

Kömürün, nem, uçucu madde, kül ve sabit karbon içerikleri kısa analiz sonucu saptanan özelliklerini; karbon, hidrojen, azot, oksijen ve kükürt içerikleri ise elementel analiz sonucu saptanan özelliklerini oluşturmaktadır. Ayrıca, kömürün ısı değeri, mineral maddesi, külünün bileşimi de yanma davranımını belirleyen özellikleridir.

Kömürün özelliklerinin saptanması amacıyla uygulanmakta olan standartlardan en yaygın olarak kullanılanlar, ASTM ve ISO standartlarıdır (Meriçboyu ve Beker, 1998).

### **2.3.1 Nem**

Kömürün içerdiği nem miktarı oldukça önemlidir ve kömürün fiziksel ve kimyasal özelliğini ve kömür kullanım yöntemlerini etkiler. Nem içeriği reaktiviteye, gazlaştırma, piroliz ve kurutma gibi proseslere, boyut ayrıştırma karakteristiğine, taşınım ekonomisine, tutuşma noktasına ve kömürün yanabilme özelliğine doğrudan etki yapar (Meriçboyu ve Beker, 1998; Erdöl ve diğ, 1999).

Kömürün nem içeriğinin yanmaya olan etkisi, kullanılan yakma sistemine doğrudan bağlıdır. Nemin etkisinin en fazla görüldüğü aşamanın yanmanın başlamadan önceki süreç olduğu, nemin yapıyı terk etmesi sonucu geride kalan kuru kütlenin ısınmasıyla uçucu madde çıkışı ve yanmasının başladığı belirtilmektedir. Nem, uçucu madde yanma sıcaklığına ulaşmayı geciktirmesi ve yapıyı etkilemesi açısından yanma sürecinde önem taşımaktadır (Atakül ve diğ, 1996).

### **2.3.2 Uçucu madde**

Kömür, oksijensiz ortamda ısıtıldığında kimyasal olarak değişikliğe uğrar ve kömürden, çoğunluğu hidrojen, karbonmonoksit, metan ve diğer hidrokarbonlar gibi yanıcı gazlardan oluşan, karbondioksit ile su buharı gibi yanmayan gazları ve katran buharlarını da içeren uçucu madde çıkışı olur. Değişik yaşlardaki kömürlerin uçucu maddelerinin bileşimleri ve miktarları da önemli farklılıklar gösterir; kömürün yaşı arttıkça içerdiği uçucu maddenin miktarı ve uçucu madde içerisindeki yanmayan gaz miktarı azalır.

Kömürün koklaşabilirliği ile karbonizasyon sırasındaki gaz ve katı ürünlerin miktarları konusunda bilgi verdiğinden kömüre uygulanan uçucu madde analizi önemlidir (Meriçboyu ve Beker, 1998).

### **2.3.3 Karbon ve hidrojen içeriği**

Karbon ve hidrojen kömürde hem organik ve hem de anorganik yapıda bulunur. Kömürleşme süreci ilerlerken karbon miktarı artar ve hidrojen/karbon oranı azalır. Kömür yandığı zaman oluşan ısının hemen hemen tamamı içerdiği karbon ve hidrojenin yanması sonucunda oluşmaktadır.

Mevcut yöntemlerle kömürün içerdiği organik ve anorganik bağlı karbon ve hidrojenin tamamını veya her birini ayrı ayrı saptamak olasıdır (Meriçboyu ve Beker, 1998).

### **2.3.4 Kül**

Kömür yandığında kalan külün kaynağı, kömürün içerdiği mineral maddelerdir. Kömürün mineral maddesi ile külü, ne içerik ne de miktar bakımından aynı değildir. Kömür yandığı zaman, içerdiği mineral maddelerin şu temel değişikliklere uğraması sonucunda kül oluşmaktadır:

- Hidrat suyu kaybı.
- Karbonatların parçalanması.
- Kükürdün parçalanması.
- Alkali metal klorürlerin uçucu hale gelmesi.
- Kömürün yanması sonucu oluşan metal oksitlerin, organik ve piritik kükürdün bir kısmını kükürttrioksit halinde tutması.
- Eğer sıcaklık yeterince yüksek ise, oksitler, silikatlar ve serbest silikanın tepkimeye girerek yeni bileşikler oluşturması.

Külün kökeni kömürün içerdiği mineral maddeler olduğundan, özellikleri mineral maddenin bileşimine ve oksidasyonun gerçekleştirildiği şartlara bağlıdır. Kül kömürün istenmeyen bir bileşenidir, yakma alanına taşınır ve işlem sonunda atılır. Kömür külünün içerdiği bazı bileşenler çeşitli amaçlarla kullanılabilirse de külün ekonomik değeri düşüktür (Kopuz, 2011).

### 2.3.5 Isıl değeri

Bir yakıtın ısı değeri, birim ağırlıktaki (veya hacimdeki) yakıtın tamamen yanması sonucu açığa çıkan ısı biriminin sayısıdır.

Bir kömürün ısı değeri, kömürleşme derecesine ve organik yapısına karışmış olan yanmayan maddelerin miktarına bağlıdır. Genç kömürlerin ısı değerleri düşüktür; çünkü oksijen ve nem içerikleri fazladır; fakat genç kömürler çok yaygın olarak yakılmaktadır; bunun nedeni miktarlarının fazla ve fiyatlarının düşük olmasıdır. Kuru külsüz temelde hesaplanan ısı değeri, kömürün yaşıyla sistematik olarak değişir ve yaşı arttıkça artar. Kömürün ısı değerinin saptanması amacıyla geliştirilen yöntemler iki gruba ayrılır:

- Isı değerini deneysel olarak saptanması.
- Isı değerini hesap yoluyla bulunması.

Kömürün ısı değerini deneysel olarak saptanması için günümüzde en çok kullanılan yöntem kömürün oksijen kalorimetre bombasında yakılmasıdır; kömür bir bomba içinde, basınç altında, oksijen ile sabit hacimde yakılarak açığa çıkan ısı ölçülür. Kalorimetre bombasıyla saptanan ısı değerleri yanma ürünlerinin (karbondioksit ve su gibi) oda sıcaklığına soğutulması ile bulunan değerlerdir. Bu değerlerin pratik bir anlamı yoktur; çünkü bir yakıt yakılırken yanma ürünleri oda sıcaklığına soğutulurken dışarı atılmaz. Pratikte sıcak baca gazlarıyla kaybolan sadece duyulur ısı değildir; içerdiği su buharının buharlaşma gizli ısı da kaybedilir. Su, havada ve kuru kömürde nem olarak bulunur; karbona bağlı hidrojen de yanma sırasında su oluşturur. Kalorimetre bombasında gerçekleştirilen yanma sırasında nem önce buharlaşır, sonra da sıvı su halinde yoğunlaşır ve yoğunlaşma ısını verir. Bu nedenlerle, kalorimetre bombasında yakma yöntemi ile saptanan yanma ısısına “üst ısı değeri” denir. “Alt ısı değeri” ise tüm suyun yoğunlaşma ısısının üst ısı değerinden çıkarılması yoluyla bulunur. Alt ısı değeri gerçeğe daha yakın bir büyüklüktür ve saptanabilmesi için yakıtın içeriğinin bilinmesi gerekmektedir (Meriçboyu ve Beker, 1998).

### 2.3.6 Azot içeriği

Kömürdeki azotun, bitkisel ve/veya hayvansal proteinler, azotça zengin bitkiler, bitki alkoloidleri ve klorofilden kaynaklandığı genellikle kabul edilmektedir. Kömürün

içerdiği azotun tamamı organik yapıdadır ve büyük kısmı, yüksek molekül ağırlıklı heterosiklik bileşikler içinde yer almaktadır. Kömürün azot içeriği genelde %1-2 arasında değişiklik gösterir (Williams ve diğ, 2000).

Yanma sırasında kömürde bulunan azot, yanma koşullarına ve kullanılan kömürün doğasına bağlı olarak amonyak, elementel azot veya azot oksitlere dönüşebilir. Kömürün yakılmasıyla oluşan NO<sub>x</sub> emisyonları, asit yağmurlarına ve fotokimyasal dumanlara sebep olduğu için ciddi bir problemdir. Yakma sistemlerinin tasarımı, hava/kömür oranı, sıcaklık ve kömürün içerdiği azot miktarı, yayılan azot oksit miktarını önemli ölçüde etkilemektedir (Speight, 2005; Xu ve Kumagai, 2002).

### **2.3.7 Oksijen içeriği**

Kömürdeki oksijen içeren fonksiyonel gruplar; hidroksitler (ağırlıklı olarak fenoller), eterler, karboksilik asitler, karboniller, furanlar, piranlar ve esterlerdir.

Kömürün oksijen içeriğinin doğrudan saptanması oldukça zordur; çünkü oksijen kömürün içerdiği minerallerde anorganik, organik yapı içinde ise organik bileşikler halinde ve ayrıca da nem içerisinde bulunmaktadır (Meriçboyu ve Beker, 1998).

### **2.3.8 Kükürt içeriği**

Kömürün içerdiği kükürt türleri, organik kükürt ve inorganik kükürt olmak üzere ikiye ayrılır. Kömürde hidrokarbon yapısına bağlı olarak bulunan tüm kükürde organik kükürt denir. Organik kükürt bileşikleri kömürde asıl yapının bir parçası olarak düzgün dağılmış halde bulunurlar. Bu tür kükürdün kökeni, kömürü oluşturan bitkisel maddelerdir. İnorganik kükürt ise kömürde, sülfat, disülfür ve elementel kükürt şekillerinde bulunmaktadır.

Yüksek kükürt içerikli kömürlerin herhangi bir ön işlemten geçirilmeden yakılması, atmosferdeki kükürt dioksit emisyonlarının artmasındaki en önemli nedenlerden biri olarak görülür. Kömürün içerdiği kükürt, sadece hava kirliliğine değil, aynı zamanda yakma ve kazan ekipmanlarının korozyonuna ve cüruf bağlamasına sebep olur (Meriçboyu ve Beker, 1998).

Atmosfere bırakılan kükürtdioksit miktarı çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik ön işlemlerle azaltılabilir. Kömürün yakılmasından önce kükürt içeriğinin belli bir

sınırın altına indirilmesi, oluşacak kükürtlü bileşiklerin yanma sonrası tutulmasından daha ekonomiktir (Yaman ve diğ, 1998).

Kömürde bulunan inorganik kükürt fiziksel ayırma metotlarıyla giderilebilirken, organik kükürdün giderilebilmesi için kimyasal ayırma metotlarına gereksinim vardır (Speight, 2005).

### **2.3.9 Mineral madde**

Kömürün mineral veya inorganik bileşenleri, kömürün organik yapısının parçası olmayan elementlerin toplamıdır.

İçerdiği mineral madde kömürün üretimini, hazırlanmasını ve kullanımını etkiler. Mineral madde kömür üretim ve taşımacılığında arzu edilmeyen bir yakıt bileşenidir. Kömür hazırlama ve zenginleştirme işlemleri kömürün içerdiği mineral maddeyi azaltmaya yöneliktir. Kömür hazırlama tekniklerinin etkinlikleri ne olursa olsun, daima önemli bir miktar mineral madde kömürde kalır ve okside olarak külü oluşturur. Kullanılan kömürün mineral maddesinin bileşimi ve miktarı, üretilen kokun kalitesini etkiler (Meyers, 1982).

### **2.4 Kömürün Önemi**

Dünya birincil enerji tüketiminde son 10 yıllık artış oranı yaklaşık %30 düzeyindedir. Bu dönemde, en dikkat çekici gelişme kömürün toplam enerji arzı içerisindeki payına ilişkindir. Söz konusu 10 yılda petrolün payı %36.4'den %31.5'e, nükleer payı %6.7'den %5.1'e ve biyoyakıt payı %10.1'den %9.9'a düşerken, doğal gazın payı sadece 0.7 puanlık artışla %20.6'dan %21.3'e yükselmiş, buna karşın kömürün toplam içindeki payı 5.4 puan artışla %23.4'den %28.8 düzeyine yükselmiştir (Url-1).

Son 10 yılda dünya enerji tüketimi yaklaşık %30 artarken ülkemiz enerji tüketimi %53 artmıştır. Birincil enerji arzı 2012 yılında bir önceki yıla göre %4.9 artış göstererek 120.1 MTEP olmuştur. Bu arzın kaynaklara dağılımında ilk sırayı 39.3 MTEP ile kömür almaktadır. Kömürü sırasıyla; 37.4 MTEP ile doğal gaz, 31.2 MTEP ile petrol, 5 MTEP ile hidrolik, 3.5 MTEP ile odun, hayvan ve bitki artıkları ve 3.5 MTEP ile jeotermal, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklar izlemektedir (Url-1).

Uluslararası Enerji Ajansı tarafından, günümüzde mevcut enerji politikalarının gelecekte de sürdürüleceği varsayımına göre yapılan tahminlerde; dünya birincil enerji arzının 2011 yılına göre yaklaşık %34 oranında artış göstererek 2030 yılında 17.572 MTEP seviyesine yükseleceği, bu miktarın kaynaklara dağılımında önemli farklılıkların olmayacağı, bununla beraber petrolün birinciliği kaybedeceği öngörülmektedir. Buna göre; 2030 yılında en büyük pay %29.3 ile kömürün olacaktır. Kömürü %27.9 ile petrol ve %22.8 ile doğal gaz izleyecektir. Söz konusu yılda; nükleer enerjinin payı %5.6 ve diğer kaynakların payı ise %14.4 olacaktır (Url-2).

Kömür, günümüze kadar dünya enerji talebinin giderek artması ve zamanla devreye giren yeni enerji kaynaklarının kullanılır hale gelmesiyle genel enerji tüketiminde oransal olarak gerilemişse de, rezerv ve üretim- tüketim açısından halen önemli bir enerji kaynağı durumundadır.

Dünya Enerji Konseyi tarafından 80 civarında ülkede bulunduğu raporlanan dünya kömür rezervlerinin en büyük kısmı (237.3 milyar ton) ABD’de yer almaktadır. ABD’yi 157 milyar ton ile Rusya Federasyonu ve 114.5 milyar ton ile Çin izlemektedir. Diğer kömür zengini ülkeler arasında; Avustralya (76.4 milyar ton), Hindistan (60.6 milyar ton), Almanya (40.5 milyar ton), Ukrayna (33.9 milyar ton), Kazakistan (33.6 milyar ton) ve Güney Afrika Cumhuriyeti (30.2 milyar ton) bulunmaktadır. Dolayısıyla, dünya kömür rezervlerinin %90’a yakını bu 9 ülkenin elindedir (Url-1).

Ülkemizde ise, doğal gaz ve petrol rezervleri oldukça sınırlı olmasına karşın, 510 milyon tonu görünür olmak üzere, yaklaşık 1.3 milyar ton taşkömürü ve 13.4 milyar tonu görünür rezerv niteliğinde toplam 13.8 milyar ton linyit rezervi bulunmaktadır. Bu miktar dünya kanıtlanmış işletilebilir kömür rezervlerinin %1.7’sini oluşturmaktadır. Linyit rezervlerimiz ise dünya linyit rezervlerinin %6.9’u büyüklüğündedir (Url-1).

Son yıllarda yürütülen arama ve rezerv geliştirme çalışmaları sonucunda ciddi bir rezerv artışı sağlanmıştır. Yeni sahaların bulunmasına ve rezerv artışına yönelik çalışmalar MTA tarafından sürdürülmektedir.

Tarihi öneme sahip bir enerji kaynağı olan kömürün geçmişte büyük sanayi ile olan güçlü bağının gelecekte de devam etmesi beklenmektedir. Termik santrallerde

elektrik üretiminde enerji kaynağı olarak oynadığı büyük rol yanında, özellikle büyük sanayinin temelini oluşturan ağır metalurji ile kimya sanayinde yakıt ve hammadde olarak önemi gelecekte de devam edecektir.

Fosil yakıtların (petrol, doğalgaz, kömür), enerji hammaddesi yanında birçok sanayinin (boya, plastik, eczacılık, kozmetik, demir-çelik, alüminyum vs. gibi) ana girdilerin üretildiği hammaddeler olmaları, dünya enerji tüketiminin neredeyse tamamını karşılamalarına ve dünya ticaretine konu olmalarına neden olmuştur (DPT, 2001).

Kömür; sürdürülebilir ekonomik kalkınmanın gereği olan enerjinin sürekliliğini ve dolayısıyla enerji güvenliğini sağlamaya aday en önemli kaynaktır. Kömür, sanayiye olan katkısı yanında birçok özelliğinden dolayı diğer fosil kaynaklardan daha üstün durumundadır. Diğer fosil yakıtlarla kıyaslandığında kömür, coğrafi olarak 50'den fazla ülkede yayılmış, oldukça büyük rezerv miktarlarına sahiptir.

Kömürü önemli kılan başlıca unsurlar;

- Görünür kömür rezervlerinin şu an ki üretim seviyeleri baz alındığında yaklaşık 200 yıla yakın ömürleri ile diğer fosil yakıtların ömürlerinin yaklaşık 4 katıdır.
- Belirli bölgelerde toplanmış stratejik öneme sahip diğer fosil yakıtlara karşılık, coğrafi olarak çok sayıda ülkede düzenli bir dağılımı ile en geniş yayılım gösteren bir kaynak olması nedeniyle rekabetçi bir yakıt türüdür.
- Kömür fiyatlarında; diğer fosil kaynaklardan farklı olarak, siyasi dalgalanma ve çatışmaların yönlendirmediği bir ortamda oluşması nedeniyle ani iniş çıkışlar görülmez.
- Üretim kapasiteleri piyasaya göre ayarlanabilir.
- Ticari anlaşmalarda esnekliğe sahiptir.
- Kolay ve ucuz ulaştırılabilir.
- Kolay ve güvenli stoklanabilir.
- Kullanımı kolay ve güvenlidir.
- Diğer kaynaklara göre kullanıcıya arzı ucuzdur ve sürekliliği vardır.
- Dünya elektrik ve çelik üretiminde vazgeçilmez bir kaynak olarak önemli ölçüde tüketilmektedir.

- Üretim-ulaştırma-tüketim aşamalarında gerek kaza riskinin; gerekse kaza sonucu çevreye olumsuz etkilerin daha azdır.

Bu özelliklerinden dolayı, kömür vazgeçilmez bir enerji kaynağı olma özelliğini uzun bir süre daha koruyacaktır. Ayrıca uzun yıllar çevresel etkileri nedeniyle yer yer eleştirilen kömür, giderek artan teknolojik gelişmeler sayesinde, daha verimli ve temiz teknolojiler kullanılarak çevre dostu bir kaynak olarak enerji üretiminde önemini devam ettirmektedir.

Sahip olduğu avantajlar ile dünya enerji kaynakları arasında vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan kömür, Türkiye'nin sahip olduğu yerli enerji kaynakları arasında da önemli bir yere sahiptir. Özellikle petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynaklarca fakir olan Türkiye'de linyit rezervinin büyüklüğü ve geniş yayılım özelliği, linyit kömürüne yerli enerji kaynakları arasında üretim-tüketim açısından en avantajlı kaynak olma özelliğini kazandırmıştır (Bozkurt, 2011).

### 3. RDF (REFUSE DERIVED FUEL-ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKIT)

Atıktan Türetilmiş Yakıt anlamına gelen RDF (Refuse Derived Fuel) teriminin tanımı ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir ve herhangi bir resmi tanımı mevcut değildir (Özel, 2011).

RDF terimi genellikle, evsel, ticari veya endüstri proseslerinden çıkan tehlikesiz atıkların, geri kazanılabilen malzemeleri (cam, plastik, metal vb.) ayrıştırıldıktan sonra geriye kalan yanabilir özelliğe sahip geri dönüşümsüz malzemedan türetilen alternatif katı yakıtlar için kullanılmaktadır (Gendebien ve diğ, 2003).



**Şekil 3.1 : RDF örneği.**

RDF geleneksel yakıtlara oranla daha ucuz bir yakıttır ve ısı değeri yaklaşık 4000-6000 cal/g'dır. Isıl değerinin yüksek olması ayıklanamayan yakıt özelliği gösteren selülozik maddeler olan kâğıt, odun, kumaş, mukavva ve plastik gibi bileşenlerden kaynaklanır (Myung ve diğ, 2010).

Ayrıca içerdiği yüksek selülozik ve plastik bileşenlerden dolayı da ısı değeri yüksektir. Atık yakma talimatlarına uyulduğu sürece yardımcı yakıt olarak kullanılabilme potansiyeli oldukça yüksektir (Sika, 2000). Yüksek ısı değere sahip olan bu yakıtlar, enerji üretim tesislerinde veya çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılabilmektedir (Piao ve diğ, 2000; Pekin, 2005).

Evsel atıktan türetilmiş yakıtlar için kullanılan başka terimler de bulunmaktadır. Örnek olarak şu terimler verilebilir:

- Tehlikesiz Katı Atıklardan Türetilmiş Yakıt (Solid Recovered Fuel-SRF),
- Geri Kazanılmış Yakıt (Recycled Fuel-REF),
- Kağıt ve Plastik Yakıt (Paper and Plastic Fraction Fuel-PPF),
- Prosesle İşlenmiş Yakıt (Processed Engineered Fuel-PEF),
- Paketleme Atıklarından Türetilen Yakıt (Packaging Derived Fuel-PDF) gibi.

SRF, REF, PPF, PEF ve PDF genellikle geri kazanılamayacak kadar kirlenmiş olan, evsel atığın yanabilir kuru kısmını (örneğin, plastikler ve/veya kâğıt) ifade etmektedir.

Bu yakıtlar, karışık atık kısımlarından türetilmiş RDF'ye nazaran, yakıldığında daha yüksek ısı değere, düşük nem oranına ve düşük kül miktarına sahiptir.

Endüstriyel atıklardan (lastik ve solventler gibi) özel proses adımları ile belirli kalitede üretilmiş atıklara da,

- Lastikten Türetilmiş Yakıt (Tire Derived Fuel-TDF),
- İkincil Yakıt (Secondary Fuel-SF),
- İkame Yakıt (Substitute Fuel-SF) ve
- İkame Sıvı Yakıt (Substitute Liquid Fuel-SLF) gibi adlar verilmektedir (Alp, 2011).

### **3.1 RDF'yi Oluşturan Atıklar**

RDF üretiminde kullanılabilecek atık türleri aşağıda verilmiştir (Özel, 2011):

- Evsel katı atıklar,
- Endüstriyel atıklar,
  - Plastik ve kâğıt/karton atıkları (ticari ve endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan),
    - Ambalaj atıkları,
    - Üretim atıkları,
    - Atık lastikler,

- Biyokütle atıkları,
  - Bitkisel atıklar (sap, saman, kabuk vb.),
  - Kontamine olmamış ahşap atıkları,
  - Kâğıt ve kağıt üretimi atık çamurları,
  - Kurutulmuş evsel atıksu arıtma çamurları,
  - Tekstil atıkları,
  - Hayvansal atıklar,
- Araçların parçalanmasından oluşan atıklar (automotive shredder residues - ASR),
- Yüksek kalorifik değere sahip tehlikeli atıklar,
  - Atık yağlar,
  - Endüstriyel çamurlar,
  - Emprenye edilmiş ağaç talaşları,
  - Atık solventler,
  - Halı atıkları ve kırpıntılar,
  - Tekstil,
  - Çocuk bezi üretim atıkları,
  - Anod çamurları.

RDF'nin ısı değeri ve yanma davranımı, çeşitli enerji üretim tesislerinde ve endüstriyel proseslerde fosil yakıtın yerine alternatif olarak kullanılabilmesi açısından çok önemli karakteristik özelliklerdir. Bu nedenle RDF üretiminde kullanılacak hammaddeler dikkatle seçilmeli, analizi iyi yapılmalı ve kullanılmadan önce sınıflandırılmalıdır. Eğer hammaddeler özensizce seçilirse, endüstriyel kullanım için uygun olmayan ve düşük ısı değere sahip RDF üretilmiş olur (Hernandez ve diğ, 2007).

### 3.2 RDF'nin Sınıflandırması

RDF üretimi ve kullanımına yönelik düzenlemeler RDF'nin belirli özelliklere sahip olacak şekilde üretilen ve kullanılacak şekilde sınıflandırılmalarını gerektirmektedir.

Böylece hem RDF üretiminde kullanılabilecek atık türleri ve kodları hem de bu atıkların fiziksel ve kimyasal (boyutları, katı, sıvı ve macunumsu formları, kalorifik değerleri, nem, halojen ve ağır metal içerikleri vb.) yapılarına göre RDF türleri belirlenebilecek ve standardize edilebileceklerdir. RDF standardizasyonu için;

- Kullanılan atıkların özellikleri, ısı değeri, fiziksel durum, nem, kül, klor, cıva ve diğer ağır metaller vb. içerikleri,
- RDF üretiminde kullanılacak teknoloji sınıfları,
- RDF'yi kullanacak tesislerin teknolojik imkânları açısından sınıflandırılmaları gerekmektedir.

"Katı Atıklardan Türetilmiş Yakıtlar" ile ilgilenmek üzere 2000 yılında oluşturulan katı atıklardan türetilmiş yakıtlar için sınıflandırma sistemi CEN/TSE 15359:2006:E Standardı olarak yayınlanmıştır.

Ülke koşullarına göre RDF üretiminde kullanımına izin verilecek atıkların kodları belirlenmelidir. Bu amaçla önerilen 5 ana kategori halinde atık kodları Çizelge 3.1'de verilmiştir (Özel, 2011)

**Çizelge 3.1 : RDF üretiminde kullanılabilecek atık kodları (Özel, 2011).**

RDF üretiminde kullanılabilecek atık kodları sınıf I.

---

**I.Sınıf Atıklar: Ahşap, kâğıt, karton, mukavva kutular**

---

- 02 01 03 Bitki dokusu atıkları
- 02 01 07 Ormancılık atıkları
- 03 01 01 Ağaç kabuğu ve mantar atıkları
- 03 03 01 Ağaç kabuğu ve odun atıkları
- 03 03 02 Yeşil sıvı çamuru (pişirme sıvısı geri kazanımından)
- 03 03 07 Atık kâğıt ve kartonun hamur haline getirilmesi sırasında ayrılan ıskartalar
- 15 01 01 Kâğıt ve karton ambalaj
- 15 01 03 Ahşap ambalaj
- 17 02 01 Ahşap
- 20 01 01 Kâğıt ve karton

RDF üretiminde kullanılabilecek atık kodları sınıf II.

---

**II.Sınıf Atıklar: Tekstil, elyaf**

---

- 04 02 09 Kompozit malzeme atıkları (tekstil, elastomer, plastomer)
- 04 02 10 Doğal ürünlerden oluşan organik maddeler (örneğin yağ, mum)
- 20 01 10 Giysiler
- 20 01 11 Tekstil ürünleri

RDF üretiminde kullanılabilecek atık kodları sınıf III.

---

**III.Sınıf Atıklar: Plastikler**

---

- 02 01 04 Atık plastikler (ambalajlar hariç)
- 12 01 05 Plastik yongalar ve çapaklar
- 12 01 03 Kaynak atıkları
- 15 01 02 Plastik ambalaj
- 15 01 05 Kompozit ambalaj
- 15 01 06 Karışık ambalaj
- 17 02 03 Plastik

**Çizelge 3.1 (devam):** RDF üretiminde kullanılabilecek atık kodları (Özel, 2011).

RDF üretiminde kullanılabilecek atık kodları sınıf IV.

---

**IV.Sınıf Atıklar: Diğer malzemeler**

---

- 09 01 07 Gümüş veya gümüş bileşenleri içeren fotoğraf filmi ve kâğıdı
- 09 01 08 Gümüş veya gümüş bileşenleri içermeyen fotoğraf filmi ve kâğıdı
- 09 01 10 Pilsiz çalışan tek kullanımlık fotoğraf makineleri
- 19 09 04 Kullanılmış aktif karbon
- 19 09 05 Doymuş veya kullanılmış iyon değiştirme reçinesi

RDF üretiminde kullanılabilecek atık kodları sınıf V.

---

**V.Sınıf Atıklar: Atıklardan Türetilen Kalorifik Değeri Yüksek Olan Atıklar**

---

- 19 05 01 Belediye ve benzeri atıkların kompostlanmamış fraksiyonları
- 19 05 02 Hayvansal ve bitkisel atıkların kompostlanmamış fraksiyonları
- 19 05 03 Standart dışı kompost
- 20 01 08 Biyolojik olarak bozunabilir mutfak ve kantin atıkları
- 20 02 01 Biyolojik olarak bozunabilir atıklar
- 20 02 03 Biyolojik olarak bozunamayan diğer atıklar

RDF kalitesi belirlenirken, ekonomik kriter olarak “ısı değeri”, teknolojik kriter olarak “klor” ve emisyon kriteri olarak da “cıva” parametreleri öne çıkmıştır.

### 3.3 RDF Üretimi

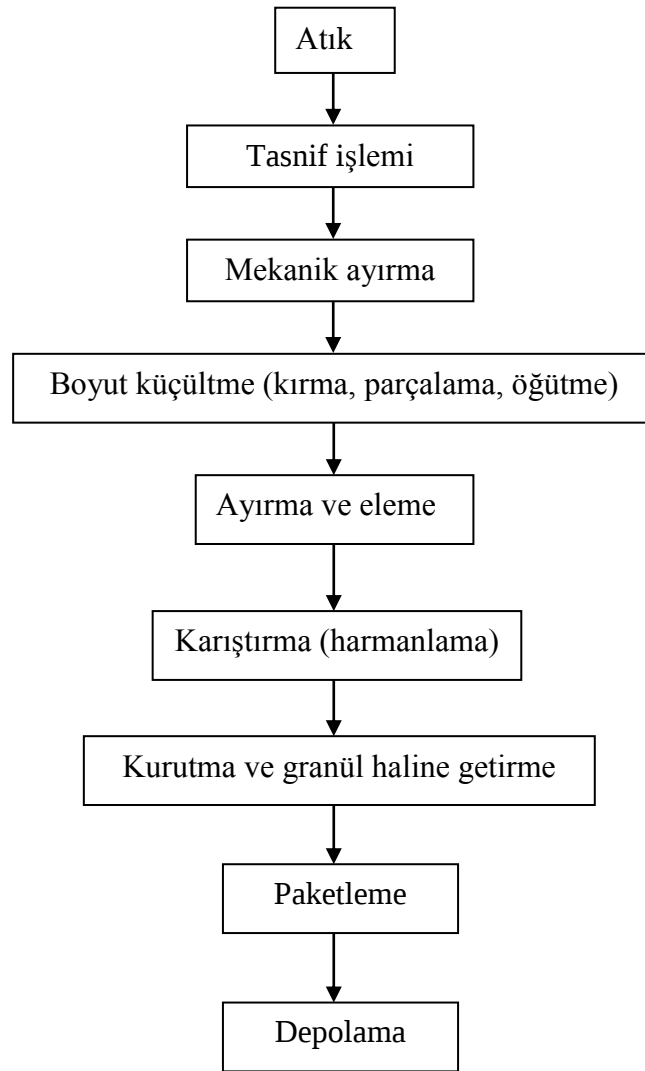
Farklı türlerdeki atıklardan yakıt hazırlama prosesi, o yakıtı kullanacak proseslerin ayırt edici özelliklerine göre düzenlenir (Örneğin, elektrik santrali, çimento veya kireç üretim tesisi vb.). Bu yanma prosesleri teknik olarak farklı özelliklere sahiptirler (Caputo, 2002). RDF üretim prosesinin temel adımları şöyledir (Caputo, 2002):

- Kullanılacak katı atığın kaynağında ayrılması yani tasnif edilmesi (örneğin, evsel ya da endüstriyel atık vb.),
- Mekanik ayırma (Manyetik ayıklayıcı kullanma),
- Boyut küçültme işlemi için atığın içindeki hacim kaplayan malzemelerin dilimlenmesi, kırılması, parçalanması, öğütülmesi,
- Ayırma ve eleme,

- Karıştırma (harmanlama),
- Kurutma ve granül haline getirme (pelletleme),
- Paketleme,
- Depolama.

RDF üretim prosesinde bu adımların hepsinin birlikte kullanılması zorunlu değildir. Üretimde kullanılan hammadde ve RDF'nin kullanılacağı yere göre değişiklik gösterir (Kara, 2012).

Genel olarak RDF üretim prosesi Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir :



**Şekil 3.2 : RDF üretim prosesi (Kara, 2012).**

### 3.4 RDF Üretiminin Çevresel Etkileri

RDF'nin üretimi, en az iki farklı tipte çevresel etkilerin ortaya çıkmasına neden olur:

- Süreçte kullanılan enerjinin tüketiminden ortaya çıkan yükler (çoğunlukla elektrik veya tesiste ya da şantiyede buhar üretimi),
- Prosesten ortaya çıkan atıkların havaya atılması (mekanik işlemlerden dolayı ortaya çıkan partiküller, kurutma veya presleme proseslerinden ortaya çıkan buharlar) veya prosesten çıkan atıksuların (yıkama veya sıyırma işlemleri gibi su içeren prosesler) alıcı ortama boşaltılmasıdır.

#### 3.4.1 VOC, koku ve toz

- Atıkların ön işlemeye tabi tutulmasından kaynaklanan hava emisyonları, işlenen atık tipine ve kullanılan süreçlere bağlıdır.
- Emisyon izleme ve raporlama işlemi, ulusal mevzuat çerçevesinde gerçekleştirilir. VOC, koku ve toz emisyonları için azaltma teknikleri gerektiğinde uygulanır.
- Toz, genellikle torba filtrelerle azaltılır.
- Ses ve koku için karşı önlemler değerlendirilmelidir.
- VOC'yu azaltma teknikleri, diğer tekniklerin yanı sıra biyolojik işlemleri, aktif karbonu ve termal işlemleri içerir.

#### 3.4.2 Atıksu

RDF hazırlama tesislerinden kaynaklanan her türlü atıksular ilgili mevzuat çerçevesinde deşarj edilirler. RDF hazırlama tesislerinin atık kabul ve depolama ünitelerinden yağmur suyu ile oluşacak atıksuların toplanması ve ilgili mevzuat çerçevesinde arıtılması esastır.

### 3.5 RDF'nin Önemi

RDF sistemlerinin şüphesiz en olumlu etkisi, fosil yakıt kullanımının azaltımını sağlayarak yeni atık oluşumunu engellemesidir (Ariyaratne ve diğ, 2012).

Atıkların kaynağından çıktıktan sonra atık işleme tesislerine gelerek RDF haline getirilmesi ve çimento fabrikaları döner fırınlarında yakılarak enerji elde edilmesi ile,

atıkların depolanması esnasında oluşacak olan su kirliliği, toprak kirliliği, görüntü kirliliği, koku problemleri ve hava kirliliği engellenmiş olmaktadır (Bidart ve diğ, 2013).

RDF prosesinden çıkan alternatif yakıtların yüzey alanları artırıldığından dolayı yanma verimleri artırılmaktadır. Yakma esnasında birincil yakıtlardan azaltıma gidilerek yaklaşık olarak eşdeğer bir emisyon salınımı yapılarak ek tesis ve ek emisyon çıkışı ya da düşük sıcaklıkta verimsiz yanma ve emisyon artışı engellenmiş olmaktadır.

Yeni yakma tesislerinin kurulmaması, yeni depo alanlarının kurulmaması ile birlikte doğal alanlar korunarak toplumun sosyal yaşam alanları da korunmaktadır. Atığın bulunduğu her alan psikolojik açıdan toplumsal problemler getirmektedir. Atıkların işlenerek alternatif yakıt haline getirilmesi ile birlikte bu etkilerde ortadan kalkmaktadır.



#### **4. KÖMÜR YARIKOKU VE RDF YARIKOKU KARIŞIMLARININ YANMASI**

Fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan kirleticilerin çevreyi olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir. Yanma gazlarında bulunan kükürt oksitler ve azot oksitler bu kirleticilerin başında gelmektedir. Ayrıca sera gazı etkisine sebep olan CO<sub>2</sub>'in artması oldukça ciddi bir sorun haline gelmiştir. Kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku içeren karışımların yakılması, CO<sub>2</sub>, kükürt ve azot oksitleri emisyonlarını azaltarak çevre kirliliğini önleyen ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını sağlayan, fosil yakıt tüketimini azaltan en önemli seçeneklerden birisidir.

##### **4.1 Kömür ve RDF'nin Yanması**

Yanma ardışık olarak gerçekleşen fiziksel ve kimyasal tepkimeler içeren karmaşık bir olaydır. Kömür ve RDF'nin yanması genel olarak üç basamaktan oluşmaktadır:

- Kömür ve RDF'nin ısınması sonucunda uçucu madde çıkışı,
- Uçucu maddenin gaz fazında yanması,
- Karbonca zengin katı maddenin (yarıkok) yanması (Açma, 1999).

Kömür ve RDF oksitleyici bir ortamda ısıtılırsa öncelikle nem çıkışı ve sıcaklığın yükselmeye devam etmesi ile uçucu madde çıkışı gerçekleşir. Yakıtın içerisindeki organik maddeler bozunmaya başlar, çıkan uçucu madde sıcaklık yeterli düzeye ulaştığında ortamdaki oksijen ile birleşerek yanar. Uçucu maddesini kaybetmiş, karbonca zenginleşmiş, oksijen ve hidrojenle fakirleşmiş ve mineral maddelerin çoğunu içeren gözenekli katı yapı yarıkok olarak adlandırılır. Uçucu madde çıkışı ve yanması tamamlanınca ortamdaki oksijen yarıkok yüzeyine ulaşır ve taneciğin içine difüze olur (Berkowitz, 1985).

Uçucu maddenin çıkışı ve yanması çok hızlı gerçekleşirken, yarıkokun yanma hızı oldukça yavaştır. Dolayısıyla, kömürün ve RDF'nin yanma kinetiğinde hız belirleyici adım yarıkokun yanma basamağıdır (Williams, 2000).

Kömür ve RDF'nin ısınması sonucunda uçucu madde çıkışı ile yarıkokların yoğunlukları azalır ve gözeneklilikleri artar (Smooth, 1991).

#### **4.2 Uçucu maddenin yanması**

Uçucu madde; çoğunlukla hidrojen, karbon monoksit, metan ve diğer hidrokarbonlar gibi yanıcı gazlar, katran buharları ve karbondioksit ile su buharı gibi yanıcı olmayan gazları da içeren bir karışımdır (Açma, 1999).

Kömürün ve RDF'nin ısıtılması ile, çıkan uçucu maddenin bileşimi çok farklı olabilir ve maddelerin molekül ağırlıklarına göre hafif, orta ve ağır katranlar ve yanıcı gazlardan oluşur (Williams, 2000).

RDF'nin uçucu madde içeriği kömürün uçucu madde içeriğinden çok fazladır ve RDF'nin uçucu madde çıkışı kömüre kıyasla daha düşük sıcaklıklarda başlar. Uçucu madde çıkış hızı sıcaklığa, ısıtma hızına, basınca ve tanecik büyüklüğüne bağlı olarak değişmektedir (McKendry, 2002).

Uçucu maddenin yanması henüz tam olarak aydınlatılmamıştır. Genel olarak, oksijenle birleşen hidrokarbon moleküllerinin kararlı olmayan hidroksil bileşenlerine dönüştüğü; bunların da parçalanarak aldehitleri oluşturduğu; aldehitlerin ise oksitlenerek karbon monoksit ve hidrojene ayrıştığı düşünülebilir. Karbon monoksit ile hidrojenin yanma tepkimeleri büyük ölçüde aydınlatılmıştır. Hızlı ısınma, yakıtın oksijen ile temasının iyi sağlanamaması veya ortamda yeterince oksijen bulunmaması gibi hallerde hidrokarbonlar hidroksil bileşenlerine dönüşmek yerine, karbon ve hidrojene ayrışır. Bu olay ıs oluşması açısından çok önemlidir.

Ortamda yeterince oksijen varsa, sıcaklık uygun ve yeterli süre mevcut ise karbondioksit ile su buharı oluşur; aksi halde yanmayan karbon tanecikleri birleşerek ısı meydana getirir (Arısoy, 1991).

#### **4.3 Yarıkokun yanması**

Yarıkokun yanması; olduğu kömür veya RDF'nin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, reaktanların gaz fazından taneciğe difüzyonuna, tanecik çapına, yanma ürünlerinin gözeneklerden difüzyonuna, minerallerin etkisine, reaksiyonlar sırasında yüzey alanında meydana gelen değişikliklere, yarıkokun parçalanmasına ve yakıtın



Yarıkokun oksidasyonu; oluştuğu yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerine, reaktanların gaz fazından tanecik yüzeyine difüzyonuna, tanecik çapına, yanma ürünlerinin gözeneklerden difüzyonuna, minerallerin etkisine, tepkimeler sırasında yüzey alanında meydana gelen değişikliklere, yarıkokun parçalanmasına ve yakıcının sıcaklık ile basıncına bağlı olarak değişmektedir (Demirbaş, 2004).

ıkan uçucu madde miktarı, geriye kalan yarıkokun özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Uçucu madde çıkışının fazla olması, oluşan yarıkokun yoğunluğunu düşürmekte, gözenekliliğini arttırmakta ve gözenek yapısının orijinal yakıtinkinden önemli ölçüde farklı olmasına neden olmaktadır (Williams, 2000).

Yarıkokta bulunan mineral maddelerden bazıları yanma olayında katalizör rolü oynarlar. Özellikle kalsiyum ve demir bileşikleri tanecik yüzeyinde aktif merkezler oluşmasına neden olmakta ve gaz bileşiklerin adsorpsiyonuna geniş ölçüde yardımcı olmaktadır (Baxter, 2005).

#### **4.4 Kömür Yarıkoku ve RDF Yarıkoku Karışımının Yanması**

Kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku karışımının ısınması sonucunda uçucu madde çıkışı ile yarıkokların yoğunlukları azalır ve gözeneklilikleri artar. Uçucu madde çıkışı ve yanması tamamlanınca ortamdaki oksijen yarıkok yüzeyine ulaşır ve taneciğin içine difüze olur (Smooth, 1991; Berkowitz, 1985).

##### **4.4.1 Kömür yarıkoku-RDF yarıkoku karışımının yanmasını etkileyen faktörler**

Yanma olayını etkileyen parametreler iki grup altında toplanabilir. Birinci grubu yakıtın özellikleri (fiziksel özellikleri ile yapısı ve bileşimi), ikinci grubu ise yakma sisteminin özellikleri ile yakma koşulları (sıcaklık, ısıtma hızı, bekleme süresi) oluşturmaktadır. Birinci gruba dahil olan en önemli yakıt özellikleri; organik yapı, inorganik yapı, nem içeriği, ısıl değer, kül miktarı, uçucu madde/sabit karbon oranı, gözeneklilik ve tanecik boyutudur (Berkowitz, 1985).

Kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku karışımının yanma mekanizması kömürün ve RDF'nin yanma mekanizmasına benzemektedir. Karışımarda yanma sırasında kömür ve RDF arasında herhangi bir etkileşimin olmaması durumunda kömürün veya RDF'nin yanma reaksiyonları karışımı oluşturan bileşenlerin varlığından

etkilenmez ve her bir bileşen bağımsız davranım gösterir. Kömür ve RDF numuneleri arasında görülen sinerjik etkileşimler ise, karışımların ısı davranımlarının beklenen değerlerden sapmalar göstermesine neden olabilmektedir (Wan, 2008).

Bu etkileşimlerin görülmesi yakıtların temas süresi, her bir yakıtın yanma hızı ve karışım oranlarına bağlıdır. Hızlı ısıtma ve kısa bekleme süresi koşullarında yapılan yanma deneylerinde sinerjik etki görülmemektedir (Açma ve Yaman, 2007).

RDF'nin yüksek uçuculuğa ve yüksek reaktiviteye sahip olması yakma sistemleri için avantajlıdır. Düşük yoğunluklu ve yüksek nem içerikli RDF'nin enerji yoğunluğunu artırmak için boyut küçültme işlemi ve yarıkok üretimi gerçekleştirilir. Aksi durumda, yakma ünitelerinin daha büyük boyutlu olması gerekmektedir (Wey, 2006).

Yakıtların nem içerikleri yanma sürecini önemli ölçüde etkilemektedir. Yüksek nem içeriği, yakma sistemlerinde kısmi yanmaya, düşük ısı verime, aşırı miktarda kirletici oluşumuna ve is, kurum gibi ürünlerin oluşarak sistemi tıkamasına neden olur. Ayrıca, yanma odasında gerekli bekleme süresini arttırır ve maksimum yanma sıcaklığını düşürür. Böyle durumlarda, yakıtın nem içeriğinin azaltılması amacıyla, yakmadan önce kurutulması veya kuru yakıt ile karıştırılması gerekli olabilir. Yakıtların daha az oranda nem içermesi, daha yüksek yanma sıcaklıklarına ulaşılabilmesini sağlar (Loo ve Koppejan, 2008).

RDF'nin uçucu madde içeriği kömürünkine kıyasla oldukça fazladır. Bu oranın kaynakları için yüksek olması, yanma davranımının büyük ölçüde uçucu maddelerin gaz fazında yanmasından etkilendiğini göstermektedir (Demirbaş, 2003). Kömüre RDF'nin eklenmesi ile genellikle uçucu madde miktarı artar. Uçucu madde miktarının artması tutuşma sıcaklığını genellikle düşürür, uçucu madde çıkışı ve yanmasının düşük sıcaklıklarda başlamasını ve hızlı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar.

Kömürün ve RDF'nin birlikte yakılmasını etkileyen faktörlerden ikisi yakıtın tane boyutu ve tane boyut dağılımıdır. Genelde yakıt tanecikleri küçüldükçe, yanma süreci daha hızlı ve tam olmaktadır. Büyük taneciklerin tam olarak yanabilmeleri için, yakma kamarasında daha uzun süre kalmaları gerekmektedir. Yanma veriminin

yüksek olması için, yeterli bekleme süresinde küçük ve yoğun partiküllerin yakılması gerekmektedir (Loo ve Koppejan, 2008).

RDF'nin ısı değeri kömürüne göre yüksek olmasının sebebi, ayıklanamayan yakıt özelliği gösteren selülozik maddeler olan kağıt, odun, kumaş, mukavva ve plastik gibi bileşenlerden kaynaklanır. Ayrıca içerdiği yüksek C miktarından dolayı da ısı değeri yüksektir (Myung ve diğ., 2010).

Yakıtların toplam karbon içeriği arttıkça ısı değeri artar. Kömür-RDF karışımlarında artan RDF katkısı ile ısı değeri yükselmektedir.

Kömür bir yakma ünitesinde yakıldığında içerdiği mineral maddeler önemli değişikliklere uğrayarak klinker oluşumu, korozyon, cüruf ve kurum gibi sorunlar yaratır. RDF külü alkali karakterli olmasından dolayı tortu ve korozyona neden olmakta, ısı aktarımını olumsuz etkilemekte ve ekipmanların ömrünü kısaltmaktadır. Bu problemi engellemek için, yakma sisteminin sıcaklığını kül yumuşama sıcaklığının altında tutmak gereklidir. Ayrıca, yüksek kaliteli kömürlerin biyokütle ile karıştırılarak yakılması, bu problemlerin azaltılmasını sağlamaktadır.

Kömür-RDF karışımlarının içerdiği RDF miktarı yanma verimini etkileyen parametrelerden bir tanesidir. Karışımda RDF'nin yüksek oranda olması verimliliği olumlu şekilde etkilemektedir.

#### **4.4.2 Kömür yarıkoku-RDF yarıkoku karışımlarının yakılmasının kirletici oluşumuna etkisi**

Maksimum ısı enerjisi üretimi, minimum kirletici yayını ve çevre yönetmeliklerine uygunluk sağlamak için, yakma sistemleri yanmanın tam olarak gerçekleşebileceği şekilde tasarlanmalıdır (Klass, 1998).

Kömür yarıkoku-RDF yarıkoku karışımlarının birlikte yakılması ile sadece kömürün yakıldığı sistemlere göre daha az CO<sub>2</sub> emisyonu açığa çıkar. RDF, düşük kükürt içeriğine sahip olduğu için, yüksek kükürt oksit yayınımlarına yol açmaz. Bu nedenle, RDF'nin kömüre katılarak yakılması sonucunda kükürt oksit yayınımları azalmaktadır. Bazı durumlarda yanma sonucu oluşan kükürt oksit miktarı yakıtın kükürt içeriğine bağlı olarak beklenen miktardan daha az olabilmektedir. Bunun nedeni kömürün içerdiği kükürdün yanması sonucu oluşan kükürt oksitlerin bir kısmının RDF'nin külü tarafından tutulmasıdır.

## 5. KÖMÜR, RDF VE KARIŞIMLARI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Son yıllarda kömür ve RDF karışımlarının yanma davranımlarının incelendiği çalışmalar yapılmıştır. Ancak kömür ve RDF'nin farklı sıcaklıklarda karbonizasyonu sonucu elde edilen yarıkoklarının ve bu yarıkoklardan hazırlanan karışımlarla ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

(Kuen ve diğ, 2007) tarafından, RDF'nin 500–900 K arası sıcaklıklarda ve 30 dk bekleme süresiyle gerçekleştirilen pirolizinde RDF'nin bozunması hakkında bilgi verilmiş, RDF ile RDF'nin yapısında bulunan selüloz, plastik türleri ile TG eğrileri karşılaştırılmış ve kinetik çalışma yapılarak hız ifadeleri elde edilmiştir.

(Taylor ve diğ, 2008) tarafından, RDF ve kömür karışımlarının yanması sonucu oluşan uçucu külün XRD, BET, SEM ve tanecik boyutu analizleri değerlendirilmiştir.

(Myung ve diğ, 2010), alt bitümlü kömür, RDF ve bunlardan hazırlanan karışımların piroliz davranımlarını belirlemek amacıyla çalışma yapmışlardır. Kömür ve RDF'nin izotermal olmayan şartlardaki pirolizinde, numuneler TGA cihazında 100 ml/dk N<sub>2</sub> akımı altında oda sıcaklığından 900°C'ye 15°C/dk hızla ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 10 dk bekletilmiştir. Kömür ve RDF'nin izotermal şartlardaki pirolizinde ise, numuneler ısıtılma reaktöründe 100 ml/dk N<sub>2</sub> akımı altında, oda sıcaklığından 500°C-800°C'ye ısıtılmıştır. Her iki durumda da, piroliz boyunca numunelerin ağırlık kayıpları kaydedilmiş ve karışımlarda kömür ve RDF arasındaki sinerjik etkileşimlerin belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, en yüksek sinerjik etkileşimlerin 700°C'de ve en fazla RDF içeren karışımda gerçekleştiği görülmüştür. Bütün numunelere BET, SEM, XRD analizleri uygulanarak yapısal değişim ve inorganik maddeler incelenmiştir. Ortalama por çapları küçüldükçe yani mikroporların sayısı arttıkça yüzey alanının arttığı ve karışıma eklenen RDF oranı arttıkça sülfürün tutularak yeni bileşikler oluşturduğu görülmüştür.

(Kara, 2012) yaptığı çalışmada, RDF'nin geliştirilmesi ve çimento üretiminde alternatif yakıt olarak değerlendirilme potansiyelinin araştırılması konusunu ele almıştır. RDF üretimi, özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve klinker üretiminde nasıl etkisi olduğu araştırılmıştır. Ana yakıt olarak kullanılan petrol kokunda %8, %12 ve %15 oranlarında RDF katılarak klinker üretimi gerçekleştirilmiştir. RDF kullanımının CO<sub>2</sub> emisyonlarını azalttığı, daha ucuz klinker üretimi sağlandığı ve diğer yenilenemeyen kaynakların kullanımının azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

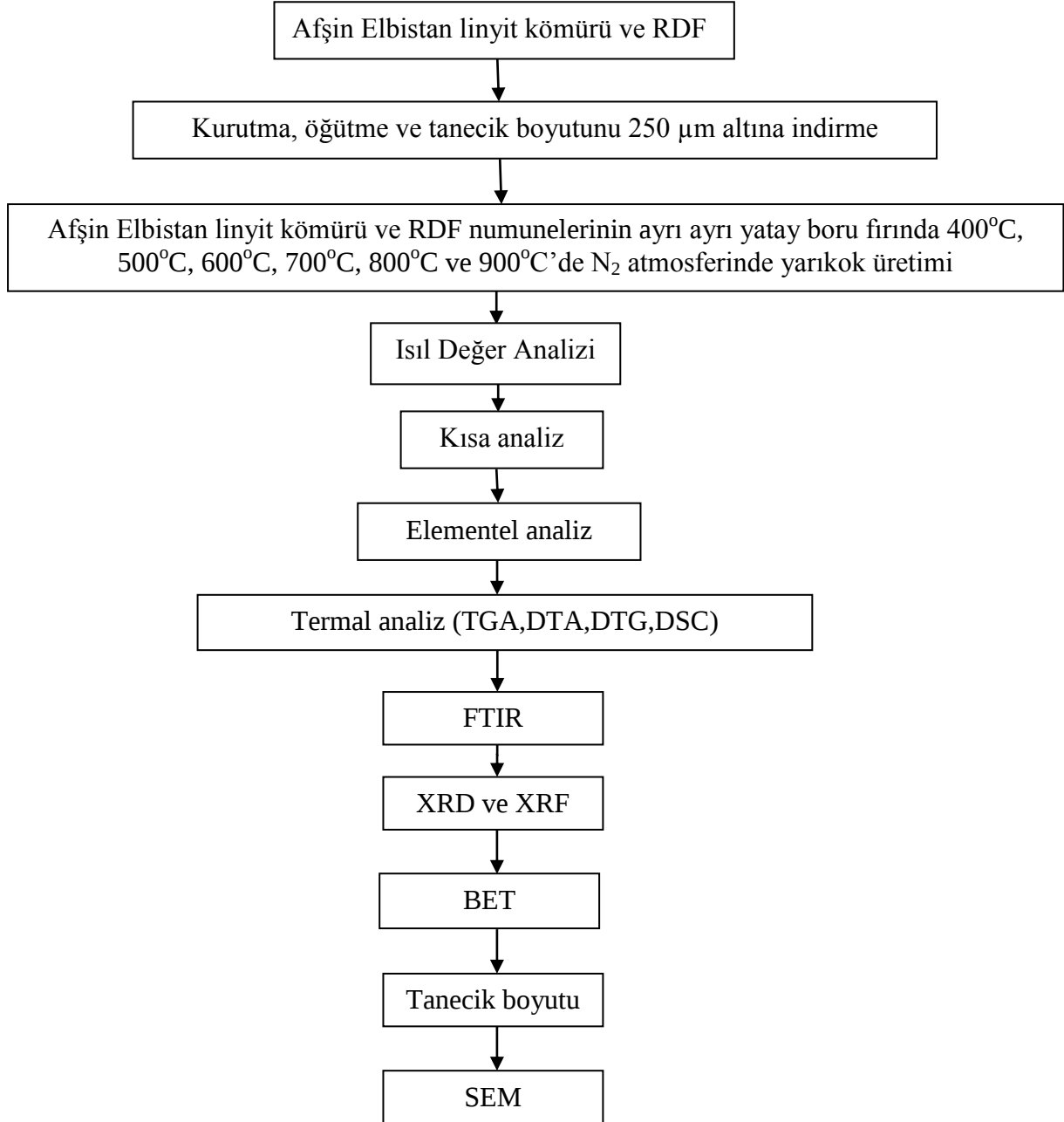
(Vounatsos ve diğ., 2013), yaptıkları çalışmada RDF ve RDF'yi oluşturan kağıt, karton ve plastik bileşenlerine kısa analiz, elementel analiz ve ısıl değer analizi uygulamışlardır. Bu analizleri 5 ay boyunca 5 kez tekrarlayarak sürenin bu analizlerin sonuçlarını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Ayrıca RDF ve RDF'yi oluşturan kağıt, karton ve plastik bileşenlerine termogravimetrik analiz uygulayarak, RDF'nin gazlaştırılması prosesini geliştirmeye çalışmışlardır.

(Efika ve diğ., 2015), RDF'nin değişik ısıtma hızları ve bekletme süreleriyle 700°C-900°C'de yatay boru fırında pirolizi sonucu elde edilen yarıkoklarının ısıl değerlerinin hangi parametrelerden daha çok etkilendiği ve en yüksek ısıl değerin hangi şartlarda elde edildiği konusunda çalışmışlardır. Çalışma boyunca, RDF'nin yapısındaki bileşenlerin hangi sıcaklıklarda ve nelere bozunduğu konusunda bilgi verilmiştir. Bu çalışma sonucunda, yüksek ısıtma hızında, en uzun bekleme süresinde ve 800°C'de en yüksek gaz verimine sahip olan RDF yarıkoklarının en yüksek ısıl değere sahip olduğu belirlenmiştir.

## **6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

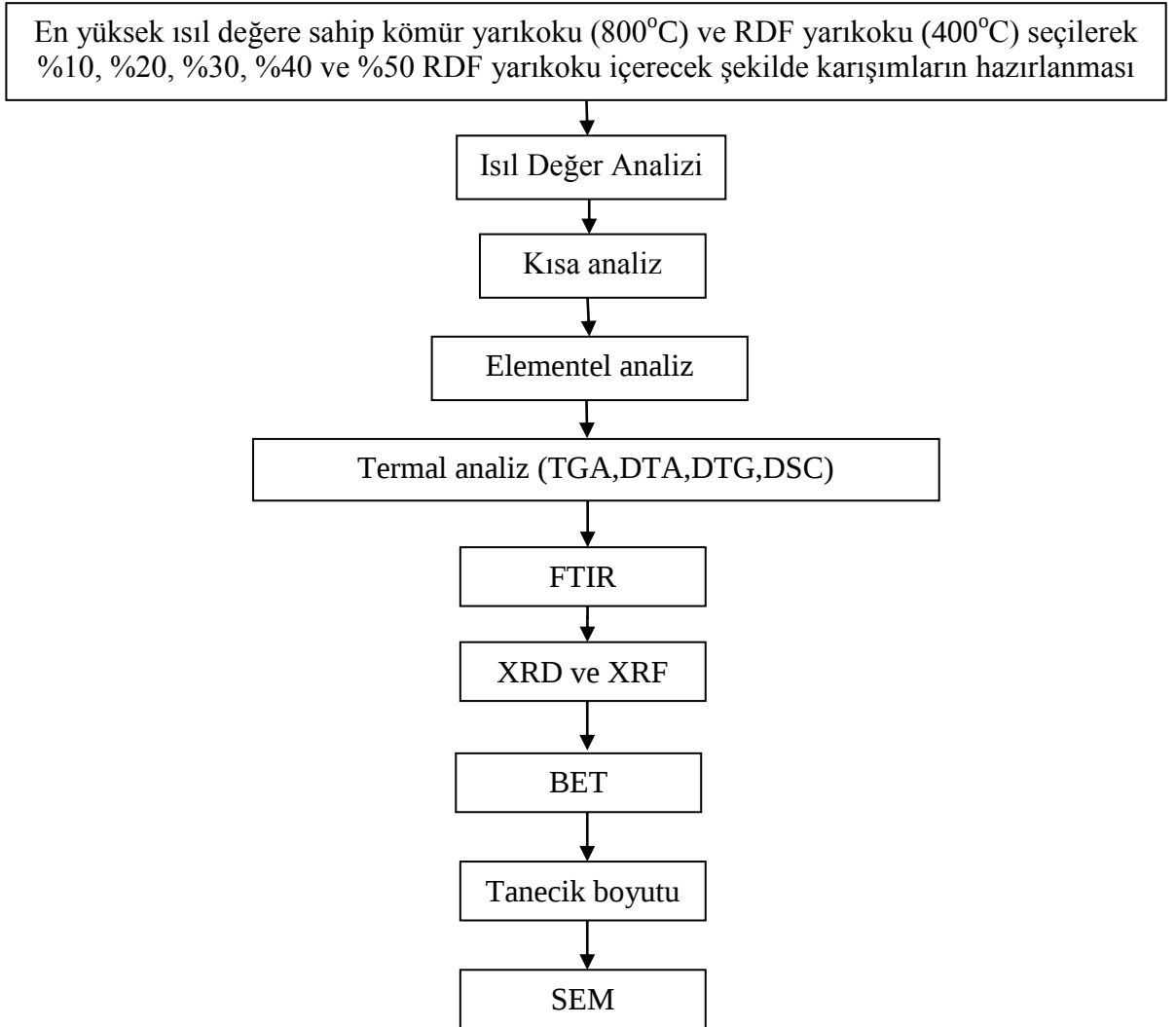
Bu çalışmanın amacı, kömür ve RDF'yi birlikte kullanarak daha kaliteli ve yüksek ısı değerli yakıt elde edebilmektir. Bu kapsamda, Afşin Elbistan linyit kömürü ve RDF kullanılmıştır. Kömür ve RDF'den farklı sıcaklıklarda (400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C) yarıkoklar üretilmiş, en yüksek ısı değere sahip kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku seçilmiş, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında RDF yarıkoku içerecek şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Kömür ve RDF ana numunelerine, yarıkoklarına ve karışımlarına kısa analiz, elementel analiz, ısı değeri analizi, termal analiz, FTIR, XRD, XRF, SEM, BET ve tanecik boyutu analizleri yapılmıştır. Analizler ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Ana numunelere ve üretilen yarıkoklara uygulanan analizlerin akım şeması Şekil 6.1’ de görülmektedir:



**Şekil 6.1 :** Ana numunelere ve yarıkoklara uygulanan analizlerin akım şeması.

Yarıkok karışımlarına uygulanan analizlerin akım şeması Şekil 6.2’de görülmektedir.



**Şekil 6.2 :** Yarıkok karışımlarına uygulanan analizlerin akım şeması.

### 6.1 Kullanılan Numunelerin Tanıtılması ve Uygulanan Ön İşlemler

Bu çalışmada, Afşin Elbistan linyit kömürü numunesi kullanılmıştır. Afşin-Elbistan Linyit Havzası’nda kırk yılı aşkın bir süre önce bulunan linyit kömürü, ülkemizde elektrik üretimi amaçlı kullanılabilecek enerji kaynakları arasında gerek kaynak maliyeti, gerekse rezerv büyüklüğü bakımından en uygun yakıt olarak görülmektedir. Havzanın üretilebilir rezervi 3,7 milyar ton olarak hesaplanmış olup, MTA’nın son yıllarda yaptığı etüt ve sondajlar neticesinde söz konusu üretilebilir rezerv miktarının en az 4,5 milyar ton olduğu belirlenmiştir (Url-1).

Yeni bulunan rezervler dikkate alınmadan yapılan hesaplamalara göre, Afşin-Elbistan Havzası'nda mevcut santrallerle birlikte kurulabilecek elektrik santrallerinin toplam kurulu gücü 10.000 MW olmaktadır. Ancak, havzadaki mevcut kömür üretim planlaması, havzanın toplam üretilbilir rezervi 2,77 milyar ton olacağı öngörüsüne göre yapılmıştır. Bu planlama sonucunda önemli miktarda kömür kaybı olacak ve havzanın toplam santral potansiyeli azalacaktır (Url-1).

Ayrıca bu çalışmada, atıktan türetilmiş yakıt (RDF) kullanılmıştır. Geri Kazanım tesisinde işlendikten sonra düzenli depolama alanına gönderilen katı atıklar ayıklanarak, geri dönüştürülemeyen plastik ağırlıklı atıklar çimento fırınlarında alternatif yakıt olarak kullanılmakta ve ayrıca toplanan diğer geri kazanılabilen plastikler granül haline getirilmektedir.

Bu çerçevede ayırma ünitesinden çıkan ve geri dönüştürülemeyen (mevcut sistemde depolama alanlarına gönderilen atıklar) atıklardan RDF üretilmesi ve bu malzemenin çimento fırınlarında ek yakıt (fosil yakıtlar yerine) olarak kullanılması amacıyla parçalayıcılar ve separatörden oluşan bir RDF üretim teslerinde, nihai olarak elde edilen parçalanmış atıklardan oluşan ve ısı değeri yaklaşık 4000 kcal/kg olan atıklar çimento fabrikalarında kullanılacak fiziksel büyüklüğe indirilmek üzere son parçalayıcıda işlenerek hazır hale getirilmektedir.

Ayırma ünitesinde ayrılan geri dönüşümlü plastik atıkların ekonomik değerinin arttırılması amacıyla PE (Polietilen), PP (Polipropilen) ve PET türü plastik atıklar için bir granül tesisleri kurulmaktadır. Plastiklerin daha küçük boyutlara getirilerek hammadde olarak kullanımları sağlanmış ve ekonomik değerleri arttırılmaktadır. Elde edilen granül plastik çöp konteynırı, çöp poşeti, yol döşemesi, saksı, askılık vb. ürünlerin yapımında kullanılmaktadır (Url-3).

Afşin Elbistan linyit kömürü ve RDF numunesi kullanılmadan önce sabit ağırlığa ulaşana kadar açık havada kurutulmuş ve nemi tamamen giderilene kadar etüvde bekletilmiştir.

Daha sonra numuneler halkalı öğütme cihazında öğütülmüştür ve Retsch AS 200 model eleme cihazında 250 µm altına indirilmiştir. Numuneler, kolayca saklanılabilmesi ve ayırt edilebilmesi için kavanozlara konulmuş ve etiketlenmiştir. Bu çalışmada uygulanan analizler, ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

## 6.2 Kömür ve RDF Yarıkoklarının Elde Edilmesi

Yarıkok numuneleri, kömür ve RDF numunelerinin  $N_2$  akımı altında karbonizasyonu ile Şekil 6.3'te görülen yatay boru fırında elde edilmiştir. Kömür ve RDF numunelerinden 10 g tartılmıştır. 100 ml/dak  $N_2$  akımı altında,  $10^\circ\text{C}/\text{dk}$  ısıtma hızıyla  $400^\circ\text{C}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$  ve  $900^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 30 dk bekletilmiş ve daha sonra ortam sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Bu numunelerden elde edilen yarıkokların ısıl değerleri karşılaştırılmış, en yüksek ısıl değere sahip olan kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku kullanılarak, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında RDF yarıkoku içerecek şekilde karışımlar hazırlanmıştır.



Şekil 6.3 : Yatay boru fırın.

## 6.3 Kısa Analiz

Numunelerin kısa analizleri Şekil 6.4'te gösterilen termal analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. Pt-Pt/Rh ısıl çiftine sahip cihazın çalışma sıcaklığı  $1000^\circ\text{C}$ 'ye çıkabilmektedir. Numune kabı platinden yapılmış olup hacmi  $10\ \mu\text{L}$ 'dir. TA marka, SDT Q600 model termal analiz cihazı Şekil 6.4'te görülmektedir. Tane boyutu  $250\ \mu\text{m}$  altına indirilmiş olan 10 mg numune, termal analiz cihazında 100 ml/dak  $N_2$  akımı altında, öncelikle  $50^\circ\text{C}$ 'de denge haline ulaşılmış, daha sonra  $10^\circ\text{C}/\text{dk}$  ısıtma hızıyla  $105^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılarak bu sıcaklıkta nem çıkışının sağlanması için 10 dk süreyle bekletilmiştir. Ardından,  $40^\circ\text{C}/\text{dk}$  ısıtma hızıyla  $900^\circ\text{C}$ 'ye ısıtılmış ve uçucu madde çıkışının gerçekleşmesi için bu sıcaklıkta 7 dk bekletilmiştir.

Uçucu maddenin çıkışının ardından;  $20^\circ\text{C}/\text{dk}$  soğutma hızıyla sıcaklık, kömür numunesinin kısa analizinde,  $755^\circ\text{C}$ 'ye, RDF numunelerinin kısa analizinde ise  $600^\circ\text{C}$ 'ye düşürülmüştür. Sıcaklık düştükten sonra  $N_2$  akımı kesilerek 100 ml/dk kuru

hava beslenerek sabit karbonun yanması gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kaybı sabitlenince kalan ağırlık kül miktarına eşittir.



**Şekil 6.4 :** TA marka, SDT Q600 model termal analiz cihazı.

#### 6.4 Elementel Analiz

Numunelerin elementel analizleri Şekil 6.5’te görülen Leco TruSpec® CHN model elementel analiz cihazı ve Leco TruSpec® S modülü ile gerçekleştirilmiştir. Elementel analiz ile numunelerin karbon, hidrojen, azot ve kükürt içerikleri belirlenmiş ve oksijen içeriği ise hesap yolu ile belirlenmiştir.



**Şekil 6.5 :** Leco TruSpec® CHN model elementel analiz cihazı ve S modülü.

#### 6.5 Isıl Değer Analizi

Bir yakıtın ısı değeri, birim ağırlıktaki yakıtın tamamen yanması sonucunda açığa çıkan ısıнын bir göstergesidir. En çok kullanılan yöntem, yakıtın saf O<sub>2</sub> ortamında kalorimetre bombasında yakılmasıdır. Bu yöntemle, yakıt bir bomba içinde basınç altında, saf O<sub>2</sub> ile sabit hacimde yakılarak açığa çıkan ısı ölçülür (Toftgaard, 2010)

Numunelerin ısıl değerleri, paslanmaz elik kalorimetre bombasına sahip, Şekil 6.6’da gösterilen IKA C2000 model kalorimetre cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda numunelere ait st ısıl değerler elde edilmiştir.



**Şekil 6.6 :** IKA C2000 model kalorimetre.

#### **6.6 Termal Analiz**

Numunelerin termal analizleri Şekil 6.4’te gösterilen termal analiz cihazında gerçekleştirilmiştir. 10 mg Afşin Elbistan linyit kömürü ve RDF numunesi termal özelliklerini belirlemek amacıyla 40°C/dk ısıtma hızıyla, 100 ml/dk kuru hava akımı debisiyle ortam sıcaklığından 900 °C’ye kadar ısıtılarak, numunelerin eş zamanlı olarak TG, DTA, DTG, DSC eğrileri elde edilmiştir.

TG eğrisinde nem ile uçucu madde çıkışlarının ve yanma prosesinin neden olduğu ağırlık azalması, DTA eğrisinde nem çıkışına ait endotermik pikler ile yanma prosesine ait ekzotermik pikler, DTG eğrisinde sıcaklığa bağlı olarak bu süreçlerin neden olduğu ağırlık kayıp hızlarındaki değişim, DSC eğrisinde de bu sıcaklık aralığında ortam ile numune arasındaki ısı alışverişi görülmektedir. DTA eğrilerinden numunelerin tutuşma sıcaklıkları belirlenirken, DTG eğrileri ile maksimum yanma hızı sıcaklığı, maksimum yanma hızı, yanma süresi ve yanma verimleri belirlenmiştir.

## 6.7 FTIR Analizi

Fourier Dönüşüm Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, fonksiyonel grupların titreşimlerinden kaynaklanan yapısal, kompozisyonel ve fonksiyonel bilgilerin elde edilmesini sağlayan bir tekniktir.

Numunelerin FTIR analizleri Perkin Elmer marka, Spectrum One model FTIR cihazı ile yapılmıştır.  $500\text{ cm}^{-1}$  ile  $4000\text{ cm}^{-1}$  aralığında belirlenen absorbands değerleri ve literatürde bunlara karşılık gelen fonksiyonel gruplar tespit edilerek, tüm numunelerin fonksiyonel grup dağılımları belirlenmiştir.

## 6.8 X-Işını Difraktometresi (XRD)

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristalin fazının kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır.

Numunelerin XRD analizleri, Panalytical marka PW3040/60 model X-ışını difraktometresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Anot malzemesi bakır olan ve  $45\text{ kV}$ – $40\text{ mA}$  güçte çalışan X-ışınının kullanıldığı analizlerde tarama açısı  $10^\circ$ – $90^\circ$  olarak seçilmiş olup  $0,026^\circ$  adım aralıklarında değerler alınarak  $5^\circ/\text{dakika}$  hızlarda analizler tamamlanmıştır. Elde edilen analiz çıktıları X'Pert HighScore Plus 2.2b programı ve ICDD ile ICSD veritabanları kullanılarak tahlil edilmiş olup karşılaştırmalı sonuçlara yer verilmiştir.

## 6.9 X-Işını Floresan Spektrometresi (XRF)

Numunelerin XRF analizleri, Thermo Scientific marka Niton XL3t XRF analiz cihazı kullanılarak yapılmış olup, analizlerde en yüksek  $50\text{ kV}$  ve  $100\mu\text{A}$  çalışma koşullarında çalışabilen ve toplamda  $2\text{ W}$  güçte çalışan bakır anot bulunan X-ışını tüpünden yararlanılmıştır. Atom X ışınları gibi yüksek enerjili bir radyasyonla uyarılırsa, bu yüksek enerji girişi yakın yörüngelerdeki elektronları daha yüksek enerji düzeyine çıkarır. Uyarılan elektronlar ilk enerji düzeylerine döndüklerinde kazanmış oldukları fazla enerjiyi dalga boyu  $0,1\text{--}50\text{ Å}$  olan X ışınları şeklinde geri verirler. Bu ikincil X ışınları yayımına floresans ışımada adı verilir. Elementlerin verdiği bu ışımaların dalga boyu her element için farklı ve ayırt edicidir. Diğer bir

ifadeyle bu ışımlar o elementin parmak izi gibidir. Işımanın dalga boyunun saptanmasıyla elementin cinsi (nitel), saptanan bu ışının yoğunluğunun ölçülmesiyle element konsantrasyonu (nicel) belirlenmektedir.

#### **6.10 Yüzey Alanı Ölçümü (BET)**

Yüzey alan ölçümleri granül ya da toz halindeki katı numunelerin üzerine tabaka halinde adsorplanan gaz miktarı ölçülerek yapılmaktadır. Tek tabaka kapasitesinin ve yüzey alanının elde edilmesi için Brunauer, Emmett ve Teller (BET)'in çok katlı adsorpsiyon için geliştirmiş oldukları izoterm modeli kullanılmıştır.

Numunelerin BET yüzey alanları, Quantachrome marka NOVA1200 model bir yüzey alanı ölçer ile belirlenmiştir. Yüzey alanı ölçülecek numune, cam ölçüm kabına konulduktan sonra, vakum uygulanarak 105°C'de gaz giderme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemden sonra numune, yüzey alanı ölçme bölümüne yerleştirilmiş ve adsorplanan gaz olarak azot kullanılarak, çoklu nokta (6 nokta) BET yöntemi ile numunenin yüzey alanı ölçülmüştür.

#### **6.11 Tanecik Boyutu Analizi**

Numunelerin tanecik boyutu analizleri Hydro 2000G ıslak numune dağıtıcı ile birlikte çalışan Malvern Instruments TM Mastersizer 2000 tanecik boyutu ölçme cihazı ile yapılmıştır. Tanecik boyutlarını ölçmek için kullanılan Mie Teorisi ışığın ortam içerisinde tane boyu etrafındaki hem kırılmasını hem de geçirgenliğini dikkate alır. Mie modelini kullanabilmek için hem örneğin hem de ortamın kırılma İndislerinin bilinmesi gerekmektedir.

#### **6.12 Mikroyapısal Analiz (SEM)**

Taramalı Elektron Mikroskobu veya SEM (Scanning Electron Microscope), çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışan bir cihazdır. Numunelerin yapılarını yüksek çözünürlükte görüntüleyebilir. Numunelerin SEM görüntüleri için FEI-Quanta FEG 250 marka SEM cihazı kullanılmıştır.



## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI VE YORUMLANMASI

Bu çalışmada kullanılan ana numune, yarıkok ve karışım numunelerine verilen kodlar Çizelge 7.1’de görülmektedir:

**Çizelge 7.1 : Numune adları ve kodları.**

| Numune Adı                                                    | Numune Kodu       |
|---------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Kömür (Ana Numune)</b>                                     | KA                |
| <b>Kömür Yarıkok (400°C)</b>                                  | KY400             |
| <b>Kömür Yarıkok (500°C)</b>                                  | KY500             |
| <b>Kömür Yarıkok (600°C)</b>                                  | KY600             |
| <b>Kömür Yarıkok (700°C)</b>                                  | KY700             |
| <b>Kömür Yarıkok (800°C)</b>                                  | KY800             |
| <b>Kömür Yarıkok (900°C)</b>                                  | KY900             |
| <b>RDF (Ana Numune)</b>                                       | RA                |
| <b>RDF Yarıkok (400°C)</b>                                    | RY400             |
| <b>RDF Yarıkok (500°C)</b>                                    | RY500             |
| <b>RDF Yarıkok (600°C)</b>                                    | RY600             |
| <b>RDF Yarıkok (700°C)</b>                                    | RY700             |
| <b>RDF Yarıkok (800°C)</b>                                    | RY800             |
| <b>RDF Yarıkok (900°C)</b>                                    | RY900             |
| <b>%10 RDF Yarıkok (400°C)+<br/>%90 Kömür Yarıkok (800°C)</b> | 10 RY400+90 KY800 |
| <b>%20 RDF Yarıkok (400°C)+<br/>%80 Kömür Yarıkok (800°C)</b> | 20 RY400+80 KY800 |
| <b>%30 RDF Yarıkok (400°C)+<br/>%70 Kömür Yarıkok (800°C)</b> | 30 RY400+70 KY800 |
| <b>%40 RDF Yarıkok (400°C)+<br/>%60 Kömür Yarıkok (800°C)</b> | 40 RY400+60 KY800 |
| <b>%50 RDF Yarıkok (400°C)+<br/>%50 Kömür Yarıkok (800°C)</b> | 50 RY400+50 KY800 |

## 7.1 Isıl Değer Analiz Sonuçları

Çizelge 7.2’de numunelerin ısı değer analiz sonuçları verilmiştir. KA ve KY numunelerinin ısı değer analiz sonuçları incelendiğinde, KY400, KY500 ve KY600 numunelerinin ısı değerleri, KA numunesinin ısı değeri ile kıyaslandığında yarıkok üretimi işlemi ile sırasıyla %13.48, %12.93, %6.34 oranlarında azalma olduğu belirlenmiştir.

KY numunelerinin ısı değerlerinin 700°C’den itibaren KA numunesinin ısı değerine göre artmaya başladığı ve KA numunesinin ısı değeri ile kıyaslandığında yarıkok üretimi işlemi ile %2.64 artma olduğu belirlenmiştir.

KY800 numunesinde ise, KA numunesinin ısı değeri ile kıyaslandığında yarıkok üretimi işlemi ile %15.93 artma olduğu belirlenmiştir. Yarıkok üretim sıcaklığının 900°C’ye yükseltilmesiyle elde edilen KY900 numunesinin KA numunesinin ısı değeri ile kıyaslandığında %11.43 artma olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, KY900 numunesinin ısı değerinde KY800 numunesinin ısı değerine göre azalma olduğu belirlenmiştir. Yarıkok üretiminde 700°C’den itibaren sıcaklığın artması, ısı değerinin sıcaklığa bağlı olarak arttığını göstermektedir. KY800 numunesi en yüksek ısı değerine sahip olmasından dolayı karışımları hazırlamak için seçilmiştir. Kısa analiz sonuçlarında, KY800 numunesinin sabit karbon ve elementel karbon içeriğinin en yüksek çıkması bu sonucu desteklemektedir.

RA numunesinin ısı değeri, KA numunesi ile kıyaslandığında daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak RA numunesinden 400°C’de üretilen yarıkokun ısı değerinin RA numunesine göre KY400 numunesinin aksine %22.11 artış olduğu belirlenmiştir. RY500, RY600, RY700, RY800 ve RY900 numunelerinin ısı değerlerinin ise, RA numunesine göre sırasıyla %37.64, %38.07, %45, %46.49, %42.95 oranlarında azalma olduğu belirlenmiştir.

RY numunelerinin 400°C’den itibaren ısı değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Bu durum KY numunelerinin aksine gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre karışımları hazırlamak için RY400 numunesi seçilmiştir. Kısa analiz sonuçlarında, RY400 numunesinin uçucu madde ve elementel karbon içeriğinin en yüksek değerde ve kül içeriğinin düşük olması bu sonucu doğrulamaktadır. Bu durum, RDF’nin uçucu maddesinin yanabilen kısmının çok yüksek olduğunu

göstermektedir. Sıcaklık arttıkça, mineraller oksitlenmekte ve kül içeriği artmakta ve elementel karbon içeriği azalmaktadır.

Karışımların ısı değeri analiz sonuçları incelendiğinde, KY800 numunesinden daha yüksek ısı değere sahip olan RY400 numunesinin karışımlardaki miktarı arttıkça ısı değerinde artış olduğu görülmüştür. KY800 numunesine RY400 numunesinin %10 ilavesi ile, KY800 numunesinin ısı değerinde %7.5; KY800 numunesine RY400 numunesinin %20 ilavesi ile, KY800 numunesinin ısı değerinde %17.6; KY800 numunesine RY400 numunesinin %30 ilavesi ile, KY800 numunesinin ısı değerinde %25.5; KY800 numunesine RY400 numunesinin %40 ilavesi ile, KY800 numunesinin ısı değerinde %28.8; KY800 numunesine RY400 numunesinin %50 ilavesi ile, KY800 numunesinin ısı değerinde %35.77 artış olduğu belirlenmiştir. KA numunesinden sadece yarıkok üretimi ile KY800 numunesinin ısı değerinde en fazla %15.93 artış sağlanabilirken, KY800 numunesine %50 RY400 numunesi ilavesi ile ısı değerinde %35.77 artış sağlanabildiği görülmüştür. KY800 numunesinden kaliteli yakıt üretmek için RY400 numunesinin ilavesi ile ısı değerinin %19.84 daha fazla arttırılabildiği belirlenmiştir.

Bu durumda, karışımların RDF yarıkoku içeriği arttıkça ısı değerlerin de arttığı görülmüştür. RDF yarıkokunun kömür yarıkoku üzerinde katkı etkisi yaptığı ve karışıma katılma oranı arttıkça uçucu madde içeriğini arttırarak ısı değerlerde iyileşme yapılabileceği düşünülmüştür.

**Çizelge 7.2 : Numunelerin ısı değeri analiz sonuçları.**

| <b>Numune</b>     | <b>Isıl değeri (cal/g)</b> |
|-------------------|----------------------------|
| KA                | 2536                       |
| KY400             | 2194                       |
| KY500             | 2208                       |
| KY600             | 2375                       |
| KY700             | 2603                       |
| KY800             | 2940                       |
| KY900             | 2826                       |
| RA                | 5424                       |
| RY400             | 6623                       |
| RY500             | 3382                       |
| RY600             | 3359                       |
| RY700             | 2983                       |
| RY800             | 2902                       |
| RY900             | 3094                       |
| 10 RY400+90 KY800 | 3178                       |
| 20 RY400+80 KY800 | 3570                       |
| 30 RY400+70 KY800 | 3944                       |
| 40 RY400+60 KY800 | 4252                       |
| 50 RY400+50 KY800 | 4577                       |

## **7.2 Kısa Analiz Sonuçları**

Çizelge 7.3'te numunelerin kısa analiz sonuçları verilmiştir. KA ve KY numunelerinin kısa analiz sonuçları incelendiğinde, KA numunesinin nem ve kül içeriğinin yüksek, karbon içeriğinin ise düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, kömürün mineral madde içeriğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, KY numunelerinin nem ve uçucu madde içeriğinde azalma, sabit karbon ve kül içeriğinde artma olduğu görülmektedir. Sıcaklık yükseldikçe, mineraller oksitlenmekte ve kül artmaktadır. En yüksek sabit C içeriğine sahip kömür yarıkokunun 800°C karbonizasyon sıcaklığında üretilen KY800 numunesinin olduğu görülmüştür. 700°C'den 800°C'ye geçildiğinde, uçucu madde içeriğinde diğer karbonizasyon sıcaklıkları arasındaki geçişten daha fazla oranda azalma olması bu sonucu doğrulamaktadır. KY900 numunesinin sabit C içeriğinde bir miktar azalma görülmüştür. Ayrıca, yarıkokların yapısındaki nem termal işlem ile giderilmesine rağmen, sonrasında dış ortamdan nem absorpladığı için kısa analiz sonuçlarında az da olsa nem görülmüştür.

RA ve RY numunelerinin kısa analiz sonuçları incelendiğinde, RA numunesinin uçucu madde içeriğinin yüksek, sabit karbon içeriğinin ise düşük olduğu görülmüştür. RDF numunesi heterojen bir yapıdan oluşmaktadır. RDF'nin içerdiği selülozik (hemiselüloz, selüloz, lignin) ve plastik bileşenlerin varlığı uçucu madde içeriklerinin çok yüksek olmasına neden olmaktadır. RDF'nin içerdiği silika ve diğer inorganik maddelerin ise, yüksek kül içeriğine katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

Benzer şekilde karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, yarıkokların nem ve uçucu madde içeriğinin azalma, sabit karbon ve kül içeriğinin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Sıcaklık yükseldikçe, mineraller oksitlenmekte ve kül artmaktadır. En yüksek sabit C içeriğine sahip RDF yarıkokunun 400°C karbonizasyon sıcaklığında olduğu görülmüştür. 400°C'den 500°C'ye geçildiğinde, uçucu madde miktarında diğer karbonizasyon sıcaklıkları arasındaki farktan daha fazla miktarda azalma olduğu görülmektedir. DTG eğrilerinde de bu durum, 400°C-500°C arasında ağırlık kayıp hızlarının en fazla olduğu bölge olarak görülmektedir. Ayrıca, yarıkokların yapısındaki nem termal işlem ile giderilmesine rağmen, sonrasında dış ortamdan nem absorpladığı için kısa analiz sonuçlarında az da olsa nem görülmüştür.

Farklı oranlarda yarıkoklar ile hazırlanmış karışımların kısa analiz sonuçları incelendiğinde ise, karışımlardaki RY400 numunesi içeriği arttıkça uçucu madde içeriğinde artma ve kül içeriklerinde ise azalma olduğu görülmektedir. Nem ve sabit C içeriklerinde ise düzenli bir değişim olmadığı görülmüştür.

50 RY400+50 KY800 numunesinin ısı değeri diğer karışım numuneleri ile kıyaslandığında en yüksek değerde olduğu belirlenmiştir. Bu numunenin uçucu madde içeriğinin diğer numunelerden çok daha yüksek olması nedeniyle, uçucu maddenin yanabilen kısmının daha fazla olduğu ve ısı değeri üzerine uçucu madde miktarının etkili olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 7.3 : Numunelerin kısa analiz sonuçları.**

| <b>Numune</b>     | <b>Nem<br/>(%)</b> | <b>Uçucu Madde<br/>(%)</b> | <b>Sabit C<br/>(%)</b> | <b>Kül<br/>(%)</b> |
|-------------------|--------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| KA                | 7.39               | 50.05                      | 14.50                  | 28.06              |
| KY400             | 1.15               | 43.32                      | 12.95                  | 42.58              |
| KY500             | 2.75               | 41.45                      | 13.93                  | 41.87              |
| KY600             | 1.06               | 37.05                      | 12.63                  | 49.26              |
| KY700             | 1.33               | 29.47                      | 17.90                  | 51.30              |
| KY800             | 0.34               | 11.32                      | 21.70                  | 66.64              |
| KY900             | 0.01               | 10.98                      | 20.45                  | 68.56              |
| RA                | 3.30               | 80.10                      | 3.80                   | 12.80              |
| RY400             | 1.27               | 68.95                      | 9.94                   | 19.84              |
| RY500             | 3.48               | 29.99                      | 25.39                  | 41.14              |
| RY600             | 2.07               | 22.06                      | 30.07                  | 45.80              |
| RY700             | 1.83               | 14.53                      | 30.89                  | 52.75              |
| RY800             | 1.90               | 11.63                      | 32.28                  | 54.19              |
| RY900             | 2.10               | 9.05                       | 36.50                  | 52.35              |
| 10 RY400+90 KY800 | 2.48               | 28.16                      | 15.34                  | 54.02              |
| 20 RY400+80 KY800 | 1.63               | 25.32                      | 18.64                  | 54.41              |
| 30 RY400+70 KY800 | 1.99               | 31.75                      | 16.36                  | 49.90              |
| 40 RY400+60 KY800 | 1.70               | 34.92                      | 18.10                  | 45.28              |
| 50 RY400+50 KY800 | 2.94               | 43.72                      | 12.25                  | 41.09              |

### 7.3 Elementel Analiz Sonuçları

Çizelge 7.4’te numunelerin elementel analiz sonuçları verilmiştir. KA ve KY numunelerinin elementel analiz sonuçları incelendiğinde, en yüksek H, N, O ve S içeriklerinin ise KA numunesinde olduğu görülmüştür. Karbonizasyon sıcaklığı arttıkça nem ve uçucu madde çıkışıyla yapıdaki H, O, N ve S içeriklerinin genel olarak azalma gösterdiği ve C içeriklerinin genel olarak artma ya da azalma göstermediği ancak daha çok azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık arttıkça, mineraller oksitlenmekte ve kül içeriği artmakta ve elementel karbon içeriğinin KY800 dışında genel olarak azalmakta olduğu görülmüştür. Sadece KY800 numunesinde, H ve N içeriklerinin daha düşük sıcaklıkta üretilen numunelere göre arttığı, daha sonra tekrar azaldığı görülmüştür. Elementel C içeriğinin en yüksek olduğu numunenin ise KY800 olduğu görülmüştür. Ayrıca, KY800 numunesinin ısıl değerinin de en yüksek olması bu sonuçla uyum göstermektedir.

RA ve RY numunelerinin elementel analiz sonuçları incelendiğinde, en yüksek H, O ve S içeriklerinin ise KA numunesinde olduğu görülmüştür. RA numunesinin yüksek C ve H içeriği, RDF’yi oluşturan kâğıt, karton ve odun parçalarının selülozik bileşenlerindeki ve plastik bileşenlerindeki C, H bağlarından kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, RDF'nin yüksek O içeriğine de sahip olduğu görülmüştür. Yüksek O içeriği, RDF'yi oluşturan kâğıt, karton ve odun parçalarının selülozik bileşenlerindeki O bağından kaynaklanmaktadır.

Karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, nem ve uçucu madde çıkışıyla yapıdaki H, O ve S içeriklerinin genel olarak azaldığı ve N içeriğinde düzenli değişim olmadığı görülmüştür. Bu durumun RDF'nin heterojen yapısından kaynaklandığı düşünülmüştür. Elementel C içeriğinin ise, RY400'e kadar arttığı daha sonra karbonizasyon sıcaklığı arttıkça azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Sıcaklık arttıkça, mineraller oksitlenmekte ve kül içeriği artmakta ve elementel karbon içeriği azalmaktadır. Elementel C içeriğinin en yüksek olduğu numunenin RY400 olduğu görülmüştür. Ayrıca RY400 numunesinin ısı değeri de en yüksek olması bu sonuçla uyum göstermektedir.

Farklı oranlarda yarıkoklar ile hazırlanmış karışımların elementel analiz sonuçları incelendiğinde ise, karışımlardaki RY400 numunesi içeriği arttıkça C, H, N içeriklerinin artma ve O içeriklerinin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Ayrıca, S içeriklerinin düzensiz olarak değiştiği görülmüştür.

**Çizelge 7.4 : Numunelerin elementel analiz sonuçları.**

| Numune            | C(%)  | H(%) | O(%)  | N(%) | S(%) |
|-------------------|-------|------|-------|------|------|
| KA                | 43.1  | 2.61 | 22.12 | 1.86 | 1.39 |
| KY400             | 39.4  | 1.56 | 14.14 | 1.81 | 0.54 |
| KY500             | 38.9  | 1.04 | 15.35 | 1.65 | 0.27 |
| KY600             | 39.6  | 0.58 | 8.26  | 1.75 | 0.55 |
| KY700             | 35    | 0.33 | 11.08 | 1.59 | 0.03 |
| KY800             | 75.1  | 0.93 | 1.50  | 2.59 | 0.01 |
| KY900             | 35.1  | 0.63 | 0.72  | 1.41 | 0.60 |
| RA                | 56.06 | 7.67 | 21.63 | 1.39 | 0.51 |
| RY400             | 61.69 | 6.79 | 9.77  | 1.63 | 0.44 |
| RY500             | 41.55 | 2.13 | 11.32 | 2.36 | 0.36 |
| RY600             | 41.66 | 1.64 | 7.61  | 2.27 | 0.50 |
| RY700             | 40.79 | 1.42 | 2.20  | 1.85 | 0.39 |
| RY800             | 40.07 | 1.26 | 1.95  | 1.45 | 0.32 |
| RY900             | 43.69 | 1.07 | 0.65  | 1.09 | 0.43 |
| 10 RY400+90 KY800 | 39.8  | 0.90 | 2.43  | 1.47 | 0.39 |
| 20 RY400+80 KY800 | 43.2  | 1.37 | 1.50  | 1.62 | 0.39 |
| 30 RY400+70 KY800 | 46    | 1.98 | 0.58  | 1.69 | 0.69 |
| 40 RY400+60 KY800 | 49.4  | 2.39 | 0.40  | 1.73 | 0.88 |
| 50 RY400+50 KY800 | 52.8  | 2.99 | 0.11  | 1.76 | 0.35 |

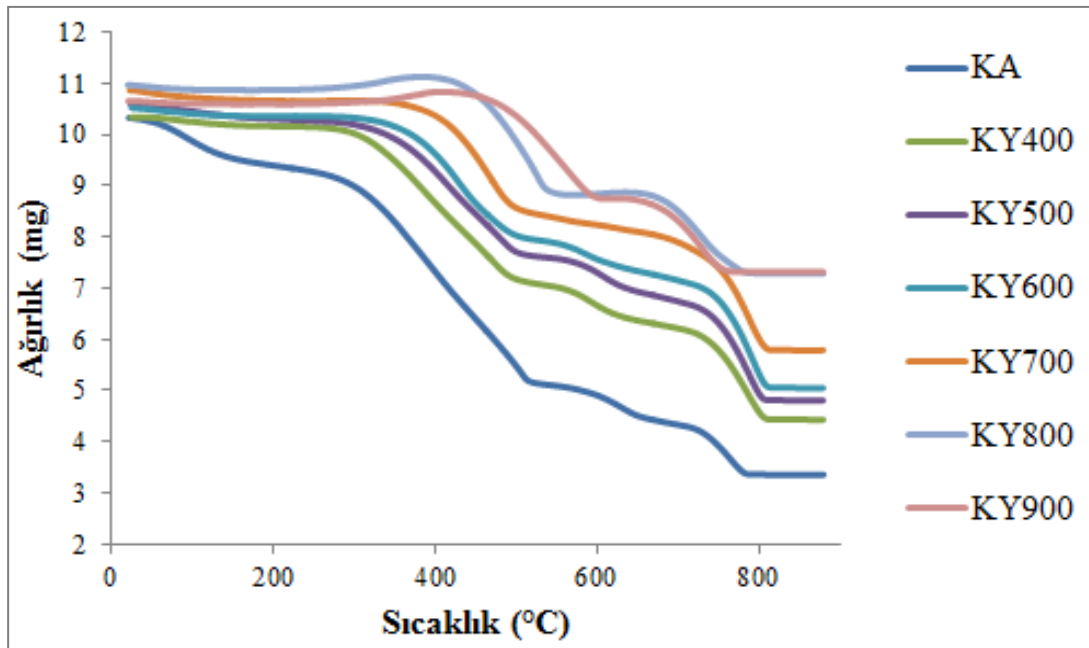
## 7.4 Termal Analiz Sonuçları

Numunelerin kuru hava atmosferinde yanmasına ait TG, DTG, DTA, DSC eğrileri ve bu eğrilerden belirlenen yanma özellikleri değerlendirilmiştir.

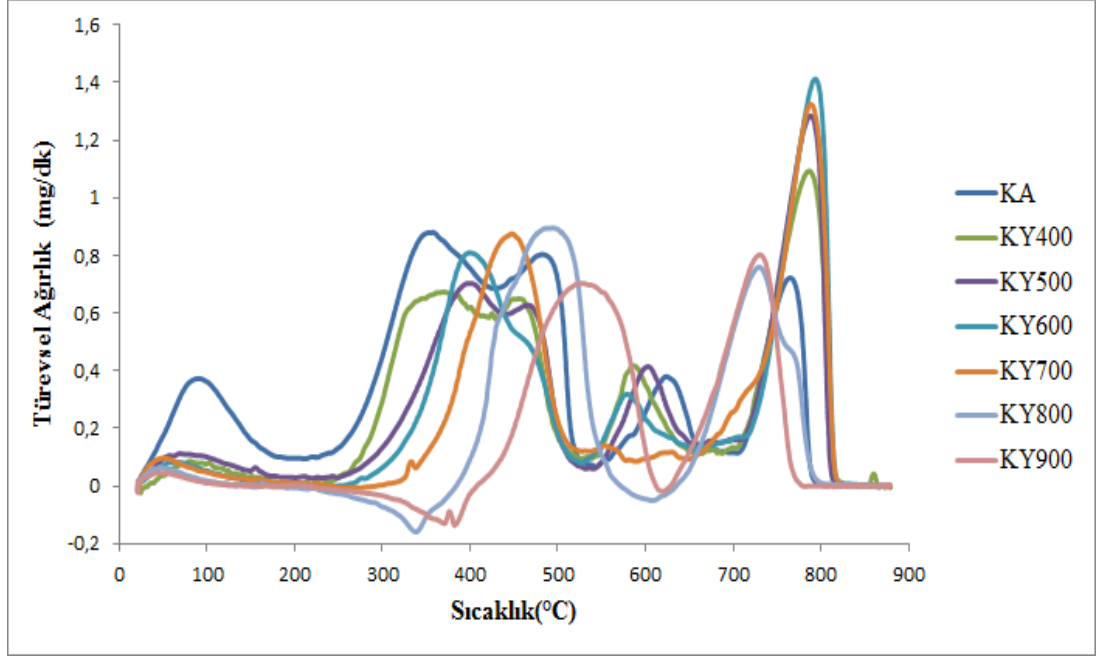
### 7.4.1 KA ve KY numunelerinin termal analiz sonuçları

KA ve KY numunelerinin kuru hava atmosferinde yanmasına ait TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri Şekil 7.1, Şekil 7.2, Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'te, bu eğrilerden belirlenen yanma özellikleri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

KA ve KY numunelerinin kuru hava atmosferinde yanması sonucu elde edilen TG eğrileri incelendiğinde, KA ve KY numunelerinin iki farklı ağırlık kayıp bölgesine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, ağırlık kaybının en fazla KA numunesinde gerçekleştiği ve KY numunelerinin elde edildiği karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, uçucu madde çıkışı daha fazla gerçekleştiğinden ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.1 : KA ve KY numunelerinin TG eğrileri.

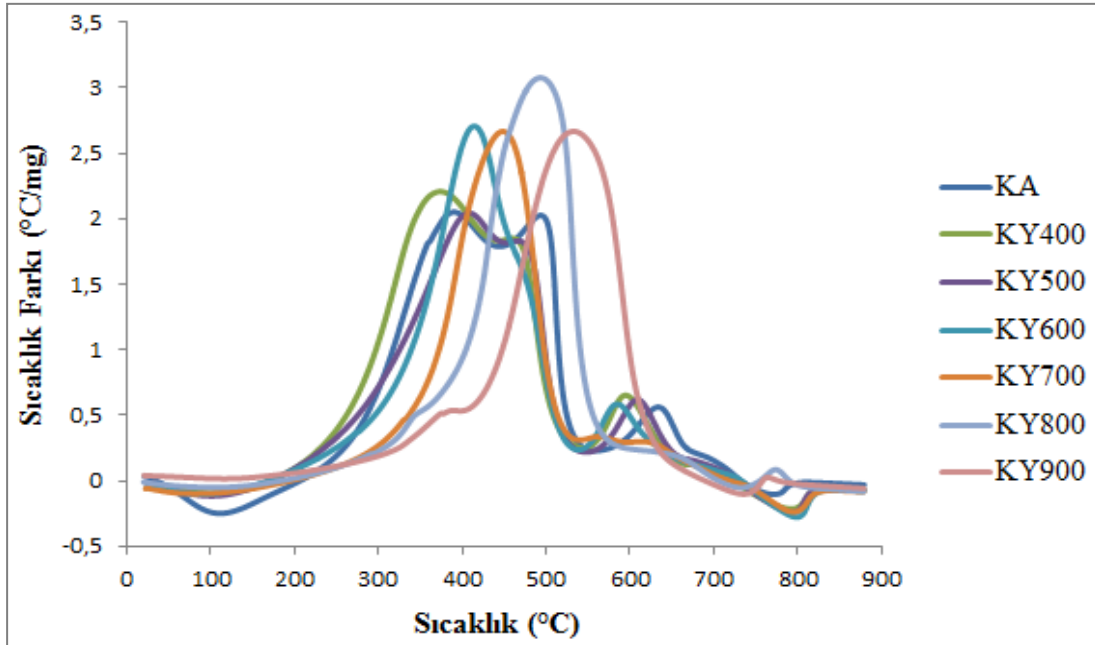


**Şekil 7.2 : KA ve KY numunelerinin DTG eğrileri.**

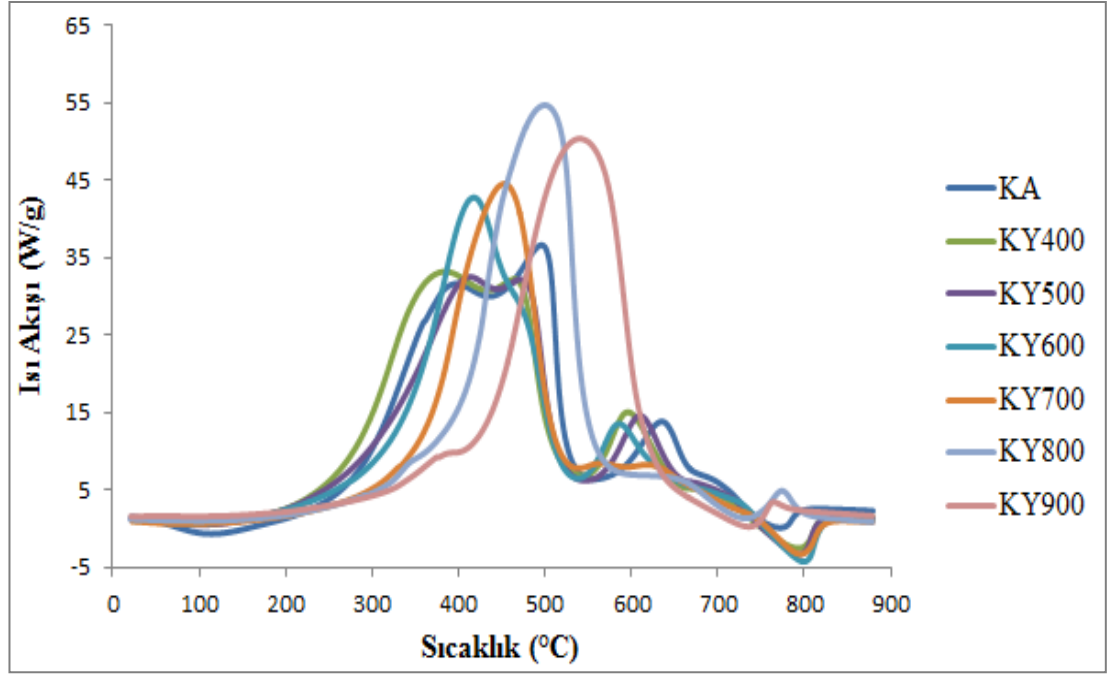
KA numunesinin DTG eğrisinde yaklaşık 100°C’de nem çıkışının tamamlanmasının ardından yaklaşık 200°C’ye kadar önemli bir ağırlık kaybının gerçekleşmediği görülmektedir. 250°C ile 350°C arasındaki sıcaklık aralığında ağırlık kayıplarının başladığı görülmektedir. Kömür numunesinin bünyesinde yer alan uçucu maddelerin yapıdan uzaklaşması ile başlayan bu süreç, yanabilir uçucu türlerinin 207°C’de tutuşmasının ardından homojen gaz fazında yanması ile devam etmiştir ve 0.88 mg/dk maksimum yanma hızına 358°C sıcaklığında ulaşmıştır. Yaklaşık olarak 550 °C’ye kadar devam eden ve en önemli ağırlık kayıp bölgesini oluşturan ikinci pik bu şekilde açıklanabilir. 600°C’den sonra başlayan ve yaklaşık 750°C’ye kadar devam eden ağırlık kayıp bölgesinde, sabit karbonun heterojen fazda yanmasına ve bazı mineral fazlarından parçalanma neticesinde karbondioksit ve bazı bileşenlerin yapıdan uzaklaşması gerçekleşmektedir. Yanma yaklaşık olarak 20.08 dk sürmekte ve yanma verimi %67.50 olarak gerçekleşmektedir.

KY numunelerinin DTG eğrileri incelendiğinde; KA numunesi ile kıyaslandığında, 400°C ve 500°C’de uçucu maddelerin yapıdan uzaklaşması ve yanabilir uçucu türlerin homojen fazda yanmasının birbirini izleyen iki ayrı pik ile gerçekleştiği görülürken, 500°C’den sonra bu iki olayın eş zamanlı olarak tek bir pik ile gerçekleştiği görülmüştür.

KA ve KY numunelerinin DTG eğrilerinin kıyaslanması sonucunda, KA numunesinin 250°C-550°C ile arasında olan uçucu maddenin ardından yarıkokun yanmasına ait olan pik iki farklı pik halinde görülmektedir. KA numunesinin DTG eğrisinde 350°C civarında görülen pik uçucu madde yanmasına ait piktir. KY numunelerinin yarıkok üretimi sıcaklığına bağlı olarak, yarıkok yanmasına ait piklerin daha yüksek sıcaklıklara doğru kaydığı, 800°C civarında görülen pik ile sıcaklığın artmasına bağlı olarak birim zamandaki ağırlık kayıp hızının düştüğü belirlenmiştir. Yarıkok numunelerinde uçucu maddenin çıkmış olması nedeniyle KY500'den sonra 500°C civarında yarıkok yanmasına ait tek bir pik olarak görülmektedir. 600°C civarında ana numune ve diğer yarıkoklarda görülen pikin KY800 ve KY900'de aromatik yapıların sistemden uzaklaşması nedeniyle görülmediği belirlenmiştir. Bunun nedeni şekil 7.20'de görülen KA ve KY numunelerine ait FTIR analiz sonuçları ile de açıklanabilir.



Şekil 7.3 : KA ve KY numunelerinin DTA eğrileri.



**Şekil 7.4 : KA ve KY numunelerinin DSC eğrileri.**

KA numunesinin DTA eğrisinde, içermiş olduğu yüksek nemden dolayı yaklaşık 100°C’de endotermik bir pik verdiği ve ardından uçucu madde yanmasının gerçekleştiği ekzotermik pik ile birbiriyle kaynaşmış durumda yarıkok yanmasının gerçekleştiği ikinci pikin varlığı görülmektedir. 630°C’de yarıkok yanmasına ait ikinci bir egzotermik pikin varlığı daha gözlenmektedir. Ayrıca, 800°C civarında mineral maddelerin bozunmasına bağlı olarak endoterm pik görülmüştür.

Aromatik yapıların 800°C ve 900°C’de bünyeden uzaklaşmış olması nedeniyle 600°C civarında görülen egzoterm piklerin KY800 ve KY900’da olmadığı belirlenmiştir. Egzoterm pik sıcaklıkları sıcaklığın artmasına bağlı olarak daha yüksek sıcaklıklara doğru kaymıştır.

KY numunelerinin DTA eğrileri incelendiğinde, ana numunede görüldüğü gibi sıcaklığa bağlı olarak nem çıkışının neden olduğu endotermik pik görülmemektedir. 400°C ve 500°C’de uçucu madde ve yarıkok yanmasının birbirini izleyen iki ayrı pik ile gerçekleştiği görülürken, 500°C’den sonra bu iki olayın eş zamanlı olarak tek bir pik ile gerçekleştiği görülmektedir. Yaklaşık 800°C civarında ekzoterm tepkimelerin sona erdiği görülmektedir.

DSC eğrileri ile DTA eğrileri birbirleriyle uyum göstermektedir. KA ve KY numunelerinin DTA ve DSC eğrilerinin birbirleriyle uyum gösterdiği ve benzer eğilimlerin olduğu görülmektedir. KY800 numunesinin daha yüksek bir ekzoterm

pike sahip olması daha yüksek ısı değeri göstergesi olup ısı değeri analizi sonuçları ile uyum sağlamaktadır.

**Çizelge 7.5 : KA ve KY numunelerinin yanma özellikleri.**

| Numune | T <sub>max</sub><br>(°C) | (dm/dt) <sub>max</sub><br>(mg/dk) | Yanma<br>Verimi | Yanma<br>süresi<br>(dk) | Tutuşma<br>sıcaklığı<br>(°C) |
|--------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|
| KA     | 358                      | 0.88                              | 67.50           | 20.08                   | 207                          |
| KY400  | 786                      | 1.09                              | 57.17           | 21.78                   | 172                          |
| KY500  | 788                      | 1.28                              | 54.70           | 20.62                   | 172                          |
| KY600  | 793                      | 1.41                              | 52.01           | 21.81                   | 168                          |
| KY700  | 789                      | 1.32                              | 46.25           | 20.81                   | 195                          |
| KY800  | 486                      | 0.87                              | 33.60           | 21.83                   | 185                          |
| KY900  | 730                      | 0.80                              | 31.41           | 21.94                   | 202                          |

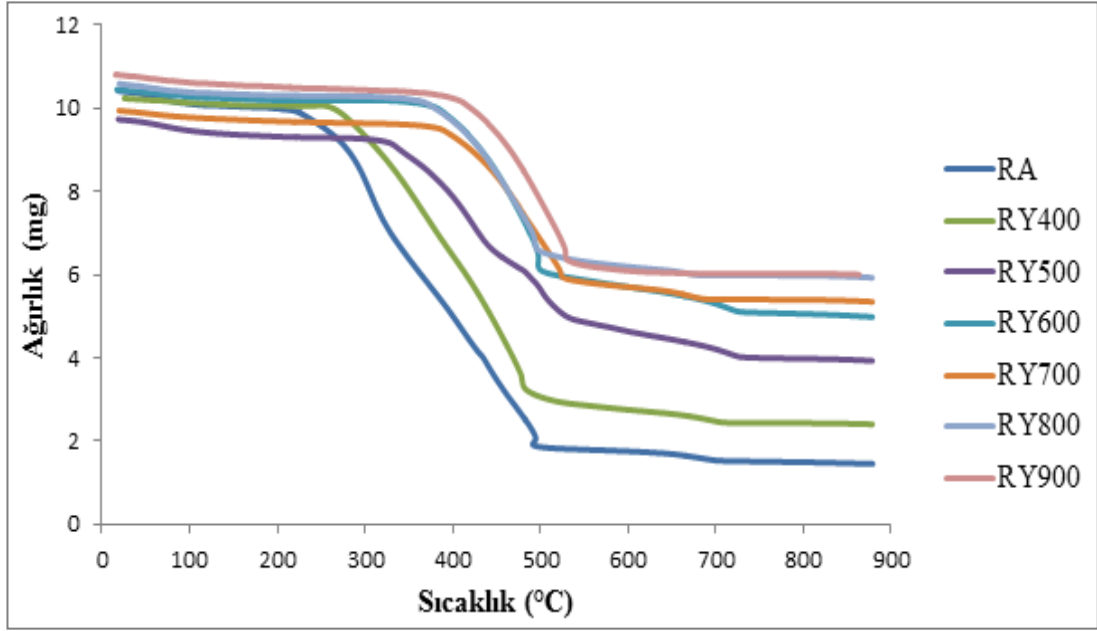
Çizelge 7.5 ve FTIR analizleri incelendiğinde, ısı değeri en yüksek KY800 numunesinde aromatik halkalı yapılardaki bağların 800°C’de koparak C-H parafinik düz zincir yapılarını oluşturduğu belirlenmiştir. Yakma sonucunda, düz zincir yapılarının halkalı yapılara oranla kırılabilmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisinin daha düşük olması nedeniyle maksimum yanma sıcaklığı (T<sub>max</sub>), diğer numunelere kıyasla daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmekte, birim zamandaki maksimum ağırlık kayıp hızı (dm/dt)<sub>max</sub> ise düşmektedir.

KA numunesinin 20.08 dk süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 358°C’de 0.88 mg/dk ve yanma veriminin %67.50; KY400 numunesinin 21.78 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 786°C’de 1.09 mg/dk ve yanma veriminin % 57.17; KY500 numunesinin 20.62 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 788°C’de 1.28 mg/dk ve yanma veriminin %54.7; KY600 numunesinin 21.81 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 793°C’de 1.41 mg/dk ve yanma veriminin %52.01; KY700 numunesinin 20.81 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 789°C’de 1.32 mg/dk ve yanma veriminin % 46.25; KY800 numunesinin 21.83 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 486°C’de 0.89 mg/dk ve yanma veriminin %33.60 ve KY900 numunesinin 21.94 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 730°C’de 0.8 mg/dk ve yanma veriminin %31.41 olduğu belirlenmiştir.

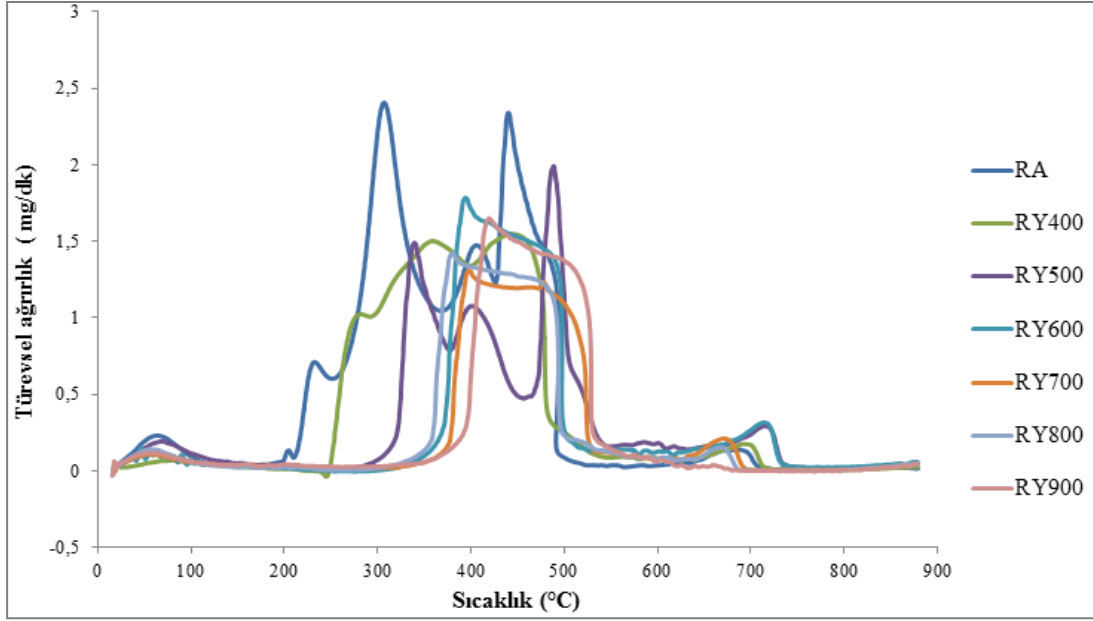
#### 7.4.2 RA ve RY numunelerinin termal analiz sonuçları

RA ve RY numunelerinin kuru hava atmosferinde yanmasına ait TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri Şekil 7.5, Şekil 7.6, Şekil 7.7, Şekil 7.8’de, bu eğrilerden belirlenen yanma özellikleri Çizelge 7.6’da verilmiştir.

RA ve RY numunelerinin yanması sonucu elde edilen TG eğrileri incelendiğinde, RA ve RY numunelerinin iki farklı ağırlık kayıp bölgesine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, ağırlık kaybının en fazla ana numunede gerçekleştiği ve yarıkokların elde edildiği karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir. Ayrıca, ağırlık kaybının en fazla RA numunesinde gerçekleştiği ve RY numunelerinin elde edildiği karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, uçucu madde çıkışı daha fazla gerçekleştiğinden ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.5 : RA ve RY numunelerinin TG eğrileri.



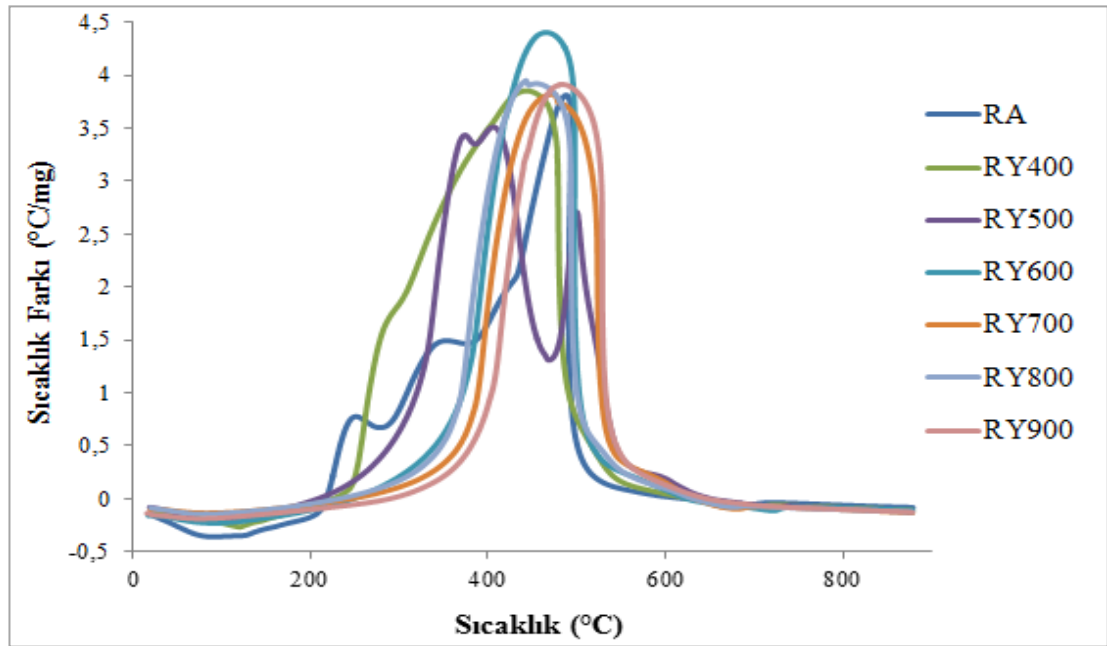
Şekil 7.6 : RA ve RY numunelerinin DTG eğrileri.

RDF, içerdiği bileşenlerin türüne göre nem giderilmesi ( $<110^{\circ}\text{C}$ ) haricinde genelde üç aşamada kademeli olarak bozunmaktadır. Birinci aşama ( $250^{\circ}\text{C}$ - $400^{\circ}\text{C}$ ), RDF içindeki selülozik bileşenlerin (hemiselüloz, selüloz) bozunmasını; ikinci aşama ( $400^{\circ}\text{C}$ - $500^{\circ}\text{C}$ ), termal olarak kararlı plastik bileşenlerin (PVC, LDPE, HDPE, PP) bozunmasını ve üçüncü aşama ( $600$ - $800^{\circ}\text{C}$ ), karbonat bazlı inorganik dolgu maddelerinin ( $\text{CaCO}_3$ ) bozunmasını göstermektedir. PVC'nin bozunması sırasında bazı kaynaklar  $300^{\circ}\text{C}$ - $350^{\circ}\text{C}$  ve  $400^{\circ}\text{C}$ - $500^{\circ}\text{C}$  arasında iki ayrı pikin oluştuğunu belirtmektedir (Myung ve diğ, 2010).

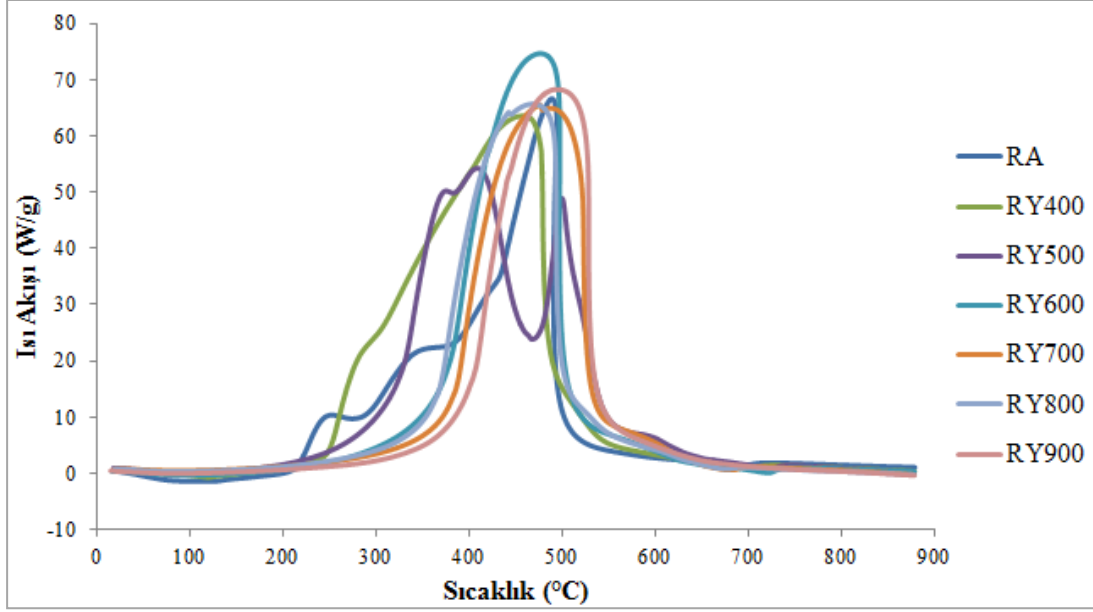
RA numunesinin DTG eğrisinde yaklaşık  $80^{\circ}\text{C}$ 'de nem çıkışının tamamlanmasının ardından yaklaşık  $200^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar önemli bir ağırlık kaybının gerçekleşmediği görülmektedir.  $200^{\circ}\text{C}$  ile  $250^{\circ}\text{C}$  arasındaki sıcaklık aralığında ağırlık kayıplarının başladığı görülmektedir. RDF numunesinin bünyesinde yer alan selülozik yapıdaki yanabilir uçucu bileşenlerin (selüloz, hemiselüloz, lignin) bozunarak yapıdan uzaklaşması ile başlayan bu süreç, selüloz ve hemiselüloz bileşenlerinin homojen fazda yanması ile devam etmiştir. Ayrıca  $320^{\circ}\text{C}$  civarında PVC'nin HCl çıkışı ve termal kararlı bileşen oluşması gerçekleşmiştir. Yaklaşık olarak  $380^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar devam eden ve en önemli ağırlık kayıp bölgesini oluşturan ikinci pik bu şekilde açıklanabilir.  $400^{\circ}\text{C}$ 'den sonra başlayan ve yaklaşık  $500^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar devam eden ağırlık kayıp bölgesi, plastik yapıdaki termal kararlı ve yanabilir uçucu bileşenlerin bozunarak yapıdan uzaklaşması ve bileşenlerin homojen fazda yanması ile

açıklanabilir. Yaklaşık 700°C’de karbonat bazlı inorganik dolgu maddelerinin ( $\text{CaCO}_3$ ) bozunmasını, karbondioksit ve bazı bileşenlerin yapıdan uzaklaşmasını ve lignin yapısının yanmasını göstermektedir. Lignoselülozik yapının üçüncü bileşeni olan lignin, hemiselüloz ve selülozun bozunduğu sıcaklıklar arasında bozunmasına rağmen DTG eğrisinde ayrı bir pik ile gözlenmez (Efika ve diğ, 2015).

RY numunelerinin DTG eğrileri incelendiğinde; RY400’de yapıdaki selülozik ve plastik yapılarının uçucu maddelerin uzaklaşması ve yanabilir uçucu türlerin homojen fazda yanmasının birbirini izleyen iki ayrı pik ile gerçekleştiği görülürken, RY500’de ise selülozik bileşenlerin çıkışı büyük ölçüde tamamlandığından, plastik yapılarının uçucu bileşenlerin çıkışını ve yanmasını gösteren piklerin daha belirgin olduğu görülmüştür.



Şekil 7.7 : RA ve RY numunelerinin DTA eğrileri.



**Şekil 7.8 :** RA ve RY numunelerinin DSC eğrileri.

RA numunesinin DTA eğrisinde, içermiş olduğu nemden dolayı yaklaşık 100°C’de çok küçük endotermik bir pik verdiği ve ardından 200°C-500°C arasında uçucu bileşenlerin bozunması ve yanmasının gerçekleştiği ekzotermik pik ile birbiriyle kaynaşmış durumda ikinci pikin varlığı görülmektedir.

RY numunelerinin DTA eğrileri incelendiğinde, ana numunede görüldüğü gibi başlangıçta endotermik pik görülmemektedir. 400°C ve 500°C’de uçucu bileşenlerin bozunması ve yanmasının birbirini izleyen iki ayrı pik ile gerçekleştiği görülürken, 500°C’den sonra bu iki olayın eş zamanlı olarak gerçekleştiği tek bir pikin varlığı ile görülmektedir. Yaklaşık 800°C civarında ekzoterm tepkimelerin sona erdiği görülmektedir.

RA ve RY numunelerinin DSC eğrileri ile DTA eğrileri birbirleriyle uyum göstermektedir. Çizelge 7.6 ve FTIR analizleri incelendiğinde, ısı değeri en yüksek olan RY400 numunesinin kömürün aksine sıcaklığın düşmesiyle aromatik grupların oluşmadığı, C-H parafinik düz zincir yapılarının kömürün aksine daha düşük sıcaklıkta (400°C) oluştuğu belirlenmiştir. Yanma esnasında aktivasyon enerjilerinin daha düşük olması nedeniyle düz zincirli yapıların düşük sıcaklıkta (400°C) kolaylıkla yanabilmesi nedeniyle ısı değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. RY400 numunesinin birim zamandaki ağırlık kayıp hızının  $(dm/dt)_{max}$  nispeten daha düşük olduğu, DSC eğrisinde RY400 numunesine ait pikin daha geniş ve büyük olduğu belirlenmiştir. KY numunelerinde, aromatik yapılar sıcaklığın yükselmesiyle

birlikte 800 °C'ye kadar oluşmaya devam etmekte olduğu, RY numunelerinde ise 500 °C'den itibaren oluştuğu belirlenmiştir.

Çizelge 7.6 incelendiğinde, RA numunesinin 22.01 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 307.55°C'de 2.40 mg/dk ve yanma veriminin %86.08; RY400 numunesinin 21.85 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 445.69°C'de 1.54 mg/dk ve yanma veriminin %76.58; RY500 numunesinin 22.02 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 487.81°C'de 1.98 mg/dk ve yanma veriminin %59.67; RY600 numunesinin 21.88 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 393.54°C'de 1.78 mg/dk ve yanma veriminin %52.03; RY700 numunesinin 21.97 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 397.68°C'de 1.31 mg/dk ve yanma veriminin %46.25; RY800 numunesinin 22 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 380.33°C'de 1.41 mg/dk ve yanma veriminin %44.06 ve RY900 numunesinin 22.1 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 419.58°C'de 1.65 mg/dk ve yanma veriminin %44.58 olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 7.6 : RA ve RY numunelerinin yanma özellikleri.**

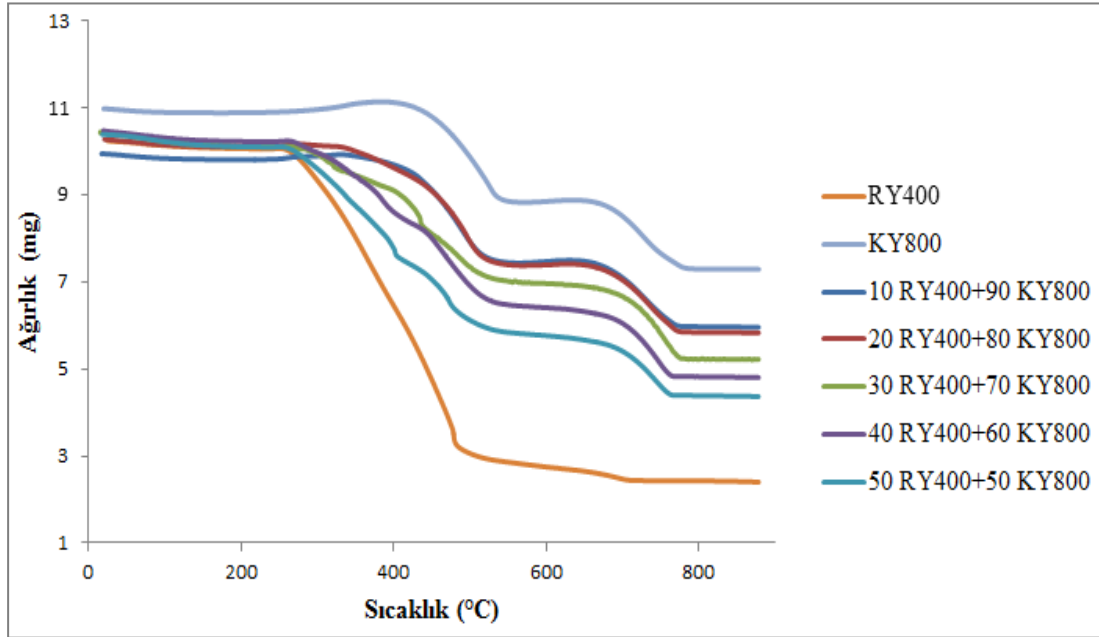
| Numune | T <sub>max</sub><br>(°C) | (dm/dt) <sub>max</sub><br>(mg/dk) | Yanma<br>Verimi | Yanma<br>süresi<br>(dk) | Tutuşma<br>sıcaklığı<br>(°C) |
|--------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|
| RA     | 307                      | 2.40                              | 86.08           | 22.01                   | 218                          |
| RY400  | 445                      | 1.54                              | 76.58           | 21.85                   | 225                          |
| RY500  | 487                      | 1.98                              | 59.67           | 22.02                   | 207                          |
| RY600  | 393                      | 1.78                              | 52.03           | 21.88                   | 247                          |
| RY700  | 397                      | 1.31                              | 46.24           | 21.97                   | 245                          |
| RY800  | 380                      | 1.41                              | 44.06           | 22                      | 232                          |
| RY900  | 419                      | 1.65                              | 44.58           | 22.1                    | 288                          |

#### 7.4.3 Karışımların termal analiz sonuçları

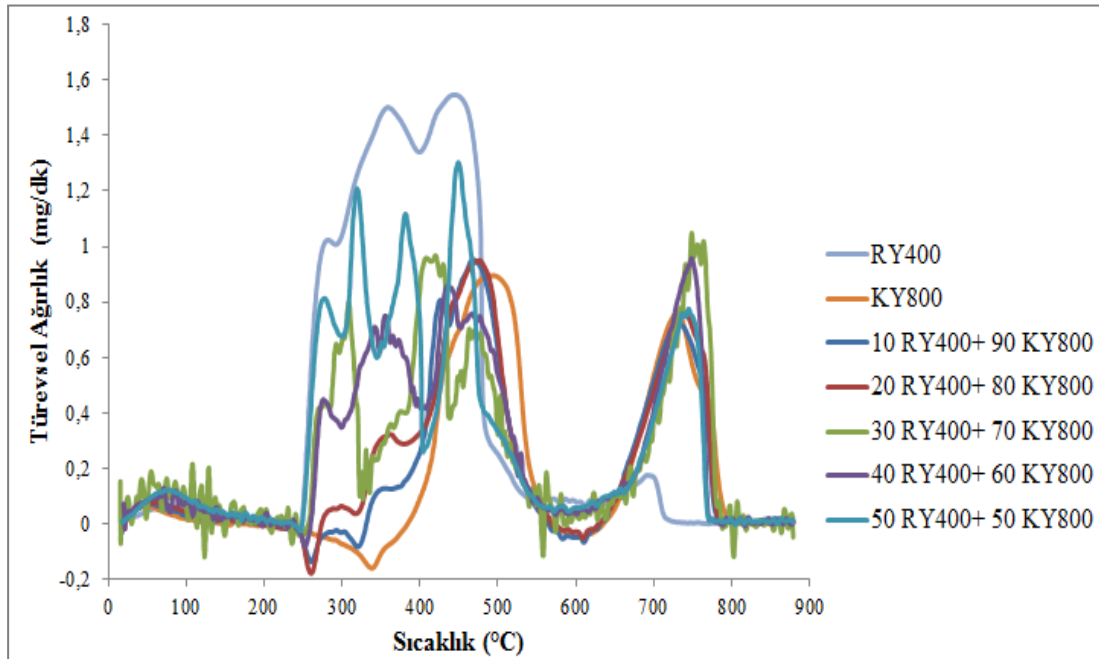
Karışımların kuru hava atmosferinde yanmasına ait TG, DTG, DTA ve DSC eğrileri Şekil 7.9, Şekil 7.10, Şekil 7.11, Şekil 7.12'de, bu eğrilerden belirlenen yanma özellikleri Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Karışımların yanması sonucu elde edilen TG eğrileri incelendiğinde, kömürün ve yarıkoklarının iki farklı ağırlık kayıp bölgesine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, ağırlık kaybının en fazla RA ve en az KA numunesinde gerçekleştiği ve RY400 numunesinin karışıma katılma oranı arttıkça ağırlık kaybının arttığı görülmektedir.

Bu durumun RDF'nin yüksek uçucu madde içeriğine sahip olmasından kaynakladığı düşünülmektedir.



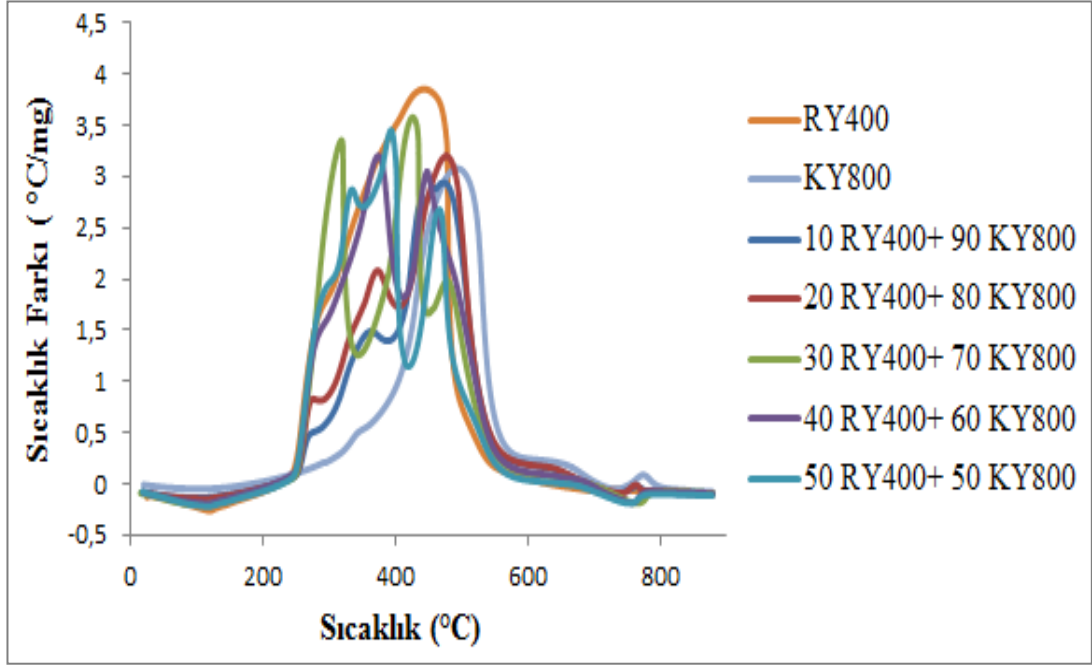
Şekil 7.9 : Karışımların TG eğrileri.



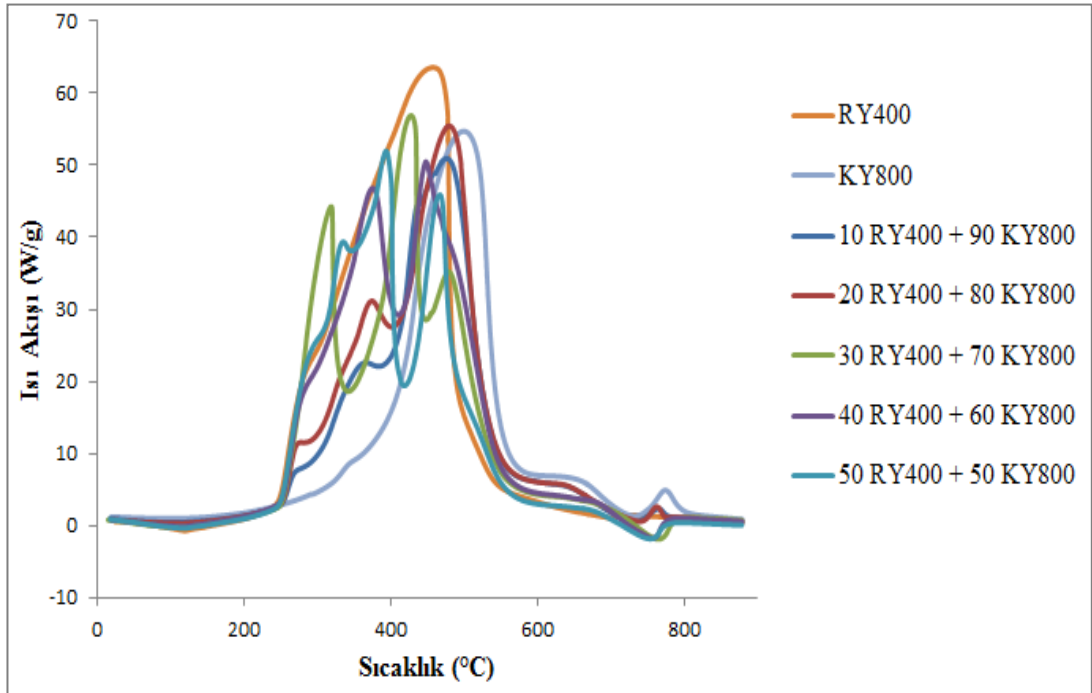
Şekil 7.10 : Karışımların DTG eğrileri.

Karışımların yanması sonucu elde edilen DTG eğrileri incelendiğinde, RY400 numunesinin karışıma katılmasıyla, selülozik ve plastik bileşenlerin bozunmasıyla KY800 numunesine ait olan eğride bozulmalar meydana getirdiği ve katılma oranı arttıkça RY400 numunesine benzeme eğiliminde olduğu görülmüştür.

Bu durum, karışımlardaki RY400 numunesinin KY800 numunesi üzerinde katkı etkisi yaptığını doğrulamaktadır.



Şekil 7.11 : Karışımların DTA eğrileri.



Şekil 7.12 : Karışımların DSC eğrileri.

Karışımların yanması sonucu elde edilen DTA ve DSC eğrileri birbirleriyle uyum göstermektedir. DTG eğrilerine benzer şekilde karışımlarda eğrilerde bozulmalar

meydana geldiği ve katılma oranı arttıkça RY400 numunesine benzeme eğiliminde olduğu görülmüştür.

Karışımlara ait DSC eğrileri incelendiğinde ısı değeri en yüksek olan 50 RY400+50 KY800 numunesinin DSC eğrisinin altında kalan alanın en yüksek olduğu, diğerlerine oranla daha geniş bir pikin elde edildiği ve  $T_{max}$  değerinin diğerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Karışımlarda RY400 içeriğinin artmasıyla birlikte aromatik yapıları gösteren piklerin şiddetinin düştüğü belirlenmiştir. 50 RY400+50 KY800 numunesine ait FTIR piklerinde görüldüğü gibi aromatik yapıların olmadığı düz zincir parafinik C-H yapılarının olduğu ve ısı değerinin en yüksek değerde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, RY400 numunesinin KY800 numunesine ilave edilmesinin aromatik yapılarda azalmaya neden olduğu ve yanmayı kolaylaştırdığı belirlenmiştir.

**Çizelge 7.7 : Karışımların yanma özellikleri.**

| Numune            | $T_{max}$<br>(°C) | $(dm/dt)_{max}$<br>(mg/dk) | Yanma<br>Verimi | Yanma<br>süresi<br>(dk) | Tutuşma<br>sıcaklığı<br>(°C) |
|-------------------|-------------------|----------------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|
| 10 RY400+90 KY800 | 468               | 0.95                       | 40.06           | 21.9                    | 221                          |
| 20 RY400+80 KY800 | 476               | 0.94                       | 43.27           | 21.95                   | 220                          |
| 30 RY400+70 KY800 | 748               | 1.04                       | 50              | 22.1                    | 228                          |
| 40 RY400+60 KY800 | 748               | 0.95                       | 54.14           | 21.99                   | 218                          |
| 50 RY400+50 KY800 | 449               | 1.30                       | 57.95           | 22.03                   | 229                          |

Çizelge 7.7 incelendiğinde, 10 RY400+90 KY800 numunesinin 21.9 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 468°C’de 0.95 mg/dk ve yanma veriminin %40.06; 20 RY400+80 KY800 numunesinin 21.95 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 476°C’de 0.94 mg/dk ve yanma veriminin %43.27; 30 RY400+70 KY800 numunesinin 22.1 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 748°C’de 1.04 mg/dk ve yanma veriminin %50; 40 RY400+60 KY800 numunesinin 21.99 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 748°C’de 0.95 mg/dk ve yanma veriminin %54.14; 50 RY400+50 KY800 numunesinin 22.03 dakika süren yanma süresince en yüksek yanma hızının 449°C’de 1.3 mg/dk ve yanma veriminin %57.95 olduğu belirlenmiştir.

## 7.5 FTIR Analizi Sonuçları

**Çizelge 7.8 :** FTIR dalga numarası aralıkları ve fonksiyonel grupları (Topsak, 2011).

| <b>Dalga Numarası Aralıkları (cm<sup>-1</sup>)</b> | <b>Fonksiyonel Gruplar</b>                                                       |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1705                                               | unconjugated ketone or carbonyl stretching                                       |
| 1638                                               | Carbonyl stretching conjugated with aromatic rings                               |
| 1606, 1513, 1426                                   | Aromatic skeleton vibrations                                                     |
| 1466                                               | C–H deformations ve aromatic ring vibrations                                     |
| 1135, 1042                                         | aromatic CH in-plane deformation for syringyl type ve guaiacyl type respectively |
| 843                                                | Aromatic C–H out of bending                                                      |
| 1645                                               | associated with absorbed water                                                   |
| 1125 - 1000                                        | typical of xylans                                                                |
| 1042                                               | C–O, C–C stretching or C–OH bending                                              |
| 838                                                | small b ve for $\alpha$ -linkage                                                 |
| 903                                                | sharp b ve for $\beta$ -linkage                                                  |
| 1168                                               | C–O–C vibrations in the anomeric region                                          |
| 3600–2800                                          | stretching vibrations of C-H ve O-H                                              |
| 1200–950                                           | C–O stretching region                                                            |
| 950–700                                            | Anomeric region                                                                  |
| 903                                                | typical for $\beta$ anomers                                                      |
| 1645                                               | In the carbonyl stretching region, the signal relates to the residual water      |
| 3400                                               | OH groups in lignins                                                             |
| 3000–2800                                          | C H stretch in the methyl ve methylene groups                                    |
| 1720                                               | carbonyl stretching vibration                                                    |
| 1600, 1500                                         | aromatic skeletal vibration                                                      |
| 1300 -1000                                         | various vibrations modes such as C-O, C-H ve C=O.                                |
| 620                                                | sulphonic groups (S-O stretching vibration)                                      |
| 1600                                               | skeletal vibrations of fused-ring aromatic structures                            |
| 1700 -1850                                         | different types of carbonyl carbons                                              |
| 1772, 1840                                         | five-membered ring cyclic anhydrides                                             |
| 1750                                               | five- or six-membered ring lactones                                              |
| 1717                                               | carboxylic acid groups                                                           |
| 1600                                               | C=O stretching conjugated to the aromatic ring                                   |
| 1508                                               | Aromatic ring vibrations                                                         |
| 1459                                               | C–H deformations, asymmetric in –CH <sub>3</sub> ve –CH <sub>2</sub> –           |
| 1420                                               | Aromatic ring vibrations combined with C–H in plane deformation                  |
| 1329                                               | Syringyl ring breathing with C–O stretching                                      |
| 1270                                               | Guaiacyl ring breathing with C–O stretching                                      |
| 1220                                               | C–C plus C–O plus C =O stretching                                                |
| 1140                                               | C–H in plane deformations of guaiacyl units                                      |
| 1125                                               | C–H in plane deformations of syringyl units                                      |
| 1031                                               | Aromatic C–H deformation plus C =O stretching                                    |

**Çizelge 7.8 (devam):** FTIR dalga numarası aralıkları ve fonksiyonel grupları (Topsak, 2011).

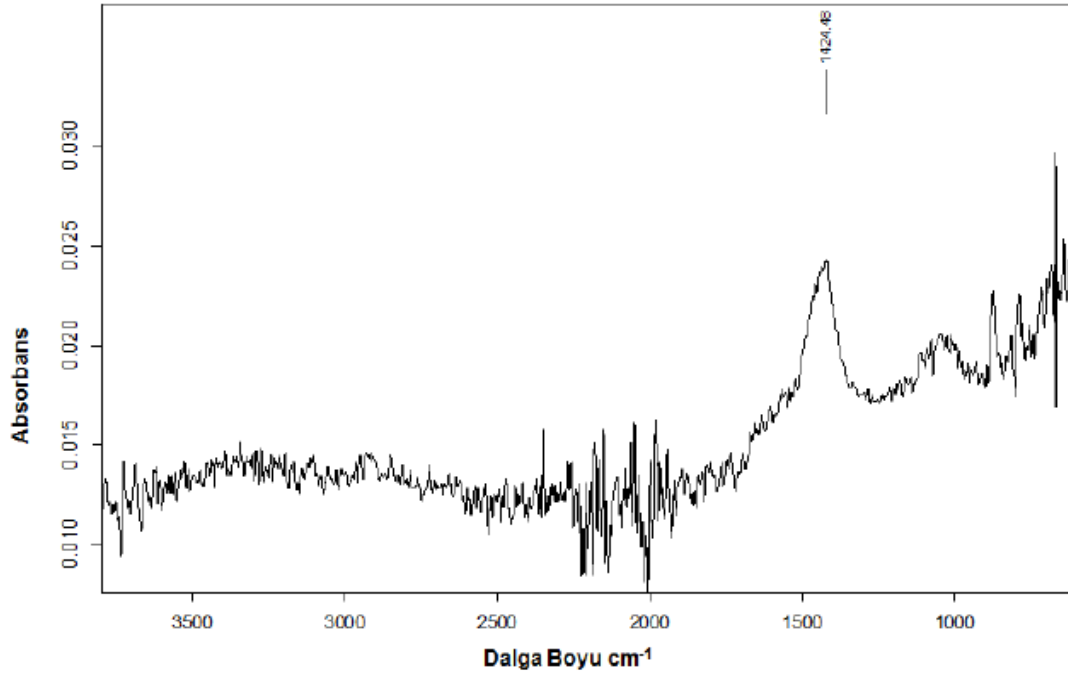
|                                 |                                                                      |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 834                             | C-H vibrations of syringyl units                                     |
| 3450-3350                       | O-H stretching of various functional groups                          |
| 1538, 1342                      | nitration of the char structures                                     |
| 1500, 1600                      | C C aromatic skeletal vibration, the sulfonic acid groups            |
| 3420                            | O-H stretching in lignin                                             |
| 2960                            | C-H stretching in lignin                                             |
| 1590                            | C =C aromatic skeletal vibration                                     |
| 1510                            | C-C ring skeletal vibration in lignin                                |
| 1460                            | C-H vibration in lignin                                              |
| 1420                            | C-O stretching in lignin                                             |
| 1270                            | C-O stretching in $Mg^{2+}$ , $Ca^{2+}$                              |
| 1192                            | C-O stretching                                                       |
| 1182                            | C-O stretching in lignin                                             |
| 1127                            | C-O stretching in $Na^+$ – ve $Mg^{2+}$                              |
| 1050                            | C-O stretching in lignin                                             |
| 1260-1270                       | guaiacyl groups in the lignin                                        |
| 1330-1375                       | syringyl groups in the lignin                                        |
| 1700 -1715                      | carbonyl group                                                       |
| 1660-1675                       | C=O bond conjugation with the aromatic rings                         |
| 2937                            | C-H vibration of aliphatic carbon                                    |
| 3408                            | O-H stretching in methyl groups                                      |
| 1000-1400                       | C-O, C-H                                                             |
| 1230-1210                       | aromatic phenyl C-O                                                  |
| 1300-1400                       | Bending vibration of the alcoholic ve phenolic hydroxyl (-OH) groups |
| 1613, 1513, 1300-1000           | relevant bonds on the aromatic ring                                  |
| 1310-1365, 1093-1088, 2750-2990 | alkyl groups                                                         |
| 1645-1750                       | O-H Bending                                                          |
| 3823-3870                       | O-H Stretching                                                       |
| 3020-3190                       | C-H Stretching                                                       |
| 2990-3010                       | C-H Stretching                                                       |
| 2020-2220                       | C-O Stretching                                                       |
| 2210-2390                       | C=O Stretching                                                       |
| 645-690                         | C=O Stretching                                                       |
| 974-1058                        | C-O Stretching                                                       |
| 1300-1400                       | O-H Bending                                                          |
| 3500-3600                       | O-H Stretching                                                       |
| 2904-2979                       | C-H Stretching                                                       |
| 1613                            | C=C Stretching                                                       |
| 1300-1000                       | C-O Stretching                                                       |
| 2750-2990                       | C-H2 Unsymmetric                                                     |
| 1093-1188                       | C-C Skeleton                                                         |
| 1310-1365                       | C-CH3 Bending                                                        |
| 1513                            | C=C-OH Stretching                                                    |
| 2918, 2850                      | C- H stretching in aliphatic moieties                                |

**Çizelge 7.8 (devam):** FTIR dalga numarası aralıkları ve fonksiyonel grupları (Topsak, 2011).

|                              |                                                                                    |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1700–1710                    | C= O stretching of carboxylic acids.                                               |
| 1702                         | carbonyl streching                                                                 |
| 1655                         | C=O stretching in aryl ketones                                                     |
| 1605 ve 1513                 | aromatic stretching                                                                |
| 1459                         | C-H bending in methly ve methylenic groups                                         |
| 1424                         | aromatic vibration coupled with C-H bending in plane                               |
| 1330                         | C-H bending in stringyl ve guiacyl rings substituted on C-5                        |
| 1220                         | C-C, C-O, ve C=O streching                                                         |
| 1123                         | C-H bending in stringyl units ve C-O streching in secondary alcohols               |
| 1030                         | C-H bending in planein guacyl units ve C-O stretching in primary alcohols          |
| 840                          | aromatic C-H bending out of plane                                                  |
| 3600–3000 (s)                | OH stretching of Acid, methanol                                                    |
| 2860–2970 (m)                | C–Hn stretching Alkyl, aliphatic, aromatic                                         |
| 1700–1730 (m), 1510–1560 (m) | C=O stretching Ketone ve Carbonyl                                                  |
| 1632 (m)                     | C=C stretching Benzene ring                                                        |
| 1613 (w), 1450 (w)           | C=C stretching Aromatic skeletal mode                                              |
| 1470–1430 (s)                | O–CH <sub>3</sub> Methoxyl–O–CH <sub>3</sub>                                       |
| 1440–1400 (s)                | OH bending Acid                                                                    |
| 1402 (m)                     | CH bending                                                                         |
| 1232 (s)                     | C–O–C stretching Aryl-alkyl ether linkage                                          |
| 1215 (s)                     | C–O stretching Phenol                                                              |
| 1170 (s), 1082 (s)           | C–O–C stretching vibration ring skeletal                                           |
| 1108 (m)                     | OH association C–OH                                                                |
| 1060 (w)                     | C–O stretching and C–O                                                             |
| deformation                  | C–OH (ethanol)                                                                     |
| 700–900 (m)                  | C–H Aromatic hydrogen                                                              |
| 700–400 (w)                  | C–C stretching                                                                     |
| 3370–3420 cm                 | –OH stretching vibration                                                           |
| 2935–2915                    | CH <sub>2</sub> and CH <sub>3</sub> asymmetric and symmetric stretching vibrations |
| 1742–1620                    | Stretching mode of carbonyls mainly ketones and esters                             |
| 3300-3600                    | O-H stretching, hydroxyl                                                           |
| 2800-3300                    | C-H stretching,aliphatic,olefinic,aromatic structures                              |
| 1650-1770                    | C=O stretching, carbonyl                                                           |
| 1600-1700                    | C=C stretching,olefinic structures                                                 |
| 1500-1650                    | C=C stretching,aromatic structures                                                 |
| 1420-1480                    | C-H bending,aliphatic structures                                                   |
| 1360-1430                    | O-H&C-H bending,hydroxyk,acid,phenol,olefines,methyl                               |
| 1200-1300                    | C-O stretching, unsaturated ethers                                                 |
| 1000-1200                    | C-H bending out of plane,aromatic structures                                       |

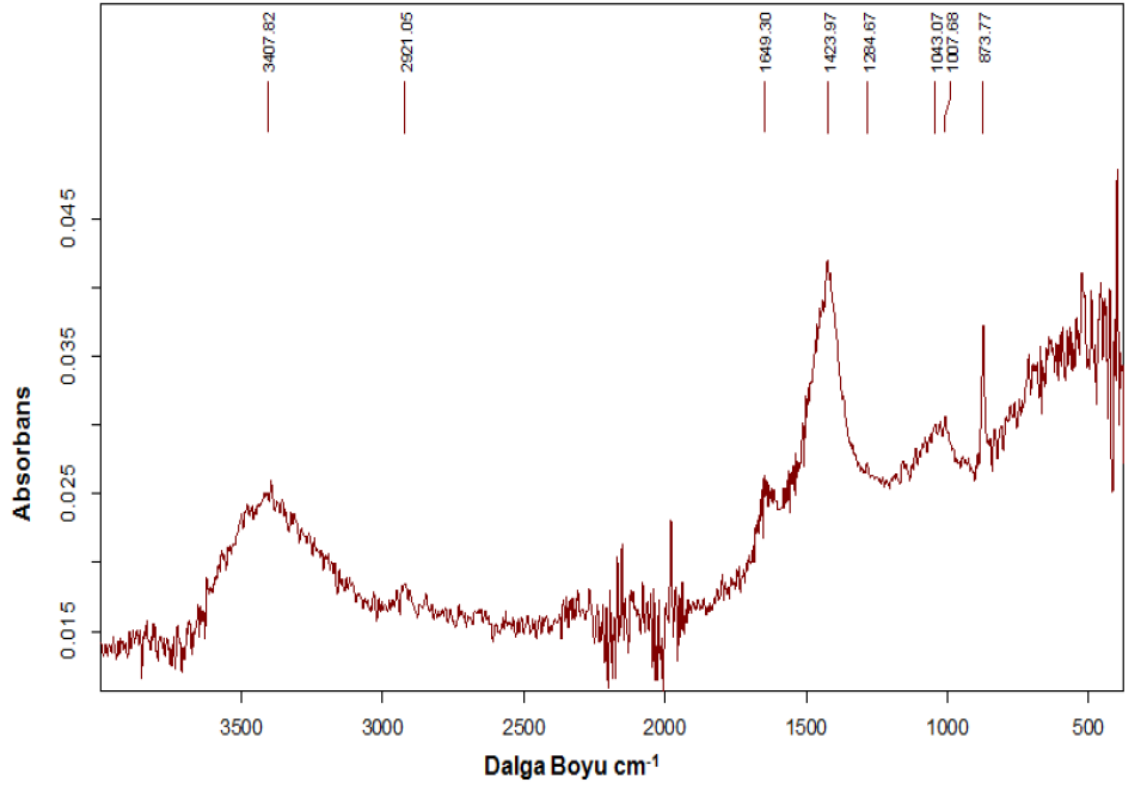
### 7.5.1 KA ve KY numunelerinin FTIR analizi sonuçları

KA numunesinin FTIR analizi sonucu Şekil 7.13'te gösterilmiştir. FTIR spektrumunda en şiddetli pikin  $1424.48\text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda olduğu görülmektedir. Bu pikin metil ve metilen gruplarına ait olduğu görülmektedir.



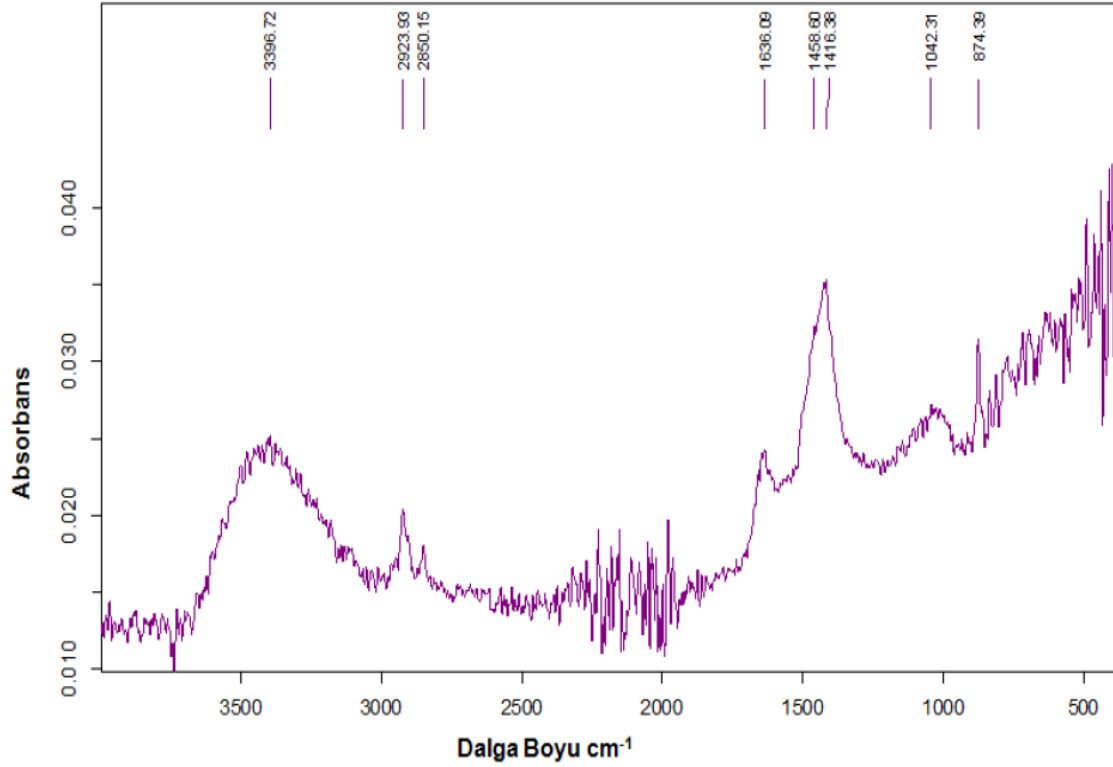
Şekil 7.13 : KA numunesinin FTIR spektrumu.

KY400 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde,  $3407.82\text{ cm}^{-1}$ 'de O-H gerilmeleri sonucu meydana gelen geniş bir bant olmak üzere  $2921.05$ ,  $1649.30$ ,  $1423.97$ ,  $1284.67$ ,  $1043.07$ ,  $1007.68$  ve  $873.77\text{ cm}^{-1}$ 'de diğer piklere rastlanmaktadır.  $2921.05\text{ cm}^{-1}$ 'de pik metil ve metilen gruplarına ait C-H gerilmesini göstermektedir.  $1649.30\text{ cm}^{-1}$  olefinik yapıların C=C titreşim absorpsiyonunu göstermektedir.  $1423.97\text{ cm}^{-1}$  C-H ve  $1284.67\text{ cm}^{-1}$  ise C-O gerilmelerine aittir.  $1043.07\text{ cm}^{-1}$  eter yapısındaki C-O bağlarını göstermektedir.  $873.7\text{ cm}^{-1}$ 'de ise C-H düzlem dışı eğilmesi görülür ve aromatik yapıları ifade etmektedir.



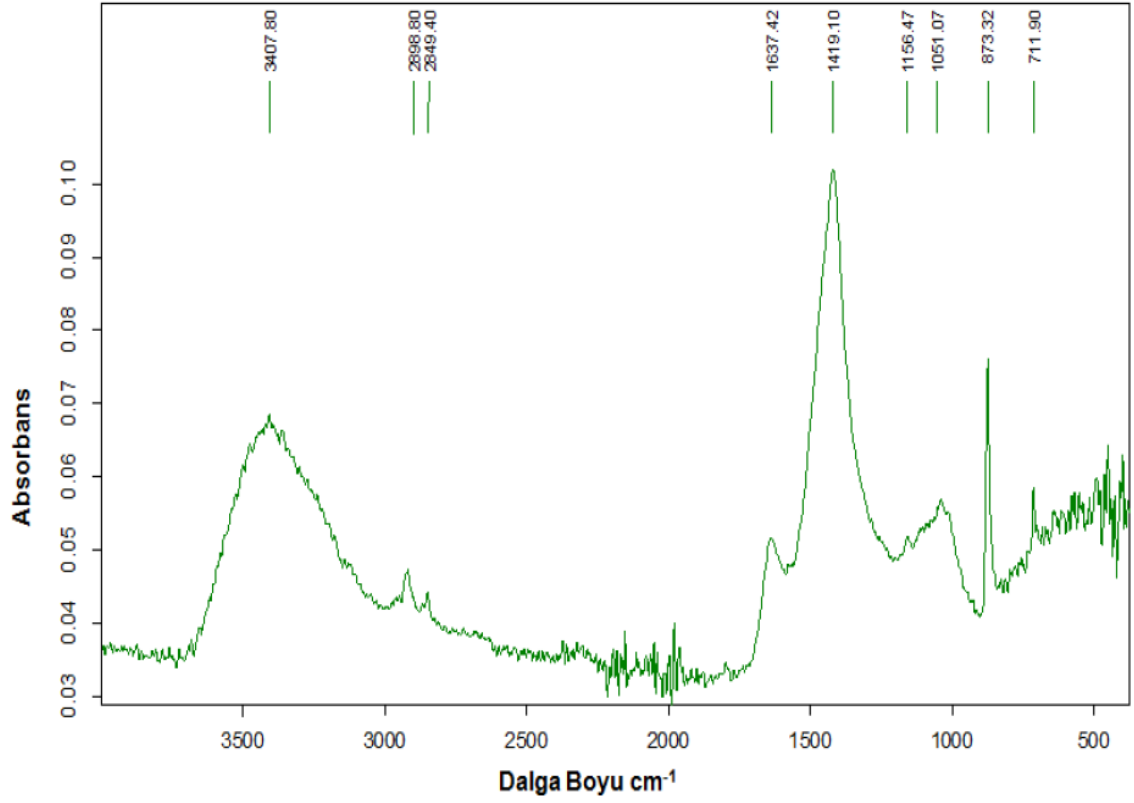
**Şekil 7.14 :** KY400 numunesinin FTIR spektrumu.

KY500 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 3396.72'de geniş bir pik ve 2923.93, 2850.15, 1636.09, 1458.60, 1416.38, 1042.31, 874.39 cm<sup>-1</sup>'de olmak üzere diğer piklere sahiptir. 3396.72 bandı O-H bağları gerilmelerini ifade etmektedir. 2923.93, 2850.15 cm<sup>-1</sup> pikleri metil ve metilen gruplarına ait C-H gerilmelerinden dolayı ortaya çıkmıştır. 1636.09 C=C gerilmelerini, 1458.60 ve 1416.388 C-H gerilmelerini, 1042.31 cm<sup>-1</sup> ise C-O gerilmelerini temsil etmektedir. 74.39 cm<sup>-1</sup>'de ise aromatik yapıları göstermektedir.



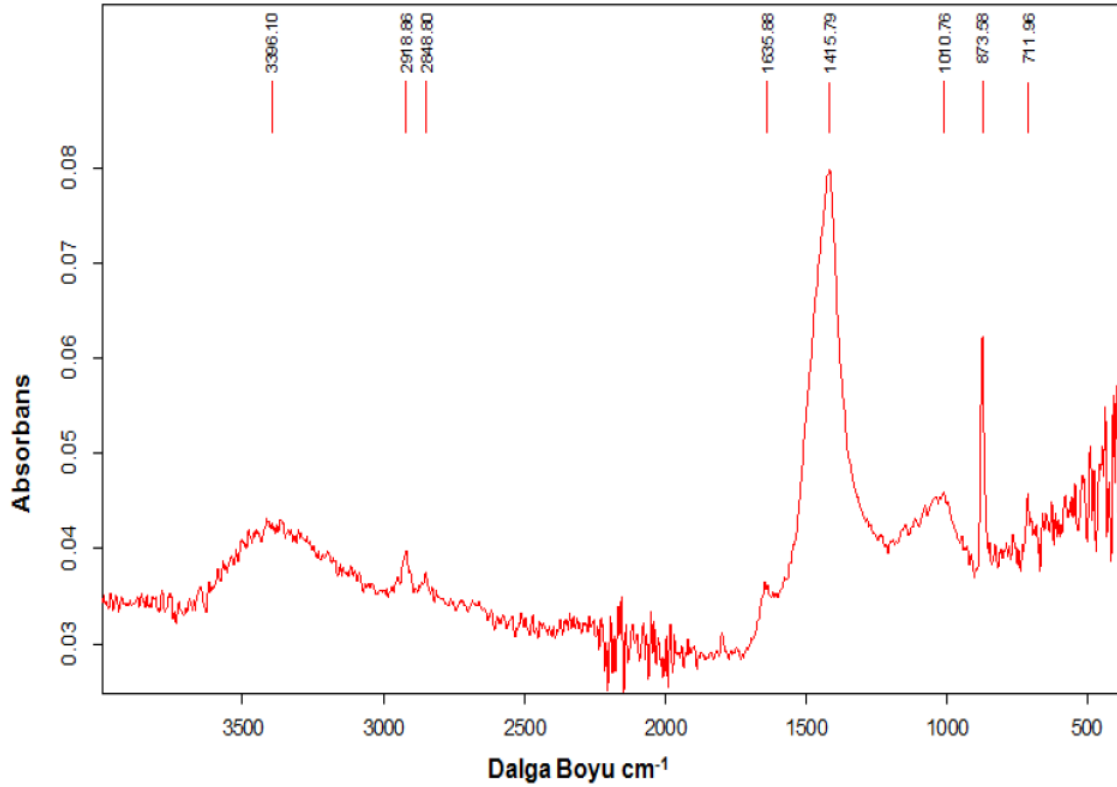
**Şekil 7.15 :** KY500 numunesinin FTIR spektrumu.

KY600 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 3407.80, 2898.80, 2849.40, 1637.42, 1419.10, 1156.47, 1051.07, 873.32 ve 711.90 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda pikler görülmüştür. 3407.80 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki pik O-H bağları gerilmeleri bulunmuştur. 2898.80, 2849.40 cm<sup>-1</sup>'de C-H gerilmeleri görülmüştür. 1637.42 cm<sup>-1</sup>'de C=C titreşimine ait pikler ortaya çıkmıştır. 1419.10 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda C-H bağları, alifatik yapılara ait pikler görülmektedir. 1156.47 ve 1051.07 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda C-O gerilmelerini eter benzeri yapılar görülmektedir. Aromatik yapılar, düzlem dışı C-H gerilmeleri 873.32 ve 711.90 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda pik oluşturmuştur.



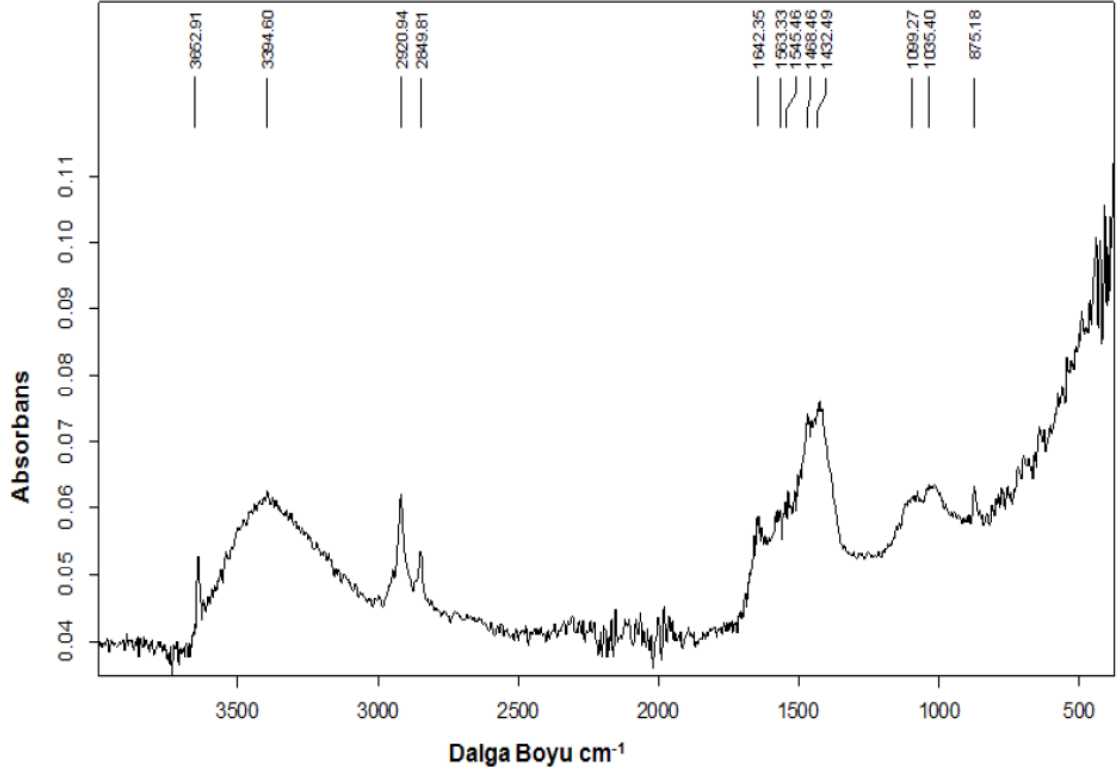
**Şekil 7.16 :** KY600 numunesinin FTIR spektrumu.

KY700 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 3396.10, 2918.86, 2848.80, 1635.88, 1415.79, 1010.76, 873.58, 711.96 cm<sup>-1</sup> dalga boylarında pikler ortaya çıkmıştır. 3396.10 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki pik O-H bağlarından dolayı ortaya çıkmıştır. 2918.86, 2848.80 cm<sup>-1</sup> pikleri C-H bağlarından dolayı ortaya çıkan metil ve metilen grubuna aittir. 1635.88 cm<sup>-1</sup>'de C=C gerilmeleri görülürken, 1415.79 cm<sup>-1</sup>'de C-H bağları bulunmaktadır. 1010.76 cm<sup>-1</sup> ise eter yapılarına C-O bağlarına aittir. 873.58, 711.96 cm<sup>-1</sup> pikleri aromatik yapılar varlığında ortaya çıkmıştır.



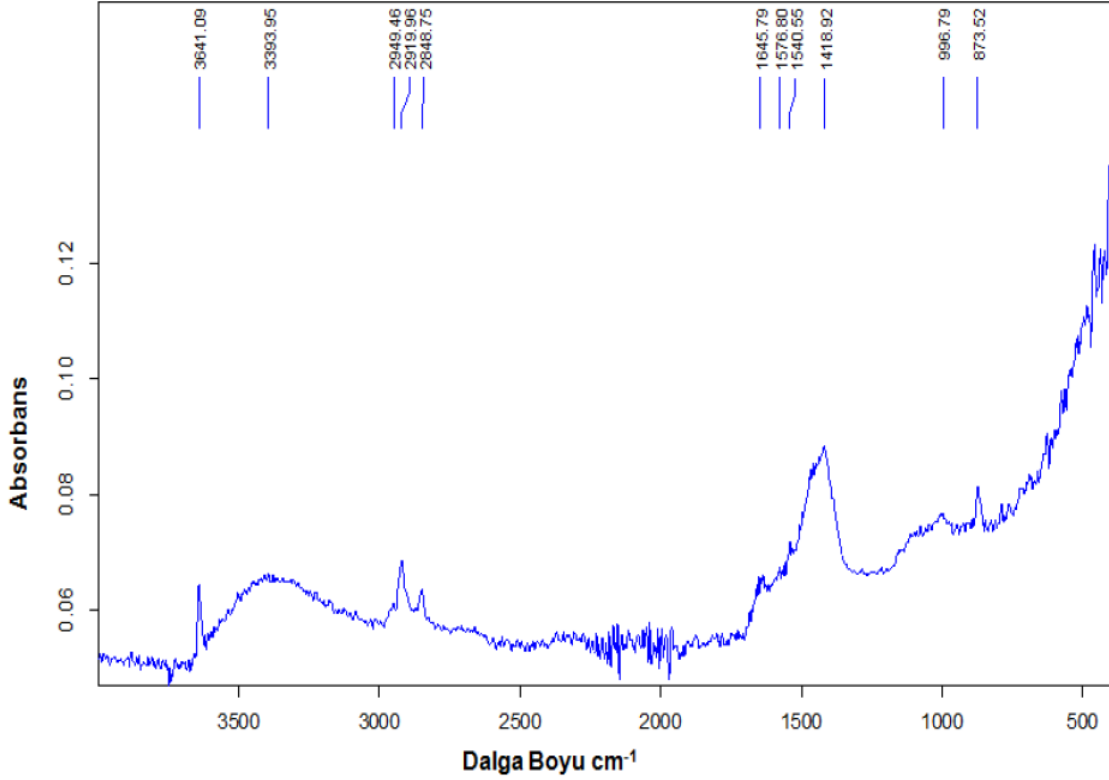
Şekil 7.17 : KY700 numunesinin FTIR spektrumu.

KY800 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, meydana gelen pikler 3652.91, 2920.94, 2849.81, 1642.35, 1563.33, 1545.46, 1432.49, 1099.27, 1035.40, 875.18 cm<sup>-1</sup> dalga boyundadır. 3800-3100 cm<sup>-1</sup> aralığında özellikle 3600-3700 cm<sup>-1</sup> aralığındaki pikler mineral yapıya ve sudaki O-H gruplarının absorsiyonuna bağlanabilir. 3394.60 cm<sup>-1</sup>'de geniş bant hidroksil grupların varlığını göstermektedir. 2920.94, 2849.81 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki pikler C-H bağlarından dolayı ortaya çıkmıştır. 1642.35, 1563.33, 1545.46 cm<sup>-1</sup> pikleri C=C bağlarına, aromatik yapılara aittir. 1432.49 C-H gerilmelerini ifade ederken, 1099.27, 1035.40 cm<sup>-1</sup> pikleri ise eter yapıları, C-O gerilmelerini göstermektedir. Son olarak 875.18 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki pik aromatik yapılara aittir.



**Şekil 7.18 :** KY800 numunesinin FTIR spektrumu.

KY900 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 3641.096, 3393.95, 2949.46, 2919.96, 2848.75, 1645.79, 1576.80, 1540.55, 1418.92, 996.79 ve 873.52  $\text{cm}^{-1}$  pikleri bulunmaktadır. 3641.096 ve 3393.85’de görülen geniş bant hidroksil gruplar bulunduğunu göstermektedir. 2949.46, 2919.96, 2848.75 pikleri metil ve metilen gruplarını göstermektedir. 1645.79  $\text{cm}^{-1}$ ’de C=O; 1576.80, 1540.55  $\text{cm}^{-1}$ ’de C=C bağlarına ait pikler bulunmaktadır. 1472.03, 1418.92 $\text{cm}^{-1}$ ’deki pikler C-H bağlarına aittir. 1113.39, 1002.78  $\text{cm}^{-1}$ ’de görülen pikler ise eter benzeri yapıları ifade etmektedir. 873.52  $\text{cm}^{-1}$  ise aromatik yapıları göstermektedir.

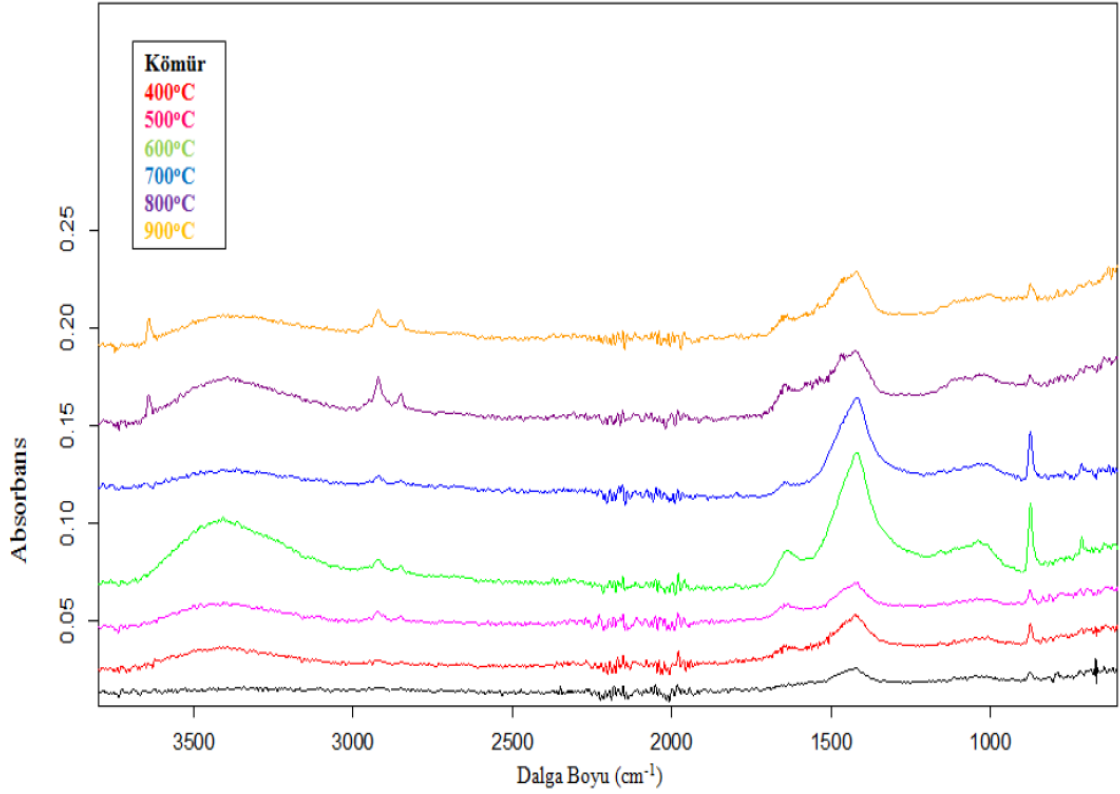


**Şekil 7.19 :** KY900 numunesinin FTIR spektrumu.

#### 7.5.1.1 KA ve KY numunelerinin FTIR sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.20’de KA ve KY numunelerine ait FTIR sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmiştir. KY500’de karbonizasyon gerçekleşene kadar metil ve metilen grupları görülmemektedir. Kömürün yapısındaki nemden dolayı hidroksil grupları ortaya çıkmıştır. Eter türevi fonksiyonel grupları belirten pikler KY500’e kadar düşük şiddetteyken KY600 ve KY700’de şiddetleri artmıştır. Fakat KY800 ve KY900’de eter grupları da bozunmaya başlamıştır.

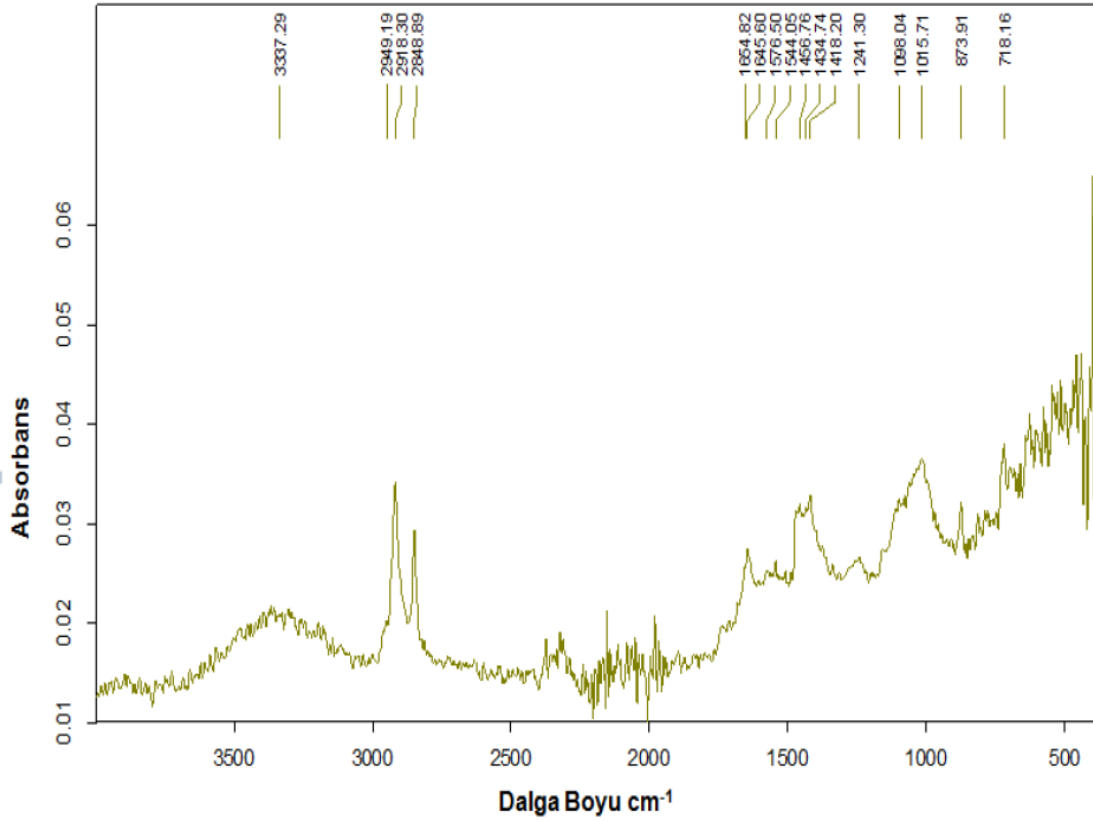
KY600 ve KY700’de yaklaşık 800 ve 1400  $\text{cm}^{-1}$  civarında aromatik C-H piklerinde artış olduğu ve KY800’den itibaren ise bu piklerin şiddetlerinin azaldığı yani aromatik yapıların bozulduğu görülmüştür. Ayrıca, KY800’den itibaren 2800  $\text{cm}^{-1}$  civarında alifatik C-H piklerinin şiddetinin de arttığı görülmüştür. Aromatik yani halkalı yapılardaki bağlar, alifatik yani düz zincirli yapılardaki bağlardan çok daha kuvvetlidir ve kırılması için yüksek sıcaklıklar gereklidir. KY800 ve KY900’de bulunan düz zincirli yapılar sayesinde verilen ısı, bağları koparmaya ve enerji açığa çıkarmaya yeterlidir. KY600 ve KY700 numunelerinin ısı değerlerinin KY800 ve KY900’e göre daha düşük olması, KY800’den itibaren aromatik yapıların bozunması ile ısı değerinin biraz düşmesi FTIR sonuçlarını da doğrulamaktadır.



**Şekil 7.20 : KA ve KY numunelerinin FTIR spektrumları.**

### 7.5.2 RA ve RY numunelerinin FTIR analizi sonuçları

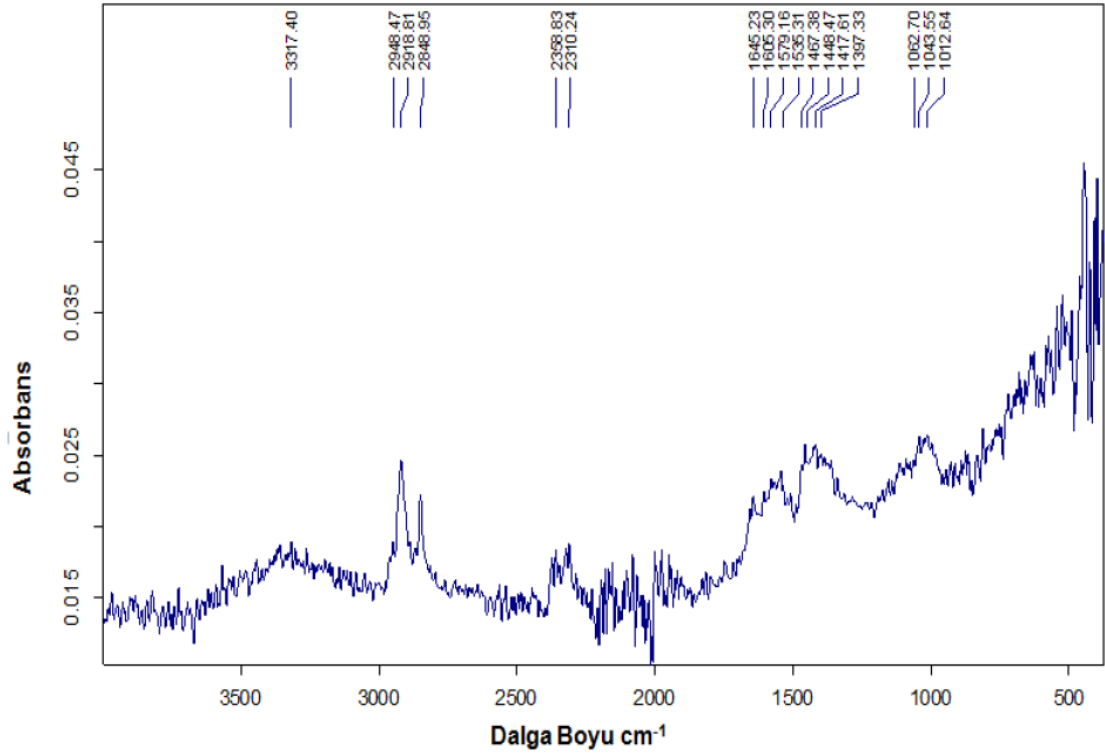
RA numunesinin FTIR analizi sonucu Şekil 7.21’de gösterilmiştir.  $3337.29\text{ cm}^{-1}$ ’de geniş bant ve  $2949.19$ ,  $2918.30$ ,  $2848.89$ ,  $1664.82$ ,  $1645.60$ ,  $1576.50$ ,  $1544.05$ ,  $1486.76$ ,  $1434.74$ ,  $1418.20$ ,  $1241.30$ ,  $1086.06$ ,  $1015.71$ ,  $873.91$  ve  $718.16\text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda pikler ortaya çıkmıştır. RDF numunesindeki fonksiyonel gruplar yorumlandığında; öncelikle  $3337.29\text{ cm}^{-1}$  bandı O-H bağları gerilmelerini göstermektedir. O-H bağları hidroksil grupları ifade etmektedir ve yapıdaki nemden kaynaklanmaktadır.  $2949.19$ ,  $2918.30$ ,  $2848.89\text{ cm}^{-1}$  pikleri C-H gerilmelerini, metil ve metilen gruplarını ifade etmektedir.  $1664.82$ ,  $1645.60$ ,  $1576.50$ ,  $1544.05\text{ cm}^{-1}$  dalga boyundaki orta şiddetli pikler aromatik yapıdaki C=C gerilmelerinden dolayı ortaya çıkmıştır.  $1486.76$ ,  $1434.74$ ,  $1418.20\text{ cm}^{-1}$  dalga boyundaki pikler C-H bağlarını, alifatik yapıları ifade etmektedir.  $1200\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$  arası selüloz bandıdır ve eter türevi yapılara aittir. RDF numunelerinin bu bölgede pikler görülmesinin sebebi kâğıt atıklardan kaynaklanan selülozdur.  $873.91\text{ cm}^{-1}$  aromatik yapılarda C-H eğilme titreşimlerini göstermektedir.  $718.16\text{ cm}^{-1}$ ’de ise alkol fenollerde O-H titreşimlerini göstermektedir.



**Şekil 7.21 : RA numunesinin FTIR spektrumu.**

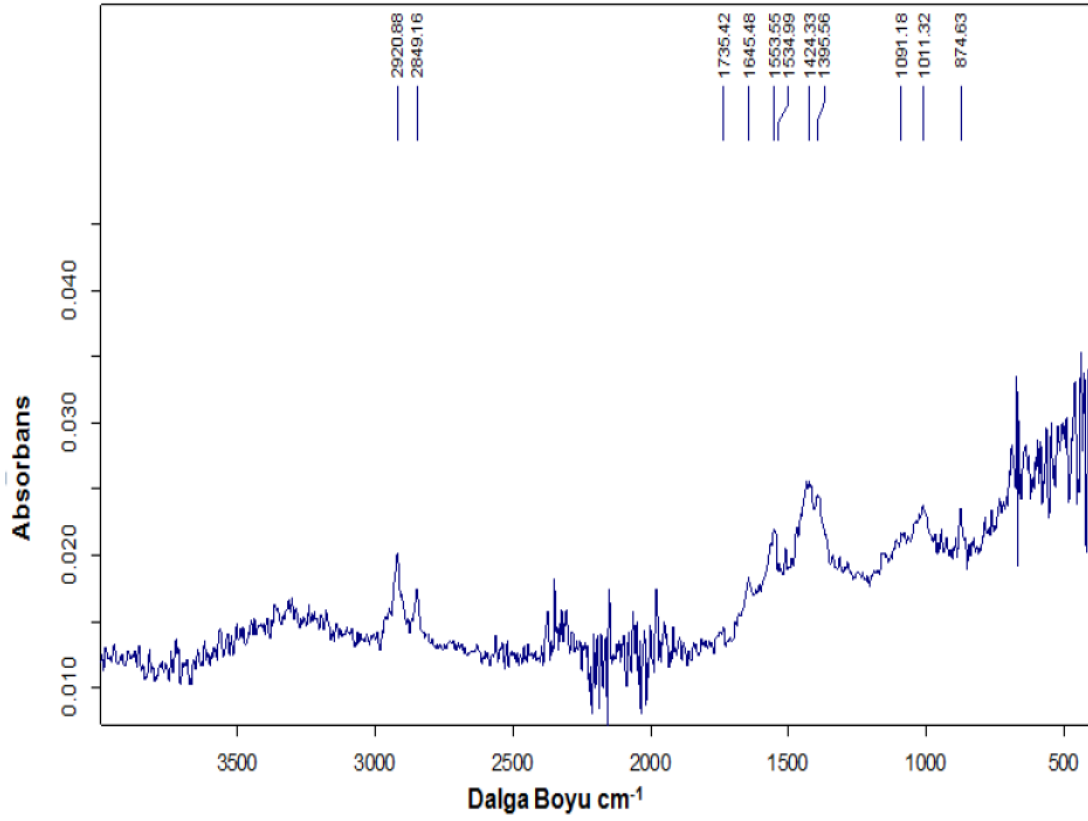
RY400 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 3317.40, 2948.47, 2918.81, 2848.95, 2358.83, 2301.24, 1645.23, 1605.30, 1579.16, 1536.31, 1467.38, 1448.47, 1417.61, 1397.33, 1062.70, 1043.55 ve 1012.64  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda piklere sahiptir. 3317.40  $\text{cm}^{-1}$  piki hidroksil grupları ifade etmektedir. 2948.47, 2918.81, 2848.95  $\text{cm}^{-1}$  pikleri C-H bağlarını göstermektedir. 2358.83, 2301.24  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki pikler C=O gerilmelerini göstermektedir. 1500-1650  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyu aralığındaki tüm pikler C=C bağlarını ve aromatik yapılarına aittir. 1467.38, 1448.47, 1417.61, 1397.33  $\text{cm}^{-1}$  pikleri C-H bağlarını göstermektedir. 1062.70, 1043.55 ve 1012.64  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda pikler ise C-O bağlarından dolayı görülmektedir.

FTIR serisinde görülen C-O (2360-2335  $\text{cm}^{-1}$ ), metanol (1032  $\text{cm}^{-1}$ ), asetilen yapılar RDF'nin selüloz ve lignin içerikli bileşimini ifade etmektedir. 1450-1600  $\text{cm}^{-1}$  arasında ortaya çıkan pikler plastik yapılardan kaynaklanmaktadır.



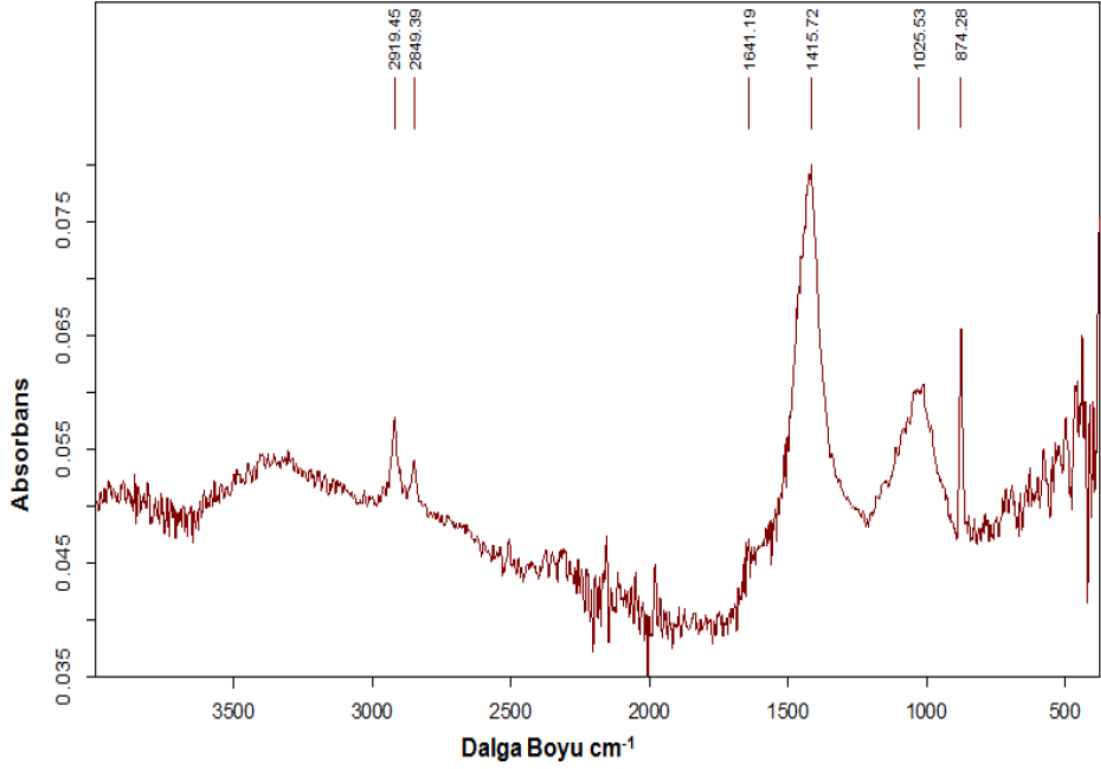
**Şekil 7.22 :** RY400 numunesinin FTIR spektrumu.

RY500 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 2920.88, 2849.16, 1735.42, 1645.48, 1553.55, 1534.99, 1424.33, 1395.56, 1091.18, 1011.32, 874.63 cm<sup>-1</sup> pikleri görülmüştür. 2920.88 ve 2849.16 cm<sup>-1</sup> dalga boylarına sahip pikler C-H bağlarını göstermektedir. 1645.48, 1553.55, 1534.99 cm<sup>-1</sup>'deki pikler C=C bağlarına ve aromatik yapılara aittir. 1424.33 cm<sup>-1</sup> piki C-H bağlarına aittir. 1091.18, 1011.32 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda pikler ise C-O bağlarını göstermektedir. 874.63 cm<sup>-1</sup>'de C-H düzlem dışı eğilmesi ile aromatik yapılar görülmektedir.



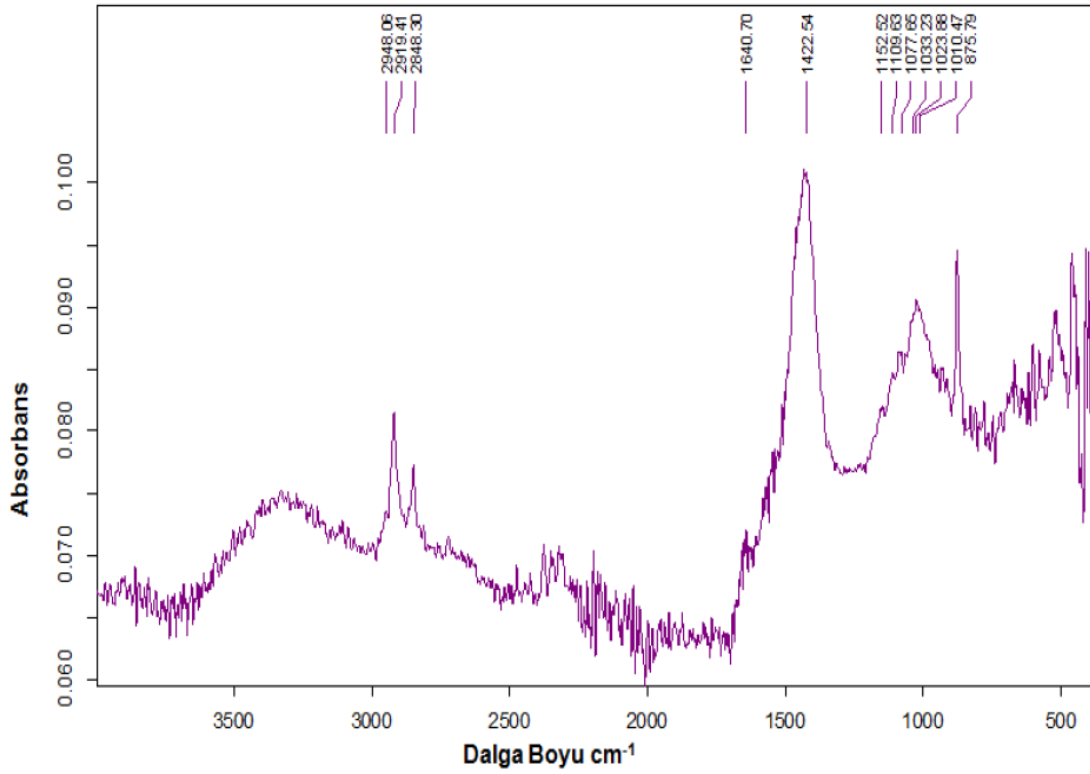
**Şekil 7.23 :** RY500 numunesinin FTIR spektrumu.

RY600 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 2919.45, 2849.39, 1641.19, 1415.72, 1025.53 ve 874.28 cm<sup>-1</sup> dalga boyuna sahip pikler görülmektedir. 2919.45, 2849.39 cm<sup>-1</sup> pikleri C-H gerilmelerine aittir. 1641.19 cm<sup>-1</sup>'deki pikte C=C gerilmeleri, 1415.72 cm<sup>-1</sup>'de C-H gerilmeleri, 1025.53 cm<sup>-1</sup>'de ise C-O bağları bulunmaktadır. 874.28 cm<sup>-1</sup>'de ise aromatik yapılara ait C-H düzlem dışı eğilmesi görülmektedir.



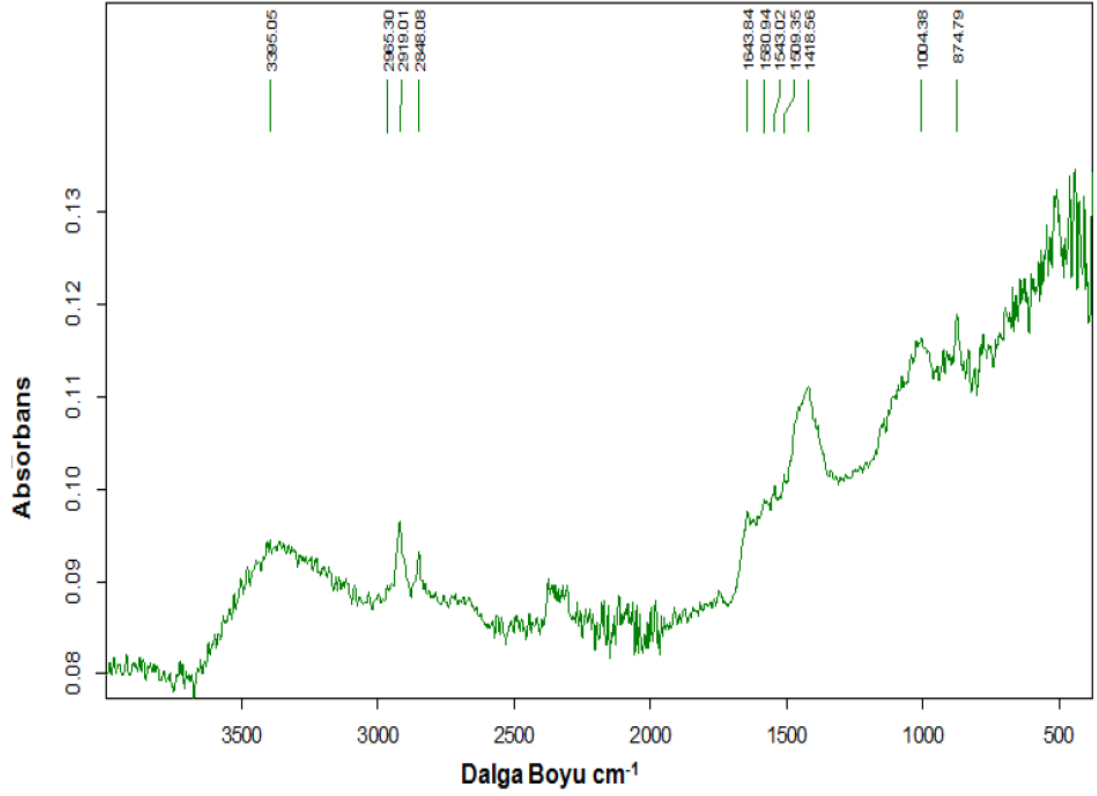
**Şekil 7.24 :** RY600 numunesinin FTIR spektrumu.

RY700 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 2948.06, 2919.41, 2848.30, 1640.70, 1422.54, 1152.52, 1109.63, 1077.66, 1033.23, 1023.88, 1010.47 ve 875.79 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda pikler görülmektedir. 2948.06, 2919.41, 2848.30 cm<sup>-1</sup> dalga boylarına sahip pikler C-H bağlarına aittir. 1640.70 cm<sup>-1</sup>'deki pikte C=C gerilmeleri, olefinik yapılar, 1422.54 cm<sup>-1</sup>'de ise C-H gerilmeleri, alifatik yapılar görülmektedir. 1000-1160 cm<sup>-1</sup> aralığındaki tüm pikler C-O bağlarını göstermektedir. 875.79 cm<sup>-1</sup>'de ise C-H düzlem dışı eğilmesi görülür ve aromatik yapıları ifade etmektedir.



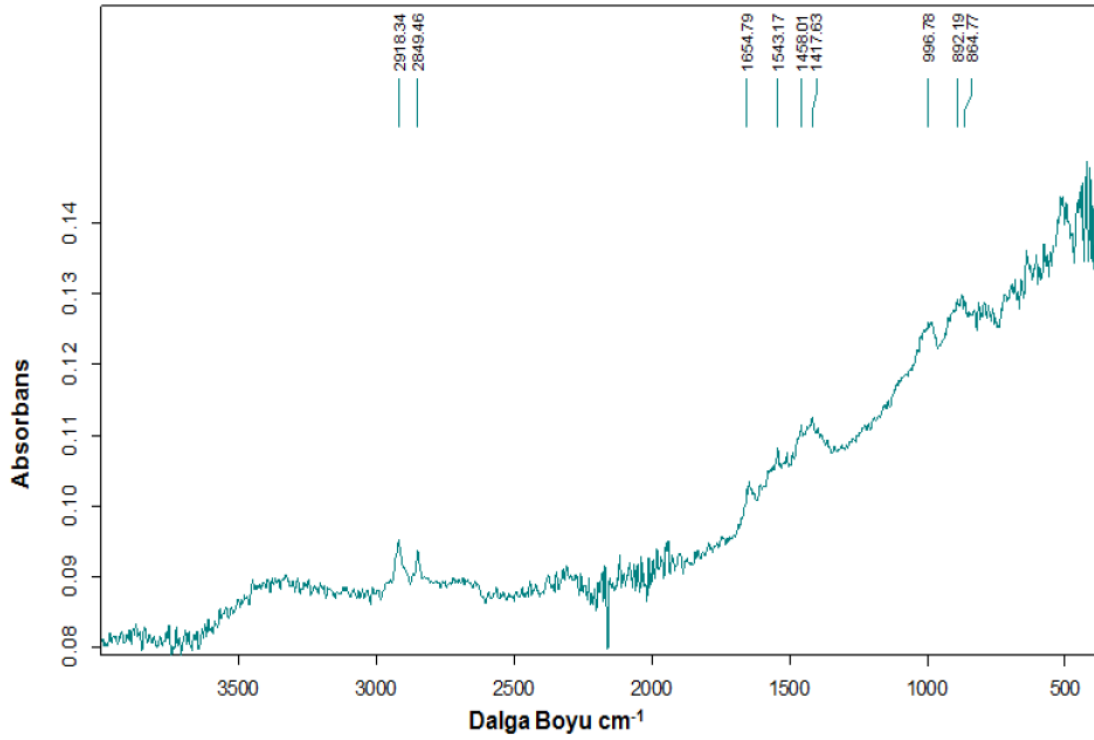
Şekil 7.25 : RY700 numunesinin FTIR spektrumu.

RY800 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, bir önceki spektrumlarda da görüldüğü gibi 3395.05 cm<sup>-1</sup> O-H bağlarına ait piktir. 2965.30, 2919.01, 2848.08 cm<sup>-1</sup> pikleri C-H gerilmelerini göstermektedir. 1634.84, 1580.94, 1543.02, 1509.35, 1418.56 cm<sup>-1</sup> pikleri ise C=C, C-O gerilmelerini ifade etmektedir.



**Şekil 7.26 :** RY800 numunesinin FTIR spektrumu.

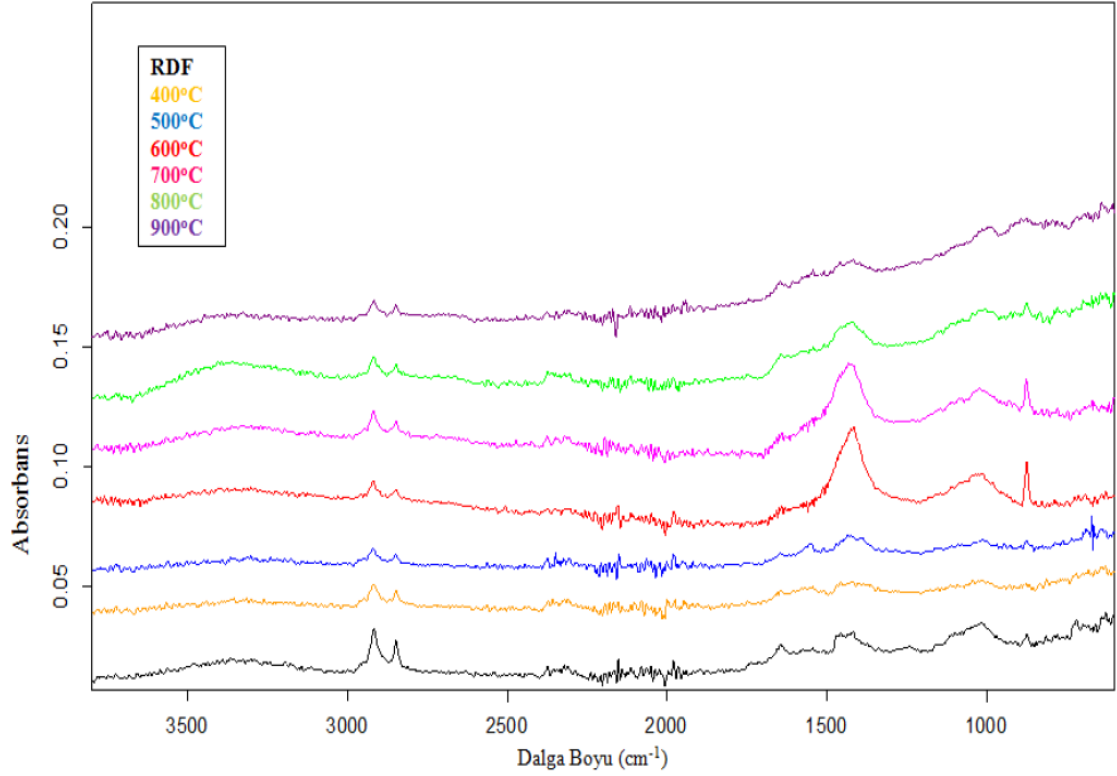
RY900 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 2918.34, 2849.46, 1654.79, 1543.17, 1458.01, 1417.63, 996.78, 892.19 ve 864.77 cm<sup>-1</sup> dalga boylarında pikler görülmüştür. 3300 civarında görülen O-H bağlarını ifade eden pik görülmemektedir. 2918.34, 2849.46 cm<sup>-1</sup> pikleri C-H gerilmelerini, alifatik, olefinik, aromatik yapıları göstermektedir. 1654.79, 1543.17 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki pik aromatik yapılardaki C=C gerilmelerini gösterir. 1458.01, 1417.63 cm<sup>-1</sup> dalga boyuna sahip pikler C-H bağlarını, alifatik yapıları göstermektedir. 996.78 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki pik de C-O bağlarını göstermektedir. 892.19 ve 864.77 cm<sup>-1</sup> ise aromatik yapılara aittir.



Şekil 7.27 : RY900 numunesinin FTIR spektrumu.

#### 7.5.2.1 RA ve RY numunelerinin FTIR sonuçlarının karşılaştırılması

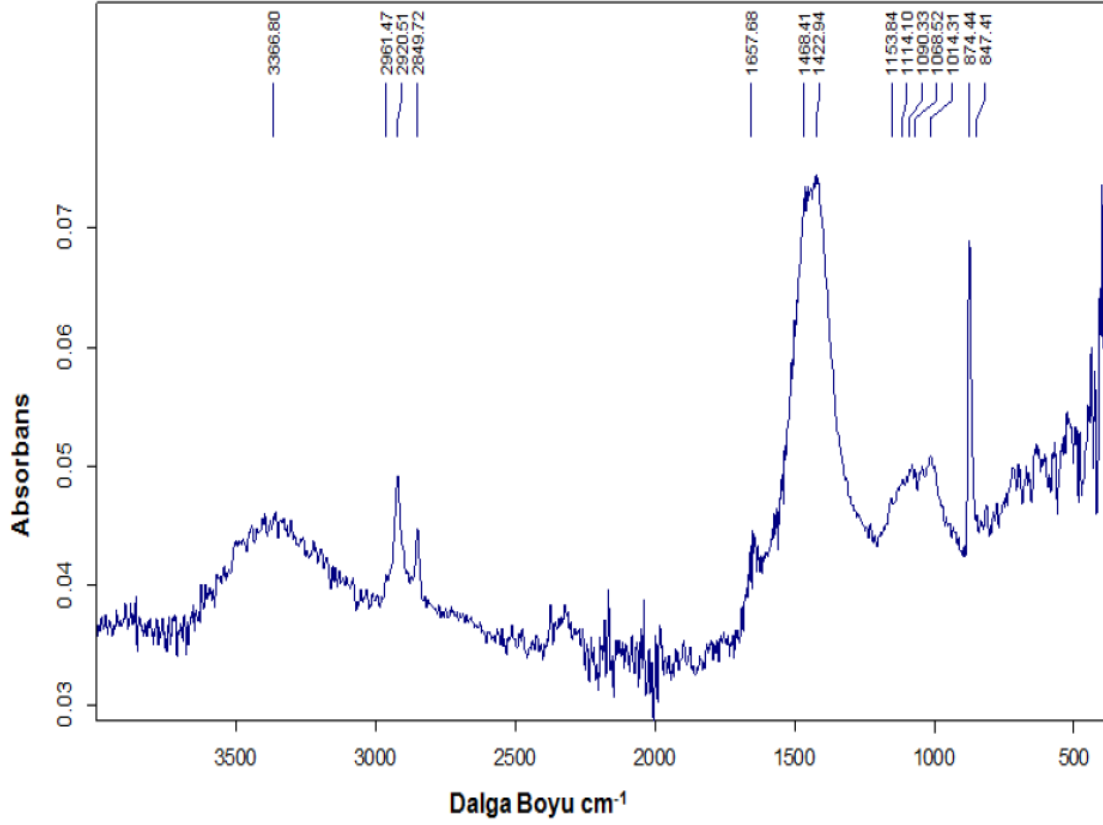
RA ve RY numunelerinin pikleri Şekil 7.28’de belirtilmiştir. Selülozik yapıları belirten  $1000\text{ cm}^{-1}$  civarındaki C-O bağlarına ait pik şiddeti RY400’de düşmüştür. Çünkü, yaklaşık bu sıcaklıkta selüloz bozunmaya uğramakta ve böylece ısı değerinde artma olması beklenmektedir. Isıl değer sonuçlarında RY400 numunesinin en yüksek ısı değere sahip olması FTIR sonuçlarını doğrulamaktadır.  $1450\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  arasında ortaya çıkan pikler aromatik C-H bağlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, RY400 numunesinde plastik uçucu bileşenlerinin uzaklaşmasıyla C-H bağlarını ifade eden pik şiddetinde azalma gözlenmiştir fakat daha yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça C-H bağları tekrar oluşarak aromatik yapıları oluşturmuştur. RY800’den sonra oluşan aromatik yapılar da bozunmaktadır. Böylece, FTIR sonuçlarının RY400’den sonra ısı değerinde düşme olmasını ve RY800’den sonra ısı değerinin biraz artmasını doğruladığı görülmektedir.



Şekil 7.28 : RA ve RY numunelerinin FTIR spektrumları.

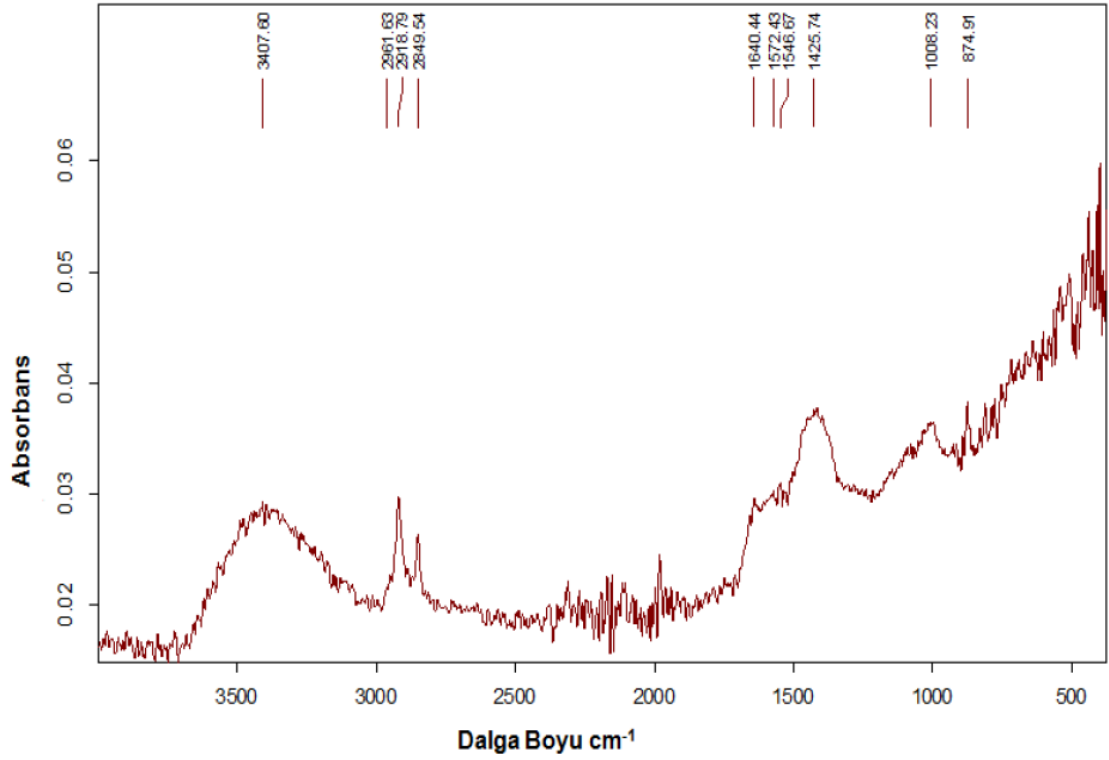
### 7.5.3 Karışımların FTIR analizi sonuçları

10 RY400+90 KY800 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde,  $3366.80\text{ cm}^{-1}$  bandı,  $2961.47$ ,  $2920.51$ ,  $2849.72$ ,  $1657.68$ ,  $1468.41$ ,  $1422.94$ ,  $1153.84$ ,  $1114.10$ ,  $1090.33$ ,  $1068.52$ ,  $1014.31$ ,  $874.44$  ve  $847.41\text{ cm}^{-1}$  pikleri görülmektedir.  $3366.80\text{ cm}^{-1}$  bandı hidroksil gruplarını ifade etmektedir.  $2961.47$ ,  $2920.51$ ,  $2849.72\text{ cm}^{-1}$  metil ve metilen gruplarına ait piklerdir.  $1657.68\text{ cm}^{-1}$  C=O titreşimlerini gösterirken,  $1468.41$ ,  $1422.94\text{ cm}^{-1}$  pikleri C-H bağlarını göstermektedir.  $1153.84$ ,  $1114.10$ ,  $1090.33$ ,  $1068.52$ ,  $1014.31\text{ cm}^{-1}$  pikleri C-O gerilmeleri sonucu ortaya çıkmıştır.  $874.44$  ve  $847.41\text{ cm}^{-1}$  pikler aromatik yapılara aittir.



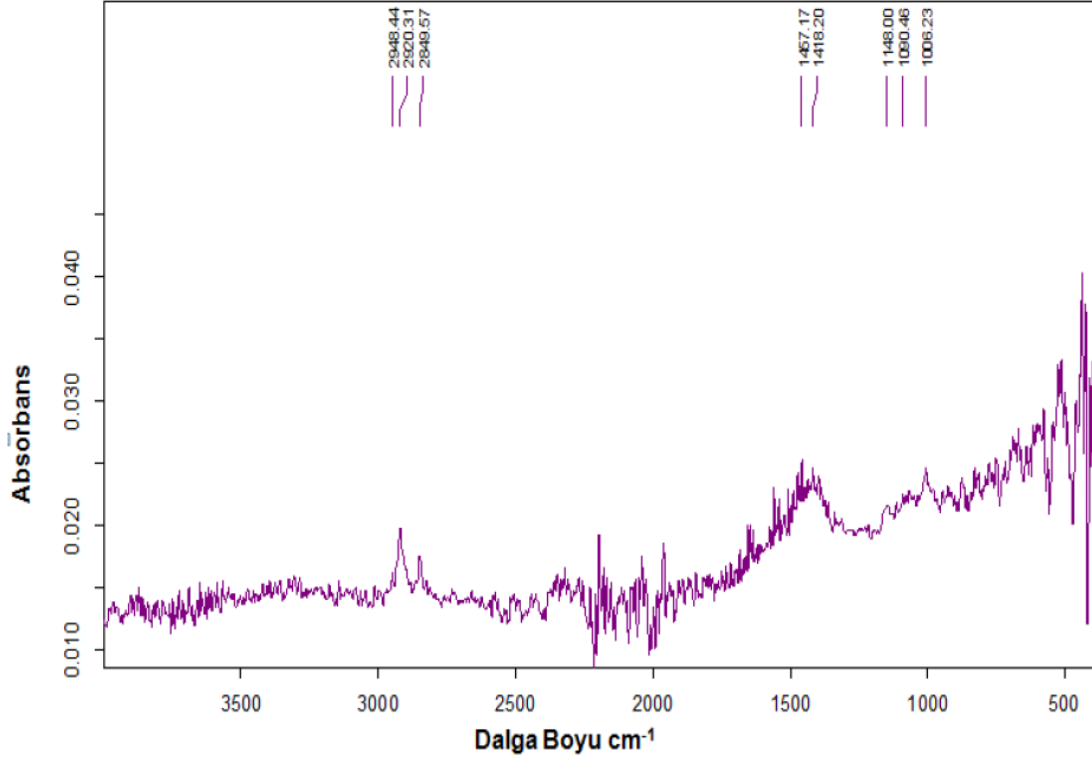
**Şekil 7.29 :** 10 RY400+90 KY800 numunesinin FTIR spektrumu.

20 RY400+80 KY800 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 3407.60  $\text{cm}^{-1}$  bandı hidroksil grupları göstermektedir. 2920.31, 2849.57  $\text{cm}^{-1}$  pikleri metil ve metilen grupları varlığında ortaya çıkmıştır. 1640.44, 1572.43, 1546.67  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki pikler C=C titreşimlerinden dolayı ortaya çıkmıştır. 1425.74  $\text{cm}^{-1}$  piki C-H gerilmelerinden kaynaklanmaktadır. 1008.23  $\text{cm}^{-1}$  piki C-O gerilmeleri eter yapısını ifade etmektedir. 874.91  $\text{cm}^{-1}$  piki aromatik gruplara aittir.



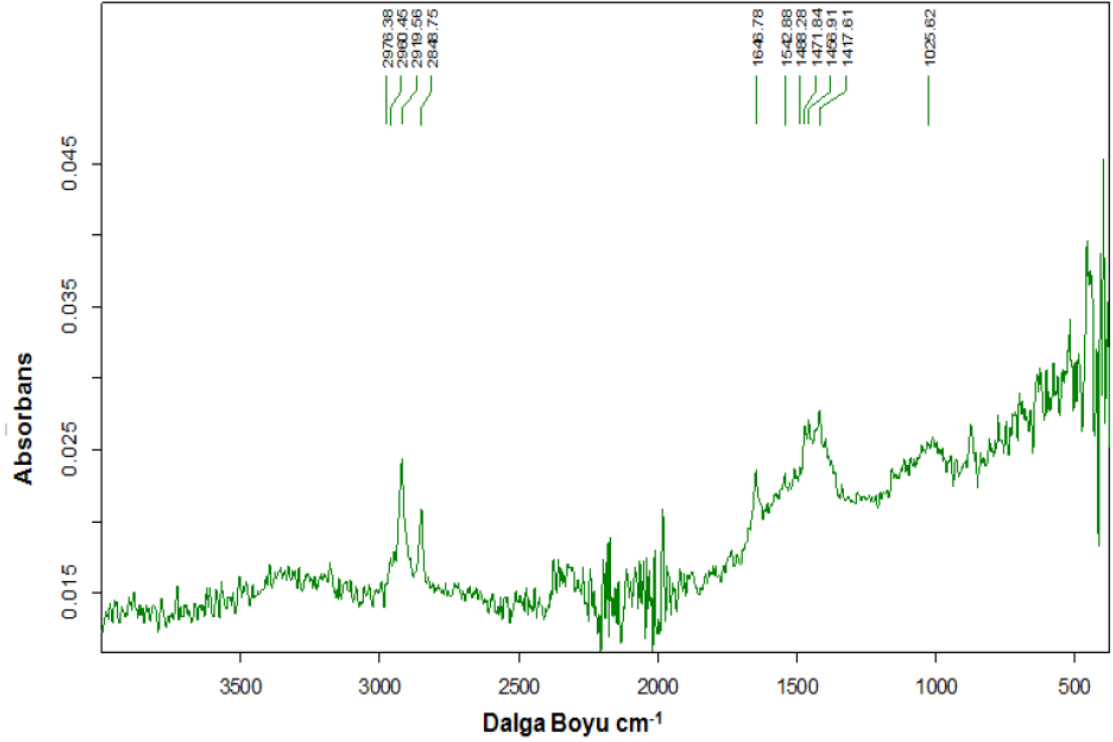
**Şekil 7.30 :** 20 RY400+80 KY80 numunesinin FTIR spektrumu.

30 RY400+70 KY80 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 2948.44, 2920.31, 2849.57 cm<sup>-1</sup> dalga boyundaki pikler metilen gruplarını ifade eden C-H gerilmelerini göstermektedir. 1457.17, 1418.20 cm<sup>-1</sup> pikleri C-H gerilmelerini göstermektedir. 1092.46, 1006.23 cm<sup>-1</sup> pikleri ise C-O gerilmelerine ait eter yapılarını ifade etmektedir.



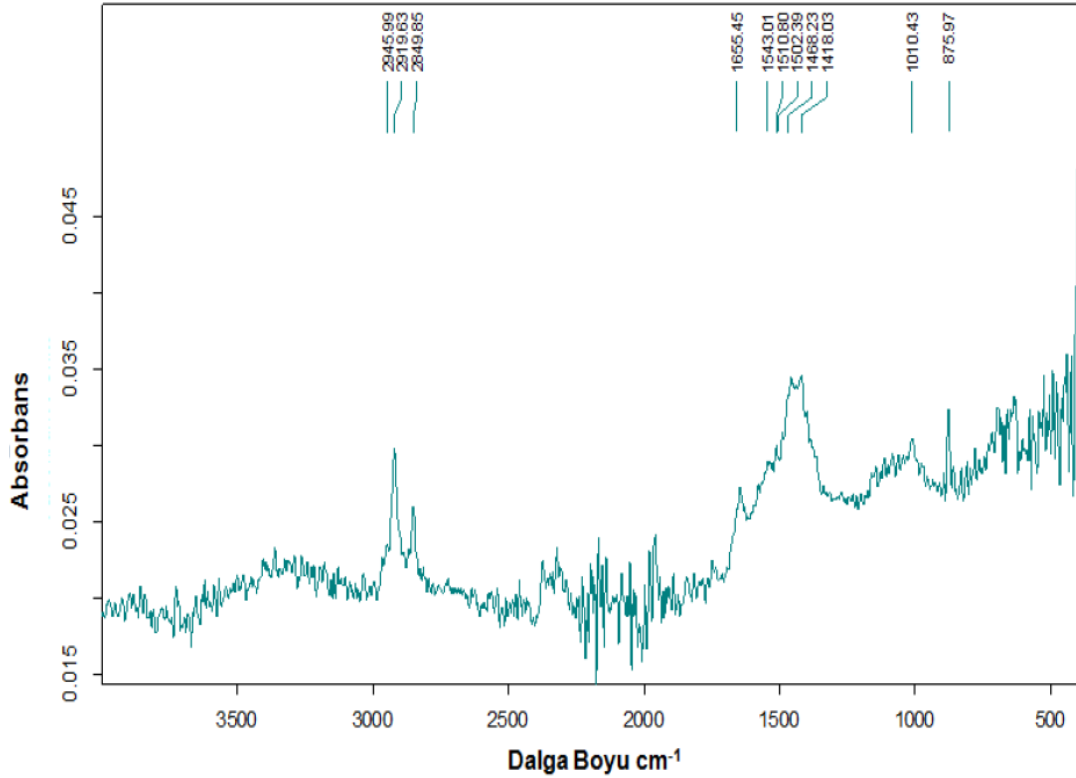
**Şekil 7.31 :** 30 RY400+70 KY800 numunesinin FTIR spektrumu.

40 RY400+60 KY800 numunesine içeren numuneye ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 2976.38, 2960.45, 2919.56, 2848.75  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki pikler metil ve metilen gruplarını göstermektedir. 1646.78, 1542.88  $\text{cm}^{-1}$  pikleri C=C bağlarına aittir. 1488.28, 1471.84, 1456.91, 1417.61  $\text{cm}^{-1}$  C-H bağlarını, alifatik grupları göstermektedir. 1025.62  $\text{cm}^{-1}$  dalga boylarında pik ise C-O gerilmeleri sonucu oluşmuştur.



**Şekil 7.32 :** 40 RY400+60 KY800 numunesinin FTIR spektrumu.

50RY400+50KY800 numunesine ait FTIR spektrumu incelendiğinde, 2945.99, 2919.63, 2849.85, 1655.45, 1543.01, 1510.80, 1502.39, 1466.23, 1418.03, 1010.43 ve 875.97  $\text{cm}^{-1}$  pikleri görülmüştür. 2945.99, 2919.63, 2849.85  $\text{cm}^{-1}$ 'de pikler C-H gerilmelerinden dolayı metil ve metilen grupları varlığında ortaya çıkmıştır. 1655.45  $\text{cm}^{-1}$  piki C=O gerilmelerine aittir karbonil gruplarını ifade etmektedir. 1543.01, 1510.80, 1502.39  $\text{cm}^{-1}$  C=C gerilmelerini göstermektedir. 1466.23, 1418.03  $\text{cm}^{-1}$  dalga boylarındaki pikler ise C-H gerilmeleri sonucunda oluşmuştur. Son olarak, 1010.43  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki pik C-O bağlı eter yapıları ifade ederken, 875.97  $\text{cm}^{-1}$  piki aromatik yapıları göstermektedir.

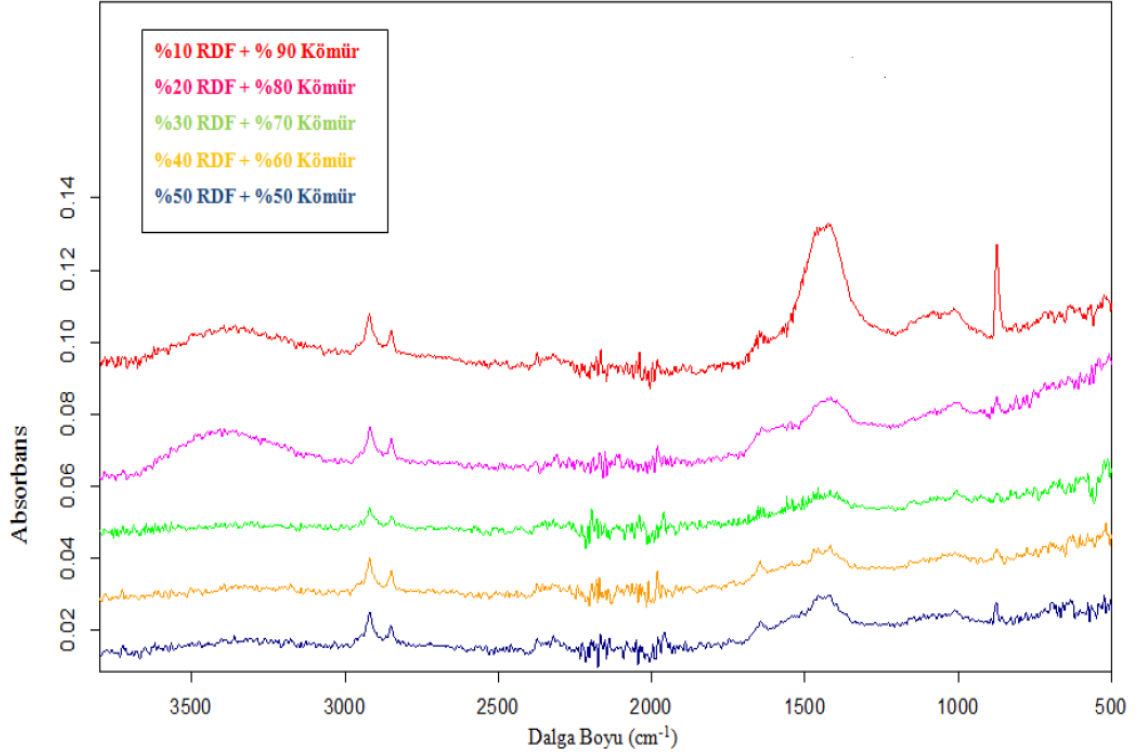


Şekil 7.33 : 50 RY400+50 KY800 numunesinin FTIR spektrumu.

#### 7.5.3.1 Karışımların FTIR sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7.34'te karışımların FTIR sonuçları verilmiştir. Karışımlardaki RDF içeriği arttıkça  $1400\text{ cm}^{-1}$  civarında görülen aromatik yapıları ifade eden C-H bağları kopmakta, pik küçülmektedir. Aromatik yani halkalı yapılardaki bağlar, alifatik yani düz zincirli yapılardaki bağlardan çok daha kuvvetlidir ve kırılması için yüksek enerji gereklidir. RDF içeriği arttıkça, ısı değerlerinin artması FTIR sonuçlarını doğrular niteliktedir.

Ayrıca, %10 ve % 20 RY400 içeren numuneler dışındakilerde  $3000\text{ cm}^{-1}$  dalga boyu civarında ortaya çıkan O-H bandı görülmemektedir. Bu sonuç, yapıdaki nemin çoğunlukla kömürden kaynaklandığını göstermektedir.



**Şekil 7.34 : Karışımların FTIR spektrumları.**

## 7.6 XRD Analizi Sonuçları

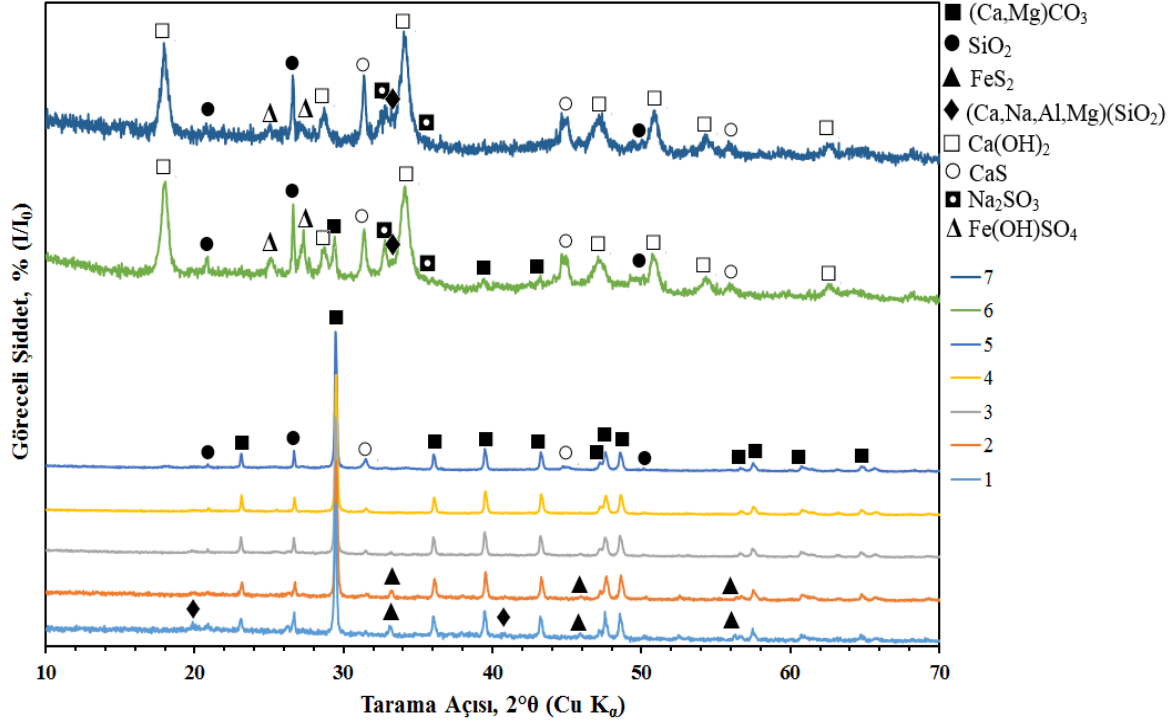
### 7.6.1 KA ve KY numunelerinin XRD analizi sonuçları

Şekil 7.35'te KA ve KY numunelerinin XRD analizi sonuçları verilmiştir. Şekil sırasıyla; KA, KY400, KY500, KY600, KY700, KY800 ve KY900 numunelerini göstermektedir.

KA numunesinin XRD analizi sonuçlarına bakıldığında, KA numunesinin en yüksek pikinin ( $\text{CaCO}_3$ ) kalsite ait olduğu görülmüştür. KA numunesinin diğer piklerine bakıldığında ise, ( $\text{SiO}_2$ ) kuvars, Ca, Na, Al, Mg ile bileşik halinde bulunan  $\text{SiO}_2$  ve CaS (kalsiyum sülfat),  $\text{FeS}_2$  (pirit) gibi maddelerin bulunduğu görülmüştür.

KY numunelerinin XRD analizi sonuçları incelendiğinde ise, KY700 numunesine kadar KA numunesindeki yapının çok fazla değişmediği ancak artan sıcaklıkla salınan kükürdün diğer elementler tarafından tutularak CaS (kalsiyum sülfat),  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  (sodyum sülfat),  $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$  (demir hidroksit sülfat) gibi yeni bileşikler oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca yapıda bulunan  $\text{CaCO}_3$ ,  $700^\circ\text{C}$  ve üzerinde bozunarak  $\text{CO}_2$  kaybına uğramaya başlar ve CaO olarak uçucu kül içerisinde kalır. XRD analizi sonrasında elde edilen sonuçlarda uçucu kül içerisinde CaO olması beklenirken,

$\text{CaCO}_3$  ve  $\text{Ca(OH)}_2$  ile karşılaşmıştır. Bunun nedeninin analiz için bekleyen numunelerin havadaki nem ve  $\text{CO}_2$  ile tekrar reaksiyona girmesi sonucu  $\text{Ca(OH)}_2$  ve  $\text{CaCO}_3$ 'a dönüştüğü olarak düşünülmektedir. Ayrıca kuvars, silisyumun en kararlı haldeki oksit minerali olduğundan her durumda en önemli mineral olarak kalmaya devam etmiştir.



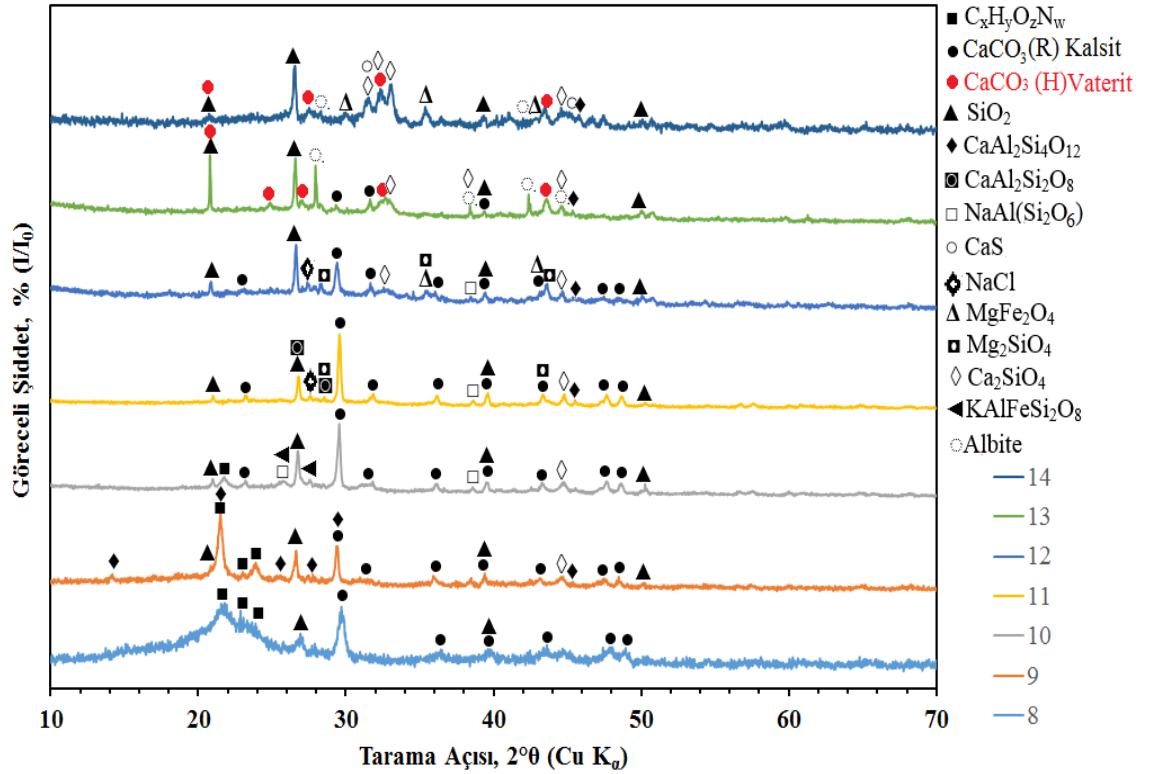
Şekil 7.35 : KA ve KY numunelerinin XRD analizleri.

#### 7.6.2 RA ve RY numunelerinin XRD analizi sonuçları

Şekil 7.36'da RA ve RY numunelerinin XRD analizi sonuçları verilmiştir. Şekil sırasıyla; RA, RY400, RY500, RY600, RY700, RY800 ve RY900 numunelerini göstermektedir.

RA numunesinin XRD analizi sonuçlarına bakıldığında, RA numunesinin en yüksek pikinin ( $\text{CaCO}_3$ ) kalsite ait olduğu görülmüştür. RA numunesinin diğer piklerine bakıldığında ise, ( $\text{SiO}_2$ ) kuvars ve  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{N}_w$  şeklinde ifade edilen organik bileşenler görülmüştür.  $\text{CaCO}_3$  içeriği, RDF'nin kötü kokusunu gidermek, yanması sırasında PVC'den kaynaklanan HCl emisyonunu azaltmak ve sülfürün yakalanmasını sağlamak için RDF üretim prosesinde eklenen  $\text{CaCO}_3$ 'tan kaynaklanmaktadır. Organik bileşenlerin ise, RDF'nin selülozik (selüloz, hemiselüloz ve lignin) ve plastik (LDPE, HDPE, PVC) içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

RY numunelerinin XRD analizi sonuçları incelendiğinde ise, RY400'den sonra selüloz ve plastik yapılarının yavaş yavaş bozunmaya başlayarak yapının çok fazla değişmediği ancak artan sıcaklıkla salınan kükürdün diğer elementler tarafından tutularak (CaS) kalsiyum sülfür, (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) sodyum sülfat, (Fe(OH)SO<sub>4</sub>) gibi bileşikler oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca yapıda bulunan (CaCO<sub>3</sub>) kalsit, 700°C ve üzerinde çok kararlı halde olmayan (CaCO<sub>3</sub>) vaterit formuna dönüşür. Ayrıca, bu sıcaklıklarda CaCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> kaybına uğrar ve CaO olarak uçucu kül içerisinde kalır. XRD analizi sonrasında elde edilen sonuçlarda uçucu kül içerisinde CaO olması beklenirken, CaCO<sub>3</sub> ile karşılaşmıştır. Bunun nedeninin analiz için bekleyen numunelerin havadaki CO<sub>2</sub> ile tekrar reaksiyona girmesi sonucu çok kararlı halde olmayan CaCO<sub>3</sub>'a dönüşmesi olarak düşünülmektedir. Ayrıca, 500°C civarında PVC'nin bozunmasıyla salınan klorürün NaCl oluşturduğu görülmüştür.

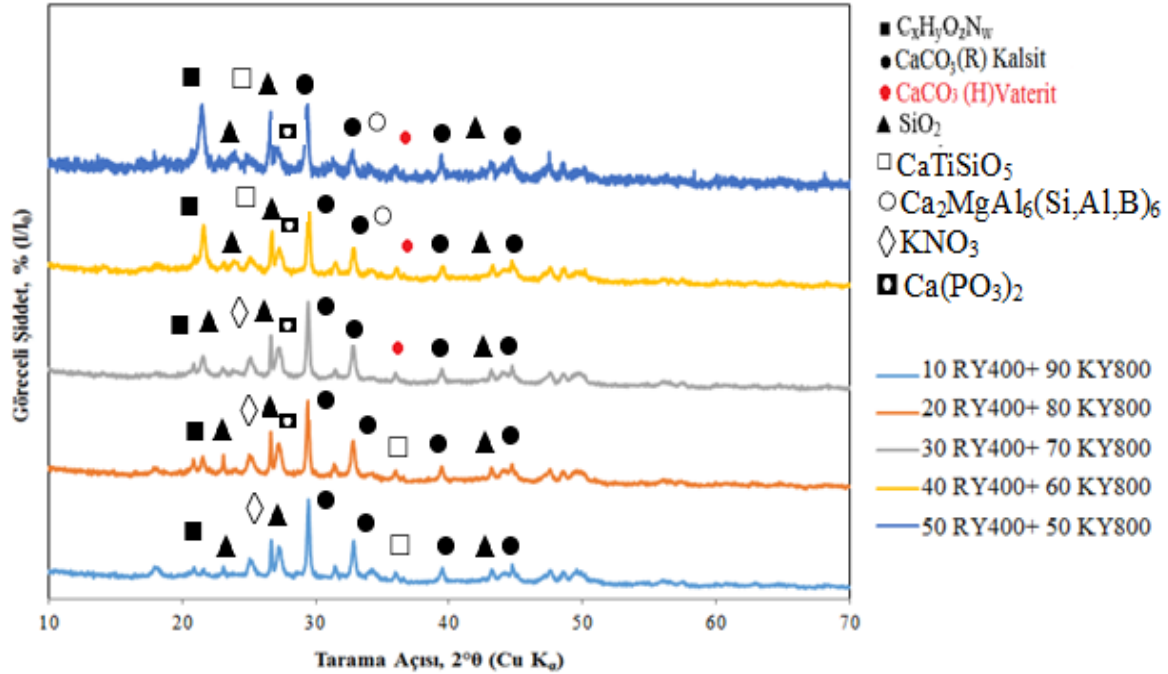


Şekil 7.36 : RA ve RY numunelerinin XRD analizleri.

### 7.6.3 Karışımların XRD analizi sonuçları

Şekil 7.37'de karışımların XRD analizi sonuçları verilmiştir. Karışımların XRD analizi sonuçlarına bakıldığında, karışımların hepsinde (CaCO<sub>3</sub>) kalsit-vaterit, (SiO<sub>2</sub>) kuvars yapılarının bulunduğu ve karışımların RY400 numunesi içeriği arttıkça RDF'nin içerdiği organik bileşenlerden dolayı C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>NO<sub>3</sub>(p-nitrofenol) gibi

$C_xH_yO_zN_w$  yapılarının ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca, karışımların yapısında  $(CaTiSiO_5)$  titanit,  $(Ca_2MgAl_6(Si,Al,B)_6)$  serendibit,  $(KNO_3)$  potasyum nitrat ve  $(Ca(PO_3)_2)$  kalsiyum fosfat gibi bileşenlerin ön plana çıktığı görülmüştür.



Şekil 7.37 : Karışımların XRD analizleri.

## 7.7 XRF Analizi Sonuçları

Çizelge 7.8, Çizelge 7.9 ve Çizelge 7.10'da numunelerin XRF analizi sonuçları verilmiştir.

### 7.7.1 KA ve KY numunelerinin XRF analizi sonuçları

KA numunesinin XRF analizi sonuçlarına bakıldığında, KA numunesinin yapısında başlıca %24.83 Ca, % 9.978 Mg, % 6.831 S, % 3.205 Al, % 1.943 Si, % 1.762 Fe olduğu belirlenmiştir. KA numunesinin ve yarıkoklarında Sr içeriğinin %0.25 ile %0,41 arasında, Ni içeriğinin %0.029 ile %0.064 arasında, Fe içeriğinin %1.445 ile %2.258 arasında, Mn içeriğinin %0.007 ile %0.032 arasında, Cr içeriğinin %0.029 ile %0.059 arasında, Ca içeriğinin %24.83 ile %45.27 arasında, S içeriğinin %3.055 ile %6.831 arasında, K içeriğinin %0.192 ile %0.298 arasında, Al içeriğinin %2.469 ile %4.972 arasında, P içeriğinin %0.594 ile %1.057 arasında, Si içeriğinin %1.861 ile %2.622 arasında, Cl içeriğinin %0.042 ile %0.167 arasında, Mg içeriğinin %3.925 ile %12.81 arasında değiştiği belirlenmiştir.

XRF sonuçlarının, XRD sonuçları ile desteklendiği görülmüştür. XRD sonuçlarında bulunan minerallerin başlıca, XRF sonuçlarında bulunan başlıca elementlerden oluştuğu belirlenmiştir. KA numunesindeki yüksek miktardaki Ca-CaCO<sub>3</sub>, Mg-MgCO<sub>3</sub>, S-FeS<sub>2</sub>, Si-SiO<sub>2</sub>, Al- $\text{AlSiO}_2$  varlığı ile XRD sonuçlarında da görülmüştür.

KY numunelerinin XRF analizi sonuçlarına bakıldığında, sıcaklık arttıkça sabit karbon ve kül miktarının artması sonucu numunelerde bulunan mineral madde miktarlarının genel olarak artış eğiliminde olduğu görülmüştür.

#### **7.7.2 RA ve RY numunelerinin XRF analizi sonuçları**

RA numunesinin XRF analizi sonuçlarına bakıldığında, RA numunesinin yapısında başlıca %21.46 Ca, %5.684 Fe, %4.049 Cl, %3.616 Mg, %2.829 Al, %2.748 Si, %1.737 K olduğu belirlenmiştir. RA numunesindeki yüksek miktardaki Ca-CaCO<sub>3</sub>, Si-SiO<sub>2</sub> varlığı ile XRD sonuçlarında da görülmüştür.

RA numunesinin ve yarıkoklarında Sr içeriğinin %0.164 ile %0.318 arasında, Ni içeriğinin %0.347 ile %0.576 arasında, Fe içeriğinin %4.512 ile %7.537 arasında, Mn içeriğinin %0.092 ile %0.118 arasında, Cr içeriğinin %0.739 ile %1.294 arasında, Ca içeriğinin %16.54 ile %26.75 arasında, S içeriğinin %0 ile %1.24 arasında, K içeriğinin %1.572 ile %2.604 arasında, Al içeriğinin %1.866 ile %5.858 arasında, P içeriğinin %0.618 ile %1.012 arasında, Si içeriğinin %2.539 ile %5.104 arasında, Cl içeriğinin %2.071 ile %4.049 arasında, Mg içeriğinin %2.34 ile %6.881 arasında değiştiği belirlenmiştir.

RY numunelerinin XRF analizi sonuçlarına bakıldığında, sıcaklık arttıkça sabit karbon ve kül miktarının artması sonucu numunelerde bulunan mineral madde miktarlarının genel olarak artış eğiliminde olduğu görülmüştür. Ancak yapıda bulunan PVC'nin bozunmasıyla açığa çıkan klorürün sıcaklık arttıkça genel olarak azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.

KA, KY, RA ve RY numuneleri karşılaştırıldığında, RA ve RY numunelerinin Fe, K, Si, Cl, Al, Ni içeriklerinin daha yüksek olduğu, KA ve KY numunelerinin ise Ca, Mg, P, S içeriklerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

### 7.7.3 Karışımların XRF analizi sonuçları

Karışımların XRF analizi sonuçlarına bakıldığında, yapılarında başlıca Ca, Mg, Al, S, Fe, Si, K, P olduğu belirlenmiştir. Karışımlardaki yüksek miktardaki Ca-CaCO<sub>3</sub>, Si-SiO<sub>2</sub>, K-KNO<sub>3</sub>, P-Ca(PO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Mg ve Al-(Ca<sub>2</sub>MgAl<sub>6</sub>(Si,Al,B)<sub>6</sub>) serendibit varlığı ile XRD sonuçlarında da görülmüştür.

Karışımların Sr içeriğinin %0.37 ile %0.465 arasında, Ni içeriğinin %0.101 ile %0.263 arasında, Fe içeriğinin %2.902 ile %4.803 arasında, Mn içeriğinin %0.04 ile %0.061 arasında, Cr içeriğinin %0.123 ile %0.507 arasında, Ca içeriğinin %37.72 ile %49.33 arasında, S içeriğinin % 3.028 ile % 4.65 arasında, K içeriğinin %0.401 ile %0.936 arasında, Al içeriğinin %4.445 ile %6.966 arasında, P içeriğinin %0.948 ile %1.056 arasında, Si içeriğinin %2.826 ile %3.18 arasında, Cl içeriğinin %0.259 ile %1.041 arasında, Mg içeriğinin %10.54 ile %17.81 arasında değiştiği belirlenmiştir.

**Çizelge 7.9 : KA ve KY numunelerinin XRF analizi sonuçları.**

|            | Numune |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | KA     | KY400 | KY500 | KY600 | KY700 | KY800 | KY900 |
| <b>Ba</b>  | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| <b>Sb</b>  | 0.002  | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.002 | 0.003 | 0.002 |
| <b>Sn</b>  | 0.001  | 0     | 0     | 0.001 | 0     | 0.002 | 0     |
| <b>Cd</b>  | 0.005  | 0.003 | 0.002 | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.004 |
| <b>Pd</b>  | 0.002  | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 |
| <b>Ag</b>  | 0.001  | 0.002 | 0     | 0.002 | 0.001 | 0.003 | 0.003 |
| <b>Bal</b> | 96.69  | 97.96 | 102.6 | 93.19 | 85.95 | 56.4  | 62.67 |
| <b>Mo</b>  | 0.008  | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.004 | 0.008 | 0.006 |
| <b>Nb</b>  | 0.006  | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.004 | 0.005 | 0.004 |
| <b>Zr</b>  | 0.006  | 0.004 | 0.003 | 0.004 | 0.004 | 0.007 | 0.006 |
| <b>Sr</b>  | 0.259  | 0.257 | 0.25  | 0.279 | 0.292 | 0.411 | 0.371 |
| <b>Rb</b>  | 0.002  | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.001 |
| <b>Bi</b>  | 0      | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.002 |
| <b>As</b>  | 0.001  | 0     | 0.001 | 0     | 0     | 0.001 | 0.001 |
| <b>Se</b>  | 0.001  | 0.001 | 0.001 | 0     | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| <b>Pb</b>  | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| <b>W</b>   | 0.007  | 0.011 | 0.009 | 0.007 | 0.024 | 0.029 | 0.023 |
| <b>Zn</b>  | 0.008  | 0.006 | 0.005 | 0.007 | 0.004 | 0.01  | 0.006 |
| <b>Cu</b>  | 0.015  | 0.006 | 0.004 | 0.006 | 0.005 | 0.005 | 0.011 |
| <b>Ni</b>  | 0.043  | 0.037 | 0.029 | 0.029 | 0.037 | 0.064 | 0.056 |
| <b>Co</b>  | 0.013  | 0.004 | 0     | 0     | 0.001 | 0.011 | 0     |
| <b>Fe</b>  | 1.762  | 1.478 | 1.445 | 1.585 | 1.638 | 2.258 | 2.094 |
| <b>Mn</b>  | 0.009  | 0.022 | 0.007 | 0.022 | 0.014 | 0.028 | 0.032 |
| <b>Cr</b>  | 0.059  | 0.033 | 0.031 | 0.029 | 0.029 | 0.038 | 0.033 |
| <b>V</b>   | 0.103  | 0.087 | 0.082 | 0.086 | 0.087 | 0.135 | 0.127 |
| <b>Ti</b>  | 0.115  | 0.099 | 0.093 | 0.088 | 0.088 | 0.149 | 0.131 |
| <b>Ca</b>  | 24.83  | 30.27 | 29.9  | 32.86 | 35.29 | 45.27 | 44.22 |
| <b>K</b>   | 0.258  | 0.246 | 0.192 | 0.199 | 0.251 | 0.266 | 0.298 |
| <b>S</b>   | 6.831  | 3.333 | 3.055 | 3.559 | 4.031 | 6.004 | 5.624 |
| <b>Al</b>  | 3.205  | 2.469 | 2.582 | 3.087 | 3.299 | 4.972 | 4.906 |
| <b>P</b>   | 1.057  | 0.61  | 0.594 | 0.722 | 0.814 | 0.95  | 0.967 |
| <b>Si</b>  | 1.943  | 2.024 | 1.861 | 1.99  | 2.094 | 2.622 | 2.555 |
| <b>Cl</b>  | 0.087  | 0.054 | 0.042 | 0.054 | 0.071 | 0.138 | 0.167 |
| <b>Mg</b>  | 9.978  | 7.299 | 3.925 | 6.25  | 7.852 | 12.81 | 9.217 |

**Çizelge 7.10 : RA ve RY numunelerinin XRF analizi sonuçları.**

|            | <b>RA</b> | <b>RY400</b> | <b>RY500</b> | <b>RY600</b> | <b>RY700</b> | <b>RY800</b> | <b>RY900</b> |
|------------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Ba</b>  | 0         | 0            | 0            | 0            | 0.001        | 0            | 0.017        |
| <b>Sb</b>  | 0.008     | 0.006        | 0.006        | 0.01         | 0.009        | 0.013        | 0.015        |
| <b>Sn</b>  | 0         | 0.001        | 0.003        | 0.006        | 0.009        | 0.003        | 0.006        |
| <b>Cd</b>  | 0.008     | 0.007        | 0.004        | 0.007        | 0.006        | 0.006        | 0.006        |
| <b>Pd</b>  | 0.003     | 0.002        | 0.001        | 0.001        | 0.002        | 0.001        | 0.001        |
| <b>Ag</b>  | 0.005     | 0.002        | 0.003        | 0.002        | 0.002        | 0.005        | 0.004        |
| <b>Bal</b> | 98.74     | 116.9        | 83.92        | 80.26        | 78.67        | 79.74        | 79.25        |
| <b>Mo</b>  | 0.028     | 0.028        | 0.043        | 0.042        | 0.045        | 0.045        | 0.044        |
| <b>Nb</b>  | 0.013     | 0.008        | 0.009        | 0.008        | 0.009        | 0.008        | 0.007        |
| <b>Zr</b>  | 0.01      | 0.01         | 0.013        | 0.014        | 0.016        | 0.017        | 0.012        |
| <b>Sr</b>  | 0.164     | 0.167        | 0.3          | 0.284        | 0.305        | 0.318        | 0.31         |
| <b>Rb</b>  | 0.003     | 0.002        | 0.003        | 0.003        | 0.003        | 0.002        | 0.003        |
| <b>Bi</b>  | 0.002     | 0.003        | 0.003        | 0.004        | 0.001        | 0.003        | 0.003        |
| <b>As</b>  | 0.004     | 0.001        | 0            | 0.003        | 0.003        | 0.001        | 0.001        |
| <b>Se</b>  | 0.001     | 0.001        | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            |
| <b>Pb</b>  | 0.042     | 0.044        | 0.095        | 0.082        | 0.068        | 0.061        | 0.037        |
| <b>W</b>   | 0.044     | 0.024        | 0.029        | 0.04         | 0.039        | 0.04         | 0.031        |
| <b>Zn</b>  | 0.141     | 0.117        | 0.201        | 0.178        | 0.144        | 0.022        | 0.009        |
| <b>Cu</b>  | 0.164     | 0.116        | 0.196        | 0.201        | 0.254        | 0.211        | 0.289        |
| <b>Ni</b>  | 0.45      | 0.347        | 0.576        | 0.499        | 0.566        | 0.531        | 0.532        |
| <b>Co</b>  | 0         | 0            | 0.013        | 0            | 0            | 0.032        | 0            |
| <b>Fe</b>  | 5.684     | 4.512        | 7.296        | 6.85         | 7.467        | 7.537        | 7.217        |
| <b>Mn</b>  | 0.107     | 0.096        | 0.092        | 0.11         | 0.092        | 0.118        | 0.116        |
| <b>Cr</b>  | 1.087     | 0.739        | 1.34         | 1.214        | 1.282        | 1.294        | 1.205        |
| <b>V</b>   | 0.196     | 0.103        | 0.165        | 0.154        | 0.149        | 0.151        | 0.139        |
| <b>Ti</b>  | 1.14      | 0.8          | 1.399        | 1.254        | 1.382        | 1.368        | 1.314        |
| <b>Ca</b>  | 21.46     | 16.54        | 26.41        | 25.28        | 26.75        | 26.53        | 25.91        |
| <b>K</b>   | 1.737     | 1.572        | 2.377        | 2.307        | 2.283        | 2.604        | 2.467        |
| <b>S</b>   | 0.001     | 0            | 0            | 0.247        | 0.846        | 1.24         | 0.741        |
| <b>Al</b>  | 2.829     | 1.866        | 3.729        | 5.858        | 4.814        | 5.222        | 4.932        |
| <b>P</b>   | 0.858     | 0.618        | 0.98         | 0.939        | 0.917        | 0.85         | 1.012        |
| <b>Si</b>  | 2.748     | 2.539        | 4.363        | 4.805        | 5.067        | 4.836        | 5.104        |
| <b>Cl</b>  | 4.049     | 2.071        | 3.287        | 3.472        | 3.693        | 3.291        | 2.76         |
| <b>Mg</b>  | 3.616     | 2.959        | 2.732        | 6.881        | 3.565        | 2.34         | 6.717        |

**Çizelge 7.11 : Karışımların XRF analizi sonuçları.**

|            | <b>10 RY400</b><br>+<br><b>90 KY800</b> | <b>20 RY400</b><br>+<br><b>80 KY800</b> | <b>30 RY400</b><br>+<br><b>70 KY800</b> | <b>40 RY400</b><br>+<br><b>60 KY800</b> | <b>50 RY400</b><br>+<br><b>50 KY800</b> |
|------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Ba</b>  | 0                                       | 0                                       | 0                                       | 0                                       | 0                                       |
| <b>Sb</b>  | 0.004                                   | 0.002                                   | 0.001                                   | 0.004                                   | 0                                       |
| <b>Sn</b>  | 0.002                                   | 0                                       | 0                                       | 0                                       | 0                                       |
| <b>Cd</b>  | 0.005                                   | 0.007                                   | 0.008                                   | 0.005                                   | 0.006                                   |
| <b>Pd</b>  | 0.002                                   | 0.002                                   | 0.002                                   | 0.002                                   | 0.002                                   |
| <b>Ag</b>  | 0.003                                   | 0.003                                   | 0.002                                   | 0.004                                   | 0.004                                   |
| <b>Bal</b> | 51.76                                   | 58.75                                   | 39.61                                   | 69.94                                   | 56.08                                   |
| <b>Mo</b>  | 0.012                                   | 0.012                                   | 0.019                                   | 0.016                                   | 0.022                                   |
| <b>Nb</b>  | 0.007                                   | 0.008                                   | 0.01                                    | 0.008                                   | 0.009                                   |
| <b>Zr</b>  | 0.009                                   | 0.009                                   | 0.01                                    | 0.008                                   | 0.01                                    |
| <b>Sr</b>  | 0.419                                   | 0.392                                   | 0.465                                   | 0.37                                    | 0.394                                   |
| <b>Rb</b>  | 0.002                                   | 0.002                                   | 0.003                                   | 0.002                                   | 0.003                                   |
| <b>Bi</b>  | 0.002                                   | 0.002                                   | 0.003                                   | 0.002                                   | 0.004                                   |
| <b>As</b>  | 0.001                                   | 0.002                                   | 0.001                                   | 0                                       | 0.002                                   |
| <b>Se</b>  | 0.001                                   | 0.001                                   | 0                                       | 0.001                                   | 0.001                                   |
| <b>Pb</b>  | 0                                       | 0.002                                   | 0.01                                    | 0.012                                   | 0.03                                    |
| <b>W</b>   | 0.035                                   | 0.032                                   | 0.064                                   | 0.029                                   | 0.049                                   |
| <b>Zn</b>  | 0.024                                   | 0.028                                   | 0.045                                   | 0.043                                   | 0.08                                    |
| <b>Cu</b>  | 0.02                                    | 0.026                                   | 0.048                                   | 0.074                                   | 0.103                                   |
| <b>Ni</b>  | 0.101                                   | 0.113                                   | 0.159                                   | 0.155                                   | 0.263                                   |
| <b>Co</b>  | 0                                       | 0.003                                   | 0.012                                   | 0.007                                   | 0                                       |
| <b>Fe</b>  | 2.902                                   | 2.957                                   | 3.979                                   | 3.173                                   | 4.803                                   |
| <b>Mn</b>  | 0.04                                    | 0.048                                   | 0.054                                   | 0.056                                   | 0.061                                   |
| <b>Cr</b>  | 0.123                                   | 0.17                                    | 0.265                                   | 0.262                                   | 0.507                                   |
| <b>V</b>   | 0.157                                   | 0.148                                   | 0.177                                   | 0.121                                   | 0.182                                   |
| <b>Ti</b>  | 0.217                                   | 0.259                                   | 0.433                                   | 0.385                                   | 0.63                                    |
| <b>Ca</b>  | 46.49                                   | 43.16                                   | 49.33                                   | 37.72                                   | 42.2                                    |
| <b>K</b>   | 0.401                                   | 0.444                                   | 0.658                                   | 0.793                                   | 0.936                                   |
| <b>S</b>   | 4.65                                    | 4.029                                   | 4.491                                   | 4.407                                   | 3.028                                   |
| <b>Al</b>  | 5.83                                    | 5.146                                   | 6.161                                   | 4.445                                   | 6.966                                   |
| <b>P</b>   | 0.967                                   | 1.056                                   | 0.948                                   | 0.972                                   | 1.038                                   |
| <b>Si</b>  | 2.826                                   | 2.955                                   | 3.18                                    | 2.894                                   | 3.089                                   |
| <b>Cl</b>  | 0.259                                   | 0.346                                   | 0.562                                   | 0.682                                   | 1.041                                   |
| <b>Mg</b>  | 14.66                                   | 14.4                                    | 17.81                                   | 10.54                                   | 11.17                                   |

### 7.8 BET Analizi Sonuçları

Çizelge 7.11’de numunelerin BET analizi sonuçları verilmiştir. KA, RA, KY ve RY numunelerinin BET analizi sonuçları incelendiğinde, karbonizasyon sıcaklığı arttıkça yüzey alanlarının da arttığı görülmüştür. Yüzey alanlarındaki bu artış, yarıkok üretimi sırasında uçucu maddelerin numunelerden uzaklaşması ve buna bağlı olarak

mikro gözenek hacimlerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Yüzey alanının artmasıyla genel olarak daha gözenekli bir yapı oluştuğu ve gözenek çaplarının küçüldüğü bilinmektedir. Bu durum, SEM analizi sonuçları ile de desteklenmektedir. Kömür ve RDF numunelerinin yüzey alanları karşılaştırıldığında, kömür numunelerin yüzey alanlarının RDF numunelerine göre daha fazla olduğu ve sıcaklıkla yüzey alanlarında daha fazla artış olduğu görülmüştür.

KY900 numunesinin yüzey alanının diğer numunelere göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu numunede, gözenek çapları çok küçük olduğundan dolayı yanmayı sağlayacak olan kuru hava taneciklerin içine nüfuz edemez. KY900 numunesinin daha düşük ısı değere sahip olması bu şekilde açıklanabilir.

RY400'den sonra da yüzey alanlarının çok daha fazla artış gösterdiği görülmüştür. Benzer şekilde, yüzey alanının artmasıyla daha gözenekli bir yapı oluşmakta ve gözenek çapları küçüldüğü için kuru hava taneciklerin içine nüfuz edememektedir. Böylece, RY400'den sonra numunelerin daha düşük ısı değere sahip olması bu şekilde açıklanabilmektedir.

Karışımların BET analizi sonuçlarına bakıldığında ise, RY400 numunesinden daha yüksek yüzey alanına sahip olan KY800 numunesinin karışımlardaki içeriği arttıkça yüzey alanlarının da artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Yüzey alanının artmasıyla daha gözenekli bir yapı oluşmakta ve gözenek çapları küçüldüğü için yanma sırasında kuru havanın tanecikler içine nüfuz etmesi zorlaşmaktadır. Böylece yüzey alanı arttıkça numunelerin daha düşük ısı değere sahip olması bu şekilde açıklanabilir.

**Çizelge 7.12 : Numunelerin BET analizi sonuçları.**

| <b>Numune</b>     | <b>Spesifik Yüzey Alanı (m<sup>2</sup>/g)</b> |
|-------------------|-----------------------------------------------|
| KA                | 1.97                                          |
| KY400             | 2.05                                          |
| KY500             | 6.75                                          |
| KY600             | 8.52                                          |
| KY700             | 11.15                                         |
| KY800             | 37.58                                         |
| KY900             | 92.83                                         |
| RA                | 0.46                                          |
| RY400             | 0.67                                          |
| RY500             | 4.08                                          |
| RY600             | 21.54                                         |
| RY700             | 23.90                                         |
| RY800             | 30.48                                         |
| RY900             | 32.59                                         |
| 10 RY400+90 KY800 | 16.62                                         |
| 20 RY400+80 KY800 | 9.88                                          |
| 30 RY400+70 KY800 | 8.50                                          |
| 40 RY400+60 KY800 | 4.97                                          |
| 50 RY400+50 KY800 | 0.46                                          |

### **7.9 Tanecik Boyutu Analizi Sonuçları**

Çizelge 7.12’de numunelerin tanecik boyutu analizi sonuçları verilmiştir.

KA, RA, KY ve RY numunelerinin ile tanecik boyutu analizi sonuçları incelendiğinde, karbonizasyon sıcaklığının artmasıyla genel olarak tanecik boyutlarının küçülme eğiliminde olduğu belirlenmiştir. SEM analizi sonuçlarına bakıldığında ise, karbonizasyon sıcaklığı arttıkça taneciklerin parçalanma sonucu genel olarak küçülme eğiliminde olduğu ve BET analizi sonuçlarına bakıldığında ise karbonizasyon sıcaklığı arttıkça tanecik boyutlarının küçülmesine bağlı olarak yüzey alanlarının arttığı görülmüştür.

Karışımların tanecik boyutu analizi sonuçlarında ise, karışımlardaki KY800 numunesinin içeriği arttıkça yüzey alanları artarken, tanecik boyutu küçülmesinde bazı sapmalar olduğu ancak yine de küçülme eğiliminde olduğu görülmüştür.

**Çizelge 7.13 : Numunelerin tanecik boyutu analizi sonuçları.**

| <b>Numune</b>     | <b>Tanecik Boyutu (µm)</b> |
|-------------------|----------------------------|
| KA                | 104.23                     |
| KY400             | 95.64                      |
| KY500             | 93.57                      |
| KY600             | 91.02                      |
| KY700             | 90.90                      |
| KY800             | 85.43                      |
| KY900             | 77.56                      |
| RA                | 188.23                     |
| RY400             | 110.18                     |
| RY500             | 102.39                     |
| RY600             | 109.45                     |
| RY700             | 79.89                      |
| RY800             | 79.01                      |
| RY900             | 69.94                      |
| 10 RY400+90 KY800 | 98.08                      |
| 20 RY400+80 KY800 | 101.68                     |
| 30 RY400+70 KY800 | 86.20                      |
| 40 RY400+60 KY800 | 99.20                      |
| 50 RY400+50 KY800 | 103.97                     |

#### **7.10 SEM Analizi Sonuçları**

Şekil 7.38, Şekil 7.39, Şekil 7.40, Şekil 7.41 ve Şekil 7.42’de numunelerin SEM analizi sonuçları verilmiştir.

KA ve KY numunelerinin SEM analizi sonuçları incelendiğinde, KA numunesinin düzgün şekle sahip küçük boyutlu kompakt parçacıklardan oluştuğu görülmüştür. KY numunelerinin ise ana numuneye benzer şekilde bir yapıya sahip olduğu, ancak karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, toplam gözenek hacminin arttığı, daha fazla mikro gözenek oluştuğu ve parçalanma sonucu tanecik boyutlarının küçüldüğü görülmüştür.

RA ve RY numunelerinin SEM analizi sonuçları incelendiğinde ise, RA numunesinin tüysü yapıya sahip olduğu ve ince tüylerin birbirlerine dolaşarak matris bir yapı oluşturduğu görülmüştür. Düzensiz şekle sahip parçaların plastik ve tahta (odun) parçalarına ait olduğu düşünülmüştür (Myung, 2010). RY numunelerinin ise, ana numuneye benzer şekilde bir yapıya sahip olduğu, ancak karbonizasyon sıcaklığı arttıkça toplam gözenek hacminin arttığı, daha fazla mikro gözenek oluştuğu ve parçalanma sonucu tanecik boyutlarının küçüldüğü görülmüştür. RDF’nin

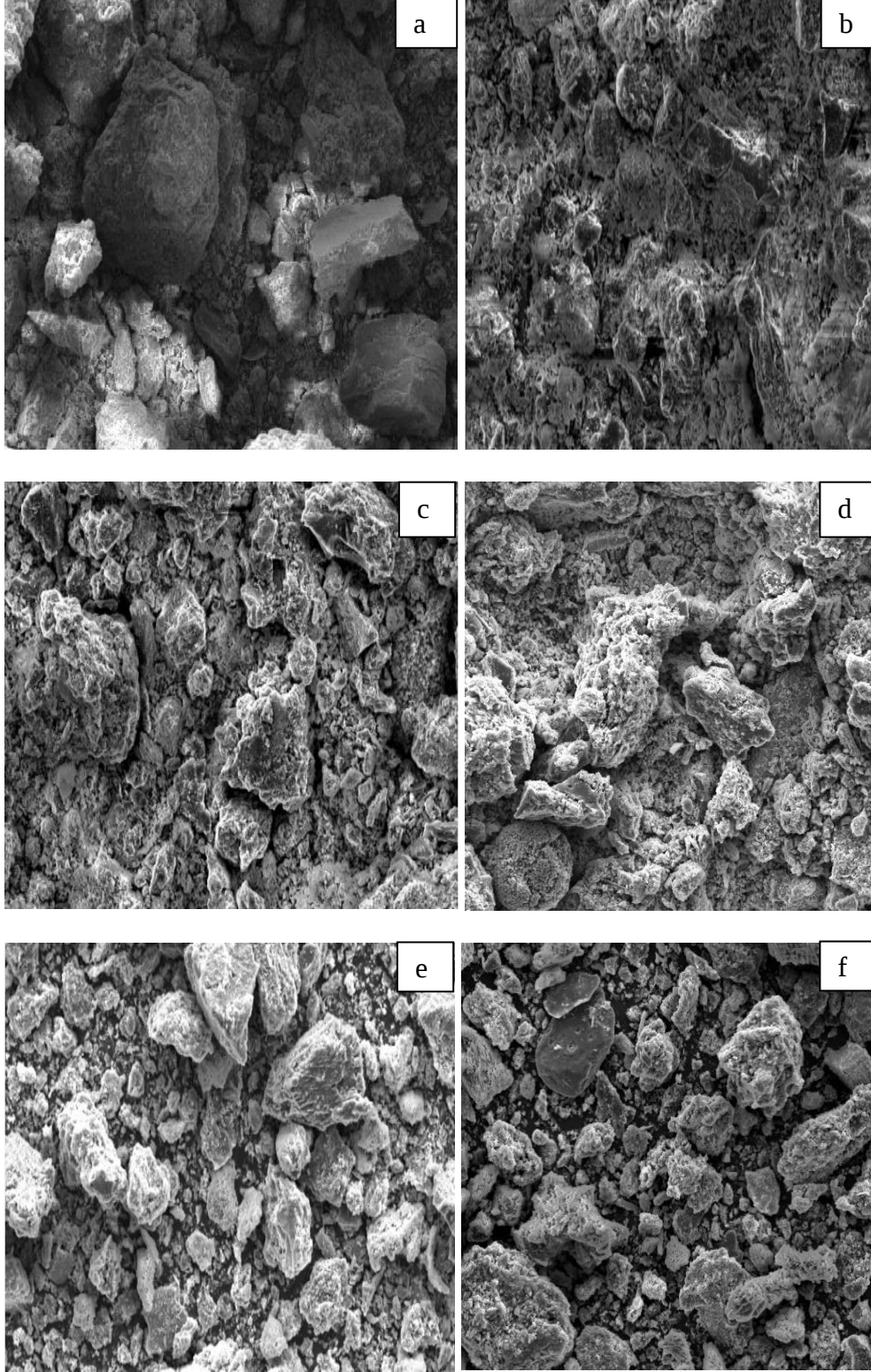
karbonizasyonundan sonra kalan lifsi yapıların ise selülozik fiberlere ait olduğu düşünülmektedir.

RY numunelerinin ortalama tanecik boyutlarının KY numunelerinin ortalama tanecik boyutları ile kıyaslandığında daha büyük olduğu belirlenmiştir.

Karışımların SEM analizi sonuçlarına bakıldığında ise, iyi karışma olduğu durumda daha küçük tanecik boyutlu olan KY800 numunesinin daha büyük tanecik boyutlu olan RY400 numunesine yapışarak daha kompakt bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir. RY400 numunesinin karışımlardaki miktarı arttıkça yüzey alanlarının azaldığı BET analiz sonuçları ile belirlenmiştir. Ayrıca SEM görüntüleri de bu sonuçları desteklemektedir.

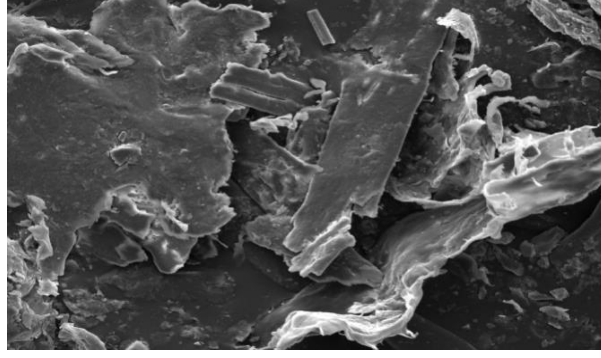


**Şekil 7.38 :** KA numunesinin SEM görüntüsü.

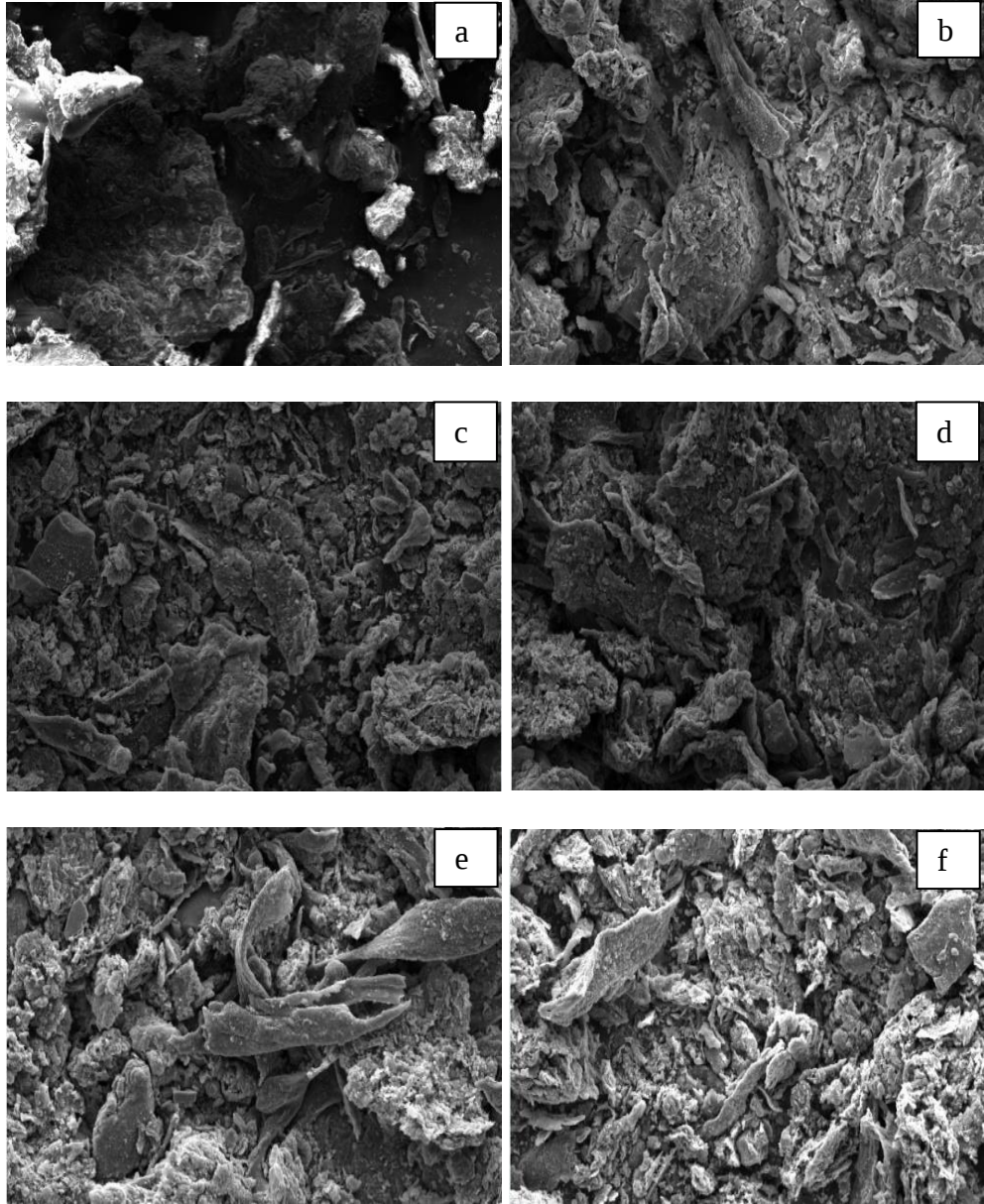


**Şekil 7.39 :** KY numunelerinin SEM görüntüleri.

a; KY400, b; KY500, c; KY600, d; KY700, e; KY800, f; KY900 numunelerine ait SEM görüntüleridir.

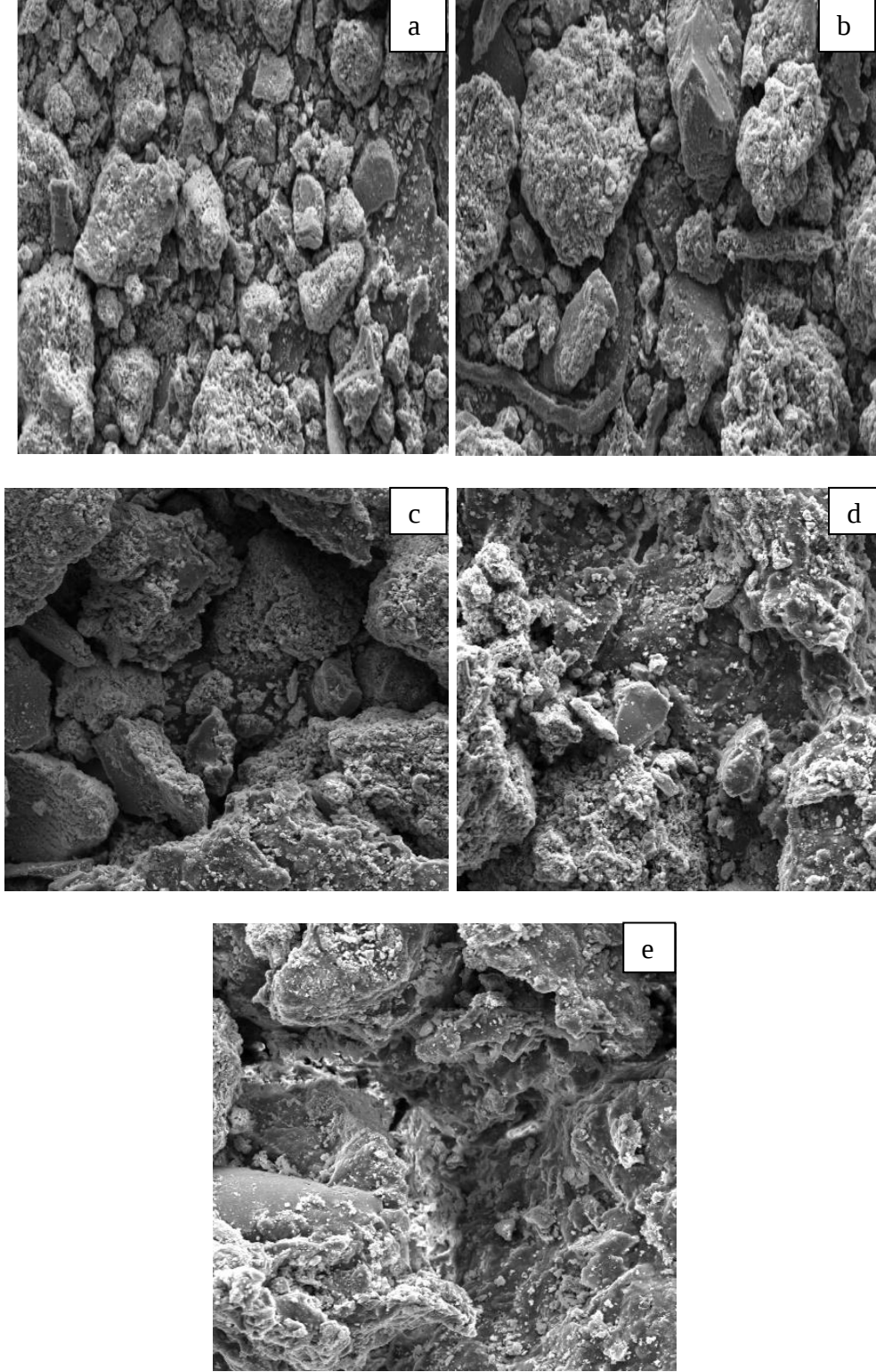


**Şekil 7.40 :** RA numunesinin SEM görüntüsü.



**Şekil 7.41 :** RY numunelerinin SEM görüntüleri.

a; RY400, b; RY500, c; RY600, d; RY700, e; RY800, f; RY900 numunelerine ait SEM görüntüleridir.



**Şekil 7.42 : Karışımların SEM görüntüleri.**

a; 10 RY400+90 KY800, b; 20 RY400+80 KY800, c; 30 RY400+70 KY800, d; 40 RY400+60 KY800, e; 50 RY400+50 KY800 numunelerine ait SEM görüntüleridir.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düşük kaliteli Afşin Elbistan linyit kömürü ve atıklardan üretilmiş yakıt (Refuse Derived Fuel-RDF) kullanılarak kaliteli yakıt üretmek hedeflenmiştir. Kömür ve RDF'den farklı sıcaklıklarda (400°C-900°C) yarıkoklar üretilmiş ve ısı değeri en yüksek olan kömür yarıkoku ve RDF yarıkoku seçilerek farklı oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Linyit kömürü ve RDF ana numunesine, yarıkoklarına ve farklı oranlarda hazırlanan karışımlarına yanma davranımlarını belirlemek amacıyla farklı analizler (kısa analiz, elementel analiz, ısı değeri analizi, XRF, XRD, SEM, BET, FTIR ve tanecik boyutu analizleri) uygulanmıştır. Ayrıca, aynı numunelere yanma davranımlarını belirlemek amacıyla termal analizler (TGA, DTA, DSC, DTG) uygulanmıştır.

Bu çalışma sonucunda,

- Isıl değeri analizi sonuçları incelendiğinde, KY800 ve RY400 numunesinin ısı değeri en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle, karışımları hazırlamak için bu numuneler seçilmiştir.
- Kısa analiz ve elementel analiz sonuçlarında, KY800 numunesinin sabit C ve elementel C içeriğinin en yüksek çıkması ve RY400 numunesinin uçucu madde içeriğinin çok yüksek olması ve elementel C içeriğinin en yüksek değerde olması bu sonucu doğrulamaktadır. Bu durum, RDF'nin uçucu maddesinin yanabilen kısmının çok yüksek olduğunu göstermektedir. Karışımların ısı değeri analiz sonuçları incelendiğinde, karışımların RDF yarıkoku içeriği arttıkça ısı değerleri de arttığı görülmüştür. Bu durumda, RDF yarıkokunun kömür yarıkoku üzerinde katkı etkisi yaptığı ve karışıma katılma oranı arttıkça uçucu madde içeriğini artırarak ısı değerlerinde iyileşme yapılabileceği düşünülmüştür.
- Isıl değeri en yüksek KY800 numunesinin FTIR analizleri incelendiğinde, aromatik halkalı yapıların 800°C'de bağların koparak C-H parafinik düz zincir yapılarının oluştuğu belirlenmiştir. Yakma neticesinde düz zincir yapılarının halkalı yapılara oranla kırılabilmesi için gerekli olan aktivasyon

enerjisinin daha düşük olması nedeniyle maksimum yanma sıcaklığı ( $T_{\max}$ ), diğer numunelere kıyasla daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmekte, birim zamandaki maksimum ağırlık kayıp hızı  $(dm/dt)_{\max}$  ise düşmektedir.

- Isıl değeri en yüksek olan RY400 numunesinin FTIR analizleri incelendiğinde, kömürün aksine sıcaklığın düşmesiyle aromatik grupların oluşmadığı, C-H parafinik düz zincir yapılarının kömürün aksine daha düşük sıcaklıkta ( $400^{\circ}\text{C}$ ) oluştuğu belirlenmiştir. Yanma esnasında aktivasyon enerjilerinin daha düşük olması nedeniyle düz zincirli yapıların düşük sıcaklıkta ( $400^{\circ}\text{C}$ ) kolaylıkla yanabilmesi nedeniyle ısıl değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. RY400 numunesinin birim zamandaki ağırlık kayıp hızının  $(dm/dt)_{\max}$  nispeten daha düşük olduğu, DSC eğrisinde RY400 numunesine ait pikin daha geniş ve büyük olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerin BET analizi sonuçları incelendiğinde, karbonizasyon sıcaklığı arttıkça yüzey alanlarının da arttığı görülmüştür. Yüzey alanlarındaki bu artış, yarıkok üretimi sırasında uçucu maddelerin numunelerden uzaklaşması ve buna bağlı olarak mikro gözenek hacimlerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Yüzey alanının artmasıyla genel olarak daha gözenekli bir yapı oluştuğu ve gözenek çaplarının küçüldüğü bilinmektedir.
- Numunelerin tanecik boyutu analizi sonuçları incelendiğinde, karbonizasyon sıcaklığının artmasıyla genel olarak tanecik boyutlarının küçülme eğiliminde olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerin SEM analizi sonuçları incelendiğinde karbonizasyon sıcaklığı arttıkça, toplam gözenek hacminin arttığı, daha fazla mikro gözenek oluştuğu ve parçalanma sonucu tanecik boyutlarının küçüldüğü görülmüştür.
- Deneysel çalışmalar sonucunda, Afşin Elbistan linyit kömürü ve RDF'den üretilen yarıkok karışımlarından yüksek ısıl değerli yakıt üretimi gerçekleştirilmiştir. RDF yarıkokunun kömür yarıkoku üzerinde katkı etkisi yaptığı ve karışıma katılma oranı arttıkça ısıl değerlerde iyileşme yapılabileceği düşünülmüştür.
- Bu çalışmada kullanılan  $400^{\circ}\text{C}$ - $900^{\circ}\text{C}$  karbonizasyon sıcaklığı aralığının ve karışımlardaki %10-%50 arası RDF yarıkoku içeriğinin daha da genişletilmesi önerisi yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Açma, H.**, 1999. Kömürün mineral içeriğinin yanma özelliklerine etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Alp, K.**, 2011. Atıktan Türetilmiş Yakıt Üretimi, Kullanımı ve Etkileri, ÇOB 2011 Atık Yönetimi Sempozyumu, İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü.
- Arısoy, A.**, 1991. Kömür, Kurtiş Matbaası, İstanbul, 357-401.
- Ariyaratne, W., Melaaen, M., Eineb, K., Tokheim, L.**, 2012. Determination of fossil fraction of refuse derived fuel by the selective dissolution method in calorific value basis: development of simplified method, *Fuel*, **98**, 41–7
- Atakül, H., Okutan, H., Arısoy, A. ve Ekinci, E.**, 1996. Kömür Neminin Yanmaya ve Emisyona Etkisi, *İkinci Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye.
- Baxter, L.**, 2005. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy, *Fuel*, **84**, 1295-1302.
- Berkowitz, N.**, 1985. Chemistry of Coal Science and Technology, Elsevier, Amsterdam.
- Bidart, C., Fröhling, M., Schultmann, F.**, 2013. Municipal solid waste and production of substitute natural gas and electricity as energy alternatives, *Applied Thermal Engineering*, **51**, 1107–1115.
- Bozkurt, P.**, 2011. Atık Lastik-Kömür Karışımlarının Piroliz ve Kritik Üstü Ekstraksiyonla Değerli Ürünlere Dönüştürülmesi Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kimya Anabilim Dalı, Ankara.
- Burnley, S., Phillips, R., Coleman, T., Rampling, Y.**, 2011. Energy implications of the thermal recovery of biodegradable municipal waste materials in the United Kingdom, *Waste Management*, **3**, 1949–1959.
- Caputo, A.**, 2002. Pelagagge PM. RDF production plants: I Design and costs. *Applied Thermal Engineering*, **22**, 423–37.

- Demirbas, A.**, 2004a. Combustion Characteristics of Different Biomass Fuels, *Progress in Energy and Combustion Science*, **30**, 219-230.
- DPT**, 2001. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu Kömür Çalışma Grubu, Ankara, DPT Yayını.
- Efika, E.C., Onwudili, J.A., Williams, P.T.**, 2015. Products from the high temperature pyrolysis of RDF at slow and rapid heating rates, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **45**, 120-129.
- Erdöl, N., Çalli, L., Okutan, H., Arisoy, A. and Ekinci, E.**, 1999. Effect of coal moisture on particulate emission in a fixed bed combustion appliance, *Fuel Processing Technology*, **58**, 109-117.
- Gendebien A, Leavens A, Blackmore K, Godley A, Lewin K, Whiting KJ**, 2003. European Commission – directorate general environment refuse derived fuel, current practice and perspectives final report.
- Hernandez, F.D., Ryu, C., Sharifi, V.N., Swithenbank, J.**, 2007. Combustion of refuse derived fuel in a fluidised bed, *Chem Eng Sci*, **62**, 627–35.
- Himus, G. W.**, 1958. The Elements of Fuel Technology, Leonard Hill Limited, London.
- Kara, M.**, 2012. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns, *Resources, Conservation and Recycling*, **68**, 21-28.
- Kara, M., Günay, E., Tabak, Y., Yıldız, Ş.**, 2009. Perspectives for pilot scale study of RDF in Istanbul, Turkey, Science Direct, *Waste Management*, **29**, 2976–2982.
- Karayığit, A.İ.**, 1998. Kömür Petrografisi, *Kömür, Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*, 71-86, Kural, O., Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş., İstanbul, Türkiye.
- Karayığit, A.İ., Köksoy, M.**, 1998. Kömür Oluşumu ve Sınıflandırılması, *Kömür, Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*, 59-70, Kural, O., Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş., İstanbul, Türkiye.
- Kendry, P.**, 2002b. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, *Bioresource Technology*, **83**, 47-54.
- Krevelen, V.**, 1993. Coal: Typology-Physics-Chemistry-Constitution, Elsevier Science, Amsterdam.
- Kuen, S.L., Wang H. P., Liu S.H., Chang N.B.**, 1999. Pyrolysis kinetics of refuse-derived fuel, *Fuel Processing Technology*, **60**, 103–110.

- Kural, O.**, 1998. Kömür, Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş.
- Loo, S., Koppejan, J.**, 2008. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing, Earthscan, London.
- Meriçboyu, A., Beker, Ü., Küçükbayrak, S.**, 1998. Kömürün Kullanımını Belirleyen Önemli Özellikleri, *Kömür, Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*, 149-164, Kural, O., Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş., İstanbul, Türkiye.
- Meyers, R.A.**, 1982. Coal Structure, Academic Pres, Inc., New York.
- Myung, W.S., Sang, D.K., See, H.L., Jae, G.L.**, 2010. Pyrolysis characteristics of coal and RDF blends in non-isothermal and isothermal conditions, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **88**, 160–167.
- Nithikul, J.**, 2007. Potential of refuse derived fuel production from Bangkok municipal solidwaste. Thailand: Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development.
- Özel, A.**, 2011. Çimento Üretiminde Atıktan Türetilmiş Yakıt Kullanımı ve Çevresel Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Özpeker, I.**, 1998. Kömür Kimyası ve Teknolojisi, 7-30, İstanbul, Türkiye.
- Pekin, A.V.**, 2005. Çimento Sanayinde Alternatif Yakıt Kullanımı, Akçansa Çimento Sanayii ve Tic. A.Ş.
- Piao, G.L., Aono, S., Kondoh, M., Yamazaki, R., Mori, S.**, 2000. Combustion test of refuse derived fuel in a fluidized bed, *Waste Management*, **20**, 443–447.
- Ruppert, L.F.** 2002. The US Geological Survey's national coal resource assessment: the results, *Coal Geology*, **50**, 247–274.
- Sika, P.**, 2000. Energy from MSW, RDF Pelletization, A Pilot Indian Plant, Department of Science and Technology, Government of India.
- Shi, L., Liu, Q., Guo, X., Wu, W.**, 2013. Pyrolysis behavior and bonding information of coal—a TGA study, *Fuel Processing Technology*, **108**, 125–132.
- Smooth, L.D.**, 1991. Coal and Char Combustion in Fossil Fuel Combustion, Ed.Bartok, W., Wiley-Interscience, New York.
- Speight, J.G.**, 2005. Handbook of coal analysis, John Wiley& Sons, Inc., New York.
- Suksankraisorn K., Patumsawad S., Vallikul P., Fungtammasan B., Accary A.**, 2004. Cocombustion of municipal solid waste and Thai lignite in a fluidized bed, *Energy Conversion Management*, **45**, 947–62.

- Taylor, D.R., Tompkins, M.A., Kirton, S.E., Mauney, T., Natusch, D.F.,** 1992. Analysis of Fly Ash Produced from Combustion of Refuse-Derived Fuel and Coal Mixtures, *Environ. Sci. Technol.*, **16**, 148-154.
- Toftegaard, M., Brix, J., Jensen P.A., Glarborg, P., Jensen, A.D.,** 2010. Oxy-fuel combustion of solid fuels, *Prog Energy Combust Sci*, **36**, 581–625.
- Topsak, E.,** 2011. Pyrolysis process effects on the structural properties of biomass and its functional group distribution, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı,** 2007. *Dokuzuncu kalkınma planı madencilik özel ihtisas komisyonu raporu*, Ankara.
- Vounatsos, P., Atsonios, K., Agraniotis M., Panopoulos, K., Grammelis, P.,** 2013. Report on RDF/SRF gasification properties, *Energy Waste*, **9**, 1-40
- Wan, H.P., Chang, Y.H., Chien, W.C., Lee, H.T., Huang, C.C.,** 2008. Emissions during co-combustion of RDF-5 with bituminous coal, paper sludge and waste tires in a commercial circulating fluidized bed co-generation boiler, *Fuel*, **87**, 761–767.
- Wei, X.L., Wang, Y., Liu, D.F., Sheng, H.Z., Tian, W.D., Xiao, Y.H.,** 2009. Release of sulfur and chlorine during co-firing RDF and coal in an internally circulating fluidized bed. *Energy & Fuels*, **23**, 1390–1397.
- Williams, A., Pourkashanian, M. and Jones, J.M.,** 2000. Combustion and Gasification of Coal, Taylor&Francis, New York.
- Yaman, S., Çelik, M.S. ve Küçükbayrak, S.,** 1998. Kömürün Kükürdünün Giderilmesi, *Kömür, Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri*, 337-352, Kural, O., Özgün Ofset Matbaacılık A.Ş., İstanbul, Türkiye.
- Xu, W.C. and Kumagai, M.,** 2002. Nitrogen evolution during rapid hydrolysis of coal, *Fuel*, **81**, 2325-2334.
- Url-1** <[http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/ statical\\_ review\\_ of\\_ world\\_ energy\\_ 2013.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/ statical_ review_ of_ world_ energy_ 2013.pdf) >, alındığı tarih : 22.05.2015.
- Url-2** <[http://www.enerji.gov.tr/yayinlar\\_raporlar/Sektor\\_Raporu\\_TKI\\_2012.pdf](http://www.enerji.gov.tr/yayinlar_raporlar/Sektor_Raporu_TKI_2012.pdf) >, alındığı tarih : 22.05.2015.
- Url-3** [http://www.istac.com.tr/projeler/arge\\_projeleri/tubitak-projeleri/](http://www.istac.com.tr/projeler/arge_projeleri/tubitak-projeleri/) alındığı tarih : 15.02.2015.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Gülşen KURT

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Bursa/ 13.03.1989

**Adres:** Yıldırım/BURSA

**E-Posta:** gulsenkurt@gmail.com

**Lisans:** Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

**Yüksek Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi