

66828

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## ÇEŞİTLİ KATKI MADDELERİNİN KÖMÜR KÜLLERİNİN

### ERGİME SICAKLIKLARINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kim.Müh. Başak AKSELLİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : Haziran 1997

Tezin Savumulduğu Tarih : Haziran 1997

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hüsnü ATAÖL 25.07.1997 *Ataöl*

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sadriye KÜÇÜKBAYRAK-OSKAY *Sadriye*

Prof. Dr. Ekrem EKİNCİ *Ekrem*

HAZİRAN 1997

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, çeşitli katkı maddelerinin kül ergime sıcaklıklarına etkisi incelenecektir. Akışkan yataklı yakma sistemlerinde sıkça görülen aglomerasyon probleminin, büyük bir oranda külün anorganik yapısı ve ergime sıcaklıkları ile ilgili olduğu bilinmektedir. Bu amaçla, Türkiye genelinde 10 kömür havzasından alınan linyit numunelerine  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  maddeleri ilave edilerek, kül ergime sıcaklıklarındaki değişimler gözlenmiştir.

Bütün çalışmalarım boyunca, laboratuvarlarını kullanıma açan TÜBİTAK-MAM Enerji Sistemleri Bölümü yetkililerine, büyük yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof.dr. Hüsnü Atakül' e, TÜBİTAK-MAM' daki çalışmalarında yardımcı olan İbrahim Kurtdere' ye ve akışkan yataklı yakma sistemleri konusundaki yardımlarından dolayı Araş.Gör. Bilgin Hilmioğlu' na teşekkür ederim.

Yetişmemde emeği geçen bütün değerli hocalarıma ve aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                    | <u>Sayfa No</u> |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|
| ÖNSÖZ                                                              | ii              |
| SEMBOL LİSTESİ                                                     | iv              |
| ŞEKİL LİSTESİ                                                      | v               |
| TABLO LİSTESİ                                                      | vii             |
| ÖZET                                                               | viii            |
| SUMMARY                                                            | ix              |
| BÖLÜM 1 GİRİŞ                                                      | 1               |
| BÖLÜM 2 YANMA VE KÖMÜR YAKMA TEKNOLOJİLERİ                         | 3               |
| 2.1. Yanma                                                         | 3               |
| 2.2. Kömür Yakma Teknolojileri                                     | 4               |
| BÖLÜM 3 AKIŞKAN YATAK YAKMA SİSTEMLERİ                             | 7               |
| 3.1. Akışkan Yatakta Kömürün Yanması                               | 8               |
| 3.1.1. Akışkan Yataklı Yakıcılarda İşlevsel Bölgeler               | 8               |
| 3.2. Akışkan Yataklı Yakma Sistemlerinin Üstünlükleri ve Sorunları | 11              |
| 3.3. Akışkan Yataklı Yakma Sistemleri                              | 12              |
| 3.3.1. Atmosferik Basıncıta Çalışan Akışkan Yataklar               | 12              |
| 3.3.2. Dolanımlı veya Hızlı Akışkan Yataklar                       | 13              |
| 3.3.3. Basıncılı Akışkan Yataklar                                  | 13              |
| BÖLÜM 4 KÖMÜRÜN MİNERAL MADDE VE KÜL İÇERİĞİ                       | 15              |
| 4.1. Mineral Madde                                                 | 15              |
| 4.2. Kömür Külünün Özellikleri                                     | 16              |
| 4.2.1. Külün Ergime Özellikleri                                    | 17              |
| 4.3. Akışkan Yataklı Sistemlerde Aglomerasyon                      | 20              |
| BÖLÜM 5 deneysel çalışmalar ve sonuçların değerlendirilmesi        | 26              |
| 5.1. Kullanılan Kömür Numunelerinin Tanıtımı                       | 26              |
| 5.2. Linyit Numunelerine Uygulanan Analizler                       | 26              |

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.1. Kısa ve Elementel Analizler                                                                  | 27 |
| 5.3. Küllere Uygulanan Analizler                                                                    | 28 |
| 5.3.1. Küllerin Kimyasal Analizleri                                                                 | 28 |
| 5.3.2. Küllerin Ergime Sıcaklıklarının Saptanması                                                   | 28 |
| 5.4. Sonuçların Değerlendirilmesi                                                                   | 30 |
| 5.4.1. Özgül Kül Sıcaklıkları ile Anorganik Yapı Arasındaki İlişki                                  | 31 |
| 5.4.2. Katkı İlavesinin Özgül Sıcaklıklara Etkisi                                                   | 37 |
| 5.4.2.1. CaO İlavesinin Kül Özgül Sıcaklıklarına Etkisi                                             | 37 |
| 5.4.2.2. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> İlavesinin Kül Özgül Sıcaklıklarına Etkisi                 | 44 |
| 5.4.2.3. K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> İlavesinin Beypazarı Linyitinin Özgül Sıcaklıklarına Etkisi | 51 |
| 5.4.2.4. MgO İlavesinin Beypazarı Linyitinin Özgül Sıcaklıklarına Etkisi                            | 51 |
| 5.4.3.. Kömürlerin Aglomerasyonu ve Özgül Sıcaklıkları İle ilişkisi                                 | 54 |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER                                                                                | 60 |
| KAYNAKLAR                                                                                           | 62 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                                            | 66 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                 |   |                                                                  |
|-----------------|---|------------------------------------------------------------------|
| M               | : | Kömürün mineral madde içeriği, %                                 |
| A               | : | Kömürün kül miktarı, %                                           |
| S               | : | Kömürün kükürt içeriği, %                                        |
| IT              | : | Başlangıç deformasyon sıcaklığı                                  |
| ST              | : | Yumuşama sıcaklığı                                               |
| HT              | : | Yarı küreselleşme sıcaklığı                                      |
| FT              | : | Ergime sıcaklığı                                                 |
| T <sub>AG</sub> | : | Aglomerasyon sıcaklığı                                           |
| ΔT <sub>1</sub> | : | Aglomerasyon sıcaklığı ile başlangıç deformasyon sıcaklığı farkı |
| ΔT <sub>2</sub> | : | Aglomerasyon sıcaklığı ile yumuşama sıcaklığı farkı              |
| ΔT <sub>3</sub> | : | Aglomerasyon sıcaklığı ile yarı küreselleşme sıcaklığı farkı     |
| ΔT <sub>4</sub> | : | Aglomerasyon sıcaklığı ile ergime sıcaklığı farkı                |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                            | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1 Bir yakma sisteminin basit şematik gösterimi                                                                     | 4               |
| Şekil 2.2 Kömür yakma yöntemlerinin şematik gösterimi                                                                      | 5               |
| Şekil 3.1 Akışkan yatakta kömürün yanma sürecinin şematik olarak gösterimi                                                 | 9               |
| Şekil 3.2 Atmosferik akışkan yataklı bir yakıcının şematik şekli                                                           | 14              |
| Şekil 5.1 Kül kalıbı                                                                                                       | 29              |
| Şekil 5.2 Kül ergime testinde, piramitin özgül sıcaklıklardaki görünüşü                                                    | 30              |
| Şekil 5.3 Orjinal küllerin IT değerlerinin $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ile değişimi                       | 34              |
| Şekil 5.4 Orjinal küllerin IT değerlerinin $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{CaO})$ ile değişimi | 34              |
| Şekil 5.5 Orjinal küllerin FT değerlerinin $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ ile değişimi                       | 35              |
| Şekil 5.6 Orjinal küllerin FT değerlerinin $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{CaO})$ ile değişimi | 35              |
| Şekil 5.7 Orjinal küllerin IT değerlerinin $\%(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ ile değişimi     | 36              |
| Şekil 5.8 Orjinal küllerin FT değerlerinin $\%(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ ile değişimi     | 36              |
| Şekil 5.9 Beypazarı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                                    | 39              |
| Şekil 5.10 Çan linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                                         | 39              |
| Şekil 5.11 Elmalı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                                      | 40              |
| Şekil 5.12 Eynez linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                                       | 40              |
| Şekil 5.13 Deniz-2 linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                                     | 41              |

|            |                                                                                              |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.14 | Göynük linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                   | 41 |
| Şekil 5.15 | Göynük şisti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                     | 42 |
| Şekil 5.16 | Kısırkdere linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi               | 42 |
| Şekil 5.17 | Tunçbilek linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                | 43 |
| Şekil 5.18 | Yatağan linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO oranı ile değişimi                  | 43 |
| Şekil 5.19 | Beypazarı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi  | 45 |
| Şekil 5.20 | Çan linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi        | 45 |
| Şekil 5.21 | Elmalı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi     | 46 |
| Şekil 5.22 | Eynez linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi      | 46 |
| Şekil 5.23 | Deniş-2 linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi    | 48 |
| Şekil 5.24 | Göynük linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi     | 48 |
| Şekil 5.25 | Göynük şisti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi       | 49 |
| Şekil 5.26 | Kısırkdere linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi | 49 |
| Şekil 5.27 | Tunçbilek linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi  | 50 |
| Şekil 5.28 | Yatağan linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam Na <sub>2</sub> O oranı ile değişimi    | 50 |
| Şekil 5.29 | Beypazarı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam K <sub>2</sub> O oranı ile değişimi   | 52 |

|            |                                                                                                                |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.30 | Beypazarı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam MgO oranı ile değişimi                                  | 52 |
| Şekil 5.31 | Aglomerasyon sıcaklıklarının $\text{Na}_2\text{O}$ oranı ile değişimi                                          | 57 |
| Şekil 5.32 | Aglomerasyon sıcaklıklarının $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ oranı ile değişimi                       | 58 |
| Şekil 5.33 | Aglomerasyon sıcaklıklarının $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{CaO}$ oranı ile değişimi | 58 |
| Şekil 5.34 | Aglomerasyon sıcaklıklarının $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı ile değişimi                           | 59 |
| Şekil 5.35 | Aglomerasyon sıcaklıklarının $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı ile değişimi                           | 59 |

## TABLO LİSTESİ

|            | <u>Sayfa No</u>                                                       |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 2.1  | Kömür yanma tepkimeleri                                               | 4  |
| Tablo 2.2  | Yakma sistemlerinin kıyaslanması                                      | 6  |
| Tablo 5.1  | Kömür numunelerinin kısa analiz sonuçları                             | 27 |
| Tablo 5.2  | Kömür numunelerinin elementel analiz sonuçları                        | 27 |
| Tablo 5.3. | Kömür numunelerinin orjinal küllerinin kimyasal analiz sonuçları      | 28 |
| Tablo 5.4  | Özgül kül sıcaklıkları                                                | 33 |
| Tablo 5.5  | Küllerin anorganik içeriklerinin, kıyaslama amacıyla farklı ifadeleri | 33 |
| Tablo 5.6  | Bazı linyitlerin aglomerasyon sıcaklıkları                            | 54 |

## ÖZET

Kömür yakma sistemlerinde karşılaşılan sinterleşme ve aglomerasyon olayları, yanmanın sürekliliği açısından problem yaratmakta ve sistemin verimini olumsuz yönde etkilemektedir. Aglomerasyon, kül taneciklerinin birbirine yapışıp, katı bir kütle haline gelmesi olayıdır ve özellikle akışkan yataklı yakma sistemlerinde karşılaşılan önemli bir problemdir. Temel olarak kömürün anorganik yapı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle kül ergime sıcaklıkları ve aglomerasyon özellikleri arasında bir etkileşim olduğu sanılmaktadır.

Bu çalışmada, 9 linyit ile bir bitümlü şistin küllerinin anorganik yapıları ile özgül sıcaklıkları olarak bilinen, başlangıç deformasyon (IT), yumuşama (ST), yarı küreselleşme (HT) ve akma (FT) sıcaklıkları arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışmada, hem orijinal, hem de belirli oranlarda,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  katılarak bileşimleri değiştirilmiş olan “katkılı küller” göz önüne alınmıştır.

Küllerin anorganik yapıları, standart yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Özgül sıcaklıkları LECO AF 500 model bir cihaz kullanılarak, ASTM D 1857 ‘ ye göre oksitleyici atmosferde ölçülmüştür. Aglomerasyon sıcaklıkları ise 10 cm çapında bir akışkan yatakta ölçülmüştür.

Orijinal küllerin IT değerleri 1377-1576 K, ST değerleri 1414-1801 K, HT değerleri 1460-1814 K, FT değerleri 1482- 1844 K arasında değişmektedir. Özgül sıcaklıkları en yüksek olan kömü Eynez linyiti, en düşük olan ise Göynük bitümlü şisti olmuştur. Orijinal küllerin anorganik yapıları ile özgül sıcaklıkları arasında sistematik herhangi bir ilişki görülmemiştir. Genel olarak,  $\text{Na}_2\text{O}$  içerikleri yüksek olan kömürlerin çoğunlukla daha düşük sıcaklıklarda, buna karşın  $\text{SiO}_2$  oranları yüksek ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranları düşük kömürler ise daha yüksek sıcaklıklarda ergimiştir. Ancak bu durum incelenen bütün kömürler için geçerli değildir.

Aynı tür küllerin yapısal değişimlerini özgül sıcaklıklara etkisini görmek amacıyla, bazı küllere değişik oranlarda  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  katılarak hazırlanan katkılı küllerle yapılan ölçümlerin sonuçları, sıcaklıkları en fazla etkileyen katkının  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  olduğunu göstermiştir. Toplam  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriğine bağlı olarak, özgül sıcaklıklarda genelde bir düşme eğilimi gözlenmiştir.  $\text{Na}_2\text{O}$  katkısı bazı kömürlerin ergime sıcaklıklarını 120 K kadar düşürmüştür.

Kömürlerin aglomerasyon sıcaklıkları, deformasyon sıcaklıklarına (IT) altında kalmaktadır. Aglomerasyon sıcaklıkları IT değerlerinden 175-346 K, ergime sıcaklıklarından ise, yaklaşık olarak 346-551 K daha düşük olmuştur. Akışkan yataklarda yanan kömür taneciklerinin sıcaklığının ölçülen ortalama yatak sıcaklığından yaklaşık olarak, 100-150 K daha yüksek olduğu göz önüne alındığında, aglomerasyonun deformasyon sıcaklığında veya ona çok yakın sıcaklık seviyelerinde başladığı anlaşılmaktadır.



## THE EFFECT OF ADDITIVES ON THE FUSION TEMPERATURES OF COALS

### SUMMARY

In coal processing, coal ash may cause serious problems such as clinker trouble in fluidized bed gasifiers, sintering in stoker combustors, agglomeration in fluidized bed combustors, fouling of heating surface in combustors, vaporization of harmful elements from the ash. Therefore, prediction of ash behavior is of vital importance, particularly for combustion systems

In fluidized bed combustion systems, agglomeration (sintering) of ash (coal) and bed material particles can cause severe problems. As a result of agglomeration, deposition can form on heat transfer surfaces and bed walls. Accumulation of sticky ashes on surfaces can cause substantial decrease in heat transfer coefficient, disturb air distribution and consequently fluidization in the bed. In the most serious cases, sintering of particles can lead to heavy agglomerate mass which finally disturb fluidization and combustion completely. In these cases the system has to be dismantled in order to remove agglomerates and restore the normal operation.

The measurement of so called characteristic ash temperatures, namely initial deformation temperature (IT), softening temperature (ST), hemispherical temperature (HT) and fusion temperature (FT) is considered to be one of the best methods to estimate the behavior of coal ash in coal combustors in practice.

The agglomeration is a process which describes formation of agglomerates from particles under heating. The earlier works suggest that, in fluidized bed combustors, agglomeration can occur as a result of partial melting and stickiness of bed particles due to the operating of fluidized bed at temperatures higher than the melting point of coal. But later research indicate that agglomeration can occur at temperatures much lower than the ash fusion temperature. The temperature at which agglomeration starts is called first sintering temperature.

The properties and behavior of ashes are remarkably different among coals and since coal ash is extremely complex mixture of minerals it is not possible to predict the fusion behavior of such mixture from its chemical composition with a reasonable accuracy. Many correlations have been developed to estimate the softening and fusion behavior of ashes from their chemical composition, in general, all of them suggest that the softening and fusion temperatures increase as the amounts of acidic oxides ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in the ash increase. Therefore, it is essential to study the individual coal deposit in order to see how they exactly behave in practical combustion.

The objectives of this work is to determine the characteristic ash temperatures of some major Turkish lignites, to investigate the relationship between their temperatures and inorganic compositions and relationship between ash fusion

temperatures and inorganic compositions and relationship between ash fusion temperature and agglomeration temperature of some selected coals. The effect of addition of some metal oxides which are the major component of ashes of coals on the characteristic temperatures is also investigated.

Ten coal samples studied were taken from the major lignite deposits in various districts of Turkey. One sample out of ten is oil shale. The samples are ;

- 1 ) Beypazarı - Ankara
- 2 ) Çan - Çanakkale
- 3 ) Elmalı ( Soma ) - Manisa
- 4 ) Eynez - Manisa
- 5 ) Deniz ( Soma ) - Manisa
- 6 ) Göynük - Bolu
- 7 ) Göynük Oil shale - Bolu
- 8 ) Kırakdere - Manisa
- 9 ) Tunçbilek - Kütahya
- 10 ) Yatağan - Muğla

The following analyses were carried out in order to characterize coal samples and ashes : Proximate analysis, elemental analysis, measurement of characteristic temperatures and chemical analysis of ashes.

Coal samples were crushed and sieved to - 200 mesh and ashes were prepared using the TS 330 procedures. Ash compositions were determined according to ASTM procedure D 2795 - 86. Ash fusion measurements were made by using a LECO AF - 500 type ash fusion furnace with digital read - out, sensivity of 5K and a maximum temperature of 1844 K according to the ASTM procedure D 1857 - 68. Ash cones were prepared and put into the furnace and were heated to the fusion temperature with a heating rate of 8 K/ min. under oxidizing gas atmosphere. The results are presented as the an average values of repeated measurements.

The results of chemical analysis of ashes and ash fusion measurements are presented in Table 1 and Table 2 respectively.

As seen from Table 2, initial deformation temperatures and fusion temperatures of lignites change between 1377 - 1573 K and 1482 - 1844 K, respectively. The fusion temperature of Eynez lignite was out of the temperature range of ash fusion furnace and it could not be measured exactly.

Comparison of Table 1 and Table 2 indicated that, in general, coals with higher  $\text{SiO}_2$  and lower  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  contents such as Eynez, Elmalı, Kırakdere, Tunçbilek and Yatağan lignites have higher initial deformation and fusion temperatures while coals with higher  $\text{Na}_2\text{O}$  percentages have lower fusion temperatures. However, no regular relationship is seen between chemical composition and critical temperatures of ashes. For example, in spite of their high  $\text{Na}_2\text{O}$  percentages, Eynez, Kırakdere and Tunçbilek lignites have fusion temperatures higher than that those with lower  $\text{Na}_2\text{O}$  percentages.

In Figure 1, the initial deformation temperatures are given as a function of total percentage of ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$ ). These oxides are called basic oxides which are considered, chemically, to be the most active components and have the leading role in agglomeration (sintering) behavior of ash. It is clear from figure that no regular relationship between composition and deformation temperature can be

described for original coal ashes. The initial deformation temperature differs widely even for ashes having nearly the same total basic oxide percentage.

A set of experiments was carried out by using of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{MgO}$  as additives to ashes in order to investigate the relationship between the

Table 1. Chemical Composition of Ashes (wt%)

| Coal        | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ |
|-------------|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Beyşehir    | 32.58          | 21.09                   | 13.71        | 4.65         | 23.04                   | 3.25                  | 1.09                 |
| Çan         | 13.80          | 27.73                   | 19.53        | 1.74         | 35.23                   | 1.30                  | 0.26                 |
| Elmalı      | 22.00          | 13.45                   | 26.36        | 2.00         | 12.91                   | 1.04                  | 1.55                 |
| Eynez       | 35.73          | 16.17                   | 12.71        | 2.41         | 13.28                   | 7.01                  | 1.49                 |
| Deniş-2     | 16.48          | 21.55                   | 20.42        | 1.21         | 22.32                   | 1.68                  | 0.90                 |
| Göynük      | 25.45          | 19.92                   | 11.18        | 1.21         | 27.82                   | 5.04                  | 0.60                 |
| Göynük Şist | 25.58          | 24.66                   | 9.34         | 1.89         | 12.39                   | 4.11                  | 1.00                 |
| Kısrakdere  | 21.56          | 24.26                   | 13.98        | 2.91         | 13.91                   | 11.08                 | 2.10                 |
| Tunçbilek   | 27.90          | 16.12                   | 13.57        | 6.78         | 16.69                   | 13.76                 | 1.80                 |
| Yatağan     | 21.76          | 28.87                   | 10.95        | 0.74         | 15.82                   | 1.02                  | 1.22                 |

Table 2. Characteristic Ash Temperatures.

| Coal        | IT (K) | ST (K) | HT (K) | FT (K) |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| Beyşehir    | 1388   | 1429   | 1493   | 1569   |
| Çan         | 1498   | 1595   | 1621   | 1669   |
| Elmalı      | 1485   | 1542   | 1603   | 1684   |
| Eynez       | 1576   | 1801   | 1814   | >1844  |
| Deniş-2     | 1430   | 1484   | 1528   | 1558   |
| Göynük      | 1391   | 1417   | 1444   | 1482   |
| Göynük Şist | 1377   | 1414   | 1460   | 1560   |
| Kısrakdere  | 1501   | 1571   | 1641   | 1673   |
| Tunçbilek   | 1511   | 1538   | 1592   | 1693   |
| Yatağan     | 1522   | 1548   | 1565   | 1703   |

IT : Initial deformation temperature, ST : Softening temperature, HT : Hemispherical temperature, FT : Fusion temperature.

composition and fusion characteristics for the individual ashes. In these experiments,  $\text{CaO}$  and  $\text{Na}_2\text{O}$  contents of all ashes were increased by adding of  $\text{CaO}$  and  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .  $\text{K}_2\text{CO}_3$  and  $\text{MgO}$  were added only to Beyşehir lignite ash.

The characteristic temperatures of Beyşehir, Elmalı, Eynez, Tunçbilek and Yatağan lignites and Göynük oil shale decreased regularly with increasing  $\text{CaO}$  content while no considerable changes was observed for other lignites. A maximum decrease of 130 K was determined in fusion temperature with an increase of 9% in  $\text{CaO}$  for Eynez and Yatağan lignites.

The  $\text{Na}_2\text{O}$  content of ashes was increased by using  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Increasing of the amount of  $\text{Na}_2\text{O}$  lowered the characteristic temperatures of Beyşehir, Çan, Eynez, Kısrakdere, Tunçbilek and Yatağan lignite ashes. Temperature profiles of Elmalı

lignite ash had a minimum around 8%  $\text{Na}_2\text{O}$  below which temperatures decreased while above which increased slightly with increase in  $\text{Na}_2\text{O}$  content. Increasing of  $\text{Na}_2\text{O}$  content by 10%, caused a 120 K and 180 K reduction in fusion temperatures of Beypazarı and Eynez lignite, respectively, which were the highest reductions determined. Other ashes were not affected significantly by the  $\text{Na}_2\text{O}$ .

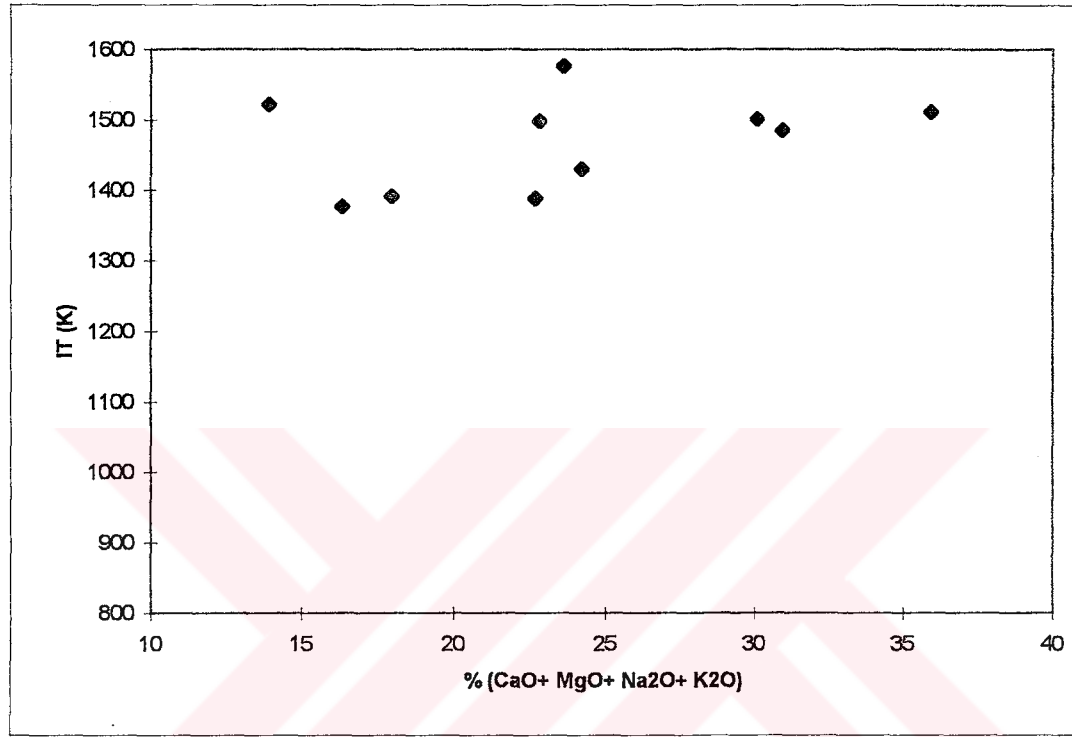


Figure 1. Change of fusion temperature of original coal ashes with  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO})$  %

Another topic studied in this work is the relationship between the agglomeration and characteristic temperatures of lignites. For this purpose, a set of experiments was performed in which the agglomeration temperatures ( $T_{AG}$ ) of Beypazarı, Çan, Eynez, Kısırakdere, Göynük and Yatağan lignites were determined in a 10 cm id fluidized bed combustor. Results of agglomeration measurements are compiled in Table 3. The difference between agglomeration temperature and characteristic temperatures are also included in the Table. The differences described as  $\Delta T_1 = IT - T_{AG}$ ,  $\Delta T_2 = ST - T_{AG}$ ,  $\Delta T_3 = HT - T_{AG}$ ,  $\Delta T_4 = FT - T_{AG}$

Agglomeration temperatures listed in Table 3 are lowest temperatures where first agglomerates formed. Data in the table indicate that agglomeration of lignite can occur at temperatures several hundred degrees below fusion temperature for a lignite in a fluidized bed coal combustor. Values of  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$ ,  $\Delta T_4$  show that the agglomeration behavior of lignites with different ash compositions vary widely and can not be explained on the basis of ash fusion temperature.

Table 3. Agglomeration Temperature of Some Lignites.

| Coal        | $T_{AG}$<br>(K) | $\Delta T_1$<br>(K) | $\Delta T_2$<br>(K) | $\Delta T_3$<br>(K) | $\Delta T_4$<br>(K) |
|-------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Beypazarı   | 1173            | 215                 | 256                 | 320                 | 396                 |
| Çan         | 1323            | 175                 | 272                 | 298                 | 346                 |
| Eynez       | 1293            | 283                 | 508                 | 521                 | 551                 |
| Göynük      | 1093            | 298                 | 324                 | 351                 | 389                 |
| Kısırakdere | 1273            | <228                | <298                | <368                | <400                |
| Yatağan     | 1196            | 326                 | 352                 | 369                 | 507                 |

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Türkiye’de özellikle son yıllarda, endüstrileşme, nüfus artışı, yapısal değişiklikler ve gelir seviyesindeki yükselmeye paralel olarak enerji gereksinimi ve açığı artmaktadır. Bu açığı yerli kaynaklarla karşılamak mümkün olmamaktadır. Enerji açığını karşılamak için 1970’ler öncesinde başvurulan yol, petrol ve petrol ürünlerini ithal etmek olmuştur. Ancak 1970 ‘ li yıllarda patlak veren enerji krizinden sonra, ithal petrolün maliyetleri hızla yükselmiş ve enerji gereksinimini karşılamak için yerli kaynakların daha büyük ölçülerde devreye alınması yoluna gidilmiştir. Türkiye’deki en önemli enerji kaynakları, linyitler ve hidrolik potansiyellerdir. 1970 yılından sonra hidrolik potansiyel ve linyite dayalı enerji üretimi hızla artmıştır. Türkiye’de, linyit hem elektrik üretiminde hem de ısınmada kullanılmaktadır. 1990 yılında 45.9 milyon ton olan linyit tüketimi, 1995 yılında 63 milyon ton civarına çıkmıştır. Son yıllarda, petrolün yanısıra, taşkömürü ve doğal gazın ithal edilmesine karşı bu artış eğiliminin devam edilmesi beklenmektedir. Nitekim geleceğe yönelik olarak hazırlanan üretim projeksiyonlarında 2010 yılında hedeflenen linyit üretimi, 1995 yılı hedefinin üç katıdır [1].

Türkiye’nin linyit rezervleri yaklaşık 8 milyar ton (~1.7 milyar TEP\*) dur. Bu kömürler, yüksek nem, kül, kükürt içerikleri ve düşük ısı değerleri nedeniyle yüksek bir kirlilik potansiyeline sahiptirler. Linyit rezervlerinin yaklaşık yarısının ısı değeri 6276 kJ/kg’ın altındadır. Isıl değer 12552 kJ/kg olanların oranı ise yalnızca %7 civarındadır.

Günümüzde linyitler değerlendirilmek amacıyla en yaygın şekilde kullanılan yöntem, yakmaktır. Linyitlerin yakılması beraberinde önemli çevre sorunları

getirmektedir. Bu sorunlar hem linyitin hem de yakma sistemlerinin özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Günümüzde yakma konusunda kaydedilen en önemli gelişme akışkan yatak teknolojisinin geliştirilmesi olmuştur. Akışkan yataklı yakma sistemlerinin sayısı her geçen gün artmaktadır.

Anorganik yapıdaki değişikliğin, kömür kül yapısını ve ergime sıcaklığını etkilediği ve bununla akışkan yatak yanma koşullarında aglomerasyona neden olduğu bilinmektedir.

Ancak akışkan yataklı yakıcılarda karşılaşılan en önemli problemlerden biri, aglomerasyon olayıdır. Aglomerasyon, kömür taneciklerinin birbirine yapışması ve daha büyük bir kütleyle dönüşmesi olayıdır. Bu olay, akışkan yataklı yakma sistemlerinde çalışma sıcaklığının üst sınırını belirlemektedir. Aglomerasyonun büyük ölçekte kömürlerin anorganik yapısal özelliklerinden kaynaklandığı sanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, linyitlerin anorganik yapısı ile kül yapısı ve ergime sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemek ve bundan hareket ederek, linyitlerin aglomerasyon eğilimlerini belirlemektir.



## BÖLÜM 2

### YANMA VE KÖMÜR YAKMA TEKNOLOJİLERİ

#### 2.1.YANMA

Yanma, yakıtların yanabilen kısımlarının oksijenle reaksiyona girerek gaz ürünlere dönüşmesi olayıdır. Bir başka tanımla yakıtların oksitlenmesi olayıdır. Yanma olayı sırasında ısı şeklinde enerji açığa çıkmaktadır. Üretilen enerji miktarı, yakıtın özelliklerine bağlıdır. Enerjinin yanısıra, ışık ve ses de oluşmaktadır. Fosil yakıtlar temel olarak karbon, hidrojen ve oksijenden oluşmaktadır. Bunların yanısıra, çok daha az oranlarda olmak üzere azot, kükürt, klor ve diğer elementler de bulunmaktadır. Yanma sırasında organik kısımlar gaz ürünlere dönüşürken, inorganik kısımlar küle dönüşmektedir.

Yeterli oksijenin olduğu normal yanma koşullarında, karbon karbondioksit, hidrojen suya (buhara), kükürt kükürt-oksitlerine dönüşmektedir. Yanmanın tam olmadığı durumlarda, CO, is, kurum, katran,... gibi ürünler oluşmaktadır. Bu durum yanma veriminin düşük kalmasına neden olmaktadır. Kömür yanma tepkimelerine ait bilgiler Tablo 2.1.'de verilmiştir. Termodinamik açıdan R2-R5 tepkimeleri, 2273 K' den daha düşük sıcaklıklarda tersinmez tepkimelerdir. 1123 K ve 1173 K sıcaklıklarında R6 ve R7 tepkimeleri tersinir tepkimelerdir. 973 K' de R1 'den R5'e kadar olan tepkimeler yanmada daha etkin rol oynarlar. 1123-1173 K' de R6 ve R7 tepkimelerinin yanı sıra, diğer tepkimelerin de hızları artar. Bu nedenle yanma verimi, yüksek sıcaklıklarda daha yüksektir [2].

Katı yakıtların yanma ürünleri arasında yer alan külün ve atıkların enerji üretimi açısından herhangi bir katkısı olmamaktadır. Aksine bunlar ısı tüketmektedirler.



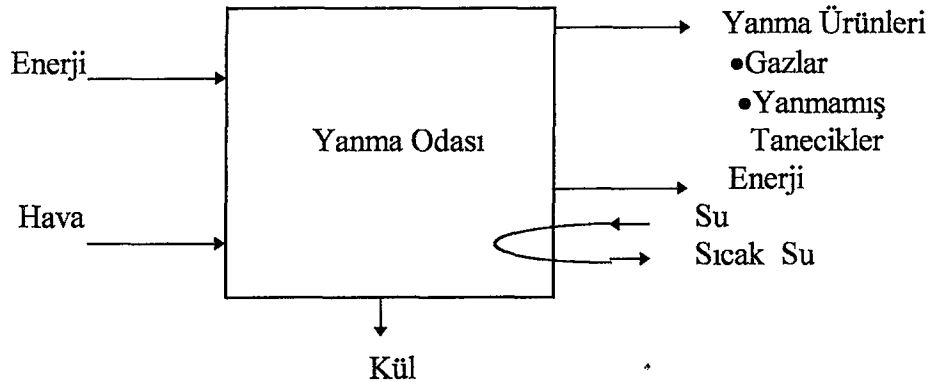
## 2.2.KÖMÜR YAKMA TEKNOLOJİLERİ

Yakma, günümüzde kömür kullanımında en yaygın şekilde kullanılan yöntemlerden biridir ve yakın gelecekte de öyle kalacağı anlaşılmaktadır. Bir yakma sistemi basitçe aşağıdaki şematik şekille gösterilebilir (Şekil 2.1).

Bir yakma sistemi genel olarak, bir yakıt besleyici veya brülör, yanma odası veya fırın ve yanma sonucu açığa çıkan enerjinin önemli bir bölümünün geri kazanıldığı ısı değiştirici elemanlarından oluşmaktadır. Kömür yakma sistemleri, sabit yatakta yakma sistemleri, akışkan yataklar ve toz kömür yakma sistemleri olmak üzere başlıca üç grupta toplanmaktadır.

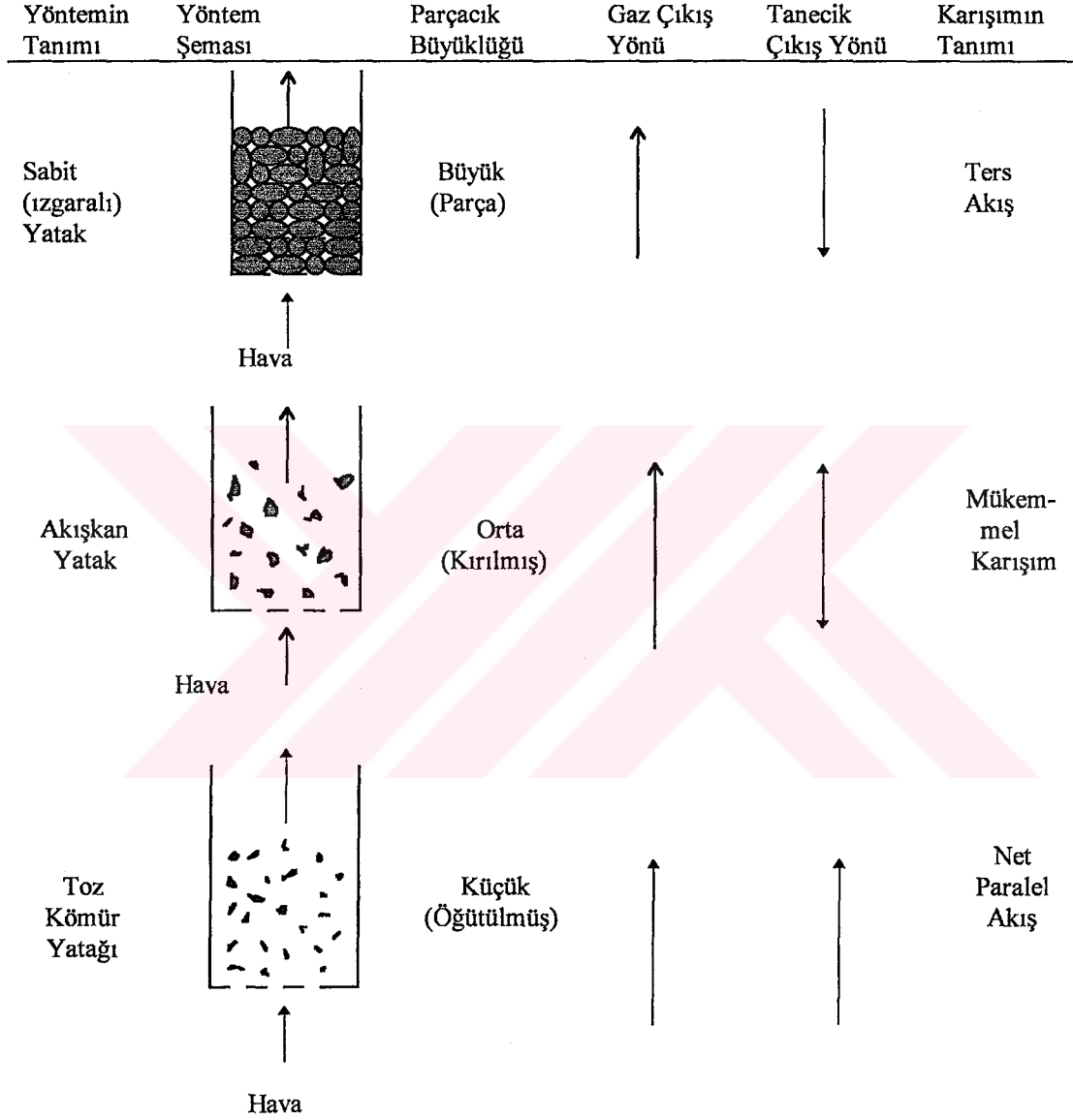
Tablo 2.1-Kömür Yanma Tepkimeleri [2].

| Tepkime | Proses                        | Tepkimeler                                                                                  | Tepkimenin Yaklaşık Başlama Sıcaklığı ( K ) |
|---------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| R1      | Kömür Kombinasyonu            | $\text{Kömür} \rightarrow \text{Yarı kok} + \text{Uçucu maddeler}$                          | 648                                         |
| R2      | Uçucu maddelerin yanması      | $\text{Uçucu maddeler} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ | 698                                         |
| R3      | Yarı kok yanma                | $\text{vC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{pCO} + \text{qCO}_2$                              | 773                                         |
| R4      | CO yanması                    | $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$                                          | 848                                         |
| R5      | Hidrojen yanması              | $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$                                  | 582                                         |
| R6      | C/H <sub>2</sub> O gazlaşması | $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$                      | 1123                                        |
| R7      | C/CO <sub>2</sub> gazlaşması  | $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$                                         | 1173                                        |



Şekil 2.1. Bir Yanma Sisteminin Basit Şematik Gösterimi.

Yakma sistemlerinin temel prensipleri Şekil 2.2' de şematik olarak gösterilmiştir: Bu şekilde görüldüğü gibi, katı-gaz hareket almasıya bağlı olarak tanımlanmaktadır [3].



Şekil 2.2-Kömür Yakma Yöntemlerinin Şematik Gösterimi.

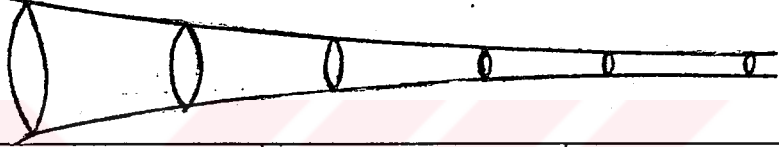
Akışkan yataklarda kömür havada asılı kalarak yanmaktadır. Hava ile kömür tanecikleri arasında mükemmel bir karışım vardır. Kömür tanecik boyutu genellikle 1-10 cm' dir.

Toz kömür yakma sistemlerinde kömür mikron mertebesine (1-100  $\mu$ m) kadar öğütüldükten sonra hava ile karıştırılmakta ve bir yakma odasında yakılmaktadır. Günümüzde en çok kullanılan yakma yöntemidir.

Sabit yataklı yakıcılarda, kömür sabit ızgaralar üzerinde yanmaktadır. Kömür iri parçalar halinde olabilmektedir. Kömür tanecikleri genel olarak hareketsizdir, ancak ızgara hareket edebilmektedir.

Yakma sistemleri çeşitli yönleriyle Tablo 2.2’de genel olarak kıyaslanmıştır.

Tablo 2.2-Yakma Sistemlerinin Kıyaslanması.

| Parametreler                    | Yakma Sistemleri                                                                   |                             |                           |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                                 | Yüzeyde Yakma<br>(ızgara)                                                          | Akışkan Ort. Yakma<br>(AYY) | Hacimde Yakma<br>(Brülör) |
| Yakıt Tane<br>Büyüküğü          |  |                             |                           |
| Tane hareketi                   | Yüzeyde hareketsiz                                                                 | Yoğun türbülanslı           | Hacimde askıda            |
| Uygulama                        | Eski                                                                               | En yeni                     | Yeni                      |
| Yakıt                           | Kömür                                                                              | Her türlü yakıt             | Gaz,sıvı,toz kömür        |
| Yakıt kapasitesi                | Düşük                                                                              | Orta                        | Yüksek                    |
| Yatırım maliyeti<br>(izolasyon) | Daha yüksek                                                                        | Yüksek                      | Düşük                     |
| SO <sub>2</sub> kontrolü        | Çok sınırlı                                                                        | Etken kontrol               | Sınırlı                   |
| No <sub>x</sub> kontrolü        | Çok sınırlı                                                                        | Etken kontrol               | Sınırlı                   |
| Partikül kontrolü               | Çok sınırlı                                                                        | Yüksek                      |                           |
| Isı depolama<br>özellği         | Sınırlı                                                                            | Çok yüksek                  | Sınırlı                   |
| Yakıt kontrolü                  | Sınırlı                                                                            | İyi                         | Çok iyi                   |
| Isı transferi                   | Çok sınırlı                                                                        | Çok yüksek                  | Sınırlı                   |
| Kütle transferi                 | Çok sınırlı                                                                        | Çok yüksek                  | Sınırlı                   |
| Yatak sıcaklığı                 | Yüksek                                                                             | En düşük                    | Yüksek                    |
| Yanma yoğunluğu*                | Düşük                                                                              | Yüksek                      | Daha yüksek               |
| Yanma verimi                    | Düşük                                                                              | Yüksek                      | Daha yüksek               |
| Yatak ebatları                  | En büyük                                                                           | Küçük                       | Büyük                     |

\*Birim hacimden çekilen ısı enerjisi.

## BÖLÜM 3

### AKIŞKAN YATAK YAKMA SİSTEMLERİ

Akışkan yatak teknolojisinin en büyük uygulama alanlarından biri kömürlerin yakılmasıdır. Bu teknoloji, 1930' dan beri önemli bir değişikliğe uğramayan yakma teknolojisinde, önemli bir ilerleme olarak görülmektedir. Akışkan yatakta yakma konusundaki çalışmalar 1970' lerden sonra yoğunlaşmıştır. 1970' lerde yaşanan iki önemli petrol krizinden sonra, dünyada genel olarak kömüre yeniden bir dönüş başlamıştır. Kömür, dünyada bilenen en büyük fosil yakıt kaynaklarının başında gelmektedir. Ancak kömürün kullanımındaki artış beraberinde önemli çevre sorunlarını da getirmiştir. Bu, hem kömürün özelliklerinden hem de kullanılan teknolojinin yetersizliğinden kaynaklanmaktadır. Kömürü değerlendirmek için halen dünyada en yaygın şekilde kullanılan yöntem “yakma”dır. Kömürün yanması sırasında ortaya çıkan çeşitli kirletici gaz ve tanecik yayınımları hava kirliliğinde çok büyük bir rol oynamaktadır. Bu kirliliğin etkileri yerel ve ulusal sınırları aşarak komşu bölge ve ülkeleri etkileyebilmektedir. Kısacası bu kirlilik küresel bir sorun niteliği taşımaktadır. Buna paralel olarak, günümüzde çevre konusunda dünya kamu oyunda büyük bir duyarlılık bulunmaktadır. Bu nedenle çevre konusunda ulusal ve uluslararası düzeyde çeşitli standart ve kıstaslar konulmakta ve bunlar gün geçtikçe daha da sertleşmektedir. Bu kıstaslara uymak yine ulusal ve uluslararası yaptırımlara bağlanmaktadır.

Akışkan yatak, daha sonraki bölümlerde tartışılacağı gibi çeşitli nitelikleri ve üstünleri ile kömür yakma konusunda önemli bir seçenek olarak görülmektedir.

Akışkanlaşmanın temel prensipleri ve özellikleri 4,5,6,7 nolu kaynaklarda ayrıntılı bir şekilde işlenmiştir.

### 3.1.AKIŞKAN YATAKDA KÖMÜRÜN YANMASI

Akışkan yatakda yanma, kömür taneciklerinin hava ile akışkanlaştırılmış ve kömürün tutuşma sıcaklığına kadar ısıtılmış kum, kireçtaşı, kül veya bunların karışımından oluşmuş bir ortamda yanması şeklinde gerçekleşmektedir. Kömür taneciklerinin karışım içindeki derişimi yaklaşık %5 civarında kalmaktadır [8]. Yüksek oranlardaki inert maddenin karışması ile oluşan türbülans ortam, yanma sonucu açığa çıkan enerjiyi hızlı bir şekilde tüm yatak hacmine yayarak tekdüze bir sıcaklık dağılımını sağlamaktadır. Çalışma sıcaklığı genellikle 1073-1173 K arasında tutulmaktadır. Bu sıcaklık diğer geleneksel yakma sistemlerinin çalışma sıcaklığından yaklaşık 200-300 K daha düşüktür. Yanan kömür taneciklerinin sıcaklığının ise yatağın ölçülen sıcaklığının 150-200 K üstünde olduğu sanılmaktadır [9]. Ancak, akışkan yatağın çalışma sıcaklığı, kömürün özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir.

Akışkan yataklarda kömürün yanma mekanizması, gerek akışkan yatağın karmaşık hidrodinamik davranımı, gerekse kömür taneciğinin yanma sürecinde geçirdiği aşamalar nedeni ile tam olarak aydınlanmamıştır [10]. Akışkan yatağa atılan bir tanecik, genel olarak aşağıda belirtilen aşamalardan geçerek yanmaktadır [11]:

1. Ön ısınma,

2. Uçucu maddelerin çıkışı ve yanması (uçucu madde yanma süresince kömür daha çok yüzeye yakın üst bölgelerde kalma eğilimi gösterir),

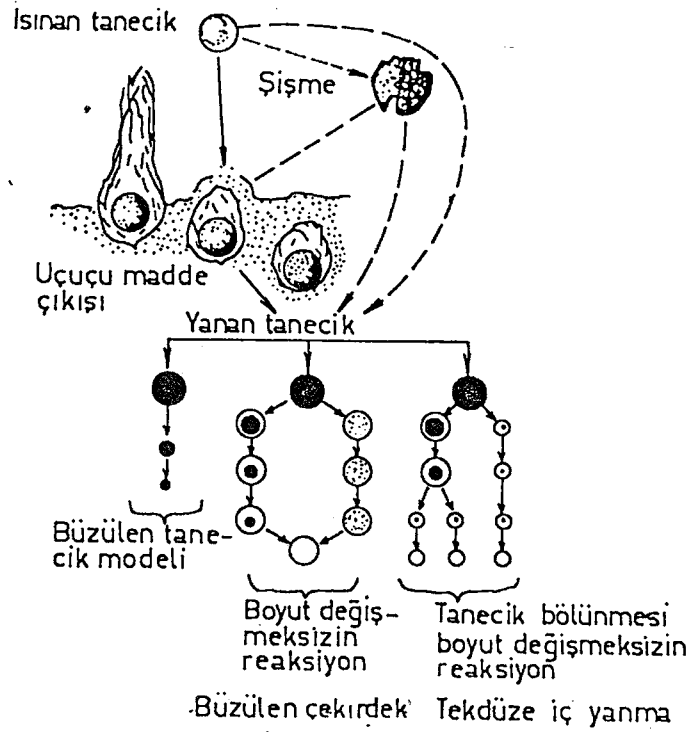
3. Şişme ve birinci parçalanma (bazı kömür türleri için),

4. Yarı-kok yanması.

Bu aşamalar Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir.

#### 3.1.1. Akışkan Yataklı Yakıcılarda İşlevsel Bölgeler

Akışkan yataklı yakıcılarda yanma değişik koşullarda gerçekleşebilmektedir. Bu açıdan başlıca iki bölgeden söz etmek mümkündür: 1. Aktif yatak ,2. Serbest bölge.



Şekil 3.1. Akışkan Yataкта Kömürün Yanma Sürecinin Şematik Olarak Gösterimi.

- I. Aktif Yatak Bölgesi : Kömürün yandığı bölgedir. Hidrodinamik olarak habbe ve sürekli fazlardan oluşmaktadır. Yanma önemli ölçüde bu bölgede gerçekleşmektedir. Yarıkok yanması tümüyle burada gerçekleşmektedir.
- II. Serbest Bölge : Aktif yatak yüzeyinin üstündeki bölgedir. Bu bölge, uçucu maddeler ve aktif yataktan sürüklenen ince kömür tanecikleri için, bir karışma ve yanma bölgesi işlevini görmektedir. Tam yanmanın sağlanması için ikincil hava beslemesi bu bölgede yapılmaktadır. Bölge aynı zamanda taşınım ayrışma bölgesi olarak da görev yapmaktadır. Kömür derişiminin büyük olması durumunda kısmi yanma sonucu bu bölgede bir miktar CO oluşabilir.

Akışkan yataкта bu iki bölgeyi keskin çizgilerle ayırmak mümkün değil. Yanma koşulları açısından akışkan yatağa bakıldığında şu alt bölgeler görülebilir [2]:

**1.Bölge:** Dağıtıcı eleğin hemen üstündeki bölgedir. Oksijence zengindir. Bölgede hava ve kömür çok iyi karışmakta ve tam yanma gerçekleşmektedir. Yanmanın nitelikleri kömürün özellikleri, dağıtıcı elek tasarımı ve kömürün beslenme şekli gibi faktörler tarafından etkilenmektedir. Bölgedeki gaz faz temel olarak hava ve  $CO_2$ 'den oluşmaktadır.

**2.Bölge:** İki fazlı habbe modeli temel alınarak tanımlanan bu bölge iki fazdan oluşan aktif yatak bölgesidir; sürekli faz ( A ), habbe fazı ( B ). Bu iki faz arasında iki yönlü ve sürekli bir gaz akışı vardır. Kömürün yarıkok aşamasındaki yanması burada gerçekleşmektedir. Gaz faz karışımı ise temel olarak  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  ve  $\text{O}_2$  'dan oluşmaktadır.  $\text{O}_2$  derişimi yukarıya doğru çıkıldıkça azalmaktadır.

**3.Bölge:** Aktif yatak bölgesinin hemen üstündeki sığ bir bölgedir. Hidrodinamik ve termal olarak oldukça aktif bir bölgedir. Habbeler vasıtasıyla bu bölgeye önemli ölçüde tanecik taşınmaktadır. Sürekli fazdan gelen  $\text{CO}$ , sürüklenen kömür tanecikleri ve uçucu maddeler bu bölgede kısmen karışarak yanarlar. Yanmanın yoğun olmasından dolayı özellikle yüksek oranlarda uçucu madde içeren kömürler yakıldığı takdirde, bölge ısı transferi açısından büyük önem taşımaktadır.

**4.Bölge:** Bu bölge daha önce sözü edilen serbest bölgedir [9].

Akışkan yatakta yanma niteliği ve verimi yatak sıcaklığı, hava fazlası, kömürün boyutu ve türü ve hidrodinamik koşullar tarafından etkilenmektedir. Bir miktar yanmamış kömür gazla birlikte dışarı sürüklenmektedir. Bunun yanı sıra, kül içinde bir miktar yanmamış kömür kalabilmektedir. Bu durumlarda yanma verimi %100' den küçük olmaktadır.

Literatürde yanma veriminin yatak sıcaklığı ile doğru orantılı olduğu belirtilmektedir. 1173 K'nin üstünde yanma verimi %97'ye kadar çıkabilmektedir.

Akışkan yatakta yanma sıcaklığının yüksek olması, yanma verimi ve buhar üretimi bakımından arzu edilen bir durumdur. Çalışmalar, kömür yakan akışkan yataklarda sıcaklığın teorik olarak 2473 K' e kadar çıkabileceğini göstermiştir [2]. Ancak, akışkan yatakta çalışma sıcaklığı katı yakıtın özelliklerine de bağlı olup genelde 1223-1273 K ile sınırlıdır. 1273 K' nin üzerindeki sıcaklıklarda havanın azotu, azot oksitlerine dönüştüğünden,  $\text{NO}_x$  konsantrasyonu artarak hava kirliliğine neden olmaktadır. Ayrıca, sıcaklığın 1273 K' nin üzerine çıkması durumunda alkali metal sülfat ve klorürlerin buhar basınçları yükselerek korozyon, paslanma ve erozyonu artırmaktadır. Kükürtdioksitin kireçtaşı ile tutulması, 1098-1148 K' de optimum verimle gerçekleşmektedir. Akışkan yatakta yanma olayında yanma sıcaklığının üst sınırını belirleyen en önemli faktör, aglomerasyondur. Yanan kömür taneciğinin sıcaklığı, ölçülen ortalama yatak sıcaklığından daha yüksektir. Bu nedenle görünürde düşük görünen yatak sıcaklıklarında bile aglomerasyon görülmektedir. Güvenli



operasyon açısından akışkan yataklarda çalışma sıcaklığının, kül yapışma sıcaklığının 250 K kadar altında olması uygun görülmektedir [12]. Aglomerasyon olayının ortaya çıkmasında rol alan en büyük faktörün kömürün anorganik yapısının olduğu sanılmaktadır.

### 3.2. AKIŞKAN YATAKLI YAKMA SİSTEMLERİNİN ÜSTÜNLÜKLERİ VE SORUNLARI

Akışkan yataklar geleneksel yakma sistemleri ile kıyaslanırsa birçok üstünlüklere sahip oldukları görülür. Bu üstünlükleri şu şekilde özetlemek mümkündür [5,13-15]:

- Kömür ve hava dinamik bir ortamda çok iyi karışmakta ve kömür tanecikleri gerekli oksijenle çok iyi temasa gelerek yüksek yanma verimlerine ulaşmaktadır.
- Farklı özelliklere sahip düşük kaliteli yakıtları akışkan yataklarda yakmak mümkündür. “Kömür / inert madde” oranı çok küçük olduğundan yanma süreci beslemedeki değişimleri daha kolay absorbe edebilmektedir.
- Yanma geleneksel sistemlere kıyasla daha düşük sıcaklıklarda (1073-1173 K) gerçekleştirildiği için NO<sub>x</sub> yayılımı daha düşüktür.
- Kireçtaşı ve dolomit gibi absorbantlar kullanarak SO<sub>2</sub> yayılımını kontrol edilebilmektedir. Sistemde ayrıca kendi özelliğinden kaynaklanan bir SO<sub>2</sub> bağlanması gerçekleşmektedir.
- Yatak içi yüksek ısı transfer katsayıları nedeni ile gerekli ısı aktarım yüzeyi, geleneksel sistemlere kıyasla daha azdır. Böylece hem gerekli boyutlar küçülmekte hem de maliyet düşmektedir.
- Düşük çalışma sıcaklığından dolayı alkali tuzlardan kaynaklanan korozyon ve kirlenme, bu tuzların buharlaşmaları düşük seviyelerde kaldığı için, azalmaktadır.
- Akışkan yataklı yakma sistemleri kullanılarak birleşik ısı-güç çevirimi yolu ile güç üretimi daha düşük boyutlardaki ünitelerle sağlanabilmektedir ve çevrimin verimi yükselmektedir.



Akışkan yataklı yakıcılarda sözü edilen bu üstünlüklerin yanı sıra, bazı sorunlarla da karşılaşmaktadır. Bunlar:

- Tasarım güçlükleri,
- İlk işletme güçlükleri,
- Yatak malzemesi ve külden kaynaklanan taşınım güçlükleridir.

### **3.3.AKIŞKAN YATAKLI YAKMA SİSTEMLERİ**

Akışkan yataklı yakma sistemleri başlıca üç grupta toplanmaktadır:

1. Atmosferik basınçta çalışan yataklar,
2. Dolanımlı veya hızlı akışkan yataklar,
3. Basıncı akışkan yataklar.

#### **3.3.1.Atmosferik Basınçta Çalışan Akışkan Yataklar**

Bu yakıcı sistemler, atmosferik basınçta çalışan sistemlerdir. Buhar ve sıcak su üretimi için kullanılan bu sistemlerde, ısı çekme işlemi kömürün özellikleri ve çalışma koşullarına bağlı olarak aktif yatak, serbest bölge veya her ikisinden de yapılabilir. Yüksek oranda uçucu madde içeren kömürlerde yatak bir gazlaştırıcı görevini yapmakta ve açığa çıkan gazların yanması daha çok yatağın üst kısmı ve serbest bölgede gerçekleşmektedir. Bu tür kömürler için serbest bölgede ısı çekimi önem kazanır. Aktif yatağın birim hacmindeki ısı kapasitesi, sıcak gazların ısı kapasitesinden çok daha yüksek (yaklaşık 1000 kat) olduğu için aktif bölgeden çekilen ısı miktarı serbest bölgeden çekilen ısıdan 6-7 kat daha fazla olabilmektedir. Atmosferik akışkan yataklarda 200MW kapasiteye ulaşılmış bulunmaktadır [9]. Bu sistem şematik olarak Şekil 3.2' de gösterilmiştir.

### 3.3.2.Dolanımlı veya Hızlı Akışkan Yataklar

Dolanımlı veya hızlı akışkan yataklar son yıllarda en fazla dikkati çeken akışkan yataklı sistemlerdir. Bu tip akışkan yataklarda akışkanlaştırma, atmosferik akışkan yataklara kıyasla çok daha yüksek hızlarda (6-10 m/s) gerçekleştirilmektedir. Yataktan taşınan yanmamış kömür tanecikleri siklonlarda tutulup yatağa geri beslenmekte ve bu yolla yüksek yanma verimlerine ulaşılabilir.

Yüksek çalışma hızları yatakta erozyona neden olduğundan ısı transfer boruları aktif yataktan çok, serbest bölgeye konulmakta veya borulu duvarlar vasıtasıyla sistemden ısı çekilmektedir. Atmosferik akışkan yataklara kıyasla dolanımlı akışkan yataklar şu üstünlüklere sahiptirler [9]:

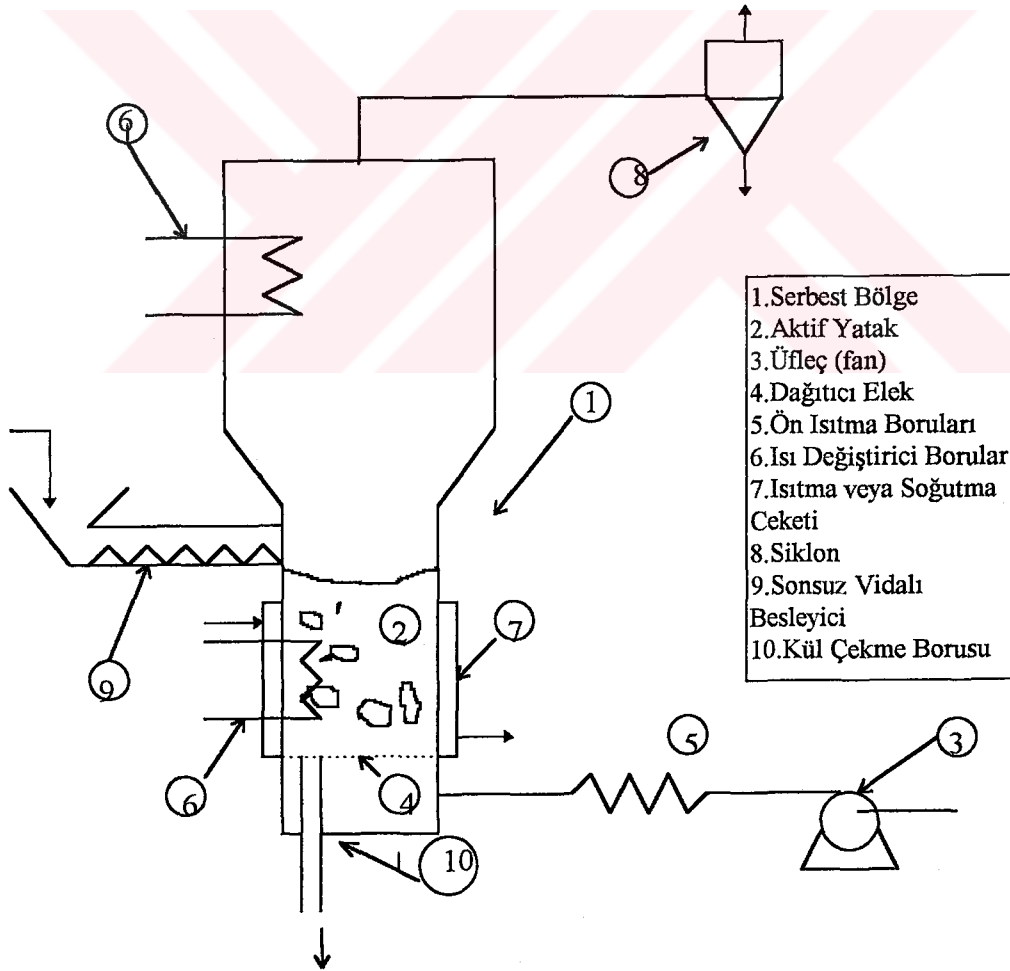
- \*Daha yüksek yanma verimlerine ulaşmaktadır.
- \*Kömür besleme sistemi daha basit ve esnektir. Daha az kömür besleme noktalarına gereksinim duyulmaktadır.
- \*Daha az miktarlarda kireçtaşı veya dolomite gerek olmaktadır. %90 lık verimle SO<sub>2</sub> tutmak için gerekli Ca / S mol oranı 1.5 kat daha azdır. Bu oran atmosferik sistemlerde 3-5 civarındadır.

### 3.3.3.Basınçlı Akışkan Yataklar

Yüksek basınçlarda çalıştırılan bu sistemler, birleşik ısı-güç çevrimi yolu ile elektrik üretiminde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Günümüzde 100 MW' ye kadar ulaşan basınçlı yataklar uygulama aşamasına varmış bulunmaktadır. 2000 yılına kadar ise 400 MW kapasitedeki sistemlerin devreye girmesi beklenmektedir [9]. Bu sistemler üzerindeki çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Ancak bu tip araştırmalar pahalı olduğundan uluslararası işbirliğine gidilmektedir. Nitekim ABD, Almanya ve İngiltere' nin işbirliği ile 1980 yılında İngiltere Grimethorpe 'da bu konuda temel araştırmalar yapmak amacıyla 80 MW gücünde basınçlı bir akışkan yatak kurulmuştur [13]. 2 m iç çap ve 14 m yüksekliğindeki akışkan yatakta basınç 12.156 bar' a kadar çıkabilmektedir. Buhar, yatak içine yerleştirilen ısı değiştirici borular

vasıtasıyla üretilmektedir. Araştırmanın son aşamasında basınçlı akışkan yatak bir gaz türbinine bağlanarak güç üretiminde kullanılmaktadır.

Basınçlı akışkan yataklar atmosferik akışkan yataklara kıyasla, buhar kazanı boyutlarını küçültme, yanma verimini artırma, kaliteli akışkanlaştırmayı sağlama, gaz ve buhar türbini ile entegre edilerek kullanılması sonucu ısı transfer yüzeyi gereksinimi azaltma ve güç üretiminde verimi yükseltme (yaklaşık %5 kadar) gibi üstünlükler sağlamaktadır [9,13]. Günümüzde atmosferik basınçlı akışkan yataklarda elektrik üretimi endüstriyel ölçülerde yapılmaktadır. Basınçlı akışkan yataklarda elektrik üretimi çalışmaları ise pilot tesis kademesini aşmış, endüstriyel ölçekteki modüler aşamaya ulaşmıştır.



Şekil 2.2. Atmosferik Akışkan Yataklı Bir Yakıcının Şematik Görünümü.

## BÖLÜM 4

### KÖMÜRÜN MİNERAL MADDE VE KÜL İÇERİĞİ

#### 4.1.MİNERAL MADDE

Kömürün mineral madde veya inorganik madde içeriği, organik yapısının dışında kalan elementlerden oluşmaktadır. İnorganik elementlerin organik yapı ile oluşturdukları organometalik bileşikler de mineral maddeler içinde yer almaktadır. Kömürün içerdiği mineral maddeler ortalama olarak 20  $\mu\text{m}$  çapındadır ve ancak çok az miktarının çapı 100  $\mu\text{m}$ ' dan büyüktür [16].

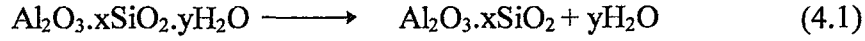
Mineral maddeler kömürün üretimini, hazırlanmasını ve kullanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Kömür hazırlama ve zenginleştirme işlemleri mineral madde miktarını düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Ancak uygulanan yöntemler, mineral maddeleri tümü ile uzaklaştırmamaktadır. Kalan mineral maddeler ise kömürün kullanımı, özellikle yanma sürecini önemli ölçüde etkileyebilmektedir [16].

Kömürün içerdiği mineral safsızlıklar bölgenin jeolojik durumuna ve kömürün yaşına bağlı olarak değişebilmektedir. Kömürün inorganik madde içeriği temel olarak Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K ve Ti 'nin oksijenli bileşiklerinden oluşmaktadır. Bu mineraller aynı zamanda yer kabuğunun da temel bileşenleridir [4].

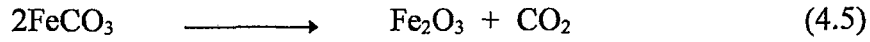
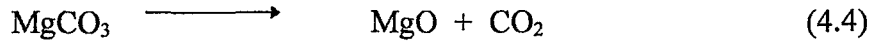
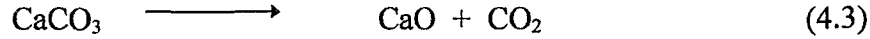
Kömürde en çok bulunabilen yanmayan madde silikat bazlı mineralleridir; bunlar kömürün içerdiği minerallerin %80-90 kadarını oluşturmaktadırlar. Mineral maddenin geri kalan kısmının önemli bir bölümü karbonatlar ve disülfürlerden ibarettir. Karbonat ve disülfür mineral gruplarının derişimleri kömürün bulunduğu yörelerin jeolojik yapısına bağlı olarak değişmektedir [16].

Kül kömürün yanmasından sonra arta kalan mineral maddelerdir. Kömürün mineral madde ve kül içeriği ne bileşim ne de miktar bakımından aynı değildir. Kömür yandığı zaman, içerdiği mineral maddeler aşağıdaki belirtilen temel değişikliklere uğrayarak küle dönüşmektedirler [17]:

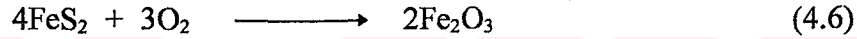
1)Hidrat suyu içeren minerallerin hidrat sularını kaybetmeleri;



2)Karbonatların parçalanması



3)Sülfürlerin parçalanması



4)Alkali metal klorürlerin uçuculaşması ,

5)Kömürün yanması sırasında oluşan metal oksitlerin, organik ve piritik kökürdün bir kısmı ile reaksiyona girmesi,  $\text{SO}_3$  artışına neden olmaktadır. Sıcaklığın yeterince yüksek olması durumunda ise, oksitler, silikatlar ve serbest silika tepkimeye girerek yeni bileşikler oluşturur.

Parr kül içeriği ile kül miktarı arasındaki ilişkiyi şu bağıntıyla tanımlamıştır [18]:

$$M = 1.08 \cdot A + 0.55 \cdot S \quad (4.1)$$

M: Kömürün mineral madde içeriği, %

A: Kömürün külü, %

S: Kömürün kükürt içeriği, %

## 4.2.KÖMÜR KÜLÜNÜN ÖZELLİKLERİ

Kül, daha önce de belirtildiği gibi kömürün içerdiği mineral maddelerin yanma sonucunda dönüşmesiyle ortaya çıkan katı bir atıktır. Külün kökeni kömürün içerdiği

mineral maddeler olduğundan, özellikleri mineral maddenin bileşimine ve oksidasyonun gerçekleştirildiği şartlara bağlı olarak değişmektedir .

Kömür külünün bileşimi ve rengi geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Rengi bileşimine bağlı olarak beyaz ile çikolata rengine kadar değişen tonlar alabilmektedir [17].

Kül temel olarak silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum bileşikler ve daha az oranlarda olmak üzere magnezyum, sodyum, potasyum, titan ve diğer elementlerin oksitlerinden oluşmaktadır. Kül bileşimi genellikle oksitler cinsinden ifade edilmesine karşın, kül silikatların, oksitlerin ve sülfatların bir karışımı halinde bulunmaktadır. Küldeki silikatların kaynağı şist ve kil mineralleridir. Demir oksidin en önemli kaynağı pirittir; kömürün yanması sırasında demir |||-oksit ve kükürt oksitlerini oluşturur. Kalsiyum ve magnezyum oksitler karbonat minerallerinin parçalanması sonucunda oluşmaktadır. Sülfatlar ise büyük ölçüde yanma sırasında oluşan kükürt oksitlerin metal oksitler ile girdiği tepkimeler sonucu oluşmaktadır [19].

### 3.2.1.Külün Ergime Özellikleri

Kül yüksek sıcaklıklarda ısıtılırsa yumuşar ve ergiyerek, akışkanlaşır. Kül ergime özellikleri bileşimine bağlı olarak değişmektedir [19].

Yakma sisteminin tasarımı, işletilmesi ve kömürlerin optimum harmanlama oranlarının belirlenebilmesi açısından, kullanılacak kömürün külünün bileşiminin, ergime ve cüruf özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir [19].

Kül kristal, yarı kristal ve camsı minerallerin çok kompleks bir karışımıdır [20]. Bu nedenle belirli bir ergime sıcaklığına sahip olması beklenemez. Ancak, kül ergime testleri sonucunda belirli bir ergime sıcaklığı saptanmaktadır. Bu testler, piramit veya silindirik şekil verilmiş olan kül peletlerinin bir fırında, oksitleyici veya az indirgeyici atmosferde, kontrollü olarak ısıtılmaları sırasındaki şekil deformasyonu, büzülme ve akma gibi, numunenin dış görünüşünde meydana gelen değişikliklerin gözlenmesi suretiyle gerçekleştirilir. Genellikle piramit şeklindeki kül peletlerinin kullanılması tercih edilmektedir. Çünkü yuvarlaklaşma sıcaklığı, silindirik peletlerinkine kıyasla, daha net bir şekilde gözlenebilmektedir [19].

Kömür külünün bileşimi ile ergime sıcaklığı arasındaki ilişkiyi bulma konusundaki ilk çalışmalarda,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve kükürdün külün ergime sıcaklığına etkisi incelenmiştir [21].

Nicholls ve Selving külün  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriği ile yumuşama sıcaklıkları arasındaki ilişkiyi araştırmış ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranında her %1'lik artışın, ergime sıcaklığını 23 K düşürdüğü sonucuna varmıştır. Nicholls ve Selving 43 kömür külü için:

$$R = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad (4.2)$$

oranı ile yumuşama sıcaklığı arasında bir ilişki olduğunu gözlemlemiştir [22].

Schaeffer külün bileşimi ile ergime sıcaklığı arasındaki ilişkiyi irdellemek için R ile tanımlanan başka bir oranı temel almıştır [22]:

$$R = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / \text{SiO}_2(\text{FeO} + 0.6(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})) \quad (4.3)$$

Kunstmann, 24 Güney Afrika kömürünün külüne Nicholls ve Selving' in R formülü (4.2) ile Schaeffer' in türettiği R formülünü (4.3) uygulamış ve ikincisinin kullanımıyla, külün ergime sıcaklığı ile R arasında, daha net bir ilişki olduğu sonucuna varmıştır [22].

Kömürün külünün kimyasal bileşimi ile erime sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan bazı parametreler şunlardır [19]:

$$\text{Silika değeri}(\%) = \text{SiO}_2 * 100 / (\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}) \quad (4.4)$$

$$\text{Baz/Asit Oranı} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) \quad (4.5)$$



$$\text{Silika/Alumina Oranı} = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \quad (4.6)$$

$$\text{Demir Oksit/KalsiyumOksit Oranı} = \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO} \quad (4.7)$$

$$\text{Dolomit}(\%) = (\text{CaO} + \text{MgO}) * 100 / \text{Toplam Baz} \quad (4.8)$$

$$\text{DemirOksit/DolomitOranı} = \text{Fe}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{MgO}) \quad (4.9)$$

Kömürün külünün ergime sıcaklığı ile kimyasal bileşimi arasındaki ilişkiyi saptamak üzere çok çeşitli formüller türetilmiş olmasının nedeni, külün ergime sıcaklığının öncelikle kimyasal bileşimine bağlı olmasındandır. Kömürün külünün bileşimi geniş bir aralıkta değiştiğinden ergime özellikleri de önemli farklılıklar göstermektedir. Külün erime özelliklerinin deneysel olarak saptanması özel aletler gerektirdiğinden ve zaman kaybına neden olduğundan, bu özelliğin bazı formüller yardımıyla saptanması mühendislik açısından değerlidir [19].

Küldeki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{TiO}_2$  asidik;  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ise bazik karakterdeki oksitlerdir. Vorres, bu bileşenlerin külün ergime özelliğine etkilerini, içerdikleri katyonların kimyasal özelliklerine dayanarak açıklamıştır. Katyonların çapları farklıdır. Kömür külünün temel bileşenleri olarak kabul edilen oksitlerdeki katyonların yarıçapları  $\text{\AA}$  olarak şöyledir [23]:  $\text{Si}^{4+}=0.42$ ;  $\text{Al}^{3+}=0.51$ ;  $\text{Fe}^{3+}=0.64$ ;  $\text{Mg}^{2+}=0.67$ ;  $\text{Ti}^{4+}=0.68$ ;  $\text{Fe}^{2+}=0.74$ ;  $\text{Na}^+=0.94$ ;  $\text{Ca}^{2+}=0.99$ ;  $\text{K}^+=1.33$ . Kömürün külünde en çok bulunan anyon oksijen iyonudur ve yarıçapı  $1.40 \text{ \AA}$  'dur. Bu anyon, söz konusu katyonların hepsinden daha büyüktür ve iyonik kristaller içinde elektronegatif anyonlar etkin durumdadır. Katyonlar anyonlar arasında boşlukları doldurur. Katyonlar belirli sayılardaki anyonlarla çevrilmiştir. Zıt yüklü iyonların yarıçaplarının oranı  $0.225-0.414$  arasında ise koordinasyon sayısı 4' tür ve oksijen iyonları tetrahedron şeklinde düzenlenmiştir. Yarıçapların oranı  $0.414-0.732$  arasında ise koordinasyon sayısı 6' dır ve oksijen iyonları oktahedron düzenindedir. Bu durumda  $\text{Si}^{4+}$  ve  $\text{Al}^{3+}$  için tetrahedral düzen,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Ca}^{2+}$  için oktahedral;  $\text{K}^+$  için ise kübik düzen söz konusudur. İyonik potansiyel, değerliğinin iyonun yarıçapına orandır. Söz konusu katyonların iyonik potansiyelleri şöyledir:  $\text{Si}^{4+}=9.5$ ;  $\text{Al}^{3+}=5.9$ ;  $\text{Fe}^{3+}=4.7$ ;  $\text{Mg}^{2+}=3.0$ ;  $\text{Ti}^{4+}=5.9$ ;  $\text{Fe}^{2+}=2.7$ ;  $\text{Na}^+=1.1$ ;  $\text{Ca}^{2+}=2.0$ ;

$K^+ = 0.75$ . İyonik potansiyel, bir katyonun mevcut anyonları kendi etrafında koordine edebilmek için, diğerleriyle rekabet edebilme kapasitesini göstermektedir. Asit grubuna dahil olan  $Si^{4+}$ ,  $Al^{3+}$  ve  $Ti^{4+}$  'ın iyonik potansiyelleri yüksek; bazik olan elementlerin potansiyeli ise düşüktür.  $Si^{4+}$  'ın  $SiO_4^{4-}$  oluşturabilmesi, oksijen anyonlarının miktarına da bağlıdır.  $SiO_2$  bileşiği, silisyuma tetrahedral düzen için gereken 4 oksijen anyonunu tek başına koordine edemediğinden, farklı silisyum oksit iyonlarını birlikte koordine ederler; bu ise ancak sıvı haldeyken polimer gruplarının oluşturulmasıyla olasıdır. Polimer oluşturmak için gereken oksit iyonları, iyonik potansiyelleri düşük olan alkali metallerle bağ yapan oksitlerden sağlanabilmekte ve bu oksitler parçalanarak sert küresel iyonları oluşturmaktadır. Bu nedenle iyonik potansiyelleri yüksek olan asit oksitler, ergimiş külde polimerin oluşmasına yardımcı olmaktadır. Bazik oksitler ise, oksijen iyonu sağlamaktadır. Oksijen iyonları, sistemdeki iyonik potansiyeli yüksek iyonlar tarafından çekilmekte ve polimer zincirlerini kırmaktadır. Bu gelişme viskoziteyi düşürmektedir. Nitekim külde oksit derişiminin artırılması durumunda ergimiş haldeki külün viskozitesini düşürmektedir.

Külünde bulunan demir, ortamın oksitleyici ve indirgeyici olmasına bağlı olarak ergime özelliklerini farklı şekilde etkileyebilmektedir. Bunun nedeni, iki ve üç değerlikli demir iyonlarının iyonik potansiyellerinin birbirinden oldukça farklı olmasıdır.  $Fe^{3+}$  'ın iyonik potansiyeli 4.7 olduğundan zayıf asidik olarak kabul edilebilir;  $Fe^{2+}$  'ın iyonik potansiyeli ise 2.7' dir ve bazik karakterdedir. Kömür külünde demir her iki formda da bulunmaktadır, ancak  $Fe^{3+}$  daha azdır.

Çeşitli araştırmacıların, aynı katkı maddelerini kullanarak kömürün külünün ergimesi özellikleri konusunda yaptıkları çalışmaların sonuçları birbirinden çok farklı olmuştur; bunun nedeni kullanmış oldukları kömürlerin küllerinin farklı bileşimlere sahip olması ve katkı maddelerinin bu nedenle farklı etkiler yapmasındandır.

#### 4.3.AKİŞKAN YATAKLI SİSTEMLERDE AGLOMERASYON

Kömür yakma sistemlerinde yüksek sıcaklıklarda küllerin sinterleşmesi veya aglomerasyonu görülmektedir. Sinterleşme ve aglomerasyon olayları içiçe geçen olaylardır. Bazen aynı anlamda, bazen ise küllerin koklaşması sürecinin ardışık iki aşaması olarak görülmektedir. Bu nedenle kesin çizgilerle birbirinden ayrılmalrı

mümkün değildir. Bu çalışmada, bu iki terim aynı anlamda kullanılacaktır. Sabit yataklı kömür yakma sistemlerinde görülen kekleşme, genellikle sinterleşme, akışkan yataklarda ise bu olay aglomerasyon olarak isimlendirilmektedir.

Aglomerasyon, kömür ve kül taneciklerinin birbirine yapışarak daha büyük bir kütleye dönüşmesi olayıdır. Oluşan kütlenin özellikleri, kömürün özellikleri ile operasyon koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Buna bağlı olarak, aglomere kütle bazen bir darbeye kolaylıkla dağılabilmekte, bazen de oldukça sağlam bir fiziksel yapıya sahip olmaktadır. Bazı Türk linyitlerinin kükürt, alkali metal (sodyum, potasyum gibi) içeriklerinin yüksek olması bunların aglomerasyon (sinterleşme) sıcaklığının düşük kalmasına neden olmaktadır. Linyitlerimizin kül içeriğinin yüksek olması nedeniyle bu kömürlerin yandığı akışkan yataklarda ayrışma görülmektedir.

Düşük kül sinterleşme sıcaklıkları ve yüksek ayrışma eğilimi, akışkan yataklı sistemlerde Türk linyitlerinin değerlendirilmesinde, aglomerasyonu aşılması gereken en önemli sorun haline getirmektedir.

Akışkan yataklı sistemlerde yanma, geleneksel sistemlere kıyasla 250-400 K daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Buhar üretimi açısından, yanmanın daha yüksek sıcaklıklarda sürdürülmesi gerekmektedir. Ancak akışkan yataklı sistemlerde karşılaşılan aglomerasyon olayı çalışma sıcaklığını sınırlamaktadır. Akışkan yataklarda, aglomerasyon başlamadan önce, sistem genellikle bir durgunlaşma aşamasından geçmektedir. Bundan dolayı, aglomerasyon olayının, yataktaki gaz hızının bazı taneciklerin minimum akışkanlaşma hızının altına düşmesinden kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Ancak, minimum akışkanlaşma hızının üstündeki hızlarda da aglomerasyonun görülmesi bu açıklamanın yeterli olmadığını ortaya koymuştur [24].

Aglomerasyon temel olarak, taneciklerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Durgunlaşma (defluidization) ve aglomerasyon eğilimi, taneciklerin temas yüzeylerinin büyüklüğü ve birbirini çekme özelliklerinin güçlülüğü oranında artmaktadır [24,25]. Taneciklerin hareketliliği, arttıkça bu eğilim azalmaktadır [26]. Kömürlerin anorganik yapısı ile aglomerasyon özellikleri arasında güçlü bir ilişkinin bulunduğu konusunda yaygın bir görüş bulunmaktadır. Kömürlerin

içerdiği anorganik bileşiklerin ergiyerek yüzeye ulaşmasıyla, aglomerasyonun başladığı bilinmektedir [24, 27,28].

Aglomerasyon olayı, birbirinden farklı çeşitli aşamalardan geçerek gerçekleşmektedir [29]. Aglomerasyon taneciklerin teması ve yüzeyler arasında oluşan bağların büyümesi ile başlar ve taneciklerin birbirine yapışarak gözenekli bir ağ yapısı oluşturmalarıyla son bulur. Zaman içinde, taneciklerin arasındaki bağlar gittikçe güçlenir ve yoğunlaşır. İç kısımlarda kalan gözenekler kapanır ve bağlar büyüyerek partikülün yapısını tamamen değiştirir. Sonunda kütle sürekli, yoğun bir metaryel haline dönüşmektedir.

Akışkan yataklarda aglomerasyon olayının üç temel mekanizmaya göre gerçekleştiği belirtilmektedir [29]:

1. Kısmi ergime,
2. Kısmi ergime ve viskoz bir sıvının oluşumu,
3. Kimyasal reaksiyon.

Kısmi ergime, reaktif sıvı sinterleşmesi olarak da tanımlanmaktadır. Kül partiküllerinin içerdiği mineral maddelerin kısmi ergimesiyle sıvı faz oluşmakta ve bu faz taneciklerin birbirine yapışması sürecini başlatmaktadır. Sıvı fazın miktarı, taneciklerin yapışkanlık özelliklerini ve kuvvetini belirler. Ortamda yeterince sıvı varsa tanecikler birbirine yapışır, başka bir ifadeyle aglomerasyon başlar [29].

Kısmi ergime esnasında meydana gelebilecek kül aglomerasyonunun derecesi kömürün (kül) içerdiği inorganik maddenin faz denge hesaplaması ile tahmin edilebilir [29].

Sodyum, kükürt ve klorür yönünden zengin kömürlerin yakıldığı akışkan yataklarda külün kolayca ergimesi sebebiyle yatakta aglomerasyon gerçekleşebilmektedir [29]. Akışkan yatakta yanma konusunda yapılan çalışmalarda, düşük kaliteli kömürlerin içerdiği sodyum ve sülfürlerin külün ergiyip yatak malzemesi yüzeylerinde birikmesine ve bu taneciklerin yapışan bir özellik kazanmalarına neden oldukları gözlemlenmiştir. Küller kömürün içerdiği anorganik maddelerin fizikokimyasal dönüşümleriyle oluşmasına rağmen, küllerin yatak malzemesinin yüzeyinde birikmesi fiziksel bir süreç olarak görülmektedir. Kül ile kaplı yatak malzemesi tanecikleri aglomerasyona uğrayarak topaklaşırlar. Aglomere formunda, birlikte topaklanmış halde bulunur [30].

Viskoz sıvı oluşumu ve kısmi ergime veya viskoz akış sinterleşmesi, silikat sistemlerinde görülen bir olaydır. Donma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda bir silikat sisteminde oluşan sıvı faz, oldukça viskoz bir sıvı olabilir. Sıvı fazın viskozitesi zaman zaman o kadar yüksek olmaktaki sıcaklık, katılaşma sıcaklığının altına düştüğünde sıvı camsı bir faz halini alır [29].

Viskozite hem camsı fazın kimyasal kompozisyonunun hem de sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan dolayı, bu faktörler viskoz akış sinterleşmesini kontrol eder [29].

Birçok kömür külü ana bileşim elementi olarak silikaya sahiptir. Bu nedenle kömür yakma sistemlerinde de viskoz akış yüzünden sinterleşme meydana gelebilir. Kalmanovitch, yakma prosesi esnasında kül partiküllerinin tamamen ergidiğini ve topaklaşmaya neden olan gözenekli cam bir faz oluşturduğunu gözlemiştir [29].

Aglomerasyona neden olan diğer bir mekanizma anorganik yapıda kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesidir. Bu kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ve ergime sıcaklıkları düşük olan bileşikler, tanecikler arasında köprücüklerin kurulmasına ve büyümesine ortam hazırlamaktadır.  $SO_2$  uzaklaştırılması amacıyla kullanılan kireç taşının yakma sistemlerinde kömürün yakma kazanında cüruf oluşumu esnasında partikül-partikül sinterleşmesini arttırdığı bunun da  $SO_2$  atmosferinde CaO bakımından zengin külde gerçekleşen çeşitli reaksiyonlara bağlanmıştır [29].

Akışkan yataklarda aglomerasyon konusu, birçok araştırmacı tarafından geniş bir şekilde değerlendirilmiştir. Goldberger, içinde kül biriken akışkan yataklarda aglomerasyon sıcaklıklarını belirlemiştir. Bu araştırmacıya göre, kullanılan malzemenin özelliklerinin yanı sıra, taneciklerin yüzey alanı ve sıcaklıkları da, aglomerasyonun ortaya çıkıp gelişmesinde rol oynamaktadır. Siegel ve ç.a.[24]., Saxena ve ç.a. [27], ve Longston ve ç.a.[26] ise, yüksek sıcaklıklarda mineral maddelerin eriyerek yüzeye ulaşması sonucu, yapışkan bir özellik kazanan taneciklerin aglomerasyona neden olduklarını ileri sürmüşlerdir. Salvador ve ç.a.[28], düşük sıcaklıklarda bile oluşabilen ötektik noktalar vasıtasıyla, yarıkok ve kül taneciklerinin birbirlerine yapışmalarını ve yakılan kömürlerde yüksek oranlarda Na ve K tuzlarının bulunmasını, aglomerasyonun diğer nedenleri olarak görmektedirler. İngiltere’de, Kömür Araştırma Kurumu laboratuvarlarında yürütülen akışkan yatakta kömür yakma



çalışmaları sırasında , uzun çalışma süreleri boyunca, yatakta  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının artması sonucu, yatağın aglomerasyona daha yatkın bir ortama dönüştüğü gözlenmiştir .

Texas ve Dakota linyitleri kullanarak yapılan çalışmalarda ise  $\text{Na}_2\text{O}$ 'ın aglomerasyonu hızlandırdığı belirlenmiştir. Anorganik yapıları açısından önemli ölçüde farklılıklar gösteren Çan linyit numunelerinin akışkan yatakta yakılması sırasında, bu linyitlerin aglomerasyona uğrama eğilimleri ile anorganik yapıları arasında yakın bir ilişkinin olduğu görülmüştür [31].

Kullanılan linyitin tane büyüklüğü arttıkça , linyitin cinsi ve çalışma koşullarına bağlı olarak, aglomerasyon sıcaklığı sınırlı bir oranda artmaktadır.

Ekinci ve ç.a. [32] ile Atakül ve ç.a. [33]' nın linyitlerin akışkan yatakta yanma konusunda yaptıkları çalışmalardan elde ettikleri sonuçlar, linyit bünyesinde bulunan  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$ ' in, aglomerasyon eğilimini arttırdığını göstermiştir. Yine bu araştırmacılar, yatak malzeme türünün ve akışkanlaştırma hava hızının da bu sıcaklıkların oluşmasında etkisinin olduğunu belirtmektedirler.

Skrifvars ve ç.a.,  $\text{CaO}$  bakımından zengin kömür külünün normal koşullarda, 1173 K olarak saptadıkları sinterleşme sıcaklığını  $\text{SO}_2$  atmosferinde 873 K' e düşüğünü saptamışlardır [29].

Kömür külünün ergime sıcaklığı ile sinterleşme oluşumu arasında bir paralellik bulunmaktadır. Ancak kömür sinterleşmesi çeşitli faktörler tarafından etkilenmektedir. Bu faktörler şu şekilde sıralanabilir [17]:

- 1)Kömürün içerdiği mineral maddenin dağılımı,
- 2)Külün bulunduğu ortamın gaz atmosferinin bileşimi,
- 3)Yakıtın yakıldığı yatağın en sıcak bölgesinde yakıt ile içerdiği mineral maddenin ne ölçüde karışmış olduğu,
- 4)Külün yüksek sıcaklığa maruz kaldığı süre,
- 5)Yakma sisteminin tasarım özellikleri,
- 6)Yakıt tabakasının kalınlığı ,
- 7)Yanma hızı.

Jung ve Schobert, yaptıkları bir çalışmalarında, sinterleşme sıcaklığının külün tanecik boyutu küçüldükçe düşüğünü belirlemiştir. Oluşan aglomere kütlenin sertliği ise tanecik boyutu ile ters orantılıdır [34].

Son yıllarda yapılan çalışmalar, kül yumuşama sıcaklığının değil, sinterleşme sıcaklığının aglomerasyon için daha belirleyici bir özellik olduğunu ortaya koymuştur.

Huffman ve ç.a., oldukça geniş bir mineral aralığına sahip bir kömürün küllerinin yüksek sıcaklık davranışlarını incelemişler ve külün indirgeyici atmosferde küllerin ergime sıcaklığının 200-400 K kadar düştüğünü saptamışlardır [20].

Jung ve Schobert, çeşitli kömürlerin sinterleşme özelliklerini incelemişler ve  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oranları yüksek alkali ve toprak alkali metal oksit oranları düşük küllerin daha yüksek sıcaklıklarda sinterleştiğini gözlemişlerdir. Aynı araştırmacılar, küllerin anorganik bileşimlerinin sinterleşme sıcaklığını etkilemesini kabaca iki faktöre bağlamaktadırlar : 1)  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarı, 2) Anhidritlerin oluşumu.  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarı arttıkça, düşük sıcaklıklarda eriyen sodyum-alumina silikatların oluşmasından dolayı, sinterleşme sıcaklığı düşmektedir. Anhidratlar ise sinterleşmeye başlayan kütlenin büyümesini hızlandırmaktadır [34].

Kül aglomerasyon sıcaklığı ile ergime sıcaklığı arasında bir paralellik olmasına karşın, kül yumuşama sıcaklığının aglomerasyon için her zaman kıstas olmamaktadır. Külde sinterleşmenin veya kısmen ergimenin, ASTM kül ergime sıcaklıklarının oldukça altındaki sıcaklıklarda meydana geldiğini tespit edilmiştir. Stallmann ve Neavel, kömür piroliz reaktöründe, külün başlangıç deformasyon sıcaklığının oldukça altındaki sıcaklıklarda sinterleşmenin başladığını saptamışlardır [34]. Huffman ve Huggins ise çalışmalarında, başlangıç deformasyon sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda kayda değer kısmi bir ergime gözlemlemişlerdir [34].

Düşük ranklı kömür küllerinde, artan sodyum içeriği, kül yumuşama sıcaklığının belirli oranlarda azalmasına sebep olmaktadır. Linyit külleri için bu azalma, küldeki her yüzde birlik artış için 5 K ' dir . Kül minerallerinin yarı-küreselleşme sıcaklığı, sodyum sülfat ilavesi ile kayda değer şekilde düşürülebilmektedir [35]. HT'de 220 K kadarlık azalma, %20 sodyum sülfat ilavesi ile ve kül ile %50  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  'ün karıştırılarak ilavesi ile de, 390 K' lik azalma meydana gelmektedir [34].

## **BÖLÜM 5**

### **DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ**

#### **5.1.KULLANILAN KÖMÜR NUMUNELERİNİN TANITIMI**

Deneysel çalışmalarda, dokuz adet kömür ve bir adet bitümlü şist numunesi kullanılmıştır. Kullanılan numunelerin çoğunluğu kömür olduğundan, daha sonraki bahislerde numuneler için “kömür” ifadesi kullanılacaktır. Bu numunelerin alındığı kömür yatakları şunlardır:

1. Beypazarı - Ankara
2. Çan - Çanakkale
3. Elmalı (Soma) - Manisa
4. Eynez (Soma) - Manisa
5. Deniz-2 (Soma) - Manisa
6. Göynük - Bolu
7. Göynük Şist - Bolu
8. Kısırdere (Soma) - Manisa
9. Tunçbilek - Kütahya
10. Yatağan - Muğla

#### **5.2. LİNYİT NUMUNELERİNE UYGULANAN ANALİZLER**

Kullanılan kömür numunelerini karakterize etmek amacıyla aşağıda belirtilen analizler uygulanmıştır.



### 5.2.1.Kısa ve Elementel Analizler

Linyit numunelerinde toplam nem TS 690, kül TS 330, uçucu maddeler TS 711'e göre belirlenmiştir. Sabit karbon miktarı, kül ve uçucu maddenin toplamının 100'den çıkarılmasıyla bulunmuştur. Karbon, hidrojen ve azot miktarları, ASTM D 3178 ve ASTM D 3179' e göre belirlenmiştir. Bu yöntemde, karbon karbondioksit, hidrojen suya ve azot azot oksitlerine dönüştürülmüş ve bunların miktarları bir termal iletkenlik detektörü yardımıyla bulunmuştur. Bulunan değerlerden karbon, hidrojen ve azot miktarları hesaplanmıştır.

Kükürt analizleri, LECO SC 32 cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Kısa ve elementel analiz sonuçları sırasıyla Tablo 5.1 ve 5.2 ' de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kömür Numunelerinin Kısa Analiz Sonuçları (%ağ.).

| Kömür       | Nem   | Uçucu Madde(k.b.) | Kül (k.b.) | Sabit Karbon(k.b.) |
|-------------|-------|-------------------|------------|--------------------|
| Beyazarı    | 13.46 | 33.63             | 49.67      | 16.70              |
| Çan         | 10.97 | 41.22             | 10.51      | 48.26              |
| Elmalı      | 12.69 | 42.13             | 17.48      | 40.38              |
| Eynez       | 9.66  | 39.12             | 19.27      | 41.62              |
| Deniş-2     | 15.98 | 44.30             | 13.32      | 42.37              |
| Göynük      | 16.95 | 39.75             | 27.84      | 32.40              |
| Göynük Şist | 7.27  | 70.56             | 16.35      | 13.08              |
| Kısrakdere  | 12.70 | 41.64             | 14.53      | 43.83              |
| Tunçbilek   | 7.99  | 28.57             | 43.85      | 27.58              |
| Yatağan     | 16.28 | 45.68             | 10.74      | 25.58              |

Tablo 5.2. Kömür Numunelerinin Elementel Analiz Sonuçları (kuru bazda %ağ.).

| Kömür       | C     | H    | Toplam Kükürt | N     |
|-------------|-------|------|---------------|-------|
| Beyazarı    | 29.67 | 2.90 | 5.50          | 0.80  |
| Çan         | 58.68 | 4.44 | 4.96          | 1.40  |
| Elmalı      | 61.82 | 4.90 | 0.89          | 1.40  |
| Eynez       | 58.96 | 4.14 | 0.87          | 0.50  |
| Deniş-2     | 72.50 | 4.92 | 3.90          | 4.90  |
| Göynük      | 48.04 | 3.91 | 2.68          | 1.40  |
| Göynük Şist | 62.00 | 7.52 | 3.84          | ----- |
| Kısrakdere  | 57.27 | 4.46 | 2.24          | 0.53  |
| Tunçbilek   | 42.39 | 3.40 | 1.63          | 1.37  |
| Yatağan     | 44.97 | 4.15 | 2.14          | 1.00  |

### 5.3.KÜLLERE UYGULANAN ANALİZLER

#### 5.3.1.Küllerin Kimyasal Analizleri

Kömür numunelerinin küllerinde,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  analizleri, ASTM D 2795 - 86' ya göre yapılmıştır; elde edilen sonuçlar Tablo 5.3' de verilmiştir.

Tablo 5.3. Kömür Numunelerinin Orjinal Küllerinin Kimyasal Analiz Sonuçları(%ağ.).

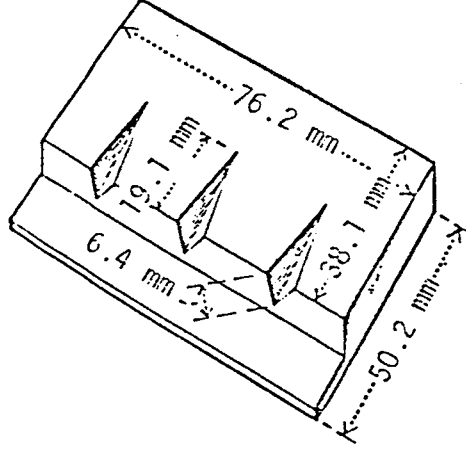
| KÜL         | $\text{SiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{CaO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ |
|-------------|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Beypazarı   | 32.58          | 21.09                   | 13.71        | 4.65         | 23.04                   | 3.25                  | 1.09                 |
| Çan         | 13.80          | 27.73                   | 19.53        | 1.74         | 35.23                   | 1.30                  | 0.26                 |
| Elmalı      | 21.00          | 13.45                   | 26.36        | 2.00         | 12.91                   | 1.04                  | 1.55                 |
| Eynez       | 35.73          | 16.17                   | 12.71        | 2.41         | 13.28                   | 7.01                  | 1.49                 |
| Deniş-2     | 16.48          | 21.55                   | 20.42        | 1.21         | 22.32                   | 1.68                  | 0.90                 |
| Göynük      | 25.45          | 19.92                   | 11.18        | 1.21         | 27.82                   | 5.04                  | 0.60                 |
| Göynük Şist | 25.58          | 24.66                   | 9.34         | 1.89         | 12.39                   | 4.11                  | 1.00                 |
| Kısrakdere  | 21.56          | 24.26                   | 13.98        | 2.91         | 13.91                   | 11.08                 | 2.10                 |
| Tunçbilek   | 27.90          | 16.12                   | 13.57        | 6.78         | 16.69                   | 13.76                 | 1.80                 |
| Yatağan     | 21.76          | 28.87                   | 10.95        | 0.74         | 15.82                   | 1.02                  | 1.22                 |

#### 5.3.2. Küllerin Ergime Sıcaklıklarının Saptanması

Küllerin; başlangıç deformasyon, yumuşama, yarı-küreselleşme ve ergime(akma) gibi özgül sıcaklıkları, LECO AF-500 model bir cihaz kullanılarak ve ASTM D 1857 ' ye uygun olarak ölçülmüştür. Kullanılan cihaz 533 -1923 K aralığında  $\pm 5$  K hassasiyetinde çalışabilmektedir.

Bu yöntemde önce kül numunelerinden piramitler hazırlanmaktadır. Bunun için gerekli miktarda kül alınarak, birkaç damla % 10 ' luk dekstrin çözeltisi ile nemlendirilir. Dekstrin çözeltisi % 0.1 oranında salisilik asit içermektedir. Salisilik asit şekil koruyucu olarak görev yapmaktadır. Nemlendirilmiş olan kül örneği spatül ile karıştırılarak şekil alabilir kıvamda bir kütle haline getirilmekte ve Şekil 5.1'de görülen eşkenar üçgen tabanlı piramit şeklindeki kalıp doldurularak piramitler hazırlanmaktadır. Kül piramitleri refraktörden yapılmış ve dikey bir eksen etrafında

döner yatay bir tablanın üzerine dikey bir şekilde konulmaktadır. Bu tabla kademeli olarak ısıtılan bir fırının içine yerleştirilmektedir. Fırının atmosferi (oksitleyici veya indirgeyici olarak) ayarlandıktan sonra, 8 K/dak. hızla ısıtılmaktadır. LECO AF 500 model cihazda, aynı anda 5 adet numunenin analizini yapmak mümkündür.



**Şekil 5.1.** Kül Kalıbı

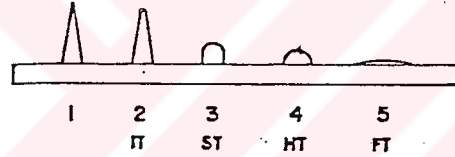
Bu analizlerde, 4 kritik sıcaklık tespit edilebilmektedir:

- 1) Başlangıç deformasyon sıcaklığı (IT) : Piramit şeklindeki numunenin tepesinde, ilk yuvarlaklaşmanın görüldüğü sıcaklıktır. Piramitin tepesi sivri kaldığı sürece görülen büzülme ve eğilme ihmal edilir. **Şekil 5.2** ' de görülen birinci koni numunenin başlangıç durumunda, ikinci ise başlangıç deformasyon sıcaklığındaki tipik bir koninin görünüşünü göstermektedir.
- 2) Yumuşama sıcaklığı (ST) : Kül piramidinin yumuşayarak küresel bir yığın şeklini aldığı sıcaklıktır. Bu noktada piramitin yüksekliği taban genişliğine eşittir (**Şekil 5.2**).
- 3) Yarı küreselleşme sıcaklığı (HT) : Piramitin ergiyerek yarım küre şeklindeki bir şekil aldığı anda ölçülen sıcaklıktır. Bu noktada kül piramidinin yüksekliği taban genişliğinin yarısına eşittir (**Şekil 5.2**).
- 4) Akma sıcaklığı (FT): Ergimiş kütlenin akarak ve yayılarak yüksekliği yaklaşık olarak 1.6 mm olan düz bir tabakaya dönüştüğü anda ölçülen sıcaklıktır (**Şekil 5.2**).

Başlangıç deformasyon sıcaklığı gerçek bir kömür yakma sistemindeki kül taneciklerinin birbirine hafifçe yapışma eğilimi göstermeye başladıkları sıcaklık seviyesine denk gelmektedir. Bu aşamada ısı iletim yüzeylerinde yapışmadan dolayı kül (kömür) birikimi başlamaktadır.

Yumuşama sıcaklığı, genellikle külün ergimeye başladığını göstermektedir ve deformasyonun başladığı aşama ile akmanın görüldüğü aşama arasındaki aşamayı göstermektedir. Yarı-küreselleşme sıcaklıkları sıvı fazın ve buna bağlı olarak taneciklerin birbirine kuvvetlice yapışıp, hızlıca büyüdüğü sıcaklıktır. Bu aşamadan sonra ısı iletim yüzeylerinde büyük miktarda kül yapışmaya ve birikmeye başlar.

Akma sıcaklığı ise külün tümü ile sıvı faz olduğu, son aşamayı göstermektedir. Yarı-küreselleşme aşamasından sonra ortaya çıkan aglomere kütleler mekanik olarak çok dayanıklıdır ve dağılması akışkan yatak koşullarında mümkün olmamaktadır.



Şekil 5.2. Kül Ergime Testi Özgül Kül Sıcaklıkları.

#### 5.4.SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Kömür yakma sistemlerinde sinterleşme ve aglomerasyon olaylarının karşılaşılan en önemli problemler olduğu, daha önceki bölümlerde vurgulanmıştır. Bu iki olay iç içe geçen olaylardır ve kömür yüzeyinde yapışma özelliği olan bir sıvı fazın oluşmasıyla başladığı bilinmektedir. Sinterleşme daha çok sabit yatak türü sistemlere özgü iken, aglomerasyon akışkan yataklarda karşılaşılan bir olaydır. Her iki olay da yakma sistemlerinin verimlerinin düşmesine ve kömür israfına neden olmaktadır. Akışkan yataklı yakıcılarda aglomerasyon başlamasıyla kömür(kül) ve yatak malzemesi tanecikleri birbirine yapışmaya başlamaktadır. Bir noktada veya bölgede

başlayan olay hızla yayılarak bütün yatak yüzeyini kaplamaktadır. Bunun sonucunda sistem akışkan özelliğini kaybetmekte ve operasyon kesilmektedir. Sistemin tekrar devreye alınması için, bu aglomere (kekleşmiş) kütlenin ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir.

Sinterleşme veya aglomerasyon olayları sonucunda oluşan yapışkan kütle (sıvı), aynı zamanda ısı iletim yüzeylerinde kül ve kömür birikmesine ve ısı iletim etkinliğinin düşmesine neden olmaktadır. Aglomerasyon olayının, sinterleşme olayını içeren daha ileri bir aşamayı ifade ettiğinden, bundan sonra yalnızca aglomerasyon olayından söz edilecektir.

Aglomerasyonun ortaya çıkmasını etkileyen birçok faktör olmasına karşın, bu olayı büyük ölçüde kömürün anorganik yapısının özelliklerinden kaynaklandığı bilinmektedir [33,34,36]. Özellikle külün yapısı ve ergime sıcaklıkları, aglomerasyon olayının ortaya çıkmasında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle göz önüne alınan kömürlerin özgül kül sıcaklıkları ile anorganik yapıları arasındaki ilişki incelenmiştir.

#### 5.4.1 Özgül Kül Sıcaklıkları ile Anorganik Yapı Arasındaki İlişki

Çalışmada kullanılan kömür küllerinin, başlangıç deformasyon (IT), yumuşama(ST), yarı küreselleşme (HT) ve ergime (akma) (FT) sıcaklıkları; bölüm 5.3.2’de sözü edilen yöntemle ölçülmüştür. Ölçümler oksitleyici bir fırın atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.4’de verilmiştir.

Bu tablo gözden geçirildiğinde kömürlerin küllerinin IT değerlerinin 1377-1573 K, ST değerlerinin 1414-1801 K, HT değerlerinin 1444-1814 K ve FT değerlerinin 1482-1844 K arasında değiştiği görülmektedir. Eynez linyitinin külü için ergime sıcaklığının 1844 K üzerinde olduğu anlaşılmaktadır. Ancak kullanılan cihazın ölçüm sınırlarını aştığı için bu kömürün FT değeri kesin bir şekilde ölçülememiştir. Başlangıç deformasyon sıcaklığı (IT), kömür yüzeyinde sıvı bir tabakanın oluştuğu bir sıcaklık seviyesini gösterdiğinden, deneysel sonuçlar daha çok bu sıcaklık temel alınarak değerlendirilecektir.

Tablo 5.3 ile Tablo 5.4 bir arada değerlendirildiğinde IT değerleri yüksek olan Eynez, Elmalı, Kısırakdere, Tunçbilek ve Yatağan gibi linyitlerin  $\text{SiO}_2$  oranlarının genellikle yüksek olduğu ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranlarının ise nispeten düşük olduğu görülmektedir. Ancak, bu genel eğilime karşın, IT değerleriyle,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

oranları arasında kurallı bir ilişkiden söz etmek mümkün değildir. Tek tek diğer oksit değerleriyle, IT değerleri arasında da herhangi bir düzenli ilişki görülmemektedir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı arttıkça IT değerinde genel olarak bir düşme eğilimi görülmektedir. Eynez, Kısırakdere ve Tunçbilek linyitleri bu genel eğilimin dışında kalmaktadır. Bu üç linyit  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriklerinin %7-13.76 gibi nispeten yüksek değerlerde seyretmesine karşın, IT değerleri diğer kömürlerin küllerine kıyasla yüksek olmuştur. Küllerin başlangıç deformasyon sıcaklığının  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$  içeriği ile değişimi,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  için gözlenen davranımına benzer şekilde bir kurala uymamaktadır. Ancak, istatistiksel açıdan bakıldığında da,  $\text{CaO}$  oranı %12 'nin üzerine çıktığında IT'de genel olarak bir düşme eğilimi görülmektedir.  $\text{MgO}$  durum daha farklı görünmekte ve hemen hemen aynı  $\text{MgO}$  oranları için dahi kömürlerin IT değerleri arasında büyük farklılıklar görülmektedir: Örneğin  $\text{MgO}$  içerikleri 1.21 olan Deniz-2 ve Göynük linyit küllerinin IT değerleri arasındaki fark 40 K kadar çıkmaktadır. Aynı kömür küllerinin ergime sıcaklıkları arasındaki fark ise 75 K'e kadar çıkmaktadır.

En belirgin ilişki  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ile IT değerleri arasında görülmektedir. Sapmalar oluşmasına karşın, IT değeri genel olarak  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı arttıkça düşmektedir.

Kül yumuşama, yarı-küreselleşme ve ergime sıcaklıklarıyla kül bileşimi arasındaki ilişki, başlangıç deformasyon sıcaklığı için gözlenen ilişkiye benzemektedir.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 ' de sırasıyla orjinal külün IT değerlerinin  $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  ve  $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})$  değerleriyle değişimi görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$ , bazik oksitler olarak bilinmekte ve külün sinterleşmesinde ve aglomerasyonunda önemli rol oynadıkları bilinmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, gerek  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  oranı ve gerekse  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO}$  oranıyla IT arasındaki ilişki, tek tek bu bileşiklerle IT arasındaki ilişkiye benzemekte ve büyük dalgalanmalar göstermektedir. Her iki durumda da IT, oksit içeriklerine bağlı olarak azalarak bir minimumdan geçmekte ve ancak çok yakın  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO}$  değerleri için IT değerlerinde büyük değişiklikler görülebilmektedir.

$\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  (Şekil 5.5) ve  $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})$  (Şekil 5.6), oranları ile FT arasındaki ilişkiye bakıldığında, IT' nin  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  oranı ile değişiminin, FT 'deki değişime benzediği, ancak salınımların daha fazla olduğu göze çarpmaktadır.  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO}$  oranı için ise, FT değerlerindeki değişim orantılı bir artış şeklinde olmaktadır.



Şekil 5.7 ve 5.8’ de orjinal küllerin sırasıyla, başlangıç deformasyon ve ergime sıcaklıkları,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  toplam içeriğinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, deneysel olarak bulunan IT değerleri büyük bir sıçrama göstermektedir. %60 üzerindeki oksit değerlerinde deformasyon sıcaklıklarında bir artış görülmektedir. FT değerlerinin ise, belli bir azalmadan sonra bir minimumdan geçerek tekrar arttığı dikkati çekmektedir.

Tablo 5.5’ de bu grafiklerde kullanılan, küllere ait anorganik bileşimlerin değişik bileşimleri bulunmaktadır.

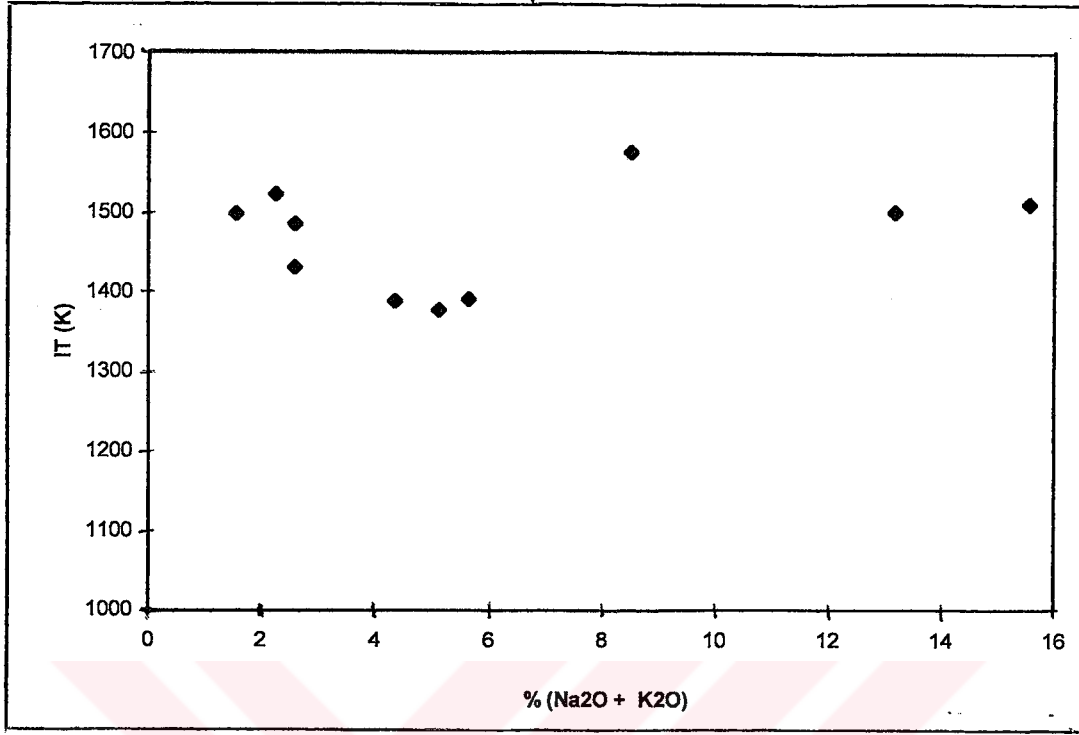
Tablo 5.4. Özgül Kül Sıcaklıkları.

| KÖMÜR       | IT ( K ) | ST ( K ) | HT ( K ) | FT ( K ) |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| Beypazarı   | 1388     | 1429     | 1493     | 1569     |
| Çan         | 1498     | 1595     | 1621     | 1669     |
| Elmalı      | 1485     | 1542     | 1603     | 1684     |
| Eynez       | 1576     | 1801     | 1814     | >1844    |
| Deniş-2     | 1430     | 1484     | 1528     | 1558     |
| Göynük      | 1391     | 1417     | 1444     | 1482     |
| Göynük Şist | 1377     | 1414     | 1460     | 1560     |
| Kısrakdere  | 1501     | 1571     | 1641     | 1673     |
| Tunçbilek   | 1511     | 1538     | 1592     | 1693     |
| Yatağan     | 1522     | 1548     | 1565     | 1703     |

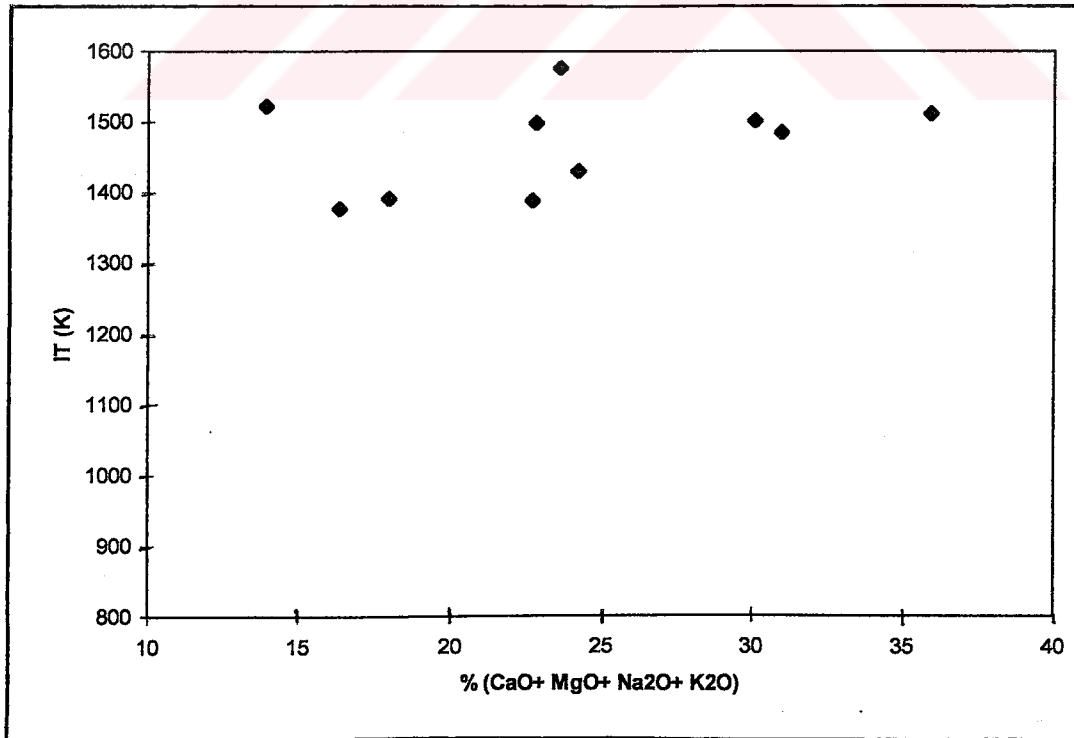
Tablo 5.5. Küllerin Anorganik İçeriklerinin, Kıyaslama Amacıyla Farklı İfadeleri.

| KÖMÜR       | $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ | $\text{CaO}+\text{MgO}$ | $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO}$ | $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Beypazarı   | 1.54                                 | 4.34                                     | 18.36                   | 22.70                                                          | 76.71                                                      |
| Çan         | 0.50                                 | 1.56                                     | 21.28                   | 22.83                                                          | 76.76                                                      |
| Elmalı      | 1.63                                 | 2.59                                     | 28.36                   | 30.95                                                          | 48.36                                                      |
| Eynez       | 2.21                                 | 8.50                                     | 15.12                   | 23.62                                                          | 65.17                                                      |
| Deniş-2     | 0.76                                 | 2.59                                     | 21.63                   | 24.22                                                          | 60.34                                                      |
| Göynük      | 1.28                                 | 5.64                                     | 12.39                   | 17.98                                                          | 73.19                                                      |
| Göynük Şist | 1.04                                 | 5.11                                     | 11.23                   | 16.34                                                          | 62.63                                                      |
| Kısrakdere  | 0.89                                 | 13.18                                    | 16.89                   | 30.07                                                          | 59.73                                                      |
| Tunçbilek   | 1.73                                 | 15.56                                    | 20.35                   | 35.91                                                          | 60.71                                                      |
| Yatağan     | 0.75                                 | 2.24                                     | 11.69                   | 13.93                                                          | 66.46                                                      |

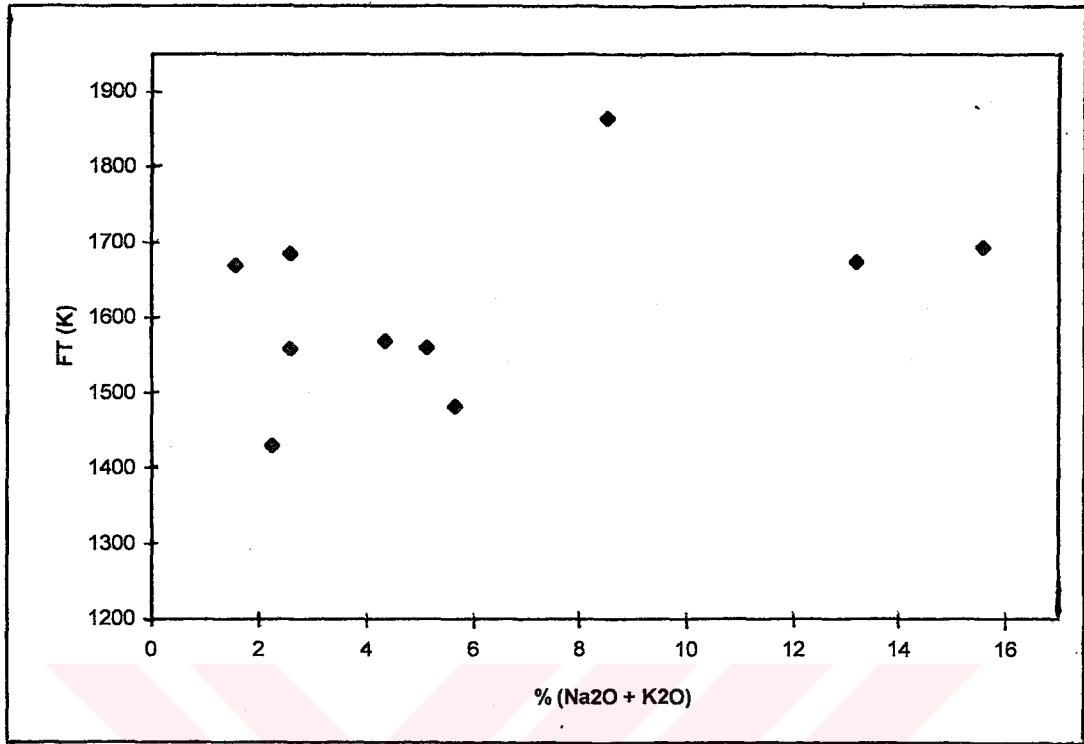




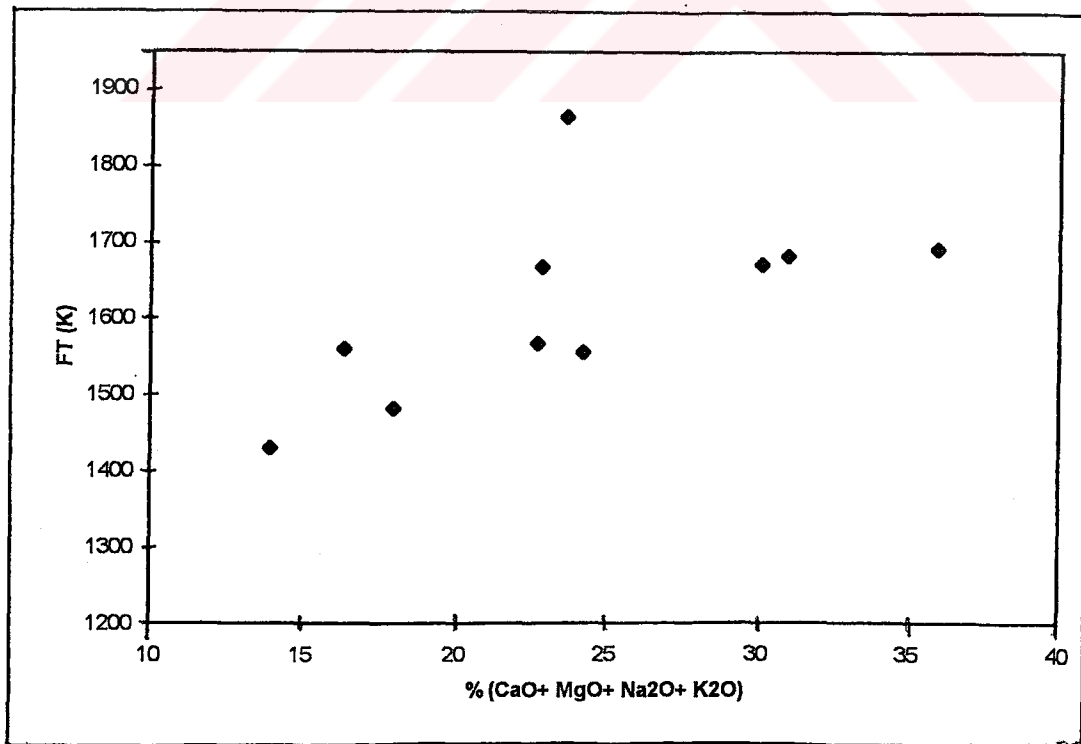
Şekil 5.3. Orjinal Küllerin IT Değerlerinin  $\%(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  İle Değişimi.



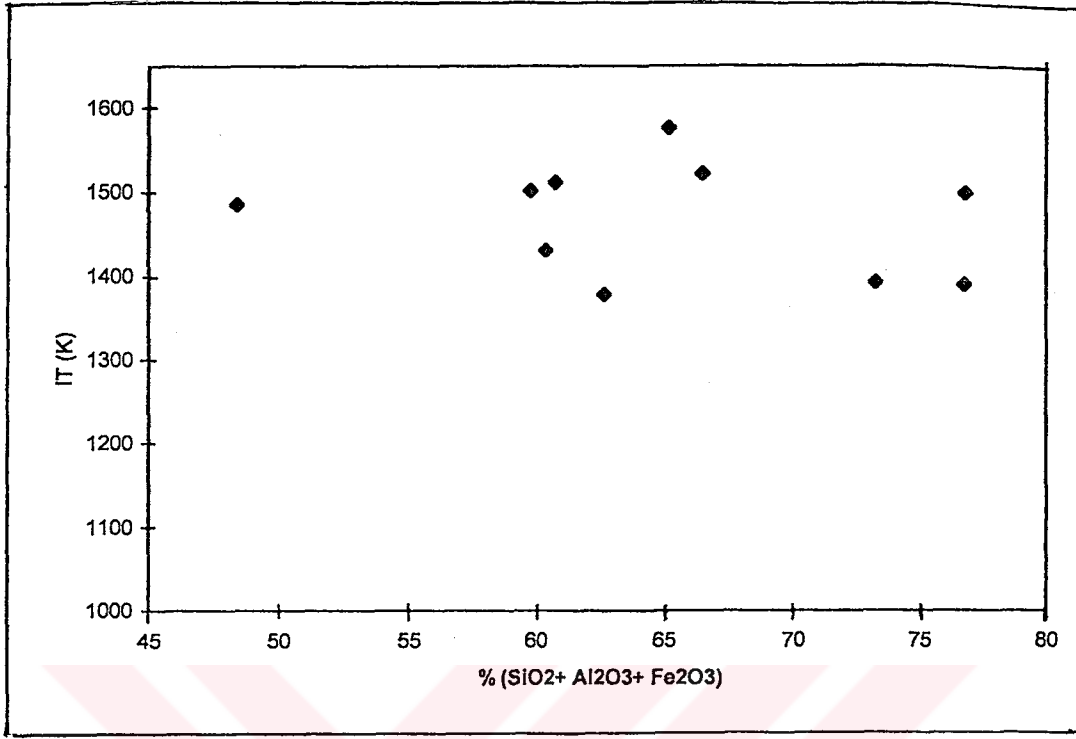
Şekil 5.4. Orjinal Küllerin IT Değerlerinin  $\%(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{CaO})$  İle Değişimi.



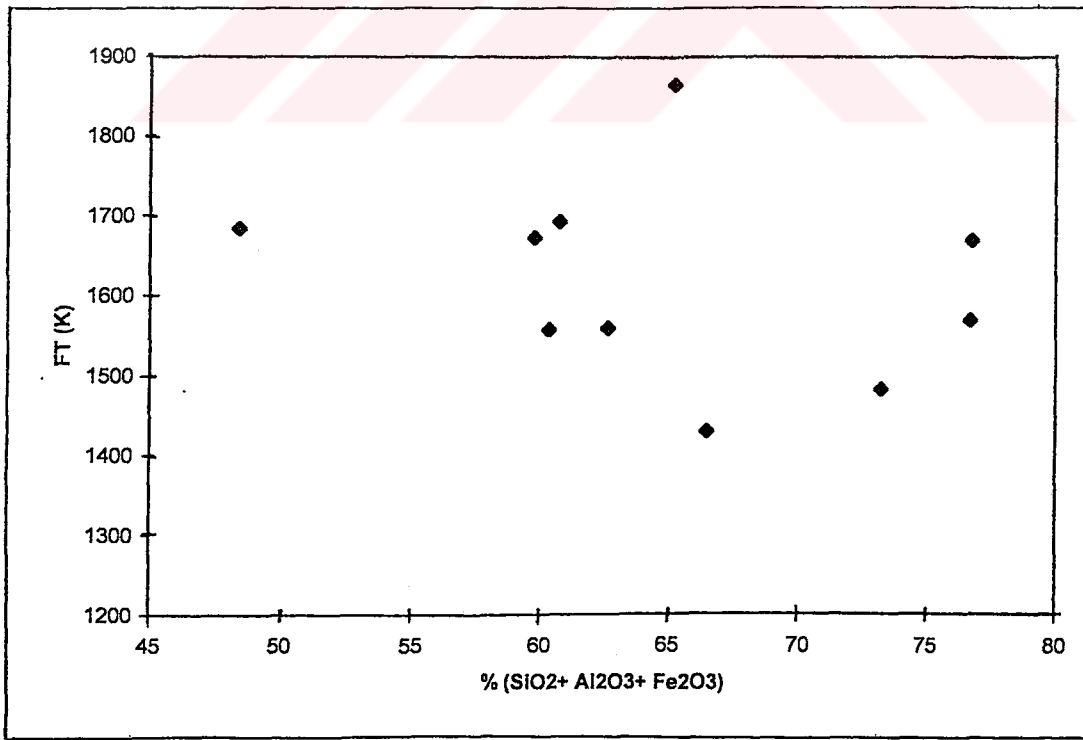
Şekil 5.5. Orjinal Küllerin FT Değerlerinin  $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  İle Değişimi.



Şekil 5.6. Orjinal Küllerin FT Değerlerinin  $\%(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{MgO}+\text{CaO})$  İle Değişimi.



Şekil 5.7. Orjinal Küllerin IT Değerlerinin  $\%(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  İle Değişimi.



Şekil 5.8.. Orjinal Küllerin FT Değerlerinin  $\%(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  İle Değişimi.

### 5.4.2.Katkı İlavesinin Özgöl Sıcaklıklara Etkisi

Daha önceki bölümde, orjinal kömür küllerinde, özgöl sıcaklıklarının külün bileşiminden etkilenmesi incelenmiştir. Bu bölümde, küllere belirli oranlarda katkı maddeleri ilave edilerek bunların özgöl kül sıcaklıklarına olan etkileri incelenmiştir. Bunun için katkı maddesi olarak  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve  $\text{K}_2\text{CO}_3$  kullanılmıştır.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$ , kömür küllerinin sinterleşme ve aglomerasyonunda önemli rol oynadıkları bilinmektedir [20, 29, 32,33, 37,38].

#### 5.4.2.1.CaO İlavesinin Özgöl Kül Sıcaklıklarına Etkisi

Bölüm 5.4.1’de tartışıldığı üzere, kömürlerin kül bileşimleri ile deformasyon ve ergime sıcaklıkları arasındaki ilişki herhangi bir kurala göre gelişen bir ilişki değildir. Bu durum, küllerin genel anorganik yapısının da bu sıcaklıkları etkilediğini göstermektedir. Bu faktörü ortadan kaldırmak için farklı küller değil, aynı külün bileşimini değiştirerek bunun özgöl kül sıcaklıklarına olan etkisini incelemek gerekmektedir.

$\text{CaO}$ ’ in özgöl kül sıcaklıklarına olan etkisini görmek amacıyla, küllere %1-10 arasında değişen oranlarda  $\text{CaO}$  ilavesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.16, 5.17, 5.18’ de gösterilmiştir. Bu şekillerde, özgöl sıcaklıklar, ilave edilen ve orjinal külde bulunan  $\text{CaO}$  toplamının bir fonksiyonu olarak çizilmiştir.

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi,  $\text{CaO}$  ilavesi Beypazarı linyiti külünün özgöl sıcaklıklarında önemli bir değişmeye yol açmamakla beraber,  $\text{CaO}$  oranı arttıkça sıcaklıklarda az da olsa bir düşme göze çarpmaktadır.

Çan linyitinin özgöl kül sıcaklıklarının  $\text{CaO}$  ile değişimi Şekil 5.10’da görülmektedir. Toplam  $\text{CaO}$  %19.5 ile %27.6 arasında değişmektedir.  $\text{CaO}$  oranının %19.5’ den %27.6’ ya çıkarılması sonucunda başlangıç deformasyon sıcaklığında 45 K kadarlık bir düşme meydana gelmiştir. Ergime sıcaklığında ise düzgün bir değişmeden çok, bir dalgalanma gözlenmiştir.

Şekil 5.11’ de Elmalı linyiti külünün  $\text{CaO}$  oranı ile değişimi veriliyor.Elmalı linyiti külünün özgöl sıcaklıklarında,  $\text{CaO}$  ilavesiyle diğer linyit küllerine kıyasla, daha büyük bir düşme dikkati çekmektedir. Sıcaklıklardaki düşme,  $\text{CaO}$  yüzdesiyle orantılı

büyük bir düşme dikkati çekmektedir. Sıcaklıklardaki düşme, CaO yüzdesiyle orantılı olmuştur. CaO oranındaki %7.4' lük artış, başlangıç deformasyon sıcaklığını 38 K ve ergime sıcaklığını 109 K kadar düşürmüştür.

Şekil 5.12' de Eynez linyiti külünün özgül sıcaklıkları CaO içeriğinin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. CaO oranı, %12.7' den %21.44' e yükseltilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, CaO oranındaki artışa paralel olarak önemli ölçüde düşme meydana gelmiştir : IT değeri, 76 K, FT değeri ise ~130 K kadarlık bir düşüş göstermiştir.

Deniş-2 linyiti külünün Şekil 5.13' de görüldüğü gibi, diğer linyitlerden oldukça farklı bir davranım göstermektedir. CaO oranındaki artışa paralel olarak beklenenin tersine, bir artış görülmektedir. Ancak, bu artış çok düşük miktarlarda kalmış bulunmaktadır.

Göynük linyiti külünün özgül sıcaklıklarının, toplam CaO ile değişimi Şekil 5.14' de görülmektedir. %14.7' lik CaO oranındaki, FT değeri sapmanın dışında, diğer değerlerde saptanan değişim 10 K gibi oldukça küçük bir aralıkta gerçekleşmektedir.

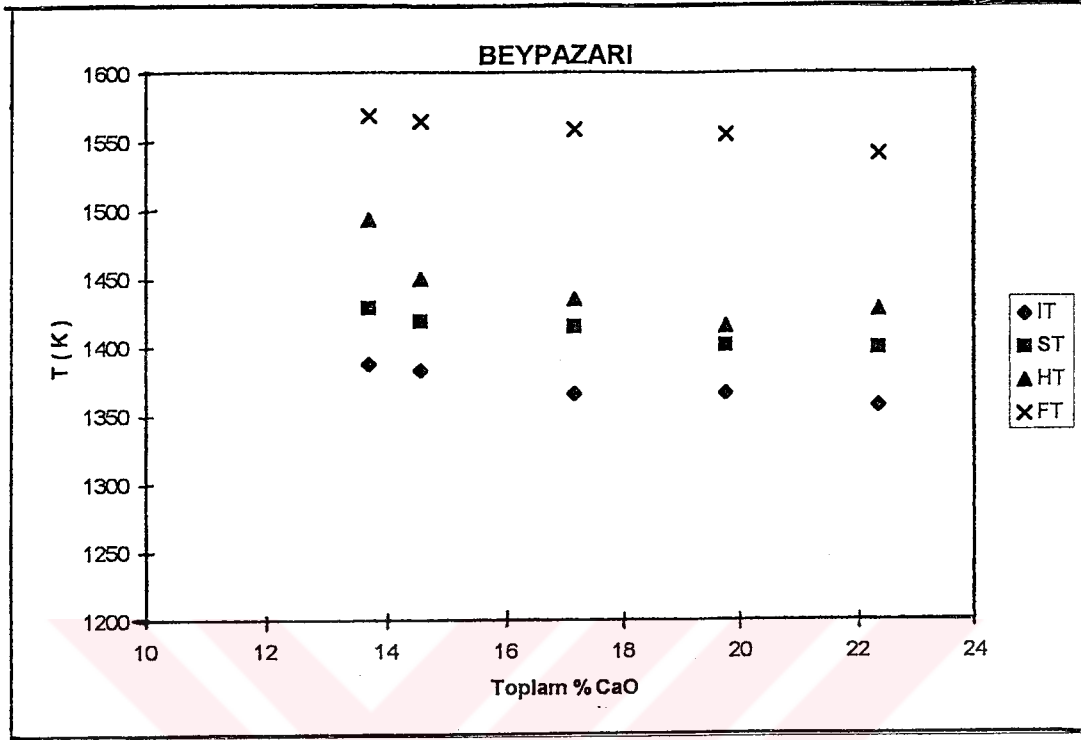
Şekil 5.15' de Göynük şist külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO içeriği ile değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi, CaO oranındaki değişmeden en çok FT etkilenmiştir. Diğer sıcaklıklarda değişme daha sınırlı kalmıştır. Ergime sıcaklığında, salınımlarla beraber, 98 K kadarlık bir düşüş gözlenmektedir.

Kısrakdere linyiti külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO içeriği ile değişimi Şekil 5.16' da görülmektedir. %22.6 CaO oranına kadar sıcaklıklarda önemli bir değişiklik göze çarpmamaktadır. Ancak, bu oranın üstündeki sıcaklıklarda bir düşme görülmektedir.

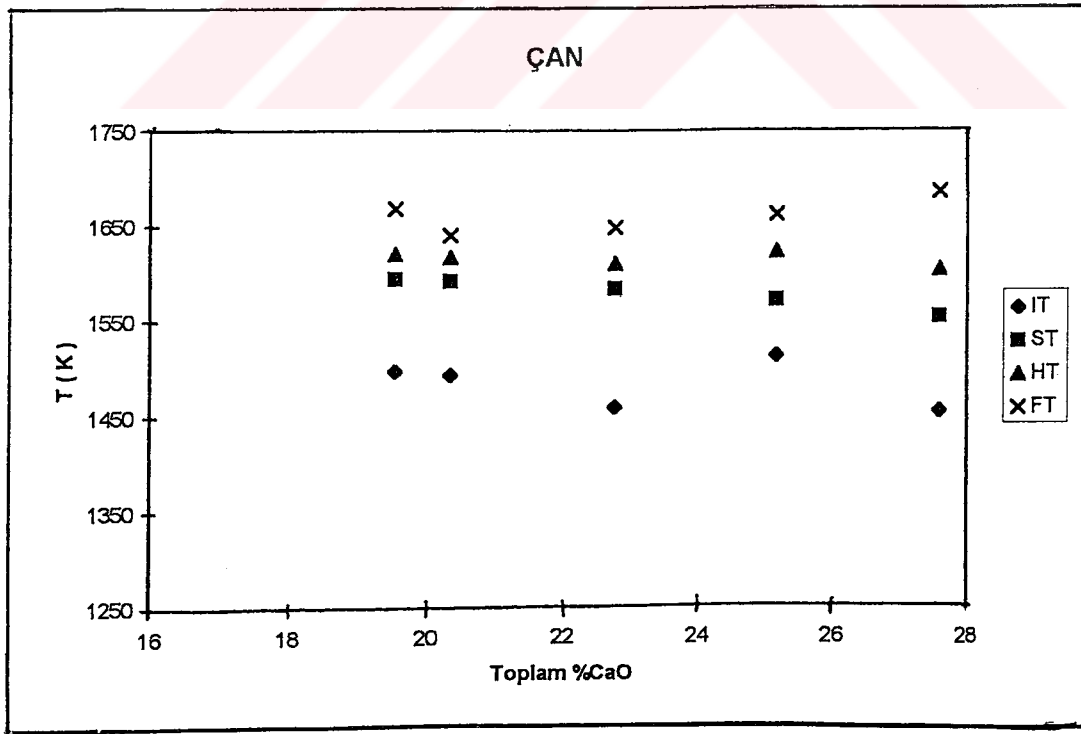
Tunçbilek linyit külünün özgül sıcaklıklarının toplam CaO miktarı ile değişimi Şekil 5.17' de sunulmuştur. Şekilden de görüldüğü gibi, CaO miktarındaki %8.6' lık bir artış, başlangıç deformasyon sıcaklığında 127 K, akma sıcaklığında da, 80 K gibi, yüksek oranda bir düşüşe sebep olmaktadır.

Yatağan linyiti külünün özgül sıcaklıklarının, CaO ilavesi ile değişimi Şekil 5.18' de görülmektedir. CaO oranındaki artışa bağlı olarak bütün sıcaklıklarda düşme kaydedilmiştir. Bu külde, FT değerinde düşmenin diğerlerine kıyasla daha fazla olması

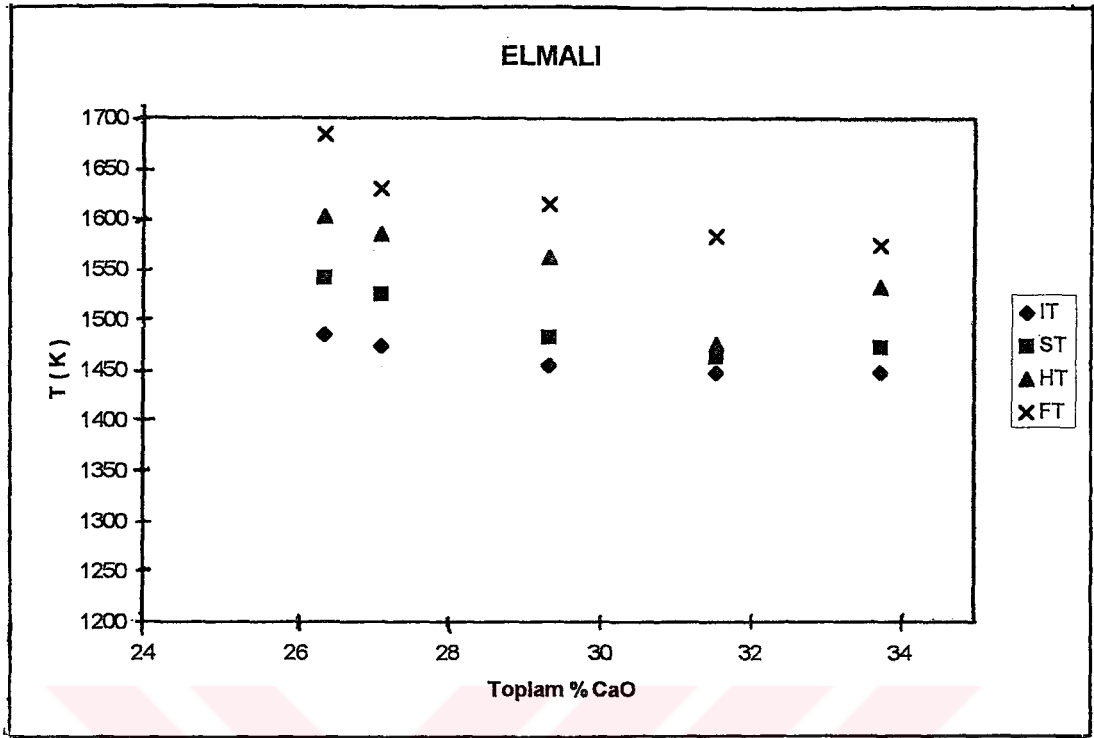
dikkati çekmektedir. Cao oranında %9 oranında artış, FT' de yaklaşık 130 K' lik bir düşmeye neden olmuştur. Diğer sıcaklıklarda düşme daha sınırlı kalmıştır.



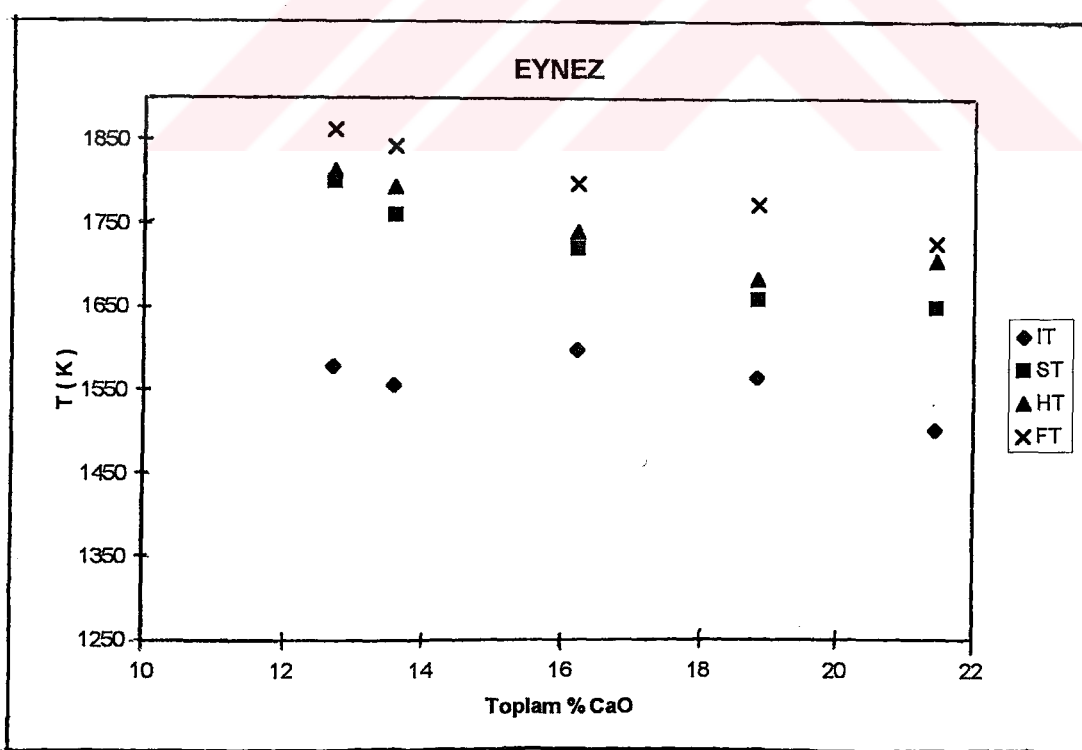
Şekil 5.9. Beypazarı Linyiti Külünün Özgül Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi.



Şekil 5.10. Çan Linyiti Külünün Özgül Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi

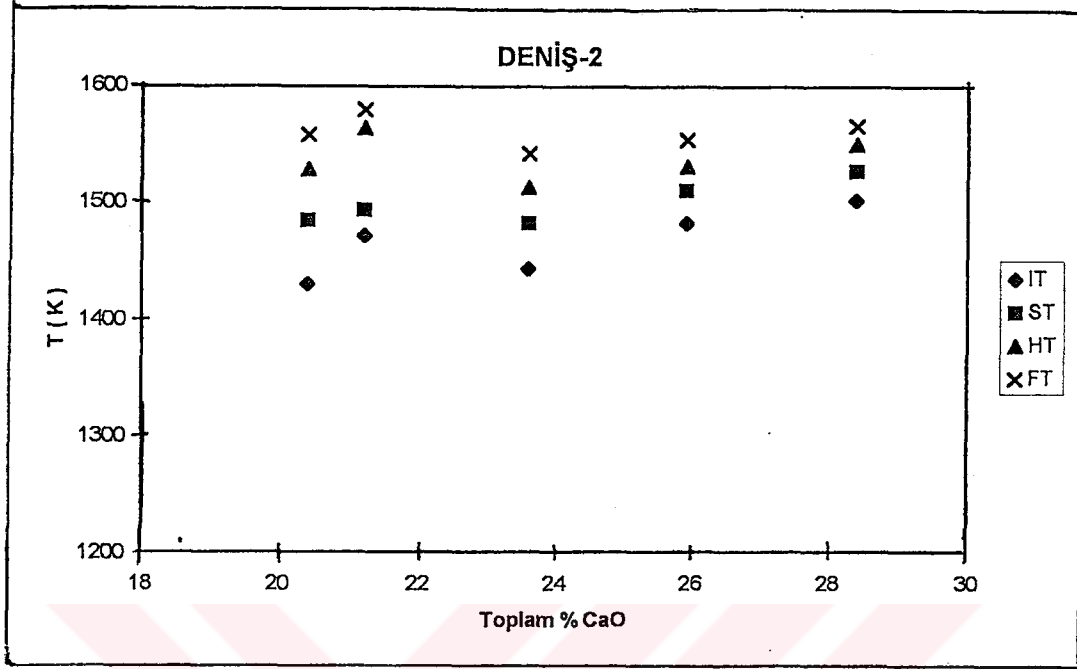


**Şekil 5.11.** Elmalı Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi.

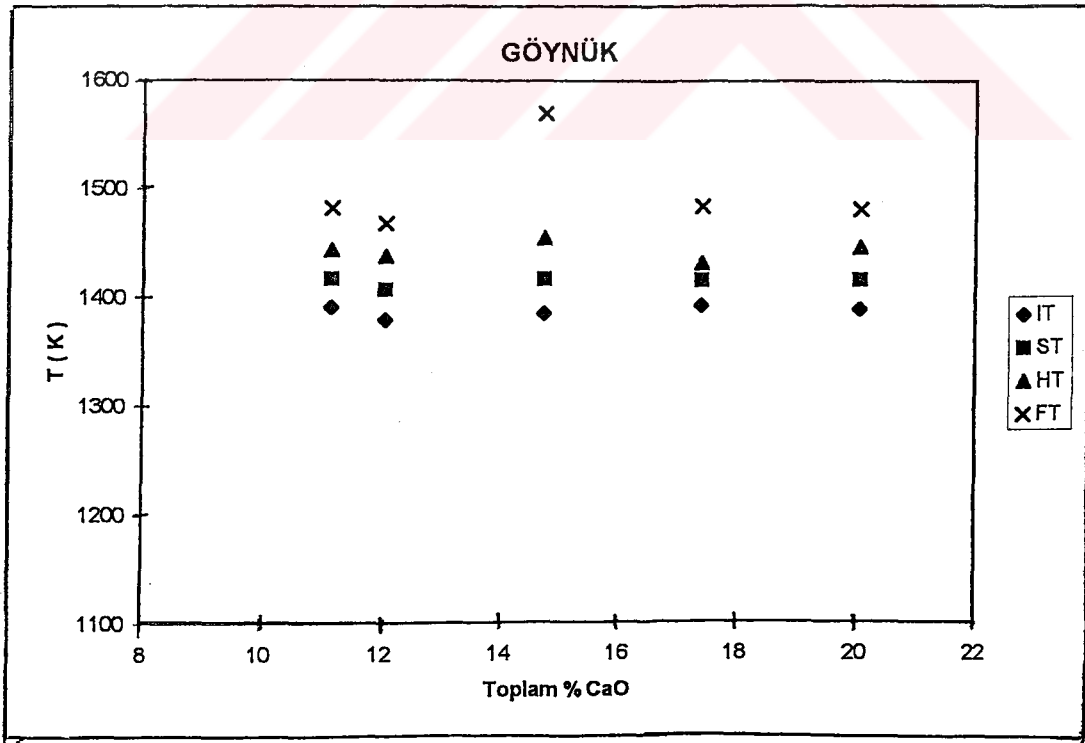


**Şekil 5.12.** Eynez Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi

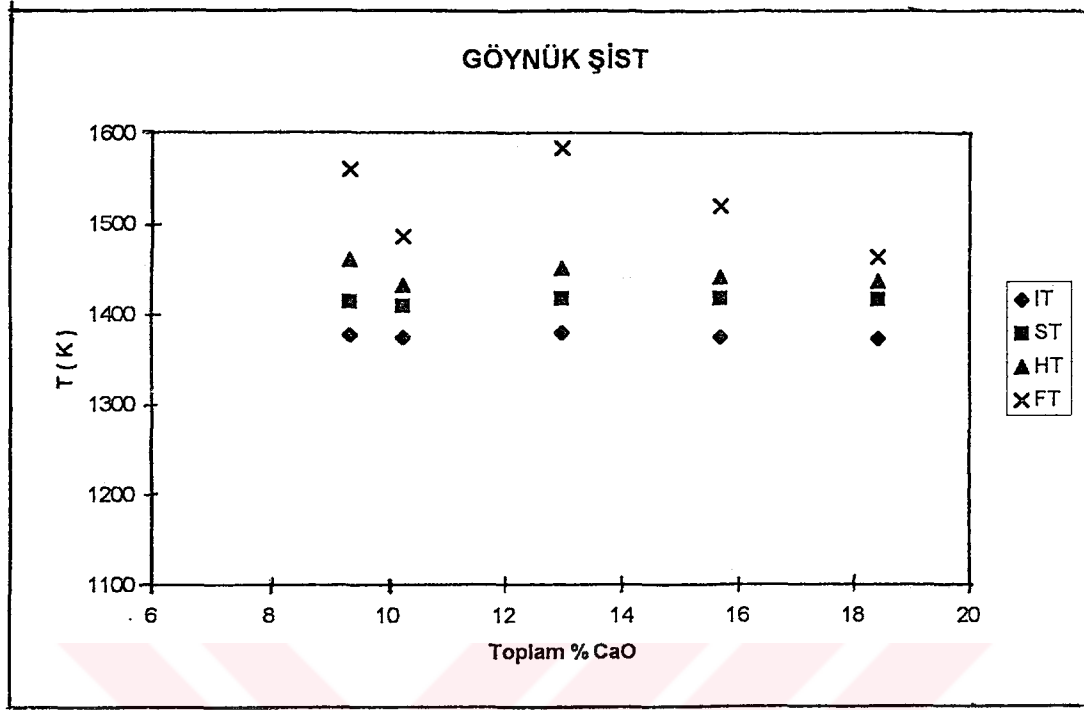




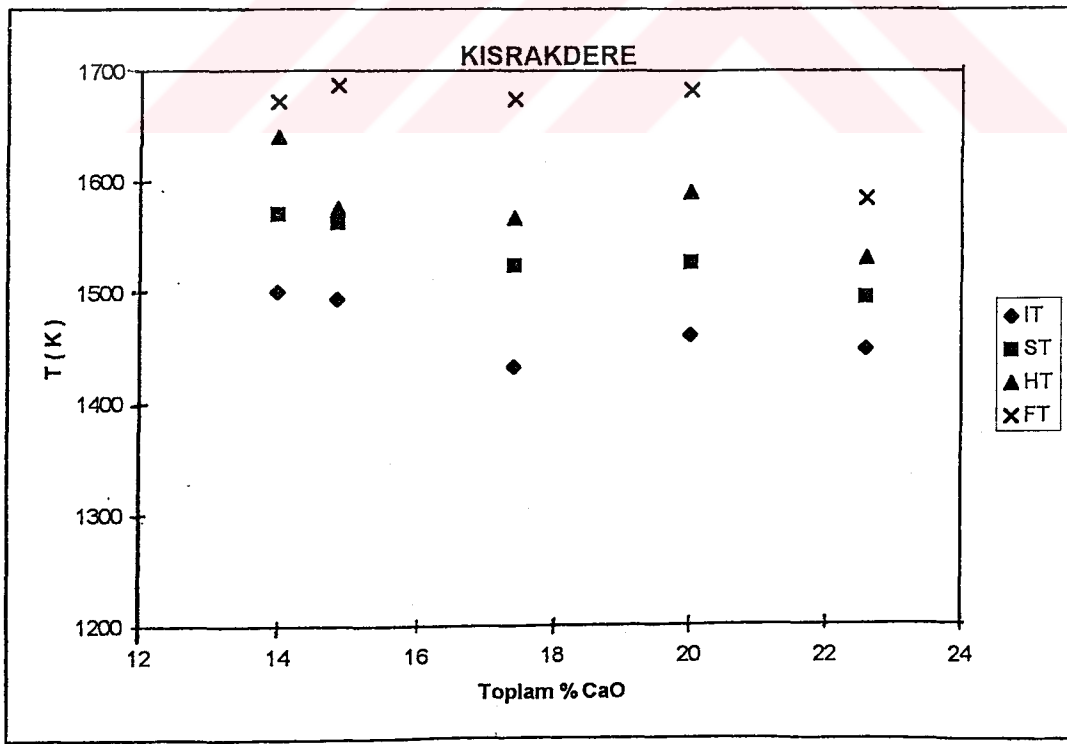
**Şekil 5.13.** Deniş-2 Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi.



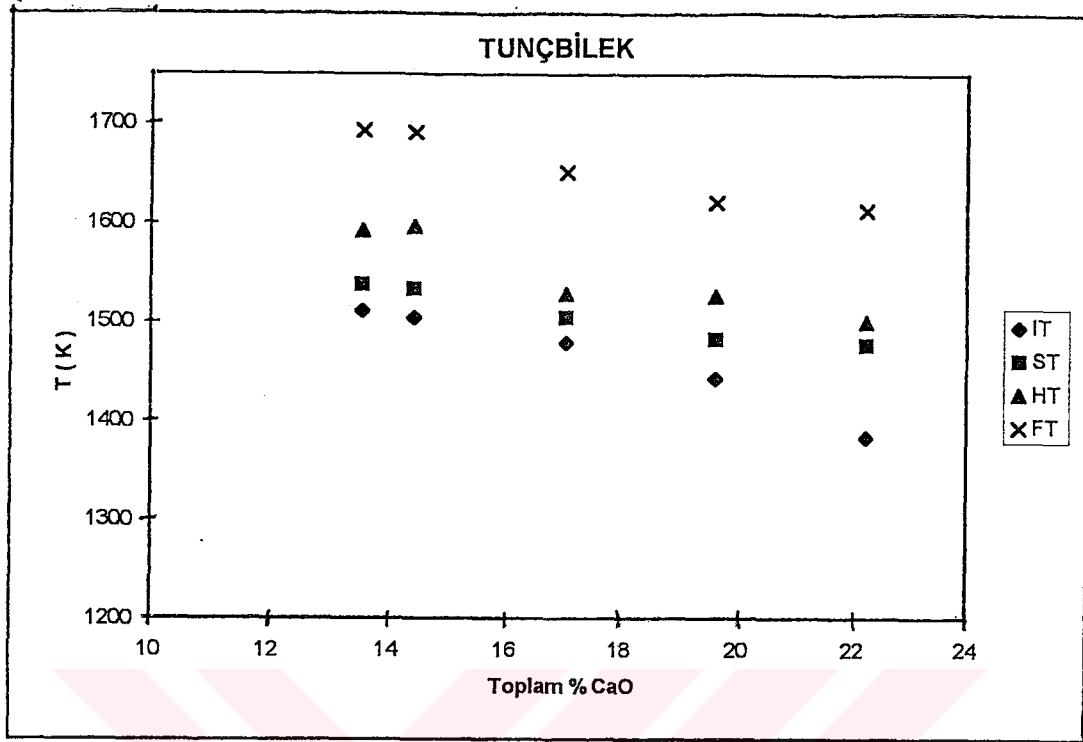
**Şekil 5.14.** Göynük Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi.



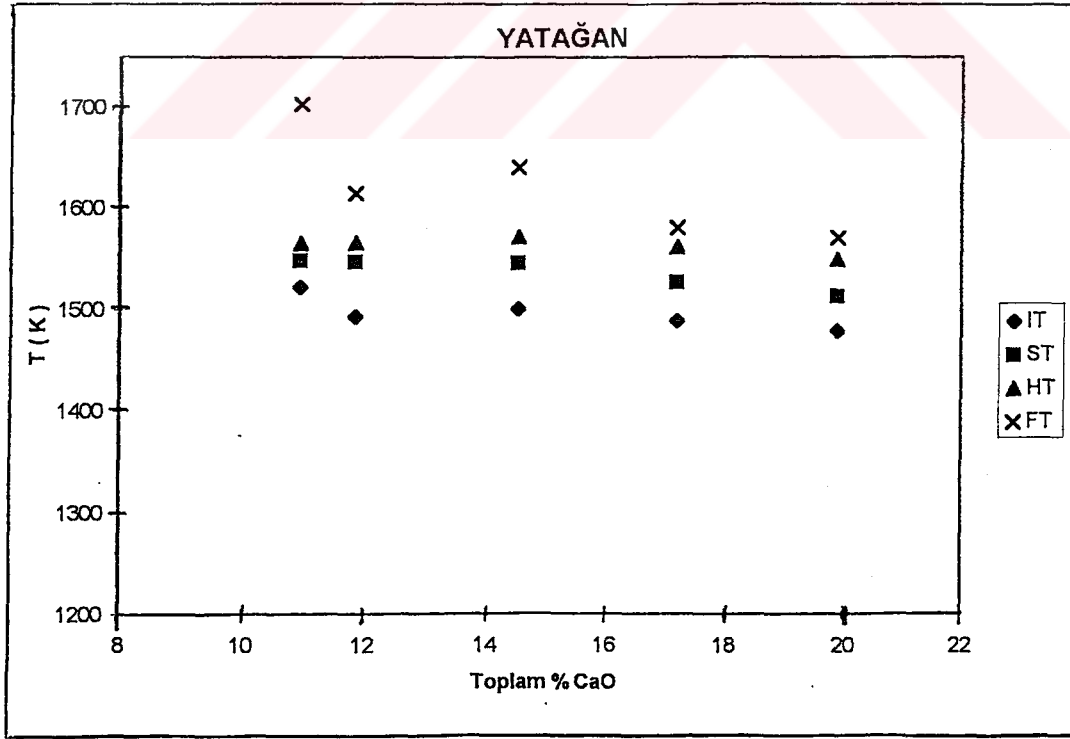
**Şekil 5.15.** Göynük Şist Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.16.** Kısrakdere Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.17.** Tunçbilek Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.18.** Yatağan Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam CaO Oranı İle Değişimi

#### 5.4.2.2. $\text{Na}_2\text{CO}_3$ İlavesinin Özgül Kül Sıcaklıklarına Etkisi

$\text{Na}_2\text{O}$  miktarındaki artışın özgül kül sıcaklıklarına olan etkisini incelemek amacıyla, küllere %2-20 arasında değişen miktarlarda  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ilave edilmiş ve elde edilen katkılı küllerin, 4 sıcaklıkları ölçülmüştür.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ' ın, tamamen okside olduğu varsayılarak ilave edilen %  $\text{Na}_2\text{O}$  hesaplanmıştır.

Küllerin içerdiği ve ilave edilen  $\text{Na}_2\text{O}$  toplanarak küllerin toplam  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, Şekil 5.19, 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.26, 5.27, 5.28' de gösterilmiştir. Şekillerde, özgül sıcaklıklar, ilave edilen ve orjinal külden bulunan  $\text{Na}_2\text{O}$  toplamının bir fonksiyonu olarak grafiğe geçirilmiştir.

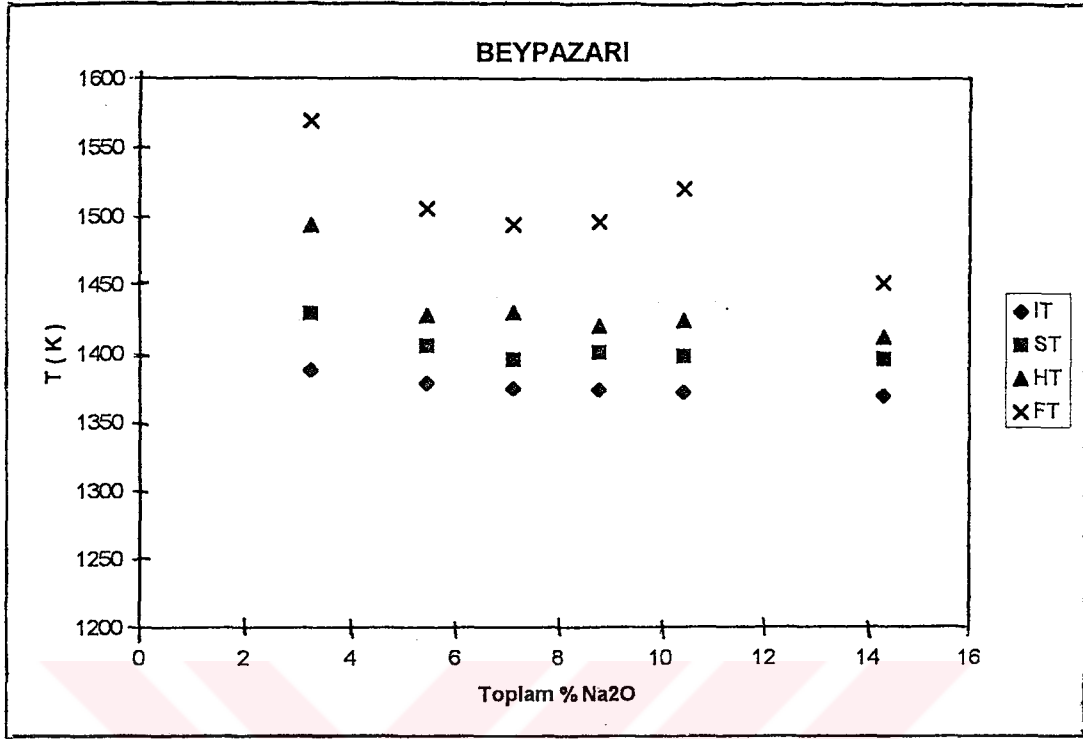
Bey pazarı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının, toplam  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı ile değişimi Şekil 5.19' da verilmiştir. Şekil incelendiğinde,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranındaki artıştan en çok FT değerinin etkilendiği, diğer sıcaklıkların daha az oranlarda etkilendiği görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının % 3.25'den %14.3' e çıkarılmasıyla deformasyon sıcaklığı 20 K, ergime sıcaklığı ise 120 K kadar düşmüştür.

Çan linyiti küllerinin özgül sıcaklıklarının  $\text{Na}_2\text{O}$  oranındaki artıştan daha az etkilendiği görülmektedir, Şekil 5.20.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının %1.3' den %12.7' ye yükseltilmesi ile, başlangıç deformasyon sıcaklığında 20 K' lik, akma sıcaklığında ise 86 K' lik bir düşüş kaydedilmiştir.

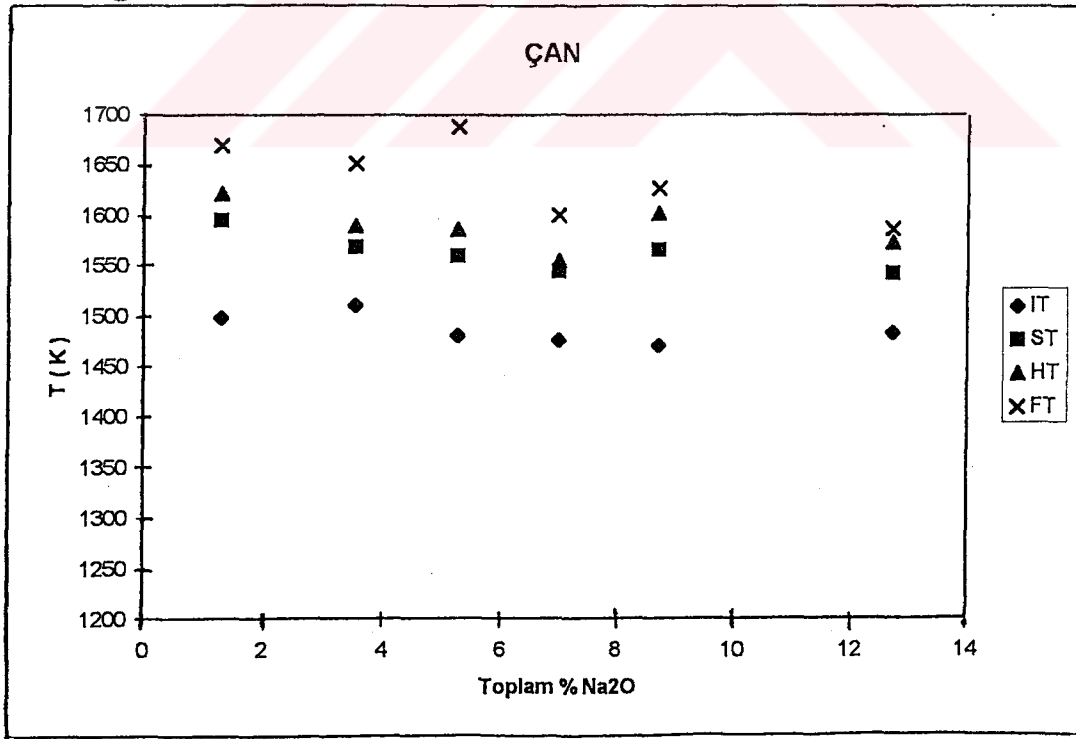
Elmalı linyiti külünün özgül sıcaklıklarının  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği ile değişimi Şekil 5.21' de sunulmuştur. %5.64  $\text{Na}_2\text{O}$  oranına kadar sıcaklıklarda sürekli bir düşüş meydana gelmiştir. Ancak, bu noktadan sonra, bir artış meydana gelmiştir.

Eynez linyiti külünün toplam  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı %7-17.3 arasında değiştirilmiştir. Sonuçlar Şekil 5.22' de verilmiştir. Bütün sıcaklıklar  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarı ile orantılı olarak düşmüştür ve bu düşme diğer kömürlere kıyasla daha yüksek olmuştur. Ergime sıcaklığındaki, 180 K' nin üzerindeki düşüş dikkati çekmektedir. Başlangıç deformasyon sıcaklığında ise yaklaşık 90 K'lik bir düşme gerçekleşmiştir.

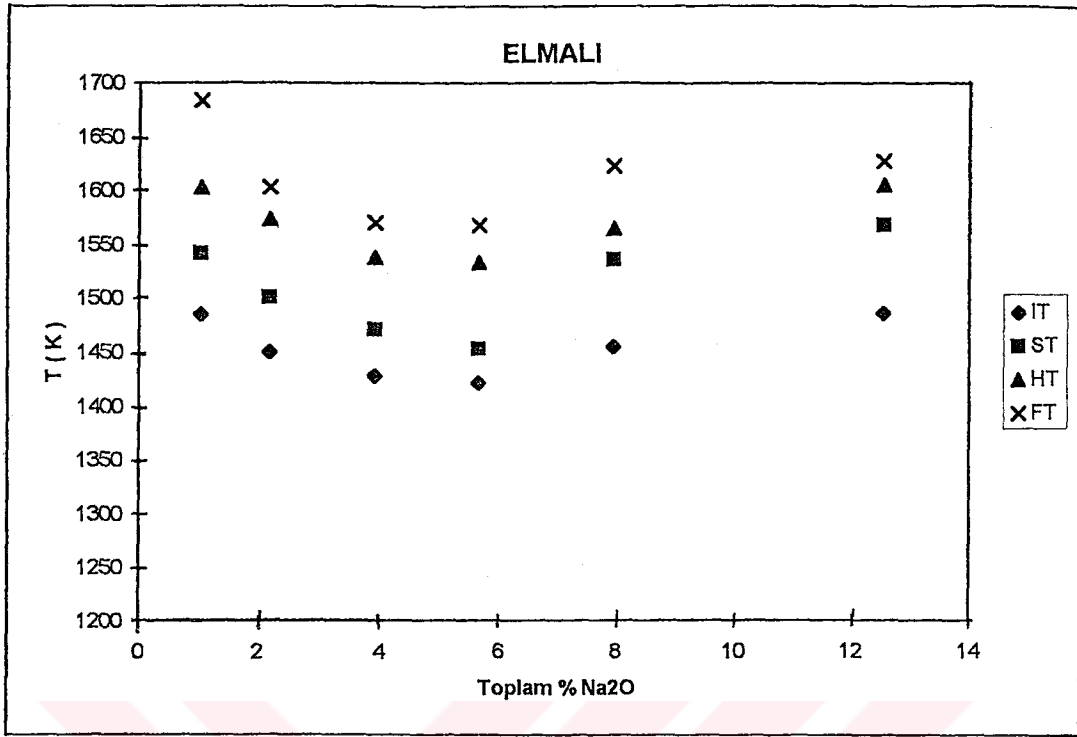
Deniş-2 linyiti külünün özgül sıcaklıkları ise Şekil 5.23' de görüldüğü gibi,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranındaki artıştan pek etkilenmemiştir. Sıcaklıklar dar bir aralıkta dalgalanmalar göstermişlerdir. Beklenilenin tersine, başlangıç deformasyon sıcaklığında 40 K' lik bir artış meydana gelmiştir.



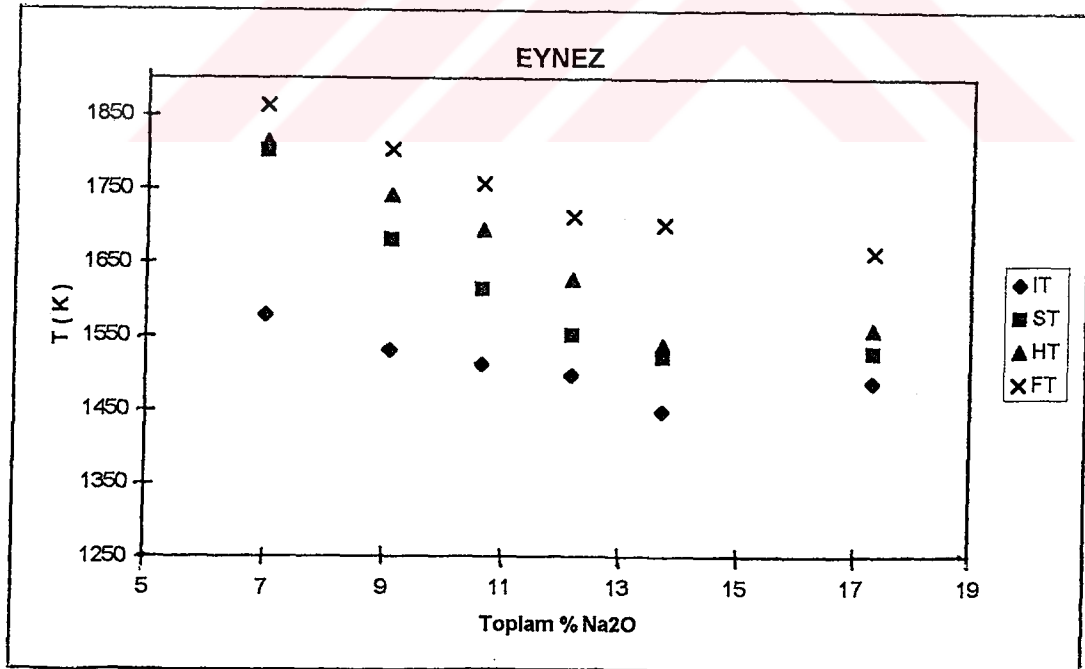
**Şekil 5.19.** Beypazarı Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O Oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.20.** Çan Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O Oranı İle Değişimi



**Şekil 5.21.** Elmalı Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O Oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.22.** Eynez Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O Oranı İle Değişimi.

Şekil 5.24' de Göynük linyiti külünün sıcaklıkları,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının bir fonksiyonu olarak görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı %5'den %12.73' e çıkmasına karşın sıcaklıklarda hissedilir bir değişiklik kaydedilmemiştir.

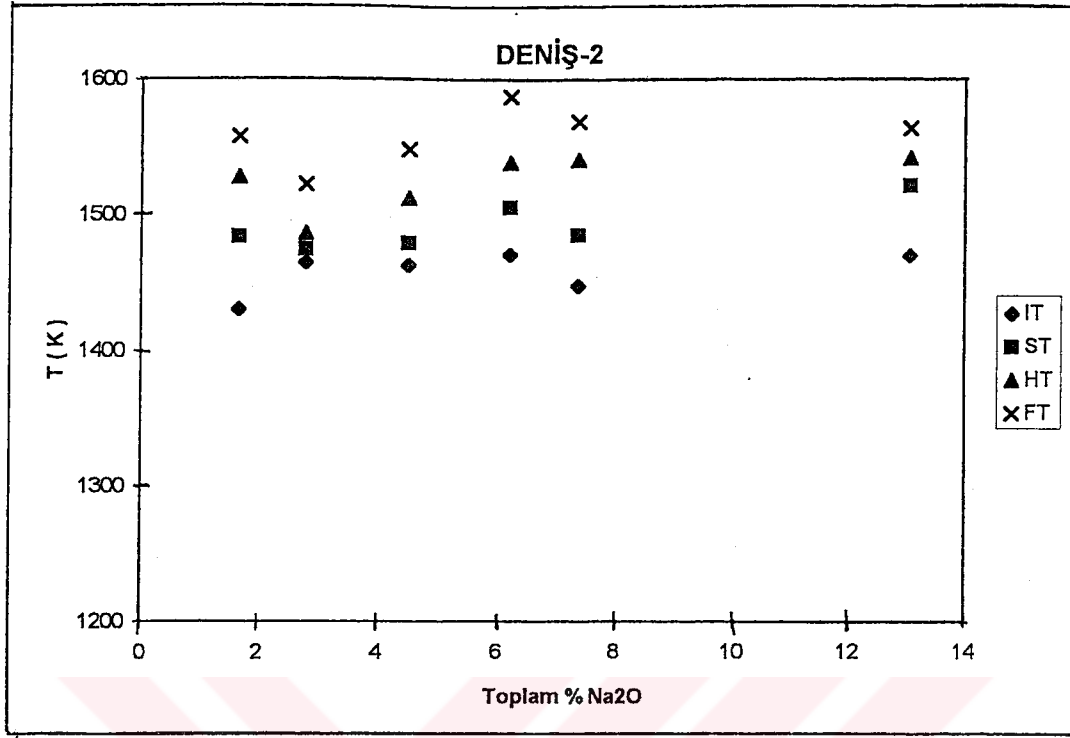
Göynük şist külüne  $\text{Na}_2\text{O}$  ilavelerinin, özgül sıcaklıklarda meydana getirdiği değişiklikler Şekil 5.25' de görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının artması ile sıcaklıklarda bir miktar düşüş kaydedilmiş, ancak %5 üstündeki  $\text{Na}_2\text{O}$  oranında önemli bir değişiklik görülmemektedir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı %15' lere kadar çıkmasına karşın, FT değerinde toplam 68 K, IT değerinde 15 K' lik düşüş kaydedilmiştir.

Kısırakdere linyiti külünün özgül sıcaklıklarının,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı ile değişimi Şekil 5.26' da görüldüğü gibi, Elmalı linyiti külü ile büyük bir benzerlik göstermektedir. Sıcaklıklar,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranındaki artışa paralel olarak düşmüştür. Ancak,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı %16' ya ulaştıktan sonra sıcaklıklarda bir artış olduğu dikkati çekmektedir.

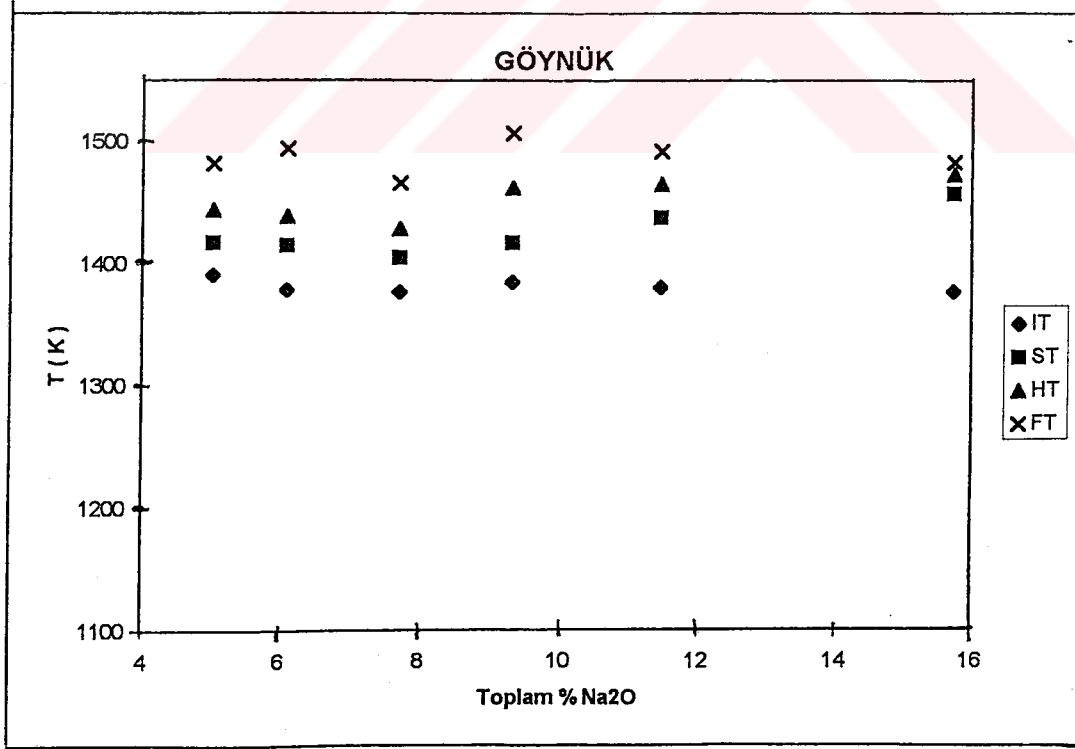
Şekil 5.27' de görüldüğü gibi, Tunçbilek linyiti külüne ait özgül sıcaklıklar,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranındaki artış ile orantılı olarak düzenli şekilde azalmıştır. Diğer kömürlerle kıyaslandığında sıcaklıklardaki düşüş daha belirgin ve sistematik olmuştur.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranındaki %9' luk artış başlangıç deformasyon sıcaklığında 122 K, ergime sıcaklığında ise 150 K' e varan bir düşüşe sebep olmuştur.

Şekil 5.28' de Yatağan linyiti külünün özgül sıcaklıklarının,  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı ile değişimi görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi, sıcaklıklar başlangıçta  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarının artmasıyla sürekli düşmüştür.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı %8'i aştıktan sonra bu azalma yerini bir artışa bırakmıştır.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı %8'e ulaştığında başlangıç deformasyon sıcaklığı 130 K, ergime sıcaklığı ise yaklaşık 160 K'lik bir düşüş göstermiştir. Bu noktanın üstünde görülen artış oranı ise hiç bir zaman bu azalmayı telafi edecek bir değere ulaşmamıştır ve sıcaklıklar hep orjinal kül özgül sıcaklık değerlerinin 80-110 K altında kalmıştır.

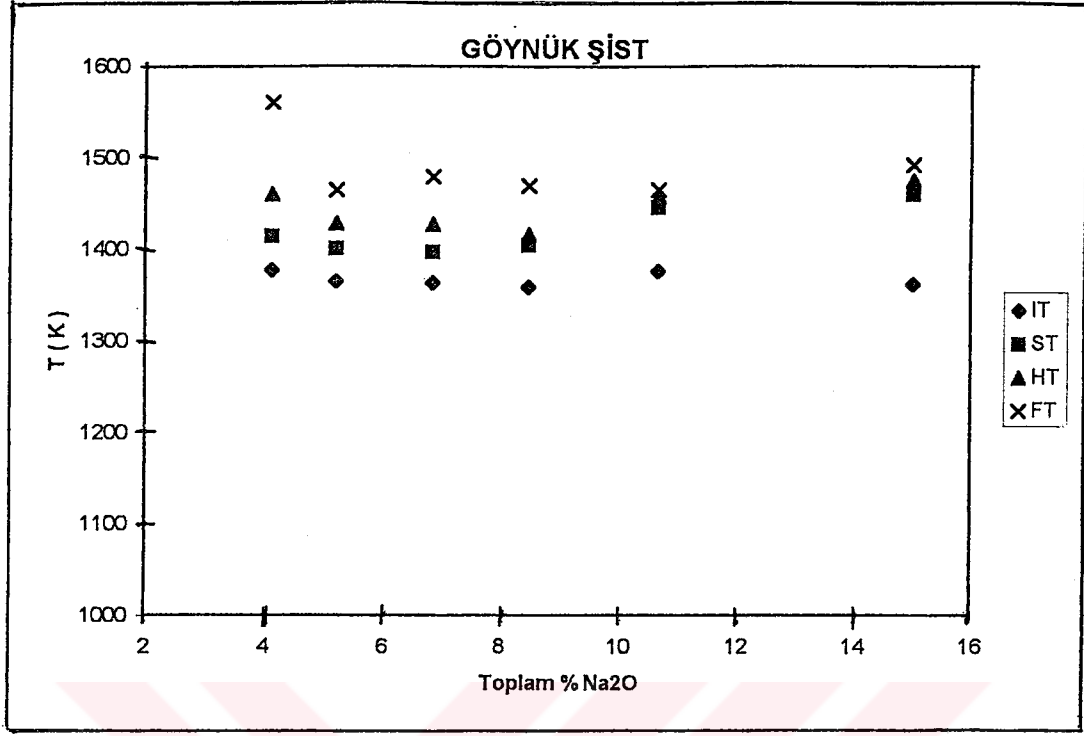




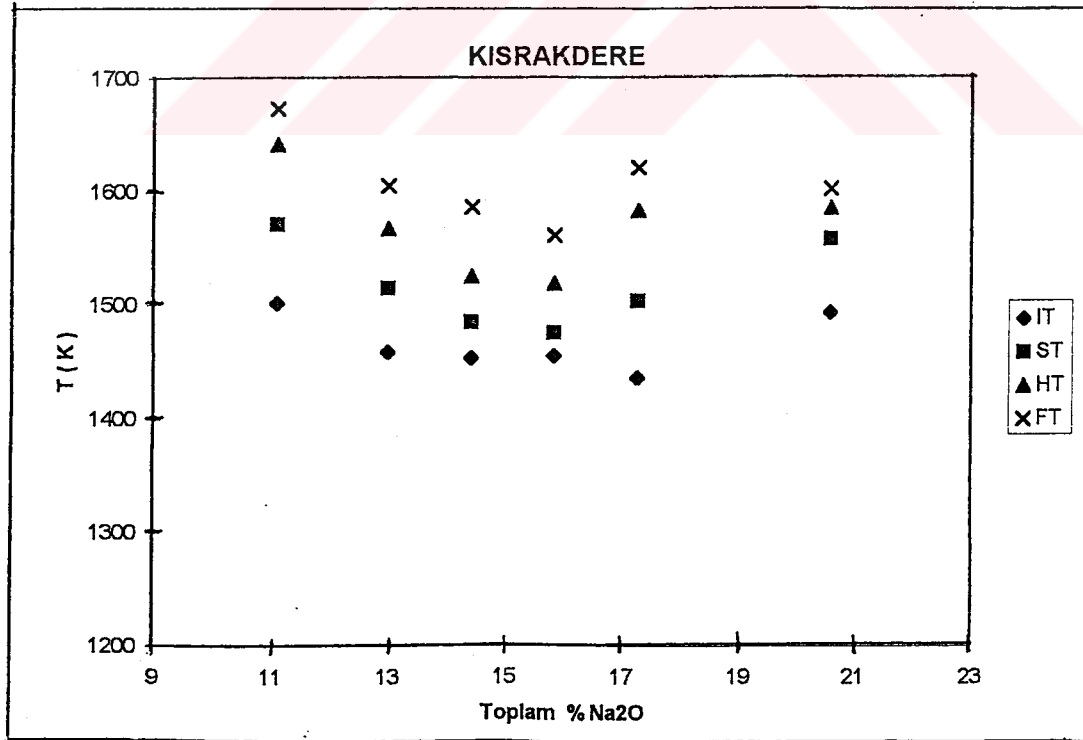
**Şekil 5.23.** Deniş-2 Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O oranı İle Değişimi.



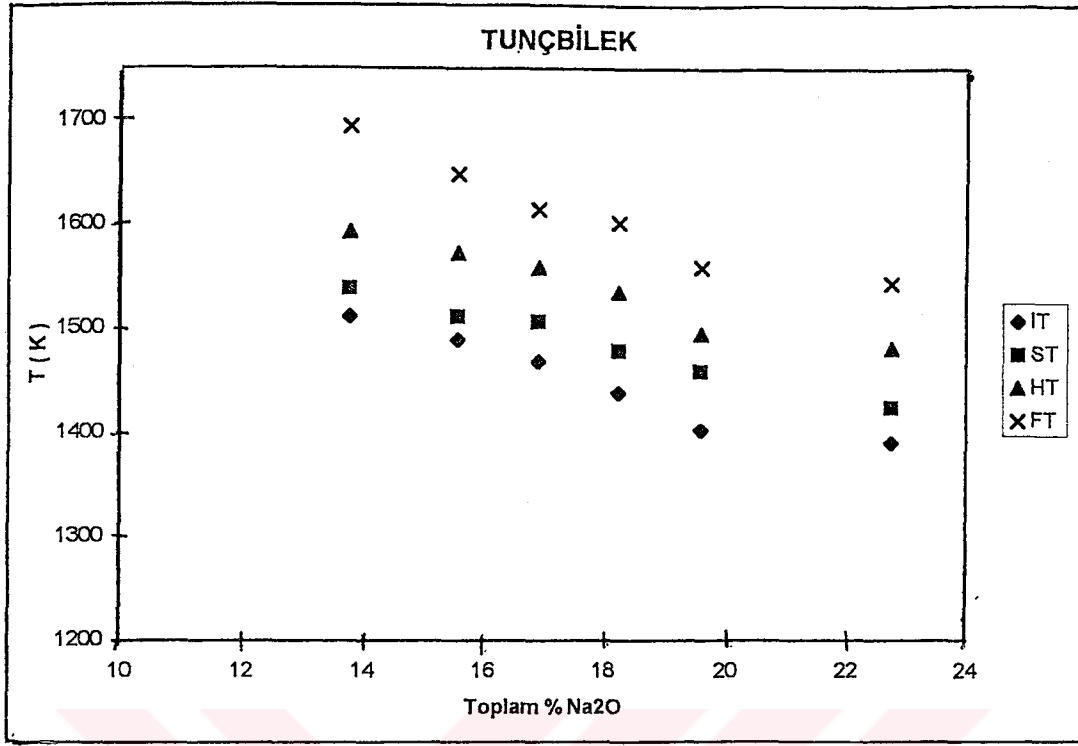
**Şekil 5.24.** Göynük Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O oranı İle Değişimi.



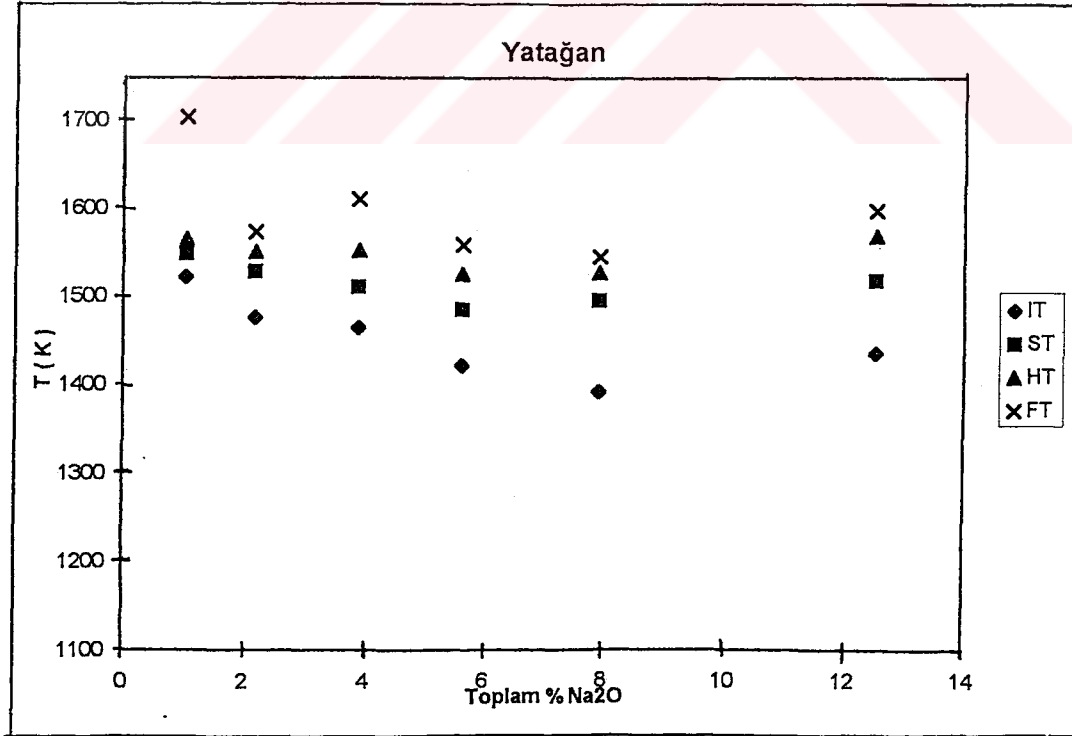
**Şekil 5.25.** Göynük Şisti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.26.** Kısırakdere Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.27.** Tunçbilek Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.28.** Yatağan Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam Na<sub>2</sub>O oranı İle Değişimi.

#### 5.4.2.3. $K_2CO_3$ İlavesinin Beypazarı Linyitinin Özgül Sıcaklıklarına Etkisi

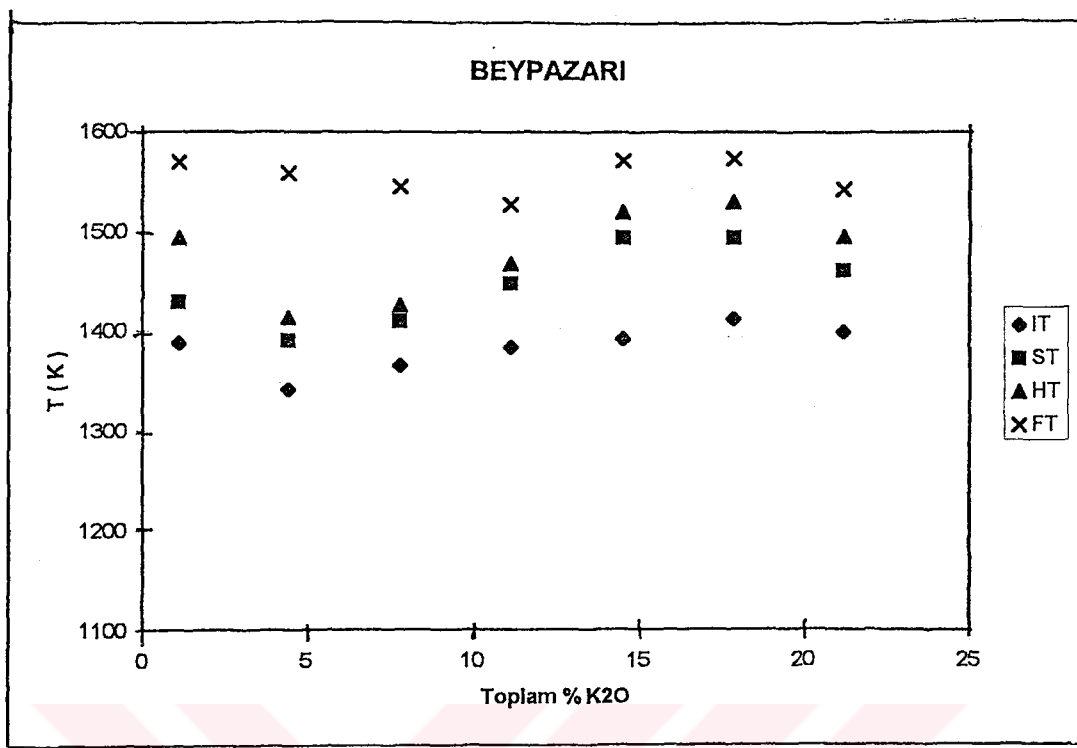
Kömürlerin sinterleşmesinde ve aglomerasyonunda önemli rol oynadığı belirtilen bileşiğin  $K_2O$  olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, yalnızca bir tek Beypazarı linyitinin külüne,  $K_2CO_3$  eklenerek  $K_2O$  oranındaki artışın etkisi incelenmiştir. 1170 K üstündeki, yüksek sıcaklıklarda  $K_2CO_3$ 'ın tümü ile  $K_2O$ 'a dönüştüğü kabul edilerek,  $K_2CO_3$  miktarından  $K_2O$  miktarına geçilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 5.29' da görülmektedir. Bu şekilde, özgül sıcaklıklar, ilave edilen ve orjinal külde bulunan  $K_2O$  toplamının bir fonksiyonu olarak çizilmiştir.

Şekilden de görüldüğü gibi,  $K_2O$  miktarına bağlı olarak sıcaklıklarda bir dalgalanma meydana gelmiştir. Sıcaklıklarda önce bir düşme daha sonra  $K_2O$  oranı %12' nin üstüne çıktığında ise bir artış gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar,  $K_2O$ 'ın bu linyitin sıcaklıklarını önemli ölçüde değiştirmediğini ortaya koymaktadır.  $K_2O$  rolünün belirlenebilmesi için daha çok kömürün incelenmesi gerekmektedir.

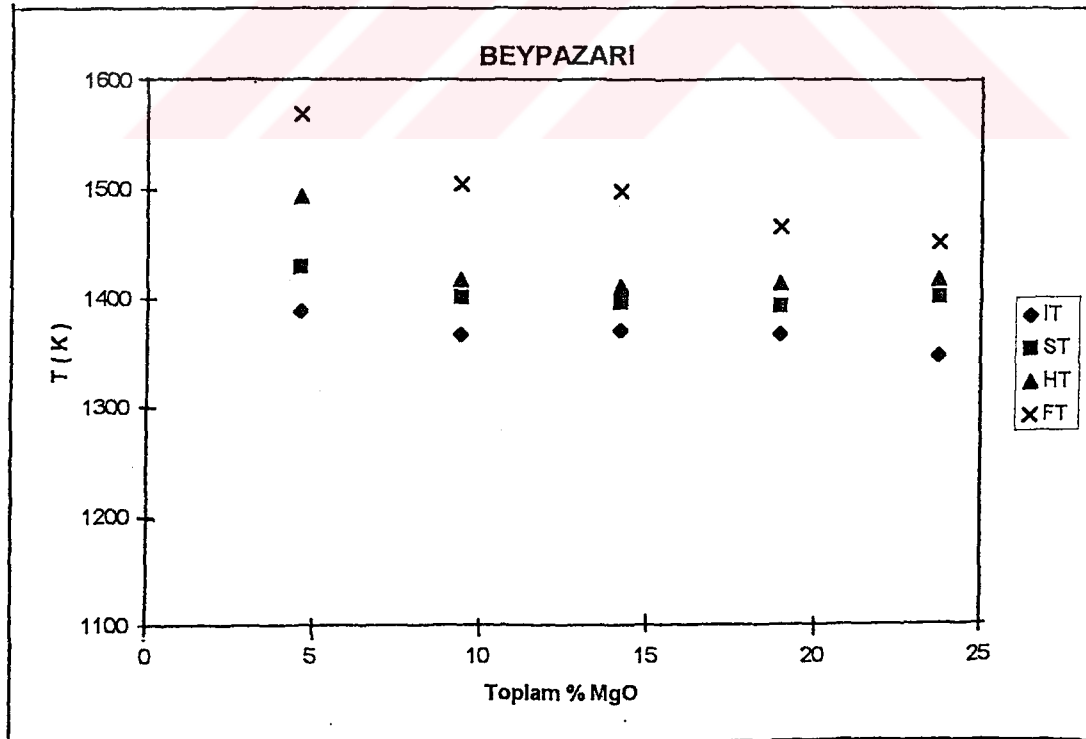
#### 5.4.2.4. $MgO$ İlavesinin Beypazarı Linyitinin Özgül Sıcaklıklarına Etkisi

$MgO$ ' in özgül kül sıcaklıklarına olan etkisini görmek amacıyla, Beypazarı linyiti külüne, %5-20 arasında değişen oranlarda  $MgO$  ilaveleri yapılmıştır. Bu şekilde elde edilen sonuçlar, Şekil 5.30' da görülmektedir. Burada özgül sıcaklıklar, ilave edilen ve orjinal külde bulunan  $MgO$  toplamının bir fonksiyonu olarak grafiğe geçirilmiştir. Toplam  $MgO$  miktarı % 4.65 ile %23.72 arasında değişmektedir.

Şekilden de görüldüğü gibi,  $MgO$  oranındaki artış özgül kül sıcaklıklarını olumsuz yönde etkilemektedir.  $MgO$  oranı arttıkça özgül sıcaklıklar azalmaktadır. En büyük düşüş ergime sıcaklığında görülmektedir.  $MgO$  oranının %24' e çıkmasıyla, ergime sıcaklığında 118 K' lik bir düşüş gerçekleşmiştir.



**Şekil 5.29.** Beypazari Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam K<sub>2</sub>O Oranı İle Değişimi.



**Şekil 5.30.** Beypazari Linyiti Külünün Özgöl Sıcaklıklarının Toplam MgO Oranı İle Değişimi.

Bölüm 5.1' de tartışılan deneysel sonuçlar linyitlerin özgül sıcaklıkları ile, anorganik yapıları arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu bölümde özgül sıcaklıklar orjinal küllerin anorganik yapı bileşimlerinin bir fonksiyonu olarak göz önüne alınmış ve deneysel sonuçları herhangi bir sistematik ilişki ortaya koymadıkları görülmüştür. Ancak, genel olarak özgül sıcaklıkları en fazla etkileyen bileşenlerin  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{SiO}_2$  oldukları anlaşılmaktadır. Tek tek anorganik bileşenler göz önüne alındığında, bazen aynı oksit oranına sahip kömür küllerinin özgül sıcaklıkları birbirinden hayli farklı olmaktadır. Bunun yanı sıra  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$  oranları yüksek olan küllerin özgül sıcaklıkları nispeten düşük olmaktadır.  $\text{SiO}_2$  oranları yüksek,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranları düşük olan Eynez, Elmalı, Kısırakdere, Tunçbilek ve Yatağan kömürlerinin özgül sıcaklıkları nispeten daha yüksek olmuştur.

Katkı maddeleri kullanılarak anorganik bileşimleri değiştirilerek yapılan incelemede elde edilen sonuçlar,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$ 'ın küllerin ergimesindeki oynadıkları rolü daha belirgin bir şekilde ortaya koymuştur. Bu çalışmada göz önüne alınan 10 kömürün 7 tanesinin (Beypazarı, Çan, Eynez, Kısırakdere, Tunçbilek, Yatağan ve Göynük şisti) özgül sıcaklıkları  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarının artmasıyla orantılı olarak düzenli düşmüştür. Ergime sıcaklıklarında,  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriklerine bağlı olarak görülen düşme 86-180 K arasında değişmiştir. Yine 6 kömürün (Beypazarı, Elmalı, Eynez, Tunçbilek, Yatağan ve Göynük şisti) özgül sıcaklıkları,  $\text{CaO}$  içeriğinin artmasına paralel olarak düşmüştür : Ergime sıcaklığında görülen azalma 80-130 K arasında olmuştur.

Bu çalışmanın sonuçları literatür verileri ile uyum içinde bulunmaktadır. Jung ve Schobert [34], aralarında linyit ve bitümlü kömürlerinde bulunduğu değişik özellikler taşıyan kömürlerle yaptıkları sinterleşme çalışmalarında,  $\text{Na}_2\text{O}$  içerikleri yüksek olan kömürlerin daha düşük sıcaklıklarda sinterleşmeye başladıklarını saptamışlardır. Araştırmacılar bunu sodyum oksitinin alüminyum oksit ve  $\text{SiO}_2$  ile reaksiyona girerek düşük sıcaklıklarda ergiyen bileşiklerin oluşmasına bağlamışlardır. Öte yandan linyit küllerindeki  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriğindeki %1'lik artışın ergime sıcaklığını 5 K civarında düşürdüğünü bildirilmektedir [35]. Toz kömür yakan yakma sistemlerinde ısı iletim yüzeylerinde ergiyerek biriken küllerin sodyum sülfat ve kalsiyum sülfat açısından zengin olduğu gözlenmiştir [34]. Sonderall ve Ellman' ın [35], kızdırmalı mikroskopla yaptıkları çalışmalarda, kalsiyum ve sodyum bileşiklerinin ergime

sıcaklığının düşmesi açısından önemli ip uçlarını ortaya koymuştur.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ' ın eklenmesi ile,  $\text{CaSO}_4$ ' ın ergime sıcaklığı önemli ölçüde düşmüştür.

#### 5.4.3. Kömürlerin Aglomerasyonu ve Özgül Sıcaklıkları İle İlişkisi

Çalışmada kullanılan kömürlerden; Beypazarı, Çan, Eynez, Kısırakdere, Göynük ve Yatağan linyitlerinin aglomerasyon sıcaklıkları saptandı. Aglomerasyon sıcaklıkları, Bölümümüzde linyitlerin akışkan yatak yanmalarıyla ilgili olarak yürütülen bir araştırma çerçevesinde ölçülmüştür [39]. Akışkan yatakta aglomerasyonunun başlama sıcaklığı ( $T_{AG}$ ), aktif yatak sıcaklığı ve yatak basınç düşüşündeki değişimlerden yararlanılarak ölçülmüştür. Kararlı yanmanın süregeldiği bir akışkan yatakta, aktif yatak sıcaklıkları ve yatak basınç düşüşleri, genellikle, belli bir seviyede ve dar bir aralıkta dalgalanmaktadır. Aglomerasyon başladığı anda, yatak içi sıcaklıklar anı bir sıçrama yaparak hızla yükselmektedir. Yatak basınç düşüşünde ise tam tersine, hızlı bir basınç düşüşü kaydedilmektedir. Burada verilen sıcaklıklar, bu ani değişimlerin görüldüğü anda ölçülen ve “ aglomerasyonun başladığı “ andaki sıcaklıklardır.

Ölçülen aglomerasyon sıcaklıkları, Tablo 5.6' da verilmiştir. Bu tabloda aglomerasyon sıcaklıklarının yanı sıra, özgül sıcaklıkları ile aglomerasyon sıcaklıkları arasındaki farklar da sunulmuştur. Burada,  $\Delta T_1 = IT - T_{AG}$ ,  $\Delta T_2 = ST - T_{AG}$ ,  $\Delta T_3 = HT - T_{AG}$ , ve  $\Delta T_4 = FT - T_{AG}$  dir. Operasyon koşullarına bağlı olarak, bir kömür değişik koşullarda aglomerasyona uğrayabilmektedir. Ancak aglomerasyon sıcaklıklarındaki değişim genellikle 100 K civarında olmaktadır. Tabloda verilen sıcaklıklar söz konusu kömürler için ölçülen en düşük aglomerasyon sıcaklıklarıdır.

Tablo 5.6. Bazı Linyitlerin Aglomerasyon Sıcaklıkları.

| Kömür       | $T_{AG}$<br>(K) | $\Delta T_1$<br>(K) | $\Delta T_2$<br>(K) | $\Delta T_3$<br>(K) | $\Delta T_4$<br>(K) |
|-------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Beypazarı   | 1173            | 215                 | 256                 | 320                 | 396                 |
| Çan         | 1323            | 175                 | 272                 | 298                 | 346                 |
| Eynez       | 1293            | 283                 | 508                 | 521                 | 551                 |
| Göynük      | 1093            | 298                 | 324                 | 351                 | 389                 |
| Kısırakdere | 1273            | <228                | <298                | <368                | <400                |
| Yatağan     | 1196            | 326                 | 352                 | 369                 | 507                 |

Tablodaki veriler incelendiğinde, özgül sıcaklıkları ile aglomerasyon sıcaklıkları arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Kömürün özelliklerine bağlı olarak, özellikle kül ergime sıcaklıkları ile aglomerasyon sıcaklıkları arasındaki fark 340 - 500 K gibi hayli yüksek seviyelere kadar çıkabilmektedir. Akışkan yataklarda, yanmakta olan kömür taneciğinin sıcaklığının ölçülen ortam sıcaklığından yaklaşık olarak 100 - 150 K kadar yüksek olduğu bilinmektedir [40]. Tablo 5.6' daki değerler bu açıdan gözden geçirildiğinde, bazı linyitler için aglomerasyon ve deformasyon sıcaklıklarının birbirine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Beypazarı ve Çan linyitlerinin  $\Delta T_1$  ( $= IT - T_{AG}$ ) değerleri (sırasıyla 215 ve 175 K) bu kömürler için aglomerasyonun kül deformasyon sıcaklıklarına yakın bir seviyede başladığını göstermektedir. Diğer kömürlerde ise aglomerasyon, kül deformasyon sıcaklığına ulaşmadan başlamaktadır. Bu durum, kül (kömür) içinde gerçekleşen ve taneciklerin birbirine yapışmasına neden olan sıvı bir fazın ortaya çıkmasıyla sonuçlanan bazı fiziksel ve kimyasal olayların kül deformasyon sıcaklığı seviyelerine ulaşmadan başladığına işaret etmektedir. Bu davranım literatür verileriyle uyum içindedir [24,30,41-43], kömür pirolizi sırasında piroliz reaktöründe başlangıç deformasyon sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda kömürün sinterleştiğini (aglomere olduğunu) gözlemişlerdir. Huffman ve ç.a. [20], başlangıç deformasyon sıcaklıkları altındaki sıcaklıklarda kömürün kısmen ergidiğini bildirmektedirler. Jung ve Schobert, linyitler ve bitümlü kömürlerle yaptıkları çalışmada benzer bir sonuçla karşılaşmışlar ve sinterleşmenin 723 K'e kadar düşen sıcaklıklarda görülebildiğini saptamışlardır. Sinterleşmenin (aglomerasyonun) düşük sıcaklıklarda başlaması olayının, sodyum - alüminosilikat bileşiklerini içeren ve düşük sıcaklıklarda ortaya çıkan sıvı fazdan kaynaklandığı belirtilmektedir [34].

Yukarıda da tartışıldığı gibi, kömürlerin sinterleşme ve aglomerasyon özelliklerinin kömürlerin anorganik yapılarıyla ilişkili olduğu konusunda genel bir görüş birliği bulunmaktadır. Bu konuda üzerinde en fazla durulan bileşik  $Na_2O$  dır. Bu oksitin, silisyum ve alüminyum bileşikleriyle reaksiyona girerek düşük ergime sıcaklıklarına sahip sodyum - alüminosilikat türü bileşikler oluşturduğu belirtilmektedir [34,44].

Şekil 5.31, Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35' de bu çalışmada incelenen linyitlerden bir kısmının akışkan yatakta aglomerasyon sıcaklıkları sırasıyla,



$\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$  yüzdeleri ve  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranının bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

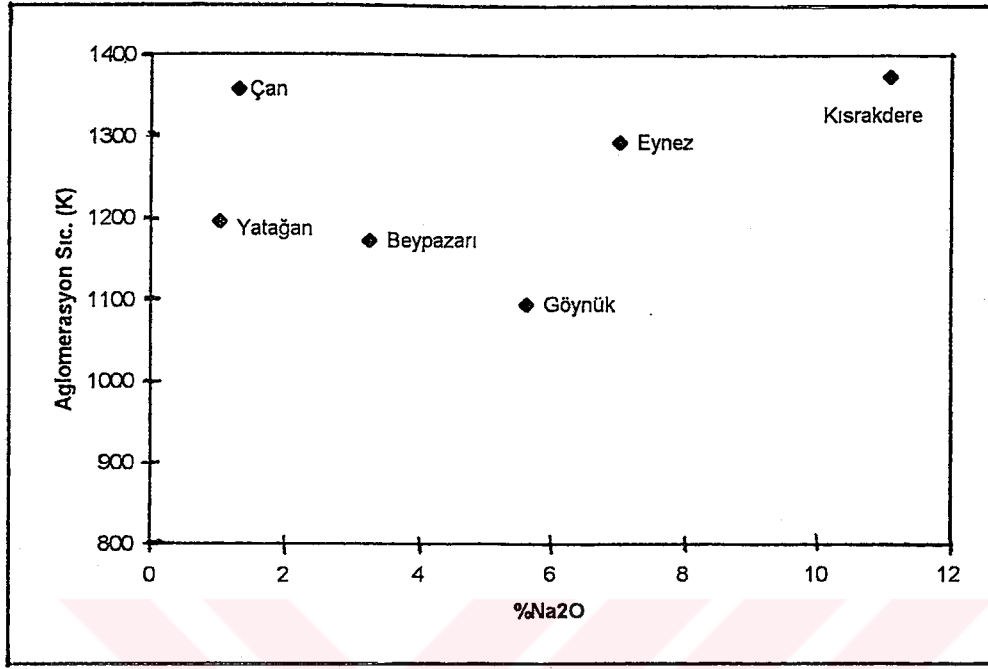
Şekil 5.31’ de görüldüğü gibi, göz önüne alınan linyitlerden 4 tanesi, Beypazarı, Çan, Göynük ve Yatağan linyitlerinin  $\text{Na}_2\text{O}$  - aglomerasyon ilişkisi literatür verileriyle uyum içindedir. Yani  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği arttıkça aglomerasyon sıcaklığı düşmektedir. Ancak bu kural bütün kömürler için geçerli değildir. Eynez ve Kısırakdere linyitlerinin, yüksek  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriklerine karşın, daha düşük  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriklerine sahip linyitlere (örneğin Beypazarı ve Göynük) kıyasla daha yüksek aglomerasyon sıcaklıklarına sahip oldukları görülmektedir.

Toplam bazik oksitler oranı (Şekil 5.33) açısından da benzer bir durum söz konusudur. Aglomerasyon sıcaklıkları  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}$  fonksiyonu olarak bir saçılma göstermektedirler.

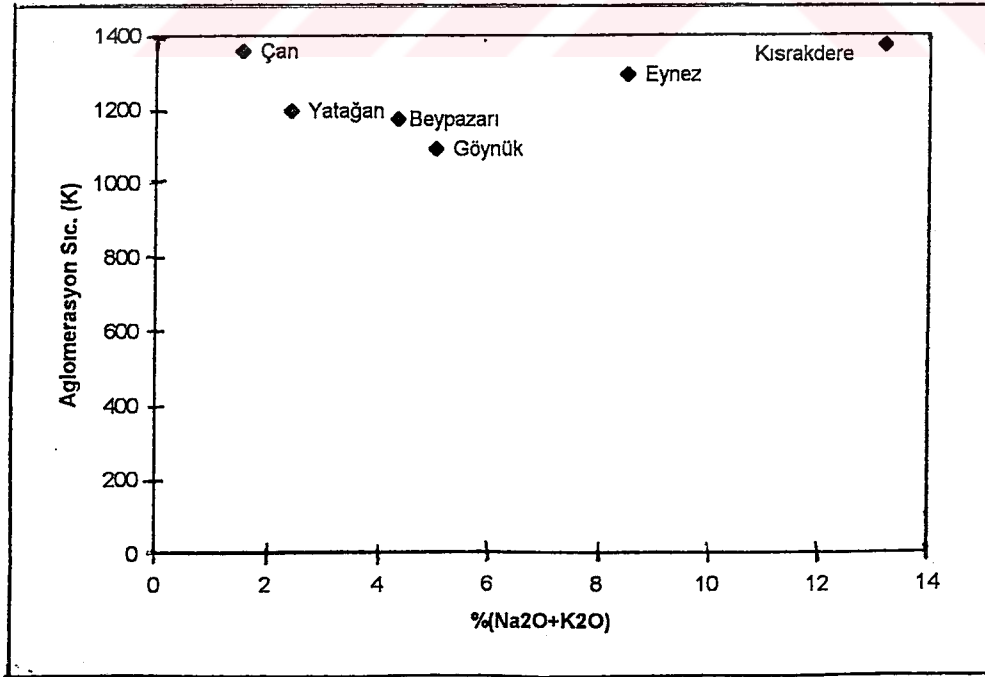
Şekil 5.34’de aglomerasyon sıcaklıkları, asidik oksitler olarak nitelendirilen  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ‘ın toplamının bir fonksiyonu olarak görülmektedirler. Tablodan anlaşıldığı gibi, aglomerasyon sıcaklıkları ile  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  oranı arasındaki ilişkiyi herhangi bir kuralla tanımlamak mümkün değildir.  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  oranları birbirine çok yakın olan kömürlerin aglomerasyon sıcaklıkları birbirinden çok farklı olabilmektedir.

Aglomerasyon sıcaklıklarının, kül  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı ile değişimi Şekil 4.35’deki grafikte görülmektedir. Çan, Kısırakdere ve Yatağan gibi düşük  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranlarına sahip kömürlerin nispeten daha yüksek sıcaklıklarda aglomerasyona uğradıkları anlaşılmaktadır. Ancak burada da bir genelleme yapmak mümkün değildir. Nitekim, Yatağan linyitine göre 3 kat daha büyük bir  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranına sahip olan Eynez linyitinin aglomerasyon sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir.

Yukarıda tartışılan deneysel bulgular, kömürlerin anorganik yapılarından hareket ederek kömürlerin aglomerasyon özellikleri hakkında kesin yargılara varmanın oldukça güç olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak alkali oksit, özellikle sodyum oksit oranları yüksek olan kömürlerin aglomerasyona daha yatkın oldukları görülmektedir.

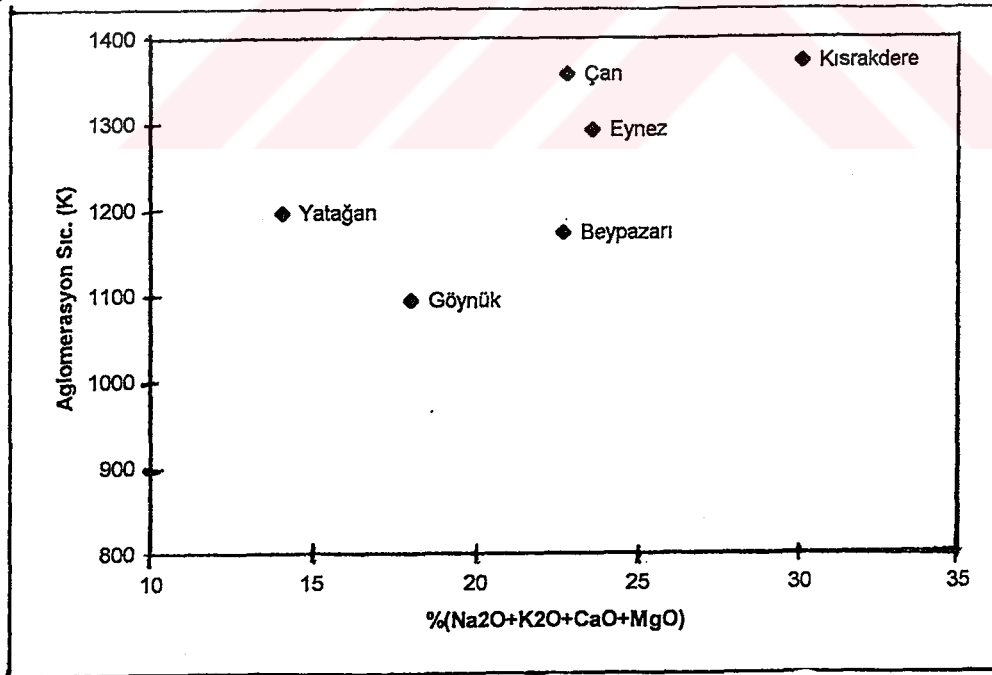


Şekil 5.31. Aglomerasyon Sıcaklıklarının Na<sub>2</sub>O Oranı İle Değişimi

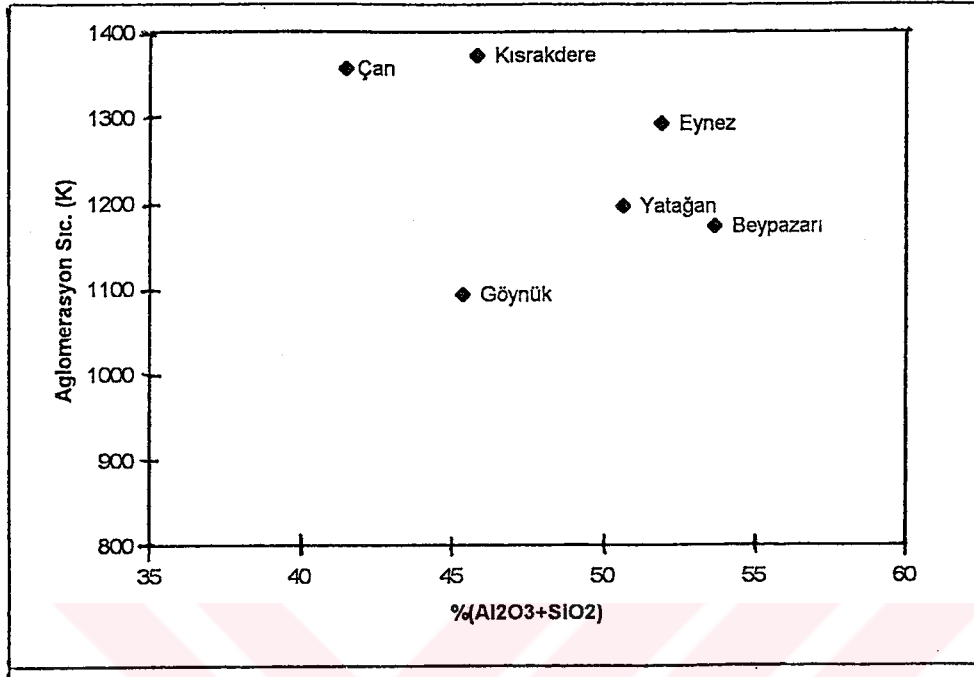


Şekil 5.32. Aglomerasyon Sıcaklıklarının Na<sub>2</sub>O+ K<sub>2</sub>O Oranı İle Değişimi

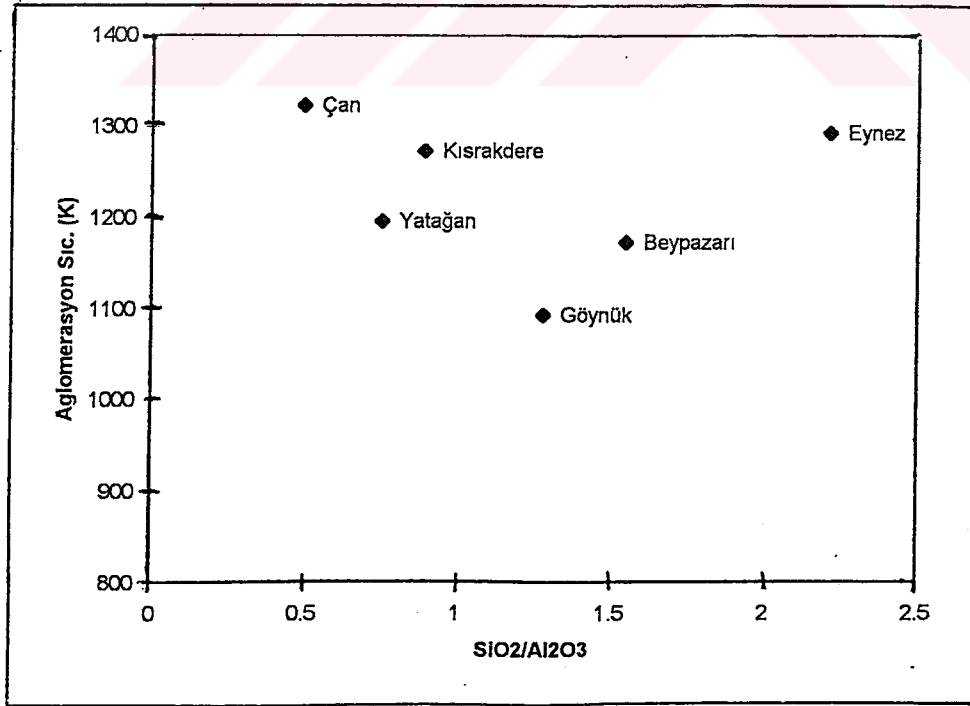
Bu konuda genel bir sonuca ulaşmak için, çok daha fazla sayıda kömürle çalışmak gerekmektedir. Aglomerasyon büyük ölçüde kömürlerin özelliklerinden kaynaklanıyor olmasına karşın, oldukça karmaşık bir olaydır ve bir daha bir çok faktör tarafından etkilenmektedir. Bu faktörler, kömürün tanecik boyutu [36], akışkanlaşma hızı ve taneciklerin momentumu [26,31], akışkan yataktaki kül birikimi [45], kullanılan yatak malzemesi, akışkanlaşmanın hidrodinamiği [42] ... gibi operasyon özellikleri tarafından da etkilenmektedir. Aglomerasyon olayı, bütün bu faktörlerin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmakta ve gelişmektedir. Örneğin yüksek oranlarda  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren bir kömürü nispeten yüksek operasyon hızlarında çalışan bir akışkan yataкта yakmak mümkün olabilmektedir. Buna karşın kömürdeki kül oranının yüksek olması, yataқта çok miktarda külün birikmesi ve operasyon hızının nispeten yüksek olması aglomerasyonun ortaya çıkması uygun bir ortam yaratabilmektedir. Büyük kömür tanecikleri, küçük taneciklere kıyasla daha yükseklik sıcaklıklarda yakılabilmektedir [31,36].



Şekil 5.33. Aglomerasyon Sıcaklıklarının  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{CaO}$  Oranı İle Değişimi



Şekil 5.34. Aglomerasyon Sıcaklıklarının  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  Oranı İle Değişimi.



Şekil 5.35. Aglomerasyon Sıcaklıklarının  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  Oranı İle Değişimi

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 1.SONUÇLAR

- 1) Bu çalışmada incelenen numunelere ait, başlangıç deformasyon sıcaklıkları, 1377-1576 K arasında, ergime sıcaklıkları da 1482-1844 arasında değişmektedir.
- 2) Küllerin anorganik yapıları göz önünde bulundurulduğunda,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$  oranları yüksek olan küllerin nispeten düşük,  $\text{SiO}_2$  oranı yüksek,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranı düşük olanların ise daha yüksek özgül sıcaklıklara sahip oldukları görülmüştür. Ancak, göz önüne alınan kömür orjial küllerinin anorganik bileşimleriyle özgül sıcaklıkları arasında herhangi kurallı bir ilişki görülmemektedir.
- 3) Katkı maddelerinin ilavesi ile anorganik bileşimleri değiştirilen küllerden elde edilen sonuçlar,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{CaO}$ 'ın özgül sıcaklıkları en fazla etkileyen maddeler olduğunu göstermektedir. Beypazarı, Çan, Eynez, Kısırakdere, Tunçbilek, Yatağan linyitleri ve Göynük şistinde, özgül sıcaklıklarda,  $\text{Na}_2\text{O}$  miktarı ile orantılı bir düşüş görülmektedir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının artmasıyla küllerin ergime sıcaklıkları 86-180 K kadar düşmüştür.
- 4) Beypazarı, Elmalı, Eynez, Tunçbilek, Yatağan linyitleri ve Göynük şistinin özgül sıcaklıkları,  $\text{CaO}$  içeriğindeki artışa paralel olarak düşmektedir. Diğerlerinde ise, sıcaklıklarda dalgalanmalar görülmektedir.
- 5) Linyitler, özgül sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda aglomerasyona uğramaktadırlar. Kül ergime sıcaklığı ile aglomerasyon sıcaklıkları arasındaki fark bazı linyitler için, 500 K' e kadar çıkmaktadır.
- 6) İncelenen kömürler için, aglomerasyon özellikleriyle külün anorganik yapı özellikleri arasındaki ilişkiyi herhangi bir kurallı bağıntı ile tanımlamak mümkün değildir. Ancak,  $\text{Na}_2\text{O}$  içerikleri yüksek olan kömürlerin aglomerasyona daha yatkın oldukları görülmektedir. Anorganik yapı ile aglomerasyon özellikleri arasındaki ilişkiyi daha genel bir şekilde ifade etmek için, daha çok sayıda kömürü incelemek gerekmektedir.

## 2.ÖNERİLER

Kül davranımını, kömür prosesleri ve özellikle yanma sistemleri açısından büyük önem taşımaktadır. Türkiye linyitlerinin ergime ve aglomerasyon özelliklerinin anlaşılabilmesi için konunun daha geniş bir çerçevede incelenmesi gerekmektedir. Kömürlerin ergime sıcaklıklarının, sinterleşme ve aglomerasyon sıcaklıklarının saptanarak, bir arada değerlendirilmesi gerekmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] EKİNCİ, E., TIRIS, M., TÜRE, İ.E., Enerji Sektöründen Kaynaklanan Hava Kirliliği, Ulusal Çevre Eylem Planı, Mart (1997).
- [2] WATERS, P.L., “ Factors Influencing the Fluidized combustion of Low Grade Solid and Liquid Fuels” , Institution of Fuel Symposium Series, No 1, Fluidised Bed Combustion,(1975).
- [3] KURAL, O., Kömür, İ.T.Ü. Maden Fak., pp. 411-432, Şubat(1991).
- [4] KURAL, O., Kömür Kimyası ve Teknolojisi, İ.T.Ü. Maden Fak., (1988).
- [5] KUNII, D., LEVENSPIEL, O., Fluidization Engineering, R.E. Krieger Pub., New York, (1997).
- [6] BASU, P.,FRASER, S.A., Circulating Fluidized Bed Boilers-Design and Operations, Butterworth-Heinemann Pub., USA, (1991).
- [7] HOWARD, J.R., Fluidized Bed Technology-Principles and Applications, Adam Hilger Pub., Bristol and New York, (1989).
- [8] HIGHLEY, J., The Design and Control of Fluidized Bed Fired Boilers, Journal of The Institute of Energy, pp. 208-216, December(1980).
- [9] ATAKÜL, H., ESKİKAYA, T., EKİNCİ, E., Akışkan Yatakta Kömürün Yanması ve Türkiye’ deki Akışkan Yatak Teknolojisinin Durumu, Kömür Teknolojileri ve Kullanımı Semineri, 16-18 Ekim(1991).
- [10] CHAKROBORTY, R.K., HOWARD, J.R., Combustion of Char in Shallow Fluidized Bed Combustors-Influence of Some Design and Operating Parameters, Journal of the Institute of Energy, pp. 48-54, March(1981).
- [11] PILLAI, K.K., The Influence of Coal Type on Devolatilization and Combustion, Journal of the Institute of Energy, pp. 191-195, (1981).
- [12] ABBI, Y.B.,BANERJI, M., GHOSH, M.K., MALLIAH, K.T.U., SHARON, H.N., Development of Fluidized Combustion Boilers for Indian Coals, American Institution of Chemical Engineers Symposium Series, Vol. 74, No 176,(1978).

- [13] **HOWARD, J.R.**, Fluidized Bed Combustion and Application, Applied Science Pub., London, (1983).
- [14] **DAVIDSON, J.R., HARRISON, D., CLIFT, R.**, Fluidization, Academic Press, London, (1985).
- [15] **GIBSON, J.**, Recent Developments in Fluidized Bed Combustion and Potential Benefits to Coal Industry, The Mining Engineer, pp. 245-246, July(1977).
- [16] **MEYERS, R.A.**, Coal Structure, Academic Press, New York, (1982).
- [17] **HIMUS, G.W.**, The Elements of Fuel Technology, Leonard Hill Ltd., London, (1958).
- [18] **ROASK, E.**, Mineral Impurities in Coal Combustion, Hemisphere Pub., Washington, (1985).
- [19] **GÜNER, H.**, Bazı Türk Linyitlerinin Küllerinin Ergime Sıcaklıkları İle Bileşikleri Arasındaki İlişkinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fak., Şubat(1990).
- [20] **HUFFMANN, G.P., HUGGINS, F.E., DUNMYRE, G.R.**, Investigation of High Temperature Behaviour of coal ash in Reducing and Oxidizing Atmospheres, Fuel, Vol. 60, No 7, pp. 585-597,(1981).
- [21] **DE GRAAF, G.A.**, Coal Age, Vol. 19, pp. 534-539, (1921).
- [22] **KUNTSMANN, F.H., BODENSTEIN, L.B., GOAS, S.B.**, Analyses of South African Coals", Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 60, pp. 376-383, March(1960).
- [23] **VORRES, K.S.**, Prediction of Ash Melting Behaviour from Coal Ash Composition, Analytical Methods for Coal and Coal Products, Academic Press, New York, Vol. 3, (1978).
- [24] **SIEGEL, J.H.**, Defluidization Phenomena in Fluidized Bed of Sticky Particles High Temperatures, Ph. D. Thesis, City University of New York, (1976).
- [25] **GOLDBERGER, W.M.**, Collection of Fly Ash in Self Agglomerating Fluidized Bed Coal Burner, ASME, paper, 67-WA/FU-3, November(1962).
- [26] **LONGSTON, B.G., STEPHENS, F.M.**, Self Agglomerating Fluidized Bed Reduction, Journal of Metal, pp. 312-316, April(1960).
- [27] **SAXENA, S.C., RAHMET, A.**, A Mechanistic Model to Explain Ash Agglomeration in Fluidized Bed Combustion, Vol. 3, December(1978).



- [28] SALVADOR, L.A., CHERISH, P., MARGARITIS, P.J., RATH, L.K.,  
Process Developments for the Westinghouse Advanced Fluidized Bed Coal  
Gasification System., Society of Automotive Engineers Inc., p. 78, (1978).
- [29] SKRIFVARS, B.J., HUPA, M., BACKMAN, R., HILTUNEN, M., Sintering  
Mechanisms of FBC Ashes, Fuel, Vol. 73, No. 2, pp. 171-176, (1994).
- [30] MANZOORI, A.R., AGARWAL, P.K., Agglomeration and Defluidization  
Under Simulated Circulating Fluidized Bed Combustion Conditions, Fuel,  
Vol. 73, No. 4, pp. 563-567, (1994).
- [31] ATAKÜL, H., Çan Bölgesi Linyitlerinin Akışkan Yatak Yakma Sürecindeki  
Davranımı, Doktora Tezi, İTÜ Kimya-Metalurji Fak., (1986).
- [32] EKİNCİ, E., ATAKÜL, H., TOLAY, M., Detection of Segregation  
Tendencies in a Fluidized Bed Using Temperature Profiles, Powder  
Technology, Vol. 71, (1990).
- [33] ATAKÜL, H., BULUTÇU, N., TOLAY, M., EKİNCİ, E., The Effect  
of Inorganic Constituents of Some Turkish Lignites on Agglomeration in a  
Fluidized Bed, First European Conference on the Influence of Inorganic  
Constituents on Coal Combustion, (1987).
- [349] JUNG, B., SCHOBERT, H. H., Viscous Sintering of Coal Ashes - 2.  
Sintering Behaviour at Short Residence Times in a Drop Tube Furnace,  
Energy and Fuels, Vol. 6, pp. 59-68, (1992).
- [35] SONDERAL, E. A., ELLMAN, R. C., Fusibility of Ash from Lignite  
and Its Correlation With Composition, U.S. Energy Res. Devel. Admin.  
Rep., Vol. 75, No. 1, (1975).
- [36] BASU, P. A., Study of Agglomeration of Coal Ash in Fluidized Beds, The  
Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 60, pp. 791-795, (1982).
- [37] ESTEP, T.G., SELTZ, H., BUNKER, H.L., STRICKLER, H.S., Mining  
and Met. Investigations, Carnegie Inst. Tech. And Mining and Met.  
Advisory Boards, Coöp Bull., Vol. 62, p 47, (1934).
- [38] BARETT, E.P., The Chemistry of Coal Utilization, John Wiley Pub., New  
York, Vol. 1, p 496, (1945).
- [39] HİLMİOĞLU, B., İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fak., Yayınlanmamış Sonuçlar.
- [40] YATES, J.G., WALKER, P.R., Particle Temperature in a Fluidized Bed  
Combustor Fluidization, by J.F. Davidson and O.L. Keairns, Cambridge University  
Press, (1978).

- [41] **ATAKÜL, H., EKİNCİ, E.,** Agglomeration of Turkish Lignites in Fluidized Bed Combustion, Journal of the Institute of Energy, pp. 56-61, (1989).
  - [42] **ATAKÜL, H., EKİNCİ, E.,** Agglomeration in Lignite Ash Flotsam and Jetsam Rich Systems, Powder Technology, Vol. 60, pp. 77-82, (1990).
  - [43] **STALLMANN, J. J., NEAVEL, R. C.,** Technique to Measure the Temperature of Agglomeration of Coal Ash, Fuel, Vol. 59, pp. 584-586, August(1980).
  - [44] **GRAY, V.R.,** Prediction of Ash Fusion Temperature from Ash Composition for Some New Zealand Coals, Fuel, Vol. 66, No. 9, pp. 1230-1239, September(1987).
  - [45] **GOBLIRSCH, G.M., TALTY, R.D.,** Recent Developments in Fluidized Bed Combustion Technology for Lignites and Subbituminous Coals in the USA, Fluidized Bed Combustion: Systems and Applications, p. iv-7, London, (1980).
- 

## ÖZGEÇMİŞ

Başak Akselli, 1972 yılında İstanbul’ da doğdu. Lise öğrenimini, 1986-1988’ de Kahramanmaraş, 1988-1989’da Nevşehir’ de tamamladı. 1989 yılında, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi’ ne girdi ve 1993 yılında Kimya Mühendisi ünvanını aldı. 1993 yılında, aynı bölümde Yüksek Lisans Eğitimi’ ne başladı.

