

**GEOPOLİMER ELDE EDİLMESİ VE KATYON, pH  
ve ISIL İŞLEMİN GEOPOLİMER ÜZERİNE ETKİSİ**

Evren ARIÖZ

Doktora Tezi

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje No: 080249**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Evren Arıöz'ün "Geopolimer Elde Edilmesi ve Katyon, pH ve Isıl İşlemin Geopolimer Üzerine Etkisi" başlıklı Kimya Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 12.06.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

| Adı-Soyadı                                   |                           | İmza  |
|----------------------------------------------|---------------------------|-------|
| Üye(Tez Danışmanı): Prof. Dr. Ö. Mete KOÇKAR |                           | ..... |
| Üye:                                         | Prof. Dr. Mustafa ŞENYEL  | ..... |
| Üye:                                         | Prof. Dr. H. Ferdi GERÇEL | ..... |
| Üye:                                         | Prof. Dr. H. Canan CABBAR | ..... |
| Üye:                                         | Prof. Dr. Kambiz RAMYAR   | ..... |

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## ÖZET

**Doktora Tezi**

### **GEOPOLİMER ELDE EDİLMESİ VE KATYON, pH ve ISIL İŞLEMİN GEOPOLİMER ÜZERİNE ETKİSİ**

**EVREN ARIÖZ**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Ö. Mete KOÇKAR  
2015, 236 sayfa**

Bu çalışmada, Çatalağzı Termik Santrali atığı olan uçucu külden geopolimer eldesi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde alkali aktifleştirici çözelti olarak sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri kullanılarak uçucu kül aktifleştirilmiştir. Farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtım işlemi uygulanarak geopolimerler üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen numuneler laboratuvar ortamında 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılmıştır. Bütün numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür. 28 gün yaşlandırılmış numuneler mikroyapısal ve morfolojik analizler için kullanılmıştır. Fourier Transform Infrared Spektroskopisi (FTIR), X-ışını Kırınım Spektroskopisi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) kullanılarak karışımların mikroyapıları araştırılmıştır. En yüksek basınç dayanımı 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan ve 28 gün yaşlandırılan numuneler için 51,45 MPa olarak bulunmuştur. FTIR spektrumunda  $\sim 950-1200\text{ cm}^{-1}$  bölgesinde görülen geopolimerlerin parmak izi gözlenmiştir. XRD spektrumlarında, yapının kuartz ve mullit kristallerinden oluştuğu görülmüştür. SEM görüntülerinde geopolimer jel fazının oluştuğu gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer, Uçucu Kül, Mekanik Özellikler, Mikroyapı

## **ABSTRACT**

### **PhD Dissertation**

## **ACQUIREMENT OF GEOPOLYMER AND THE EFFECT OF CATION, pH AND CURING CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF GEOPOLYMERS**

**EVREN ARIÖZ**

**Anadolu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Chemical Engineering Program**

**Supervisor: Prof.Dr. Ö.Mete KOÇKAR  
2015, 236 pages**

In this thesis, geopolymers were obtained by using a fly ash being a by-product of Çatalagzi Power Plant. Sodium silicate, sodium hydroxide and potassium hydroxide solutions were used as alkali activation solution in the experiments. The effect of curing conditions on the properties of geopolymer samples were investigated. The samples were aged for 7, 28 and 90 days in the laboratory. Compressive strength tests were performed on all the specimens. 28 days aged samples were used for microstructural and morphological analysis. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), X-ray diffractometry (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM) techniques were used to investigate the microstructure of the mixtures. The maximum compressive strength was obtained as 51.45 MPa for the sample synthesized with 12M potassium hydroxide and aged for 28 days. FTIR spectra indicated the fingerprint of geopolymers observed in the region of  $\sim 950\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$ . XRD spectrums showed that geopolymers consisted quartz and mullite crystals. In SEM images, geopolymeric gel phases were observed.

**Keywords:** Geopolymer, Fly ash, Mechanical properties, Microstructure

## TEŞEKKÜR

Danışmanlığımı üstlenen, çalışmamın gerçekleşmesi için gerekli ortamı sağlayan, çalışmalarımın en küçük ayrıntısına kadar ilgilenen, anlayış ve yardımlarını esirgemeyen, her zaman destek olan hocam Prof.Dr.Ö.Mete KOÇKAR'a,

Beni yetiştiren ve hayatımın her kademesinde bana destek olan Aileme,

Çalışmalarımın her aşamasında bana sabırla yardımcı ve destek olan, fedakarlık göstererek her zaman yanımda olan sevgili eşim Ömer ARIÖZ'e,

Gülen masum yüzleri ve varlıkları ile hayatımın zor günlerinde bana manevi destek olan çok sevgili çocuklarım Hamza Oğuz ARIÖZ'e ve Mehmet Alp ARIÖZ'e teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                               | <u>Sayfa</u> |
|---------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>ÖZET.....</b>                                              | <b>i</b>     |
| <b>ABSTRACT.....</b>                                          | <b>ii</b>    |
| <b>TEŞEKKÜR.....</b>                                          | <b>iii</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER.....</b>                                       | <b>iv</b>    |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>                                   | <b>ix</b>    |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>                                 | <b>xvi</b>   |
| <br>                                                          |              |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                               | <b>1</b>     |
| <br>                                                          |              |
| <b>2. GEOPOLİMERLER</b>                                       | <b>6</b>     |
| 2.1. Geopolimerizasyon.....                                   | 9            |
| 2.2. Geopolimerizasyon Mekanizması.....                       | 14           |
| 2.3. Geopolimerizasyonu Etkileyen Parametreler.....           | 19           |
| 2.3.1. Alkali çözelti derişimi.....                           | 20           |
| 2.3.2. Alkali katyon etkisi.....                              | 22           |
| 2.3.3. Kür koşulları (Sıcaklık-Süre).....                     | 24           |
| 2.3.4. Hammadde.....                                          | 25           |
| 2.4. Geopolimerlerin Uygulama Alanları.....                   | 27           |
| <br>                                                          |              |
| <b>3. GEOPOLİMERLERİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİ</b> | <b>33</b>    |
| 3.1. Basınç Dayanımı.....                                     | 33           |
| 3.2. Mikroyapı.....                                           | 34           |
| 3.2.1. Fourier Transform Infrared spektrometresi.....         | 34           |
| 3.2.2. X-ışını kırınım spektrometre.....                      | 36           |
| 3.2.3. Taramalı elektron mikroskobu.....                      | 37           |
| <br>                                                          |              |
| <b>4. UÇUCU KÜL</b>                                           | <b>39</b>    |
| <br>                                                          |              |
| <b>5. KONU İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR</b>                  | <b>45</b>    |

|                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6. DENEYSEL ÇALIŞMA</b>                                                                                       | <b>56</b> |
| 6.1. Hammadde.....                                                                                               | 57        |
| 6.1.1. Uçucu külün X-ışını floresan spektrometre analizi.....                                                    | 57        |
| 6.1.2. Uçucu külün Fourier Transform Infrared spektrometre analizi.....                                          | 57        |
| 6.1.3. Uçucu külün X-ışını kırınım spektrometre analizi .....                                                    | 57        |
| 6.1.4. Uçucu külün taramalı elektron mikroskop görüntüsü .....                                                   | 58        |
| 6.2. Geopolimer Numunelerinin Hazırlanmasında Kullanılan Kimyasallar .....                                       | 58        |
| 6.2.1. Sodyum silikat.....                                                                                       | 58        |
| 6.2.2. Sodyum hidroksit.....                                                                                     | 58        |
| 6.2.3. Potasyum hidroksit.....                                                                                   | 59        |
| 6.3. Geopolimer Numunelerinin Hazırlanması.....                                                                  | 59        |
| 6.4. Elde Edilen Geopolimerlerin Analizleri.....                                                                 | 60        |
| 6.4.1. Basınç dayanımı testleri.....                                                                             | 60        |
| 6.4.2. Mikroyapısal özelliklerin belirlenmesi.....                                                               | 61        |
| <b>7. DENEYSEL ÇALIŞMADAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR</b>                                                               | <b>62</b> |
| 7.1. Uçucu Kül Üzerine Yapılan Analizler.....                                                                    | 62        |
| 7.1.1. Uçucu külün X-ışını floresan spektrometre analizi.....                                                    | 62        |
| 7.1.2. Uçucu külün Fourier Transform Infrared spektrumu.....                                                     | 63        |
| 7.1.3. Uçucu külün X-ışını kırınım spektrumu.....                                                                | 64        |
| 7.1.4. Uçucu külün taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....                                                    | 65        |
| 7.2. Geopolimer Üretim Çalışmaları Sırasındaki Deneysel Gözlemler.....                                           | 65        |
| 7.3. Basınç Dayanımı Sonuçları.....                                                                              | 67        |
| 7.3.1. Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımları...                                         | 67        |
| 7.3.1.1. Isıl işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi.....    | 73        |
| 7.3.1.2. Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi..... | 78        |
| 7.3.1.3. Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi.....      | 83        |
| 7.3.2. Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımları.                                         | 87        |

|          |                                                                                                                   |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.2.1. | Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi.....            | 93  |
| 7.3.2.2. | Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi.....         | 97  |
| 7.3.2.3. | Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi.....              | 101 |
| 7.3.3.   | Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması..... | 104 |
| 7.4.     | Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Geopolimerlerin<br>Fourier Transform Infrared spektrumları.....                | 115 |
| 7.4.1.   | Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin<br>Fourier Transform Infrared spektrumları.....                       | 115 |
| 7.4.1.1. | Isıl işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi. ....                   | 115 |
| 7.4.1.2. | Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi. ....                | 121 |
| 7.4.1.3. | Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi. ....                     | 125 |
| 7.4.2.   | Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin<br>Fourier Transform Infrared spektrumları.....                     | 129 |
| 7.4.2.1. | Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi.....                  | 129 |
| 7.4.2.2. | Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi ....               | 133 |
| 7.4.2.3. | Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi ....                    | 137 |
| 7.4.3.   | Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin bağ yapılarının karşılaştırılması ....       | 138 |
| 7.5.     | Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Geopolimerlerin<br>X-Işını Kırınım Spektrumları Spektrumları.....              | 144 |
| 7.5.1.   | Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin<br>X-ışını kırınım spektrumları ....                                  | 144 |

|          |                                                                                                                 |     |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.5.1.1. | Isıl işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi .....             | 144 |
| 7.5.1.2. | Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi .....          | 149 |
| 7.5.1.3. | Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi .....               | 152 |
| 7.5.2.   | Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin<br>X-ışını kırınım spektrumları .....                             | 153 |
| 7.5.2.1. | Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi .....           | 153 |
| 7.5.2.2. | Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi .....        | 156 |
| 7.5.2.3. | Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi .....             | 158 |
| 7.5.3.   | Sodyum Hidroksit ve Potasyum Hidroksit Kullanılan<br>Geopolimerlerin Kristal Yapılarının Karşılaştırılması..... | 161 |
| 7.6.     | Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Geopolimerlerin<br>Taramalı Elektron Mikroskop Görüntüleri.....              | 165 |
| 7.6.1.   | Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin<br>taramalı elektron mikroskop görüntüleri.....                     | 165 |
| 7.6.1.1. | Isıl işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin yapılarına etkisi .....                     | 165 |
| 7.6.1.2. | Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin yapılarına etkisi .....                  | 183 |
| 7.6.1.3. | Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin yapılarına etkisi .....                       | 193 |
| 7.6.2.   | Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin<br>taramalı elektron mikroskop görüntüleri .....                  | 195 |
| 7.6.2.1. | Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin yapılarına etkisi .....                   | 195 |
| 7.6.2.2. | Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin yapılarına etkisi .....                | 205 |

|                                                                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.6.2.3. Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin yapılarına etkisi .....                | 212        |
| 7.6.3. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan<br>geopolimerlerin mikroyapılarının karşılaştırılması..... | 213        |
| <b>8. TARTIŞMA ve ÖNERİLER</b>                                                                                      | <b>219</b> |
| <b>9. KAYNAKLAR</b>                                                                                                 | <b>227</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Geopolimerizasyon mekanizmasının şematik gösterimi.....                                                                                            | 18 |
| 6.1. Deneysel akım şeması.....                                                                                                                          | 56 |
| 7.1. Uçucu külün orta bölge infrared bölgesi spektrumu.....                                                                                             | 63 |
| 7.2. Uçucu külün X-Işını kırınım spektrumu.....                                                                                                         | 64 |
| 7.3. Uçucu külün taramalı elektron mikroskop görüntüsü a. 250x b. 2000x.....                                                                            | 65 |
| 7.4. 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı.....                        | 75 |
| 7.5. 8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı.....                        | 77 |
| 7.6. 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı.....                       | 78 |
| 7.7. 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı.....                           | 80 |
| 7.8. 8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı.....                           | 82 |
| 7.9. 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı.....                          | 83 |
| 7.10. 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı.....  | 84 |
| 7.11. 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı.....  | 85 |
| 7.12. 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı..... | 86 |
| 7.13. 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı.....                     | 94 |
| 7.14. 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı.....                     | 95 |
| 7.15. 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı.....                    | 96 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.16. 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtım süresi grafiğı.....                          | 98  |
| 7.17. 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtım süresi grafiğı.....                          | 99  |
| 7.18. 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtım süresi grafiğı.....                         | 100 |
| 7.19. 40°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtım süresi grafiğı.....  | 102 |
| 7.20. 80°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtım süresi grafiğı.....  | 103 |
| 7.21. 120°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtım süresi grafiğı..... | 104 |
| 7.22. 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....      | 105 |
| 7.23. 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....      | 106 |
| 7.24. 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....     | 107 |
| 7.25. 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....      | 108 |
| 7.26. 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....      | 109 |
| 7.27. 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....     | 110 |
| 7.28. 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....     | 112 |
| 7.29. 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....     | 113 |
| 7.30. 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtım süresi grafiğı.....    | 114 |
| 7.31. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtım işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları                  |     |

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....                                                                                                                    | 116 |
| 7.32. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları                       |     |
| a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....                                                                                                                    | 118 |
| 7.33. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları                       |     |
| a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....                                                                                                                    | 120 |
| 7.34. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C.....  | 122 |
| 7.35. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C..... | 124 |
| 7.36. Sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanmış ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları              |     |
| a) 4M b) 8M c) 12M.....                                                                                                                                 | 126 |
| 7.37. 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M.....                                  | 128 |
| 7.38. Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları                       |     |
| a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....                                                                                                                    | 130 |
| 7.39. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları                        |     |
| a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....                                                                                                                    | 132 |
| 7.40. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C.....  | 134 |
| 7.41. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C..... | 136 |
| 7.42. Potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanmış ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları          |     |
| a) 4M b) 8M c) 12M.....                                                                                                                                 | 137 |
| 7.43. 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları              |     |
| a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune.....                                                                                         | 139 |

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.44. 4M derişiminde alkali çözeltileri kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları         |     |
| a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune.....                                                                                         | 140 |
| 7.45. 8M derişiminde alkali çözeltileri kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları           |     |
| a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune.....                                                                                         | 141 |
| 7.46. 8M derişiminde alkali çözeltileri kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları          |     |
| a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune.....                                                                                         | 142 |
| 7.47. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....  | 145 |
| 7.48. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....  | 146 |
| 7.49. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....  | 148 |
| 7.50. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C.....                 | 150 |
| 7.51. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C.....                 | 151 |
| 7.52. Sodyum hidroksit kullanılmış ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M.....                  | 152 |
| 7.53. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat.....  | 154 |
| 7.54. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat..... | 155 |
| 7.55. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C.....                 | 157 |
| 7.56. Potasyum hidroksit kullanılmış ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M.....               | 159 |
| 7.57. Potasyum hidroksit kullanılmış ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M.....               | 160 |
| 7.58. 4M derişiminde alkali çözeltileri kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl                                                                   |     |

|                                                                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| İşlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a. NaOH ile hazırlanan Numune b. KOH ile hazırlanan numune.....                                                                                 | 161 |
| 7.59. 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune..... | 162 |
| 7.60. 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune..... | 163 |
| 7.61. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 250x b. 2000x c. 5000x.....                                          | 165 |
| 7.62. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 200x b. 2000x c. 5000x.....                                         | 167 |
| 7.63. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 200x b. 2500x c. 5000x.....                                         | 168 |
| 7.64. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                          | 169 |
| 7.65. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                         | 171 |
| 7.66. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                         | 173 |
| 7.67. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                         | 175 |
| 7.68. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                        | 177 |
| 7.69. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                        | 179 |
| 7.70. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                         | 180 |
| 7.71. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                        | 181 |
| 7.72. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                        | 182 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.73. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat   |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 184 |
| 7.74. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat  |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 150x b. 1000x c. 3000x.....   | 185 |
| 7.75. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat    |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 186 |
| 7.76. Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat   |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 187 |
| 7.77. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 189 |
| 7.78. Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 191 |
| 7.79. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat    |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 150x b. 3000x c. 4000x.....   | 194 |
| 7.80. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat    |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 196 |
| 7.81. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat   |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 197 |
| 7.82. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat   |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 5000x.....   | 198 |
| 7.83. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat    |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 199 |
| 7.84. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat   |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 200 |
| 7.85. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat   |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 201 |
| 7.86. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat   |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 202 |
| 7.87. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat  |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 203 |
| 7.88. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat  |     |
| ışıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....   | 204 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.89. Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                                                                                                                   | 206 |
| 7.90. Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                                                                                                                   | 207 |
| 7.91. Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                                                                                                                  | 208 |
| 7.92. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                                                                                                                   | 209 |
| 7.93. Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                                                                                                                   | 210 |
| 7.94. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x.....                                                                                                                                   | 211 |
| 7.95. 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x).....   | 214 |
| 7.96. 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x).....   | 215 |
| 7.97. 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x).....   | 216 |
| 7.98. 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x)..... | 217 |
| 7.99. 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x)..... | 218 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1. Uçucu külün XRF analizi sonuçları.....                                                                                        | 62 |
| 7.2. 4M derişiminde NaOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....    | 68 |
| 7.3. 4M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....    | 68 |
| 7.4. 4M derişiminde NaOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....   | 69 |
| 7.5. 8M derişiminde NaOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....    | 70 |
| 7.6. 8M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....    | 70 |
| 7.7. 8M derişiminde NaOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....   | 71 |
| 7.8. 12M derişiminde NaOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....   | 72 |
| 7.9. 12M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....   | 72 |
| 7.10. 12M derişiminde NaOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta farklı kür<br>sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları..... | 73 |
| 7.11. 4M derişiminde KOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta elde edilen<br>numunelerin basınç dayanımları.....                           | 87 |
| 7.12. 4M derişiminde KOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta elde edilen<br>numunelerin basınç dayanımları.....                           | 88 |
| 7.13. 4M derişiminde KOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta elde edilen<br>numunelerin basınç dayanımları.....                          | 88 |
| 7.14. 8M derişiminde KOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta elde edilen<br>numunelerin basınç dayanımları.....                           | 89 |
| 7.15. 8M derişiminde KOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta elde edilen<br>numunelerin basınç dayanımları.....                           | 90 |
| 7.16. 8M derişiminde KOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta elde edilen                                                                 |    |

|                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| numunelerin basınç dayanımları.....                                                                                    | 90  |
| 7.17. 12M derişiminde KOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....                 | 91  |
| 7.18. 12M derişiminde KOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....                 | 92  |
| 7.19. 12M derişiminde KOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları.....                | 92  |
| 7.20. Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunede gözlenen çökeleğin EDX analizi.....  | 170 |
| 7.21. Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin EDX analizi.....                    | 170 |
| 7.22. Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunede gözlenen çökeleğin EDX analizi..... | 172 |
| 7.23. Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin EDX analizi.....                   | 172 |
| 7.24. Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunede gözlenen çökeleğin EDX analizi..... | 174 |
| 7.25. Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin EDX analizi.....                   | 174 |
| 7.26. Alkali derişimi 12M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş Numunedeki kristalin EDX analizi.....        | 176 |
| 7.27. Alkali derişimi 12M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin EDX analizi.....                   | 176 |
| 7.28. Alkali derişimi 12M olan 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin EDX analizi.....                  | 178 |
| 7.29. Alkali derişimi 8M olan 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin EDX analizi.....                   | 188 |
| 7.30. Alkali derişimi 12M olan 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunedeki kristalin EDX analizi.....      | 190 |
| 7.31. Alkali derişimi 12M olan 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunedeki kristalin EDX analizi.....      | 192 |
| 7.32. Alkali derişimi 12M olan 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin EDX analizi.....                 | 192 |

## 1. GİRİŞ

Dünya genelinde süregelen gelişim nedeniyle enerji talebinin büyük oranda arttığı bilinmektedir. Enerji talebinin 2007 ve 2030 yılları arasında %40 oranında artması ve 16,8 milyon ton eşdeğer petrole ulaşması beklenmektedir. Enerji talebindeki artışın, dünya nüfusunun artması ve artan nüfusun da daha fazla enerji tüketmesi olmak üzere iki temel nedeni vardır (Torgal ve Jalali 2011).

Enerji tüketimi, yenilenemeyen fosil kaynakların kullanılmasından dolayı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Örnek vermek gerekirse, 18. Yüzyılın başlarında atmosferdeki derişimi 280 ppm olan CO<sub>2</sub> düzeyi günümüzde yaklaşık 430 ppm'e ulaşmıştır. Karbondioksit emisyonlarının %20'lik bir kısmı kömür tesislerinden kaynaklanırken geri kalan büyük çoğunluğu enerji üretimi için fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanmaktadır. (Torgal ve Jalali 2011). Dolayısıyla CO<sub>2</sub> emisyonlarının büyük çoğunluğunu enerji ihtiyacıyla orantılı olarak açıklanabilir.

İnşaat endüstrisi Avrupa ve Türkiye'de en büyük ve en aktif sektörlerden biri olup dünya genelinde de hızlı bir şekilde büyümeye devam etmektedir. Çevresel faktörler açısından değerlendirildiğinde, CO<sub>2</sub> emisyonlarının ve enerji tüketiminin büyük kısmının inşaat endüstrisi kaynaklı olduğu söylenebilir (Torgal ve Jalali 2011).

Geçen yüzyılda, portland çimentosu ile üretilen beton dünyada en yüksek hacimde üretilen ürün ve kullanılan yapı malzemesi olmuştur (Zhang ve ark. 2014; Torgal ve Jalali 2011). Dünya çapındaki talebi karşılamak üzere gerekli beton üretimi çok yüksek miktarlarda hammadde ve enerji tüketimine, dolayısıyla büyük miktarlarda sera gazı emisyonlarına yol açacaktır (Zhang ve ark. 2014).

Yapı malzemeleri sektörü, beton üretimine bağlı olarak CO<sub>2</sub> salınımına neden olan dünyada üçüncü büyük endüstriyel sektördür. Burada salınan CO<sub>2</sub>'in %85'i çimentonun oluşumundan kaynaklanmaktadır. Çimento üretiminde kullanılan temel hammadde 1450°C'ta yakılan kireçtaşı ve kildir. Çimento fabrikalarında üretilen 1 ton klinker için yaklaşık 0,93 ton CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır. Bu emisyonun yaklaşık 0,54 tonu kireçtaşının dekarbonizasyonundan, 0,39 tonu

ise ısıtma amaçlı karbon temelli yakıtların kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Çimento üretimi için öğütme işlemleri esnasında ise elektrik üretimine bağlı olarak her bir ton çimento için 0,1 ton CO<sub>2</sub> salınımı daha olmaktadır (Komnitsas 2011; Duxon ve ark. 2008; van Deventer ve ark. 2012; Yang ve ark. 2014). Bu durumda 1 ton çimento üretimi neticesinde yaklaşık olarak 1,03 ton CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmektedir.

Ayrıca, her bir ton çimento üretimi için 6.000-14.000 m<sup>3</sup> toz içeren hava akımları oluşmaktadır. Hava akımları, tozun yanında çimento üretimi esnasında fırında gerçekleşen ve aşağıda verilen eşitliğe göre kirecin dekarbonizasyonu sonucu atmosfere salınan CO<sub>2</sub> gazını da içerir (Khale ve Chaudhary 2007);



Beton üretiminde kullanılan çimento kaynaklı CO<sub>2</sub> gazı salınımlarının azaltılması konusunda iki temel yaklaşımdan söz edilmektedir; birincisi klinker üretimi esnasında açığa çıkan CO<sub>2</sub> salınımlarının azaltılması, ikincisi ise çimento içerisindeki klinker miktarının azaltılmasıdır. Klinker üretimine bağlı olan temel faktörler kullanılan hammaddenin çeşidi, yakıtın çeşidi ve fırının ısı verimliliğidir. Bu bağlamda, üretimde kullanılan kireçtaşı, düşük karbonlu ancak benzer kalsiyum oranına sahip malzemeler ile değiştirilebilir, maliyet ve emisyonları azaltmak üzere alternatif yakıtlar kullanılabilir (Komnitsas 2011; Zhang ve ark. 2014). portland çimentosunun puzolanik atıklar ile veya beton üretiminde kullanılan doğal agregaların endüstriyel atık agregalar ile kısmi olarak yer değiştirmesi de inşaat malzemeleri ve yapı sektörü için sera gazının emisyonlarının azaltılması bağlamında önemli bir rol oynayabilir (Torgal ve Jalali 2011).

Dünya genelinde endüstriyel ve evsel enerji ihtiyacının karşılanması için kömür yakılan enerji santrallerinde her yıl milyonlarca ton uçucu kül ortaya çıkmakta (Alvarez-Ayuso ve ark. 2008), endüstrilerde ve evlerde enerjiye duyulan ihtiyacın artması uçucu kül miktarlarını da arttırmaktadır (Swanepoel ve Strydom 2002). Açığa çıkan uçucu külün sadece %20-30'u çimento ve betonun içinde mineral katkı olarak kullanılmakta, geri kalanı ise toprağa gömme gibi başka yöntemlerle bertaraf edilmektedir (Alvarez-Ayuso ve ark. 2008).

Son yıllarda, tehlikeli katı atık üretiminin çeşitlilik ve miktarları ve bunların insan sağlığı üzerindeki etkileri hakkında artan bir farkındalık oluşmuş, atık bertarafının çevresel sonuçları hakkında artan kaygılar, yeni kullanım alanlarının araştırılmasına yol açmıştır (Khale ve Chaudhary 2007). Bu atıklar değerlendirilirken sadece güvenli bir şekilde çevresel kirliliğin önlenmesi değil, aynı zamanda değerli bir ürüne dönüştürülmesine de önem verilmelidir (Alvarez-Ayuso ve ark. 2008). Dünya çapında toksik atıkların artışını önlemek için atık malzemelerin kullanımı ve değerlendirilmesi üzerine birçok araştırma yapılmaktadır (Swanepoel ve Strydom 2002).

Bu çevresel etkilerin yanında yeni araştırılacak teknolojinin ekonomik olması da önem arz etmektedir. Yan ürünlerin kullanımı ve toksik atıkların yapıya hapsedilerek ısıya ve aşındırıcı çevre koşullarına dayanıklı malzemelerin üretimi ile birlikte geopolimerler bu tür problemlere alternatif çözümler sunabilmektedir (Khale ve Chaudhary 2007).

Beton üretimi için oluşturulacak sistemler yukarıda bahsedilen sera gazı emisyonlarının azaltılması için önemli yararlar sağlayabilir (Duxon ve ark. 2008; van Deventer ve ark. 2012; Zhang ve ark. 2014). Örneğin, geleneksel portland çimentosu (OPC) ile üretilmiş beton ile kıyaslandığında geopolimer beton üretim yöntemlerinin küresel ısınma üzerine etkisi düşüktür (Komnitsas 2011). Üretimleri esnasında enerji gereksiniminin düşük olması ve daha az CO<sub>2</sub> emisyonlarına yol açması nedeniyle çimentoya göre daha fazla süreklilik gösterebilirler (Zhang ve ark. 2014). Buna ek olarak, alkali çözeltiler ile üretilen bu tür bağlayıcılar OPC ile üretilen betondan daha yüksek mekanik performans ve kimyasal ve aşınma direncine sahiptir (Torgal ve Jalali 2011).

Çevresel perspektiften bakıldığında geleneksel çimentoya karşı geopolimerlerin avantajlarından en önemlisi geopolimer üretiminde çok daha az CO<sub>2</sub> açığa çıkmasıdır. Bunu sağlayan ise geopolimer sentezi sırasında yüksek sıcaklıkta kalsinasyon basamağının olmamasıdır. Çimento klinkeri üretiminde kalsinasyon için büyük miktarlarda fosil kaynaklı enerji tüketilmesinin yanında, hammaddeye bağlı olarak reaksiyon ürünü olarak yüksek miktarda CO<sub>2</sub> açığa çıkarmaktadır. Benzer şekilde geopolimerlerde metakaolin kullanılması da CO<sub>2</sub>

salınımını bir miktar arttırmaktadır. Bunun yanında metakaolinin yüksek maliyeti ve yüksek su ihtiyacı sebebiyle büyük ölçekli geopolimer üretiminde metakaolen kullanımının inşaat endüstrisi için sürdürülebilir ve kabul edilebilir bir yöntem olmadığı belirtilmektedir (Duxon ve ark. 2007a).

Geopolimerler özellikle Avusturalya, Orta Doğu, Hindistan ve Çin'in bazı bölgeleri gibi kuru ortamlarda daha da önem kazanan daha az su tüketimi ve CO<sub>2</sub> emisyonunu arttırmaması gibi çevresel açıdan önemli iki kazanç sağlamaktadırlar (Duxon ve ark. 2007a).

Uçucu kül, taşkömürü veya linyitin yanması sonucu ortaya çıkan gazlardan elektrostatik yöntemlerle filtre edilen mikron büyüklüğünde granüler malzemelerdir. Türkiye'de Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü-İskenderun termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır. Türkiye'de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl uçucu kül elde edilmektedir (Aruntaş 2006; Gürsel ve Meral 2012). Bu miktar, Amerika Birleşik Devletleri'nde 45 milyon ton/yıl ve Hindistan'da 50 milyon ton/yıl dolayındadır. Bütün Dünyada bir yılda üretilen toplam uçucu külün ancak % 25'den daha azı değerlendirilmektedir (Aruntaş 2006).

Uçucu küller endüstriyel atık veya yan ürünler olarak isimlendirilmekte olup geopolimer üretimi için çok uygun hammaddelerdir. Emisyonların azalmasının ve ekonomik faydaların yanısıra geopolimer teknolojisi ile potansiyel olarak tehlikeli bir yan ürün olan uçucu kül, değeri olan bir yapı malzemesine dönüştürülebilmektedir. Ek olarak atık gömme alanlarının korunması sağlanmakta, depolama göletlerine duyulan ihtiyaç azalmaktadır (Diaz ve ark. 2010; Zhang ve ark. 2014).

Uçucu külden elde edilen geopolimer betonun maliyeti geleneksel portland çimentosundan elde edilen betondan yaklaşık %10-30 oranında daha ucuzdur ve teknik özellikleri umut vaad eden gelişmeler göstermektedir (Duxon ve ark. 2007b). Günümüzde beton endüstrisinde normal çimento ile üretilen

bağlayıcılara alternatif olarak geopolimer kullanımı, düşük CO<sub>2</sub> emisyonu ve düşük enerji tüketimi ile giderek önem kazanmaktadır (Sukmak ve ark. 2013; Phoo-ngernkham ve ark. 2014).

Bu çalışmada Çatalağzı termik santralinden elde edilen F sınıfı uçucu kül kullanılarak değerli ve kullanılabilir bir ürün olan geopolimer elde edilmesi amaçlanmış, elde edilen geopolimerlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir.

Geopolimerlerin sentezinde en önemli parametreler olan alkali aktifleştiricide bulunan katyon, pH ve ısıtılmanın geopolimer özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneylerde geopolimer eldesi için alkali aktifleştirici çözeltilerde 4M, 8M ve 12M olmak üzere üç farklı derişimlerinde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak katyon ve pH etkileri araştırılmıştır. Isıtılmanın etkilerinin araştırılması amacı ile üç farklı ısıtılma sıcaklığı (40°C, 80°C ve 120°C) ve üç farklı ısıtılma sürelerinde (6 saat, 15 saat ve 24 saat) kür işlemleri uygulanmıştır.

Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile 7 gün, 28 gün ve 90 gün yaşlarındaki numunelere basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi amacı ile Fourier Transform Infrared Spektrometresi, X-Işını Difraksiyon Spektrometre ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)/ Enerji Dağıtıcı X-Işını Floresan Spektrometre teknikleri kullanılmıştır.

## 2. GEOPOLİMERLER

Doğu Avrupa’da 1950’li yıllarda II. Dünya Savaşı sonrası yaşanan portland çimentosu sıkıntısının ardından Glukhovsky ve arkadaşları tarafından, başlıca silisyum ve reaktif alüminyum içeren malzemelerin alkali aktivasyonu ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Glukhovsky tarafından çimento sıkıntısına kısa süre içinde yüksek fırın cürufu kullanılarak bir çözüm üretilmiş yapılan analizler sonucu bu malzemelerin oldukça dayanıklı oldukları görülmüştür. Bu geliştirilen yeni, basit, deneysel ve etkili teknikler, bilimsel araştırmaların derinleşmesini sağlamış, 1970’lerde Davidovits tarafından metakaolin kullanılarak alüminosilikatların alkali hidroksit ve silikat çözeltileri ile reaksiyonu incelenmiştir (Duxon ve ark. 2008).

Malzemelerin alkali aktivasyonu, bazı kısmi amorf veya tamamen amorf yapıların kompakt yapılara ani dönüşümünü sağlayan kimyasal bir işlemdir (Fernández-Jimenez ve Palomo 2003a; Bakri ve ark. 2011). Alkali aktivasyon, bazı araştırmacılar tarafından toz haline getirilmiş katının derişik alkali çözelti ile karıştırılması, daha sonra orta sıcaklıklarda kısa sürelerde tutularak iyi bağlayıcı özelliklere sahip malzeme üretilmesi olarak da tanımlanmaktadır. Bu işlemler sonucunda, temel reaksiyon ürünü olarak amorf alüminosilikat jel oluşmaktadır (Bakri ve ark. 2011).

Geopolimerler amorf tan yarı kristale doğru bir yapıya sahip olan üç boyutlu alüminosilikat malzemelerdir (Xu ve Deventer 2000; Duxson ve ark. 2007b; Alvarez-Ayuso ve ark. 2008; Komnitsas 2011; He ve ark. 2012; Takeda H. ve ark. 2014; Cilla ve ark. 2014 ). Katı bir alüminosilikat ile yüksek derecede bazik alkali hidroksit ve silikat çözeltisinin reaksiyonu sonucu sentetik, X-ışınına amorf alüminosilikat malzeme oluşmaktadır. Bu malzemeler Davidovits’ten sonra “geopolimer” olarak adlandırılmış olup “inorganik polimerler” olarak da bilinmektedir (Duxon ve ark. 2007b; MacKenzie 2008).

Silisyum veya alüminyum atomları, doğal kayalara benzer moleküller oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Oluşan inorganik polimerik malzemeler jeolojik feldispatların amorf bir eşdeğeri olarak düşünülebilir ancak organik

polimerlerin ısıyla sertleşmesine benzer bir biçimde sentezlenir. Bu nedenle, bu malzemeler “geopolimerler” olarak adlandırılırlar (Khale ve Chaudhary 2007).

Geopolimerler, bazen alkali ile aktifleştirilmiş alüminosilikat bağlayıcılar veya alkali ile aktifleştirilmiş çimento olarak da adlandırılabilir. Geopolimer eldesi için bazik çözeltilerde çözünebilir silisyum ve alüminyum içeren kaolin, feldspar, albit, stilbit gibi doğal mineraller, metakaolin gibi işlem görmüş mineraller ve yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi atık malzemeler gibi birçok ana kaynak kullanılabilir (Fernández Pereira ve ark. 2009; Alvarez-Ayuso ve ark. 2008). Son zamanlarda geopolimerizasyonda atık ve yan ürünlerin kullanımı, atıkların değerlendirilmesi ve kaynakların korunumu açısından önem kazanmaktadır (Nath ve Kumar 2013).

Bağlayıcılar veya alkali ile aktifleştirilmiş çimentolar, kullanılan hammaddenin bileşimine bağlı olarak alkali bağlayıcı sistemleri ve alkali toprak bağlayıcı sistemleri iki gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma üzerinde genel bir anlaşma olmasa da birçok araştırmacı farklı sistemler için geopolimer terimini kullanmaktadır (Fernández Pereira ve ark. 2009).

Geopolimerler, çevresel olarak sürdürülebilir yapı ve inşaat ürünleri endüstrisinin temel bir elementini oluşturma potansiyeli ile ortaya çıkan yeni mühendislik malzemeleridir. Aynı zamanda bu malzemeler geleneksel betonla karşılaştırıldığında özellikle önemli ölçüde azaltılmış seragazı emisyonlarına sahiptirler (Duxon ve ark. 2007a; Duxon ve ark. 2007b, Ranjbar ve ark. 2014a).

Kömür külünden türetilen (F sınıfı ve/veya C sınıfı) geopolimerler, doğru karışım formülasyonu geliştirildiğinde geleneksel portland çimentosuna (OPC) göre üstün kimyasal ve mekanik özellikler gösterebilir. Geopolimer teknolojisinin anahtar özelliği sağlamlık ve üretim sürecindeki değişkenlik olup bu özellik ürünlerin, kömür külü kaynakları ve diğer alüminosilikat malzemeler gibi çeşitli hammaddelerden isteğe bağlı şekilde üretilmesine imkan vermektedir. Böylece ürünler istenilen uygulamaya göre rekabetçi bir fiyatta özgün niteliklere sahip olabilirler (Duxon ve ark. 2007a; Duxon ve ark. 2007b).

Hammadde seçimine ve sentez koşullarına bağlı olarak yüksek basınç dayanımı, düşük büzülme, hızlı veya yavaş priz alma, klor penetrasyonuna karşı

direnç, asit dayanıklılığı, yüksek sıcaklık ve ateşe dayanıklılık ve düşük ısı iletkenlik, kimya ve nükleer endüstrileri için atıkların tutuklanması konusunda alternatif işlemlere çözüm olma gibi çeşitli özellikler gösterebilirler. Bütün bu özellikler her geopolimerin yapısında doğal olarak bulunmayabilirler bu nedenle istenen özellikler istenilen uygulama alanlarına göre ve/veya maliyeti azaltmak üzere doğru karışımlar kullanılarak ve işlem koşulları tasarlanarak sağlanabilir (Duxon ve ark. 2007a; Duxon ve ark. 2007b; Lyu ve ark. 2013a).

Geopolimerler ve zeolitler benzer yapıya sahip olsalar da başlangıç karışımlarındaki bileşenlere bağlı olarak zeolitler, geopolimerlerden farklılık gösterir. Örnek vermek gerekirse, zeolitler kapalı hidrotermal sistemler içinde oluşup doğal olarak kristal yapıya sahip olurken geopolimerlerin yapıları amorfıtan yarı-kristale kadar değişmektedir. Geopolimer oluşumu için kullanılacak uçucu kül bazik çözelti ile karıştırıldığında, kül içerisindeki camsı bileşen ani bir şekilde çözünür. Böyle bir durumda jel içerisinde iyi kristalleşmiş bir yapının oluşması için yeterli süre ve boşluk oluşmamakta, hammaddedeki alüminyum, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kimyasal olarak daha az reaktif olan kalsiyum silikat hidroksit (C-S-H) ve kalsiyum alüminosilikat oluşmaktadır. Buna karşın zeolitler genellikle sulu seyreltik çözeltilerden sentezlenen kristaller olarak elde edilmekte, zeolit oluşumunda kristal yapıyı oluşturan başlatıcı maddelerin hareketliliği ve oryantasyonu için yeterli süre bulunmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007).

Kimyasal ve sentez yöntemleri açısından benzerlikler gösterdiklerinden dolayı geopolimer jelleri içinde zeolitik yapılar olarak adlandırılan nanokristal parçacıklar bulunabilmektedir. Zeolitler ile kıyaslandıklarında geopolimer fazlar yarı-kararlı olarak düşünülebilir ve bu nedenle geopolimerik ürünler için kristal oluşumunu sağlayan sentez koşulları, ürünlerin özelliklerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Şöyle ki, kristalizasyon derecesi, başlangıçtaki formülasyonlara ve sentez koşullarına bağlıdır (Silva ve Sagoe Crensil 2008).

Geopolimer sentezinde kullanılan bazik çözelti içindeki alkali bileşen, periyodik cetvelde 1. grup elementleridir. Aktivasyon çözeltisi olarak sadece alkali hidroksit çözeltisi veya alkali hidroksit-alkali silikat çözeltisi karışımı

kullanılmaktadır. Burada, iki aktifleştirici arasındaki fark alkali hidroksit çözeltisinin silikat içeriğinin çok düşük olmasıdır. Geopolimer sentezinde genellikle alkali silikat çözeltisinin alkali hidroksit ile beraber kullanıldığı aktifleştiriciler tercih edilmektedir. Böylece elde edilen geopolimerler kullanılan aktifleştirici çeşidine göre yapı olarak ve özellikleri yönünden farklılıklar gösterebilmektedir (Khale ve Chaudhary 2007; Sagoe-Crentsil ve Weng, 2007a).

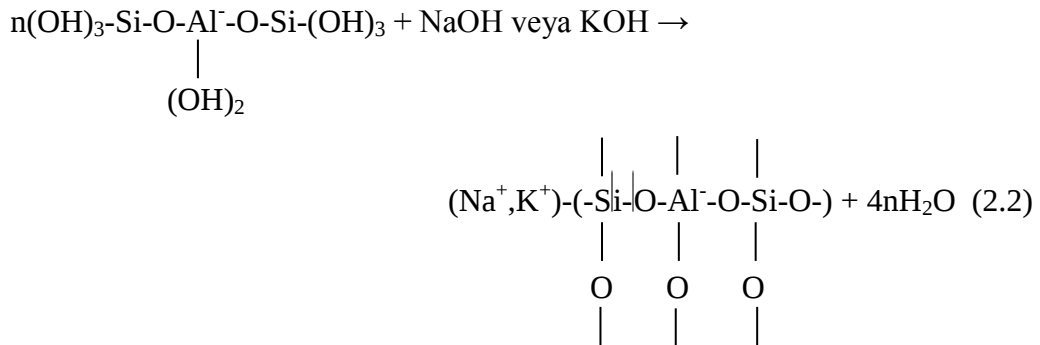
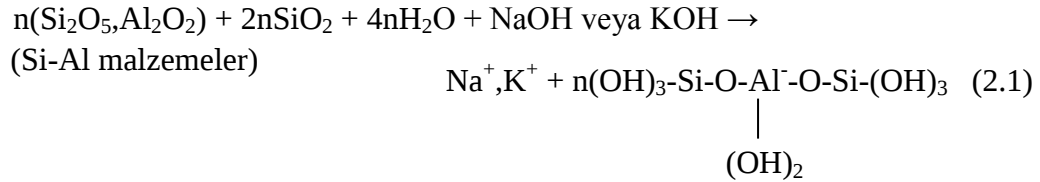
Geopolimerler yapısal bütünlüğü oluşturmak üzere tamamen farklı bir reaksiyon yolu izlediklerinden geleneksel portland çimentosundan (OPC) yapısal olarak farklıdırlar. Puzalanik imentolar kalsiyum-silikat hidrat oluşumuna dayanırken, geopolimerler yüksek derecede bazik bir ortamda silisyum ve alüminyum içeren başlatıcı bileşenlerin polikondenzasyonu ile oluşmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007).

## **2.1. Geopolimerizasyon**

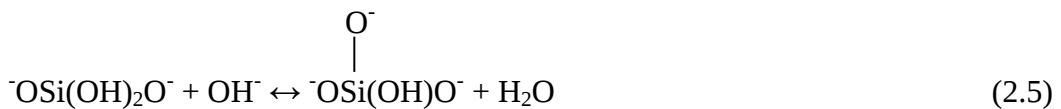
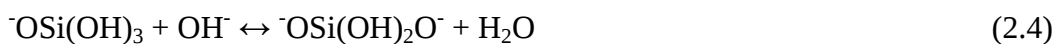
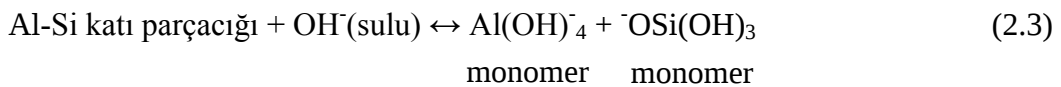
Geopolimerizasyon, amorf silisyum içeren ve alüminyum açısından zengin bir katının yüksek oranda bazik bir çözelti ile amorf tan yarı kristale doğru alüminosilikat inorganik polimerler oluşturmak üzere reaksiyona girmesi temeline dayanan oldukça umut verici, yenilikçi bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Duxon ve ark. 2007b). Bir başka deyişle, depolanmakta olan ve çevresel koşullarda tehlikeli olabilecek katı atık ve yan ürünlerin kullanılması neticesinde geopolimer oluşumu sayesinde ekonomik özümmler sağlanabilmektedir (Khale ve Chaudhary 2007).

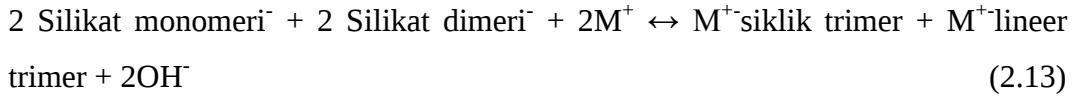
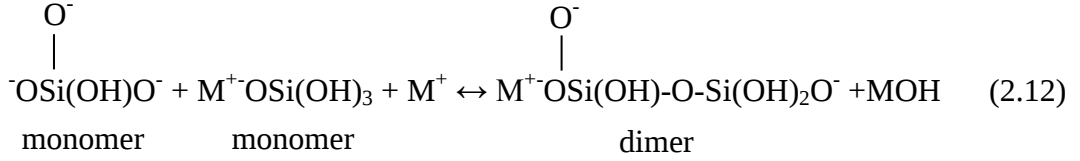
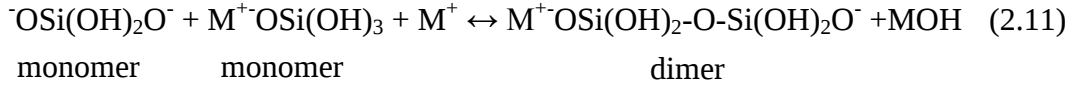
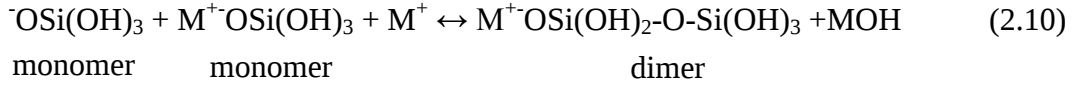
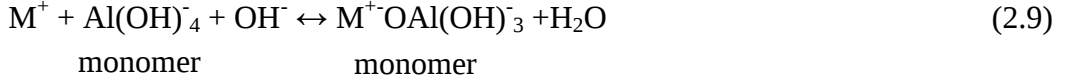
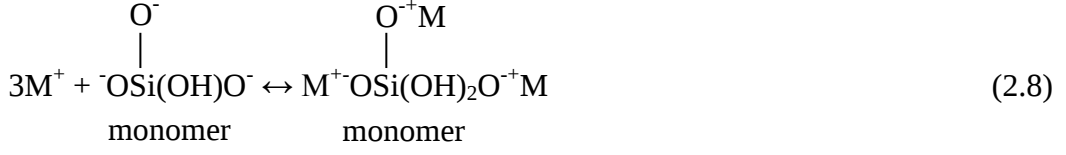
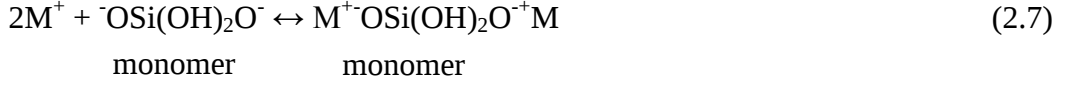
Geopolimerizasyon mekanizması, temelde Al ve Si parçacıklarının çözünme, taşınma ve polimerizasyon basamaklarından oluşmaktadır. Burada özünmüş silisyumun derişimi, çözünebilir silikatların ilavesi ile arttırılabilmektedir. Jel faz içindeki Si/Al oranı ve hammaddenin yapısı (amorf yapı) geopolimerizasyonu etkileyen önemli parametrelerdir (Fernández Pereira ve ark. 2009).

Geopolimerler, bazik ortamda alüminosilikat oksitlerin polimerik Si-O-Al-O bağları oluşturmak üzere reaksiyona girmesi ile oluşmakta olup şematik olarak aşağıdaki şekilde gösterilebilmektedir (Xu ve van Deventer 2000):



Yukarıdaki reaksiyonlar Si-Al içeren herhangi bir malzemenin geopolimerizasyon için kaynak olabileceğini göstermektedir. Silisyum ve alüminyumun çözünmesi için bir alkali metal tuz ve/veya hidroksite ihtiyaç vardır. Yüksek derecede reaktif olan ara jel fazı bireysel alümina ve silikat birimlerinin kopolimerizasyonu ile oluşmaktadır. Al-Si minerallerinin ve silikatların yüksek derecede bazik ortamda olası çözünme reaksiyonları aşağıda verilmektedir (Xu ve van Deventer 2000).





Yukarıdaki reaksiyonlarda alkali çözeltinin derişiminin artması sonucunda (2.3) ve (2.9) numaralı reaksiyonlarda sağa doğru kayma olacağı görülmektedir. Burada (2.3) ve (2.5) numaralı eşitlikler kimyasal hidratasyon reaksiyonlarıdır. Bütün OH<sup>-</sup> anyonları katı Al ve Si ile reaksiyona girerek, divalent orthosilicic acid Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> ve trivalent orthosilicic acid OSi(OH)<sub>3</sub><sup>-</sup> oluştururlar. Denklem (2.6) ve (2.9) ise alkali metal katyonun (M<sup>+</sup>) Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> ve OSi(OH)<sub>3</sub><sup>-</sup> ile reaksiyona girdiği fiziksel elektrostatik reaksiyonları ifade etmektedir. Eşitlikler (2.10) ve (2.13) anyon-katyon paylaşan etkileşimlerdir. (2.9) ve (2.13) nolu eşitliklerde ise M<sup>+</sup> katyonu Al(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup> ve ortosilicic asit iyonları ile reaksiyona girmekte ve bunun sonucunda M<sup>+</sup>Al(OH)<sub>4</sub> monomeri, silikat monomeri, dimer ve trimer iyonları oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar nedeniyle

serbest  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  miktarı azalmakta, (2.3) ve (2.5) nolu eşitliklerdeki reaksiyonlar sağa doğru kaymaktadır (Xu ve van Deventer 2000).

(2.6) ve (2.13) numaralı eşitliklerden, alkali metal katyonunun çözünmenin büyüklüğünü etkilediği görülmektedir. Reaksiyonlarda,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{K}^+$  katyonlarının aynı elektriksel yüke sahip olmalarına rağmen etkilerinin farklı olması iyonik çaplarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Küçük çaplı katyon, iyon paylaşan reaksiyonları desteklemektedir. Dolayısıyla daha küçük çapa sahip olan  $\text{Na}^+$ , (2.6) ve (2.13) numaralı eşitliklerde  $\text{K}^+$ 'dan daha aktif hale gelmekte ve NaOH çözeltisi kullanıldığında minerallerin çözünmesi daha yüksek hızlarda gerçekleşmektedir (Xu ve van Deventer 2000).

Uzun zincirli Al-O-Si oligomerleri oluşturmak için yüksek derişimlerde silikat, özellikle sodyum silikat gereklidir. Derişik alkali çözeltilerde her uzunluktaki silikat potansiyel olarak Al-O-Si kompleksleri oluşturabilir. Ancak  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  küçük yüklere sahip silikat monomerleri ile değil, daha uzun zincirli silikat oligomerleri ile birleşir ve geopolimer başlatıcılarını oluştururlar. Birçok Al ve Si içeren hammaddeler ve alkali çözeltiler geopolimerizasyonu başlatmak için yeterli oranda silisyum içerdiğinden, ortama sodyum silikat çözeltisi eklenmektedir (Xu ve van Deventer 2000).

Geopolimerizasyonda en önemli basamak, alüminosilikat malzemelerin çözünme basamağı olup jel oluşumu çözünmenin büyüklüğüne bağlıdır. Alüminosilikat katılar alkali çözelti ile reaksiyona girmekte ve yüzeylerinde bir jel fazı oluşturmaktadır. Jel parçacık yüzeyinden diğer parçacıklar arasında bulunan boşluklara difüzlenmekte, jel fazı sertleştğinde, ayrı bulunan alüminosilikat parçacıkları birbirleriyle bağ oluşmaktadır (Xu ve van Deventer 2000).

Katı bir alüminosilikat kaynağından çözeltiliye salınan alüminyum hızı, stokiyometriyi ve çözeltildeki reaksiyonların büyüklüğünü kontrol eder. Amorf alüminosilikatın çözünme ve çökeltme hızları ise sıcaklık, pH, derişim ve çözünebilir Si/Al oranı gibi birkaç faktöre bağlı olarak değişmektedir (Duxon ve ark. 2007b).

Ana malzemeler içindeki her mineral faz geopolimerizasyon reaksiyonlarında yer almaz. Kristal fazlar genellikle reaktif olmayıp ve

geopolimerik bağlayıcılar içinde aktif olmayan dolgu görevi üstlenirler. Bunlara ek olarak son geopolimerik ürünler, hem çözünmenin tamamlanmamasından (uçucu kül partikülleri gibi) hem de çözünmüş fazların tekrar çökmesinden (NaOH veya Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) kaynaklanan az miktarda reaksiyona girmemiş hammadde içermektedir (He ve ark. 2012).

Kömürün yakılması ve gazlaştırma sistemlerinden elde edilen uçucu küller temel olarak Al-Si camsı matrisleri, Ca, Fe, Na, K, Ti, Mg gibi safsızlıkları ve çok az ve değişen miktarlarda kristal fazları içerirler. Uçucu küllerin bünyesinde baskın olarak bulunan ve düzensiz atomik yapısından dolayı kimyasal reaksiyonlarda yer alan camsı matris uçucu külün temel bileşenidir (Font ve ark. 2010).

Geopolimerik bağlayıcılar, aktif veya reaktif olmayan dolgu malzemelerini bağlamak suretiyle çimento gibi davranabilirler. Aslında, kristal fazların geopolimerizasyona dahil olmadıkları gibi ana malzemedeki amorf fazlar da geopolimerlere tamamen dönüşemeyebilmektedirler. Geopolimer üretiminde reaktif hammaddeleri geopolimerizasyon reaksiyonuna dahil etmek amacıyla hammaddeler ve alkali çözeltinin uzun süreli olarak ( $\geq 15$  dakika) karıştırılması gerekmektedir (He ve ark. 2012).

Kalsiyum, magnezyum ve demir gibi ham maddelerin içeriklerinde bulunan safsızlıklar, geopolimerizasyon esnasında ek reaksiyon mekanizmasına katılabilir ve yan reaksiyon oluşturabilirler. Bu reaksiyonlar priz süresi, çökme, dayanım ve büzülmedeki değişikliklerin sonucu sentez esnasında malzeme özelliklerinde ve son üründe büyük değişikliklere neden olabilmektedir (He ve ark. 2012; Duxon ve ark. 2007b).

Kalsiyum, suyun varlığında silisyum ile reaksiyona girerek çeşitli kalsiyum-silikat-hidrat, alüminyum ile reaksiyona girerek kalsiyum-alüminat-hidrat fazlarını oluşturur. Bu reaksiyonlar sırasıyla portland çimentosu (OPC) ve kalsiyum alüminat çimentonun temeli olarak bilinmektedir. Uçucu küller belirgin derecelerde ağ yapısı oluşturabilen veya yapıyı değiştirebilen çeşitli şekillerde demir içermektedir. Külün yapısında doğal olarak bulunan demirin, arseniğin

alkali aktivasyon esnasında ağ yapısına dahil olmasında önemli bir rolü vardır (Duxon ve ark. 2007b).

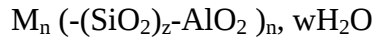
Mekanik özellikler yapı malzemelerinin yükler altında davranışını belirleyen temel özelliklerdir. Bir yapı mazlemesi olarak geopolimerik kompozitlerin mekanik özellikleri, hammaddenin geopolimerizasyon derecesi ve büyüklüğü, geopolimerik bağlayıcının kimyasal kompozisyonu (Si/Al), geopolimerik bağlayıcı ve inaktif dolgu malzemelerinin oranları, dolgu malzemelerinin özellikleri (parçacık büyüklüğü, şekli, dayanımı, vb.), gözeneklilik ve yoğunluk ve safsızlıklar gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. (He ve ark. 2012).

## 2.2. Geopolimerizasyon Mekanizması

İyonik teori temeline dayanarak 1937’de W.L. Bragg tarafından kristal yapıların ve bütün türde silikatların sınıflandırılması için bir yöntem yayınlanmıştır. Bu çalışmada kaya kökenli minerallerin oluşum ve bağ mekanizmaları, iyi bir araç olarak kullanılmıştır. Bu sistem, farklı silikat veya alüminat anyonlarını oluşum mekanizmasının temel birimi olarak kabul edilmekte olup, 4 oksijenli tetrahedral koordinasyonda temel birim,  $\text{Si}^{+4}$  katyonunu içeren tetrahedral kompleksidir. Burada çok sayıdaki silikat yapıları, ortosilikat anyonu ve tetrahedral grubun ( $\text{SiO}_4$ ) ayrit edilmesi ile açıklanabilir. Ortosilikat anyonları, disilikat anyonları [ $\text{Si}_2\text{O}_7$ ] gibi çoklu birimlere veya daha kompleks gruplara ve ardından sonsuz zincirlere, halkalara, şeritlere, katmanlara ve sonuç olarak üç boyutlu iskelet oluşturmak üzere birleşebilir. Sonuç olarak, Bragg’ın yöntemi silikat kristal kimyasında uygun bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Davidovits 2008).

Merkez iyonun büyüklüğü arttıkça, iyonu kuşatmak için daha fazla sayıda zıt yüklü iyon ihtiyacı duyulmaktadır. Her bir silikon atomu 4 adet oksijen atomu ile çevrili olup her oksijen atomu 2 silisyum atomuna veya silisyum-alüminyum atomuna bağlıdır. Kuvartz kristalinde bu bağlar moleküler zincirlerden oluşan bir ağ oluştururlar (Davidovits 2008).

Bragg'ın yöntemi aynı zamanda geopolimer terminolojisinde de kullanılabilir. Mineroloji ve geokimya alanında çalışan bilim adamları ve mühendisler, bu yöntemi geopolimer yapıların ilk açıklamaları olarak kullanabilirler. Silika-alüminat kökenli geopolimerlerin ağ yapısı, bütün oksijen atomlarına sıra ile  $\text{SiO}_4$  ve  $\text{AlO}_4$ 'ün bağlandığı tetrahedral yapıyı içermektedir. Burada  $\text{Al}^{+3}$ 'ün negatif yükünü dengelemek için pozitif iyonlar ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ) iskelet yapıdaki boşlukları doldurmakta olup oluşan yapı aşağıdaki ampirik formül ile gösterilebilir;

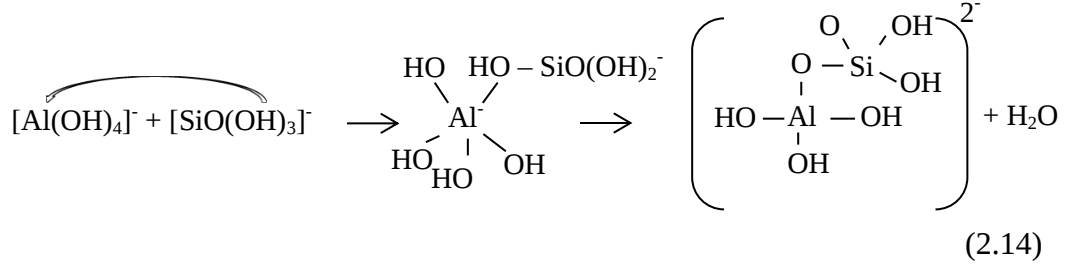


Burada “z” 1,2,3 veya daha yüksek olabilir; M potasyum veya sodyum gibi tek değerli katyondur ve “n” polikondenzasyon derecesini belirtmektedir (Davidovits 2008).

Geopolimerler Davidovits tarafından Si/Al oranının 1 olduğu poli-sialat ( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$ ), Si/Al oranının 2 olduğu poli-sialat-siloxo ( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$ ), Si/Al oranının 3 olduğu poli-sialat-disiloxo ( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$ ), Si/Al oranının 3'ün üzerinde olduğu sialat bağları olmak üzere farklı gruplara ayrılmıştır. Si/Al oranının 3 veya 3'ten küçük olduğu durumlarda sert ve kırılgan özelliklere ve üç boyutlu çapraz bağlı ağ yapısına sahip, Si/Al oranının 3'ten büyük olduğu durumlarda ise yapışkan ve lastiğe benzeyen özelliklere ve iki boyutlu lineer bağlara sahip polimerik yapılar oluşmaktadır (He ve ark. 2012; Ryu ve ark. 2013, Ranjbar ve ark. 2014b).

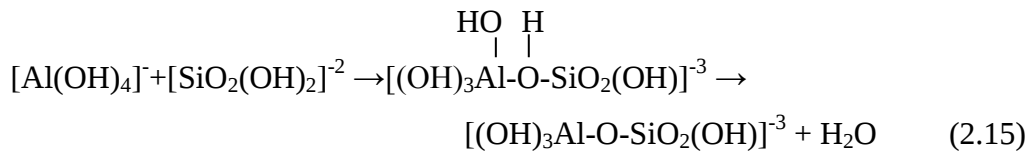
Geopolimer sentezi silikatların, alüminatlarla ve birbirleri ile kondenzasyon reaksiyonları sırasında gerçekleşmektedir. Aktifleştirici olarak sadece sodyum silikat kullanıldığında jel faz içinde Si içeriği, Al içeriğinden daha fazladır. Silikat çözeltisindeki  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$  birimleri, atomik boyutlarının büyüklüğünden ve dört tane hidroksil grubu içermelerinden dolayı kondenzasyon tepkimelerini büyük ölçüde arttırmaktadırlar. Buna karşın silikatların birbirleri ile tepkimeleri nispeten daha yavaş gerçekleşmektedir (Sagoe-Crentsil ve Weng 2007b).

Düşük miktarlarda silikat içeren aktifleştiriciler kullanıldığında genellikle nükleofilik yer değiştirme reaksiyonları meydana gelmekte olup  $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$  ve  $(\text{Si}(\text{OH})_3)^-$  arasındaki kondenzasyon reaksiyonu şematik olarak aşağıdaki şekilde gösterilebilir (Sagoe-Crentsil ve Weng 2007a);



Bu reaksiyonda  $(\text{SiO}(\text{OH})_3)^-$  içindeki OH gruplarından biri ile  $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$  içindeki Al iyonu arasında bir bağ kurulmakta ve kompleks bir bileşik oluşmaktadır. Kısaca özetlemek gerekirse, kompleks grup içindeki iki OH grubu birleşir,  $\text{H}_2\text{O}$  açığa çıkar ve alüminosilikat bileşik oluşur. Kondenzasyon reaksiyonları aynı zamanda oluşan bileşiklerin kararlılığına bağlı olup reaksiyona girecek gruplar içindeki metal atomlarının kısmi yükleri pozitif olmalıdır. Burada  $\text{OH}^-$  grupları negatif olduğundan metal atomları ile birbirlerini çekmeli ve kondenzasyon reaksiyonunun oluşmasını sağlamalıdır (Sagoe-Crentsil ve Weng 2007a).

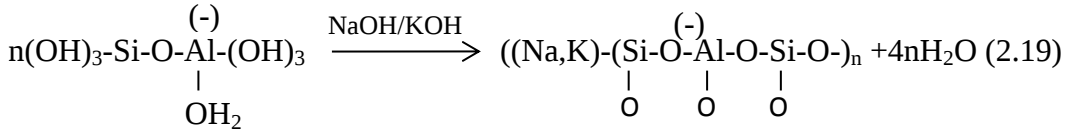
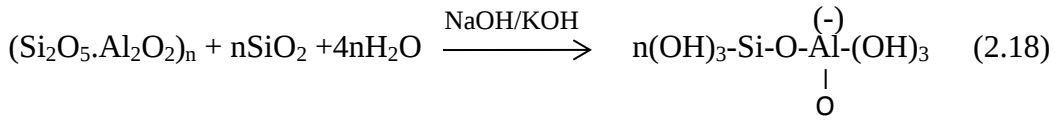
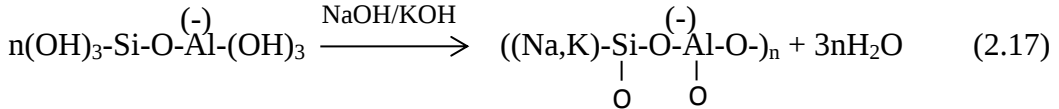
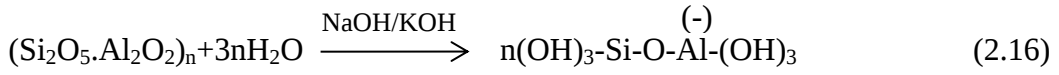
Benzer şekilde  $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$ ,  $(\text{SiO}_2(\text{OH})_2)^{-2}$  ve  $(\text{SiO}(\text{OH})_3)^-$  bileşikleri yüksek alkali ortamda var olmaktadır. Kısmi yük dağılımına göre  $(\text{SiO}_2(\text{OH})_2)^{-2}$  monomerik olma eğiliminde olduğundan,  $(\text{SiO}_2(\text{OH})_2)^{-2}$  ve  $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$  arasındaki kondenzasyon reaksiyonu aşağıdaki şekilde oluşabilir: (Sagoe-Crentsil ve Weng 2007a).



Bu reaksiyon sonucunda oluşan ürün ile  $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$  arasında tekrar kondenzasyon tepkimesi oluşabilir ve kondenzasyon sonucu oluşan ürün ile  $(\text{SiO}(\text{OH})_3)^-$ ,  $(\text{Al}(\text{OH})_4)^-$ 'in bütün hidroksil grupları tükenene kadar kararlı ürünler

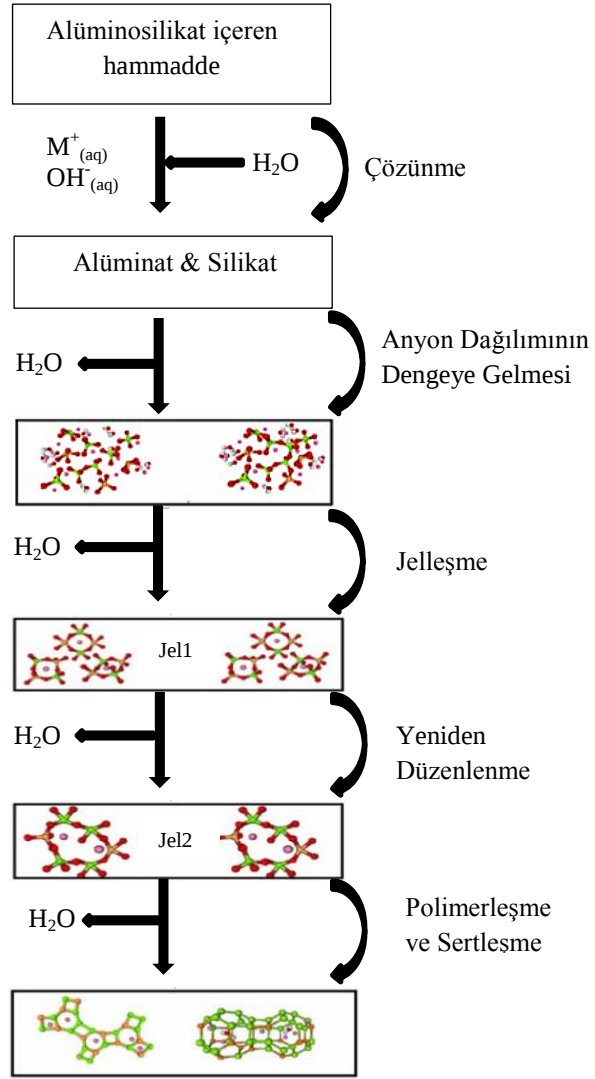
oluşturmak üzere reaksiyona girebilirler. Böylece polimerik alüminosilikat ağ yapısı oluşmaya başlar (Sagoe-Crentsil ve Weng 2007a).

Khale ve Chaudhary tarafından geopolimerizasyon esnasında aşağıdaki reaksiyonların gerçekleştiği ileri sürülmektedir (Khale ve Chaudhary 2007);



Al-O-Si'un oluşturduğu polimerik birimler, geopolimerik yapının ana yapı taşlarını oluşturmaktadır. Alkali metal tuzları ve/veya hidroksitleri, silika ve alüminanın çözünmesinin yanı sıra kondenzasyon reaksiyonlarında katalizör olarak da gereklidir. Jel fazı oldukça reaktif olup alkali metal tarafından çözülen hammaddedeki silika ve alüminyumun kopolimerizasyonu sonucu oluşmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007).

Glukhovsky, temel olarak silika ve reaktif alümina içeren malzemelerin alkali aktivasyonu hakkında 1950 yıllarında genel bir mekanizma önermiştir. Bu mekanizmada işlemler üç basamakta incelenmektedir; (a) yıkım–koagülasyon; (b) koagülasyon–kondenzasyon; (c) kondenzasyon–kristalizasyon. Mekanizmanın oldukça basitleştirilmiş hali Şekil 2.1'de verilmiştir (Duxon ve ark. 2007b).



**Şekil 2.1.** Geopolimerizasyon mekanizmasının şematik gösterimi (Duxon ve ark. 2007b).

Şekilde, katı bir alüminosilikat kaynağın sentetik alkali alüminosilikat malzemeye dönüşümü esnasında gerçekleşen temel işlemler açıklanmaktadır. Bu işlemler gösterildiği gibi lineer değil, eşzamanlı ve çoğul olarak gerçekleşir. Alkali hidrolizi (su tüketen) ile gerçekleşen katı alüminosilikat kaynağın çözünmesi ile alüminat ve silikat oluşur. Yüzeydeki katı parçacıkların çözünmesi ile alüminat ve silikatın açığa çıkması, katı parçacıkların reaksiyon esnasında geopolimere dönüşmesinden sorumlu mekanizma olarak kabul edilmektedir (Duxon ve ark. 2007b).

Çözünme sonucunda aktivasyon çözeltisinde var olan silikatı içeren gruplar sulu faza dahil olurlar. Dolayısıyla silikat, alüminat ve alüminosilikat içeren bir kompleks oluşur. Amorf alüminosilikatların çözünmesi yüksek pH ortamında hızlıdır ve aşırı doygun alüminosilikat çözelti oluşmaktadır. Bu durum derişik çözeltelerde, sulu fazda oligomerlerin kondenzasyonunda olduğu gibi, jel oluşumu ile sonuçlanmaktadır. Çözünme esnasında çok az miktarda tüketilen su açığa çıkmış olur. Aslında su reaksiyon ortamını sağlar ancak gözeneklerin içine yerleşir (Duxon ve ark. 2007b).

Aşırı doymuş alüminosilikat çözeltinin kesintisiz bir faz oluşturma süresi büyük ölçüde hammaddenin işlem koşullarına, çözelti bileşimine ve sentez koşullarına bağlıdır. Bunun yanında seyreltik olan ve alüminyum ve silisyum derişimlerinin salınım gösterdiği denge halinden uzaktaki çözeltelerde asla jel oluşmaz. Jel oluşumundan sonra sistem yeniden düzenlenmeye devam eder; jel yapısının bağlayıcılığı arttıkça üç-boyutlu alüminosilikat ağ yapısı geopolimere bağlanır. Bu durum şekilde birden fazla ‘jel’ basamağı ile gösterilmiştir. Alüminosilikat malzemenin çözünmesi ve polimerik birimlerin oluşumu, büyük oranda termodinamik ve kinetik parametrelere bağlıdır ve önerilen modelde ilk iki basamağı içermektedir. Yapısal düzenlenmenin olduğu bu işlemler, fiziksel özelliklerin belirlenmesinde oldukça önemli olan malzemenin mikroyapısını ve parçacık boyutunu belirler (Duxon ve ark. 2007b).

Alkali aktivatörlerin çeşitleri ve derişimleri, su içeriğı, hammaddenin  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{AlO}_3$  içerikleri ve ortam koşulları geopolimerlerin yapılarını önemli ölçüde etkilemektedir. Isıl işlem (kür) sıcaklığı ve işlemin süresi ise kimyasal bileşimi ve kristallik derecesini belirleyen en önemli parametrelerdir (Silva ve Sagoe-Crentsil 2008).

### **2.3 Geopolimerizasyonu Etkileyen Parametreler**

Geopolimerlerin birçok araştırma ile kanıtlanan avantajlı ve tercih edilebilir özellikleri önemli ölçüde kür süresi ve sıcaklığına, seçilen katı ve sıvı bileşenlerin kimyasal bileşimine, alkali aktifleştiricide bulunan katyon türüne ve

pH'a bağılıdır (Khale ve Chaudhary 2007; Weil ve ark. 2007; Ruiz -Santaquiteria ve ark. 2012).

Kaolin, metakolin, uçucu kül ve farklı alüminosilikat malzemelerin alkaliler ile reaksiyonu, koşullara (sıcaklık, alkali katyonu, Si/Al oranı, vb.) bağılı olarak çeşitli ağ yapılarına sahip malzemelerin oluşumu ile sonuçlanır. Nispeten yüksek su içeriği, oldukça derişik iyonik çözeltilerde çeşitliliği önemli ölçüde etkileyen birimlerin su ile birleşmelerine neden olur. Silikat ve alüminat birimlerin çeşitliliği, çözeltinin alkali derişimine ve Si/Al oranına bağılıdır. Seyreltme işlemi fazlarda taşınımın ve oryantasyonun gelişmesini sağlar (Duxon ve ark. 2007b).

Bu bölümde alkali çözelti derişiminin, alkali katyonun, kür koşullarının (sıcaklık-süre) ve kullanılan hammaddenin geopolimerlerin özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

### **2.3.1. Alkali çözelti derişimi**

Alkali derişimi, geopolimerizasyonda en önemli faktörlerden biridir. Aktivasyon çözeltisi içindeki silikat birimlerinin polimerizasyon dereceleri ve alüminosilikatların çözünürlüğü, hidroksit iyonunun derişimi ile artmaktadır. Yüksek pH değerlerinde, çözünebilir alüminyum ile reaksiyona girebilecek küçük monomerik silikatlar baskın haldedir. (Khale ve Chaudhary 2007; Zaharaki ve ark. 2010).

Alkali hidroksit derişimi arttırıldığında, küçük miktarda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline sahip amorf yapıda geopolimer baskın bir ürün olarak oluşur. Burada C-S-H jelinin geopolimer yapısındaki boşlukları ve gözenekleri doldurduğu düşünülmektedir. Böylece reaksiyona girmemiş parçacıklar ve farklı hidratlar ile boşluklar arasında bir köprü oluşturmakta ve basınç dayanımının artmasını sağlamaktadır. Çözelti içindeki yüksek sodyum oranı, jel oluşumunu desteklemekte, alüminosilikat jel içinde yapıyı belirlemede sodyum baskın bir rol oynamaktadır (Khale ve Chaudhary 2007).

Aktifleştirici olarak sodyum kullanıldığında, ana ürün olarak üç boyutlu alkali-aluminosilikat-hidrat ( $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ) oluşmaktadır. Bu jel oluşumu, geopolimerlerin dayanım ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemektedir (Ruiz-Santaquiteria ve ark. 2012).

Geopolimerlerin yapısal kararlılıklarının, aktivasyon çözeltisine çözünebilir silisyum ilavesi ile arttığı bilinmektedir. Yüksek derişimlerde silisyum bulunan aktivasyon çözeltileri ile elde edilen numunelerin X-ışını amorf yapıları, reaksiyon mekanizmalarında veya reaksiyon ürünlerindeki temel değişiklikler sonucu oluşmamakta, çok yüksek oranda çözünebilir silisyum ilavesiyle sentezlenen numunelerde bile amorf yapı gözlenmektedir. Aktivasyon çözeltisinde, yüksek derişimlerde silisyum bulunan ve orta sıcaklıklarda ( $\sim 40^\circ\text{C}$ ) sentezlenen numunelerde uzun kür sürelerinin ardından kristal faz gözlenmemiştir. Çözünebilir silisyum ilavesi, uzun sıralı yapısal dizilişi azaltsa da reaksiyon mekanizmasını temel olarak değiştirmemektedir. Bununla birlikte aluminosilikat jel oluşumu sadece çözünebilir silisyum ilavesine değil aynı zamanda çözeltinin alkalitesine bağlı olan polimerizasyon derecesine de bağlıdır. Çözünebilen silisyum bileşenlerinin polimerizasyon derecesi arttığında, daha amorf jel oluşumu fark edilir biçimde artmaktadır (Duxon ve ark. 2007b).

$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranındaki değişiklik, alkali silikat çözeltisi içindeki çözünmüş birimlerin polimerizasyon derecesini önemli ölçüde değiştirmektedir. Diğer yandan, bazı uçucu kül sistemleri için yüksek mekanik özelliklere ve küçük gözeneklere sahip geopolimer oluşturmak üzere aktivasyon çözeltisi içinde yüksek derişimlerde silisyuma ihtiyaç duyulduğu bilinmektedir (Duxon ve ark. 2007b).

Sabit  $\text{Na}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$  oranına sahip aktivasyon çözeltisinde çözünebilir silisyum derecesi arttıkça pH azalmasına ve çözelti viskozitesinin artmasına bağlı olarak hammaddenin reaksiyon derecesi azalmaktadır. Bu durum yüksek silisyum içeriklerinde reaksiyona girmemiş parçacıkların lokasyonu ile ilgili olarak mekanik performansın azalmasına neden olabilir. Hatta özellikle uçucu kül ile üretilen veya yüksek oranda çözünmemiş mineral fazlar içeren numuneler, iyi mekanik özellikler için yetersiz ölçüde bağlayıcı içermektedir. Buna rağmen

reaksiyona girmemiş parçacıklar da mikroagrega gibi davranabilir ve bunun sonucunda geopolimer daha iyi bir dayanım gösterebilir.(Duxon ve ark.2007b).

Basınç dayanımı, NaOH derişiminin artmasıyla yüksek derişimlerde silisyum ve alüminyumun çözünmesinden dolayı artmaktadır. OH<sup>-</sup> derişimi yüksek olduğunda uçucu külün çözünmesi hızlanmakta ancak polikondenzasyon engellenmektedir. Alkali derişiminin artması geopolimerlerin basınç dayanımını arttırmakta ancak fazla hidroksit iyonu derişimi erken yaşlarda düşük basınç dayanımına yol açan alüminosilikat jelin çökelek oluşturmaya neden olmaktadır (Somna ve ark. 2011).

Yüksek pH değerlerinde geopolimerik karışım viskoz olarak kalırken, düşük pH değerlerinde karışım daha az viskoz, daha sıvı jel ve işlenebilir bir kıvama sahip olmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007).

### **2.3.2. Alkali katyon etkisi**

Sistemin mikroyapısal gelişimini etkileyen diğer bir faktör de aktivasyon reaksiyonunda yer alan katyon türüdür. Hammaddenin ağ yapısını çözmek ve silikat ve alüminatlardan küçük reaktif birimler sağlamak için reaksiyonun ilk basamağı alkali bileşik ile kontrol edilir (Duxon ve ark. 2007b). Alkali çözeltinin derişimi ve çeşidi hammaddenin içindeki alüminyum ve silisyumun çözünmesini önemli ölçüde etkiler (Rattanasak ve Chindapasirt 2009).

Yüksek alkalitesine bağlı olarak potasyum hidroksitin (KOH) daha fazla çözme kapasitesinin olması beklenirken gerçekte sodyum hidroksit (NaOH), silikat ve alüminat monomerleri daha fazla çözmektedir (Duxon ve ark. 2007b). Sisteme potasyum eklenmesi çatlak oluşumunu azaltırken, sodyum hidroksit ilavesi kalsiyum hidrat oluşumunu engellemektedir (Khale ve Chaudhary 2007).

Reaksiyon kinetiğinde iyon büyüklüğü de belirleyici bir faktördür. Örneğin, potasyumun (K<sup>+</sup>) daha büyük silikat oligomerler oluşturma eğilimi bulunmaktadır. Aynı zamanda geopolimerlerin oluşum sistemlerinde sodyum katyonları (Na<sup>+</sup>) daha fazla zeolitik yapı oluşturma yeteneğine sahiptir. Bu özellik

sodyumun, potasyum katyonlarından daha küçük olmasına ve dolayısıyla jel yapı boyunca daha kolay hareket etmesine bağlı olabilir (Duxon ve ark. 2007b).

Genel olarak  $\text{OH}^-$  iyonu katalizör olarak, iskelet yapısının negatif yükünü dengeleyen alkali metal katyonu ise yapı oluşturma elementi olarak rol oynar (Duxon ve ark. 2007).  $\text{OH}^-$  iyonunun miktarı, hammaddede bulunan  $\text{Si}^{+4}$  ve  $\text{Al}^{+3}$  katyonlarının çözünmesine katkı sağlamaktadır (Khale ve Chaudhary 2007).

Geopolimerlerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde  $\text{Ca}^{+2}$  miktarının ve ortama hangi şekilde eklendiğinin fiziksel özelliklerin belirlenmesinde önemli etkisi vardır. Kalsiyumun etkisinin belirlenmesinde ise aktivasyon çözeltisinin pH'ını değiştirmesi ve dolayısıyla kalsiyum içeren farklı çökeleklerin oluşmasında, aktivasyon çözeltisi içerisindeki çözünmüş silisyumun önemli bir rolü bulunmaktadır. Uçucu küle yüksek derecede bazik aktivasyon çözeltilerinin eklenmesi, küle bulunan kalsiyumun aniden çözünmesine ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  olarak çökmesine yol açar. Bu durum,  $\text{OH}^-$  iyonlarının ortamdaki uzaklaşmasına dolayısıyla çözünme hızını net olarak etkileyen aktivasyon çözeltisinin pH'ının düşmesine neden olur (van Deventer 2007; Lyu ve ark. 2013b).

Birçok F sınıfı uçucu kül, çeşitli şekillerde ve seviyelerde demir içermektedir. Demir camsı fazlarda ağ yapısını oluşturmak veya değiştirmek üzere farklı fazlarda yer alabilmektedir. van Deventer ve arkadaşları tarafından rapor edilen Daux ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada önemli miktarlarda  $\text{Fe}^{+3}$  içeren camsı fazların düşük alkali ortamda çözünme mekanizmaları incelendiğinde Fe'in, Si ve Al'dan çok daha hızlı bir şekilde tekrar çöktüğü gözlenmiştir. Dolayısıyla reaktif Fe içeren herhangi bir uçucu külün geopolimerizasyonu esnasında demir, Ca gibi etki göstermekte ve  $\text{OH}^-$  iyonlarının ortamdaki uzaklaşmasına ve uçucu kül içerisindeki diğer kısımların çözünmesinin yavaşlamasına neden olmaktadır (Duxon ve ark. 2007a).

Uçucu kül içeren geopolimerlerin içerisindeki demirin rolü arseniğin ağ yapısına hapsedilmesi açısından da dikkat çekmektedir. Arseniğin uçucu küllü geopolimerler içinde hapsedilmesi esnasında demir içeren bileşikler ile birleştiği gözlenmiştir (Duxon ve ark. 2007a).

### 2.3.3. Kür koşulları (Sıcaklık-Süre)

Geopolimer üretiminde kür sıcaklığı ve süresi, reaksiyon sonucu oluşan ürünlerin yapıları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır (Duxon ve ark. 2007; Khale ve Chaudhary 2007). Kür sıcaklığının belirli bir düzeye kadar artırılmasının geopolimerik reaksiyonlara katkı sağladığı belirtilmektedir. Sıcaklığın artırılması temel olarak reaktif birimlerin çözünmesini sağlamak, böylece reaksiyonlara katkıda bulunmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007; Fernández Pereira ve ark. 2009).

Erken yaşlarda sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımı da artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda reaksiyon ürünlerinin miktarı fazla olduğundan geopolimerizasyon derecesi yüksektir. Diğer taraftan daha ileri yaşlarda geopolimerizasyon dereceleri neredeyse aynı olduğunda, reaksiyon ürünlerinin kalitesi baskın bir parametre olmaktadır. Düşük sıcaklıkta geliştirilen geopolimerler yavaş oluşmakta ve gözenekliliklerinin düşük olmasına bağlı olarak kaliteleri daha iyi olmaktadır (Rovnanik 2010; Lyu ve ark. 2013b). Kür sıcaklığı olarak 90°C'nin altındaki sıcaklıklarda sentezlenen geopolimerler amorf yapıya, 150-200°C arasında sentezlenenler ise zeolit benzeri kristal yapıya sahiptirler (Ferone ve ark. 2013).

Uzun kür süreleri, yüksek basınç dayanımı ile sonuçlanan polimerizasyon sürecini geliştirmektedir. Basınç dayanımındaki artış 24 saate kadar hızlı, 24 saatten sonra ise daha yavaş olmaktadır. Bununla birlikte, 48 saatten daha uzun süren kür işlemlerinin önemli bir etkisi görülmemektedir (Davidovits 2008; Khale ve Chaudhary 2007).

Yüksek sıcaklıklardaki uzun süreli kür işlemi basınç dayanımını azaltmakta ve geopolimer yapısında kırılmalara neden olmaktadır. Bu tür kür işlemleri dehidratasyon ve jel yapısının daralmasına bağlı olarak aşırı büzülme ile sonuçlanmaktadır. Geopolimer yapısında bulunan kristaller uzun kür sürelerinden etkilenmezler; bu da dayanımdaki farklılıkların yapıdaki amorf fazdan kaynaklandığını göstermektedir (Khale ve Chaudhary 2007; Fernández Pereira ve ark. 2009).

#### 2.3.4. Hammadde

Geopolimer oluşumunda başlangıç malzemesi önemli bir rol oynar. Amorf yapıda silis ve alümina içeren her malzeme, geopolimer üretimi için uygun kaynak olabilir. Geopolimerizasyon için puzolanlar, destekleyici çimento benzeri malzemeler, kimyasallar ve mineral katkıları gibi çok çeşitli kaynaklar kullanılmaktadır. Silisyum açısından zengin uçucu kül, cüruf, pirinç kabuğu külü gibi hammaddeler ve alüminyum açısından zengin olan kaolinit, bentonit gibi killer geopolimerizasyonda öncelikli hammaddelerdir. Doğal malzemeler (kaolinit, stilbit, vb.) ve endüstriyel yan ürünler (uçucu kül, fırın cürufu, vb.) geopolimer üretiminde maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanında endüstriyel yan ürünlerden veya atıklardan yararlanmak, daha “yeşil” bir üretim ve global sürdürülebilir kalkınma gibi çevresel açıdan da fayda sağlamaktadır (Khale ve Chaudhary 2007; He ve ark. 2012).

Geopolimer sentezinde kullanılan hammaddeye bağlı olarak farklı uygulamalar için çeşitli özelliklere sahip malzemeler elde etmek mümkündür. Hammaddeler, geopolimerizasyon reaksiyonlarında ve nihai ürünlerin mikroyapıları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Farklı malzemelerin çözünürlükleri çeşitli Si/Al oranlarında, amorf ve reaktif olmayan kristal fazlarda, alkali çözeltilerde farklılıklar gösterirler. Bu özellikler pratik uygulamalarda önemli olduğu düşünülen kür işleminin süresinde ve mekanik özelliklerde farklılıklara neden olmaktadır (He ve ark. 2012).

Örnek vermek gerekirse, yüksek basınç dayanımı sağlamak üzere reaktivitesi yüksek olan hammaddeler kullanılmalıdır (Khale ve Chaudhary 2007). Yüksek reaktiviteye sahip hammaddeler, daha hızlı çözünme, daha yüksek derecelerde geopolimerizasyon ve daha az reaksiyon süresi sağlamaktadırlar (He ve ark. 2012).

Geopolimerizasyonda kalsinasyon işlemi, malzemenin kristal yapısını amorf yapıya dönüştürmektedir. Amorf yapı ile daha fazla enerji depolanabilir ve aktivitede ve basınç dayanımında artış sağlanabilir (Khale ve Chaudhary 2007; He ve ark. 2012). Aktif fazların üretimi genellikle 600-800°C aralığında

gerçekleşmektedir. Kalsinasyon esnasında CaO içeriği artmaktadır. Yüksek CaO içeriği mikroyapısal poroziteyi azaltır ve amorf Ca-Al-Si jelini oluşturarak geopolimerin dayanımını arttırır (Khale ve Chaudhary 2007).

Hammaddelerin reaktiviteleri aynı zamanda parçacık boyutundan da etkilenmektedirler. Örneğin, ince parçacıklar daha geniş yüzey alanına ve reaktiviteye sahiptirler. Silisyum ve alüminyumun alkali ortamda daha çok açığa çıkmasından dolayı ince parçacıkların kullanımı ile çözelti ile katı parçacıklar arasında daha hızlı bir reaksiyon, dolayısıyla daha yüksek basınç dayanımları sağlanabilir. Uçucu küllerin öğütülmesi geopolimerizasyon için daha uygun olabilir. Kömürlerin yanma sıcaklıklarının yüksek olması da daha ince parçacık boyutunda uçucu küllerin oluşumuna neden olduğundan bu tür bir uçucu kül kullanımıyla üretilen geopolimerlerin mekanik performansı daha iyi olabilmektedir (Diaz ve ark. 2010; He ve ark. 2012; Phoo-ngernkham ve ark. 2014).

Geopolimer ürünlerini etkileyen diğer bir faktör ise aktif olmayan granül dolgu malzemesi gibi davranan reaktif olmayan ve reaksiyona girmemiş fazların miktarı ve özellikleridir (örneğin boyutları, şekilleri). Ancak bazı durumlarda reaktif fazlar tamamen reaksiyona girmeyebilir ve dolgu malzemesi gibi son üründe kalabilirler. Agregalar veya granül dolgular, geopolimerlerin yapılarını kuvvetlendirebilir ve dayanımı arttırabilirler (He ve ark. 2012).

Kaolin ve metakaolin gibi kil içeren geopolimerler en yüksek basınç dayanımlarına sahiptirler. Metakaolin, uçucu küle göre daha çok çözünmektedir (Khale ve Chaudhary 2007). Yüksek performanslı geopolimer uygulamalarında metakaolin kullanılmıştır ancak ısı işlem ile aktive edilmiş kaolin olan metakaolin nispeten pahalı bir hammaddedir. Bu nedenle kullanımı bazı uygulama alanları ile sınırlıdır (Weil ve ark. 2007). Diğer hammaddelere kıyasla düşük reaktiviteye sahip olan kaolin kullanımı ile hammadde ve jel faz arasında etkileşim kurulabilmesi için yeterli süre sağlanmakta ve geopolimerizasyon arttırılabilmektedir. Kaoline, uçucu kül gibi kalsine edilmiş bir malzeme eklendiğinde basınç dayanımında bir artış ve reaksiyon süresinde önemli derecede bir azalma elde edilebilir (Khale ve Chaudhary 2007).

Uçucu kül, önemli bir endüstriyel yan ürün ve atıktır. Uçucu küller genellikle yüksek oranda amorf silis ve alümina içerdiklerinden geopolimerler için uygun bir hammadde kaynağı oluşturmaktadırlar (Duxon ve ark. 2007b; Rattanasak ve Chindaprasirt 2009).

Uçucu küller oldukça büyük oranda değişen büyüklük, morfoloji ve reaktiviteye sahip parçacıklar içermekte, farklı sınıflara ait parçacıklar külün oluştuğu koşullara ve fırında kullanılan hammaddenin bileşimine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedirler. Aynı kaynaktan farklı zamanlarda alınan benzer bileşimlere sahip uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde, önemli oranda değişen dayanımlar gözlenmiştir. Bunun yanında aynı gruptan alınan bazı uçucu kül örneklerinde, erken dayanımların son dayanım ile uyuşmadığı görülmüştür (van Deventer ve ark. 2007).

Uçucu kül içerisindeki parçacıklar genellikle küresel olup homojen olmayan bir yapıya sahiptirler ve kristal fazlar kadar camsı fazları içerirler. Homojen bir yapıya sahip olmamaları ve farklı boyutlarda parçacık içermelerinden dolayı geopolimerizasyonda uçucu kül ile çalışırken daha fazla dikkat gerekmektedir (Duxon ve ark. 2007b).

Uçucu kül kullanılarak elde edilen geopolimerler daha iyi basınç dayanımına sahip olup geleneksel portland çimentosu ile üretilen betona göre kimyasal etkilere, yüksek sıcaklıklara ve donmaya karşı daha iyi direnç göstermektedirler (Ohno ve Li 2014).

## **2.4. Geopolimerlerin Uygulama Alanları**

Geopolimerler, mükemmel mekanik özellikleri ve dayanımları ile oldukça ilgi çekmektedirler. Metakaolin, uçucu kül gibi malzemelerin alkali aktivasyonu ile elde edilen geopolimerler, çimentolar, seramikler ve zeolitlerden farklı özelliklere sahip olan karışık bir yapıya sahip malzemelerden oluşan bir grupturlar. Geopolimerler çok hızlı dayanım kazanımı, asit direnci, boyutsal kararlılık, yangın direnci, agregalara ve güçlendirici elemanlara mükemmel

yapışma gibi yararlı ve belirleyici tipik özelliklere sahiptirler (Duxon ve ark. 2007b; Andini ve ark. 2008; Lyu ve ark. 2013b).

Geopolimer teknolojisi, çeşitli özellikleri sayesinde inşaat sektöründen havacılık sektörüne kadar birçok farklı pazarda değer yaratma fırsatı sağlamıştır (Duxon ve ark. 2007a). Amerikan Federal Havacılık Birimi tarafından uçak kabinlerinin iç kısımlarında ve kargo bölümlerinde yangına karşı dayanıklı geopolimerler kullanılarak yangından dolayı gerçekleşen kazaların hepsinin önlenebileceği bildirilmiştir (Davidovits 2008).

İnorganik polimerlerin yeni alanlarından birisi kemik veya yumuşak dokuya bağlanabilen biyoaktif malzeme alanıdır. Geopolimerlerin bu alanda kullanımı iki tür problem oluşturabilmektedir; bileşimlerinden kaynaklanan yüksek derecede bazikliğin neden olduğu hücre zehirlenmesi ve alüminyum içerikleridir. Yüksek baziklik, potasyumlu geopolimerlerde numunelerin 600°C'ye kadar ısıtılması ile giderilebilmektedir. Isıtma ile bazikliğin azaltılmasının yanında porozite de artmakta ve kemik yapısı gibi davranan malzeme oluşmaktadır. Trikalsiyum fosfat veya hidroksiapatit kullanılarak üretilen geopolimer kompozitler canlıların içinde ve organların dışında laboratuvarlarda yapılan testlerde kimyasal kararlılık göstermişler ve kemiksi yapıya biyointegrasyon sağlamışlardır (MacKenzie 2008; Komnitsas 2011).

Karbon nanotüpler gibi birçok karbon türevlerinin geopolimerlerin içine dahil edilmesi yeni hibrid malzemeler için yeni bir potansiyel oluşturmaktadır. Karbon nanotüpler çeşitli elektriksel özelliklere sahiptirler. Deneysel çalışmalar sonucunda potasyumlu geopolimerlere karbon nanotüp ve grafit eklendiğinde elektriksel özelliklerin arttığı gözlenmiştir (MacKenzie 2008).

Geopolimerler ısı kararlılık, yüksek yüzey pürüzsüzlüğü, kusursuz şekil ve sert yüzeyler gibi önemli fiziksel özelliklere sahip olup portland çimentosuyla karşılaştırıldığında oldukça kısa sürede dayanım kazanırlar (Duxon ve ark. 2007a). Geopolimerizasyon sırasında yüksek mertebelerde gerçekleşen polikondenzasyon yüksek basınç dayanımına sahip bir malzeme oluşturur (Khale ve Chaudhary 2007). Kazanılan basınç dayanımı, kullanılan bağlayıcıların türüne

ve miktarına bağlıdır. Fiziksel özelliklerinin yanında geopolimerler kimyasallara karşı da önemli oranda direnç gösterirler (Duxon ve ark. 2007a).

Laboratuvar ve endüstriyel testlerde geopolimerler klora (deniz suyu da dahil), çeşitli asitlere, alkalilere ve sülfata karşı mükemmel dayanıklılık göstermiştir (Duxon ve ark. 2007a). Örnek vermek gerekirse, 12 ila 24 hafta sülfat etkisine maruz kalan geopolimer betonlarda önemli bir olumsuz etki gözlenmemiştir (Khale ve Chaudhary 2007). Bununla beraber deniz suyu, sodyum sülfat çözeltisi ve sülfürik asit çözeltilerinde bekletilen metakaolin temelli geopolimer harçlarının mikroyapılarında ihmal edilebilir düzeyde bir bozunma gözlenmiştir (Khale ve Chaudhary 2007). Bu gibi dayanıklılığın gerektiği durumlarda geopolimerler diğer bağlayıcılara göre önemli teknolojik avantajlar sağlanmaktadır (Duxon ve ark. 2007a).

Geopolimer ısı dayanıklılık özellikleri açısından da iyi bir performans sergiler (Duxon ve ark. 2007a). Khaled ve ark. tarafından rapor edilen, Cheng ve Chin tarafından yapılan bir çalışmada 10 mm kalınlığındaki bir geopolimer panel 35 dakika 1100°C'ta aleve tutulduğunda, panelin arka tarafının sıcaklığının 240-283°C'a ulaştığı gözlenmiştir (Khale ve Chaudhary 2007). Davidovits tarafından ise bir yarış boyunca (600°C'de 2-3 saat) ısıya dayanıklı geopolimer-karbon kompozit malzeme geliştirilmiştir (Davidovits 2008).

Geopolimerizasyon ağır metallerin tutuklanması alanında da gelecek vaad eden bir teknolojidir (Khale ve Chaudhary 2007). Bu malzemeler yapılarında bulunan zeolite benzer faz özelliklerinden dolayı radyoaktif atıkların hapsolması amacıyla kullanılabilir. Özellikle sezyum ve stronsiyum kimyasal olarak kuvvetli bir şekilde bağlanmakta ve matriste etkin bir şekilde hapsolmaktadır (Duxon ve ark. 2007a). Geopolimerler demir, kobalt, kadmiyum, nikel, çinko, kurşun, arsenik gibi metallerin özütlenmesini (liçingini) en aza indirmektedir (Khale ve Chaudhary 2007; Sun ve ark. 2014).

Dünyanın birçok bölgesinde donma-çözünme dayanıklılığından dolayı geopolimerler büyük ilgi görmektedir. Tekrarlayan donma-çözünme testlerinde, malzemenin yapısında çok az bozulma görülmüştür. Klor penetrasyonuna karşı yüksek direnç özelliği ile birleştiğinde bu teknolojinin kullanımı için farklı alanlar

açılmaktadır. Örneğin soğuk bölgelerde geopolimerlerin yol yapımında kullanılmaları çok uygundur zira geleneksel portland çimentosu donma-çözünme döngüsünde ve buzlanmanın önlenmesi amaçlı tuz uygulamalarında daha hızlı bozulma göstermektedir (Duxon ve ark. 2007a).

Geopolimer teknolojisinin en önemli özelliği üretim prosesinin sağlam ve değişkenlik gösterebiliyor olmasıdır. Bir başka ifadeyle, isteğe bağlı olarak uçucu kül kaynaklı ve diğer alüminosilikat hammaddelerden belirlenen uygulamalar için spesifik özelliklere sahip ürünler elde edilebilmektedir. Bu uygulamalar klor penetrasyonuna dayanıklı düşük veya yüksek dayanımlı beton, yangın ve/veya asitlere dayanıklı kaplamalar ve kimya ve nükleer endüstriler için atıkların sağlamlaştırma alanlarında olabilir. Özetlemek gerekirse, teknolojik ve ekonomik açıdan güvenli biçimde aşağıdaki özelliklere sahip malzemeler üretilir:

- Yüksek basınç dayanımı,
- Yüksek aşınma direnci,
- Hızlı sertlik kazanma,
- Yangına karşı dayanıklılık (1000°C'a kadar) ve ısındığında toksik dumanlar açığa çıkarmaması,
- Çeşitli asitlere ve tuzlu çözeltilere karşı yüksek derecede dayanıklılık,
- Alkali-agrega reaksiyonlarına maruz kalmama,
- Düşük büzülme değeri ve düşük ısı iletkenlik,
- Taze ve eski beton yüzeylere, çelik, cam ve seramiklere iyi yapışma,
- Yüksek pH'a rağmen çeliğin korunması ve düşük klor difüzyonu.

Bütün geopolimerler yukarıda belirtilen özelliklerin hepsine aynı anda sahip değildir ancak istenilen özelliklere göre reçeteler ve formüller şekillendirilebilmektedir (Duxon ve ark. 2007a).

Yapı malzemelerinden havacılık alanına kadar pek çok sektörde kullanıma olanağı ve daha çeşitli birçok özelliklerinden dolayı geopolimer teknolojisi ticari olarak da dikkat çekmektedir. Burada bazı uygulamalar, katma

değerli ürün elde etmek üzere ana malzeme olarak kömür külü gerektirirken, bazıları seramik benzeri malzemeler üretmek için daha saf başlangıç malzemesi gerektirebilir. Bütün bu sektörlerde en uygun ve en rekabetçi teknolojinin geopolimer teknolojisi olduğu öne sürülmektedir (Duxon ve ark. 2007a).

Metakaolin veya diğer sentetik yöntemlerle elde edilen alüminosilikat hammadde kaynakları yapıştırıcı, kaplama veya hidroseramik alanları için önemlidir (Duxon ve ark. 2007b). Atık malzemelerden elde edilen geopolimerlerin kullanımı ise dayanıklılık, dayanım, yangına karşı direnç gibi geleneksel malzemelere üstünlük sağlanan yapı sektöründe yoğunlaşmıştır (Duxon ve ark. 2007b). Bir örnek vermek gerekirse uçucu külden elde edilen geopolimer beton, alkali aktivasyonun ardından birkaç saat sonra yüksek basınç dayanımlarına (24 saat sonunda 60-70MPa) sahip olabilmektedirler (Duxon ve ark. 2007b).

Geopolimerlerin yapı endüstrisinde kabul görmeyecek eksiklikleri de mevcuttur. Burada en önemli eksiklik sektörde ürünlerin sertifikalandırılmasıyla ilgilidir. Geopolimerler uçucu kül, cürufklar veya benzer ana malzemelerden elde edildiklerinden, bu hammaddeler kaynaklarına göre değişmektedirler. Geopolimer teknolojisinin gelişimi ve ticarileştirilmesi için farklı engeller ve dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır:

- Geopolimer/inorganik polimer sistemleri için tek bir terminolojide birleşilememesi,
- Çimento sanayisinde yerleşmiş tutumlar (örn. alkali ortamın bütün sistemler için zararlı olduğu ve uçucu kül içeren çimentoların tuz varlığında düşük donma-çözünme dayanımı göstermeleri),
- Düzenli bina standartlarına ve kodlarına bağlılık (geopolimerlerin portland çimentosu içermemesi, bu nedenle standartlara uyumluluk göstermemesi),
- Bu alanda son araştırmalarda dayanıklılık üzerinde nicel (miktar, ölçüm, vb.) verilerin eksikliği,
- İnşaat alanında ve yapı ürünleri endüstrisinde yeni ürünlere karşı tutucu bir anlayışın var olması (Duxon ve ark. 2007a).

Tüm bunlara rağmen geopolimerin yapısal olarak taşıdığı yanmaya karşı direnç, ısı kararlılık, işlenebilirlik ve asit dayanımı gibi özellikler avantajlı pazar potansiyeline sahip olan birçok farklı ürünün gelişmesini sağlamıştır (Duxon ve ark. 2007a).

### 3. GEOPOLİMERLERİN MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELLİKLERİ

Geopolimerlerin mekanik özellikleri, oluşan alkali aluminosilikat hidrat jelin miktarı ve kompozisyonu, matriste oluşan gözeneklerin büyüklüğü gibi etkenlere bağlıdır. Kullanılan hammaddenin yapısı ve kür koşulları da aluminosilikat hidrat jelin bileşimini ve mikroyapıyı etkilemektedir (Ruiz-Santaquiteria ve ark. 2012).

#### 3.1. Basınç Dayanımı

Geopolimerizasyon prosesi süresince amorf yapıdaki reaktif silis ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum çözmek veya aktive etmek için yüksek derecede bazik ortam gerekmektedir. Daha yüksek baziklik, ana malzemenin hızlı ve daha çok çözünmesi ile sonuçlanmakta dolayısıyla reaktif silis ve alüminyum taneleri artmaktadır. Böylece ortamda daha fazla geopolimerik bağlayıcı oluşmakta ve bu da daha fazla geopolimerizasyon anlamına gelmektedir. Bundan dolayı yüksek baziklik nihai ürünün basınç dayanımını ve sertliğini artırmaktadır. Yapılan çalışmalarda alkali derişiminin geopolimerizasyonu etkileyen önemli bir faktör olduğu ve daha yüksek NaOH derişimlerinin daha yüksek basınç dayanımları ile sonuçlandığı belirtilmiştir. Böylece yüksek derişimlerdeki alkali çözelti ile geopolimerlerin mekanik performansı üzerinde pozitif bir etki sağlanmıştır (He ve ark. 2012). Bunun yanında, amorflik derecesindeki artış da yüksek basınç dayanımları ile sonuçlanmaktadır (Zaharaki ve ark. 2010).

Uçucu kül ile yapılan çalışmalarda süre ve sıcaklık artışının geopolimerik malzemelerin mekanik gelişimlerini önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir (Duxon ve ark. 2007b). Burada mekanik özellikleri geliştirmek amacıyla reaktif dolgu malzemeleri veya çeşitli katkıları da kullanılabilir (Khale ve Chaudhary 2007). Basınç dayanımı ayrıca yaşın artması ile de artmaktadır (Davidovits 2008).

### 3.2. Mikroyapı

Farklı alüminosilikat hammaddelerden hazırlanan geopolimerlerin makroskopik özelliklerinin aynı olmasına rağmen mikroyapıları, fiziksel, mekanik, kimyasal ve ısı özellikleri çok farklı olabilmektedir (Duxon ve ark. 2007b). Bir başka deyişle geopolimerler aynı kimyasal kompozisyona ancak farklı mikroyapılara sahiptirler (Khale ve Chaudhary 2007) .

Geopolimerler genellikle ‘X-ışınına amorf’ olarak tanımlanmaktadır (Duxon ve ark. 2007b). Burada  $20^\circ$  ve  $40^\circ$   $2\theta$  arasında yapının büyük çoğunlukla amorf olmasından dolayı X-ışını Kırınım Spektroskopisi (XRD) kullanımı zordur. Kristal olmayan kısımların, X-ışını kırınım spektrumlarında keskin kırınım piklerinden ziyade geniş yaygın bir tümsek görülmektedir (Khale ve Chaudhary 2007b).

#### 3.2.1. Fourier Transform Infrared spektrometresi

Geopolimerik malzemelerin karakterini belirlemek için infrared spektroskopisi (IR) çok uygun bir yöntem olarak kullanılmaktadır. IR spektroskopisinin kullanılma nedeni Si-O-Si ve Al-O-Si temel piklerinin gözlenmesidir. Geopolimerizasyonun ardından Al-Si bağlarının temel karakteristik pikleri, çok az oranda azalmakla birlikte, hala yapıda kalmakta, bu da Al-Si minerallerinin jel fazında tamamen çözünmediğini göstermektedir. Burada yeni kristallerin oluşmamasından dolayı yeni pikler de görülmemektedir (Khale ve Chaudhary 2007).

Geopolimerlerin infrared spektrumları,  $\sim 1000 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlenen pikler, Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren geopolimer matrisinin en büyük parmak izidir. Alüminosilikat yapısındaki Si:Al oranı ile bu bandın frekansı arasında bir ilişki gözlenmiştir. Alüminyum oranı arttıkça pikin frekansı daha düşük dalga boylarına kaymaktadır.

Al-O esnemesinin büyük ölçüde ortam pH'ından etkilendiği düşünülmektedir (Phair ve van Deventer 2002; van Jaarsveld ve ark. 2002).

Spektrumlar alüminosilikatlarda bulunan 950-1250  $\text{cm}^{-1}$  dalga boylarında görülen Si-O-Si veya Si-O-Al gerilme titreşimlerini içermektedir. Esneme biçimleri iskelet yapıda bulunan Si:Al bileşimine duyarlı olup, tetrahedral alüminyum atomlarının artmasıyla daha düşük frekanslara kayabilmektedir. Örneğin düşük dalga boyuna doğru kayma,  $\text{SiO}_4$ 'ün  $\text{AlO}_4$  ile kısmi yer değiştirmesinden ve dolayısıyla Si-O bağının yerel çevresinin değişmesinden kaynaklanabilmektedir (Davidovits 2008; Zaharaki ve ark. 2010).

1210, 1100 ve 980  $\text{cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlenen pikler Si-O gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır (Sabah ve Çelik 2002).  $\sim 870 \text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen pikler Si-OH gerilme titreşimlerinden, 720-650  $\text{cm}^{-1}$  aralığındaki pikler ise dörtyüzlü  $\text{AlO}_4$  ve  $\text{SiO}_4$  (halkalı) gruplarından kaynaklanmaktadır (Palomo ve ark. 1999).  $\sim 770 - 780 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlenen Al-O-Si simetrik gerilme titreşimleri,  $\sim 780-790 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlenen kuvarz piki ile üst üste çakışabilir (Fernández-Jimenez ve Palomo 2005; van der Merwe ve ark. 2014).  $\sim 675-685 \text{ cm}^{-1}$  aralığında ise Al-O-Al açılı bükülme titreşimleri (eğilme titreşimleri) gözlenmektedir (van der Merwe ve ark., 2014).  $\sim 580 \text{ cm}^{-1}$ 'de gözlenen pikler mullit kristallerinde bulunan Al-O gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır (Fernández-Jimenez ve Palomo 2005; van der Merwe ve ark. 2014). Bunlara ek olarak  $\sim 520-545 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Si-O düzlem dışı açılı bükülme titreşimleri görülmektedir (Zaharaki ve ark. 2010). Geopolimer matrislerindeki  $\sim 450-465 \text{ cm}^{-1}$  aralığında gözlenen pikler Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerini göstermektedir (Zaharaki ve ark. 2010; Phair ve van Deventer 2002; van Jaarsveld ve ark. 2002).

Atmosferik karbonatlaşma 1410-1570  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde gözlenmekte olup matriste bulunan sodyumun fazlası yüzeye taşınmakta ve karbondioksit ile reaksiyona girmektedir. İnorganik polimerlerde gözlenen 1627  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyundaki pik H-O-H açılı bükülme titreşimlerinden kaynaklanıp alüminosilikat yapılar için tipiktir. 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde gözlenen -OH bağının gerilme titreşimleri zayıf  $\text{H}_2\text{O}$  moleküllerinin yüzeyde absorplanması veya inorganik

polimer jeline bağlanmasından kaynaklanmakta olup, –OH bağının kesin pozisyonu, bağın kuvvetine bağlıdır (Zaharaki ve ark. 2010). 2953–2853  $\text{cm}^{-1}$  aralığında görülen pikler ise C-H alifatik gerilme titreşimleridir (Gündüz 1999). 2956  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda  $\text{CH}_3$  asimetrik gerilme titreşimlerinden, 2927-2930  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda  $\text{CH}_2$  asimetrik gerilme titreşimlerinden ve 2872  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda  $\text{CH}_2$  simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanan pikler gözlenmektedir (Tursun ve ark. 2013).

### 3.2.2. X-ışını kırınım spektrometre

X-Işını kırınım spektrometre (XRD) örneklerinin en önemli özelliği merkezi yaklaşık 27-29° 2 $\theta$ 'da olup 18-36° 2 $\theta$ 'da bulunan 'özelliksiz/niteliksiz' tümsektir (Duxon ve ark. 2007b; He ve ark. 2012). Burada gözlenen tümseklerin genişliği, geopolimerizasyon derecesinin büyüklüğünü ve oluşan geopolimer bağlayıcının saflığını belirtebilmektedir (He ve ark. 2012).

Spektrumlarda hammaddeler içindeki amorf bileşenlerden kaynaklanan, uçucu kül yapısındaki Al-Si matrisi gibi, geniş tümseklerin yanında kristal fazlardan kaynaklanan piklerin şiddetlerinde az miktarda bir azalma gözlenebilir (Font ve ark. 2010). Amorf yapının baskın olduğu bir çok malzemenin X ışını kırınım difraktogramı, geopolimerler ile benzerdir (Duxon ve ark. 2007b).

Hammaddelerde bulunan bütün kristal fazlara ait pikler, geopolimerlerin yapılarında da gözlenmektedir. Piklerin varlığı kristal fazların geopolimerik reaksiyonlarda yer almadığını ve bağlayıcı içerisinde aktif olmayan dolgu malzemeleri olarak bulunduğunu göstermektedir (He ve ark. 2012). Bu pikler uçucu külde kristal kısımlardan kaynaklanan quartz, mullit ve hematite ait olabilir. 20-30° 2 $\theta$  arasındaki geniş pikler uçucu külün camsı kısmından, 6-10° ve 16° 2 $\theta$  bölgesindeki pikler ise alüminosilikat jelden kaynaklanmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007). Xu ve van Deventer (2000) tarafından yapılan bir çalışmada da XRD difraktogramları incelendiğinde kullanılan hammaddelerin içerisindeki kristal fazların yapıda kaldığı ancak şiddetlerinde bir miktar azalma olduğu ve yapıda yeni ana kristal faz oluşmadığı görülmüştür (Xu ve van Deventer 2000).

Kristal fazların yapıda kalmasının nedeni amorf fazlara göre daha zor çözünmesidir. Amorf fazlar çözünerek geopolimerizasyonun ilk basamağını oluştururlar. Kristal fazlar ise uçucu külün aktivasyonunun ardından ürün içinde kalmaya devam eder (Diaz ve ark. 2010; Font ve ark. 2010).

### **3.2.3. Taramalı elektron mikroskobu**

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizlerinde gözlenen boşluksuz, sürekli ve jelimsi alanlar saf geopolimer bağlayıcının oluştuğunu göstermektedir (He ve ark. 2012). Metakaolin temelli geopolimerlerin mikroyapıları neredeyse bütün bir jel fazından oluşurken, uçucu küllü geopolimerlerin mikroyapıları jel ile bağlanmış kül kompoziti olarak tanımlanabilir (Duxon ve ark. 2007b).

Mikroyapısal analizler uçucu kül içindeki reaksiyona girmemiş fazın sadece kristal safsızlıklar olmadığını, aynı zamanda hem kimyasal bileşimlerine bağlı olarak alkali ortamda çözünmeyen hem de engellenmiş kütle transferine bağlı olarak reaksiyona girmemiş camsı fazlar olduğunu göstermektedir (Duxon ve ark. 2007b).

Taramalı Elektron Mikroskobu ile yapılan analizlerde numunelerde mikroçatlaklar gözlenebilmektedir. Burada mikroçatlaklar, analizlerden önce numunelere uygulanan basınç dayanımı testlerinde yüklemelerden ve kür işleminde suyun buharlaşması esnasında büzülmeden kaynaklanabilmektedir (He ve ark. 2012).

Geopolimer numunelerinin bazılarında kırılan yüzeylerde büyük ve yarı küresel boşluklar gözlenmiştir. Bu boşluklar geopolimer oluşumu için hammaddelerin karıştırılması veya hazırlanan karışımın kalıplara dökülmesi esnasında içeride kalan hava kabarcıklarından veya suyun buharlaşmasının ardından oluştuğu düşünülmektedir (He ve ark. 2012).

Bazı geopolimerlerde iğne şeklinde parçacıklar veya kristaller oluşabilmekte, iğne şeklindeki parçacıkların, basınç dayanımı testlerinin ardından kırılmış uçucu kül parçacıklarının etrafında oluştuğu düşünülmektedir (He ve ark.

2012). İğne şeklindeki parçacıklar incelendiğinde geopolimeri oluşturan Na, Al, Si, O gibi temel elementlere ek olarak Ca ve Fe elementleri de gözlenmiştir. İğne şeklindeki parçacıkların dağınık ve gözenekli yapılarından dolayı elektronlar matrise de temas edebilmekte bu da elementlerin iğne şeklindeki parçacıklardan mı yoksa matristen mi kaynaklandığının anlaşılmasını zorlaştırmaktadır. Uçucu külün karmaşık kimyasal yapısından dolayı bu yeni oluşan iğne şeklindeki parçacıklar kesin olarak tanımlanamayıp  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  veya demir oksitler de olabilmektedir (He ve ark. 2012).

Prizma şeklinde oluşan parçacıklar ise geopolimer olmayıp  $\text{Na}_2\text{O}$  veya  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  mikrokristalleridir. Alkalitenin yüksek olmasına bağlı olarak kür işlemi esnasında suyun buharlaşmasının ardından reaksiyona girmemiş NaOH çökelek oluşturabilmekte, diğer bir taraftan çözünmüş olan NaOH ise reaksiyona girerek  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  meydana getirebilmektedir (He ve ark. 2012).

#### 4.UÇUCU KÜL

Türkiye’de elektrik enerjisi, büyük oranda kömüre dayalı termik santrallerden ve hidroelektrik santrallerinden elde edilmektedir. Son yıllarda bunlara üçüncü olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Kömür yakılan termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektrofiltreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutundaki kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan mikron boyutundaki bu küllere “uçucu kül” adı verilmektedir (Aruntaş 2006).

Uçucu kül, koyu gri renkte, çok ufak taneli bir malzemedir. Renginin koyuluğu açıklığı, elde edildiği kömüre ve yanış özelliğine bağlıdır. Yanmanın tam olmadığı durumda oluşan uçucu küle siyah renk veren içindeki yanmamış karbondur. İyi yanma sonucu oluşan uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir (Güler ve ark. 2005; Türker ve ark. 2009).

Cüruflardan farklı olarak bu atıkların partikül büyüklükleri 1 – 200 µm arasındadır. Toz kömürün yakılması sırasında (yaklaşık 1200°C’de) baca gazları ile sürüklenen ve hızlı bir biçimde soğurken elektrofiltreler yardımıyla bacalarda tutulan ve genellikle boyutları 100 µm’den daha küçük uçucu kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır (Görhan ve ark. 2009) .

Termik santrallerde kömürün kullanılması ile birlikte 1920 yıllarından itibaren milyonlarca ton kül ve diğer yan ürünler üretilmiştir. Günümüzde dünya çapında yılda 600 milyon ton kül üretilmekte olup bu külün %75-80’nini uçucu kül oluşturmaktadır. Termik santraller ve fabrikalardan açığa çıkan uçucu kül miktarı gün geçtikçe artmakta ve çevresel açıdan ciddi problemler oluşturmaktadır (Ahmaruzzaman 2010).

Termik santralin 1 kWh’lik enerji üretiminde yaklaşık 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW’lık bir santralden yılda yaklaşık 650.000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dolayısıyla bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlar yaratabilmektedir. Bu

malzemenin çok az bir kısmı çimento ve diğer yapı malzemelerinin üretiminde değerlendirilebilmektedir (Görhan ve ark. 2009). Uçucu külün kullanıldığı diğer alanlar beton ve asfalt yollar, yol temel tabakaları (dolgu malzemesi olarak), kireç-kumtaşı blokları, endüstriyel seramik ve refrakterler, katı atıkların stabilizasyonu ve bitki yetiştirilmesi olarak kullanımları sayılabilir (Türker ve ark. 2009).

Kimyasal ve faz bileşimleri kömürlerin mineral içeriklerine ve tesisin yakma sistemlerine bağlı olup yanma sistemlerindeki ve kullanılan kömürlerin kimyasal bileşimlerindeki değişiklikler, uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerinin de değişmesine yol açmaktadır. Yanma işleminin ardından uçucu küllerin soğutulma hızı, amorf ve kristal fazların miktarlarını etkilemektedir. Yavaş soğutma işlemi daha fazla kristal faz oluşumuna neden olmakta, bu değişiklikler geopolimerlerin özelliklerini de etkilemektedir (Swanepoel ve Strydom 2002; Diaz ve ark. 2010)

Uçucu külün fiziksel, kimyasal, minerolojik ve puzolanik özelliklerinin en belirgin ortak yanı, bunların yöreden yöreye, hatta aynı yörede dahi değişkenlik göstermeleridir. Bu değişkenlik;

- Uçucu külün kaynağının oluşturan kömürün türü ve değişkenliğine,
- Kömürün yakılmadan önceki öğütülme (pulvarizasyon) derecesine,
- Kazan türüne,
- Yakma sıcaklığı ve diğer işletme parametrelerine,
- Kül toplama ve uzaklaştırma sistemlerinin özellikleri ve işleyişine,
- Çevre korunması amacıyla kömüre ilave edilen katkı maddeleri gibi faktörlerden ve faktörlerin de zamana göre değişebilmelerinden kaynaklanan özelliklere bağlıdır (Güler ve ark., 2005).

Uçucu küllerler, kimyasal kompozisyonlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO

yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde  $\text{CaO} > \%10$  olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (Türker ve ark. 2009; Görhan ve ark., 2009).

Uçucu küller, yapısındaki kireç ve  $\text{SO}_3$  miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır. Bunlar;

- a) Esas yapısı siliko aluminatlardan meydana gelen,  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (S+A+F) toplamı % 70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı uçucu küller,
- b) Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50 ile % 70 arasında olan ve kireç ile silis miktarı yüksek olan siliko kalsik uçucu küller,
- c) Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla  $\text{SO}_3$  ve  $\text{CaO}$  ihtiva eden sülfü kalsik uçucu küllerdir (Aruntaş 2006).

Uçucu küller içi boşluklu ve boşluksuz, camsal kürecikler süngerimsi mineral parçacıklar ve yanmamış taneciklerden oluşurlar (Güler ve ark. 2005). Uçucu küllerin tanecik morfolojisi (şekli) ve büyüklük dağılımında, kömürün kaynağı ve homojenliği, pulverizasyon durumu, yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın homojenliği ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır (Türker ve ark. 2009). Uçucu küllerde incelik öncelikle kazana verilen kömürün öğütülme derecesine sonra küllerin mümkün olabildiğince bacadan kaçmasına mani olunarak tutulmasına bağlıdır. Bacadan kaçan kısım azaldıkça incelik artmaktadır (Güler ve ark. 2005).

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Uçucu küllerin matrisi esas olarak alüminosilikatlardan ve bunlarla birlikte bulunabilen Fe, Mg, Na, K, Ca, Ti ve nadir toprak elementlerinden oluşur. Uçucu olan veya uçucu oksitleri oluşturan As, Cd, Ga, Mo, Pb, Se ve Zn gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezler. Bu elementler derişimleri tane boyutu ile ters orantılı olarak uçucu

küllerin yüzeylerinde toplanırlar . Uçucu küldeki temel oksitlerden  $\text{SiO}_2$  % 25-60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  %10-30,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  %1-15 ve  $\text{CaO}$ , %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini belirlemektedir (Türker ve ark. 2009; Güler ve ark. 2005).

Uçucu küllerde önemli olan kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya  $\text{CO}_2$  kaybını da içine almaktadır. Uçucu küllerde kızdırma kaybı, %1.0-10 arasında değişmektedir (Türker ve ark. 2009).

Uçucu külde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere, alkali ortamda çözünen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halinde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristaller halinde bulunurlar (Türker ve ark. 2009).

Puzolanlar, kendileri hidrolik bağlayıcı olmamalarına karşın ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay malzemelerdir (Güler ve ark. 2009). Uçucu kül, kireç ve suyun bir arada bulunduğu durumda reaktiftir. Bu reaktivlik büyük oranda uçucu külün camsı yapısına dayanmaktadır. Uçucu kül içerisindeki camsı (amorf) yapının % 50-90 arasında olduğu belirtilmektedir (Görhan ve ark. 2009).

Genellikle, düşük  $\text{CaO}$  içeren küller başta camsı faz ve minör olarak da kuvars ( $\text{SiO}_2$ ), mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ ), manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) içermekte; yüksek  $\text{CaO}$ 'li uçucu küller kuvars, hematit, anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ), serbest kireç,  $\text{C}_3\text{A}$  ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ),  $\text{CS}$  ( $\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_2\text{S}$  ( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ), gehlenit ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ), mellilit ( $\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Al})(\text{AlSi})_2\text{O}_7$ ), merwinit ( $\text{Ca}_3(\text{Mg})(\text{SiO}_4)_2$ ), gibi mineraller ve camsı fazlar içermektedir. Bu bileşenlerin yanı sıra yüksek kireçli küllerde kalsit, portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), trisülfoalüminat hidrat

( $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) ve mullit de bulunabilmektedir. Her iki külde de, alkali feldispatlara rastlanmaktadır (Türker ve ark. 2009).

Düşük kireçli uçucu küllerdeki ana aktif bileşen silis ve alüminadan oluşan amorf fazdır. Bu tür uçucu küller rutubetli ortamda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek bağlayıcı özelliklere sahip bileşenler meydana getirebilirler. Diğer bir deyişle, düşük kireçli uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise puzolanik özellik gösterirken, içerdikleri serbest kireç, anhidrit,  $\text{C}_3\text{A}$ , amorf silis ve amorf alümina v.b nedeniyle de kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler. Uçucu küllerin çoğu, özellikle F sınıfı uçucu küller, oksijen ile bağ oluşturan tetrahedral silikatlarla yüksek derecede polimerizasyon oluşturmalarına rağmen oda sıcaklığında aktiviteleri çok yavaştır. Uçucu külde inceliğin yüksek, karbon miktarının da az olması puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır (Görhan ve ark. 2009).

Uçucu külün mineralojik bileşimi (camsı fazın durumu, kristal yapıları), külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumu uçucu külün reaktivitesinde etkin olmaktadır. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı,  $\text{SiO}_2$  açısından zengin, oldukça polimerize silissi veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silissi veya alüminosilikat camsı fazı, düşük kireçli külün reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, küle puzolanik özellik kazandırmaktadır (Türker ve ark. 2009).

Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanı sıra aktif kristalize fazlardır ( serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi). Burada, saf silis camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Bu faz bir bakıma cüruftaki yapıya da benzemekte %20'nin üzerinde CaO içeren küllerde kalsiyum alüminat camsı fazı  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  bileşiminde olmaktadır. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır (Türker ve ark. 2009).

Uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri incelendiğinde, inşaat sektöründe özellikle yol yapımında rahatlıkla kullanılabileceği ve dolayısıyla bir yandan malzeme ve enerji üretiminde ekonomi

sağlanırken diğ er taraftan termik santrallerde büyük mertebelerde atık madde olarak oluşan bu malzemenin uzaklaştırılması sorununa çözüm getireceği ve  evre kirliliğinin önlenmesi ile ekolojik dengenin korunacağı mümkün g r lmektedir (Aruntaş 2006; Güler ve ark. 2005).

Dünyada uçucu küllerin yaklaşık olarak %30-40'ı kullanılmakta, ortaya çıkan uçucu küllerin %20'si beton üretimi ve baraj duvarları köprü ayakları, maden ve diğ er yapıların dolgu enjeksiyonlarında ve diğ er pek çok inşaat yapılarında, tarımda çatı bahçesi ve ağaçlandırma çalışmalarında, agrega olarak briket yapımında, asfalt içinde dolgu malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Geri kalan kısmı ise atık gömme sahalarına veya g letlere boşaltılmaktadır (Güler ve ark. 2005; Fern ndez-Jimenez ve ark. 2006; Al-Degs ve ark. 2014).

## 5. KONU İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ranjbar ve arkadaşları (2014a) tarafından yapılan bir çalışmada geopolimer eldesi için hurma yağının yakılması sonucunda elde edilen kül ve F sınıfı uçucu kül karıştırılarak hammadde kaynağı olarak kullanılmıştır. Aktifleştirici çözelti, sodyum silikat ve 16M derişiminde sodyum hidroksitin karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Geopolimer harcına kum eklenerek 65°C'ta 24 saat kür edilmiştir. Geopolimer numuneleri 800°C ve 1000°C'ta 2 saat tutulmuştur. Numunelerin 7 günlük basınç dayanımları ölçülmüş ve mikroyapıları incelenmiştir. XRD analizleri sonucunda yapıda quartz, mullit ve götit olduğu görülmüştür. FESEM analizlerinde ise yapıda çatlaklar, küçük gözenekler ve büyük boşluklar gözlenmiştir.

Ranjbar ve arkadaşları (2014b) tarafından yapılan diğer çalışmada, aynı şekilde elde edilen numunelerin 3, 7, 14, 21, 28 ve 56 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. XRD, FESEM ve FTIR yöntemleri ile mikroyapıları incelenmiştir. FTIR analizlerinde yaklaşık 2300, 2110, 1450, 990, 845, 670 ve 445  $\text{cm}^{-1}$  dalga boylarında pikler gözlenmiştir. Basınç dayanımı testlerinde 28 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımlarının 3 ve 7 günlük numunelere göre %70 ve %98 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.

Ryu ve arkadaşları (2013), 3 farklı derişimde sodyum hidroksitin geopolimerlerin basınç dayanımı ve mikroyapılarına etkilerini araştırmışlardır. F sınıfı uçucu külü sodyum silikat ve 6, 9 ve 12M derişimlerinde sodyum hidroksit ile aktifleştirmişlerdir. Numuneler 60°C sıcaklıkta 24 saat kür edilmiştir. 1, 3, 7, 14, 28, 56 ve 91 gün yaşlandırılan numunelere basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Geopolimerlerin mikroyapıları ise SEM, EDS, XRD, FT-IR teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Sodyum hidroksit derişiminin artmasıyla basınç dayanımının arttığı görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı 12M derişiminde NaOH ile aktifleştirilmiş 91 gün yaşlandırılmış numune için 47 MPa olarak bulunmuştur. Numunelerin mikroyapılarının araştırılması amacıyla 28 gün yaşlandırılan numuneler kullanılmıştır. SEM ve EDS analizlerinde yapıda kalan uçucu küllerin küresel şekillerini korudukları ve yapının çoğunlukla Si ve Al'dan

oluştugu gözlenmiştir. FTIR spektroskopisi sonucunda temel Si-O ve Al-O reaksiyon bölgeleri gözlenmiştir ve Al-O bağlarının Si-O bağlarından daha uzun olduğu görülmüştür. XRD analizinde ise quartz ve mullit kristalleri gözlenmiştir.

Hanjitsuwan ve arkadaşları (2014) tarafından yapılan bir çalışmada sodyum hidroksit derişiminin priz süresi, basınç dayanımı ve elektriksel özellikler üzerine etkileri araştırılmıştır. 8, 10, 12, 15 ve 18 molar olmak üzere 5 farklı derişimde sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sıvı/kül oranı 0,4, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 0,67 ve kür sıcaklığı 40°C olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda sodyum hidroksit derişiminin, fizksel ve elektriksel özellikleri büyük ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Sodyum hidroksit derişiminin artmasıyla priz süresi ve basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Aynı zamanda hidroksit derişimi arttıkça dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri de artmıştır.

Oh ve arkadaşları (2014), içerikleri ve fiziksel özellikleri farklı olan iki uçucu kül kullanarak alkali-aktifleştirilmiş reaksiyon ürünlerinin çözünme özelliklerini incelemişlerdir. 5M NaOH ve sodyum silikat ile aktifleştirilen numuneler 60°C'ta kür edilmiştir. Analizler sonucunda element içeriği, amorf faz içeriği ve partikül boyutunun basınç dayanımında büyük değişikliklere neden olduğu bulunmuştur. Şabazit-Na ve alüminyumca zengin şabazit-Na temel kristal fazlar olarak bulunmuştur. <sup>29</sup>Si MAS NMR analizi sonucunda 108 ppm Q4(0Al) pikinin quartz olmadığı, Si atomlarının geopolimerizasyonda aktif olarak yer aldığı görülmüştür. <sup>27</sup>Al MAS NMR spektrumunda ise Al(V) ve Al(VI) alüminyum atomlarının, Al(IV) atomlarına dönüştüğü gözlenmiştir.

Jun ve Oh (2014) tarafından yapılan bir çalışmada ise 6 farklı uçucu kül, 5M derişiminde sodyum hidroksit ile aktifleştirilmiş ve 60°C'ta 24 saat kür edilmiştir. Numuneler 7 ve 28 gün yaşlandırılmış ve basınç dayanımları ölçülmüştür. 28 gün yaşlandırılmış numunelerin XRD ve SEM/EDS analizleri yapılmıştır. En yüksek basınç dayanımı 28 gün yaşlandırılmış numune için 9,93MPa olarak bulunmuştur. XRD analizleri sonucunda amorf yapı ile birlikte quartz, mullit ve hematit kristalleri görülmüştür. SEM analizleri sonucunda ise yapıların morfolojik olarak homojen olmadığı, reaksiyona girmemiş uçucu küller ve fark edilir gözenekler gözlenmiştir.

Sun ve Wu (2013) tarafından yapılan bir çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer harçlarının kimyasallara karşı ve donma-çözünmeye karşı dirençleri araştırılmıştır. Uçucu kül, metakaolin, sodyum hidroksit ve silis dumanı ile farklı oranlarda karıştırılmıştır. Geopolimer harçları havada 28 gün bekletildikten sonra 7 gün boyunca suda bekletilmiştir. Bir grup numunenin basınç dayanımları ölçülmüştür. Bir grup %5'lik Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine, bir grup %3'lük H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine ve bir grup ise saf suya daldırılarak 24 hafta bekletilmiştir. Numunelerin bir kısmına ise donma-çözünme testi uygulanmış ve geleneksel portland çimentosu ile hazırlanan beton numuneleri ile kıyaslanmıştır. Uçucu kül ile hazırlanan numunelerde, %5'lik Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletildikten sonra herhangi bir yıpranma görülmemiştir. %3'lük H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletildikten sonra ise numunelerde yıpranma görülmüştür. Donma-çözünme testi sonucunda ise geleneksel portland çimentosu ile hazırlanan beton numunelerinin basınç dayanımlarında azalma gözlenirken uçucu küllü numunelerde basınç dayanımı kaybı olmamıştır.

Fang ve Kayali (2013), 40g Ca(OH)<sub>2</sub>, 9,6g Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 200g uçucu kül ve su kullanarak geopolimer hamuru elde etmişler ve 105°C sıcaklıkta 24 saat kür etmişlerdir. Kür işleminin ardından bütün numuneler 1050°C'lık fırında 48 saat bekletilmiştir. Numunelerin morfoloji ve minerolojileri SEM ve XRD teknikleri ile araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda geopolimer eldesinde kullanılan suyun bir kısmının geopolimer ürünleri ile birleştiği gözlenmiştir. Eklenen suyun yaklaşık %10,74'ü buharlaşmadan yapıda kalmıştır. SEM analizleri sonucunda yapıda hegzagonal plakalar görülmüştür. XRD analizinde ise albit ve labradorit gözlenmiştir.

Ma ve arkadaşları (2013) tarafından yapılan bir çalışmada uçucu kül, farklı oranlarda sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilerek geopolimer hamuru elde edilerek 40°C'ta 7 ve 28 gün kür edilmiştir. Geopolimerlerin gözenek yapıları ve su geçirgenlikleri araştırılarak portland çimentosundan elde edilen hamur ile karşılaştırılmıştır. Yüksek oranda silisyum içeren alkali çözelti aktifleştirilmiş uçucu küllerin gözenek yapılarının çimento kullanılarak elde edilen hamurdan farklı olduğu görülmüştür. Geopolimerlerin yapılarında büyük gözenekler gözlenmezken bazı büyük boşluklar görülmüştür.

Silisyum oranı yüksek olan numunelerde toplam gözeneklilik azalmıştır. 28 gün yaşlandırılmış geopolimerlerin su geçirgenliklerinin, çimento hamurundan daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Rickard ve arkadaşları (2012) 5 farklı uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak geopolimer hamuru elde etmişlerdir. Geopolimer hamurları 3 farklı Si:Al oranlarında hazırlanmıştır ve 70°C'ta 24 saat kür edilmişlerdir. Elde edilen numunelerin termo-fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikleri araştırılmıştır. Geopolimerlerin fiziksel özelliklerinin uçucu kül içeriği ve Si:Al oranı ile büyük ölçüde değişiklik gösterdiği bulunmuştur. Numunelerin basınç dayanımları en yüksek 143 MPa ve en düşük 6 MPa bulunmuştur. Si:Al oranı yüksek olan uçucu kül ile elde edilen geopolimerlerin basınç dayanımlarının yüksek olduğu ve 1000°C'a kadar boyutlarının değişmediği gözlenirken, Si:Al oranı düşük olan uçucu kül ile elde edilen geopolimerlerin basınç dayanımlarının düşük olduğu ve yüksek sıcaklıklarda boyutlarının sabit olmadığı görülmüştür.

Criado ve arkadaşları (2012), uçucu külü %15 oranında sodyum silikat ve %85 oranında sodyum hidroksit içeren çözelti ile aktifleştirmişlerdir. Kür işlemini 85°C'de 12 saat, 7 ve 30 gün sürelerde ve nem içerikleri %90 ve %40 olan iki farklı koşulda gerçekleştirmişlerdir. Nem içeriği düşük olan ortamda kür edilen numunelerin basınç dayanımlarının daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu numunelerin yapısında su kaybı ve alkali bikarbonatların oluşumu görülmüştür.

Vargas ve arkadaşları (2011) tarafından yapılan bir çalışmada uçucu kül, sodyum hidroksit ve quartz kumu kullanılarak farklı Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> oranlarına sahip geopolimer hamuru ve harçları hazırlanmıştır. 50, 65 ve 80°C'ta 24 saat kür edilerek 1 gün boyunca labotatuvar ortamında bekletilmiştir. Hazırlanan hamurların mikroyapıları araştırılmış ve harçların ise basınç dayanımları ölçülmüştür. En yüksek basınç dayanımı 180 gün yaşlandırılmış numuneler için 21,28 MPa bulunmuştur. SEM/EDS ve XRD analizleri sonucunda Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> oranının mekanik ve morfolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir.

Somna ve arkadaşları (2011) tarafından yapılan bir çalışmada öğütülmüş uçucu kül ve 4,5 ile 16,5M arasında değişen derişimlerde sodyum hidroksit

kullanılarak geopolimer hamurları hazırlanmıştır. 7, 14, 28, 42 ve 60 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları ölçülmüştür. SEM, EDX, XRD ve FTIR analizleri ile numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Öğütülmüş uçucu kül kullanılarak hazırlanan geopolimer hamurlarının basınç dayanımlarının, orijinal uçucu kül kullanılarak hazırlanan numunelerinkinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Sodyum hidroksit derişiminin artmasıyla basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde NaOH derişiminin 12M'dan 14M'a artmasıyla yeni sodyum alüminasilikat kristallerinin oluştuğu görülmüştür. En yüksek basınç dayanımının, 9,5M ve 14M derişiminde NaOH kullanılan numuneler için 23 MPa ve 25 MPa olduğu ve derişimin artmasıyla basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir.

Hajimohammadi ve arkadaşları (2011) geotermal silisli toprak, katı sodyum alüminat ve sodyum silikat çözeltisini farklı oranlarda kullanarak geopolimerler elde etmişlerdir ve silisyumun geopolimerizasyona etkiisini araştırmışlardır. Silisyum oranı yüksek olan numunelerde geopolimer jeline alüminyumun daha yüksek oranlarda katıldığı ve yeni oluşan kristallerin olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda daha homojen bir jel yapısının oluştuğu görülmüştür.

Chindapasirt ve arkadaşları (2011a) iki farklı uçucu kül ile 10M sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikası 5 dakika karıştırarak kalıplara dökmüşler ve 68°C'ta 48 saat kür ederek geopolimer hamuru elde etmişlerdir. Harç elde etmek için kum eklemişler ve aynı koşullarda kür etmişlerdir. 7 günlük geopolimer hamurlarının XRD analizleri sonucunda yapıda quartz, CaO, CaSO<sub>4</sub> ve kalsiyum silikat görülmüştür. SEM analizlerinde ise reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül taneleri ve alüminosilikat kütleleri görülmüştür. Yapıların gözenekli olduğu ve bunun basınç dayanımını negatif yönde etkilediği bulunmuştur. Reaksiyonun derecesi incelendiğinde ise en yüksek oranın %18,6 ile yüksek amorf yapıya sahip numunede olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı ise en yüksek 38,3 MPa olarak bulunmuştur.

Jumrat ve arkadaşları (2011) linyit uçucu külü, 10 M'lık sodyum hidroksit çözeltisi, sodyum silikat, musluk suyu ve kum kullanarak harç hazırlamışlardır. Geopolimer harçlarını kür etmek için mikrodalga enerjisi

kullanmışlar ve dielektrik özelliklerini belirlemişlerdir. Numunelerin yüzey sıcaklığının belirlenmesi amacıyla 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 ve 24 üncü saatlerde infrared termometre ile ölçüm almışlardır. Dielektrik özelliklerin geopolimer harçlarının içeriğinden ve karışım oranından önemli ölçüde etkilendiği gözlenmiştir. Harçların sıcaklıklarının ise karışımdan hemen sonra en yüksek değerde olduğu ve sürenin artması ile sıcaklıkların azaldığı görülmüştür. Geopolimerleşmeden sonraki ilk 3 saat içinde sıcaklık düşüşünün hızlı olduğu, daha sonraları ise yavaşladığı açıklanmıştır. Ölçülen en yüksek sıcaklığın 34°C olduğu, dielektrik azalma faktörünün de yüzey sıcaklığı ile benzer özellikler gösterdiği bildirilmiştir.

Sazama ve arkadaşları (2011) bir grupta metakaolin, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile, diğer grupta ise metakaolin, yüksek fırın cürufu ve potasyum silikat ile geopolimer hazırlamışlardır. Elde edilen numunelere  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Pt}[(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2]$  çözeltileri ile iyon değiştirme yöntemleri uygulanarak redoks heterojen katalizör olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geopolimerlerin geçiş metalleri ile birlikte katalitik reaksiyonlar için aktif merkez oluşturabildiği bulunmuştur. Azot oksitler, katalitik indirgenme ve uçucu hidrokarbonların oksidasyonunda etkinlik göstermişlerdir. Bu sonuçlar heterojen katalitik reaksiyonlar için yeni katalizör türleri sentezlenmesinde büyük bir adım olmuştur.

Williams ve arkadaşı (2010) tarafından yapılan bir çalışmada iki farklı uçucu kül, sodyum silikat, sodyum hidroksit ve su ile aktive edilerek 75°C'ta 24 saat kür edilmiştir. Elde edilen numunelerin SEM ile mikroyapılarını incelemişlerdir. Bazı numunelerde çatlaklar görülürken, bazılarında oldukça yoğun ve sürekli bir yapı görülmüştür. XRD ile yapılan faz analizinde en belirgin quartz, mullit ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  kristallerinin olduğu görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı ise 48 MPa olarak ölçülmüştür.

Wongpa ve arkadaşları (2010) uçucu kül-pirinç kabuğu külü karışımı, 14M'lık sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat kullanarak geopolimer hamuru hazırlamışlar ve oda sıcaklığında 24 saat kür etmişlerdir. 3, 7, 14, 28, 60 ve 90 günlük basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. 28 ve 90 günlük numunelerin su geçirgenliklerini ölçmüşlerdir. En yüksek basınç dayanımı 35 MPa olarak 28

günlük numunede elde edilmiştir. Su geçirgenliği 90 günlük numunede  $6,79.10^{-9}$  m/sn olarak bulunmuştur. Su geçirgenliğinin basınç dayanımına bağlı olduğunu bularak iki özelliği ilişkilendirmişlerdir.

Temuujin ve arkadaşları (2010a) uçucu kül, standart kum, sodyum silikat ve 14M'lık sodyum hidroksit çözeltisi ile harç hazırlamışlardır. Harçlar 70°C'ta 24 saat süre ile kapalı kalıplarda kür edilmiştir. Basınç dayanımı 60 MPa olarak bulunmuştur. SEM analizleri ile agrega ve geopolimerik bağlayıcı arasında homojen bir bağ olduğu görülmüştür. NMR spektrumları Al'un %66'sının tetrahedral olarak, %34'ünün ise oktahedral olarak bağlı olduğunu göstermektedir.

Temuujin ve arkadaşları (2010b) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat veya sodyum alüminat çözeltileri ile geopolimer hazırlayarak kaplama olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Geopolimer hamurları yumuşak ve paslanmaz çelik yüzeylere uygulanarak 70°C'ta 24 saat süre ile kür edilmiştir. Çeşitli kaplama kalınlıkları denenerek yapışma dayanımları ölçülmüştür. En yüksek dayanım 1,5 mm kalınlığındaki kaplamada 3,5 MPa olarak bulunmuştur.

Komljenović ve arkadaşları (2010) uçucu külün alkali aktivasyonu ile elde edilen geopolimerlerin özelliklerine çeşitli aktifleştiricilerin yapısının ve derişiminin etkilerini araştırmışlardır. Alkali aktifleştirici olarak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , NaOH,  $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ , KOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. En yüksek basınç dayanımı aktifleştirici olarak sodyum silikat kullanılarak hazırlanan numunelerde sağlanmıştır. Numunelerin yapılarının amorf olduğu ve bazı numunelerde bazı zeolit (fojasit) çeşitlerine benzer kristal yapıların olduğu gözlenmiştir.

Sathonsaowaphak ve arkadaşları (2009), sentez için üç farklı tane boyutunda taban külünü kullanarak alkali çözelti /kül oranının, sodyum silikat/NaOH oranının, NaOH derişiminin, su/kül oranının, 10 M'lık NaOH ve naftalin tabanlı süper akışkanlaştırıcı (NSP) ilavesinin geopolimerlerin işlenebilirliği ve dayanımları üzerine etkisini incelemişlerdir. Tane boyutunun azalmasıyla basınç dayanımının azaldığını, alkali/kül oranının artmasıyla dayanımın arttığını, sodyum silikat oranının ve NaOH derişiminin artmasıyla

işlenebilirliğinin azaldığı ancak dayanımının arttığını, 10 M'lık NaOH ve NSP ilavelerinin işlenebilirliği arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Izquierdo ve arkadaşları (2009), İspanya, Hollanda ve Belçika'da bulunan çeşitli termik santrallerden alınan 11 farklı uçucu kül ile Çek Cumhuriyeti'nden alınan yüksek fırın cürufunu karıştırarak geopolimer üretmişlerdir. 6 numune kömürün yanması sonucunda, 5 numune ise kömürün alternatif yakıtlarla (petrol koku, zeytin küspesi, kanalizasyon atığı gibi) yakılması sonucunda elde edilmiştir. Geopolimer sentezinde aktivasyon çözeltisi olarak potasyum hidroksit ve potasyum silikat kullanmışlar ve oda sıcaklığında 28 gün kür etmişlerdir. Elde edilen numunelerin ekstraksiyon işlemleri sonucunda alkali ortamın Ba, Be, Co, Cr gibi elementlerin hareketliliğini engellediği, yüksek pH değerlerinin ise As, Mo, Se gibi elementlerin ekstraksiyonunu arttırdığı gözlenmiştir.

Temuujin ve arkadaşları (2009), mekanik olarak aktive edilmiş uçucu külün oda sıcaklığında kür edilen geopolimer özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarda aktivasyon çözeltisi olarak 14M sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılarak oda sıcaklığında 28 gün kür etmişlerdir. Mekanik olarak aktive edilmiş uçucu kül kullanıldığında morfolojik özelliklerinde değişiklikler, reaktivitesinde ise alkali ortamda artış gözlenmiştir. Reaksiyon ortamına eklenen serbest suyun mekanik özellikler üzerinde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Öğütülmemiş ve mekanik olarak aktive edilmiş uçucu küllerin 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 16 MPa ve 45 MPa olarak bulunmuştur.

Li ve arkadaşları (2009), uçucu külü su ile karıştırarak çözünebilir alkali tuzlarının reaksiyonunu engellemişlerdir. Çözünmeyen uçucu kül taneciklerini kuruttuktan sonra reaktör içine yerleştirmişlerdir. Reaktör istenilen sıcaklığa ulaştığında sisteme eş zamanlı olarak %96 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve baca gazı gönderilmiştir. Daha sonra reaktör içine NaClO<sub>3</sub> eklenmiştir. Deneyler 70°C ile 130°C aralığında değişen 7 farklı sıcaklıkta ve her sıcaklık için 6 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Karışım içindeki Fe<sup>+3</sup> ve Al<sup>+3</sup> içeriklerinin belirlenebilmesi ve reaksiyon kinetiğinin incelenebilmesi için 30 dakika aralıklarla 1 mL örnek alınmıştır.

Geopolimer hamurundaki  $Al^{+3}$  derişimi ICP-MS cihazı ile,  $Fe^{+3}$  ve  $Fe^{+2}$  derişimleri spektrofotometre ile belirlenmiştir.  $SO_2$ 'nin,  $NaClO_3$  ile reaksiyona girerek sistemden uzaklaştığı, yüksek oranda  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  içeren uçucu külün sülfürik asit ile reaksiyona girerek kompleks bir çamur oluşturduğu gözlenmiştir. Reaksiyon sıcaklığının artmasıyla  $SO_2$  giderim veriminin azaldığı,  $Fe_2O_3$  ve  $Al_2O_3$  dönüşümünün arttığı görülmüştür.

Chindaprasirt ve arkadaşları (2009), ana malzeme olarak uçucu kül ve taban külü, aktifleştirici olarak sodyum hidroksit ( $NaOH$ ) ve sodyum silikat ( $Na_2SiO_3$ ) kullanmışlardır. Sodyum hidroksit 5, 10 ve 15M derişimlerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan hamurlar  $65^\circ C$ 'ta 48 saat süreyle kür edilmiş ve daha sonra Fourier Transform Infrared Spektrometresi, Taramalı Elektron Mikroskobu ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) kullanılarak analiz edilmiştir. Basınç dayanımlarının ölçülmesi amacıyla geopolimer harçları hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar uçucu kül ve taban külünün geopolimer üretiminde ana malzeme olarak kullanılabileceğini ve numunelerin malzeme özelliklerine ve  $NaOH$  derişimine bağlı olduğunu göstermiştir. Uçucu külün taban külünden daha reaktif olduğu gözlenmiştir. DSC termogramlarında taban külünden elde edilen hamurlar ile ana malzeme piklerinin eğimleri arasında çok az farklılık olduğu, uçucu külden elde edilen hamurlarda ise farklılıklar olduğu görülmüştür. Sonuçlar uçucu külden elde edilen geopolimerlerde daha yüksek derecelerde geopolimerizasyon gerçekleştiğini göstermektedir. FTIR analizlerinde ise en yüksek geopolimerizasyon derecesinin 10M'lık  $NaOH$  ile elde edildiği görülmüştür. SEM/EDX analizleri sonucunda temel elementlerin Si, Al, Na ve Ca olduğu ve Si/Al oranlarının ise ana malzemelerden farklı olduğu görülmüştür. Basınç dayanımları incelendiğinde taban külü ile elde edilen geopolimerler en yüksek 18 MPa dayanım gösterirken uçucu kül ile elde edilen geopolimerler en yüksek 35 MPa dayanım göstermektedir.

Andini ve arkadaşları (2008), uçucu külü potasyum hidroksit kullanarak aktive etmişlerdir.  $25^\circ C$ 'ta 16, 96, 168, 456, 672 saat,  $40^\circ C$ 'ta 72, 120, 168, 336 saat,  $60^\circ C$ 'ta 16, 50, 72, 120 saat ve  $85^\circ C$ 'ta 1, 2, 3, 4, 5, 6 saat kür ederek polikondenzasyon reaksiyonunu incelemişlerdir. TGA, FTIR ve BET analiz yöntemlerini uygulamışlardır.  $40^\circ C$  ve  $60^\circ C$ 'ta polikondenzasyon reaksiyonunun

25°C'a göre daha az oluştuğunu, 85°C'ta ise en fazla oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Kong ve arkadaşları (2007), metakaolin ve uçucu külü sodyum silikat ve potasyum hidroksit çözeltileri ile aktive ederek iki ayrı geopolimer hamurları hazırlamışlardır. 80°C'ta 24 saat kür ettikten sonra 800°C'a maruz bırakmışlardır. Uçucu kül ile hazırlanan geopolimerlerin dayanımının arttığını, metakaolin ile hazırlanan geopolimerlerin dayanımının ise azaldığını gözlemlemişlerdir.

Li ve arkadaşları (2006), uçucu kül ve sodyum hidroksit kullanarak inorganik polimer üretmişlerdir. Üretilen geopolimerleri boyalı çözeltiden metil mavisi ve kristal menekşe renkli boyaları adsorplamak için kullanmışlardır. Adsorpsiyon kapasitesinin numunelerin NaOH/uçucu kül oranına ve füzyon sıcaklığına bağlı olduğunu bulmuşlardır. En iyi sonuçları NaOH/uçucu kül oranı 1.2/1 olan oranda ve 250°C füzyon sıcaklığında elde etmişlerdir. Sentezlenen malzemenin adsorpsiyon kapasitesi, uçucu kül ve doğal zeolitten daha yüksek çıkmıştır.

Bakharev (2006), sodyum ve potasyum alkali aktifleştiricileri ve uçucu kül ile hazırlanan geopolimerlerin 800-1200°C aralığında yanması esnasında ısı kararlılığını incelemiştir. Sodyum ile hazırlanan numunelerin 800°C'a ani bozunmaya başladığını, potasyum ile hazırlanan numunelerde ise bozunmanın 1100°C'ta başladığını gözlemlemiştir.

Lee ve van Deventer (2002), F sınıfı uçucu külü farklı derişimlerdeki alkali çözeltilerde ekstrakte edilmiştir. Ekstrakt çözeltilerin elementel bileşimi ICP-OES ile, rafinat katının yığın özellikleri ise XRD ve FTIR ile belirlenmiştir. Yüzey morfolojisi ve bileşiminin belirlenmesi için ise SEM/EDS kullanılmıştır. Çözünür silikat oranı düşük olduğunda çözünmenin, uçucu kül yüzeyinde gerçekleşen ikincil çökelmelerden dolayı engellenmekte olduğu gözlenmiştir.

Xu ve van Deventer (2002), farklı minerallerin etkisini incelemek amacıyla kaolin ve stilbit kullanmışlardır. Minerallerin jel faza tamamen geçmesinin kontrolü amacıyla <sup>27</sup>Al, <sup>29</sup>Si MAS-NMR, amorf yapının belirlenmesi amacıyla da TEM ve HREM kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlarda ağırlıkça CaO yüzdesi yüksek olan numunelerde ortalama yüzey alanı/jel oranının düşük

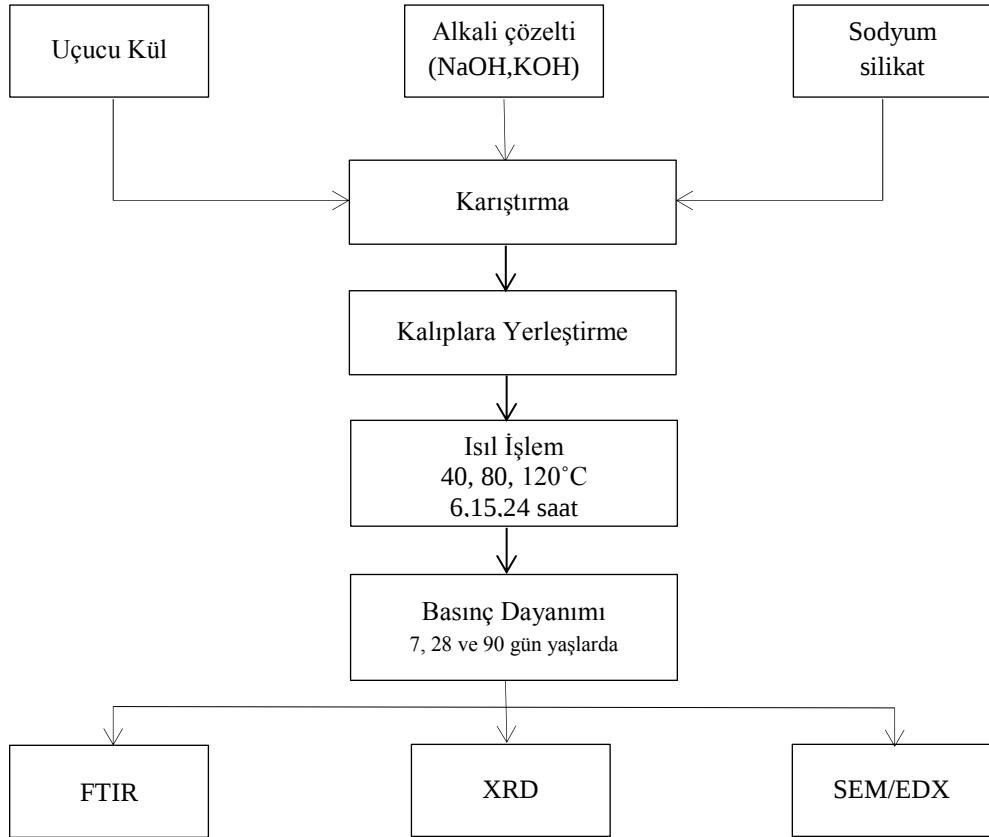
olduğu ve ortamda bulunan çözünmemiş kristallerin numuneye daha yüksek dayanım sağladığı görölmüşür.

Swanepoel ve Strydom (2002), geopolimerlerin üretimi için uçucu kül, kaolin, sodyum silikat, sodyum hidroksit ve su kullanmışlardır. Numuneler 40, 50, 60 ve 70°C kür sıcaklıklarında ve 6, 24, 48, 72 saat kür sürelerinde kür edilmiştir. En iyi sonuçlar 60°C sıcaklıkta ve 48 saat kür süresinde elde edilmiştir. 28 gün sonunda en yüksek basınç dayanımı 8 MPa olarak bulunmuştur. 7 ve 28 gün bekletilen numunelerin FTIR analizleri yapılmıştır. XRD analizleri sonucunda ise geopolimer yapısının en büyük kısmını kuvarzın oluşturduğu gözlenmiştir.

## 6.DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalarda termik santrallerin yan ürünü olan uçucu kül, alkali çözelti ve sodyum silikat kullanılarak aktifleştirilmiş ve farklı sıcaklıklarda ısıtılarak işlem uygulanarak geopolimer numuneleri elde edilmiştir. Alkali çözelti olarak 4M, 8M ve 12M derişimlerinde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır. Farklı derişimlerde hazırlanan alkali çözelti, sodyum silikat ile karıştırılarak alkali aktifleştirici çözelti hazırlanmıştır. Alkali aktifleştirici çözelti, uçucu kül üzerine eklenerek geopolimer hamuru elde edilmiştir. Elde edilen geopolimer hamuruna 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarında 6 saat, 15 saat ve 24 saat süreler ile ısıtılarak işlem uygulanmıştır.

Deneysel çalışmanın akım şeması Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel akım şeması

## **6.1. Hammadde**

Deneylerde geopolimer elde edilmesinde hammadde kaynağı olarak kullanılan uçucu kül, Çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Çatalağzı uçucu külü, diğer termik santrallerde oluşan uçucu küllere göre biraz daha fazla alümina ve silis içermekte ve nispeten daha az CaO içermektedir. Bu yönüyle geopolimer hamuru oluşturmak için daha uygundur. Uçucu kül santralden getirildikten sonra çuvallar içinde laboratuvarında istiflenmiştir.

Hammaddenin oksit kompozisyonunun belirlenmesi amacı ile X-ışını Floresan Spektrometre, kristal yapısının belirlenmesi amacı ile X-ışını Kırınım Spektrometre kullanılmıştır. Uçucu külün morfolojik özellikleri ise taramalı elektron mikroskobu ile belirlenmiştir.

### **6.1.1. Uçucu külün X-ışını floresan spektrometre analizi**

Uçucu külün oksit kompozisyonu Rigaku marka ZSX Primus model X-ışını Floresan Spektrometre (XRF) kullanılarak belirlenmiştir.

### **6.1.2. Uçucu külün Fourier Transform Infrared spektrometre analizi**

Geopolimerlerin sentezinde kullanılan uçucu külün  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  dalga boyu aralığında bağ yapısı belirlenmiştir. Analizler IFS 66v/S Bruker Optics Fourier Transform spektrometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### **6.1.3. Uçucu külün X-ışını kırınım spektrometre analizi**

Deneyisel çalışmalarda hammadde kaynağı olarak kullanılan uçucu külün kristal yapısı Rigaku Rind 2200 marka X-ışını kırınım spektrometrede 30kV voltaj ve 40mA akım kullanılarak  $2\text{--}80^\circ 2\theta$  aralığında belirlenmiştir.

#### **6.1.4. Uçucu külün taramalı elektron mikroskop görüntüsü**

Geopolimerizasyonda kullanılan uçucu külün taramalı mikroskop görüntüleri Zeiss Evo 50 EP marka mikroskopta 20 kV voltaj kullanılarak alınmıştır.

### **6.2. Geopolimer Numunelerinin Hazırlanmasında Kullanılan Kimyasallar**

Geopolimer numunelerinin hazırlanmasında alkali aktifleştirici çözelti elde edilmek için teknik sodyum silikat, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit pelletler kullanılmıştır. Alkali aktifleştirici çözelti sodyum silikatın sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit ile ayrı ayrı karıştırılması ile elde edilmiştir.

#### **6.2.1. Sodyum silikat**

Geopolimer sentezinde uzun zincirli Al-O-Si oligomerlerinin oluşturulması için sodyum silikat gereklidir (Xu ve van Deventer 2000). Deneysel çalışmalarda polimerleşme reaksiyonlarının sağlanabilmesi amacı ile teknik sodyum silikat kullanılmıştır. Teknik sodyum silikat, molce % 28,7 SiO<sub>2</sub> ve %8,9 Na<sub>2</sub>O içermektedir. Silikat çözeltisinin pH değeri 11,31, yoğunluğu ise 1,39 g/m<sup>3</sup>'tür. Kuruma ve çökelmeye maruz kalmaması için sodyum silikat döküm gününe kadar özel muhafazalı bidonlarda saklanmıştır.

#### **6.2.2. Sodyum hidroksit**

Silisyum ve alüminyum içeren hammaddelerin alkali çözeltiler ile aktifleştirilmesi ile amorf alüminosilikat jel oluşumu sağlanabilmektedir (Bakri ve ark. 2011). Deneylerde uçucu külün alkali ortamda aktifleştirilmesi için kullanılan teknik sodyum hidroksit kütlege %98 NaOH ve %2 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içermektedir.

Deneysel çalışmalarda 4M, 8M ve 12M olmak üzere üç farklı derişimde sodyum hidroksit kullanılmış ve deneylerden 1 gün önce hazırlanarak cam kaplarda bekletilmiştir.

### **6.2.3. Potasyum hidroksit**

Geopolimer reaksiyonlarında alkali çözeltide bulunan katyon, hammaddenin çözünmesini ve oluşan ürünün özelliklerini etkilemektedir (Xu ve van Deventer 2000). Alkali metal katyonun etkisinin incelenebilmesi amacı ile deneysel çalışmalarda sodyum hidroksite ek olarak potasyum hidroksit kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan teknik potasyum hidroksit kütlece %98 KOH ve %2 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içermektedir Potasyum hidroksit çözeltisi de deneylerden 1 gün önce ve 4M, 8M ve 12M derişimlerinde hazırlanmıştır.

### **6.3. Geopolimer Numunelerinin Hazırlanması**

Geopolimer numunelerinin hazırlanmasında teknik sodyum silikat ile birlikte sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit pelletler kullanılmıştır. Hidroksit çözeltileri, geopolimerlerin özelliklerine pH'ın etkisinin belirlenebilmesi amacı ile 4M, 8M ve 12M olmak üzere üç farklı derişimde hazırlanmıştır. Deneylerden 1 gün önce hazırlanan çözeltiler deneylerden önce tekrar karıştırılarak kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda yeterli işlenebilirliğe sahip geopolimer hamurlarının elde edilmesi ve en yüksek basınç dayanımının sağlanması amacı ile 0,5 ile 2 aralığında değişen alkali çözelti/sodyum silikat oranları ve 0,35 ile 0,5 aralığında değişen aktifleştirici çözelti/uçucu kül oranları denenmiştir. En yüksek basınç dayanımı, alkali çözeltinin sodyum silikata oranının 1 (kütlece), alkali aktifleştirici çözeltisinin uçucu küle oranının ise 0,4 (kütlece) olduğu numunelerde elde edilmiştir. Geopolimer hamurlarının elde edilmesinde belirlenen oranlar

doğrultusunda 3214 gr uçucu kül, 643 gr alkali çözelti ve 643 gr sodyum silikat kullanılmıştır.

Alkali aktifleştirici, sodyum silikat ile alkali çözeltinin mekanik karıştırıcı ile 2000 rpm hızında 15 dakika karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Tartılan ve varsa topaklanmış kısımları giderilen uçucu külün üzerine aktifleştirici çözelti eklenmiş ve hamur mekanik karıştırıcı ile aynı hızda 15 dk karıştırılmıştır. Elde edilen geopolimer hamuru 4x4x16cm ebatlarındaki üç gözlü çelik kalıplara dökülmüştür. Çelik kalıplar, hamurun yapışmasının önlenmesi amacıyla önceden yağlanmıştır. Geopolimer hamurunun kalıplara doldurulmasından sonra her bir kalıp hamurunun içinde hava kabarcığı kalmaması için sarsma tablasına yerleştirilerek 60 kez sarsılmıştır.

Geopolimer sentezi için farklı süre ve sıcaklıklarda ısıtma işlemi (kür) uygulanmıştır. Isıtma işlemin mekanik ve mikroyapısal özellikler üzerine etkilerinin araştırılması amacı ile 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 6 saat, 15 saat ve 24 saat sürelerde kür işlemi gerçekleştirilmiştir. Kür işleminden sonra numuneler laboratuvarda alınarak açık ortamda 7 gün, 28 gün ve 90 gün sürelerde yaşlandırılmıştır.

#### **6.4. Elde Edilen Geopolimerlerin Analizleri**

Deneysel çalışmalardan elde edilen geopolimerin özelliklerinin belirlenmesi amacı ile mekanik testler uygulanmış ve yapısal özellikleri araştırılmıştır.

##### **6.4.1. Basınç dayanımı testleri**

Isıtma işlemi uygulandıktan sonra laboratuvar ortamında 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan geopolimerlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Numuneler öncelikle ikiye bölünmüştür ve

her bir parçanın dayanımı ölçülmüştür. Basınç dayanımı testleri UTEST marka otomatik beton basınç dayanma tayini cihazında gerçekleştirilmiştir.

#### **6.4.2. Mikroyapısal özelliklerin belirlenmesi**

Geopolimerlerin mikroyapısal özelliklerinin incelenebilmesi amacı ile 28 gün yaşlandırılmış numuneler basınç dayanımı testlerinin ardından toz haline getirilerek araştırılmalarda kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen geopolimerlerin bağ yapılarının incelenmesi amacı ile Bruker Tensor 27 ve IFS 66v/S Bruker Optics Fourier Transform Spektrometreler kullanılmıştır. Toz haline getirilen geopolimer numunelerinin, potasyum bromür ile birlikte pellet haline getirilerek bağ yapıları belirlenmiştir.

Numunelerin kristal yapıları Rigaku Rind 2200 marka X-Işını kırınım spektrometrede 30kV voltaj ve 40mA akım kullanılarak belirlenmiştir. Geopolimerlerin morfolojik özellikleri Zeiss Evo 50 EP marka taramalı elektron mikroskobu (SEM)/ Enerji dağıtıcı X-Işını floresan spektrometre (EDX) kullanılarak incelenmiştir.

## 7.DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışmada F sınıfı uçucu kül kullanılarak geopolimer numuneleri elde edilmiştir. Deneylerde katyon, pH ve ısıtılmanın geopolimerler üzerine etkileri araştırılmıştır. Daha sonra elde edilen geopolimer numunelerinin mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiş ve bu özellikleri etkileyen parametrelerin analizi kapsamlı olarak yapılmıştır.

### 7.1. Uçucu Kül Üzerine Yapılan Analizler

#### 7.1.1. Uçucu külün X-ışını floresan spektrometre analizi

Uçucu külün oksit kompozisyonu X-ışını Floresan Spektrometre analizi ile belirlenmiş ve Çizelge 7.1’de verilmiştir.

**Çizelge 7.1.** Uçucu külün XRF analizi sonuçları

| Oksit İçeriği                  | Yüzde Bileşimi |
|--------------------------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 57,2           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25,1           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,3            |
| CaO                            | 1,7            |
| MgO                            | 1,8            |
| SO <sub>3</sub>                | 0,2            |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,4            |
| K <sub>2</sub> O               | 4,8            |
| K.K*                           | 1,6            |

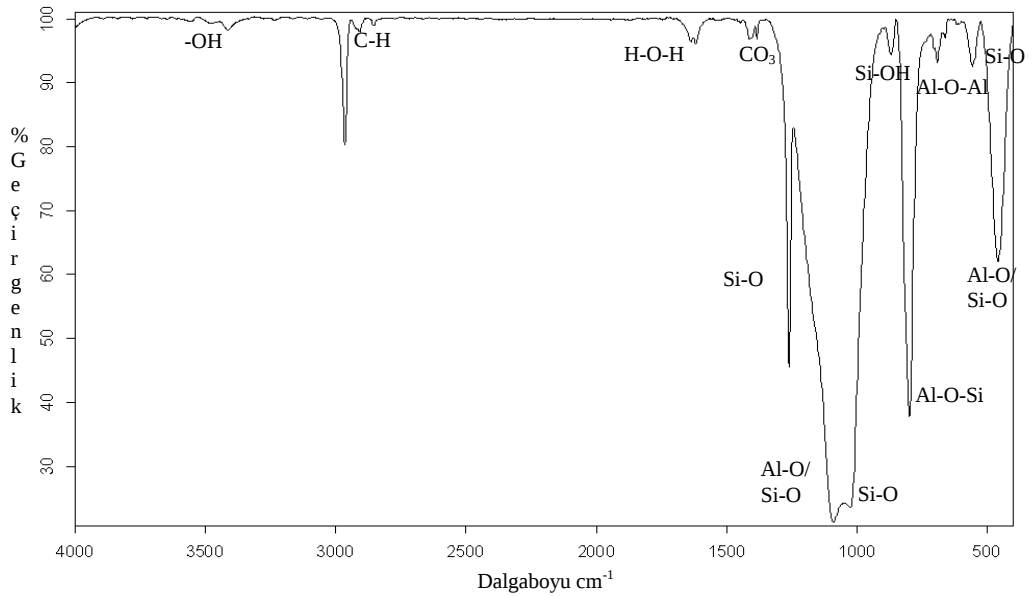
\*K.K: Kızdırma kaybı

XRF sonuçlarına göre uçucu külün bileşiminde bulunan SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’in toplamı %89.6 ve kızdırma kaybı 1,6’dır. ASTM C618-12a’ya göre

uçucu külde bulunan puzolanik özellik gösteren bileşenlerin en az %70 olması ve kızdırma kaybının en fazla %6 olması gerekmektedir. Elde edilen sonuçlara göre uçucu külün deneysel çalışmalarda kullanılması için uygun olduğu görülmüştür.

### 7.1.2. Uçucu külün Fourier Transform Infrared spektrumu

Geopolimer numunelerinin sentezinde kullanılan uçucu külün bağ yapısı Fourier Transform Infrared Spektrometre ile belirlenmiştir. Külün orta bölge infrared spektrumu Şekil 7.1’de verilmiştir.



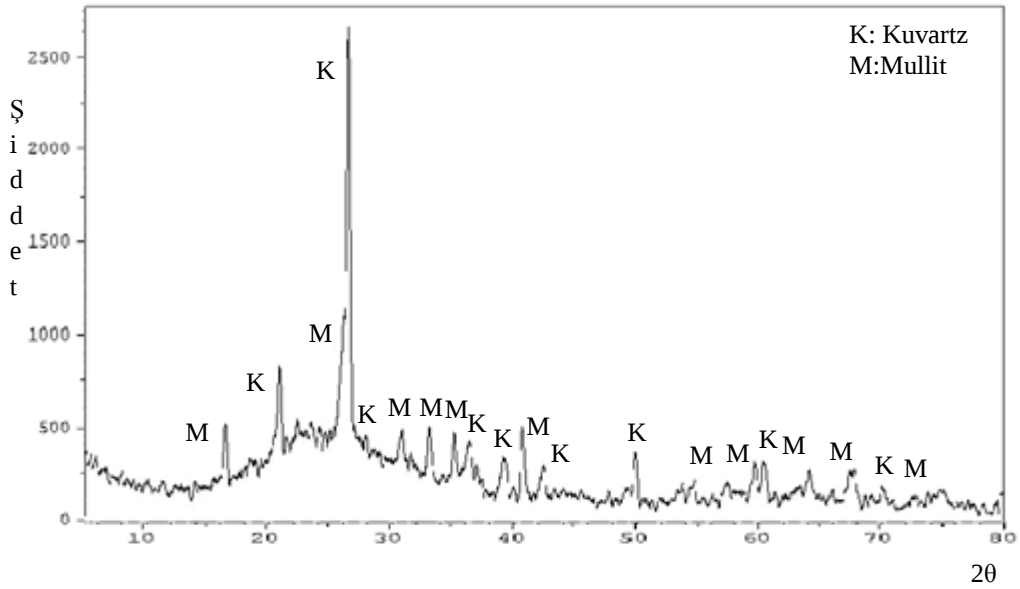
**Şekil 7.1.** Uçucu külün orta bölge infrared bölgesi spektrumu

Uçucu külün spektrumunda,  $\sim 460 \text{ cm}^{-1}$  dalgaboyunda Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimleri,  $\sim 680 \text{ cm}^{-1}$ ’de Al-O-Al açılı bükülme titreşimleri,  $\sim 780 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O-Si simetrik gerilme titreşimleri gözlenmiştir.  $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen pik Si-O gerilme titreşimlerinden,  $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen pik ise Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır.  $\sim 1270 \text{ cm}^{-1}$

dalga boyunda Si-O gerilme titreşimleri gözlenmiştir. 1410  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda atmosferik karbonatlaşma, 1650  $\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda H-O-H açılı bükülme titreşimleri, 3600  $\text{cm}^{-1}$  bölgesinde ise -OH bağının gerilme titreşimleri görülmüştür.

### 7.1.3. Uçucu külün X-Işını kırınım spektrumu

Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün X-Işını kırınım spektrumu Şekil 7.2’de verilmiştir.

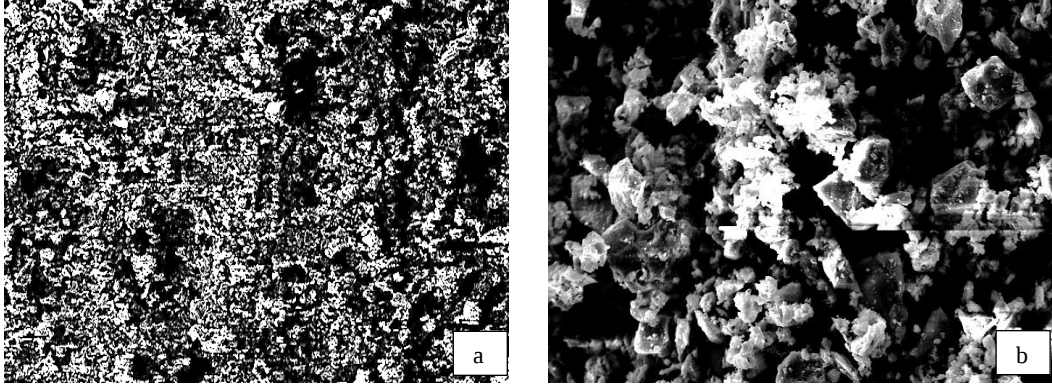


Şekil 7.2. Uçucu külün X-Işını kırınım spektrumu

X-Işını kırınım spektrometre ile yapılan analiz sonucunda uçucu külün yapısının amorf olduğu ve kuvarz ve mullit kristalleri içerdiği görülmüştür.

#### 7.1.4. Uçucu külün taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün taramalı elektron mikroskobu ile alınan görüntüsü Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3. Uçucu külün taramalı elektron mikroskop görüntüsü a. 250x b. 2000x

Şekilde uçucu külün çeşitli boyutlarda partiküllere ve homojen olmayan bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca külün yapısında bulunan partiküllerinin renk dağılımının aynı olmadığı, bazılarının açık renkli olduğu gözlenmiştir.

#### 7.2. Geopolimer Üretim Çalışmaları Sırasındaki Deneysel Gözlemler

Geopolimer üretimi için hammadde kaynağı olarak uçucu kül, sodyum silikat ve alkali çözeltiler kullanılmıştır. Çatalağzı termik santralinin atığı olan uçucu kül, santralin depolama sahasından temin edilerek laboratuvar ortamında çuvallar içinde bekletilmiştir. Deneysel çalışmalar esnasında bazı çuvallardan alınan uçucu küllerin renk tonlarında çok az farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu durum, termik santralde kullanılan kömürün içeriklerinin farklı olmasından kaynaklanabilmektedir.

Geopolimerin özelliklerine alkali derişiminin etkisinin araştırılabilmesi amacı ile sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit çözeltileri 4M, 8M ve 12M olmak üzere üç farklı derişimde hazırlanmıştır. 12M derişiminde hazırlanan alkali çözelti kullanıldığında, hidroksit derişimi yüksek olduğundan uçucu kül ile hızlı reaksiyon vererek ani katılaşma oluşmaya başlamıştır ve dolayısıyla karıştırma işlemi zorlaşmıştır.

Genel olarak sodyum hidroksit derişiminin ve sodyum silikat çözeltisinin miktarının artması geopolimer karışımın işlenebilirliğini azaltmaktadır. Sodyum hidroksit derişiminin artması çözeltinin viskozitesini artırır ve dolayısıyla hazırlanan geopolimer harcının akışkanlığını azaltır. Aynı zamanda sodyum silikat çözeltisi çok viskoz bir sıvı olduğundan miktarındaki artış harcın akışkanlığının azalmasına neden olmaktadır (Chindaprasirt ve ark. 2007).

Geopolimer üretiminde alkali aktifleştirici/uçucu kül oranı, bütün numunelerin özelliklerinin kıyaslanabilmesi amacı ile 0,4 olarak sabit tutulmuştur. 0,4'ten küçük olan oranlarda 12M'lık hidroksit çözeltileri ani reaksiyona girdiğinden çözelti miktarı yeterli olmamıştır. 0,4'ten büyük olan oranlarda ise 4M derişimindeki hidroksit çözeltisi kullanıldığında oluşan geopolimer hamuru çok akışkan olmuş ve hamurun konulduğu çelik kalıplardan sızıntılar oluşmuştur.

Basınç dayanımı belli bir sıvı/uçucu kül oranına kadar hızlı bir şekilde artmaktadır, bu bölge aktif bölge olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgenin dışında sıvı/uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Yüksek oranlarda dayanımın azalmasının nedeni alkali aktifleştirici çözeltinin içindeki OH<sup>-</sup> ın geopolimerizasyon için gerekli olan miktardan fazla olmasıdır (Sukmak ve ark. 2013).

Alkali aktifleştirici çözelti, uçucu kül üzerine eklendikten sonra karıştırma süresi literatürden yararlanılarak 15 dk olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda 15 dakikadan uzun karıştırma süreleri denenmiştir, ancak bu sürelerde 4M derişiminde alkali çözelti kullanıldığında geopolimer hamuru üzerine sıvı çıkışının oluştuğu ve süre arttırıldıkça ayrışmanın da arttığı görülmüştür.

Geopolimer hamurları elde edildikten sonra etüvde 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarında 6 saat, 15 saat ve 24 saat süreler ile ısı işlem uygulanmıştır. Yüksek sıcaklıklarda uzun süre ısı işlem gören ve yüksek derişimde alkali çözelti ile hazırlanan numunelerin bazılarında, etüvden çıkartıldıktan sonra üzerlerinde beyazlıklar oluştuğı görülmüştür. Bu durumun suyun buharlaşmasının ardından ortamda kalan alkali çözeltiden kaynaklandığı düşünülmektedir.

### **7.3. Basınç Dayanımı Sonuçları**

Deneysel çalışmalarda elde edilen geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçları, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit alkali çözeltileri kullanılan numuneler için ayrı ayrı verilerek birbirleriyle kıyaslanmıştır.

#### **7.3.1. Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımları**

Deneysel çalışmada elde edilen geopolimer numunelerin basınç dayanımı sonuçları sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit alkali çözeltileri için ayrı ayrı verilmiştir. Çizelge 7.2’de 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısı işlem gören numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 7.2.** 4M derişiminde NaOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 4M             | 40                       | 6                      | 2,08                                              | 7,21                                               | 17,67                                              |
| 4M             | 40                       | 15                     | 1,96                                              | 7,71                                               | 18,34                                              |
| 4M             | 40                       | 24                     | 2,5                                               | 7,85                                               | 15,33                                              |

4M derişiminde NaOH kullanılarak elde edilen numunelerde yaşlandırma süresinin artması ile basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 40°C sıcaklıkta 15 saat süre ile ısıt işlem görmüş ve 90 gün yaşlandırılmış numune için 18,34 MPa olarak bulunmuştur. Aynı ısıt işlem süresinde elde edilen 7 gün yaşlandırılan numunenin basınç dayanımının ise 1,96 MPa olarak en düşük değer olduğu görülmüştür.

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıt işlem gören numunelerin basınç dayanımları Çizelge 7.3'te verilmiştir.

**Çizelge 7.3.** 4M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 4M             | 80                       | 6                      | 4,37                                              | 6,69                                               | 10,49                                              |
| 4M             | 80                       | 15                     | 5,55                                              | 8,01                                               | 10,68                                              |
| 4M             | 80                       | 24                     | 6,97                                              | 8,08                                               | 10,79                                              |

80°C sıcaklıkta farklı sürelerde kür edilen geopolimer numunelerinin basınç dayanımı incelendiğinde yaşlandırma süresinin artmasının dayanım değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımının 24 saat süre ile ısıtıl işlem gören ve 90 gün yaşlandırılan numune için 10,79 MPa olduğu görülmüştür. En düşük dayanım ise 6 saat süre ile kür edilen ve 7 gün yaşlandırılan numune için 4,37 MPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.4'te 120°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 7.4.** 4M derişiminde NaOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 4M      | 120           | 6           | 3,61                           | 7,13                            | 8,19                            |
| 4M      | 120           | 15          | 9,69                           | 11,06                           | 11,46                           |
| 4M      | 120           | 24          | 10,61                          | 12,53                           | 12,58                           |

Isıl işlem sıcaklığı 120°C olan geopolimer numunelerinin basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanım değerinin 24 saat süre ile ısıtıl işlem gören ve 90 gün yaşlandırılan numune için 12,58 MPa olduğu bulunmuştur.

Alkali derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanılan ve farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları Çizelge 7.5-7.7'de verilmiştir. Çizelge 7.5, 40°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir.

**Çizelge 7.5.** 8M derişiminde NaOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 8 M            | 40                       | 6                      | 2,01                                              | 6,27                                               | 11,85                                              |
| 8 M            | 40                       | 15                     | 5,78                                              | 23,37                                              | 29,85                                              |
| 8 M            | 40                       | 24                     | 8,08                                              | 25,05                                              | 36,62                                              |

8M derişiminde NaOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarının numune yaşı ile arttığı gözlenmiştir. Yaşlandırma süresinin 7 günden 28 güne arttırılması ile sağlanan dayanımdaki artışların daha belirgin olduğu görölmüştür. En yüksek basınç dayanımının 24 saat süre ile ısıtıl işlem gören ve 90 gün yaşlandırılan numuneler için 36,62 MPa olarak bulunduğu görölmektedir.

Çizelge 7.6’da ise 80°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları verilmiştir

**Çizelge 7.6** 8M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 8 M            | 80                       | 6                      | 8,78                                              | 22,55                                              | 35,76                                              |
| 8 M            | 80                       | 15                     | 23,25                                             | 29,84                                              | 35,39                                              |
| 8 M            | 80                       | 24                     | 28,6                                              | 33,18                                              | 40,69                                              |

Isıl işlem sıcaklığı 80°C olan geopolimer numunelerinin basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanım değerinin 24 saat süre ile ısıtıl işlem gören ve 90 gün yaşlandırılan numune için 40,69 MPa olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.7., 120°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir.

**Çizelge 7.7.** 8M derişiminde NaOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 8 M     | 120           | 6           | 17,1                           | 23,81                           | 25,54                           |
| 8 M     | 120           | 15          | 35,87                          | 36,49                           | 33,5                            |
| 8 M     | 120           | 24          | 39,24                          | 40,35                           | 38,29                           |

Derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanıldığında 120°C’de 24 saat süre ile ısıtıl işlem görmüş numuneler için en yüksek basınç dayanımı 24 saat ısıtıl işlem gören ve 90 gün yaşlandırılan numune için 38,29 MPa olarak bulunmuştur. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen diğer geopolimer numunelerinin basınç dayanımlarının numune yaşının artması ile arttığı gözlenirken, 8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 120°C’de 15 ve 24 saat süre ile ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarının yaşlandırma süresinin 28 günden 90 güne artması ile azaldığı gözlenmiştir.

12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir. Çizelge 7.8’de, 40°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıtıl işlem gören ve 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 7.8.** 12M derişiminde NaOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 12 M    | 40            | 6           | 4,65                           | 23,12                           | 31,82                           |
| 12 M    | 40            | 15          | 7,55                           | 24,29                           | 35,39                           |
| 12 M    | 40            | 24          | 6,97                           | 25,58                           | 25,5                            |

Derişimi 12M olan sodyum hidroksit kullanıldığında basınç dayanımı en yüksek 15 saat ısıt işlem gören ve 90 gün yaşlandırılan numune için 35,39 MPa bulunmuştur. 24 saat ısıt işlem gören numunenin basınç dayanımının, numune yaşının 28 günden 90 güne arttırılması ile değişmediği görülmüştür. Çizelge 7.9., 12M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir.

**Çizelge 7.9.** 12M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 12 M    | 80            | 6           | 18,52                          | 28,82                           | 36,89                           |
| 12 M    | 80            | 15          | 33,07                          | 34,7                            | 41,23                           |
| 12 M    | 80            | 24          | 33,04                          | 38,65                           | 49,01                           |

80°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıt işlem gören numunelerin basınç dayanımları yaşlandırma süresinin artması ile artmıştır. En yüksek basınç dayanımı 90 gün yaşlandırılan numuneler için 49,01 MPa olarak bulunmuştur. Çizelge 7.10'da 12M derişiminde NaOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 7.10.** 12M derişiminde NaOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta farklı kür sürelerinde elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 12 M    | 120           | 6           | 20,49                          | 33,24                           | 25,33                           |
| 12 M    | 120           | 15          | 32,81                          | 43,52                           | 44,21                           |
| 12 M    | 120           | 24          | 38,2                           | 51,45                           | 39,69                           |

Alkali derişimi 12M olan sodyum hidroksit kullanıldığında elde edilen en yüksek basınç dayanımı 120°C’de 24 saat süre ile ısıtıl işlem görmüş ve 28 gün yaşlandırılmış numune için 51,45 MPa olarak bulunmuştur. Aynı şartlarda üretilmiş ve 90 gün yaşlandırılmış numunenin basınç dayanımının azaldığı ve 49,01 MPa olduğu görülmüştür.

#### **7.3.1.1. Isıl işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi**

Geopolimer numunelerinin alkali derişimi ve ısıtıl işlem sıcaklıkları sabit tutularak 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına ısıtıl işlem süresinin etkisi araştırılmıştır.

4M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir. 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerin 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları ısıtıl işlem süresinin artması ile düşük oranda artmıştır. Basınç dayanımları 7 günlük numuneler için en yüksek 2,5 MPa, 28 günlük numuneler için ise 7,85 MPa olarak ölçülmüştür. 90 günlük numunelerin basınç dayanımı ısıtıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate çıkmasıyla 17,67 MPa değerinden 18,34 MPa değerine yükselse de ısıtıl işlem süresinin 24 saate çıkmasıyla 15,33 MPa değerine azaldığı görülmüştür.

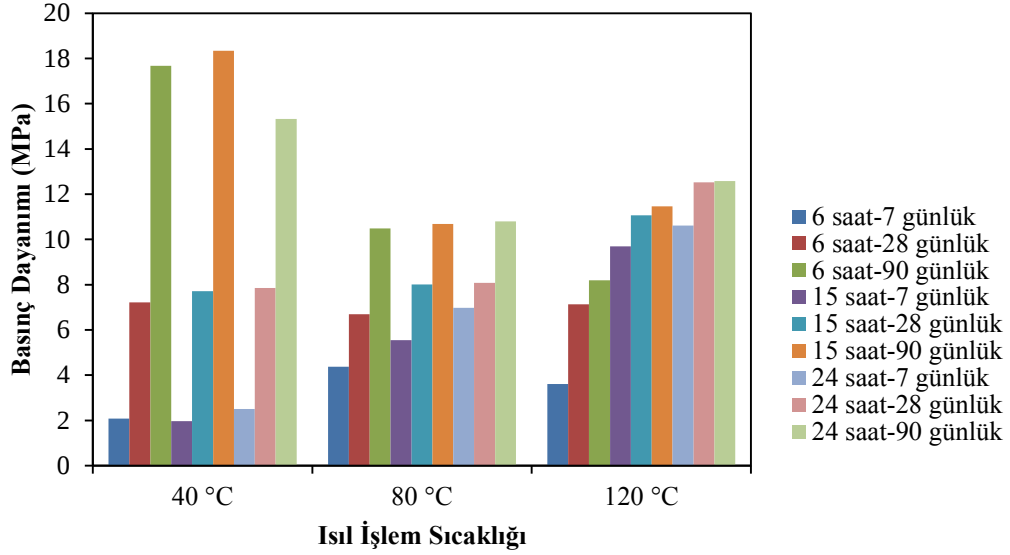
90 gün yaşılandırılan numunelerin basınç dayanımlarının ısıtılma süresinin 24 saatte artırılmasıyla azalmasının nedeninin üretim esnasında kullanılan uçucu külden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı kaynaktan farklı zamanlarda alınan uçucu küller, geopolimerlerin basınç dayanımlarında önemli oranda değişikliğe neden olabilmektedir (van Deventer ve ark. 2007).

Isıtılma sıcaklığı 80°C olan numunelerin basınç dayanımlarında ise ısıtılma süresinin artması ile artış gözlenmiştir. 7 günlük numunelerde 6 saat ısıtılma süresinde basınç dayanımı 4,37 MPa iken 15 saat ısıtılma süresinde 5,55 MPa, 24 saat ısıtılma süresinde ise 6,97 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde 28 gün yaşılandırılan numuneler için ısıtılma süresinin 6 saatten 15 saate artırılması ile basınç dayanımları 6,69 MPa'dan 8,01 MPa'a artmıştır. Isıtılma süresinin 24 saate artırılması ile dayanım aynı kalarak 8,08 MPa olmuştur. Isıtılma süresinin artırılması 90 gün yaşılandırılan numuneler için basınç dayanımını çok az oranda etkilemiştir. 6 saat süre ile ısıtılma görmüş numunenin basınç dayanımı 10,49 MPa iken 24 saat süre ile ısıtılma görmüş numunelerinin basınç dayanımı 10,79 MPa olmuştur.

120°C sıcaklıkta ısıtılma görmüş ve 7, 28 ve 90 gün yaşılandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının ısıtılma süresinin artması ile belirgin bir oranda arttığı görülmüştür. 7 gün süre ile yaşılandırılan numunelerde 6 saat ısıtılma süresinde 3,61 MPa olan basınç dayanımı, 15 saat ısıtılma süresinde %168 artarak 9,7 MPa'a ulaşmıştır. Isıtılma süresi 24 saate arttırıldığında basınç dayanımı da 10,61 MPa'a yükselmektedir. 28 ve 90 gün yaşılandırılan numunelerin basınç dayanımlarının birbirine yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür. Örnek vermek gerekirse, 15 ve 24 saat ısıtılma sürelerinde 28 günlük numunelerin dayanımları 11,06 MPa ve 12,53 MPa iken 90 günlük numunelerin dayanımları sırasıyla 11,46 ve 12,58 MPa olarak ölçülmüştür.

Deneylerde 4M sodyum hidroksit derişiminde alkali çözelti kullanılarak hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 40°C'ta 15 saat ısıtılma görmüş numunede 18,34 MPa olarak elde edilmiştir

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde kür edilen ve yaşlandırılan numuneler için elde edilen tüm sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 7.4'te verilmiştir.



**Şekil 7.4.** 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı

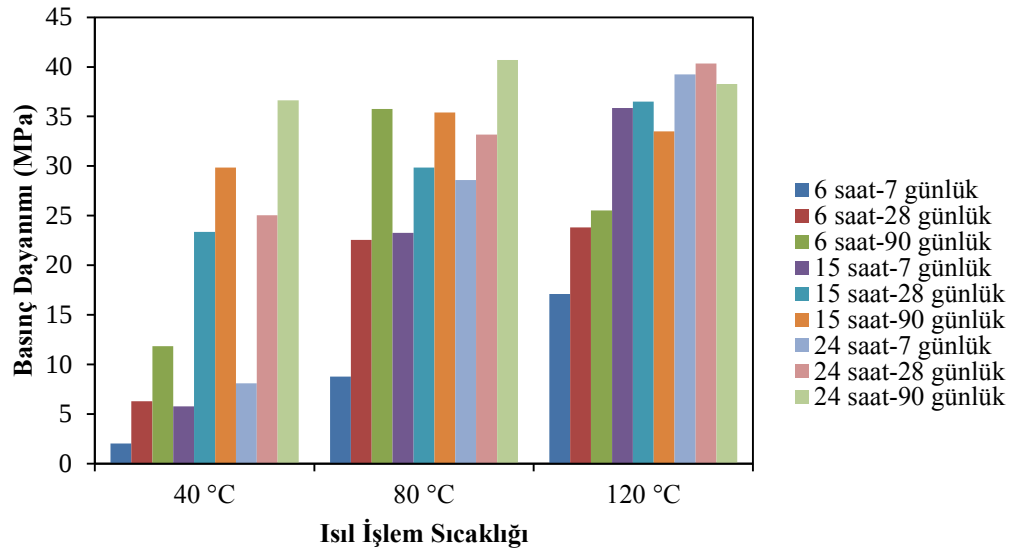
Alkali derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde kür edilerek elde edilen numunelerin basınç dayanımlarına ısıtıl işlem süresinin etkisini araştırılmıştır.

40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numuneler için 7 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında yaklaşık doğrusal bir artış görölmektedir. 28 ve 90 günlük sürelerde yaşlandırılan numunelerde ise sürenin 6 saatten 15 saate arttırılması ile daha yüksek bir artış olduğı gözlenmektedir. 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları 6 saat ısıtıl işlem süresinde 6,27 MPa iken 15 saatlik sürede % 272 artarak 23,37 MPa'a ulaşmış, 24 saat işlem gören numunenin dayanımı ise 25,05 MPa olarak ölçölmüştür. 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları ise 6, 15 ve 24 saatlik ısıtıl işlem süreleri için sırasıyla 11,85, 29,85 ve 36,62 MPa'dır.

80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gördükten sonra 7 ve 28 gün süre ile yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarında ısıtıl işlem süresinin artması ile artış sağlanmıştır. 7 gün yaşlandırma süresinin olduğu numunelerde ısıtıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate çıkması ile basınç dayanımında da belirgin bir artış gözlenerek 8,78 MPa olan dayanım 23,25 MPa'a, sürenin 24 saate arttırılması ile 28,6 MPa'a ulaşmıştır. 90 gün süre ile yaşlandırılmış numunelerde ise ısıtıl işlem süresi 6 saatten 15 saate arttırıldığında, basınç dayanımı 35,76 MPa'dan 35,39 MPa'a düşmüştür. Sürenin 24 saate arttırılması ile dayanımında da bir artış gözlenmiş ve 40,69 MPa dayanım değeri elde edilmiştir.

120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören ve 7 gün yaşlandırılan numunelerde, ısıtıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılmasıyla basınç dayanımında yaklaşık 2 kat artış sağlanarak 17,1 MPa olan dayanım 35,87 MPa'a ulaşmıştır. Benzer şekilde 28 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerde de ısıtıl işlem süresinin artmasıyla basınç dayanımları artmıştır. Örnek vermek gerekirse, 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları 6, 15 ve 24 saatlik ısıtıl işlem süreleri için sırasıyla 23,81 MPa, 36,49 MPa ve 40,35 MPa olup, 90 günlük numunelerde ise sırasıyla 25,54 MPa, 33,5 MPa ve 38,29 MPa olan dayanım değerleri sağlanmıştır. 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan ve 24 saat işlem gören numunelerin basınç dayanım değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

Alkali derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 120°C'ta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunede 40,35 MPa olarak elde edilmiştir. Bu koşullarda elde edilen tüm sonuçlar Şekil 7.5'te verilmiştir.



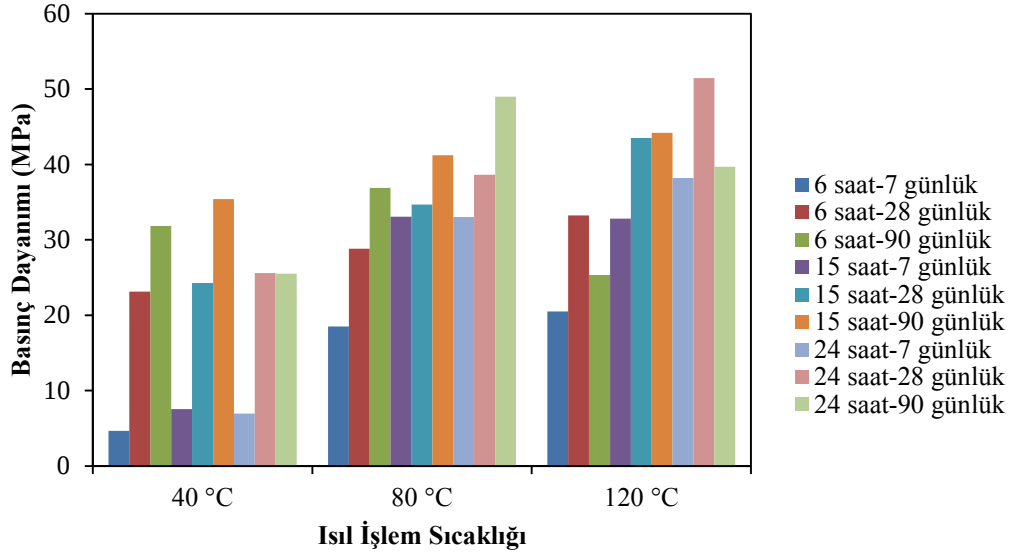
**Şekil 7.5.** 8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıl işlem sıcaklığı grafiğı

12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının ısıl işlem süresinin artması ile arttığı gözlenmektedir. Diğer numunelerin basınç dayanımları ise ısıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile artmış ancak sürenin 24 saate arttırılması ile dayanım değerlerinde bir miktar azalma meydana gelmiştir. En belirgin azalma 90 gün yaşlandırılan numunede görülmüştür. Burada 15 saatlik ısıl işlem süresinde 35,39 MPa olan basınç dayanımının, sürenin 24 saate yükseltilmesi ile 25,5 MPa'a düştüğü gözlenmiştir.

12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları ısıl işlem süresinin artmasıyla artmaktadır. Ayrıca 7 gün yaşlandırılan numunelerde sürenin 6 saatten 15 saate artmasıyla dayanımın daha fazla oranda arttığı gözlenmiştir.

120°C sıcaklıkta ısıl işlem gören ve 7 ve 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının ısıl işlem süresinin artmasıyla arttığı görülmekte, 90 gün yaşlandırılan numunelerde ise sürenin 6 saatten 15 saate arttırılması ile dayanım değerinde % 75 oranında bir artış görülürken sürenin 24 saate arttırılmasıyla basınç dayanımında %10,22 oranında azalma gözlenmektedir.

Şekil 7.6’da 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 6,15, 24 saat ısıt işlem gören numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerde en yüksek basınç dayanımı 120°C’ta 24 saat ısıt işlem görmüş ve 28 gün yaşlandırılmış numunede 51,45 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.6. 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıt işlem sıcaklığı grafiğı

### 7.3.1.2. Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi

Bu bölümde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarına ısıt işlem sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 6 saat süre ile ısıt işlem gören numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir. 7 gün yaşlandırılan numunelerde sıcaklığın 40°C’tan 80°C’a artırılması ile basınç dayanımlarında artma, 120°C’a artırılması ile dayanımlarda azalma gözlenmiştir. 28 günlük numunelerde ise sıcaklığın 40°C’tan 80°C’a artırılması ile basınç dayanımlarında çok düşük oranda bir azalma görülmektedir. Benzer şekilde 90 gün yaşlandırılan

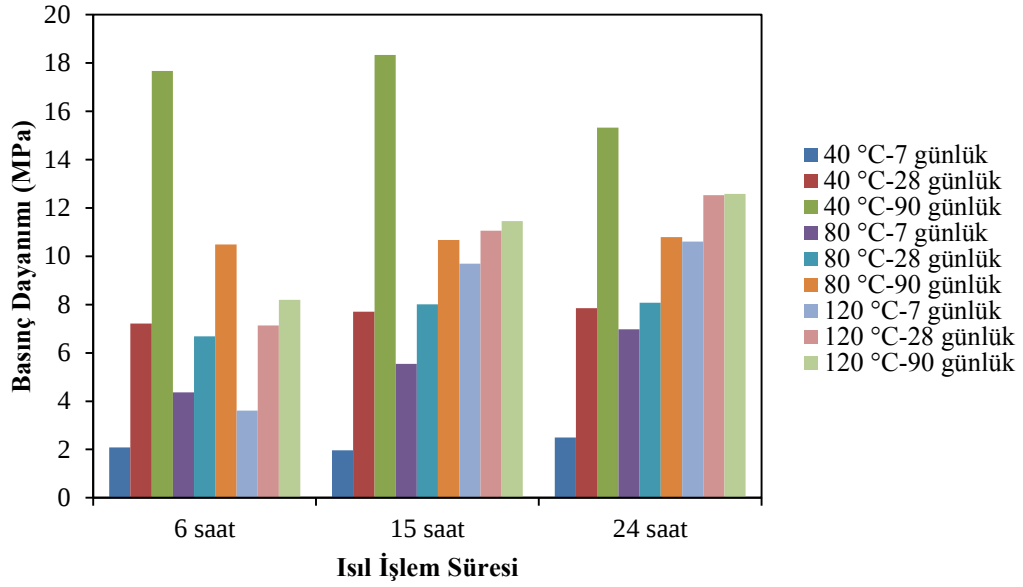
numunelerde ise ısıtıl işlem sıcaklığının arttırılması, basınç dayanımı değerlerinde önemli oranda azalmaya neden olmuştur. Burada sıcaklığın 80°C'a arttırılması ile basınç dayanımında %41 oranında, 120°C'a arttırılması ile % 23 oranında azalma görülmüştür.

Literatür çalışmalarında yüksek sıcaklıkların veya uzun süreli kür işleminin basınç dayanımını azalttığı ve geopolimer yapısında kırılmalara neden olduğu belirtilmiştir (Khale ve Chaudhary 2007; Fernández Pereira ve ark. 2009). Yüksek sıcaklıklarda veya uzun kür sürelerinde ortamdaki suyun buharlaşmasından dolayı yapıda boşluklar meydana geldiğinden geopolimerlerin yapılarını zayıflattığı düşünülmektedir.

Isıl işlem süresi 15 saat olan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde ısıtıl işlem sıcaklığının arttırılması ile 7 ve 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında artış sağlanmış, 90 gün yaşlandırılan numunelerde ise sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile dayanım değerlerinde %42 oranında bir azalma gözlenirken, sıcaklık 120°C'a arttırıldığında %7 oranında artış görülmüştür.

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan ve 24 saat ısıtıl işlem gören geopolimer numunelerinin basınç dayanımlarına işlem sıcaklığının etkisi incelendiğinde, 7 ve 28 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımlarının sıcaklığın arttırılması ile arttığı, 90 günlük numunelerin dayanımlarının ise sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile azaldığı, 120°C'a arttırılması ile arttığı görülmüştür.

Şekil 7.7, 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde kür edilen ve yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir.



**Şekil 7.7.** 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısııl işlem süresi grafiğı

8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 6 saat ısııl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarına ısııl işlem sıcaklığının etkisi araştırıldığında, sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile dayanımların büyük oranda arttığı gözlenmiştir. Bu artışın 7 gün yaşlandırılmış numunelerde %336, 28 gün yaşlandırılmış numunelerde %259 ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerde ise %201 olduğu bulunmuştur. Sıcaklığın daha da arttırılarak 120°C'a ulaşması ile 7 ve 28 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımları artarken 90 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımlarında %29 oranında azalma olduğu görölmüştür. Basınç dayanımındaki azalmanın yüksek sıcaklıklarda uzun süre ısııl işlem gören numunelerde suyun buharlaşmasından dolayı yapının kırılgan hale gelmesinden kaynaklandığı düşünölmektedir.

Aynı derişime sahip 15 saat ısııl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 7 gün süre ile yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında sıcaklığın 80°C'a arttırılmasıyla %302 oranında, 120°C'a arttırılması ile %54 oranında artış sağlanmıştır. Benzer şekilde 28 gün süre ile yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında da sıcaklığın artması ile artış görölmüştür. 90 günlük numunelerde ise sıcaklık 40°C'tan 80°C'a arttırıldığında

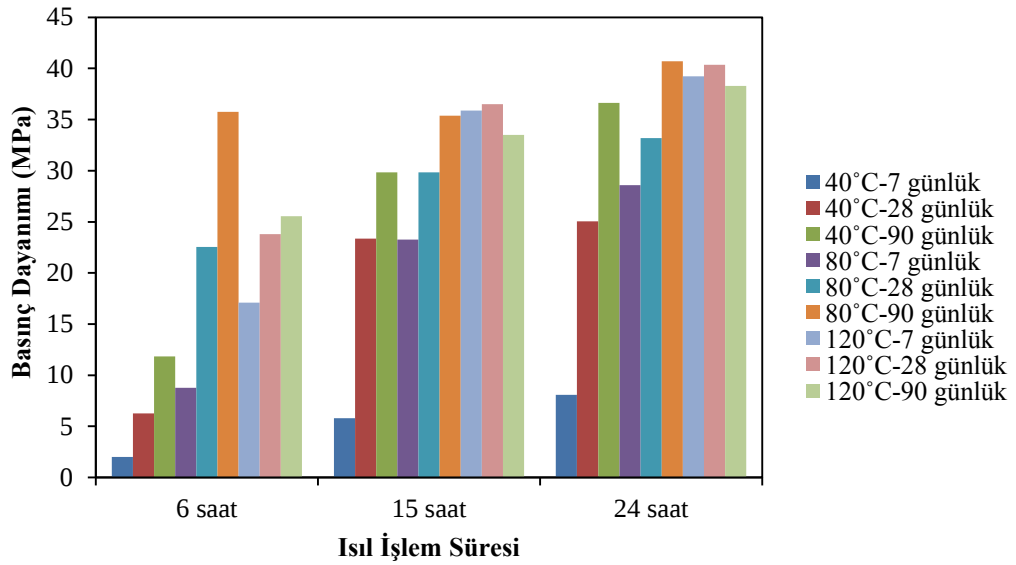
%19 oranında artış sağlanırken, 120°C'a arttırıldığında %5 oranında azalma gözlenmiştir.

Sodyum hidroksit derişimi 8M olan ve 24 saat süre ile farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem gören numunelerin dayanım değerleri incelenmiştir. Buna göre, 7 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının sıcaklığın artması ile büyük oranda arttığı görülmektedir. 28 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımlarında da sıcaklık artışı ile artış sağlanırken, 90 günlük numunelerin dayanımları sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile artmış, 120°C'a arttırılması ile azalmıştır.

Derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanılarak farklı koşullarda ısıtıl işlem gören ve 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 15 saat ve 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin dayanımlarına sıcaklığın etkisinin benzer olduğu gözlenmiştir. Bunun yanında 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılmış olan numunelerin basınç dayanımlarındaki artma ve azalma oranlarının yakın değerlerde olduğu bulunmuştur. Isıtıl işlem sıcaklığının arttırılması geopolimerizasyonu olumlu yönde etkilemiştir.

Erken yaşlarda sıcaklığın artmasıyla basınç dayanımı da artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda reaksiyon ürünlerinin miktarı fazla olduğundan geopolimerizasyon derecesi yüksektir. İleri yaşlarda ise geopolimerizasyon dereceleri neredeyse aynı olduğundan, reaksiyon ürünlerinin kalitesi baskın bir parametre olmaktadır (Rovnanik 2010; Lyu ve ark. 2013b). 90 gün yaşlandırılmış olan numunelerin basınç dayanımlarının azalmasının nedeninin numunenin yapısındaki suyun buharlaşmasından dolayı gözenekliliğin artması ve dayanımı olumsuz etkilemesi olduğu düşünülmektedir.

Numunelerin basınç dayanımlarına ısıtıl işlem sıcaklığı ile değişimleri Şekil 7.8'de verilmiştir.



**Şekil 7.8.** 8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtılma süresi grafiğı

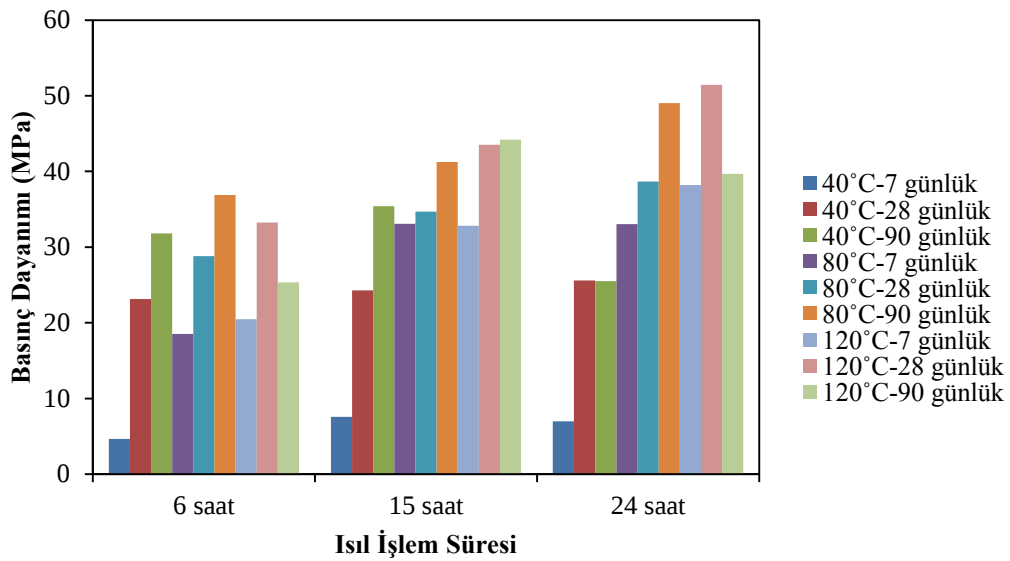
12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan ve farklı sıcaklıklarda 6 saat ısıtılma görmüş numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 7 ve 28 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımlarında sıcaklığın artması ile artış gözlenmiştir. Örnek vermek gerekirse, 7 günlük numunelerde sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile %298 oranında artış elde edilmiştir. 28 günlük numunelerin basınç dayanımlarında ise lineer bir artış görülmektedir. 90 günlük numunelerin dayanımları sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a artması ile %16 oranında artmış, ancak 120°C'a artması ile %31 oranında azalmıştır.

Aynı derişimde 15 saat ısıtılma görmüş 7 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarında sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile %338 oranında büyük artış gözlenmiştir. Benzer şekilde 28 ve 90 günlük numunelerde de sıcaklığın artması ile basınç dayanımlarında artma görülmüştür.

Derişimi 12M olan sodyum hidroksit kullanılarak 24 saat ısıtılma görmüş ve 7 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları sıcaklığın artması ile ilk aşamada yüksek oranda artmış, 28 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları ise sıcaklığın artması ile lineer bir artış göstermiştir. Bunun yanında, 90 gün yaşlandırılmış numunelerde sıcaklığın 80°C'a artması ile

dayanımlar artarken, 120°C'a arttırılması ile basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir.

12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarına ısıtıl işlem sıcaklığının etkisi incelendiğinde, 7 ve 28 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımlarındaki artışların benzer olduğu gözlenmiş, 90 gün yaşlandırılmış numunelerde ise 6 saat ve 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerde dayanımlar sıcaklığın artması ile önce artmış, daha sonra azalmıştır.



**Şekil 7.9.** 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı

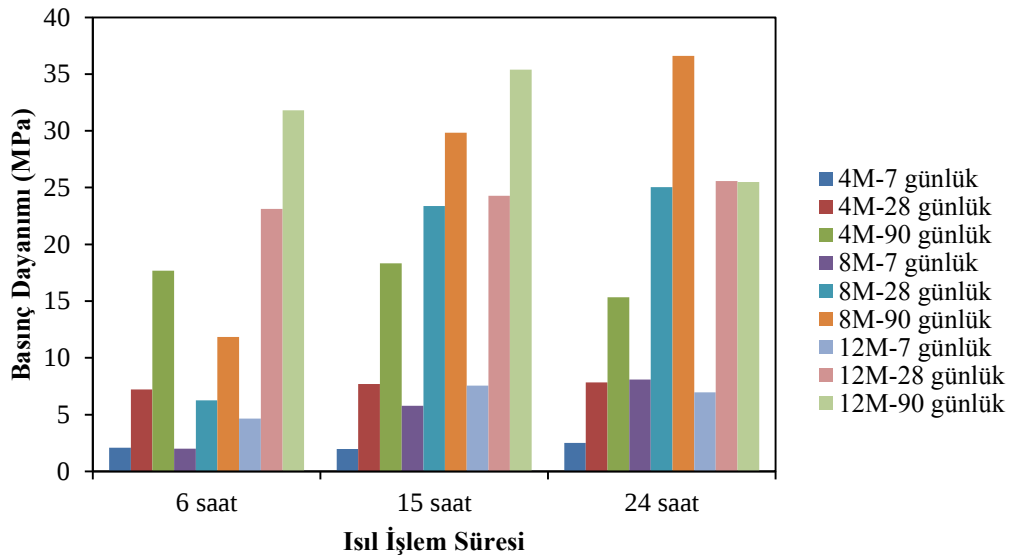
#### **7.3.1.3. Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi**

Geopolimer numunelerinin basınç dayanımları üzerine alkali derişiminin etkisinin incelenmesi amacıyla sabit sıcaklık ve sürelerde 4M, 8M ve 12M sodyum hidroksit çözeltisi ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarının derişim ile değışimi araştırılmıştır.

40°C sıcaklıkta 6 saat süre ile ısıtılmış numunelerin basınç dayanımlarına derişimin etkisi incelenmiştir. Sodyum hidroksit derişiminin 4M'dan 8M'a arttırılması ile 28 ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Sodyum hidroksit derişiminin 12M'a arttırılması ile basınç dayanımlarında yüksek oranlarda artış sağlanmış, en yüksek artış ise %169 ile 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarında görülmüştür.

40°C sıcaklıkta 15 saat süre ile ısıtılmış numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 6 saat süre ile ısıtılmış numunelerin tersine derişimin 4M'dan 8M'a arttırılması ile artış göstermiştir. Sodyum hidroksit derişiminin 12M'a arttırılması ile basınç dayanımlarının artmaya devam ettiği görülmüştür. 24 saat süre ile ısıtılmış numunelerin basınç dayanımları, derişimin 8M'a arttırılması ile artmıştır. Alkali derişimi 12M'a arttırıldığında ise 7 ve 90 gün süre ile yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının azaldığı, 28 gün süre ile yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının değişmediği gözlenmiştir.

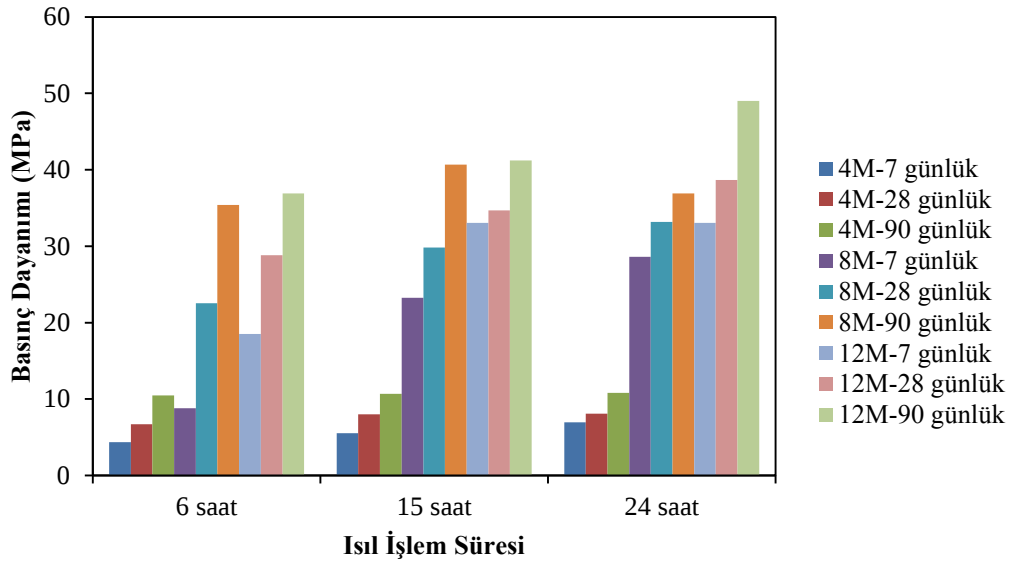
40°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtılmış numunelerin basınç dayanımlarının sodyum hidroksit derişimi ile değişimi Şekil 7.10'da verilmiştir.



**Şekil 7.10.** 40°C sıcaklıkta ısıtılmış ve sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtılmış işlem süresi grafiği

Şekil. 7.11, 80°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir. 80°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerde sodyum hidroksit derişiminin artması ile 80°C sıcaklıkta 6 saat süre ile ısıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları artmakta, en yüksek artış oranı ise derişim 8M'a arttırıldığında gözlenmektedir. Sodyum hidroksit derişiminin 4M'dan 12M'a arttırılması ile basınç dayanımlarının yaklaşık 4 kat arttığı gözlenmiştir.

80°C sıcaklıkta ve 15 saat ısıl işlem süresinde alkali derişiminin arttırılması ile basınç dayanımlarının arttığı, en fazla artış oranının derişimin 4M'dan 8M'a arttırılması ile sağlandığı gözlenmiştir. 7 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımları %319, 28 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımları %272, 90 gün yaşlandırılmış numunelerin ise basınç dayanımları %231 oranında artmıştır. Aynı sıcaklıkta 24 saat ısıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarının sodyum hidroksit derişiminin artması ile arttığı görülmektedir. Dayanım değerleri değişiminin 15 saat ısıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarının değişimi ile benzer olduğu gözlenmiştir.

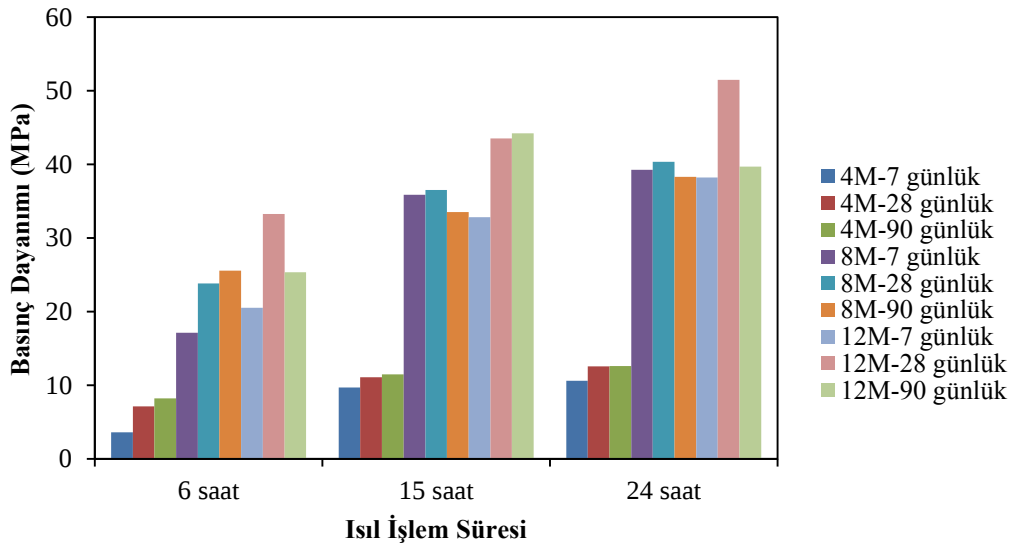


Şekil 7.11. 80°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş ve sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıl işlem süresi grafiği

40°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarının sodyum hidroksit derişimi ile değişimi şekil 7.12’de verilmiştir. 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarının sodyum hidroksit derişiminin 4M’dan 8M’a artması ile arttığı görülmektedir. Buna karşın, derişim 12M’a arttırıldığında 7 ve 28 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımlarında artış gözlenirken, 90 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımlarında artış olmadığı belirlenmiştir.

15 saat ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarının alkali derişiminin 4M’dan ve 8M’a arttırılması ile arttığı görülmüştür. Derişimin 8M’dan 12M’a arttırılması ile 28 ve 90 günlük numunelerin dayanımları artarken 7 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında bir miktar azalma olduğu gözlenmiştir.

Sodyum hidroksit derişiminin 4M’dan 8M’a arttırılması ile 120°C sıcaklıkta 24 saat süre ile ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. Derişimin 12M’a arttırılması ile 7 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin dayanım değerlerinde artış gözlenmezken, 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür.



**şekil 7.12.** 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiği

### 7.3.2. Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımları

F sınıfı uçucu külün alkali çözelti olarak potasyum hidroksit kullanılarak aktifleştirilmesiyle üretilen ve farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtılma işlemi uygulanan geopolimer numunelerinin basınç dayanımları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 7.11’de 4M derişiminde potasyum hidroksit çözeltisi kullanılarak elde edilen ve 40°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi gören numunelerin dayanım değerleri yer almaktadır.

**Çizelge 7.11.** 4M derişiminde KOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 4M      | 40            | 6           | 1,99                           | 10,63                           | 15,21                           |
| 4M      | 40            | 15          | 6,65                           | 9,19                            | 10,56                           |
| 4M      | 40            | 24          | 3,65                           | 8,75                            | 12,38                           |

4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak 40°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi gören numunelerin basınç dayanımlarının numunenin yaşlandırılması ile arttığı gözlenmiştir. Numunelerin yaşlarının 7 günden 28 güne artması ile dayanımların daha belirgin oranda arttığı görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı 6 saat ısıtılma işlemi görmüş ve 90 gün yaşlandırılmış numune için 15,21 MPa olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.12, 80°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi gören numunelerin dayanım değerlerini göstermektedir.

**Çizelge 7.12.** 4M derişiminde KOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 4M             | 80                       | 6                      | 2,94                                              | 9,01                                               | 12,22                                              |
| 4M             | 80                       | 15                     | 5,04                                              | 7,68                                               | 10,56                                              |
| 4M             | 80                       | 24                     | 8,44                                              | 12,41                                              | 13,02                                              |

80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarının numunenin yaşlandırılması ile arttığı gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 24 saat ısıtıl işlem görmüş ve 90 gün yaşlandırılmış numune için 13,02 MPa olarak bulunmuştur. Çizelge 7.13'te, aynı derişimde 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerin dayanım değerlerini göstermektedir.

**Çizelge 7.13.** 4M derişiminde KOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 4M             | 120                      | 6                      | 3,56                                              | 5,79                                               | 8,10                                               |
| 4M             | 120                      | 15                     | 12,31                                             | 12,96                                              | 12,55                                              |
| 4M             | 120                      | 24                     | 13,12                                             | 13,69                                              | 12,81                                              |

Isıtıl işlem sıcaklığı 120°C olan 15 ve 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerde, yaşın artırılması ile basınç dayanımlarının değişmediği görülmüştür. 6 saat ısıtıl işlem gören numunelerde ise numune yaşının artması ile

basınç dayanımları artmıştır. En yüksek basınç dayanımı 13,69 MPa olarak 24 saat ısıtıl işlem gören numunede sağlanmıştır.

8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları Çizelge 7.14-7.16'da verilmiştir. Çizelge 7.14'te 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları gösterilmiştir

**Çizelge 7.14.** 8M derişiminde KOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 8 M     | 40            | 6           | 2,02                           | 10,27                           | 21,51                           |
| 8 M     | 40            | 15          | 12,67                          | 15,66                           | 17,18                           |
| 8 M     | 40            | 24          | 7,38                           | 17,03                           | 17,95                           |

Isıl işlem sıcaklığı 40°C olan numunelerin basınç dayanımları, numune yaşının artması ile artmıştır. Numune yaşının 7 günden 28 güne artması ile 6 ve 24 saat ısıtıl işlem sürelerinde dayanımların daha belirgin oranda arttığı görülmüştür. Numune yaşı 90 güne arttırıldığında 6 saat ısıtıl işlem gören numunelerin dayanımları 2 kat artmıştır. 15 saat ısıtıl işlem gören numunelerin dayanımları düşük oranda artarken, 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin dayanımlarının değişmediği gözlenmiştir. 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerde en yüksek basınç dayanımı 17,95 MPa olarak 24 saat ısıtıl işlem gören numunede elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı ise 2,02 MPa olarak 6 saat ısıtıl işlem gören numunede görülmüştür.

80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları Çizelge 7.15'te verilmiştir.

**Çizelge 7.15.** 8M derişiminde KOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 8 M            | 80                       | 6                      | 8,96                                              | 18,31                                              | 18,71                                              |
| 8 M            | 80                       | 15                     | 31,03                                             | 37,39                                              | 40,71                                              |
| 8 M            | 80                       | 24                     | 25,04                                             | 32,74                                              | 31,95                                              |

80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde yaşlandırma süresi ile basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Basınç dayanımı en yüksek 40,71 MPa olarak 15 saat ısıtıl işlem görmüş ve 90 gün yaşlandırılmış numunede elde edilmiştir.

Çizelge 7.16.'da ısıtıl işlem sıcaklığı 120°C olan numunelerin 7, 28 ve 90 gün yaşlarında elde edilen basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 7.16.** 8M derişiminde KOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| <b>Derişim</b> | <b>Sıcaklık<br/>(°C)</b> | <b>Süre<br/>(saat)</b> | <b>7 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>28 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> | <b>90 Günlük<br/>Basınç<br/>Dayanımı<br/>(MPa)</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 8 M            | 120                      | 6                      | 21,24                                             | 23,8                                               | 26,35                                              |
| 8 M            | 120                      | 15                     | 29,42                                             | 24,54                                              | 30,35                                              |
| 8 M            | 120                      | 24                     | 35,22                                             | 34,85                                              | 34,23                                              |

120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarının numune yaşı ile arttığı ancak artışın 40°C ve 80°C sıcaklıklarda ısıtıl işlem gören numunelerin dayanımlarında gözlenen oranda olmadığı görülmüştür.

12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 6, 15 ve 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları değerleri Çizelge 7.17-7.19’da verilmiştir.

**Çizelge 7.17.** 12M derişiminde KOH kullanılarak 40°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 12 M    | 40            | 6           | 2,66                           | 22,68                           | 29,66                           |
| 12 M    | 40            | 15          | 20,26                          | 25                              | 27,77                           |
| 12 M    | 40            | 24          | 12,1                           | 26,27                           | 23,6                            |

Derişimi 12M olan potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımının 6 saat ısıtıl işlem görmüş ve 90 gün yaşlandırılmış numunede 29,66 MPa olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.18’de ısıtıl işlem sıcaklığı 80°C olan numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.

**Çizelge 7.18.** 12M derişiminde KOH kullanılarak 80°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 12 M    | 80            | 6           | 34,83                          | 30,71                           | 25,68                           |
| 12 M    | 80            | 15          | 44,47                          | 49,82                           | 49,93                           |
| 12 M    | 80            | 24          | 35,06                          | 39,07                           | 34,51                           |

Isıl işlem sıcaklığı 80°C olan ve 6 saat ısıtım gören numunelerin dayanımları yaşın artmasıyla azalırken, 15 saat ısıtım gören numunenin basınç dayanımı artış göstermiştir. Isıl işlem süresi 24 saat olan numunelerde ise yaşın 7 günden 28 güne artmasıyla basınç dayanımı artarken, 90 güne artmasıyla dayanımın azaldığı gözlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 24 saat ısıtım görmüş ve 28 gün yaşlandırılmış numunede 40,71 MPa olarak bulunmuştur.

**Çizelge 7.19.** 12M derişiminde KOH kullanılarak 120°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımları

| Derişim | Sıcaklık (°C) | Süre (saat) | 7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) | 90 Günlük Basınç Dayanımı (MPa) |
|---------|---------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 12 M    | 120           | 6           | 24,61                          | 23,81                           | 26,68                           |
| 12 M    | 120           | 15          | 31,28                          | 34,06                           | 29,7                            |
| 12 M    | 120           | 24          | 38,14                          | 42,79                           | 59,95                           |

120°C sıcaklıkta ısıtım gören numunelerde en yüksek basınç dayanımı 59,95 MPa olarak 24 saat ısıtım gören ve 90 gün yaşlandırılan numunede elde edilmiştir.

### **7.3.2.1. Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi**

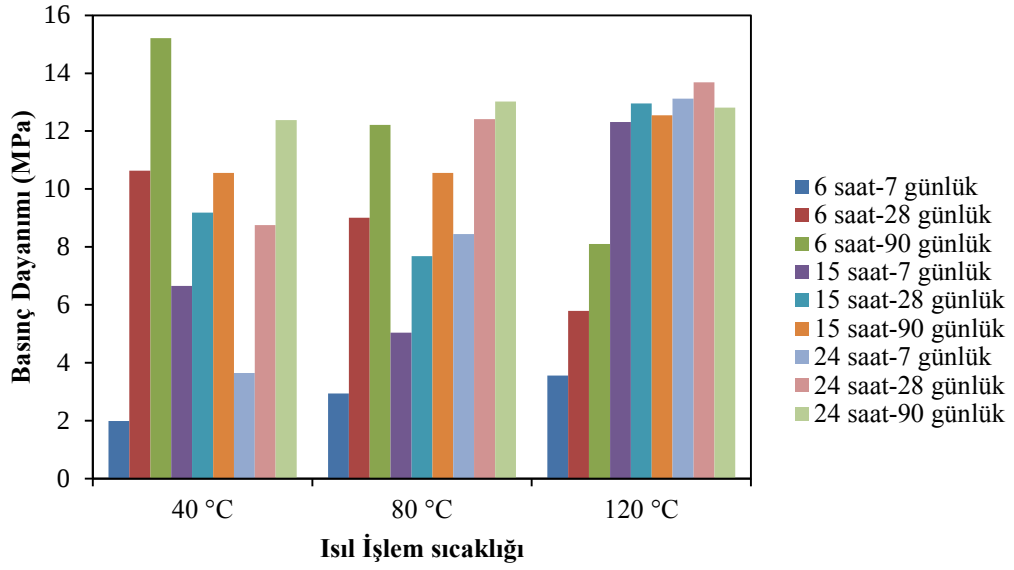
Bu bölümde alkali çözelti olarak potasyum hidroksit kullanılan geopolimer numunelerinin basınç dayanımlarına ısıtılma süresinin etkisi araştırılmıştır.

Alkali derişimi 4M olan potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 40°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi gören numunelerin 7 gün yaşlandırma süresinde basınç dayanımlarının ısıtılma süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile 1,99 MPa'dan 6,65 MPa'a arttığı, 24 saate arttırılması ile 3,65MPa değerine azaldığı gözlenmiştir. Buna karşın, 28 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımları ısıtılma süresinin artması ile azalmıştır. 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında ise 7 günlük numunelerin aksine ısıtılma süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile basınç dayanımı 15,21 MPa'dan 10,56 MPa'a düşmüş, 24 saate arttırılması ile 12,38 MPa değerine yükselmiştir.

80°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmüş ve 7 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının ısıtılma süresinin artması ile arttığı gözlenmiştir. 28 gün ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının ise ısıtılma süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile bir miktar azalmakla beraber, sürenin 24 saate arttırılması ile arttığı görülmüştür.

Isıl işlem sıcaklığı 120°C olan numunelerin basınç dayanımlarının ısıtılma süresinin artması ile arttığı görülmüştür. En yüksek artış % 246 oranında 7 gün yaşlandırılmış numuneler için ısıtılma süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile sağlanmıştır. Bunun yanında 28 ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının 15 ve 24 saat ısıtılma süreleri için birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7.13'te 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde kür edilen ve yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.



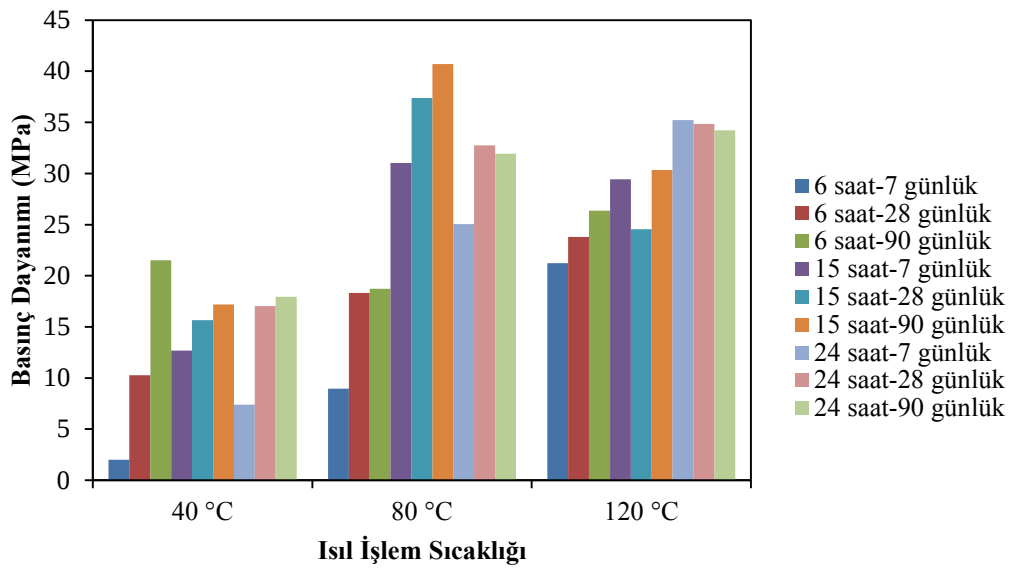
**Şekil 7.13** 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıl işlem sıcaklığı grafiğı

8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımlarına ısıl işlem süresinin etkisinin, aynı işlem koşullarında 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numuneler ile benzer olduğu görülmektedir. 40°C sıcaklıkta ısıl işlem gören ve 7 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları, ısıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile 2,02 MPa'dan 12,67 MPa'a yükselmiş, sürenin 24 saate arttırılması ile 7,38 MPa'a düşmüştür. Bunun yanında 28 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımları ısıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile 10,27 MPa'dan 15,66 MPa'a artmış, 24 saate arttırılması ile 17,03 MPa'a azalmıştır. 90 gün yaşlandırılan numunelerin dayanımlarının ise ısıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile %21 oranında azaldığı, sürenin 24 saate arttırılması ile değişmediği gözlenmiştir.

80°C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulan numunelerin basınç dayanımlarının ısıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate çıkarılması ile yüksek oranda arttığı görülmüştür. Buna karşın, ısıl işlem süresinin 24 saate arttırılması ile dayanım değerlerinin azaldığı gözlenmiştir.

120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem uygulanarak elde edilmiş numunelerin basınç dayanımlarının ısıtıl işlem süresi ile arttığı görülmüştür. 28 gün yaşılandırılmış numunelerin basınç dayanımları 6 saat ısıtıl işlem süresi için 23,8 MPa iken 15 saat ısıtıl işlem süresi için 24,54 MPa olarak ölçülmüştür. Isıtıl işlem süresinin 24 saate arttırılması ile basınç dayanımı 34,85 MPa değerine çıkmıştır.

Alkali derişimi 8M olan potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin tüm basınç dayanımları Şekil 7.14'te gösterilmiştir.



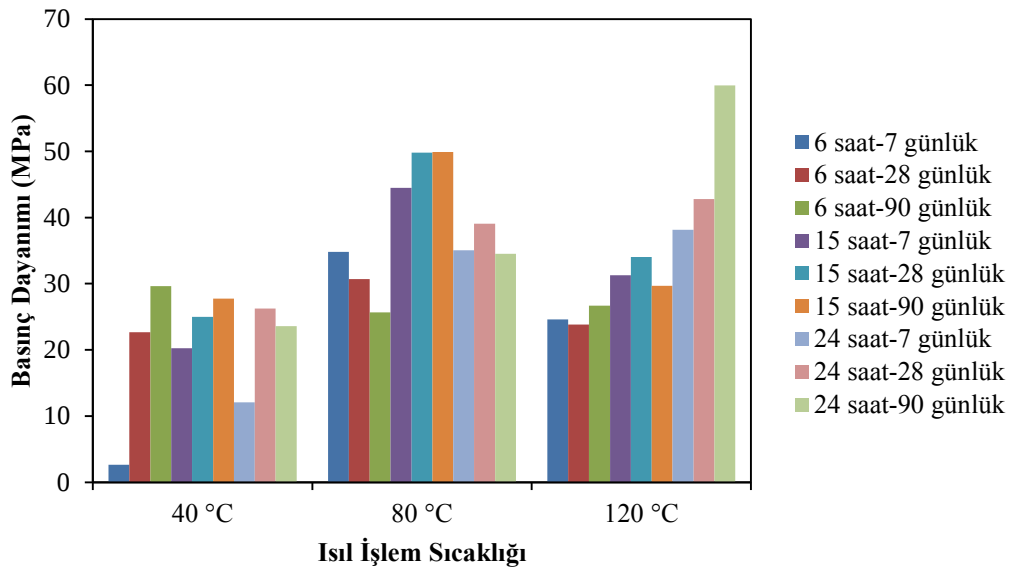
**Şekil 7.14.** 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem sıcaklığı grafiğı

Derişimi 12M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görerek 7 gün yaşılandırılan numunelerin basınç dayanımlarının ısıtıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile 2,66 MPa'dan 20,26 MPa değerine azaldığı, ancak ısıtıl işlem süresinin 24 saate çıkarılması ile 12,1 MPa değerine ulaştığı görülmektedir. 28 gün yaşılandırılmış numunelerin basınç dayanımları ısıtıl işlem süresinin artması ile artmıştır. 90 gün yaşılandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının ise ısıtıl işlem süresinin artması ile azaldığı görülmüştür. 6 saat ısıtıl işlem süresi için 29,66 MPa basınç dayanımı sağlanırken ısıtıl işlem süresi 24 saate çıktığında dayanım 23,6 MPa'a düşmüştür.

80°C sıcaklıkta elde edilen numunelerin basınç dayanımlarına ısıtma işlem süresinin etkisinin 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımına etkisi ile benzer olduğu gözlenmiştir. Isıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile basınç dayanımlarının arttığı, sürenin 24 saate arttırılması ile dayanımların azaldığı görülmüştür. Burada 90 gün yaşlandırılmış numunelerde azalma daha belirgindir.

12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtma işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarının ısıtma işlem süresinin artması ile arttığı belirlenmiştir. Ayrıca ısıtma işlem süresinin 15 saatten 24 saate arttırılması, 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarını %102 oranında arttırmıştır.

Şekil 7.15'te 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak farklı ısıtma işlem koşullarında elde edilen numunelerin basınç dayanımları verilmiştir.



**Şekil 7.15.** 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtma işlem sıcaklığı grafiğı

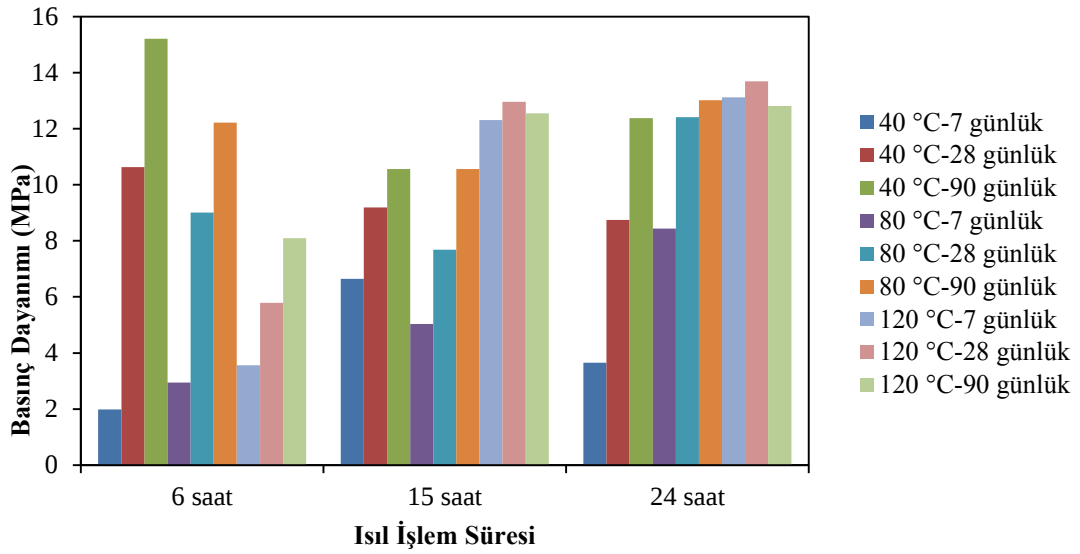
### **7.3.2.2. Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi**

Bu bölümde farklı derişimlerde potasyum hidroksit kullanılarak üretildikten sonra 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıt işlem uygulanan numunelerin basınç dayanımlarına ısıt işlem sıcaklığının etkisi incelenmiştir.

40°C ısıt işlem sıcaklığında 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan ve 6 saat süre ile ısıt işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 7 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımlarının ısıt işlem sıcaklığının arttırılması ile arttığı, 28 ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının ise ısıt işlem sıcaklığının arttırılması ile belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir.

Isıt işlem süresi 15 saat olan numunelerin basınç dayanımları ısıt işlem sıcaklığının 40°C'tan 80°C'a artması ile azalmış, 120°C'a artması ile artmıştır. 24 saat süre ile ısıt işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, 7 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımlarının ısıt işlem sıcaklığının 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile %131 oranında, 120°C'ye arttırılması ile %55 oranında arttığı gözlenmiştir. 28 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımları ısıt işlem sıcaklığının artması ile artarken 90 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımları sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile 12,38 MPa'dan 13,02 MPa'a artmış, sıcaklığın 120°C'ye arttırılması ile 12,81 MPa'a azalmıştır.

4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımları Şekil 7.16'da verilmiştir.



**Şekil 7.16.** 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısııl işlem süresi grafiğı

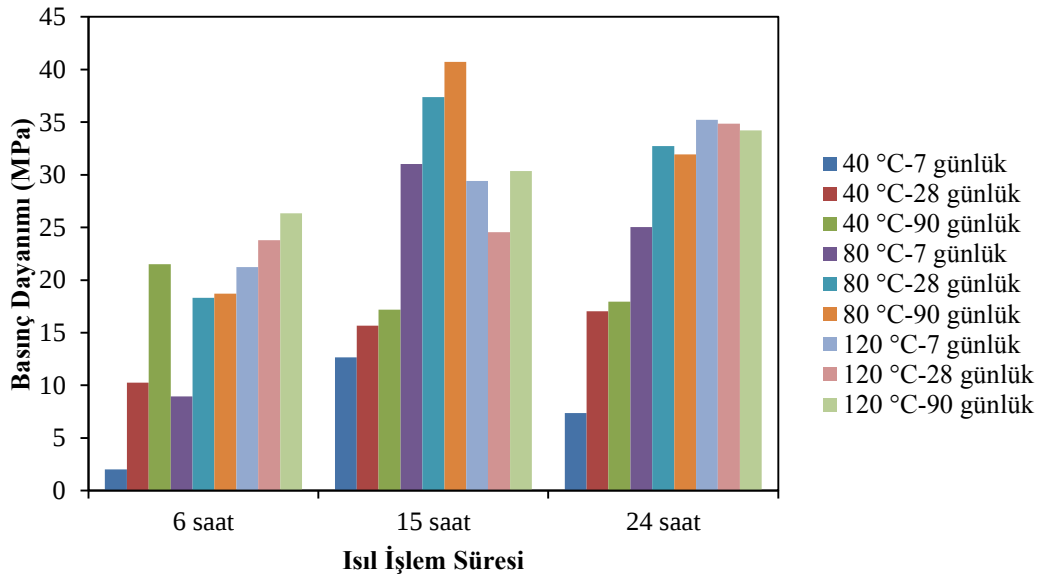
8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımlarının ısııl işlem sıcaklığı ile değışimi incelendiğinde 6 saat ısııl işlem gören ve 7 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile % 344 oranında, 120°C'a arttırılması ile %137 oranında arttığı görülmektedir. Benzer şekilde 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları da ısııl işlem sıcaklığının arttırılması ile artmaktadır. 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile 21,51 MPa'dan 18,71 MPa'a azaldığı, 120°C'a arttırılması ile 26,35 MPa'a arttığı belirlenmiştir.

Isıl işlem süresi 15 saat olan numunelerde ise ısııl işlem sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının arttığı, sıcaklığın 120°C'a arttırılması ile ise azaldığı görülmektedir. Burada 7 gün yaşlandırılan numuneler için dayanımlardaki azalma oranı %6 iken, bu oran 28 gün yaşlandırılan numuneler için %35, 90 gün yaşlandırılan numuneler için ise %44 olarak ölçülmüştür.

24 saat süre ile ısııl işlem görmüş 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları, ısııl işlem sıcaklığının arttırılması ile artmış, en yüksek artış oranı ise 7 gün yaşlandırılan numunelerde görülmüştür. Örneğın,

40°C'ta 7,38 MPa olan basınç dayanımı sıcaklığın 80°C'a arttırılması ile 25,04 MPa'a, 120°C'a arttırılması ile 35,22 MPa'a artmıştır. Elde edilen sonuçlarda 28 gün ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmüştür.

Şekil 7.17'de 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numunelerin tüm basınç dayanımları verilmiştir.



**Şekil 7.17.** 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısııl işlem süresi grafiğı

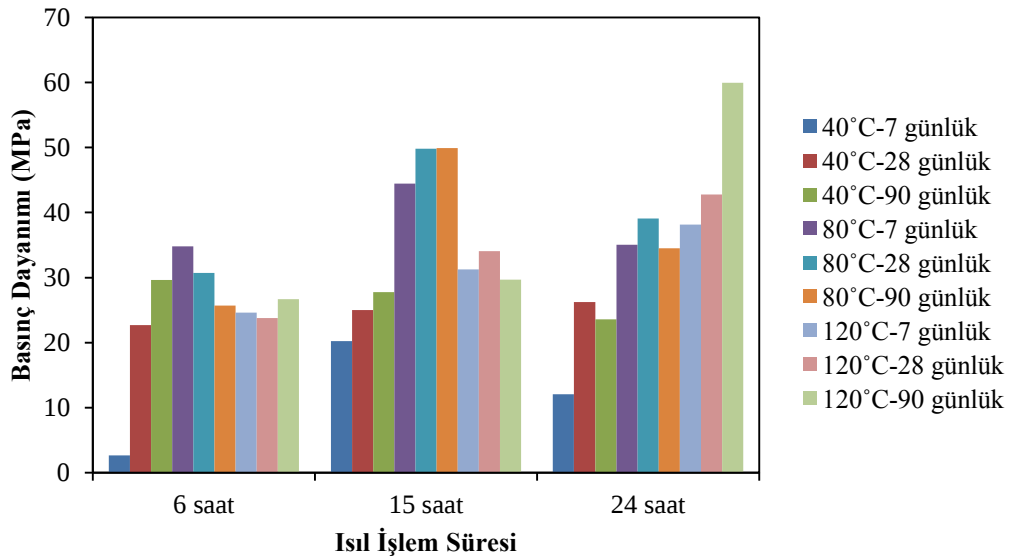
Potasyum hidroksit derişimi 12M olan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 6 saat süre ısııl işlem gören ve 7 gün yaşlandırılmış numuneler için ısııl işlem sıcaklığının arttırılması ile basınç dayanımlarında çok yüksek oranda artış gözlenmiştir. Örneğın, 40°C'ta 2,66 MPa olan basınç dayanımı sıcaklık 80°C'a arttırıldığında 34,83 MPa'a yükselmiştir. Sıcaklığın 120°C'a arttırılması basınç dayanımının 24,61 MPa'a düşmesine neden olmuştur. 28 gün yaşlandırılmış numuneler için de ısııl işlem sıcaklığının dayanımlar üzerine etkisi 7 günlük numunelerin dayanımları ile benzerdir ancak artış oranı çok yüksek değildir. Isıl işlem sıcaklığı 40°C iken 22,68 MPa olan basınç dayanımı sıcaklığın 80°C'a artması ile 30,71 MPa'a artmış, 120°C'a arttırılması ile 23,81 MPa'a

azalmıştır. 90 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanım değerlerinde ise farklı bir etki gözlenmiştir. Sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile basınç dayanımı 29,66 MPa'dan 25,68 MPa'a azalmıştır. Isıl işlem sıcaklığı 120°C'a arttırıldığında ise basınç dayanımı çok az artarak 26,68 MPa olmuştur.

12M derişiminde potasyum hidroksit ile hazırlanan ve 15 saat ısıt işlem gören numunelerin basınç dayanımlarının sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile arttığı görülmüştür. Bu artış 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan numuneler için benzer olsa da basınç dayanımlarındaki en yüksek artış 7 gün yaşlandırılmış numunelerde gözlenmiştir. Sıcaklığın 120°C'a arttırılması ise en belirgin 90 gün yaşlandırılmış numunelerde olmak üzere basınç dayanımlarında azalmaya neden olmuştur.

24 saat süre ile ısıt işlem görmüş numunelerin basınç dayanımlarının ısıt işlem sıcaklığının artması ile artış görülmüştür. Sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile en yüksek artış % 189 ile 7 gün yaşlandırılmış numunelerde, ısıt işlem sıcaklığı 120°C'a arttırıldığında ise en yüksek artış %73,72 ile 90 gün yaşlandırılmış numunelerde görülmüştür.

Alkali derişimi 12M olan potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımlarının ısıt işlem sıcaklığı ile değişimi Şekil 7.18'de gösterilmiştir.



**Şekil 7.18.** 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıt işlem süresi grafiği

### **7.3.2.3. Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımlarına etkisi**

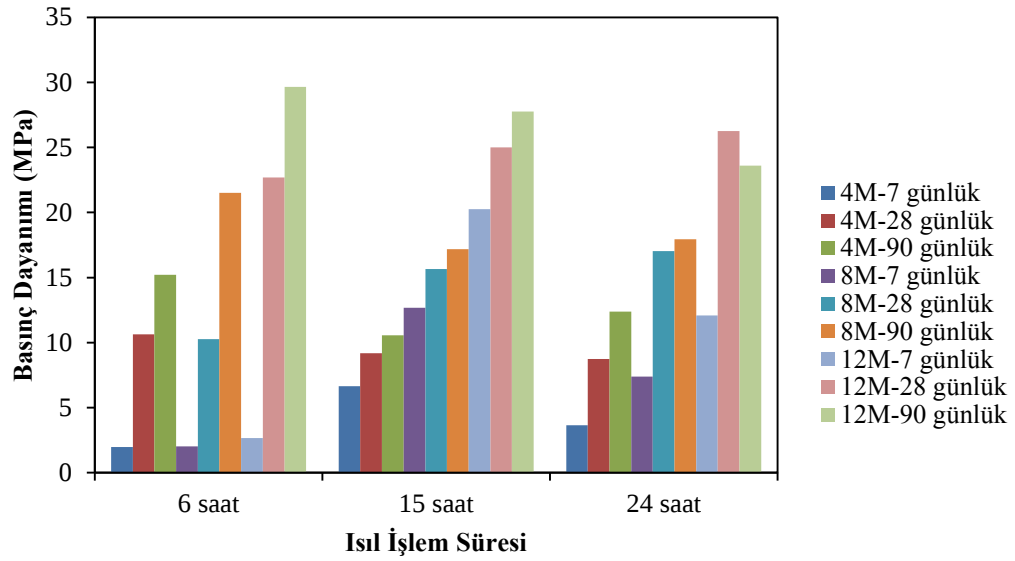
Bu bölümde alkali çözelti olarak potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen geopolimer numunelerinin basınç dayanımları üzerine derişimin etkileri incelenerek aşağıdaki şekillerde özetlenmiştir.

40°C sıcaklıkta 6 saat süre ile ısıtılmış ve 7 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının alkali derişiminin artırılması ile çok düşük oranda artmaktadır. 28 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının potasyum hidroksit derişiminin 4M'dan 8M'a artırılması ile 10,63 MPa'dan 10,27 MPa'a düşmekte, derişimin 12M'a artırılması ile 22,68 MPa'a yükselmektedir. 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları ise potasyum hidroksit derişiminin artırılması ile belirgin bir şekilde artmaktadır.

40°C sıcaklıkta 15 saat süre ile ısıtılmış numunelerin basınç dayanımları potasyum hidroksit derişiminin artması ile birlikte artmıştır. En yüksek artış 7 gün yaşlandırılmış numunelerde derişim 4M'dan 8M'a çıktığında %91 oranında gerçekleşmiştir. 28 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları %70, 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları ise %63 oranında artmıştır. Derişimin 8M'dan 12M'a artırılması ile sağlanan artış oranları bütün numuneler için yaklaşık %60 olarak belirlenmiştir.

24 saat ısıtılmış numuneler için potasyum hidroksit derişiminin artırılması ile numunelerin basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. 7 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları derişimin 4M'dan 8M'a artırılması ile 3,65 MPa'dan 7,38 MPa'a, 12M'a artırılması ile 12,1M Pa'a artmıştır. 28 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları derişimin 4M'dan 8M'a artırılması ile %95 oranında artarak 8,75 MPa'dan 17,03 MPa'a, 12M'a artırılması ile %54 oranında artarak 26,27 MPa değerine ulaşmıştır. 90 günlük numunelerin basınç dayanımları ise 4M, 8M ve 12M için sırasıyla 12,38 MPa, 17,95 MPa ve 23,6 MPa olarak ölçülmüştür.

40°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıtılmış numunelerin basınç dayanımlarının alkali derişimi ile değişimi Şekil 7.19'da verilmiştir.



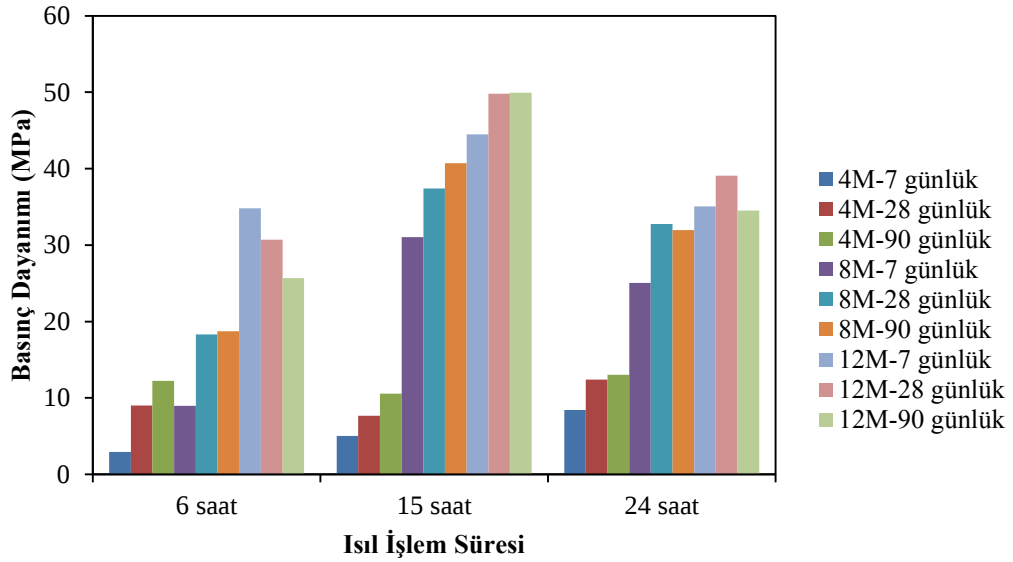
**Şekil 7.19.** 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiği

Isıl işlem sıcaklığı 80°C olan 6 saat sürede kür edilmiş numunelerin basınç dayanımlarının derişimin artması ile arttığı gözlenmiştir. En yüksek artış oranları, dayanım değerlerinin yaklaşık 4 kat arttığı 7 gün yaşlandırılmış numunelerde sağlanmıştır. 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak 28 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin dayanım değerlerinin yaklaşık olarak aynı olduğu, 12M derişiminde ise en yüksek dayanım değerinin 7 gün yaşlandırılmış numunelerde 34,83MPa olarak elde edildiği görülmüştür.

80°C'ta 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları potasyum hidroksit derişiminin arttırılması ile artmıştır. Derişimin 4M'dan 8M'a arttırılması ile basınç dayanımlarında elde edilen artış oranı, 8M'dan 12M'a arttırılması ile sağlanan artış oranından daha fazladır.

24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerde ise derişimin 4M'dan 8M'a artması ile 7 gün yaşlandırılmış numunelerde %198,68, 28 günlük numunelerde %163,82 ve 90 günlük numunelerde ise %143,4 oranında artış sağlanmıştır. Derişim 12M'a arttırıldığında ise 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılmış numuneler için sırasıyla %40, %19,33 ve %8 oranlarında artış elde edilmiştir.

80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımlarının derişim ile değışimi Şekil 7.20’de verilmiştir.



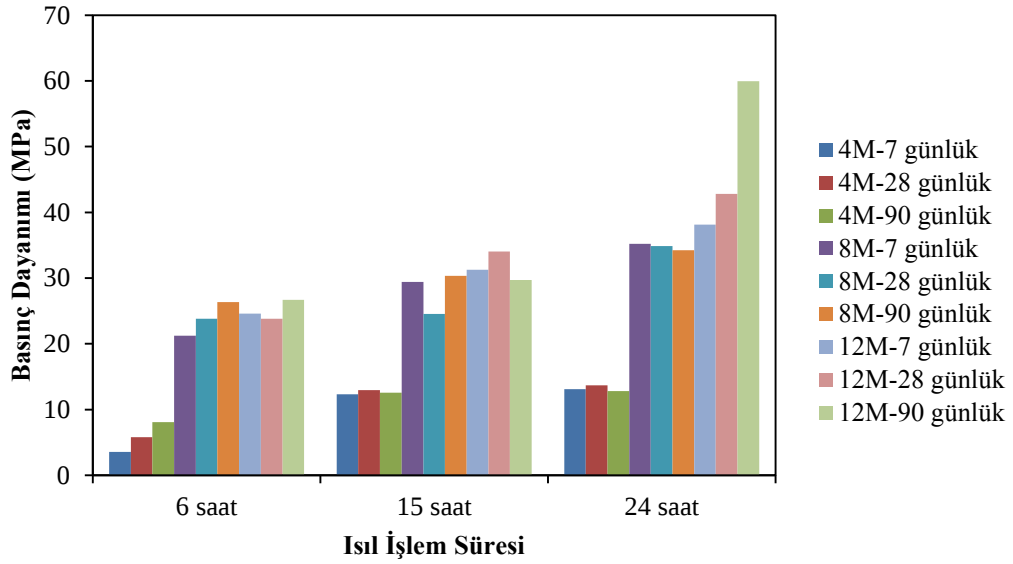
**Şekil 7.20.** 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı

120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde potasyum hidroksit derişiminin 4M’den 8M’a arttırılması ile 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarında yüksek oranlarda artış sağlanmıştır. En yüksek artış oranı 7 gün yaşlandırılmış numunelerde gözlenmiştir. Derişimin 8M’den 12M’a arttırılması ile 7 gün yaşlandırılmış numunelerde basınç dayanımı 21,24MPa’dan 24,61MPa’a artarken, 28 ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarının aynı kaldığı gözlenmiştir.

120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde alkali derişiminin arttırılmasının 7 ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarına etkisinin benzer olduğu gözlenmiştir. Bu numunelerin basınç dayanımları çok yakın değerlerde bulunmuştur. Derişimin 4M’den 8M’a arttırılması ile dayanım değerlerinde yaklaşık %140 oranında artış sağlanmıştır ancak derişimin 8M’den 12M’a arttırılması ile dayanımlarda artış gözlenmemiştir. 28 günlük numunelerde ise derişimin 4M’den 8M’a arttırılması

ile dayanım değerlerinde %89,35, 8M'dan 12M'a arttırılması ile %38,8 oranında artış elde edilmiştir.

24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanımlarının alkali derişiminin artması ile arttığı görülmüştür. Derişimin 8M'dan 12M'a arttırılması ile 7 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında %8,3, 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarında %2,28, 90 günlük numunelerde ise %75,14 oranında artış gözlenmiştir. 120°C sıcaklıkta farklı derişimler için elde edilen basınç dayanımları Şekil 7.21'de verilmiştir.

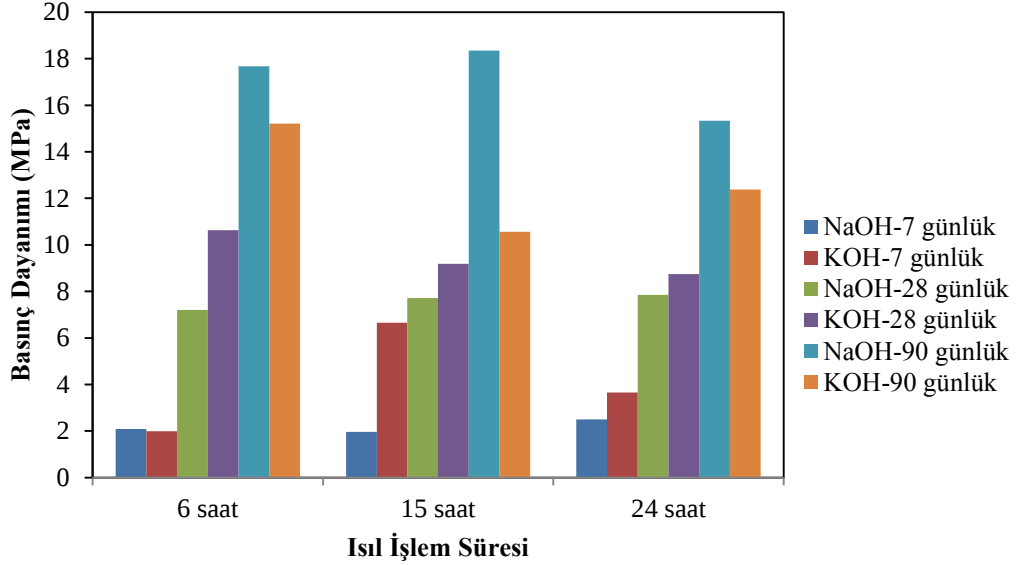


**Şekil 7.21.** 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin basınç dayanımları-ısıtıl işlem süresi grafiğı

### 7.3.3. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Geopolimerlerin basınç dayanımlarına katyon etkisinin incelenmesi amacıyla alkali çözelti olarak sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımları aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Şekil 7.22, 4M derişiminde alkali çözeltiler ile hazırlanan ve 40°C

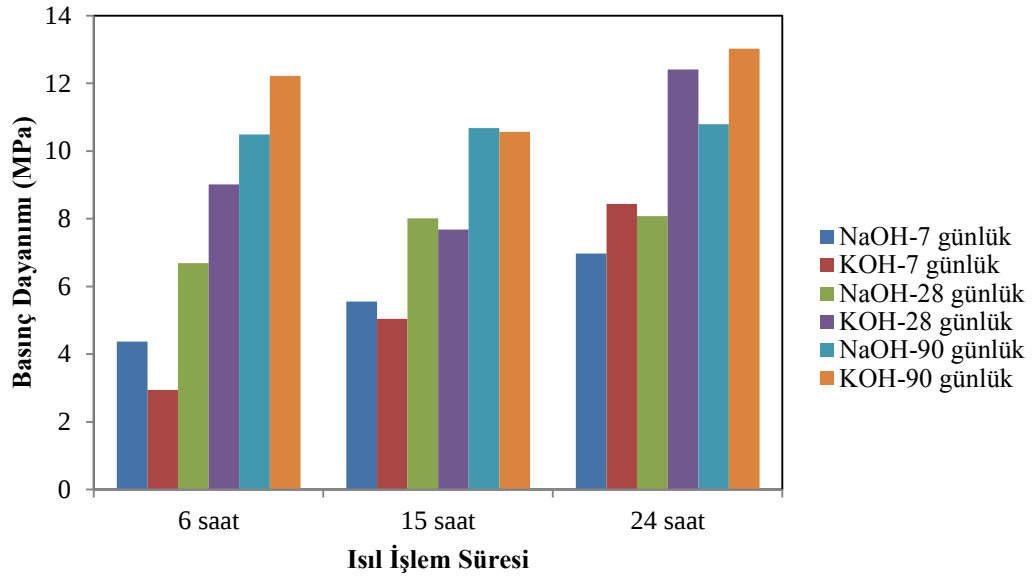
sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını göstermektedir.



**Şekil 7.22.** 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtıl işlem süresi grafiğı

40°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem süresi için potasyum hidroksit ile hazırlanan ve 7 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanımlarının sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerinkinden %4 oranında daha düşük olmasına rağmen, 15 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerde %239, 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerde ise %46 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür. 28 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları alkali çözelti olarak potasyum hidroksit kullanıldığında daha yüksek çıkmaktadır. 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, 7 ve 28 gün yaşlandırılan numunelerin aksine sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarının potasyum hidroksit ile hazırlananlardan daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 7.23, 80°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtıl işlem görmüş ve yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir.

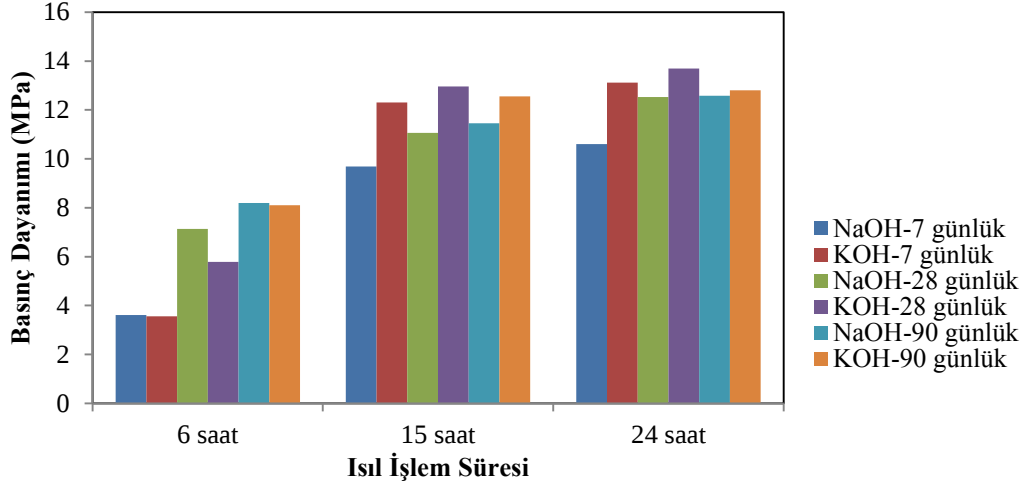


**Şekil 7.23.** 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtıl işlem süresi grafiğı

Şekilde, 7 gün yaşlandırılmış numuneler için 6 ve 15 saatlik ısıtıl işlem sürelerinde sodyum hidroksit ile hazırlananların basınç dayanımlarının potasyum hidroksit ile hazırlananlardan daha yüksek olduğı, 24 saat ısıtıl işlem süresi için ise daha düşük olduğı görölmüştür. 28 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 6 ve 24 saat ısıtıl işlem süreleri için potasyum hidroksit ile hazırlanan geopolimerlerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğı bulunmuştur. Isıl işlem süresi 15 saat olduğıunda ise basınç dayanımlarında %9 oranında bir azalma gözlenmiştir.

Geopolimer numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde 6 ve 24 saat ısıtıl işlem süreleri için potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin dayanımlarının sodyum hidroksit ile hazırlananlardan daha yüksek olduğı bulunmuştur. Isıl işlem süresi 15 saat olduğıunda dayanımlar çok yakın olmakla birlikte sodyum hidroksit ile hazırlanan numunenin dayanımı (10,68 MPa), potasyum hidroksit ile hazırlanan numunenin dayanımından (10,56 MPa) bir miktar yüksek çıkmıştır.

Şekil 7.24, 4M derişiminde alkali çözeltileri kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gördükten sonra 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir.



Şekil 7.24. 4M derişiminde alkali çözeltileri kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtıl işlem süresi grafiğı

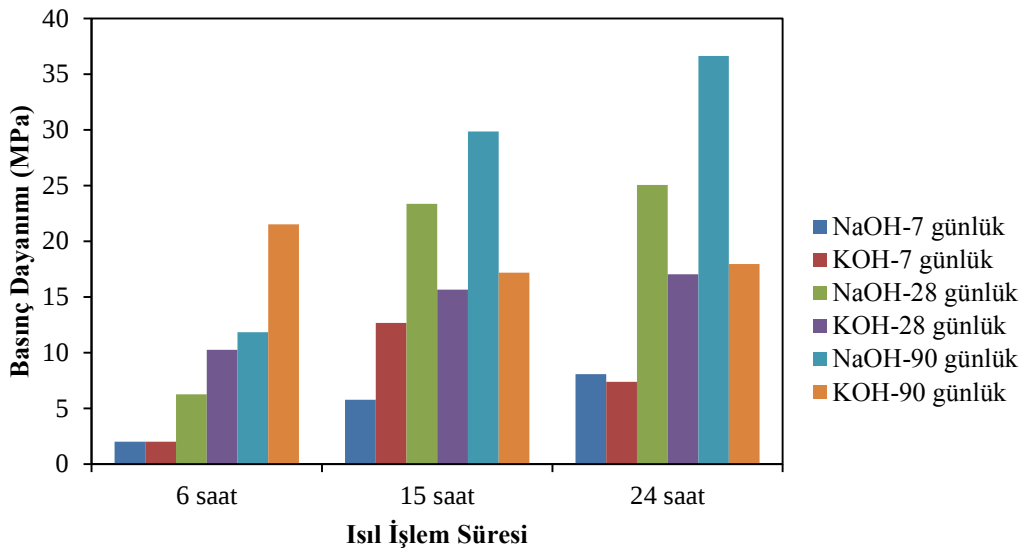
7 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında değerlerin 6 saat ısıtıl işlem süresi için birbirine çok yakın olduğı, 15 ve 24 saat ısıtıl işlem süreleri için ise potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin dayanımlarının sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin dayanımlarından daha yüksek olduğı görülmüştür.

28 gün yaşlandırma süresinde, sodyum hidroksit ile hazırlanan ve 6 saat süre ile ısıtıl işlem gören numunelerin basınç dayanım değerlerinin potasyum hidroksit ile hazırlananlardan %19 oranında daha yüksek olduğı bulunmuştur. Buna karşın, 15 ve 24 saat ısıtıl işlem süreleri için potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin dayanımlarının daha yüksek olduğı görülmüştür.

90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları gelişiminin, 7 ve 28 gün yaşlandırılmış numunelerin dayanım gelişimleri ile aynı olduğı gözlenmiştir. Basınç dayanımları 6 saat ısıtıl işlem süresi için birbirine çok yakın

iken, 15 ve 24 saat ısıt ışlem sũreleri için potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin dayanımlarının sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin dayanımlarından daha yũksek olduğu bulunmuştur.

8M derişiminde alkali ozelti kullanılarak hazırlanan geopolimer numunelerinin basınc ı dayanımı gelişimleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir. şekil 7.25., 40°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıt ışlem gũren ve 7, 28 ve 90 gũn yaşlandırılan numunelerin basınc ı dayanımlarını gũstermektedir.



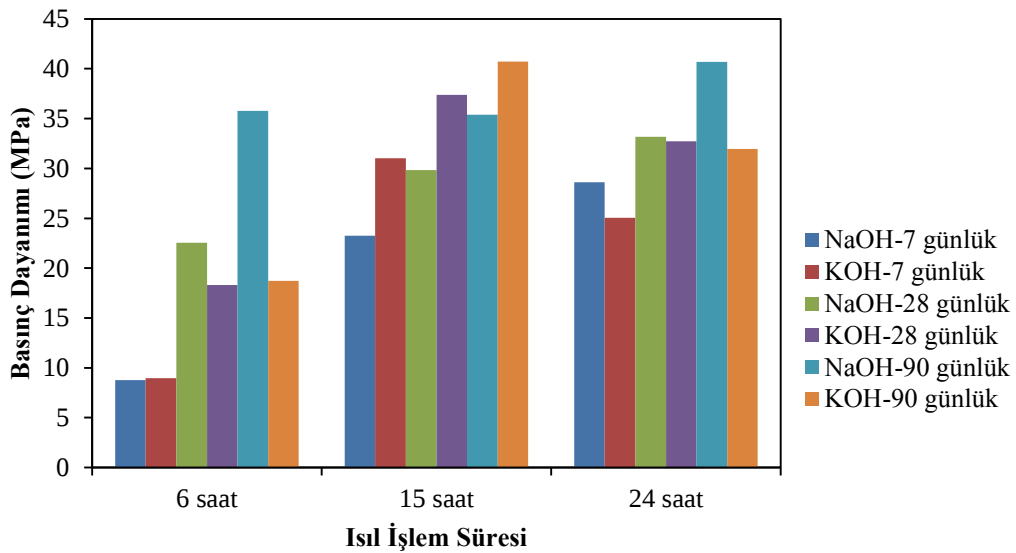
şekil 7.25. 8M derişiminde alkali ozelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıt ışlem gũrmũş numunelerin basınc ı dayanımı – ısıt ışlem sũresi grafiği

40°C sıcaklıkta ısıt ışlem gũren ve 7 gũn yaşlandırılan numunelerin dayanımları incelendiğinde 6 saatlik sũre için sodyum ve potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınc ı dayanımları aynı bulunmuştur. Burada, 15 saat ısıt ışlem sũresi için potasyum hidroksit kullanılan numunelerin dayanımları sodyum hidroksit ile hazırlananlardan daha yũksek olmasına karşın 24 saat ısıt ışlem sũresi için sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınc ı dayanımları daha yũksek çıkmıştır.

8M derişiminde alkali ozelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıt ışlem gũrmũş numunelerin 28 gũnlũk basınc ı dayanımları incelendiğinde 6 saat ısıt ışlem

süresi için potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek çıkarken, 15 ve 24 saat ısıtılma süresi için sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu gözlenmektedir. 90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımları karşılaştırıldığında 6 saat ısıtılma süresi için potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek, 15 ve 24 saat ısıtılma süresi için ise sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları daha yüksektir.

8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmüş numunelerin basınç dayanımları Şekil 7.26’da verilmiştir.



**Şekil 7.26.** 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtılma süresi grafiğı

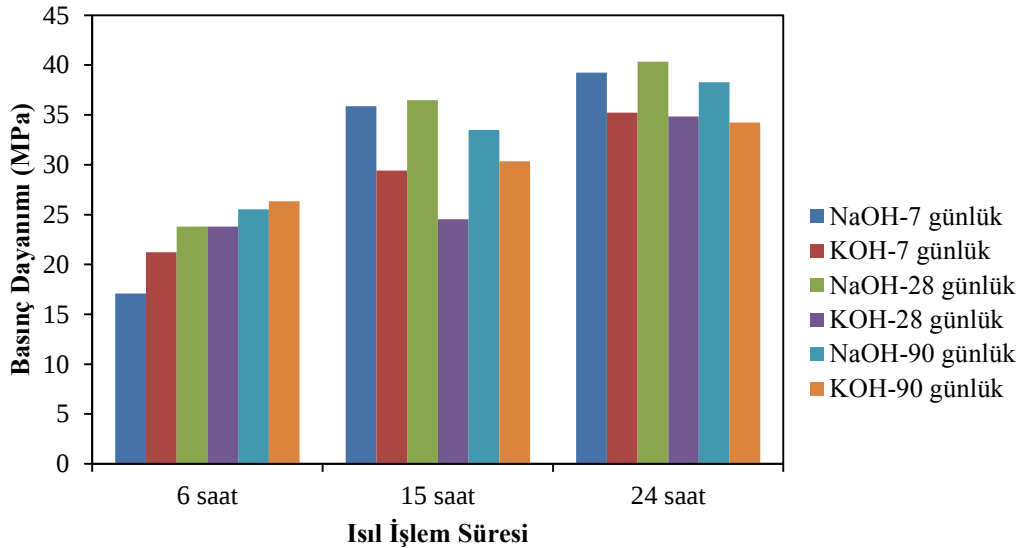
80°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmüş numunelerin 7 günlük basınç dayanımı gelişiminin, 40°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmüş numunelerin dayanımı gelişimleri ile aynı olduğu görülmüştür. Basınç dayanımlarının 6 saatlik ısıtılma süresi için sodyum hidroksit ve potasyum hidroksitle üretilen geopolimerler için aynı olduğu görülmekle birlikte, 15 saat ısıtılma süresi için potasyum hidroksit kullanılan

numunelerin dayanımlarının, 24 saat ısıtılma süresi için ise sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

28 gün yaşlandırılmış numunelerde 6 ve 24 saat ısıtılma sürelerinde sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları, potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksektir. 15 saatlik ısıtılma süresi için ise potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

90 gün yaşlandırılmış numunelerin basınç dayanımı gelişimleri incelendiğinde sodyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarının 6 ısıtılma süresi için %48 oranında, 24 saat için ise %21 oranında daha fazla olduğu bulunmuştur. 15 saat ısıtılma süresinde ise potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin basınç dayanımlarının %13 daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 7.27, 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtılma işlem görmüş numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını göstermektedir.



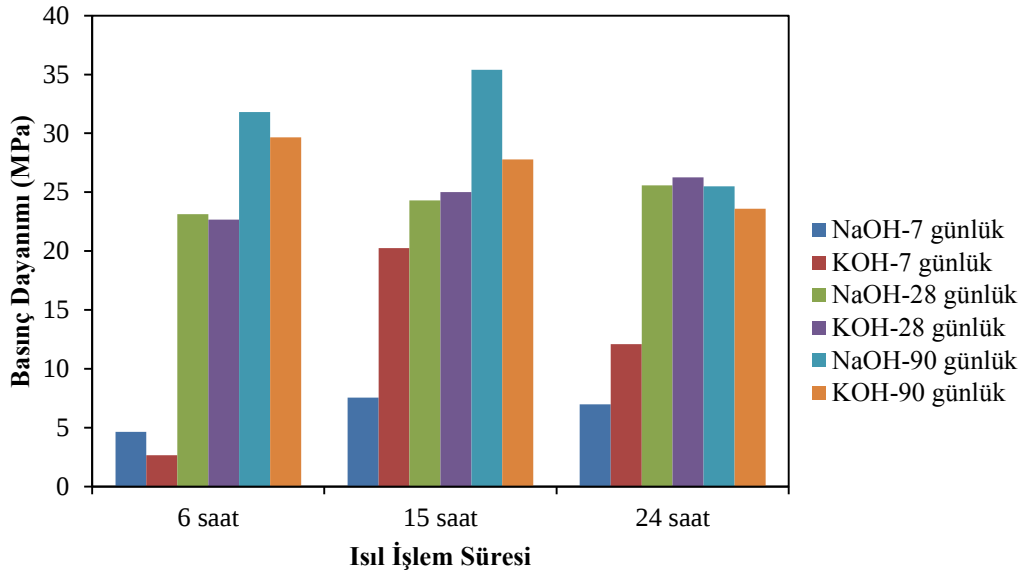
Şekil 7.27. 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtılma işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtılma süresi grafiğı

7 gün yaşlandırılan ve 6 saat ısıt ışlem gören numunelerde potasyum hidroksit kullanıldığında daha yüksek dayanımlar elde edilmektedir. Buna karşın 15 ve 24 saat ısıt ışlem sürelerinde sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin dayanımları, potasyum hidroksit kullanılanlardan daha yüksek çıkmıştır.

28 gün yaşlandırılan ve 6 saat ısıt ışlem gören numunelerin basınç dayanımları 23,8 MPa olarak bulunmuştur. 15 ve 24 saat ısıt ışlem sürelerinde ise sodyum hidroksit kullanıldığında daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Basınç dayanımları sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan numunelerde 15 saat ısıt ışlem süresi için sırasıyla 36,49 MPa ve 24,54 MPa, 24 saat ısıt ışlem süresi için ise 38,29 MPa ve 34,23 MPa olarak bulunmuştur.

120 C sıcaklıkta 6 saat ısıt ışlem görmüş numunelerin 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde potasyum hidroksit kullanılan numunelerin dayanımlarının sodyum hidroksit kullanılanlardan bir miktar daha yüksek olduğu g r lm ştir. Buna karşın 15 ve 24 saat ısıt ışlem süreleri için sodyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımları, potasyum hidroksit kullanılanlardan daha yüksek çıkmıştır.

şekil 7.28-7.30, 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve üç farklı sıcaklık ve süre ısıt ışlem gören numunelerin basınç dayanımlarını özetlemektedir. 40 C sıcaklıkta 6 saat ısıt ışlem görmüş numunelerin dayanım değerleri şekil 7.28’de verilmiştir.



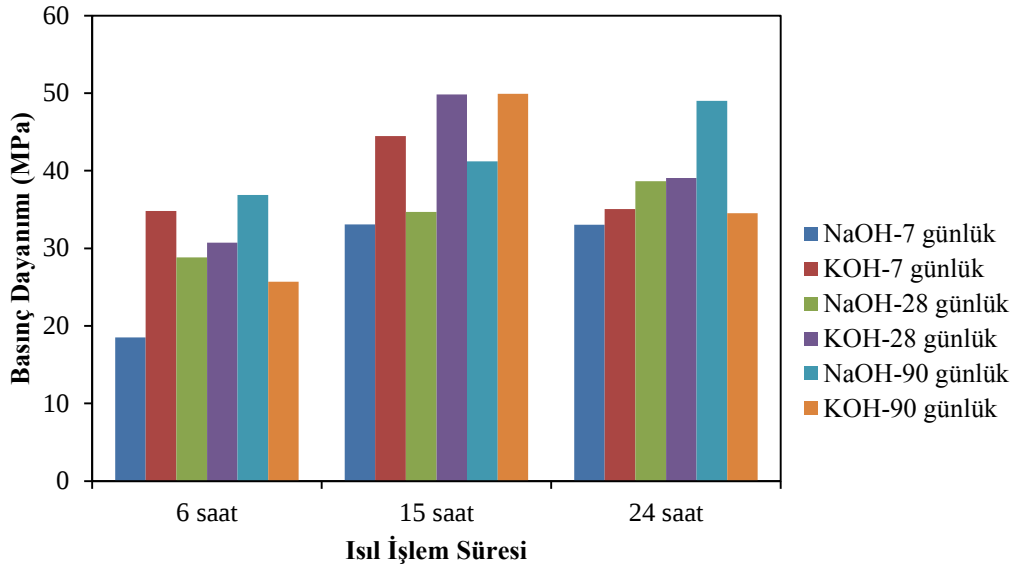
**Şekil 7.28.** 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıtıl işlem süresi grafiğı

Şekilde görüldüğü gibi, sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem gören numunelerin 7 günlük basınç dayanımları, potasyum hidroksit kullanılarak hazırlananlardan %43 daha yüksektir. Buna karşın 15 ve 24 saat ısıtıl işlem süresi için potasyum hidroksit kullanılan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

Benzer şekilde 28 gün yaşlandırılmış numuneler için 6 saat ısıtıl işlem süresinde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek iken 15 ve 24 saat ısıtıl işlem süresinde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımları daha yüksektir.

40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören ve sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin 90 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, potasyum hidroksit kullanılarak hazırlananların dayanımlarının daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Şekil 7.29'da 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gördükten sonra sırasıyla 7, 28 ve 90 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır.



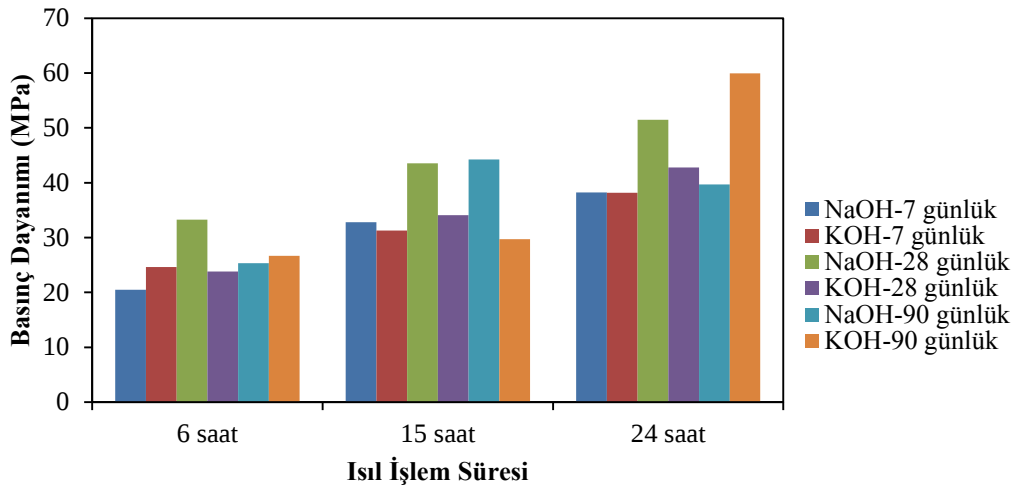
**Şekil 7.29.** 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıt işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıt işlem süresi grafiğı

80°C sıcaklıkta ısıt işlem gören ve potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin 7 günlük basınç dayanımlarının, sodyum hidroksit kullanılarak hazırlananlardan daha yüksek olduğı görölmektedir.

6 ve 15 saat ısıt işlem süreleri için potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin 28 günlük basınç dayanımlarının sodyum hidroksit kullanılanlardan daha yüksek olduğı belirlenmiştir. Isıt işlem süresi 24 saate çıkarıldığında ise sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin dayanımı 38,65 MPa iken potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin dayanımı 39,07 MPa olarak bulunmuştur.

6 ve 24 saat ısıt işlem süreleri için sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin 90 günlük basınç dayanımları, potasyum hidroksit kullanılanlardan daha yüksek iken 15 saat ısıt işlem süresi için potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin dayanımlarının daha yüksek olduğı görölmektedir.

Şekil 7.30, 120°C sıcaklıkta ısıt işlem görmüş numunelerin sırasıyla 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını göstermektedir.



**Şekil 7.30.** 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımı – ısıl işlem süresi grafiğı

6 saat ısıl işlem süreleri için potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin 7 günlük basınç dayanımı, sodyum hidroksit kullanılarak hazırlananlardan daha yüksek iken, 15 saat ısıl işlem süresi için sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin basınç dayanımları daha yüksektir. Bunun yanında 24 saat ısıl işlem süresi için basınç dayanımlarının aynı olduğu bulunmuştur.

12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin dayanımlarının potasyum hidroksit kullanılarak hazırlananlardan daha yüksek olduğu görülmüştür.

120°C sıcaklıkta 6 saat ısıl işlem görmüş numuneler için 90 günlük basınç dayanımları birbirlerine çok yakın olmakla beraber sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin dayanımları 25,33 MPa, potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin dayanımları ise 26,68 MPa olarak bulunmuştur. Isıl işlem süresi 15 saat olduğunda sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımları daha yüksek bulunurken, 24 saat ısıl işlem süresi için potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

#### **7.4. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Geopolimerlerin Fourier Transform Infrared Spektrumları**

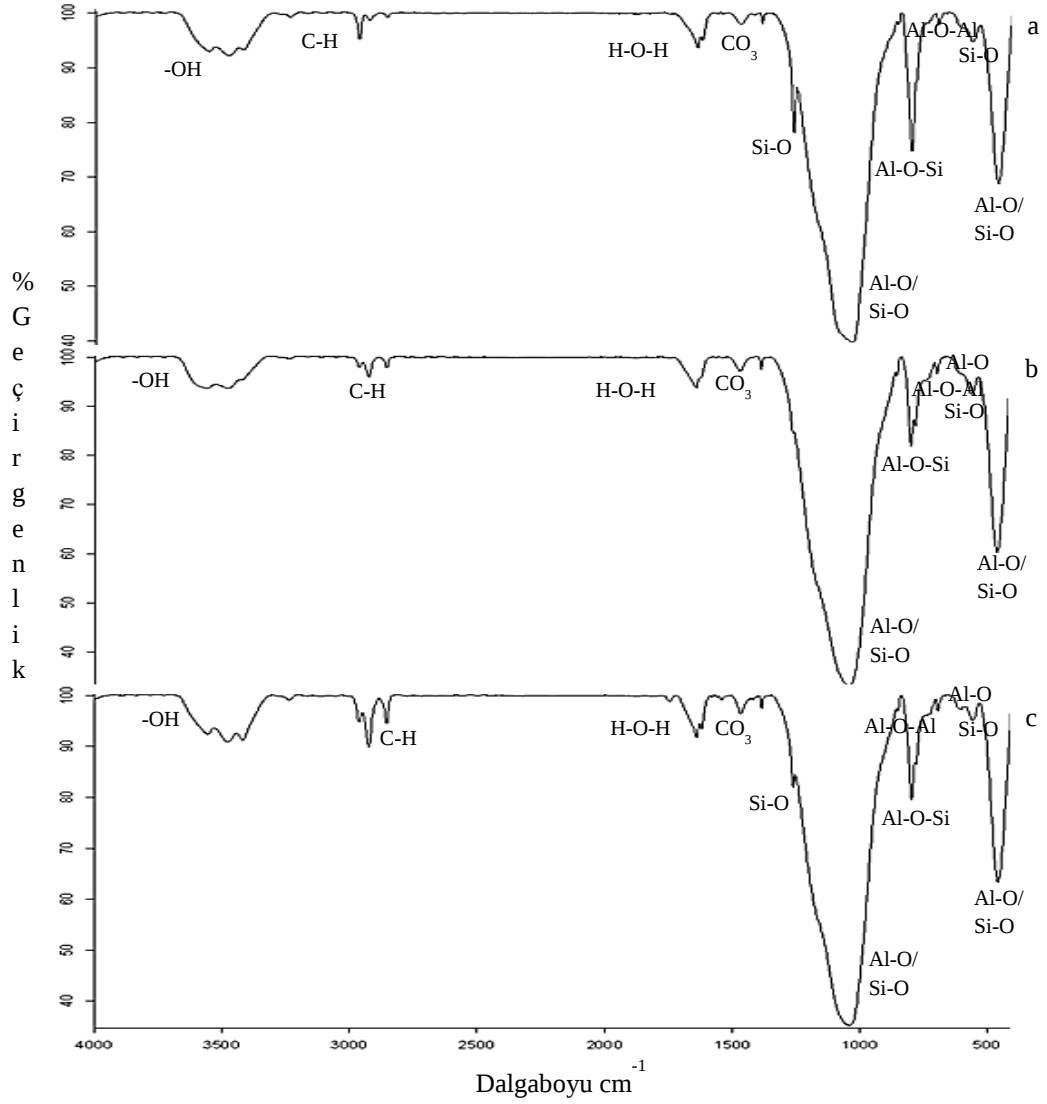
Deneysel çalışmalarda sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen geopolimer numunelerinin Fourier Transform Infrared spektrumları, ayrı ayrı verilerek ısıtma işlem koşullarının ve alkali derişiminin etkileri incelenmiştir.

##### **7.4.1. Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin Fourier Transform Infrared spektrumları**

Isıtma işlem koşullarının ve alkali derişiminin geopolimerik matriste bulunan bağ yapılarına etkisinin anlaşılması amacıyla 4M, 8M ve 12M derişimlerinde sodyum hidroksit ile hazırlanan 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 6, 15 ve 24 saat ısıtma işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları aşağıda şekillerde verilmiştir.

##### **7.4.1.1 Isıtma işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi**

Isıtma işlem süresinin numunelerin bağ yapılarına etkilerinin belirlenmesi amacıyla sabit sıcaklıkta farklı ısıtma sürelerinde elde edilen numunelerin spektrumları incelenmiştir. 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıtma işlem gören numunelerin FTIR spektrumları Şekil 7.31’de verilmiştir.



**Şekil 7.31.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıtılmış numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

6 saat ısıtılmış numunenin spektrumunda  $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren pik ile birlikte  $\sim 450 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin olduğu görülmüştür.  $\sim 775 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O-Si simetrik gerilme titreşimleri,  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 'de ise Si-O gerilme titreşimleri gözlenmiştir.

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılmış numune ile uçucu külün spektrumları kıyaslandığında, külün

spektrumunda özellikle Al-O-Si simetrik gerilme titreşimleri ve Si-O gerilme titreşimlerinin şiddetlerinin azaldığı görülmüştür. Spektrumda gözlenen silisyum içeren bağların şiddetlerinin azalması uçucu külün içeriğinde bulunan silisyumun alkali ortamda çözüldüğünü göstermektedir (Heikal ve ark. 2014).

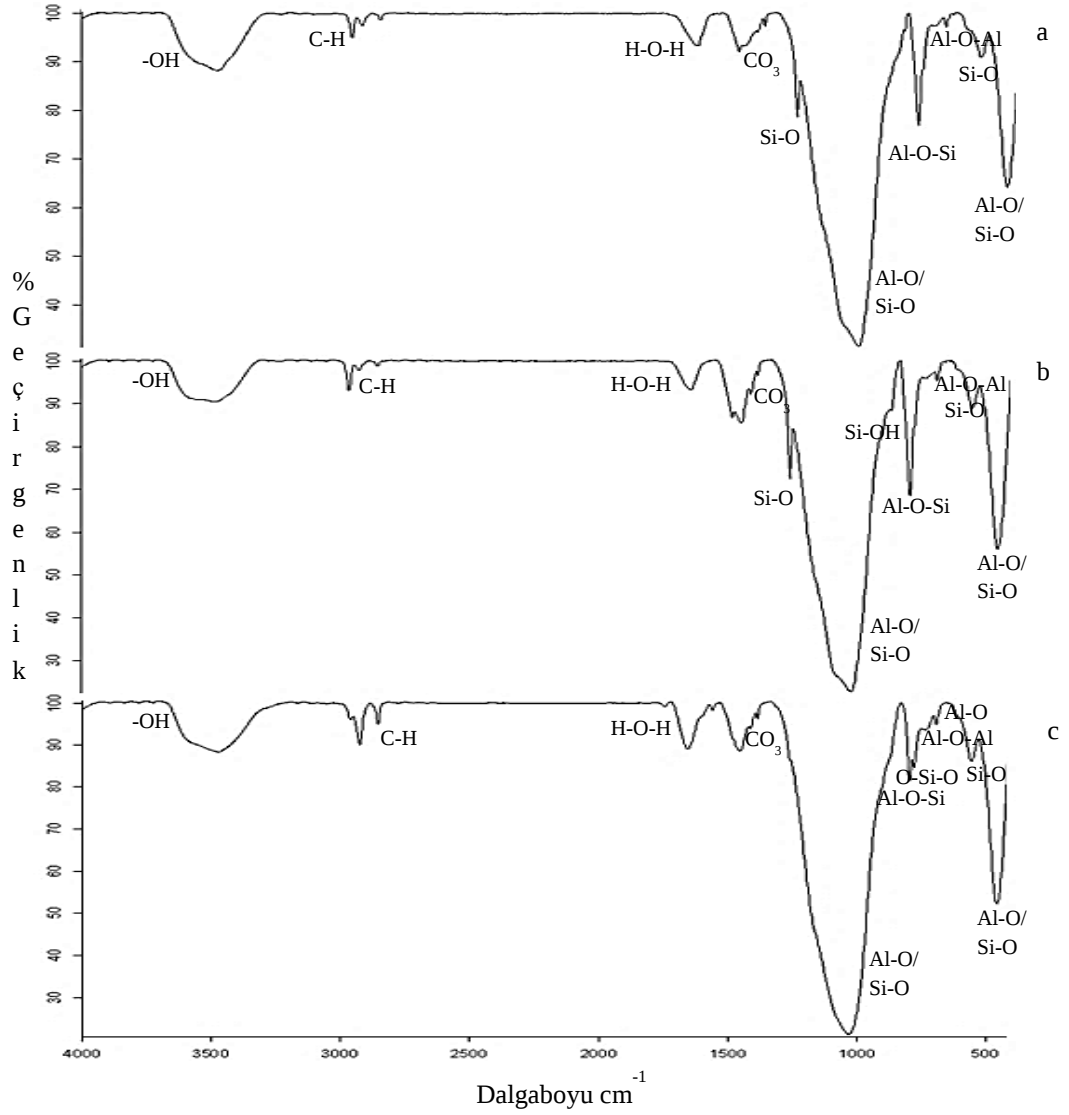
Uçucu külün spektrumunda  $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Si-O gerilme titreşimleri geopolimer numunesinde gözlenmemiştir.  $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlenen Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin, numunenin spektrumunda  $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyuna kaydığı görülmüştür. Bu pikin frekansının düşük dalga boyuna kayması alüminosilikat jel yapısına alüminyumun katıldığının göstergesidir (Phair ve van Deventer 2002; van Jaarsveld ve ark. 2002).

Alkali çözelti olarak 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve  $120^\circ\text{C}$ 'ta 15 saat ısıtıl işlem gören numunenin spektrumu incelendiğinde, ısıtıl işlem süresinin arttırılmasıyla Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddetinde azalma gözlenirken  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$ 'de Si-O gerilme titreşimlerinin oluşmadığı görülmüştür.

Al-O-Si ve Si-O bağlarının şiddetlerindeki azalma, yapıda bulunan silisyumun alüminosilikat jel yapısına dahil olduğunu göstermektedir. Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin çok düşük oranda yüksek dalga boyuna kaydığı gözlenmiştir. Yapının silisyum bakımından daha zengin olması spektrumda gözlenen piklerin daha yüksek frekanslara kaymasına neden olmaktadır (Fernández-Jimenez A. ve Palomo A. 2005).

$120^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem süresinde Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren pikin kuvvetli ancak şiddetinin 15 saat ısıtıl işlem gören numunenin spektrumunda gözlenen pikin şiddeti ile aynı olduğu görülmüştür. Isıtıl işlem süresinin 24 saate arttırılmasıyla Si-O gerilme titreşimlerinin düşük şiddette tekrar oluştuğu gözlenmiştir.

Şekil 7.32'de derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve  $40^\circ\text{C}$  sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge spektrumları verilmiştir.



**Şekil 7.32.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısııl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

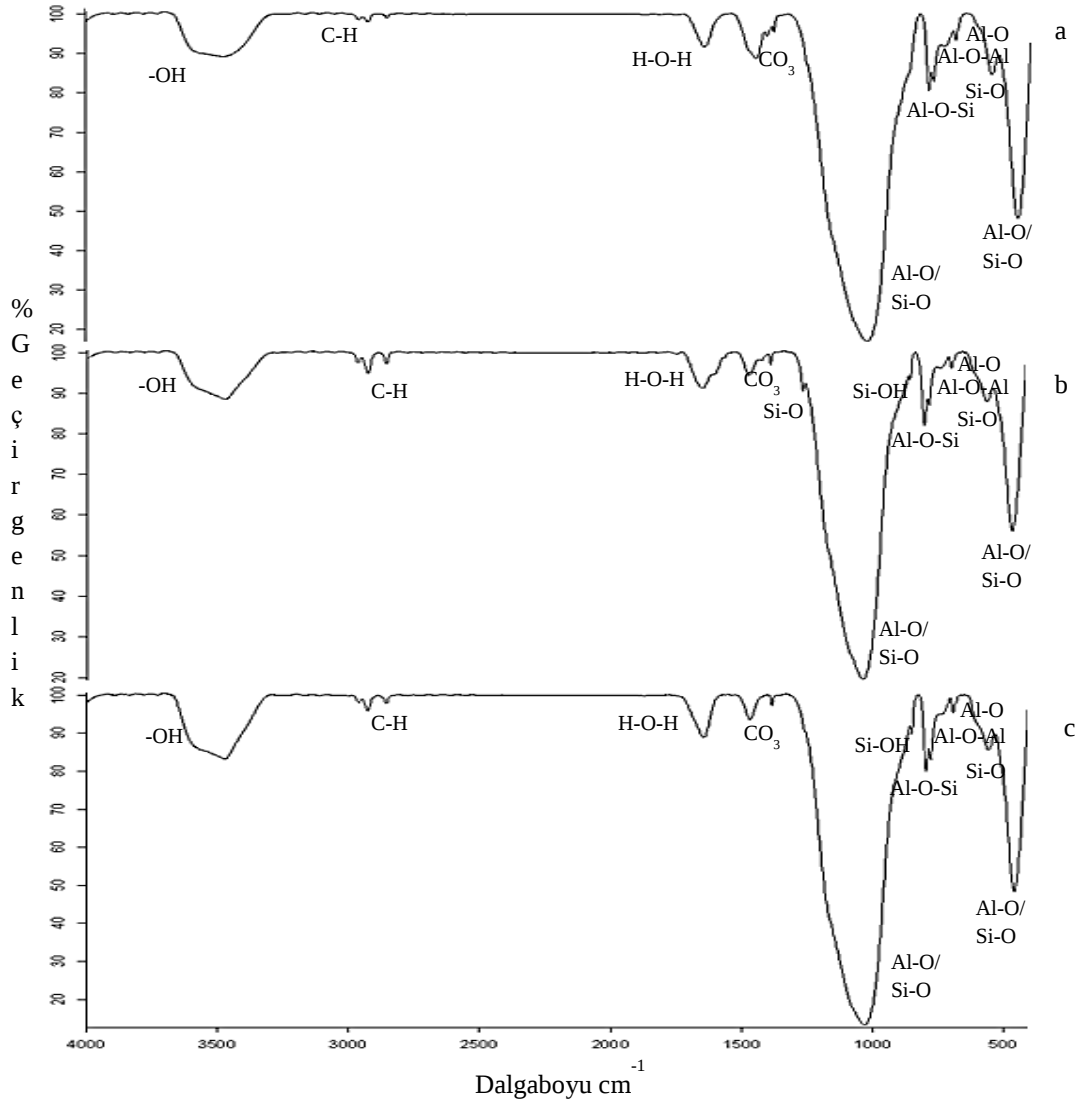
Derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısııl işlem görmüş numunenin spektrumunda  $\sim 1020 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında gözlenen Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerini gösteren pikin şiddetinin yüksek olduğu görülmüştür. Pikin şiddetindeki artış zincir uzunluğunun arttığını ve daha fazla alüminosilikat jel oluştuğunu göstermektedir (Bakharev 2005).  $\sim 450 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerini gösteren pikin şiddetinin de yüksek olduğu görülmüştür.

Spektrumda ayrıca CO<sub>3</sub> bağlarını gösteren pikin şiddetinden dolayı karbonatlaşmanın belirgin olduğu gözlenmiştir.

Isıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılmasıyla Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde azalma gözlenmiştir. Si-O gerilme titreşimleri ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanan piklerin şiddetlerinde de düşük oranda azalma görülmüştür. ~866 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda Si-OH gerilme titreşimlerinin oluştuğu gözlenmiştir.

Isıl işlem süresinin 24 saate arttırılmasıyla geopolimerik jel oluşumunun büyüklüğünü gösteren Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Si-O düzlem dışı açı bükülme titreşimleri ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanan piklerin şiddetlerinde ise düşük oranda azalma görülmüştür. Si-O gerilme titreşimlerinin 24 saat ısıtılma işlem görmüş numunenin yapısında oluşmadığı gözlenmiştir. ~780cm<sup>-1</sup> dalga boyunda kuvarzdan kaynaklanan O-Si-O piki görülmüştür.

Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtılma işlem gören numunelerin orta bölge infrared spektrumları Şekil 7.33'te verilmiştir.



**Şekil 7.33.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısııl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

80°C sıcaklıkta 6 saat ısııl işlem görmüş numunenin spektrumunda Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetinin oldukça büyük olduğu göze çarpmaktadır. Bu bağın şiddeti jel oluşumunun büyüklüğünün ve zincir uzunluğunun göstergesidir (Bakharev 2005b; Heikal ve ark 2014). Bununla birlikte kuvvetli Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin oluştuğu görülmüştür. Al-O-Si simetrik gerilme titreşimleri ile birlikte kuvartzın varlığını gösteren O-Si-O piki gözlenmiştir.

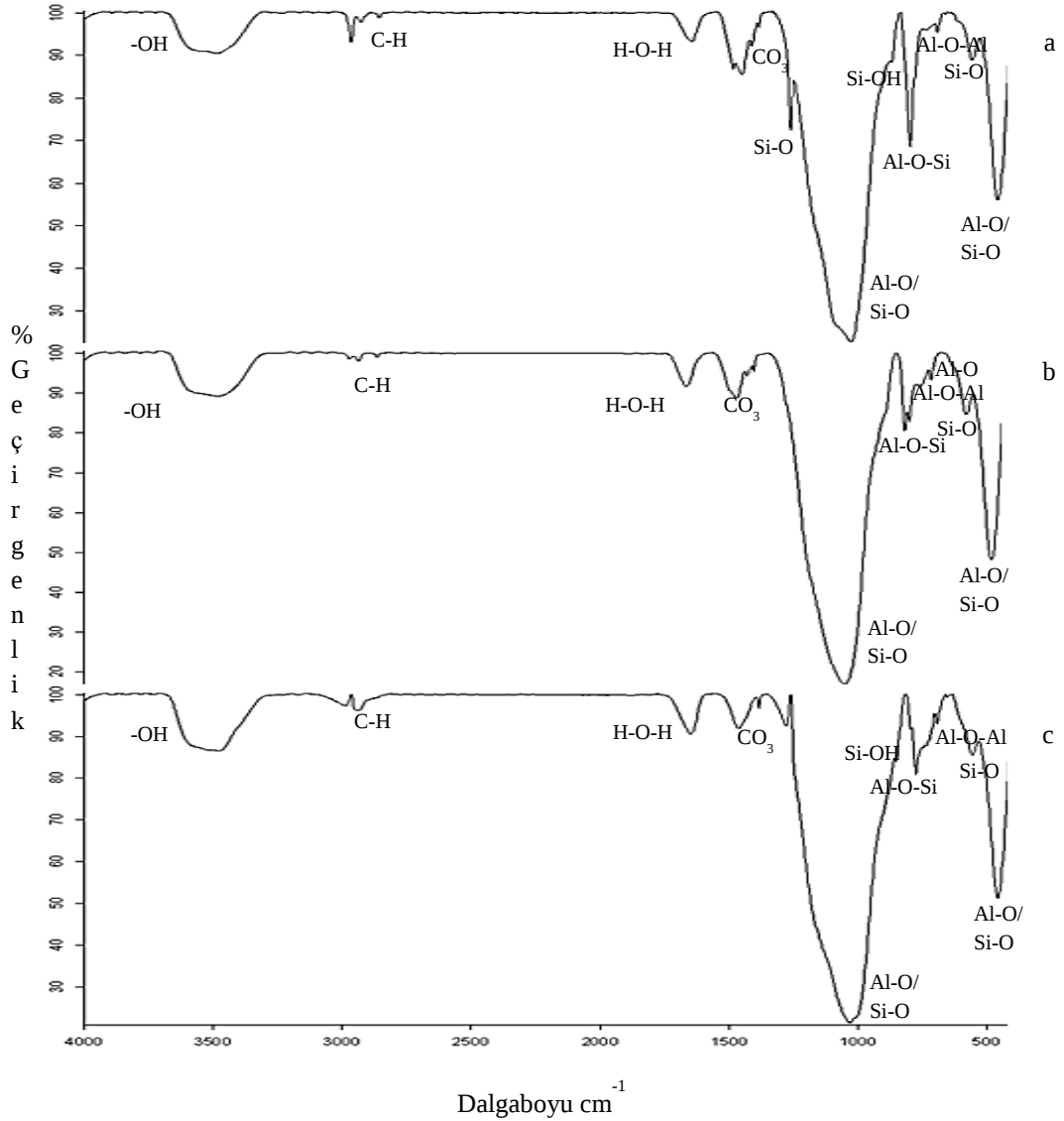
Sodyum hidroksit derişimi 8M olan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıtıl işlem gören numunenin spektrumunda kuvvetli Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetric gerilme titreşimlerinin oluştuğu gözlenmiştir. Al-O-Al açı bükölme titreşimleri ve Al-O gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde düşük oranda bir azalma görölmüşür. Kuvartzdan kaynaklanan O-Si-O piki ve ~1200 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda Si-O gerilme titreşimlerinden kaynaklanan pikin ve ~866 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda Si-OH gerilme titreşimlerinin oluştuğu gözlenmiştir.

Isıl işlem süresinin 24 saate arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetric gerilme titreşimlerinin arttığı gözlenmektedir. Bununla birlikte Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükölme titreşimlerinin şiddetinin de arttığı görölmüşür. ~1200 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda Si-O gerilme titreşimlerinden kaynaklanan pik, 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin yapısında oluşmamıştır.

#### **7.4.1.2. Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi**

Isıl işlem sıcaklığının numunelerin bağ yapılarına etkisinin araştırılması amacıyla farklı sıcaklıklarda kür edilmiş numunelerin Fourier Transform Infrared spektrumları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Alkali derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanılan ve 6 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda ısıtıl işlem gören numunelerin orta bölge infrared spektrumları Şekil 7.34'te verilmiştir.



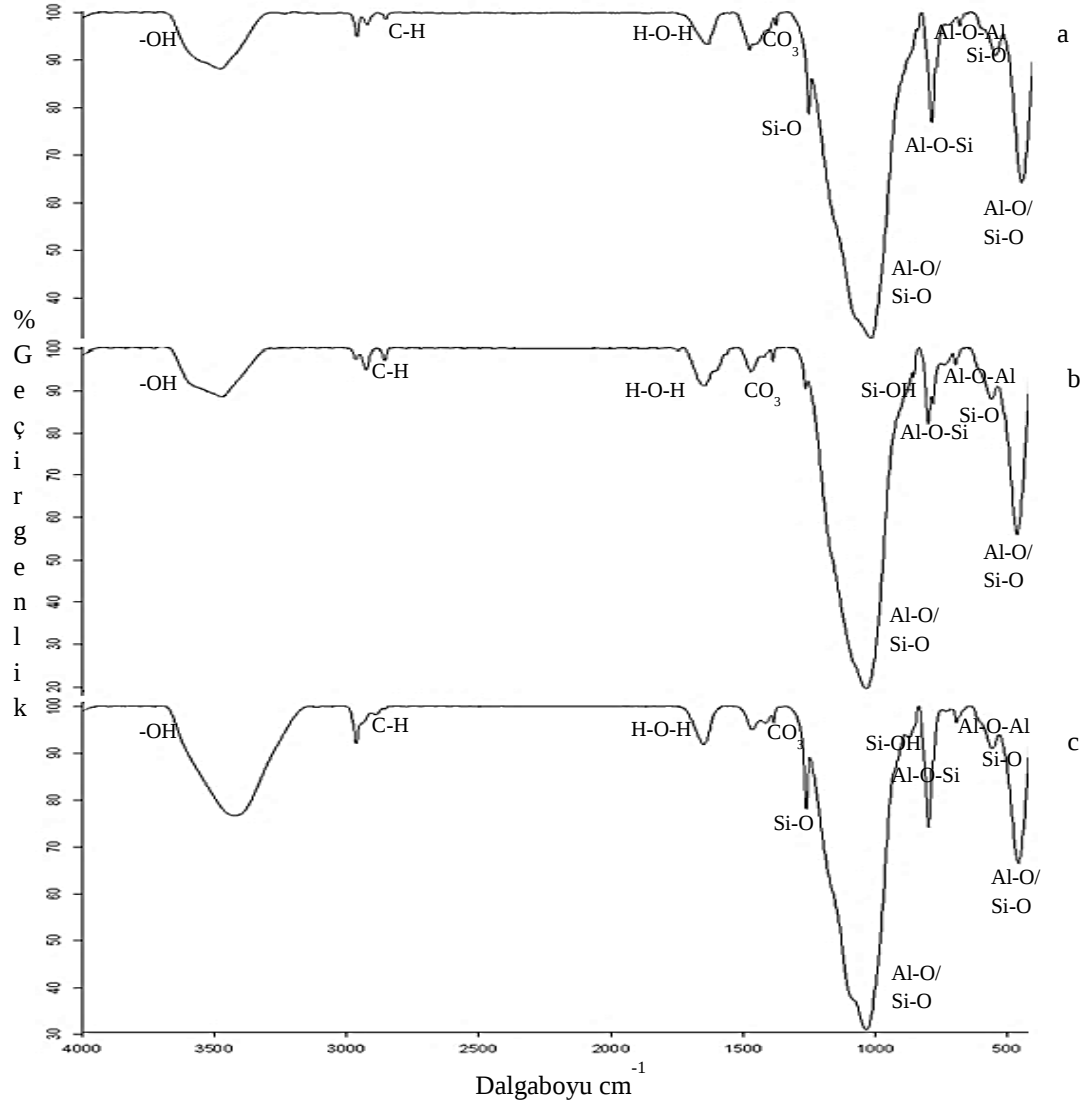
**Şekil 7.34.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C

Alkali derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanılan ve 6 saat süre ile ısıt işlem gören numunelerin spektrumları kıyaslandığında ısıt işlem sıcaklığının 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile geopolimerizasyon sonucu oluşan alüminosilikat jelin büyüklüğünü gösteren Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetinin arttığı görülmüştür. 80°C'ta ısıt işlem görmüş numunenin spektrumunda Al-O-Al açı bükülme titreşimlerinin şiddetinde çok az bir artış gözlenirken Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanan piklerin şiddetlerinde ise düşük oranda azalma görülmüştür.  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$  dalga

boyunda görülen Si-O gerilme titreşimleri ve Si-OH gerilme titreşimleri gözlenmemiştir.

Alkali derişimi ve ısıt işlemleri süresi sabit tutularak ısıt işlemleri sıcaklığı 80°C'tan 120°C'a arttırılan numunenin spektrumu incelendiğinde Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetric gerilme titreşimlerinin şiddetinde az oranda azalma görülmüştür. Bununla birlikte ~866 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda Si-OH gerilme titreşimlerinin oluştuğı gözlenmiştir. Uçucu külün alkali aktivasyonu esnasında çözünen silisyumun Si-OH bağı oluşturmasının ~1100cm<sup>-1</sup>'da gözlenen pikin şiddetinde azalmaya sebep olabileceğı düşünülmektedir.

8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 15 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda ısıt işlemleri gören numunelerin orta bölge infrared spektrumları Şekil 7.35'te verilmiştir.



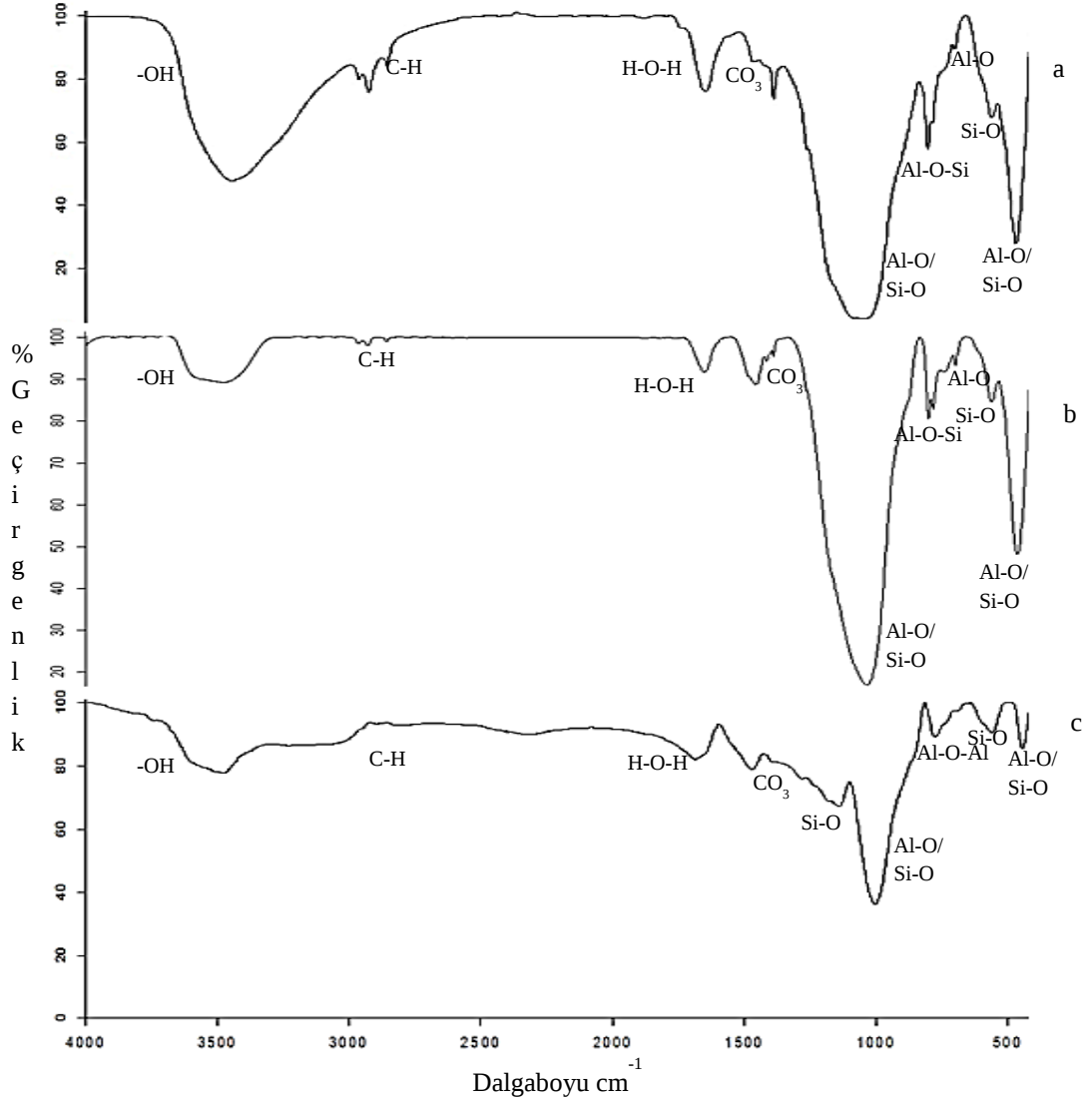
**Şekil 7.35.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C

Alkali derişimi 8M ve ısıt işlem süresi 15 saat olan 40°C ve 80°C sıcaklıklarda işlem gören numunelerin spektrumları incelendiğinde sıcaklığın arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinin arttığı görülmüştür. Bunun yanında  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Si-O gerilme titreşimlerinden ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanan piklerin şiddetlerinde az oranda azalma gözlenmiştir.

Isıl işlem sıcaklığının 120°C'a arttırılmasıyla Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinin azaldığı, ~1200 cm<sup>-1</sup> dalga boyunda Si-O gerilme titreşimlerinden ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanan piklerin şiddetlerinin arttığı görülmüştür.

#### **7.4.1.3. Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi**

Deneyisel çalışmalarda 4M, 8M ve 12M derişimlerinde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimer numunelerinin bağ yapısı üzerine etkisi incelenmiştir. Isıl işlem sıcaklığı 80°C ve ısıtıl işlem süresi 6 saat olan numunelerin spektrumları Şekil 7.36'da verilmiştir.



**Şekil 7.36.** Sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanmış ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin spektrumunda çok kuvvetli Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin olduğu görülmüştür. Numunenin yapısında ayrıca fazla miktarda adsorplanmış su bulunduğu gözlenmiştir.

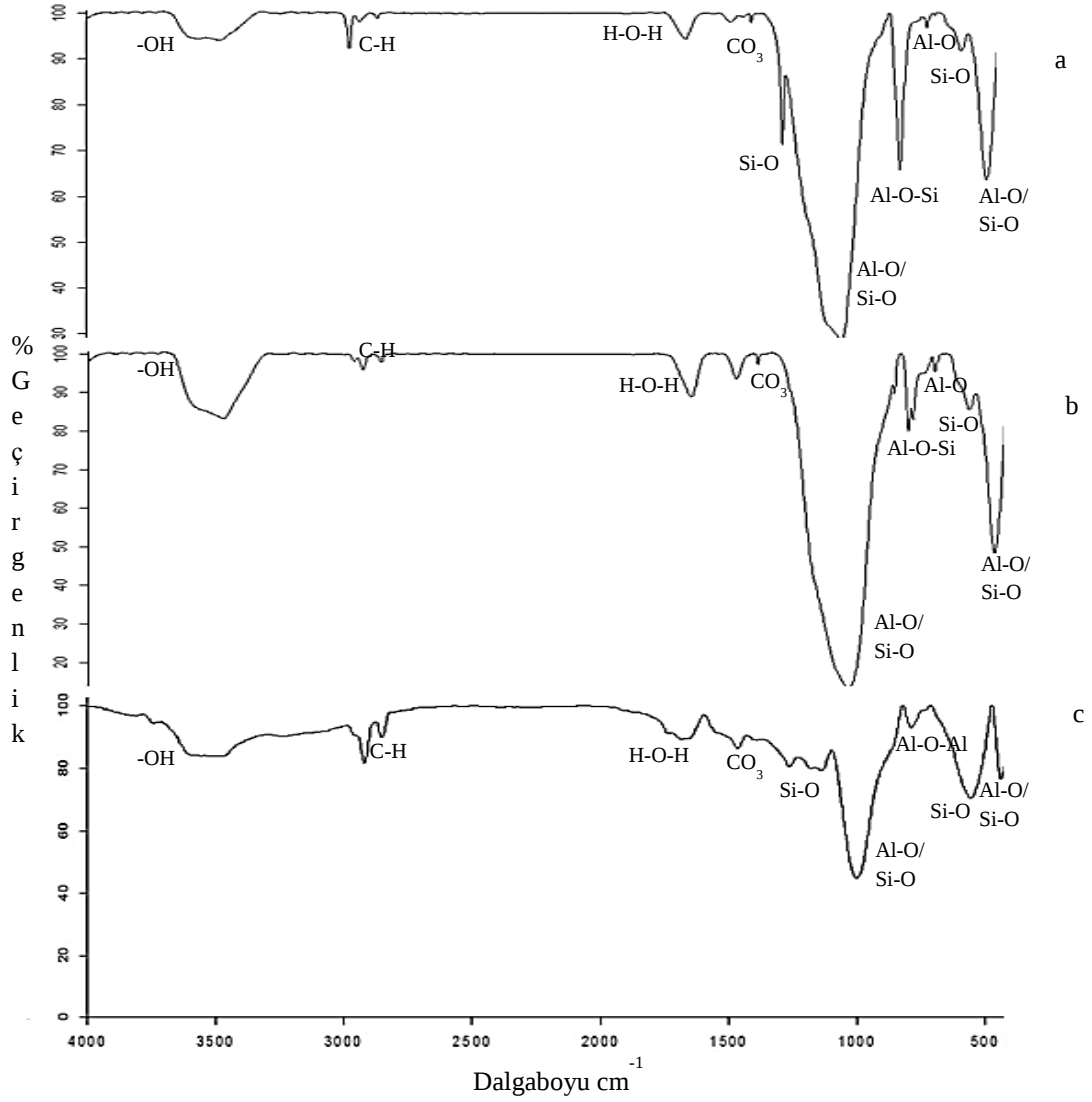
Alkali derişiminin 8M'a artırılmasıyla Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı

bükölme titreşimlerinin şiddetlerinde azalma gözlenmiştir.  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Si-O gerilme titreşimlerinin ise oluşmadığı görülmüştür.

12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin spektrumunda Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi aç bükölme titreşimlerinin şiddetlerinin belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. Al-O-Si simetrik gerilme titreşimleri, Al-O gerilme titreşimleri ve Si-O düzlem dışı aç bükölme titreşimlerinin şiddetlerinde de azalma olduğu gözlenmiştir.  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Si-O gerilme titreşimlerinin tekrar oluştuğı görülmüştür.

Alkali derişiminin arttırılması ile alüminosilikat jel oluşumunun büyüklüğünü gösteren gerilme titreşimlerinin azalmasının nedeninin,  $\text{OH}^-$  derişiminin artmasından dolayı polikondenzasyonun azalmasından kaynaklanabileceğı düşünülmektedir.

Şekil 7.37’de  $80^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 24 saat süre ile farklı sıcaklıklarda ısı işlem gören numunelerin spektrumları verilmiştir.



**Şekil 7.37.** 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıtılma işlemi görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan numunenin spektrumunda kuvvetli Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin, Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimleri olduğu görülmüştür. Spektrumda  $\sim 1200\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda oluşan Si-O gerilme titreşimlerinin şiddetinin oldukça kuvvetli olduğu gözlenmiştir.

Derişimin 8M'a artırılması ile alüminosilikat jel oluşumunu gösteren Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O

bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinin arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddeti azalmıştır ve Si-O gerilme titreşimlerinin oluşmadığı görülmüştür.

Alkali derişiminin 12M'a arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin, Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddeti azalmıştır. Bu bağlardaki silisyumun çözünerek Si-O bağları oluşturduğu spektrumda göze çarpmaktadır.  $\sim 550 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Si-O düzlem dışı açılı bükülme titreşimlerinin şiddetinin arttığı gözlenirken  $\sim 1250 \text{ cm}^{-1}$  ve  $\sim 1300 \text{ cm}^{-1}$  dalga boylarında Si-O gerilme titreşimlerinin oluştuğı dikkat çekmektedir. Numunenin yapısının silisyum bakımından daha zengin olması ile spektrumda gözlenen pikler daha yüksek dalga boylarına kaymaktadır (Fernández-Jimenez ve Palomo, 2005).

Alüminosilikat jelin büyüklüğünün azalması ile birlikte Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin gözlendiğı dalga boyunun daha düşük değere kaydığı gözlenmiştir. Yüksek derişimlerde alkali çözelti kullanılarak elde edilen geopolimerlerde, silikat polikondenzasyonunun azalmasından dolayı piklerin daha düşük dalga boylarına kaydığı görülmektedir (Phair ve van Deventer 2002).

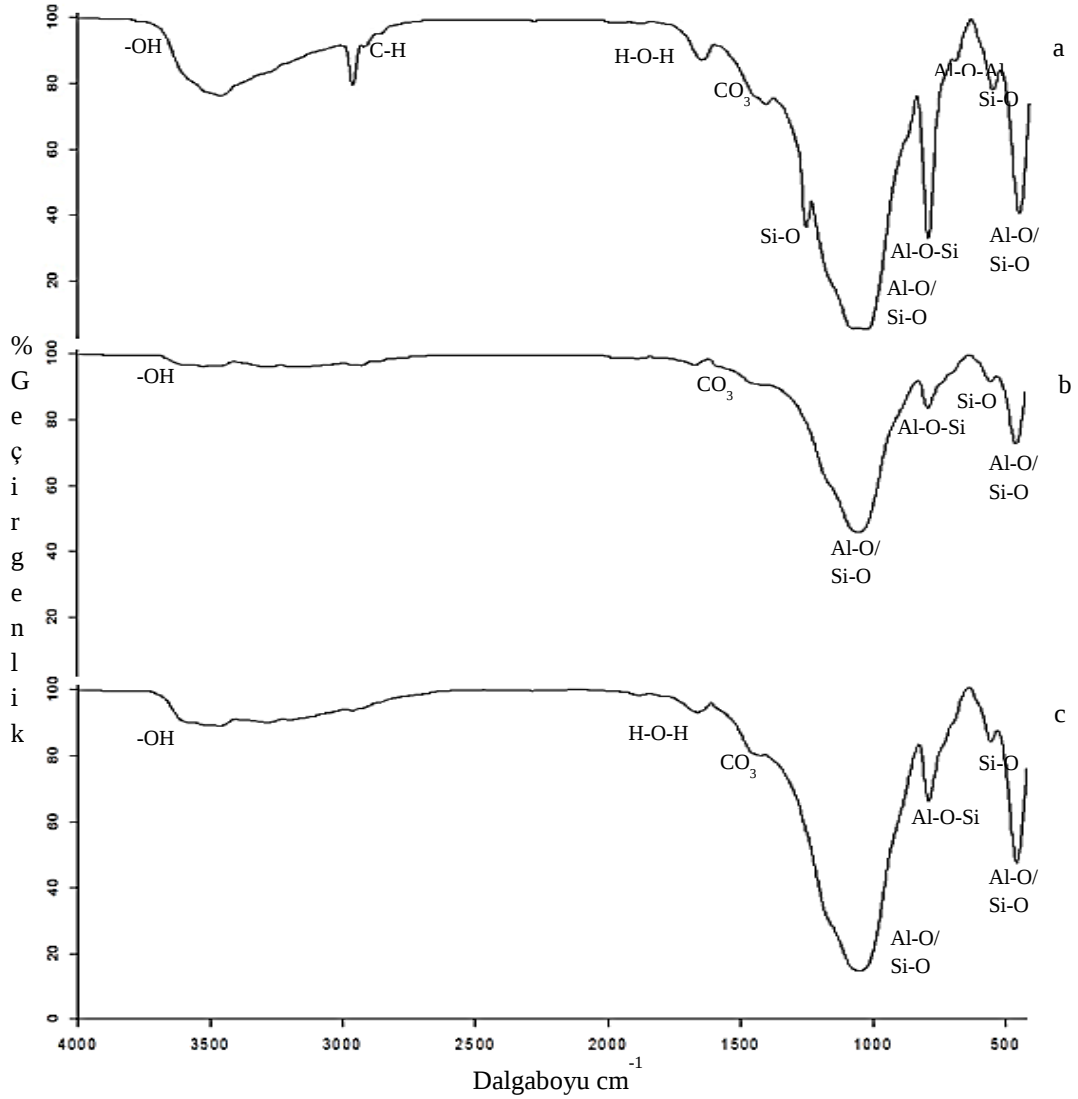
#### **7.4.2. Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin Fourier Transform Infrared spektrumları**

Bu bölümde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin bağ yapılarına ısıtma işlem süresinin, ısıtma işlem sıcaklığının ve alkali derişiminin etkileri incelenmiştir.

##### **7.4.2.1. Isıtma işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi**

Isıtma işlem süresinin numunelerin bağ yapılarına etkilerinin belirlenmesi amacıyla sabit sıcaklıkta farklı ısıtma sürelerinde elde edilen numunelerin

spektrumları incelenmiştir. 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 120°C sıcaklıkta ısıt işlem gören numunelerin FTIR spektrumları Şekil 7.38’de verilmiştir.



**Şekil 7.38.** Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

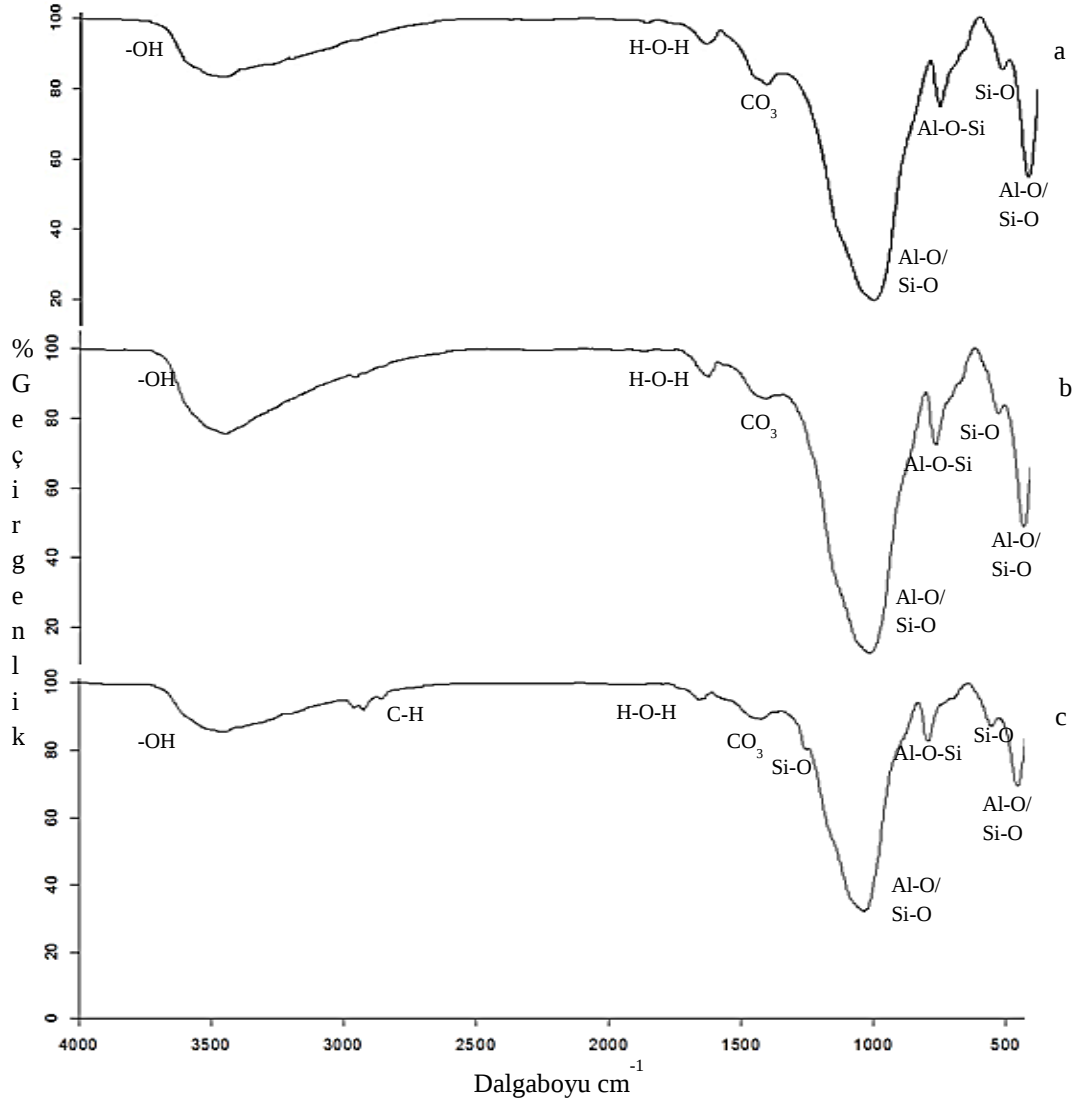
Alkali derişimi 4M olan potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin orta bölge infrared spektrumunda  $\sim 1050 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda kuvvetli Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin,  $\sim 460 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi aç bükülme titreşimlerinin ve  $\sim 770 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda

Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin olduğu gözlenmiştir.  $\sim 3500 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen pik, numunenin yüzeyinde fazla miktarda su adsorplandığını göstermektedir (Zaharaki ve ark. 2010).

Isıl işlem süresinin 15 saate arttırılmasıyla Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin, Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimleri ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddetleri azalmıştır.  $\sim 550 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Si-O düzlem dışı açılı bükülme titreşimlerinin şiddeti azalırken  $\sim 1200 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Si-O gerilme titreşimlerinin ve  $\sim 650 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda görülen Al-O-Al açılı bükülme titreşimlerinin oluşmadığı gözlenmiştir.

Isıl işlem süresinin 24 saate arttırılmasıyla jel oluşumunun büyüklüğünü gösteren Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetinin arttığı görülmüştür. Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde de artış olduğu gözlenmiştir.

8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan ve  $80^\circ\text{C}$ 'ta 6, 15 ve 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin orta bölge infrared spektrumları Şekil 7.39'da verilmiştir.



**Şekil 7.39.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısııl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

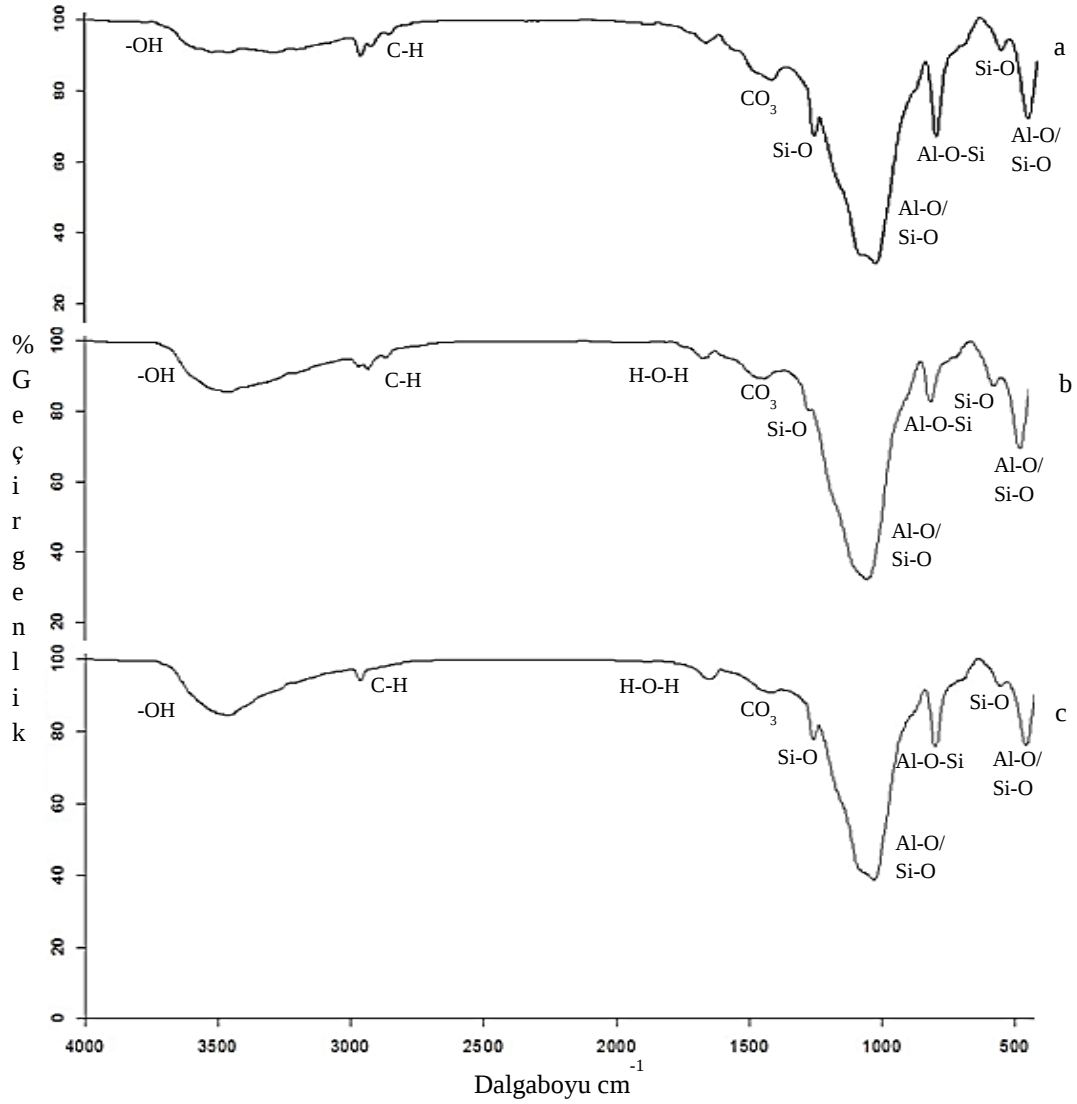
80°C sıcaklıkta 6 saat ısııl işlem görmüş numunenin spektrumunda parmak izi olarak belirtilen Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetinin büyük olduğu gözlenmiştir.  $\sim 450 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin,  $\sim 550 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Si-O düzlem dışı açılı bükülme titreşimlerinin ve  $\sim 750 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin oluştuğu görülmüştür.

Isıl işlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılmasıyla Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetric gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde artış görülmüştür.

Isıl işlem süresi 6 ve 15 saat olan numunelerin spektrumlarıyla kıyaslandığında 24 saat ısıtım işlem gören numunenin spektrumunda Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetric gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde azalma olduğu gözlenmiştir. Bağların şiddetlerindeki azalmanın  $\sim 1250 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Si-O gerilme titreşimlerinin oluşmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

#### **7.4.2.2. Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi**

Bu bölümde ısıtım işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi araştırılmıştır. Derişimi 8M olan potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 24 saat ısıtım işlem gören numunelerin spektrumları Şekil 7.40'da verilmiştir.



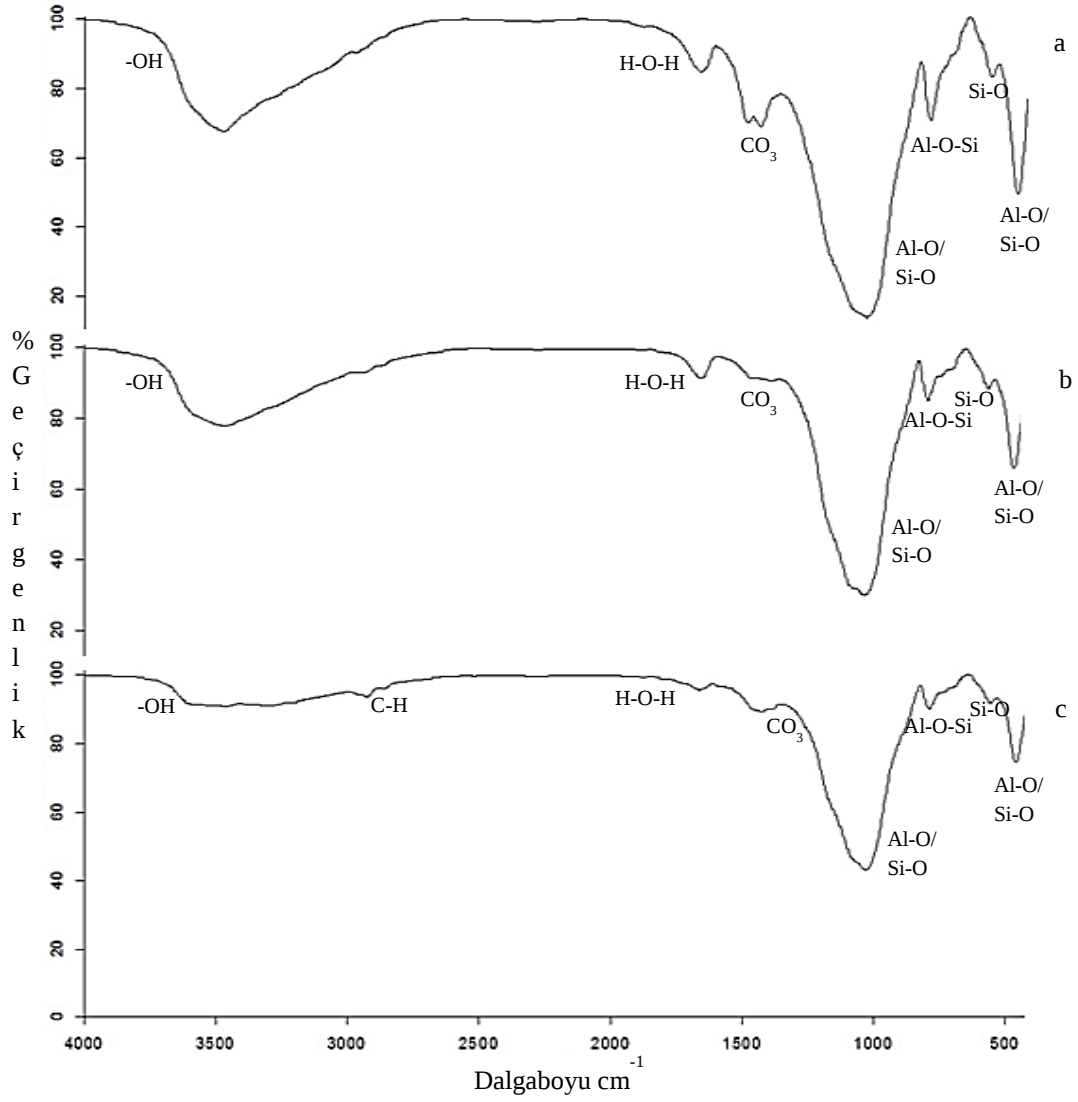
**Şekil 7.40.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C

Alkali derişimi 8M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin orta bölge infrared spektrumunda  $\sim 1000\text{cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin,  $\sim 460\text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi aç bükülme titreşimlerinin,  $\sim 550\text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Si-O düzlem dışı aç bükülme titreşimlerinin,  $\sim 750\text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin ve  $\sim 1250\text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Si-O gerilme titreşimlerinin oluştuğu görülmüştür.

Isıl işlem sıcaklığının 40°C'dan 80°C'a arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinin azaldığı görülmüştür.

Sıcaklığın 120°C'a arttırılması ile numunenin yapısındaki Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinin az miktarda azaldığı gözlenmiştir. Ana pikin şiddetindeki azalma silisyumun çözündüğünü göstermektedir (Heikal ve ark. 20014). Çözünen silisyumun Si-O ve Al-O-Si bağlarına katılmasıyla bu bağları gösteren gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde artış gözlenmiştir.

Alkali derişimi 12M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin bağ yapıları Şekil 7.41'de verilmiştir.



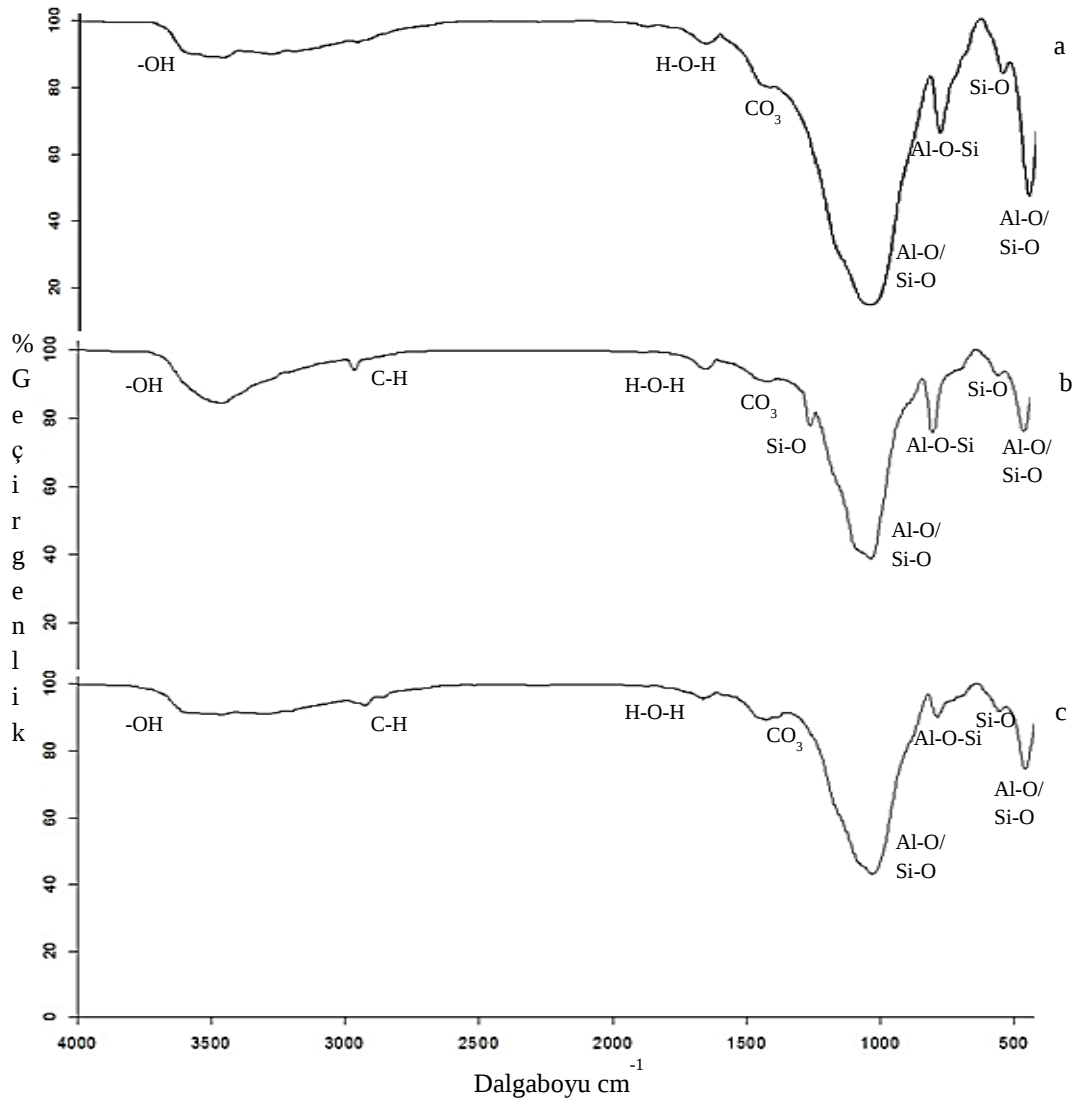
**Şekil 7.41.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C

40°C sıcaklıkta ısıt işlem gören numunenin yapısında alüminosilikat jelinin büyüklüğünü gösteren Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin kuvvetli olduğu gözlenmiştir. Şekilde yüzeye adsorplanan suya ait pikin ve karbonatlaşmayı gösteren pikin şiddetlerinin büyük olduğu görülmüştür.

Isıt işlem sıcaklığının 80°C'a ve 120°C'a arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin, Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi aç bükülme titreşimlerinin ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinin azaldığı görülmüştür.

#### 7.4.2.3. Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağ yapılarına etkisi

Potasyum hidroksit derişiminin geopolimerlerin bağ yapılarına etkilerinin incelenebilmesi amacıyla 4M, 8M ve 12M derişimlerdeki hidroksit çözeltileri ile hazırlanan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem uygulanan geopolimerlerin spektrumları kıyaslanarak Şekil 7.42’de verilmiştir.



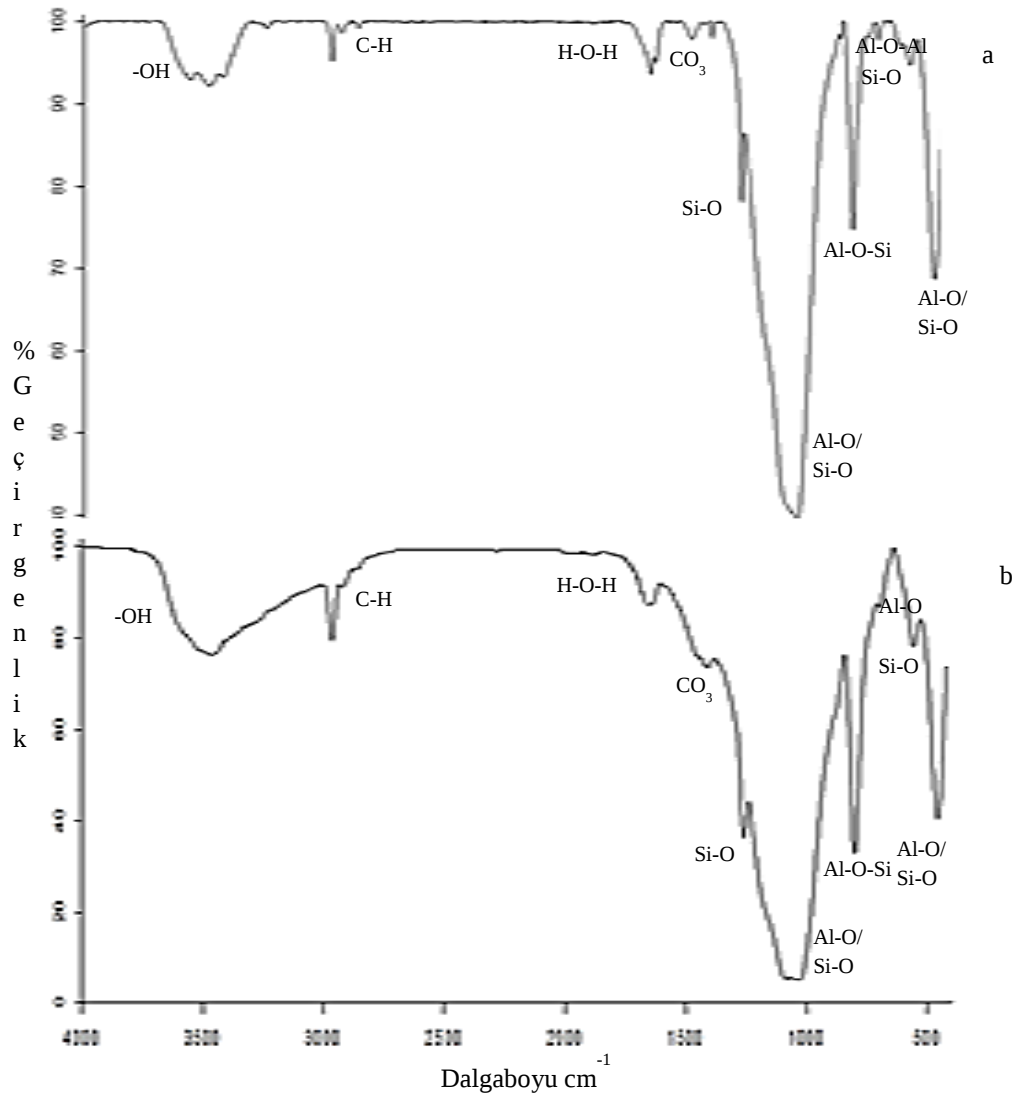
**Şekil 7.42.** Potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanmış ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M

Alkali derişiminin 4M'dan 8M'a arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetric gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi aç bükölme titreşimlerinin şiddetlerinde belirgin azalma gözlenmiştir. 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numunenin spektrumunda gözlenmeyen Si-O gerilme titreşimleri 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan numunenin spektrumunda görölmüştür. Alüminosilikat jelin yapısındaki silisyum çözünerek Si-O bağı oluşturmuştur.

Potasyum hidroksit derişiminin 12M'a arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetric gerilme titreşimlerinin, Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi aç bükölme titreşimlerinin ve Al-O-Si simetric gerilme titreşimlerinin şiddetlerinin düşük oranda azaldığı gözlenmiştir. Bağların şiddetlerindeki azalmanın yüksek derişimlerde polikondenzasyonun azalmasına bağı olabileceğı düşünölmektedir (Phair ve van Deventer, 2002).

#### **7.4.3. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin bağı yapılarının karşılaştırılması**

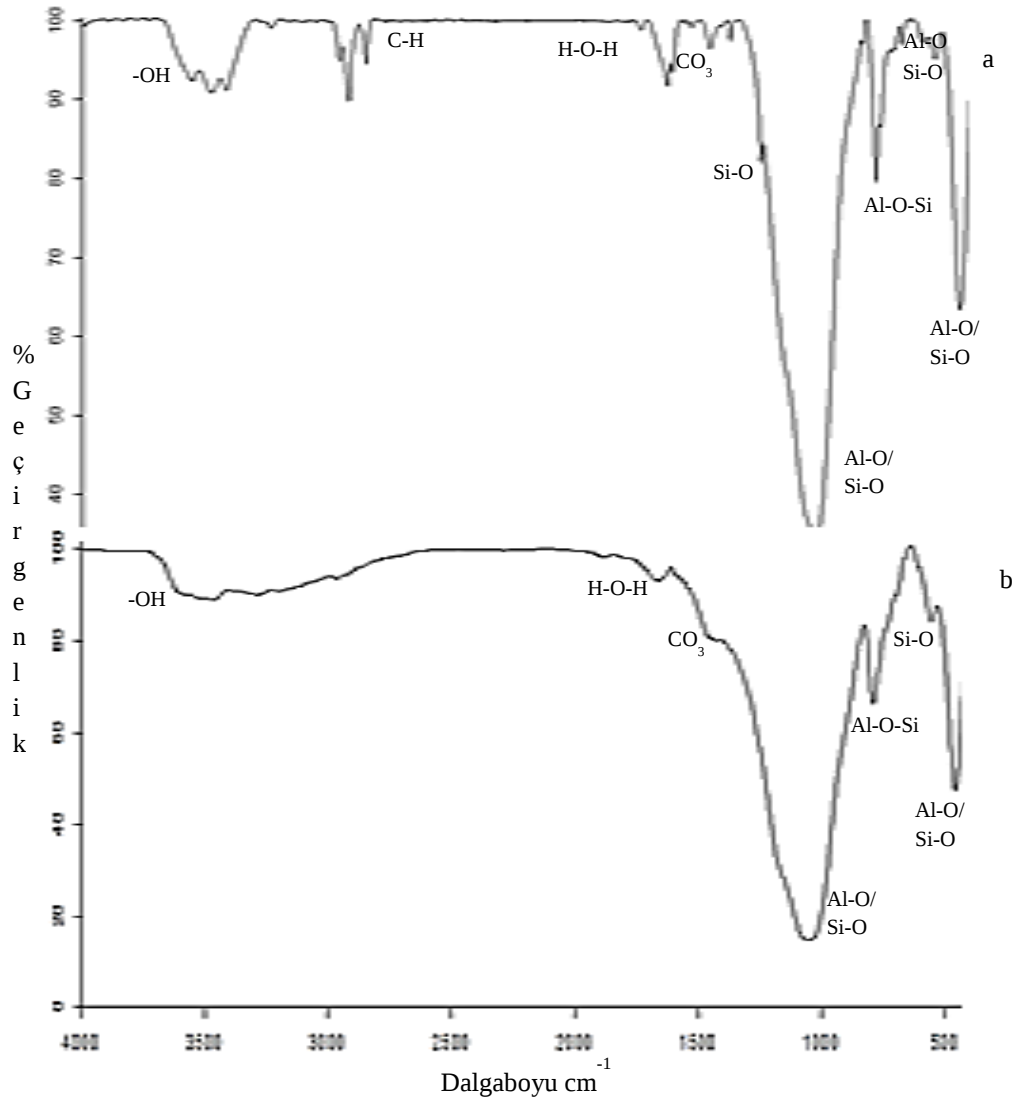
Geopolimer numunelerinin hazırlanmasında kullanılan sodyum hidroksit ve potasyum hidroksitin, numunelerin bağı yapılarına etkileri kıyaslanmıştır. Şekil 7.43, 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısı işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumlarını göstermektedir.



**Şekil 7.43.** 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune

4M derişiminde potasyum hidroksit ile hazırlanan numunenin spektrumunda Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin daha büyük olduğu görülmektedir. Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinin piklerin şiddetleri de daha yüksektir.

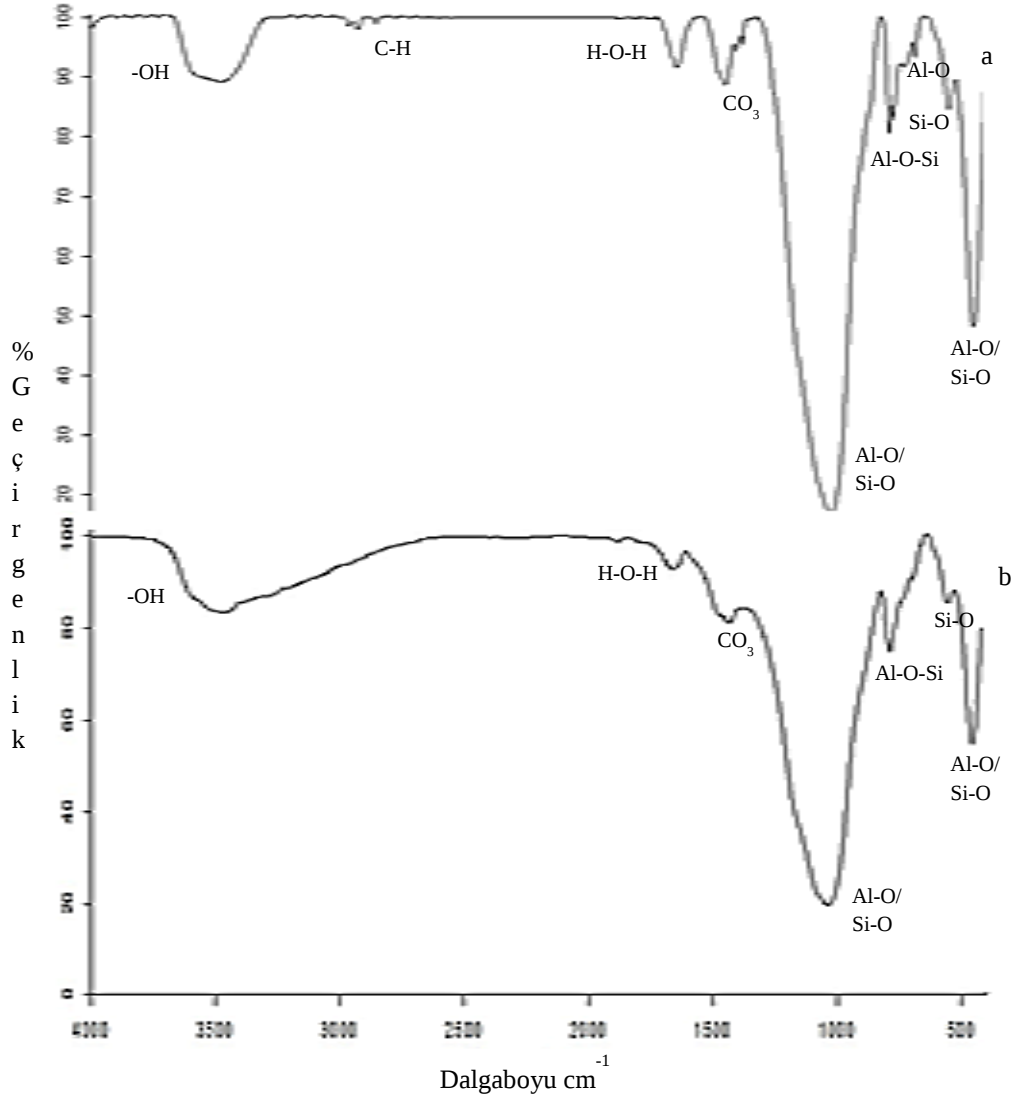
Şekil 7.44'te 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları verilmiştir.



**Şekil 7.44.** 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtılmış numunelerin orta bölge infrared spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune

120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtılmış numunelerin orta bölge infrared spektrumları incelendiğinde potasyum hidroksit ile hazırlanan numunenin spektrumunda Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açı bükülme titreşimlerinin büyük olduğu görülmektedir.  $\sim 1250 \text{ cm}^{-1}$  dalga boyunda gözlenen Si-O gerilme titreşimlerine ve Al-O gerilme titreşimlerine ait pikler bu numunenin spektrumunda gözlenmemiştir.

8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları Şekil 7.45'te verilmiştir.

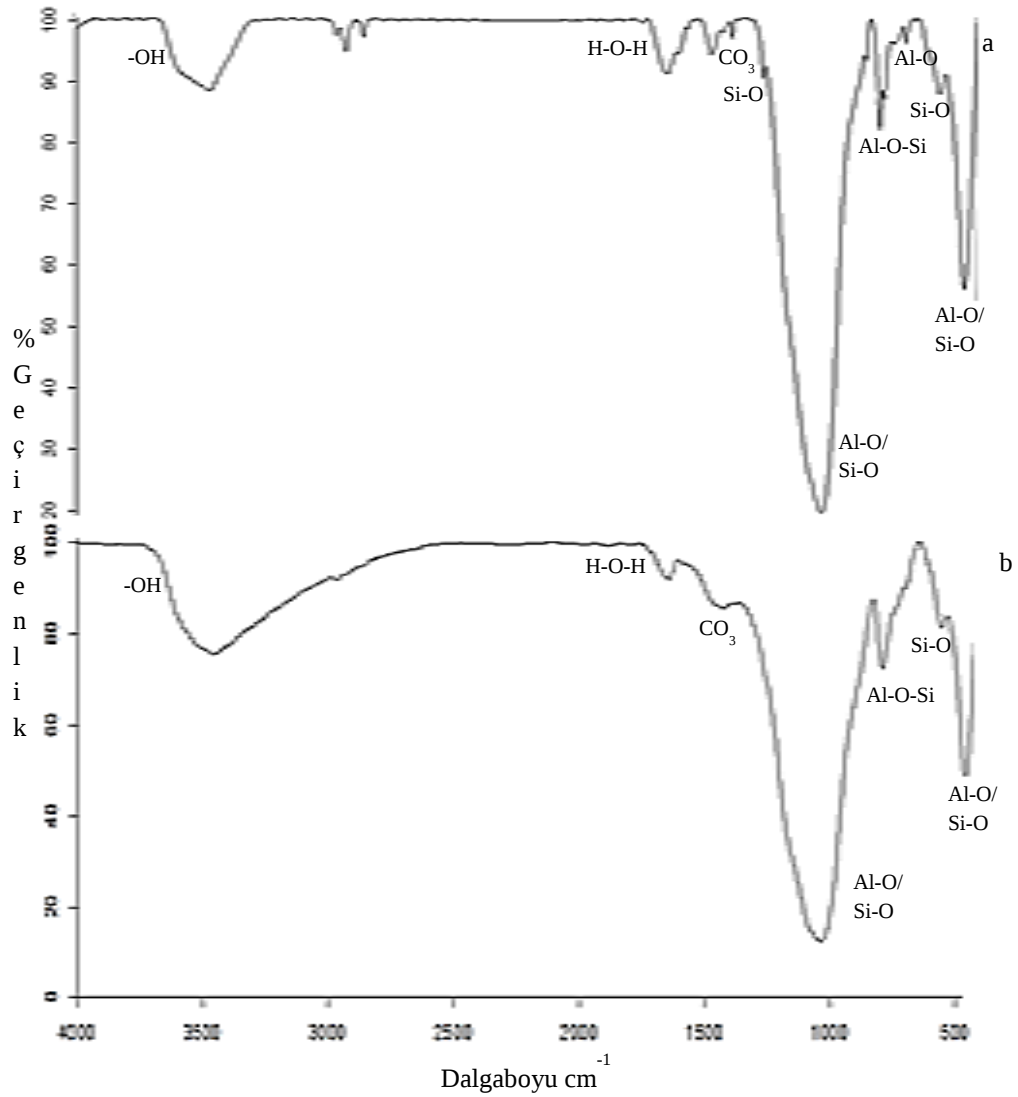


**Şekil 7.45.** 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune

8M derişiminde alkali çözeltileri ile hazırlanan numunelerin spektrumlarında Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinin aynı olduğu gözlenmiştir. Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi

açı bükülme titreşimlerinin şiddeti, sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin yapısında daha büyüktür. Potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin yapısında Al-O gerilme titreşimleri görülmemiştir.

Aynı derişimde alkali çözelti ile hazırlanan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları Şekil 7.46’da verilmiştir.



**Şekil 7.46.** 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin orta bölge infrared spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune

Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetinin, potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin yapısında daha büyük olduğu gözlenmiştir.

## **7.5. Deneysel Çalışmadan Elde Edilen Geopolimerlerin X-Işını Kırınım Spektrumları**

Deneysel çalışmada elde edilen geopolimer numunelerinin X-Işını kırınım spektrumları, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit alkali çözeltileri için ayrı ayrı incelenerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

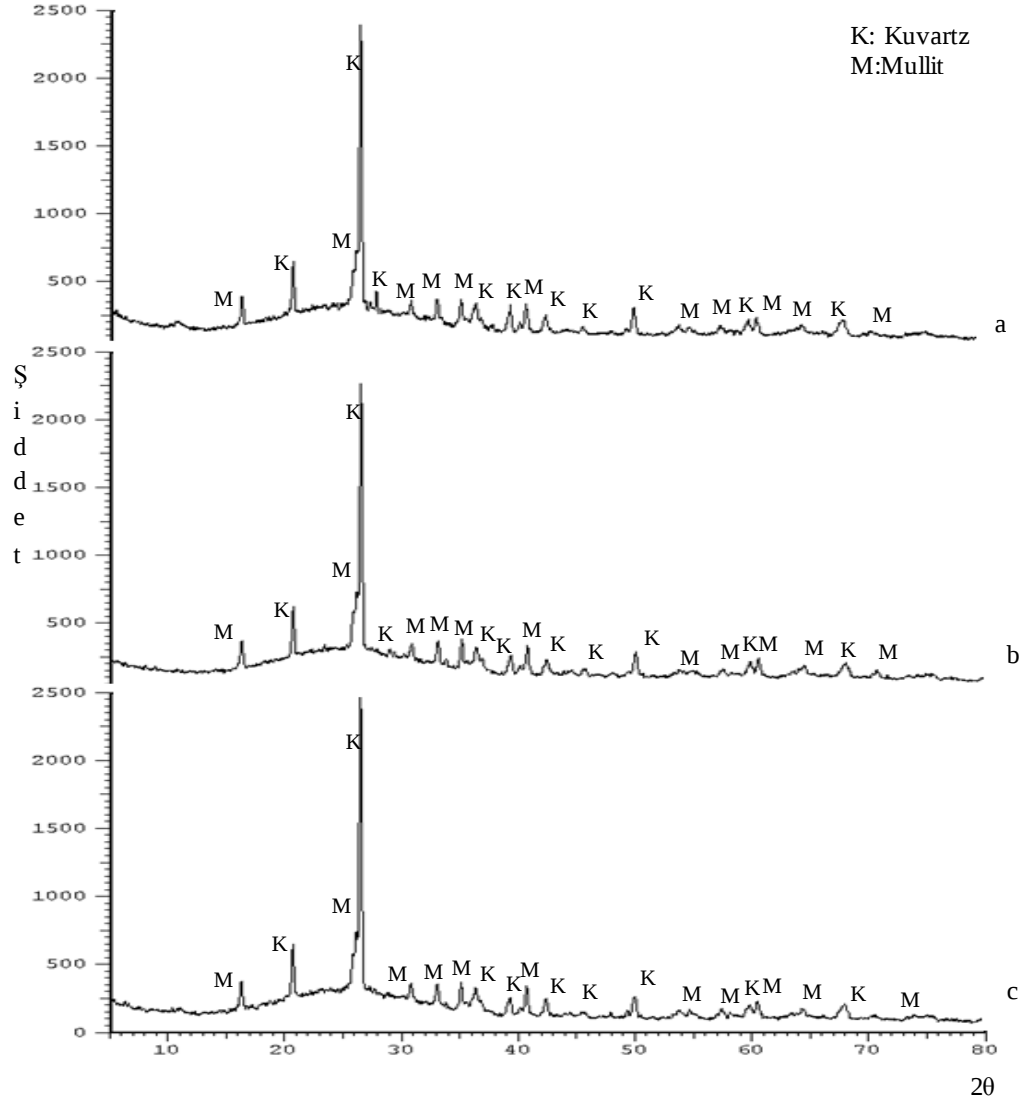
### **7.5.1. Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin x-ışını kırınım spektrumları**

Alkali çözelti olarak sodyum hidroksit kullanılarak farklı ısı işlem sıcaklıkları ve sürelerde hazırlanan geopolimerlerin kristal yapıları X-Işını kırınım spektrometre kullanılarak araştırılmıştır. Isıl işlem süresinin, ısı işlem sıcaklığının ve alkali derişiminin numunelerin yapılarına etkileri incelenmiştir.

#### **7.5.1.1. Isıl işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi**

Isıl işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarına etkisinin araştırılması amacı ile 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 40°C'ta ve 80°C'ta, 8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 40°C'ta 6 saat, 15 saat ve 24 saat ısı işlem gören numunelerin spektrumları incelenmiştir.

Alkali çözelti olarak 4M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 40°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısı işlem gören numunelerin spektrumları Şekil 7.47'de verilmiştir.



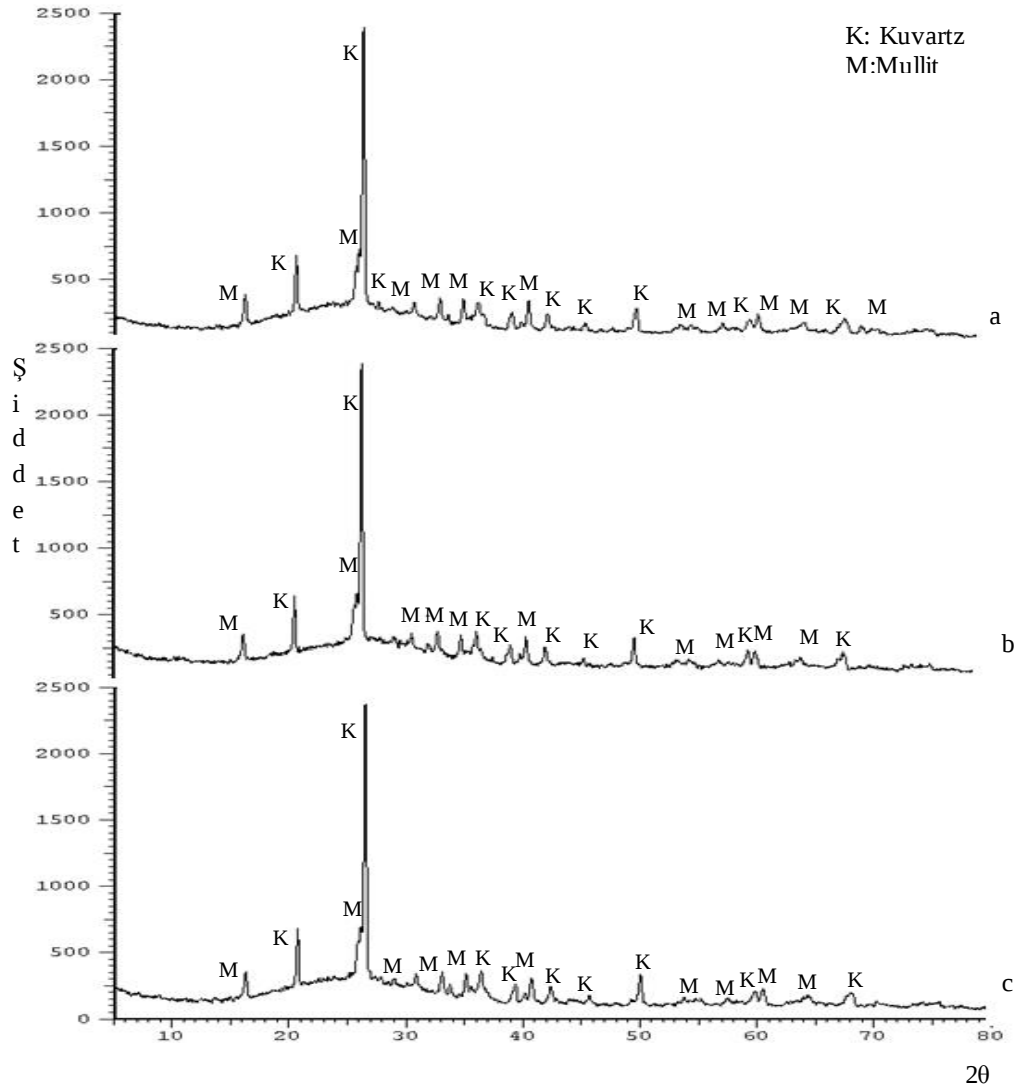
**Şekil 7.47.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıt ışlem g r m ş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt ışlem gören numunenin XRD spektrumunda yapının amorf olduğu gözlenmiştir. Numunenin kuvartz ve mullit kristalleri içerdiği g r lm ştir. Geopolimer numunelerinin yapılarında gözlenen tümsek 15-36° 2  aralığında oluştuğu gözlenmiştir.

Isıt ışlem sıcaklığı 40°C olan numunelerin yapıları incelendiğinde ısıt ışlem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile 26-27°'de görülen kuvartz pikinin şiddetinin azaldığı gözlenmiştir. Isıt ışlem süresinin 24 saate arttırılması

ile 6 ve 15 saat ısıtılma işlemi gören numunelerin spektrumlarında 28°'de görülen kuvarz pikinin bu numunenin yapısında oluşmadığı gözlenmiştir. 26-27°'de görülen kuvarz pikinin şiddetinin ise sürenin artması ile birlikte düşük oranda arttığı görülmüştür. Kristal fazların azalması, geopolimer matrisine daha fazla maddenin katıldığını göstermektedir (Xu ve Van Deventer 2002; Cristelo ve ark. 2012).

Alkali derişimi 4M olan sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve ısıtılma işlemi sıcaklığı 80°C olan numunelerin spektrumları Şekil 7.48'de verilmiştir.



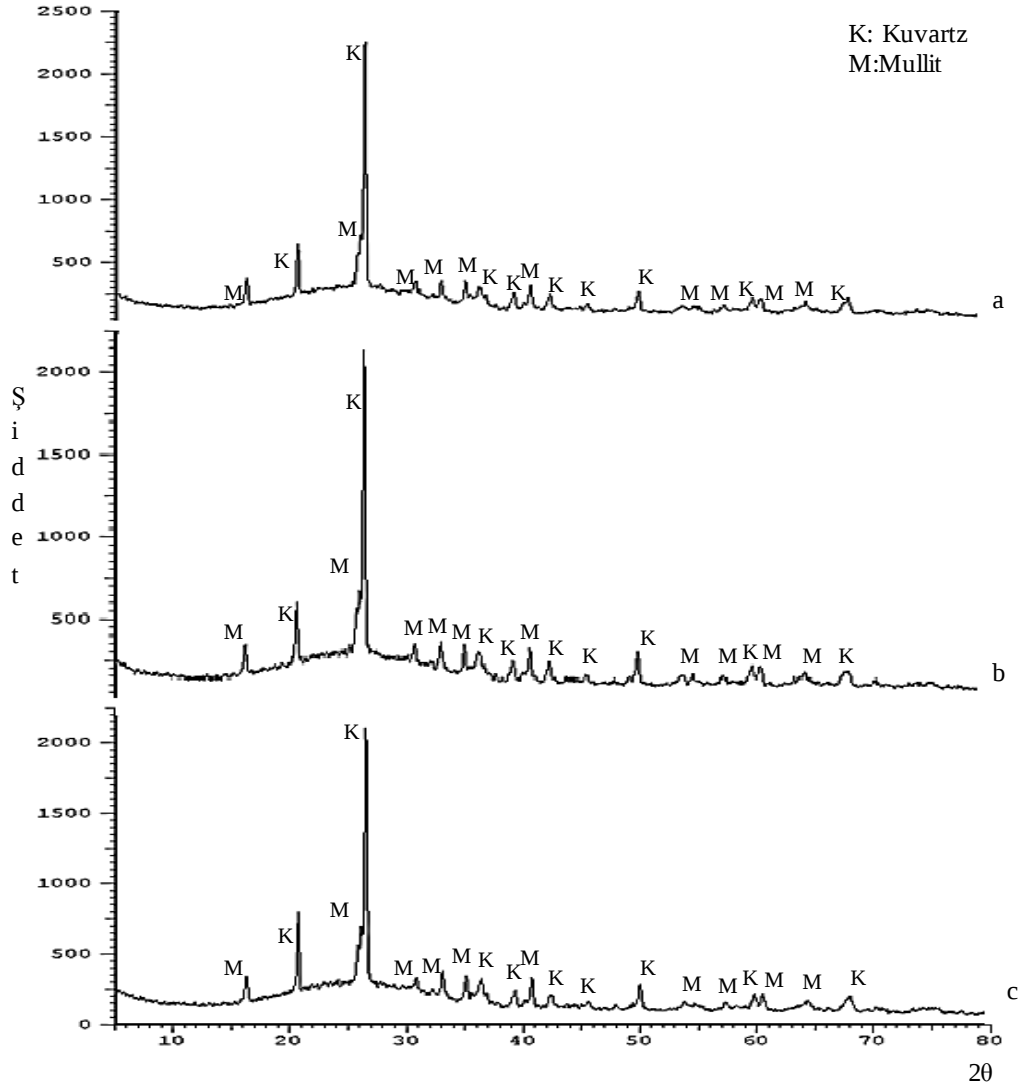
**Şekil 7.48.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta ısıtılma işlemi görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

Isıl işlem süresi 6 saat olan numunenin yapısını amorf olduğu ve temel olarak kuvarz ve mullit kristallerini içerdiği görülmüştür. Merkezi  $26-27^{\circ} 2\theta$ 'da olan  $15-37^{\circ} 2\theta$ 'da aralığında bulunan tümsek görülmüştür.

$80^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ısıtılmış numunelerde sürenin etkisi incelendiğinde 6 saat süre ile ısıtılmış numunenin spektrumunda  $28^{\circ}$ 'de gözlenen kuvarz piki, 15 saat ısıtılmış numunenin spektrumunda gözlenmemiştir. 15 saat ısıtılmış numunede  $70^{\circ}$  civarında gözlenen mullit kristallerinde azalma görülmüştür.

Isıl işlem süresi 24 saate arttırıldığında tümseğin büyüklüğünde düşük oranda bir artış gözlenmektedir. Spektrumlarda  $28^{\circ}$ 'de görülen kuvarz pikinin, 24 saat ısıtılmış numunenin yapısında da oluşmadığı görülmüştür.

Derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanılarak  $40^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıtılmış numunelerin XRD spektrumları Şekil 49'da verilmiştir.



**Şekil 7.49.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak ve hazırlanan ısıt işlem sıcaklığı 40°C olan numunelerde, sürenin 6 saatten 15 saate arttırılması ile 21°'de ve 26-27°'de görülen kuvartz piklerinin şiddetlerinde azalma gözlenmiştir.

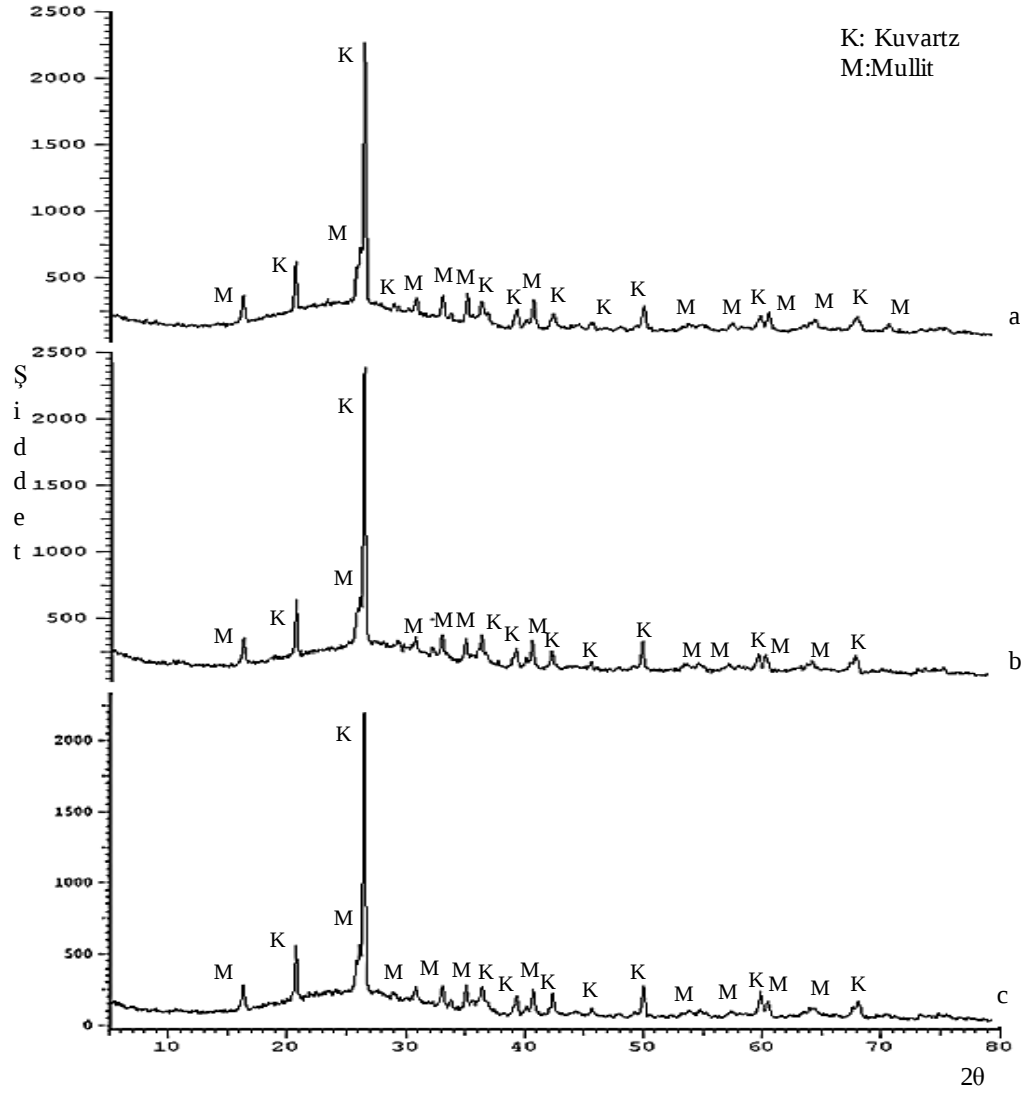
Isıt işlem süresi 15 saatten 24 saate arttırıldığında 21°'de gözlenen kuvartz pikinin şiddetinde az bir artış görülmüştür. 30°'de ve 70°'den sonra görülen mullit kristallerinin piklerinin şiddetlerinde ise düşük oranda azalma gözlenmiştir.

Geopolimer numunelerinin spektrumlarında 15-36° 2θ aralığında tümsek olduğu gözlenmiştir. Isıl işlem süresinin arttırılması ile 26-27°'de görülen kuvarz piklerinin şiddetlerinde azalma görülmüştür.

#### **7.5.1.2. Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi**

Isıl işlem sıcaklığının geopolimer numunelerinin amorf ve kristal yapılarına etkisinin incelenmesi amacıyla 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 15 saat, 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 24 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda işlem gören numunelerin spektrumları incelenerek birbirleriyle kıyaslanmıştır.

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 15 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C ısı işlem gören numunelerin orta bölge infrared spektrumları Şekil 7.50'de verilmiştir.



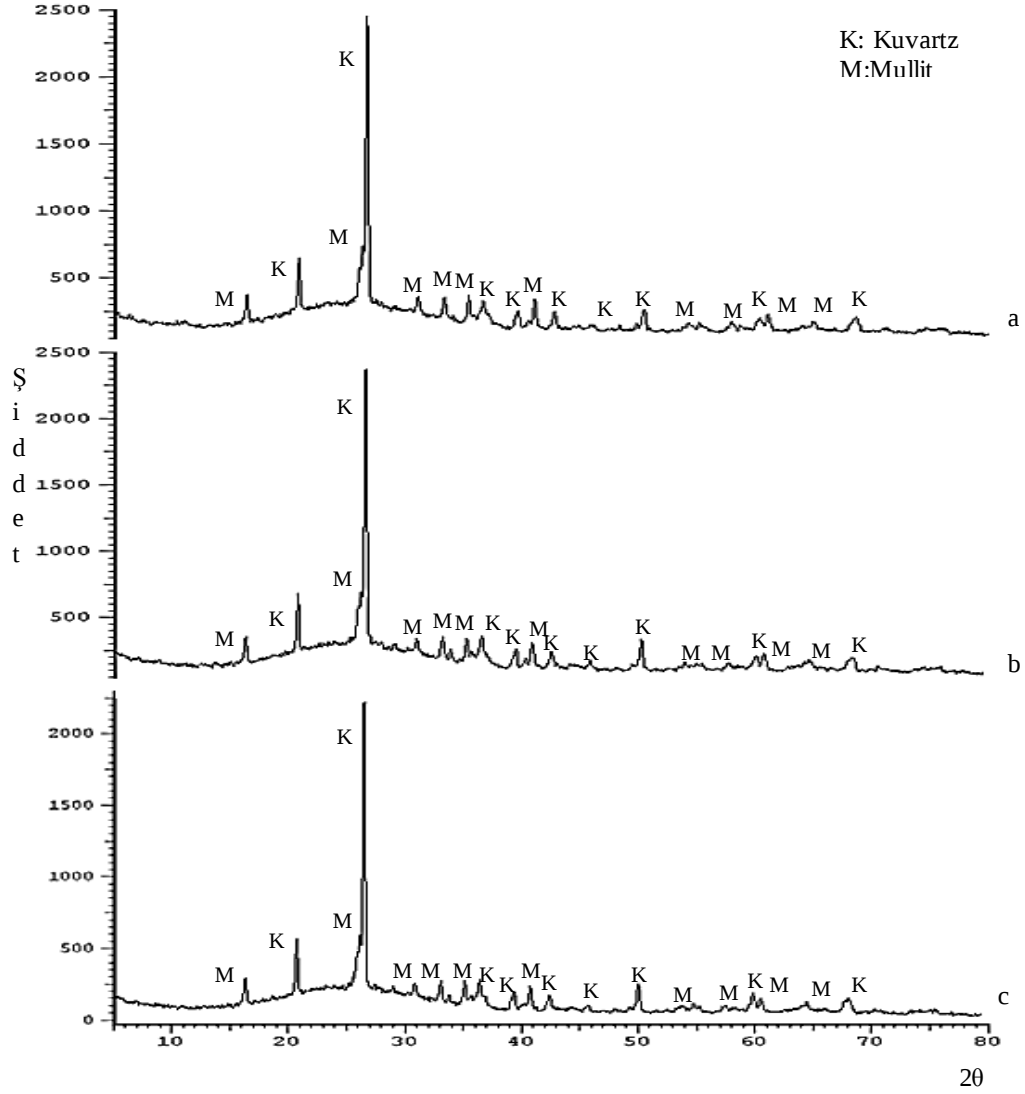
**Şekil 7.50.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C

Isıt işlem sıcaklığının 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile spektrumlarda 26-27°'de gözlenen kuvartz pikinin şiddetinde düşük oranda artış gözlenirken, 29° civarında görülen kuvartz pikinde bir azalma gözlenmiştir. 70°'de görülen mullit kristalinin, 80°C'ta ısıt işlem görmüş olan numunenin yapısında oluşmadığı görülmüştür.

Sıcaklığın 120°C'a arttırılması ile 26-27°'de gözlenen kuvartz pikinin şiddetinde düşük oranda azalma görülmüştür. 80°C'ta ısıt işlem görmüş olan

numunenin spektrumunda olduğu gibi 70°'de görülen mullit kristali bu numunenin spektrumunda da görülmemiştir.

Alkali derişimi 4M olan sodyum hidroksit kullanılan ve 24 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda ısıt işlemleri gören numunelerin spektrumları Şekil 7.51'de verilmiştir.

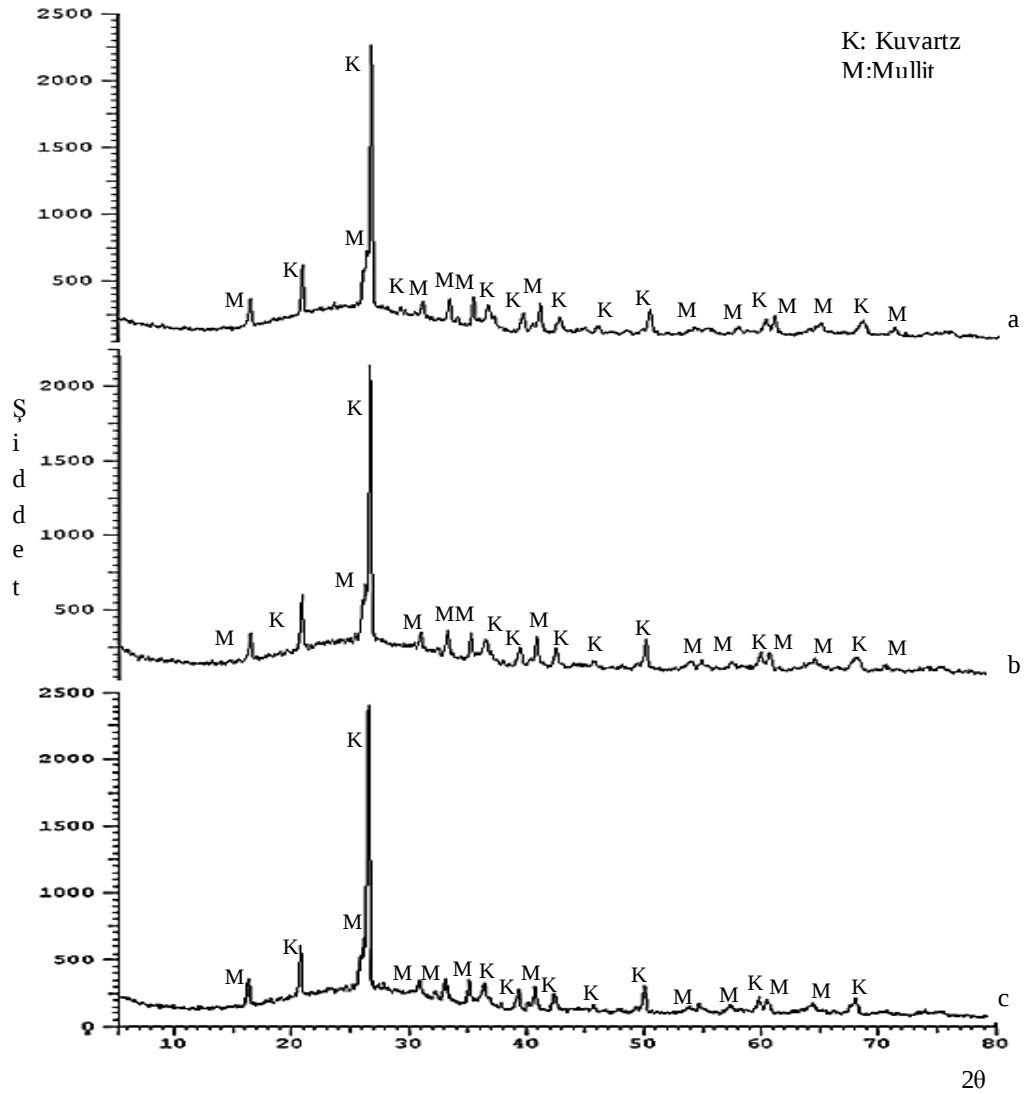


Şekil 7.51. Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 24 saat ısıt işlemleri görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C

Isıt işlemleri sıcaklığının 40°C'tan 80°C'a arttırılmasıyla 26-27°'de gözlenen kuvartz pikinin şiddetinde bir azalma gözlenirken 120°C'a arttırılması ile pikinin şiddetinde bir artış görülmüştür.

### 7.5.1.3. Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi

Alkali çözelti olarak sodyum hidroksit kullanılan numunelerde derişimin geopolimerler numunelerinin kristal fazları üzerine etkisinin araştırılması amacıyla 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş farklı derişimlerde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin XRD spektrumları Şekil 7.52’de verilmiştir.



Şekil 7.52. Sodyum hidroksit kullanılmış ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M

Sodyum hidroksit derişiminin 4M'dan 8M'a arttırılması ile 21° ve 26-27° 20 aralığında gözlenen kuvarz pikinin şiddetinde düşük oranda bir azalma görölmüştür. Pikinin şiddetinin azalması, kuvarzın çözündüğünü göstermektedir. 28°'de gözlenen kuvarz piki ise, 8M derişiminde sodyum hidroksit ile hazırlanan numunenin spektrumunda gözlenmemiştir.

Alkali derişiminin 8M'dan 12M'a arttırılmasıyla 21° ve 26-27° 20 aralığında gözlenen kuvarz pikinin şiddetinde düşük oranda bir artma görölmüştür. Ancak 15-38° aralığında gözlenen tümseğin büyüklüğünde düşük oranda azalma gözlenmiştir.

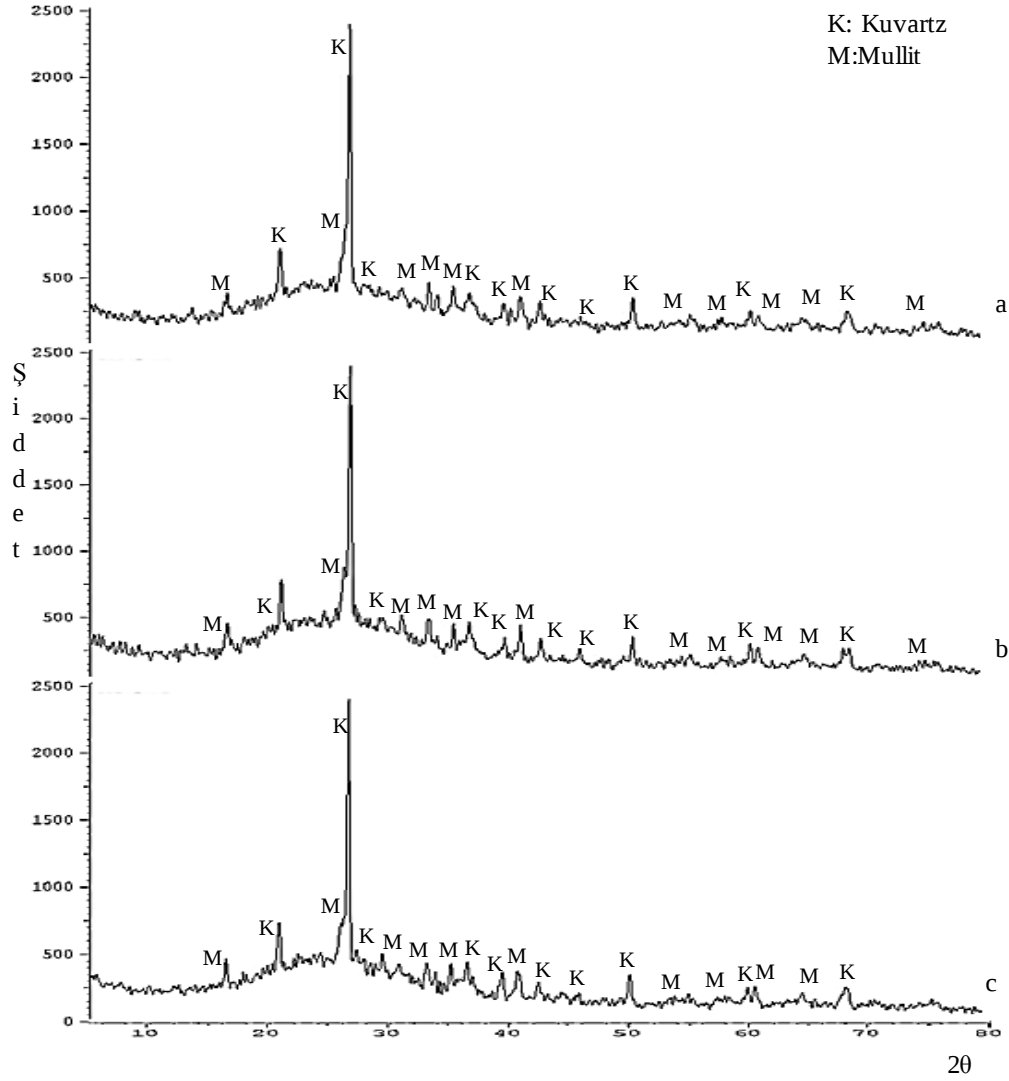
#### **7.5.2. Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin X-ışını kırınım spektrumları**

Bu bölümde alkali çözelti olarak potasyum hidroksit kullanılan ve farklı ısı işlem sıcaklıkları ve sürelerinde elde edilen geopolimerlerin kristal yapıları incelenmiştir.

##### **7.5.2.1. Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi**

Isıl işlem süresinin geopolimer numunelerinin amorf ve kristal faz yapılarına etkilerinin araştırılması amacı ile derişimi 8M olan potasyum hidroksit kullanılarak 120°C'ta ve 12M olan potasyum hidroksit kullanılarak 120°C'ta 6, 15 ve 24 sat ısı işlem gören numunelerin X-ışını kırınım spektrumları incelenmiştir.

8M derişimindeki potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 120°C sıcaklıkta ısı işlem gören numunelerin spektrumları Şekil 7.53'te verilmiştir.



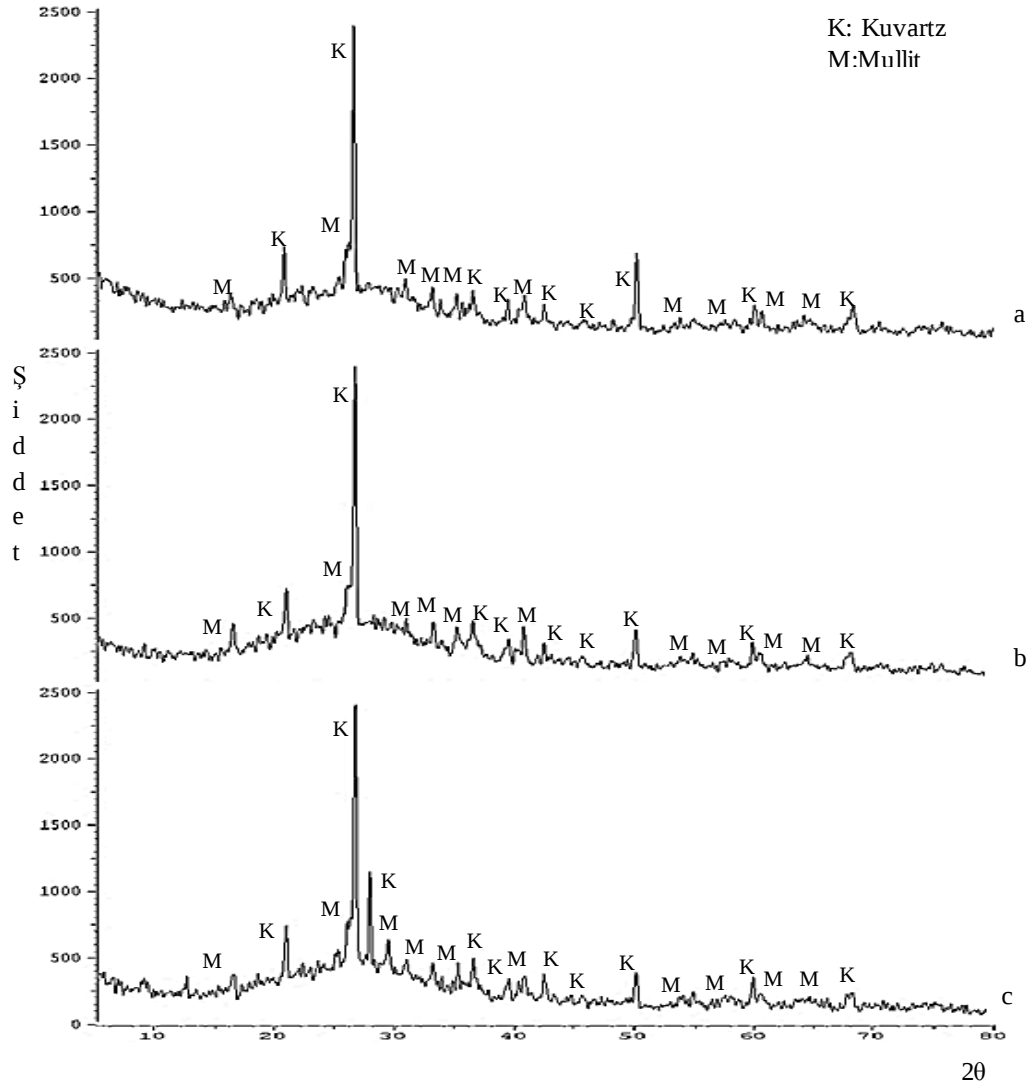
**Şekil 7.53.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıt ışılem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

Alkali derişimi 8M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt ışılem görmüş numunenin yapısının amorf olduğu ve kuvartz ve mullit kristallerini içerdđi gözlenmiştir.

Isıt ışılem süresinin 6 saatten 15 saate arttırılması ile 17°'de gözlenen mullit ve 21°'de gözlenen kuvartz piklerinin şiddetlerinde az miktarda artış görölmüşür. Geopolimer numunelerinin yapılarında gözlenen tümseğın yüksekliğinde artış gözlenmiştir.

Isıl işlem süresinin 15 saatten 24 saate arttırılması ile numunenin kristal yapısında ve oluşan tümseğin büyüklüğünde değişiklik gözlenmemiştir.

Alkali derişimi 12M olan potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan 120°C sıcaklıkta ısıt işlem gören numunelerin spektrumları Şekil 7.54'te verilmiştir.



Şekil 7.54. Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 6 saat b) 15 saat c) 24 saat

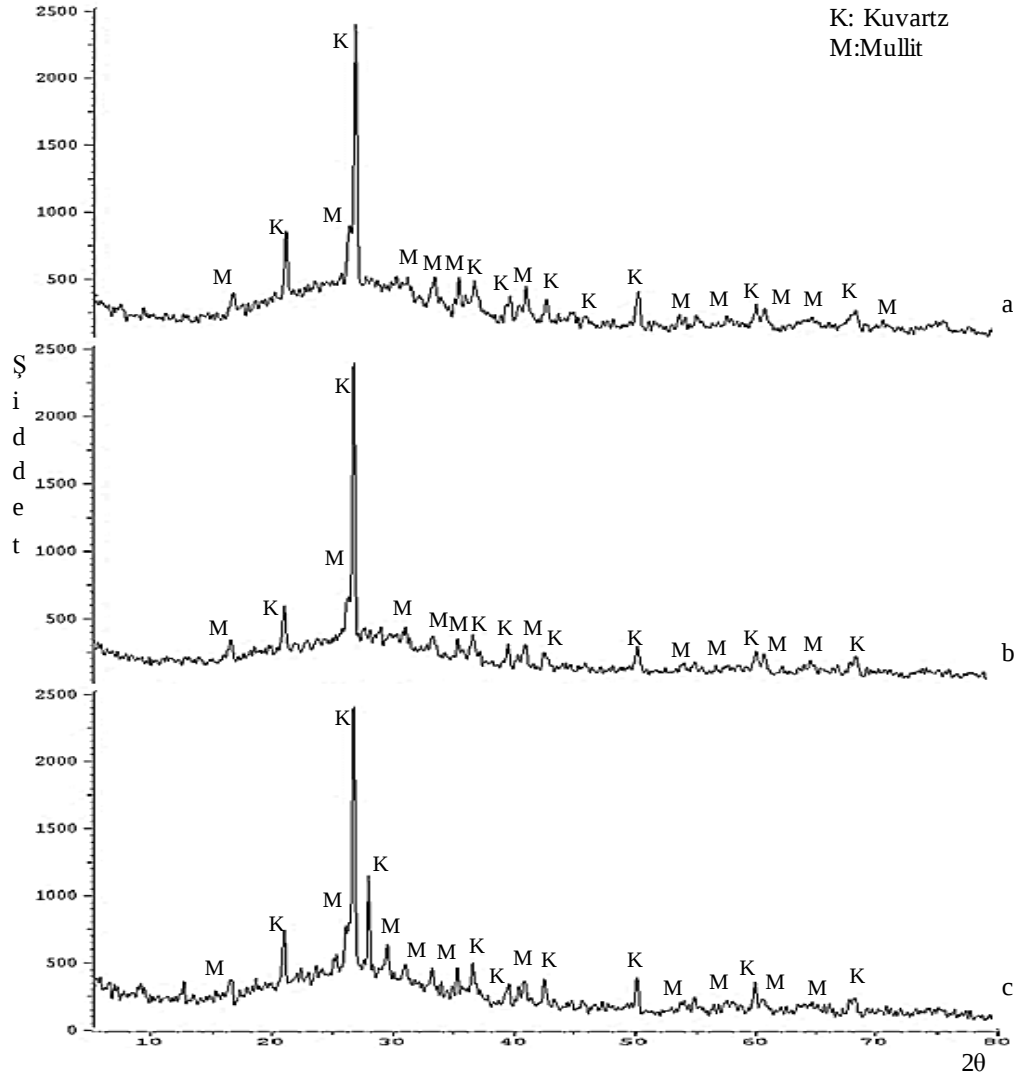
120°C sıcaklıkta 6 saat ısı işlem görmüş numunenin spektrumunda yapının amorf olduğu ve kuvarz ve mullit kristalleri içerdiği gözlenmiştir. 50°'de gözlenen kuvarz pikinin şiddetinin büyük olduğu göze çarpmaktadır.

Isıl işlem süresi 15 saat olan numunenin spektrumunda sürenin artması ile birlikte tümseğin yüksekliğinin az miktarda arttığı ve konikleştiği görülmüştür. Spektrumlarda gözlenen konikleşme uçucu külün yavaş çözünmesine bağlıdır (Criado ve ark. 2007). 50°'de gözlenen kuvarz pikinin şiddetinin azaldığı gözlenmiştir.

6 saat ve 15 saat ısı işlem gören numuneler ile kıyaslandığında, 24 saat ısı işlem görmüş numunenin spektrumunda oluşan tümseğin büyüklüğünde belirgin bir değişiklik gözlenmezken kristal fazlarının arttığı görülmüştür. 28°'de gözlenen kuvarz pikinin ve 29°'da gözlenen mullit piklerinin şiddetlerinde belirgin artış gözlenmiştir.

#### **7.5.2.2. Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi**

Bu bölümde, potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin yapılarına ısı işlem sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan ve 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 24 saat ısı işlem gören numunelerin spektrumları Şekil 7.55'te verilmiştir.



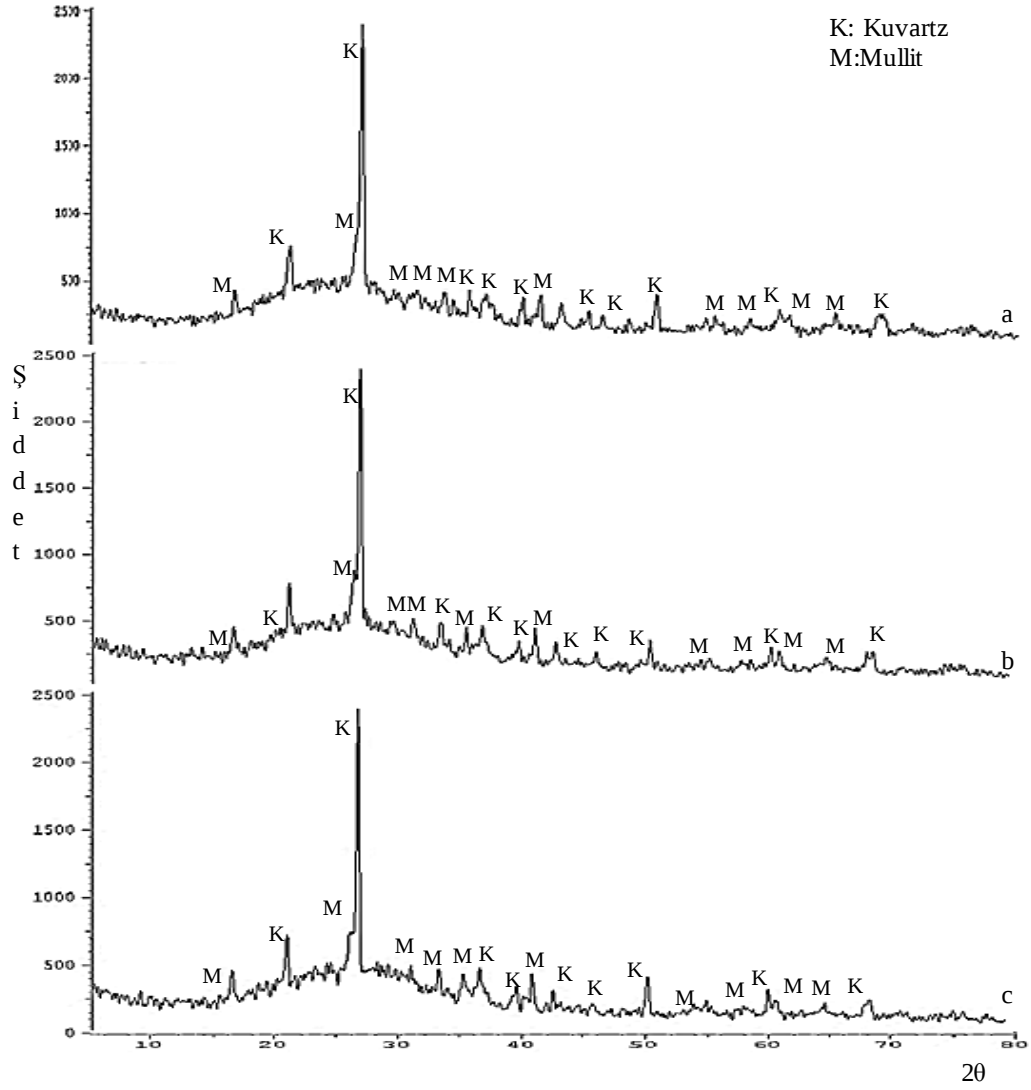
**Şekil 7.55.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a) 40°C b) 80°C c) 120°C

Isıl işlem sıcaklığının 80°C'a artırılması ile yapıda gözlenen tümseğin yüksekliğinin azaldığı ancak genişliğinin arttığı görülmüştür. 17°'de gözlenen mullit, 22°'de gözlenen kuvarz pikinin şiddetinde çok düşük oranda azalma gözlenmiştir. Sıcaklığın 120°C'a artırılması ile tümseğin şiddetinin az miktarda arttığı ve 28°'de şiddeti büyük kuvarz pikinin oluştuğu görülmüştür.

### **7.5.2.3. Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarına etkisi**

Alkali derişiminin deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen geopolimerlerin kristal yapılarına etkisinin incelenmesi amacıyla 120°C sıcaklıkta 15 saat ve 24 saat ısıt ışlem görmüş ve 4M, 8M ve 12M derişimlerinde potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen numunelerin X-ışını kırınım spektrumları incelenmiştir.

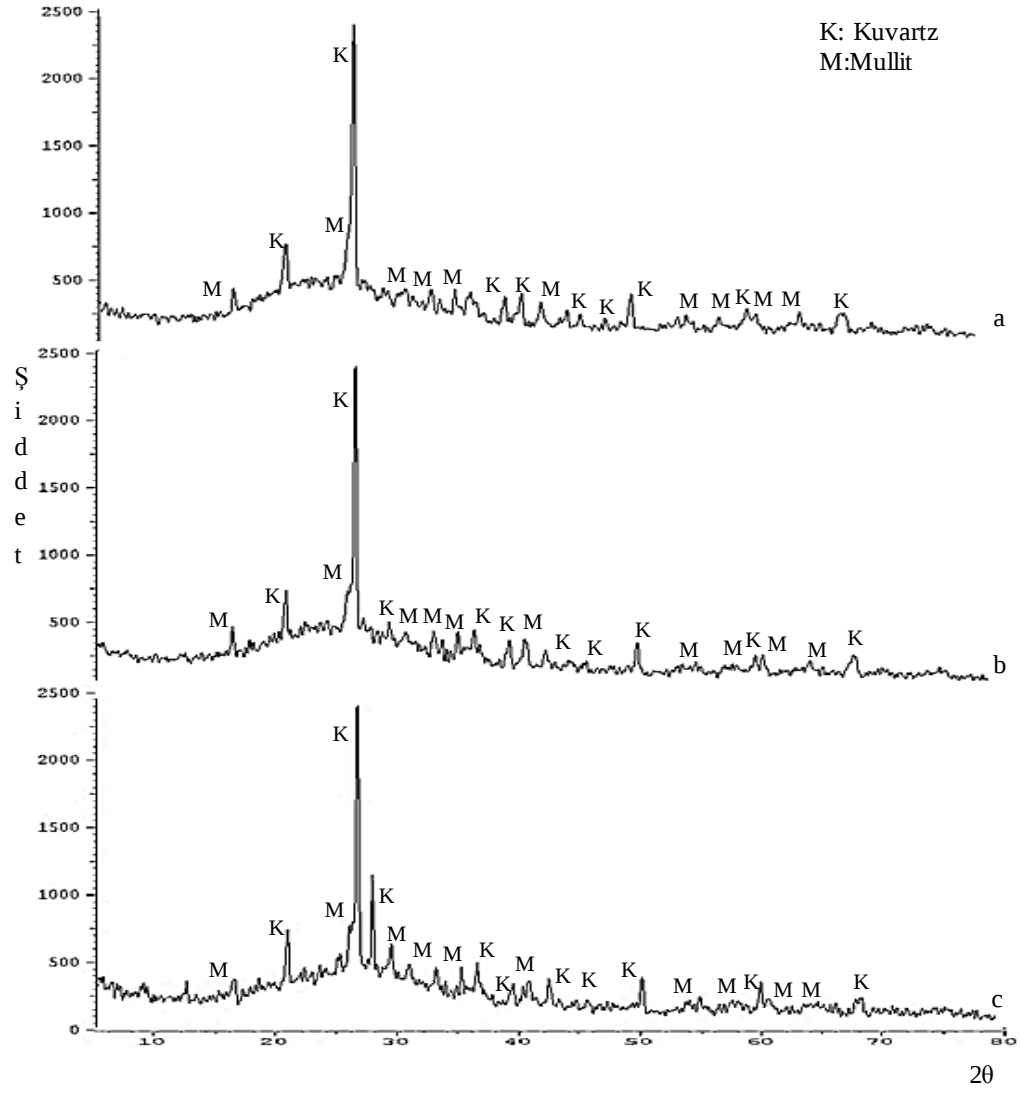
120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt ışlem gören ve 4M, 8M ve 12M derişimlerinde potasyum hidroksit kullanılan numunelerin spektrumları sırasıyla şekil 7.56’da verilmiştir.



**Şekil 7.56.** Potasyum hidroksit kullanılmış ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtılmış numunelerin XRD spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M

120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtılmış numunelerde alkali derişiminin artırılması ile oluşan tümseğın büyüklüğünde ve piklerin şiddetlerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir.

120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtılmış numunelerin spektrumları Şekil 7.57’de verilmiştir.



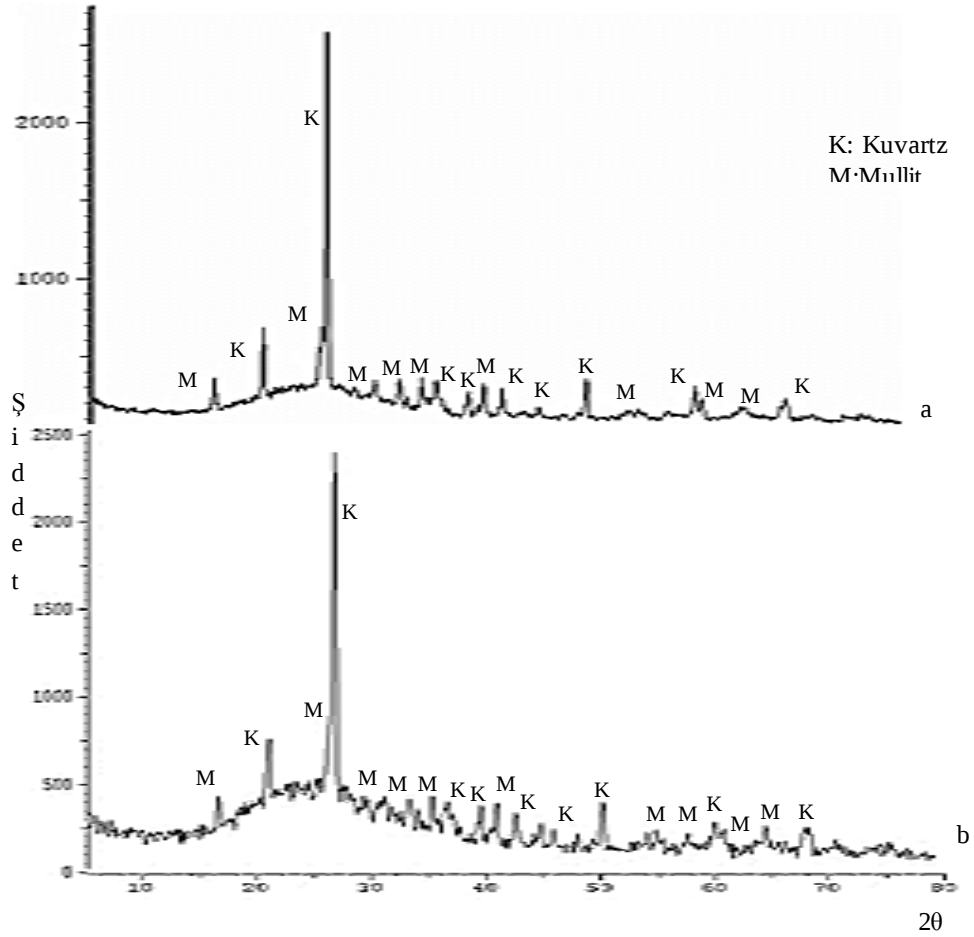
**Şekil 7.57.** Potasyum hidroksit kullanılmış ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtılmış numunelerin XRD spektrumları a) 4M b) 8M c) 12M

Potasyum hidroksit derişiminin 4M'dan 8M'a artırılması ile yapının değişmediği ancak 28°'de kuvartz pikinin oluştuğu gözlenmiştir. Derişim 12M'a arttırıldığında ise 28°'de gözlenen kuvartz pikinin şiddetinin büyük ölçüde arttığı gözlenmiştir.

### 7.5.3. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin kristal yapılarının karşılaştırılması

Bu bölümde geopolimer numunelerinin hazırlanmasında alkali aktifleştiricide bulunan katyonların, numunelerin kristal yapılarına etkileri araştırılmıştır.

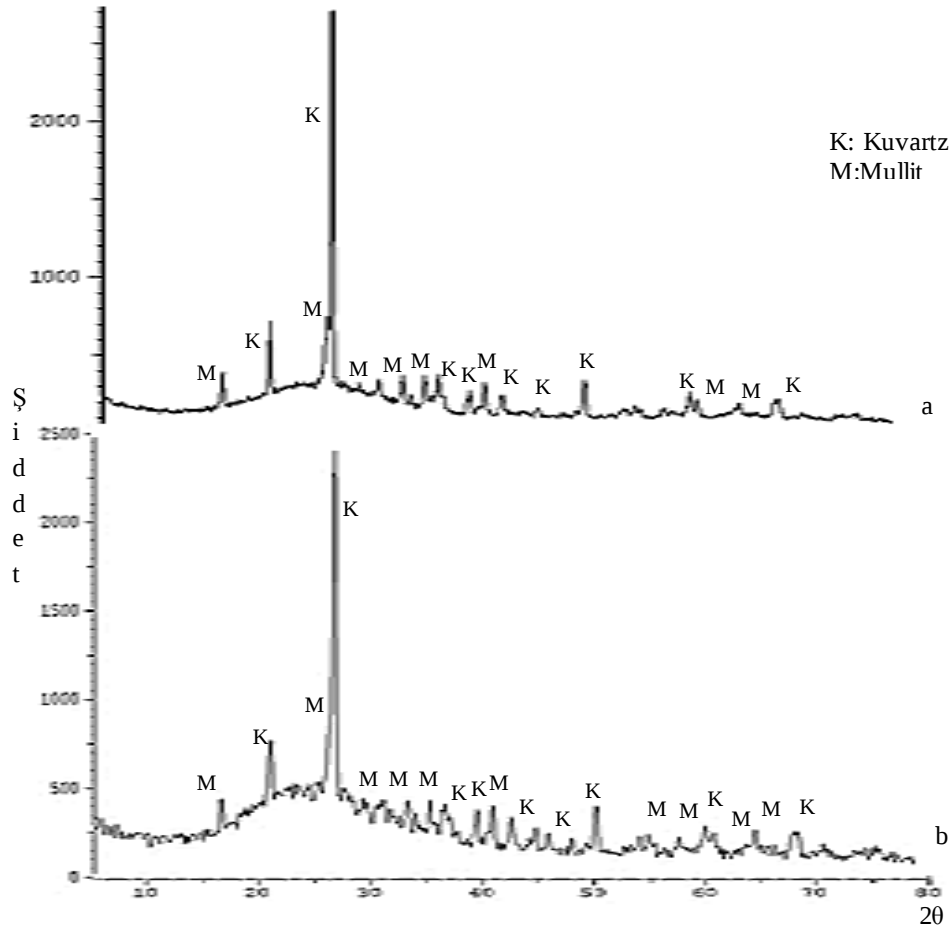
4M derişiminde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit ile hazırlanan 120°C'ta 15 saat ısıt işlem gören numunelerin spektrumları Şekil 7.58'de verilmiştir.



Şekil 7.58. 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune

Potasyum hidroksit kullanılan numunenin spektrumunda, oluşan tümseğin daha yüksek olduğu ve 26-27°C’de oluşan kuvarz pikinin şiddetinin daha büyük olduğu gözlenmiştir.

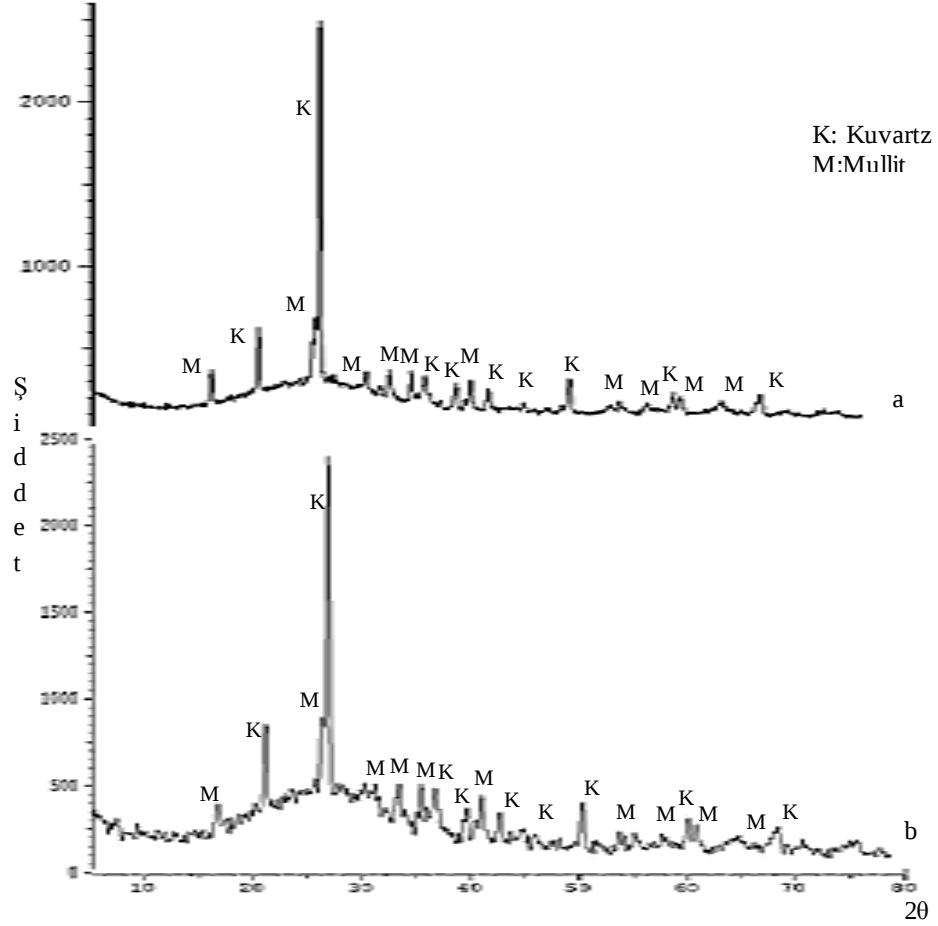
Şekil 7.59’da 4M derişiminde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit ile hazırlanan 120°C’ta 24 saat ısıt işlem gören numunelerin spektrumları verilmiştir.



**Şekil 7.59.** 4M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin XRD spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune

Şekilde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin spektrumunda, oluşan tümseğin daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7.60'ta ise 12M derişiminde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit ile hazırlanan 40°C'de 15 saat ısıt ışılem gören numunelerin spektrumları verilmiştir.



**Şekil 7.60.** 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt ışılem görmüş numunelerin XRD spektrumları a. NaOH ile hazırlanan numune b. KOH ile hazırlanan numune

12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin spektrumunda geopolimerlerde oluşan tümseğın yüksekliğinin daha büyük olduğu görülmüştür.

X-ışını kırınım spektrumları verilen numunelerin basınç dayanımları kıyaslandığında potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç

dayanımlarının da daha yüksek olduğu gör÷lmüştür. Basınç dayanımlarının yüksek olmasının sebebinin gözlenen tümseğın yüksekliğının dolayısı ile geopolimerizasyon derecesinin daha büyük olmasından kaynaklanabileceğı düşün÷lmektedir.

## **7.6. Deneyisel Çalışmadan Elde Edilen Geopolimerlerin Taramalı Elektron Mikroskop Görüntüleri**

Deneyisel çalışmalarda sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen geopolimer numunelerinin morfolojik yapıları taramalı elektron mikroskobu kullanılarak araştırılmış ve ısıtma işlem koşullarının ve alkali derişiminin etkileri incelenmiştir.

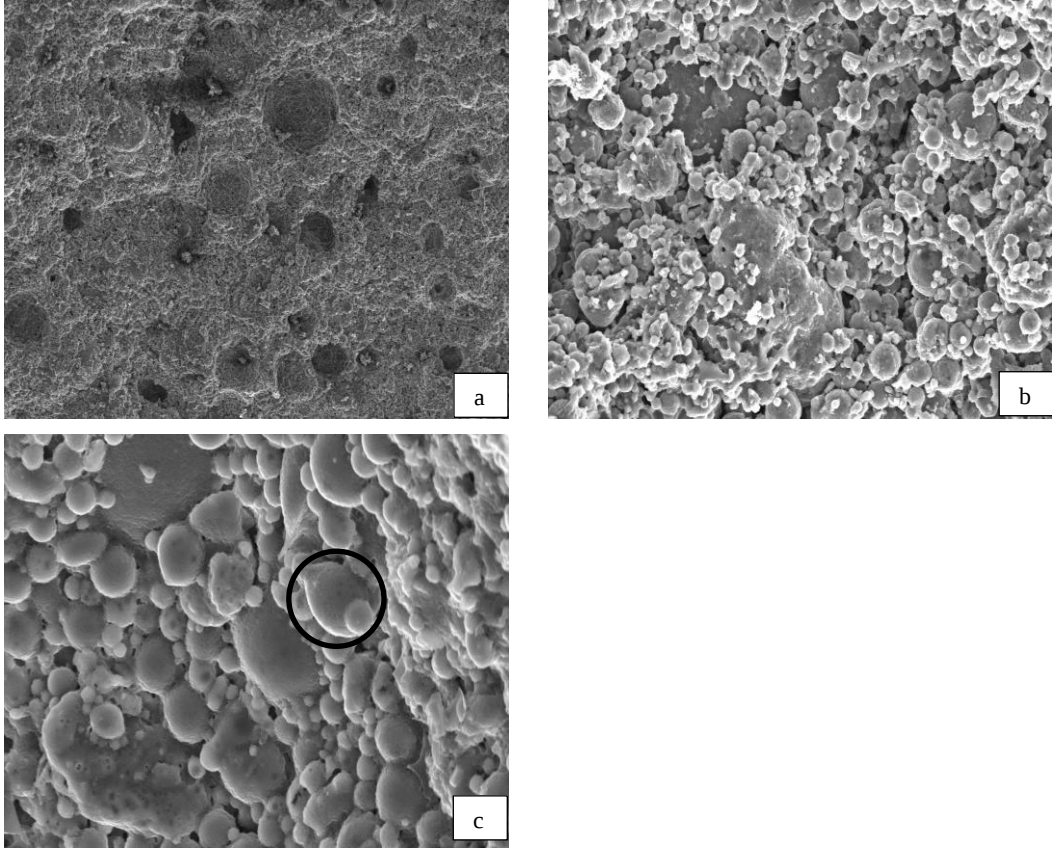
### **7.6.1. Sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri**

Farklı derişimlerde sodyum hidroksit kullanılarak üç farklı ısıtma işlem sıcaklığı ve süresinde elde edilen geopolimerlerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri alınarak yapıları araştırılmıştır.

#### **7.6.1.1. Isıtma işlem süresinin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin yapılarına etkisi**

Isıtma işlem süresinin, geopolimer numunelerinin morfolojik yapılarına etkisinin araştırılması amacı ile aynı derişimde çözelti kullanılarak hazırlanan ve aynı sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtma işlem gören numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri farklı yakınlaştırma oranlarında elde edilerek incelenmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Isıtma işlem sürelerini kıyaslamak amacı ile 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 40°C sıcaklıkta, 8M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 40°C sıcaklıkta, 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 40°C sıcaklıkta ve 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 80°C sıcaklıkta 6 saat, 15 saat ve 24 saat ısıtma işlem gören numunelerin görüntüleri incelenmiştir.

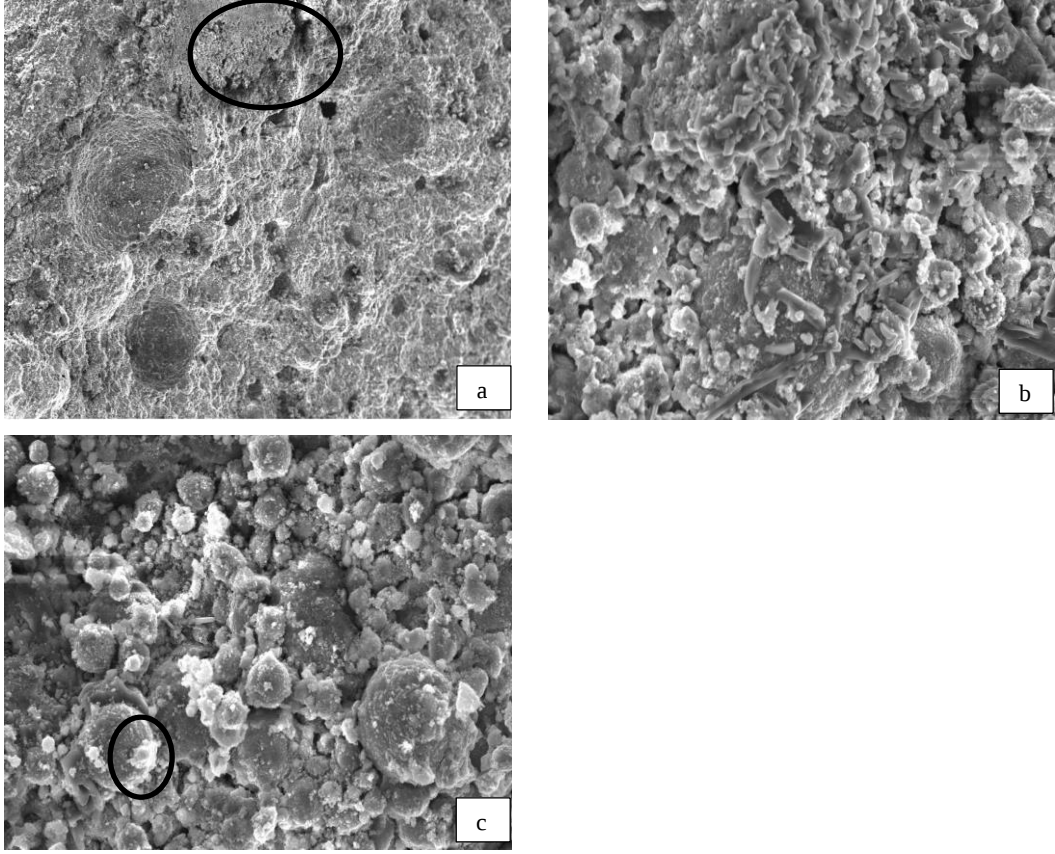
Sodyum hidroksit derişimi 4M olan 40°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıtma işlem gören numunelerin görüntüleri Şekil 7.61, Şekil 7.62 ve Şekil 7.63'te verilerek yapıları karşılaştırılmıştır. Şekil 7.61'de, 6 saat ısıtma işlem görmüş numunenin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.7.61.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 250x b. 2000x c. 5000x

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem gören numunenin görüntüsünde yapının oldukça gözenekli olduğu ve çukurlukların olduğu görülmektedir. Reaksiyona girmeden kalan çok sayıda uçucu kül olduğu gözlenmiştir. Alüminosilikat jelin bazı bölgelerde kısmen oluşmasından dolayı uçucu küllerin etrafı tamamen jel ile kaplanmamıştır. Sadece uçucu külleri birbirine bağlayacak kadar ince jel tabakasının olduğu gözlenmiştir.

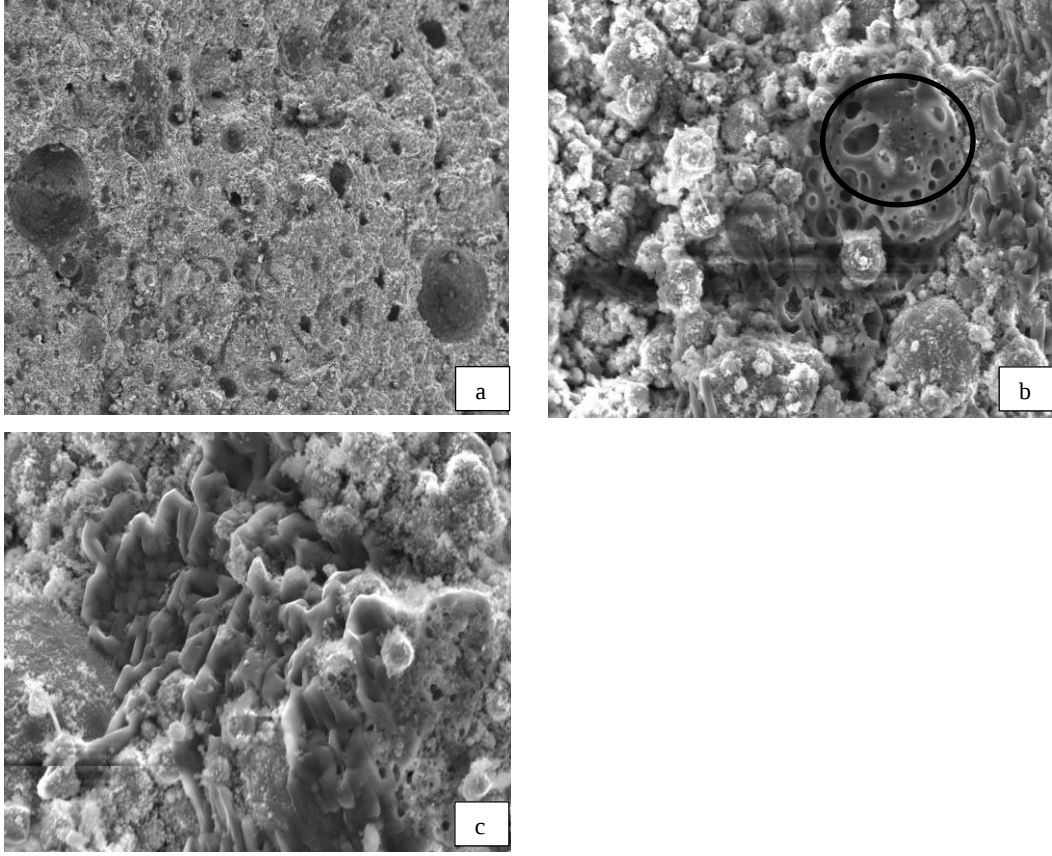
Şekil 7.62’de, 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.62.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 200x b. 2000x c. 5000x

40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem gören numunenin görüntüsünde homojen olmayan gözenekli bir yapı oluştuğu görülmüştür. Isıt işlem süresinin arttırılması ile geopolimerik yapıyı oluşturan jelin parça parça oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Numunede jel fazın üzerinde kalıntıların oluştuğu görülmüştür. Uçucu kül içindeki jel oluşturmak üzere çözünen silisyum, alüminyum, demir gibi elementlerin uçucu küllerin yüzeyinde kalıntı oluşturabilmektedirler (Bakharev, 2005; Sidhunata ve ark., 2006).

4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem gören numunenin görüntüsü Şekil 7.63'te verilmiştir.

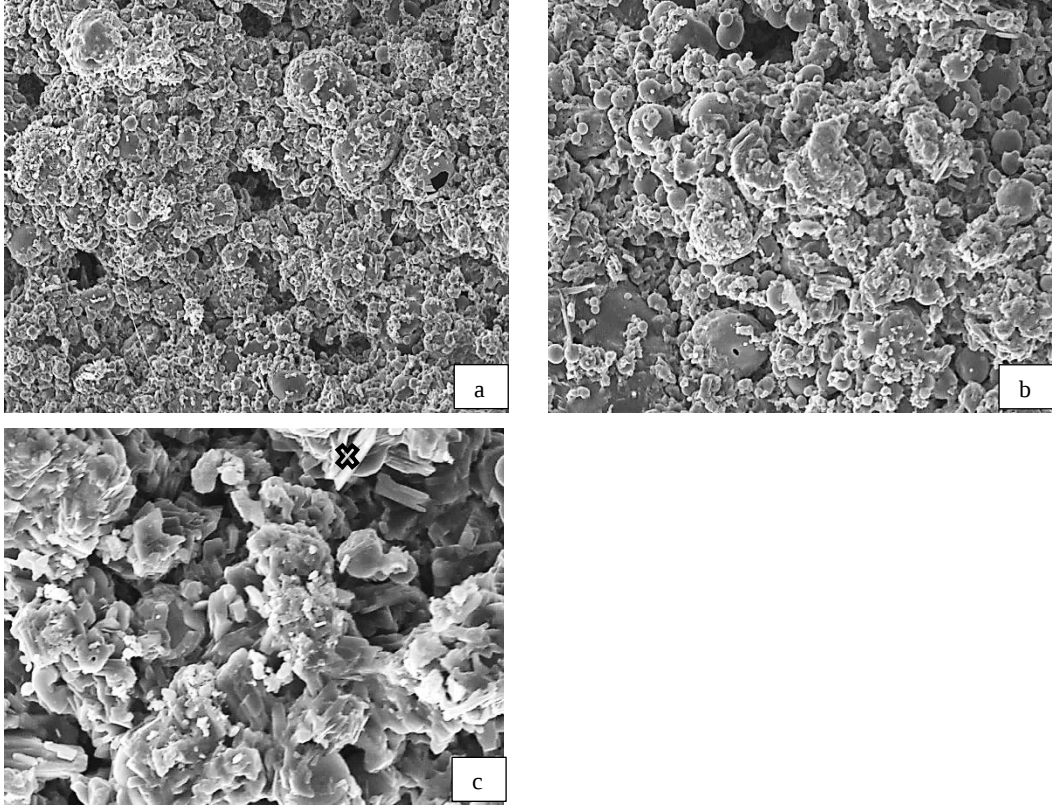


**Şekil 7.63.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 200x b. 2500x c. 5000x

Isıl işlem sıcaklığının 24 saate artırılması ile 15 saat ısıt işlem gören numunenin yapısına göre daha gözenekli olduğu gözlenmiştir. Alüminosilikat jelin oluşmaya başladığı ve ortamda kalıntıların oluştuğu görülmüştür.

Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıt işlem gören ve 28 gün yaşlandırılan numunelerin basınç dayanımlarının birbirlerine çok yakın olduğu gözlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde numunelerin mikroyapılarının benzer olduğu görülmüştür.

Alkali çözelti olarak 8M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen ve 40°C'ta 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıt işlem gören numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri incelenerek sürenin etkisi araştırılmıştır. 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü Şekil 7.64'te verilmektedir.



**Şekil 7.64.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin yapısında gözeneklerin oluştuğu ve yapının homojen olmadığı görülmüştür. Geopolimer jelinin bölgesel olarak uçucu kül tanelerinin etrafında oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Jel fazın üzerinde ise kalıntı oluşumu görülmüştür. EDX analizi ile bu yapılar incelendiğinde ağırlıkça %53,42 sodyumdan oluştuğu gözlenmiştir. Yüksek derişimde alkali çözelti kullanılan numunelerde suyun buharlaşmasının ardından sodyum kristallerinin oluşumu gözlenebilmektedir (He ve ark. 2012). Numunede gözlenen kristal yapının EDX analizi sonuçları Çizelge 7.20’de verilmiştir.

**Çizelge 7.20.** Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt ışlem görmüş numunede gözlenen   keleğin EDX analizi

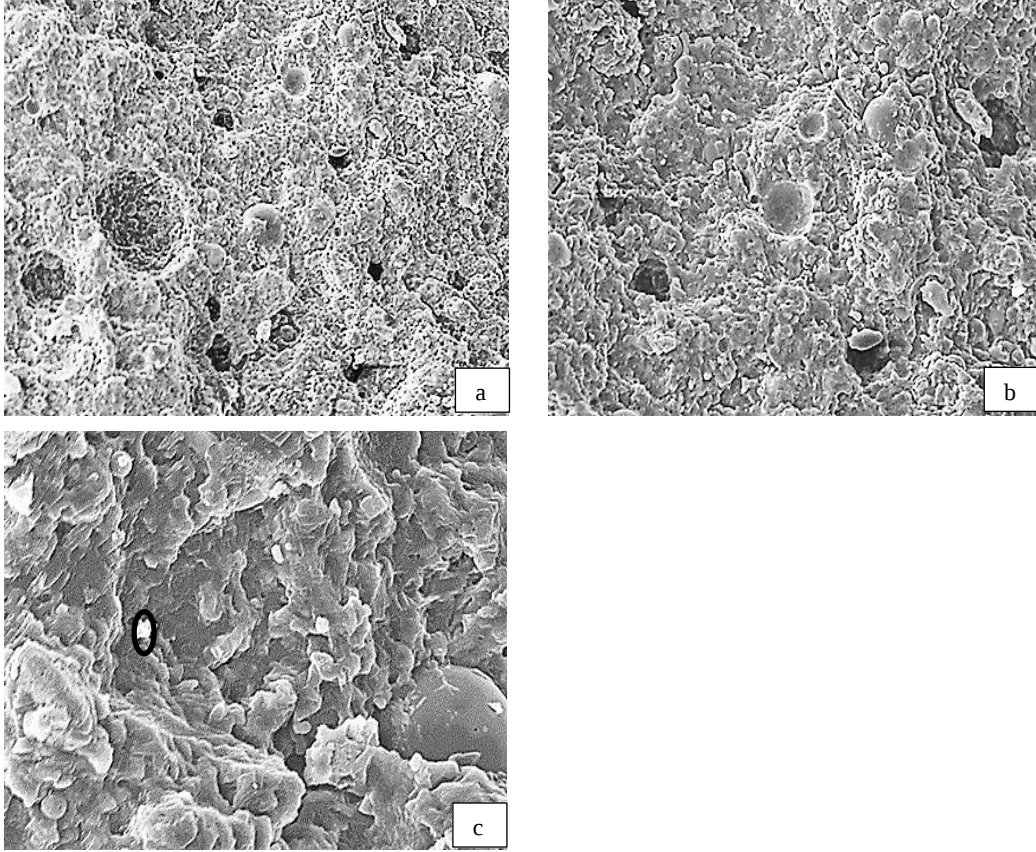
| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 6,37            | SiO <sub>2</sub>               | 14              |
| Al      | 4,24            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8               |
| Na      | 53,40           | Na <sub>2</sub> O              | 72              |
| K       | 1,43            | K <sub>2</sub> O               | 1,7             |
| Ca      | 0,20            | CaO                            | 0,3             |
| Fe      | 1,14            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,6             |
| Mg      | 1,65            | MgO                            | 2,4             |

 izelge 7.21’de ise numunenin elektron mikroskobu g r nt s nde g zlenen jelin EDX analizi sonucu verilmiştir. Analiz sonucunda, oluşan jelin yapısında SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının kütlece 1,7, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının ise kütlece 3,13 olduğu g r lm ştir. Hammadde kaynağı olarak kullanılan uçucu küldeki bu oran kütlece 2,3’tür. Deneysel olarak belirlenen oranlar, başlangıçta teorik olarak belirlenen oranlardan daha düşük olabilmektedir. Bunun nedenleri amorf fazdaki gerçek Si/Al oranının toplam belirlenen değerden daha düşük olması veya uçucu külde bulunan amorf silisyum ve alüminyumun tamamen çözünmemesi olabilir (Sidhunata ve ark., 2006).

**Çizelge 7.21.** Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt ışlem görmüş numunenin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 27,02           | SiO <sub>2</sub>               | 47              |
| Al      | 18,47           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 28              |
| Na      | 13,51           | Na <sub>2</sub> O              | 15              |
| K       | 2,76            | K <sub>2</sub> O               | 3               |
| Fe      | 4,9             | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5               |
| Ca      | 2,03            | CaO                            | 2               |

8M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen ve 40°C sıcaklıkta 15 saatlik sürede ısıt işlem gören numunenin SEM görüntüsü Şekil 7.65'te verilmiştir.



**Şekil 7.65.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

15 saatlik sürede ısıt işlem gören numunede gözenekler görülmekle birlikte 6 saat ısıt işlem görmüş numuneye göre kompakt bir yapının oluştuğu gözlenmiştir. Gözeneklerin boyutlarının daha küçük olduğu görülmüştür. 6 saat ısıt işlem gören numunenin 28 günlük basınç dayanımı 6,27 MPa iken, ısıt işlem süresi 15 saate arttırıldığında basınç dayanımının artarak 23,37 MPa'a ulaştığı belirlenmiştir. Basınç dayanımındaki artışın, gözeneklerin daha küçük olmasına ve oluşan jel fazının daha fazla oluşmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

Jel yapısında iri uçucu kül tanelerinin reaksiyona girmeden kaldığı gözlenmiştir. Ayrıca gözlenen kalıntıların sayısının az olduğu ve EDX analizi ile yapılarının %82 oranında  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 'ten oluştuğu görülmüştür. Analiz sonuçları Çizelge 7.22'de verilmiştir.

**Çizelge 7.22.** Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunede gözlenen çökeleğin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                 | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| Si      | 1,05            | $\text{SiO}_2$          | 2,4             |
| Al      | 0,32            | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0,6             |
| Na      | 11,08           | $\text{Na}_2\text{O}$   | 15              |
| Fe      | 57,51           | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 82              |

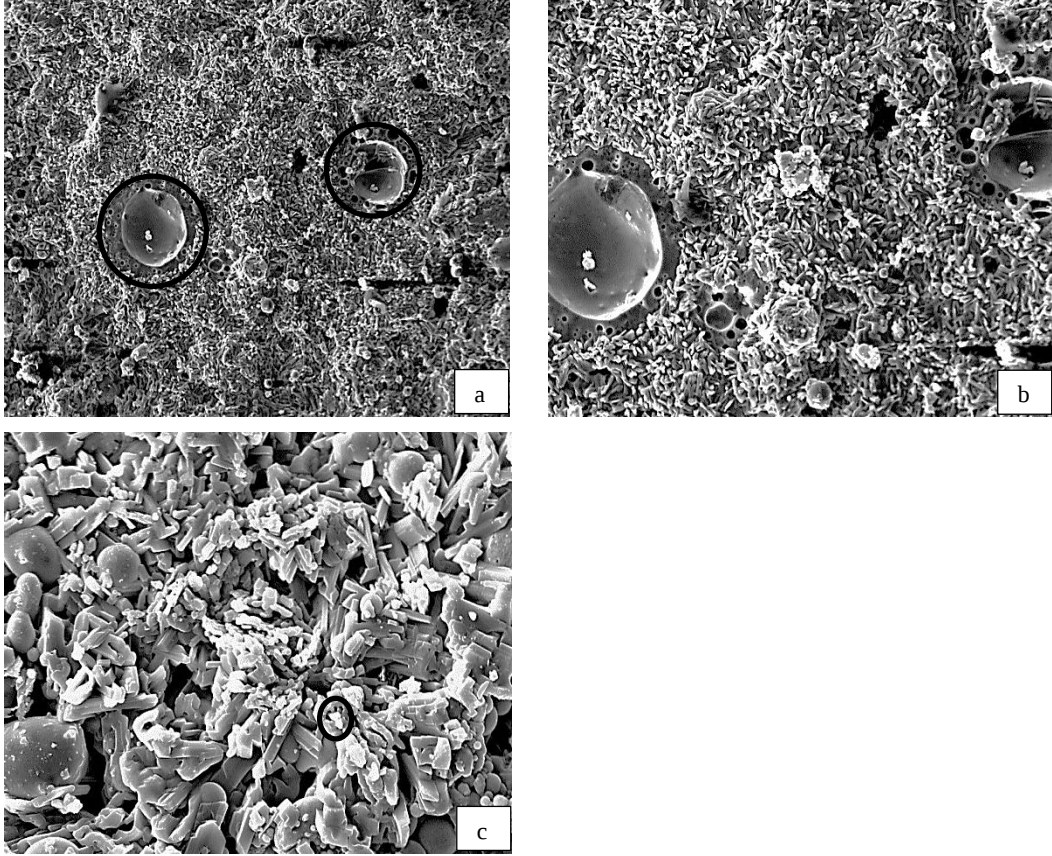
40°C sıcaklıkta 15 saatlik sürede ısıt işlem gören numunenin jel fazının EDX analizi sonucu ise Çizelge 7.23'te verilmiştir.

**Çizelge 7.23.** Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                 | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| Si      | 29,13           | $\text{SiO}_2$          | 48              |
| Al      | 15,10           | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 22              |
| Na      | 13,99           | $\text{Na}_2\text{O}$   | 15              |
| K       | 2,08            | $\text{K}_2\text{O}$    | 2               |
| Fe      | 10,47           | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 13              |

EDX analizi sonucunda numunenin yapısında belirlenen kütlece  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranının ısıt işlem süresinin artmasıyla artarak 2,2,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranının ise kütlece 3,2 olduğu görülmüştür.

Şekil 7.66'da 8M NaOH kullanılarak elde edilen ve 40°C'de 24 saatlik sürede ısıt işlem gören numunenin SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.66** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

24 saatlik sürede ısıt işlem gören numunedeki gözeneklerin sayısının 6 ve 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerdekilerden daha az ve küçük oldukları gözlenmiştir. Yapıda çukurlukların yer aldığı görülmüştür. Oluşan çukurlukların reaksiyona girmemiş uçucu kül tanelerinin numunenin diğer yüzeyinde kalmasında dolayı oluşabileceği düşünülmektedir (He ve ark. 2012). Ayrıca numunede geopolimerik jelin bütün olarak değil parça parça oluştuğu ve jelin üzerinde çöken kalıntıların olduğu gözlenmiştir. Çizelge 7.24'te jel fazın üzerinde gözlenen kalıntı parçasının EDX analizi sonucu verilmiştir. EDX analizi, çöken kalıntıların kütlece %57,47 sodyum içerdiğini göstermiştir.

**Çizelge 7.24.** Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt ışlem görmüş numunede gözlenen   keleğin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 5,48            | SiO <sub>2</sub>               | 12              |
| Al      | 3,31            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6               |
| Na      | 57,47           | Na <sub>2</sub> O              | 77              |
| K       | 1,46            | K <sub>2</sub> O               | 2               |
| Fe      | 1,96            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3               |

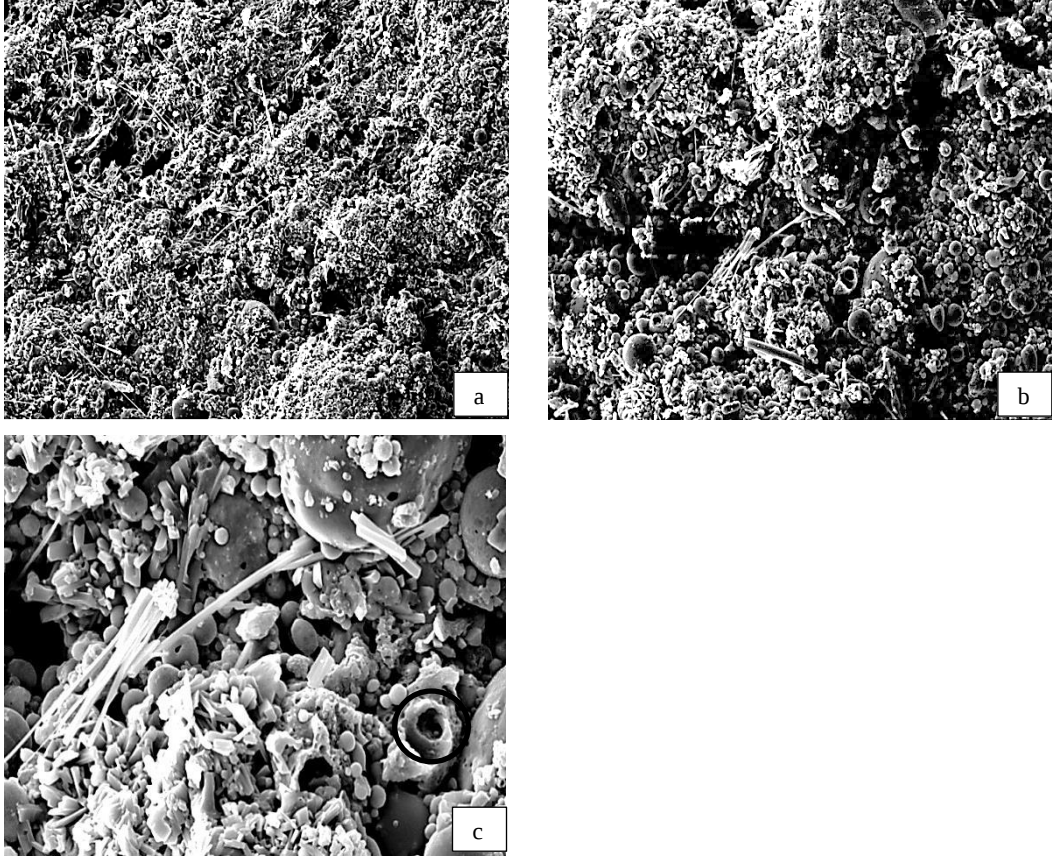
8M sodyum hidroksit ile hazırlanan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt ışlem gören numunenin EDX analizi  izelge 7.25'te verilmiştir. Bu numunenin yapısındaki kütlece SiO<sub>2</sub>/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının 2,1, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının ise kütlece 3,7 olduğu g r lm ştir. Bu oranın artması, numunedeki çözünen silisyumun miktarının arttığını g stermektedir.

** izelge 7.25.** Alkali derişimi 8M olan 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt ışlem g rm ş numunenin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 27,42           | SiO <sub>2</sub>               | 52              |
| Al      | 15,07           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25              |
| Na      | 12,07           | Na <sub>2</sub> O              | 14              |
| K       | 4,04            | K <sub>2</sub> O               | 4               |
| Ca      | 2,27            | CaO                            | 3               |
| Mg      | 1,22            | MgO                            | 2               |

Alkali   zelti olarak 12M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen ve 40°C sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat ısıt ışlem gören numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

40°C'ta 6 saat ısıt ışlem görmüş numunenin SEM g r nt ş  şekil 7.67'de verilmektedir.



**Şekil 7.67.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Alkali derişimi 12M olan sodyum hidroksit kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde yapının homojen olmadığı çeşitli büyüklüklerde reaksiyona girmemiş uçucu kül tanelerinin ve iğne şeklinde kristallerin olduğu gözlenmiştir. Bazı uçucu kül tanelerinin ise çözünmeye başladığı dikkat çekmektedir.

Uçucu kül kullanılarak elde edilen geopolimerlerin yapılarında metakaolin gibi hammaddeler kullanıldığında sağlanan homojen ve kesintisiz bir jel fazı oluşmamaktadır. Bu tür geopolimerler jel fazı ile bağlanmış kül kompoziti olarak tanımlanabilir (Duxon ve ark. 2007b). Literatür çalışmalarında reaksiyona girmeden kalan çeşitli büyüklüklerdeki uçucu kül tanelerinin gözleendiği

görülmüştür (Bakharev, 2005; Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009; Bakri ve ark., 2011; He ve ark., 2012; Marjanović ve ark., 2014)

Numunenin yapısında gözlenen kristallerin EDX analizi yapılmış ve Çizelge 7.26’da verilmiştir. Oluşan kristallerin kütlece %69 oranında sodyumdan oluştuğu belirlenmiştir.

**Çizelge 7.26.** Alkali derişimi 12M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunedeki kristalin EDX analizi

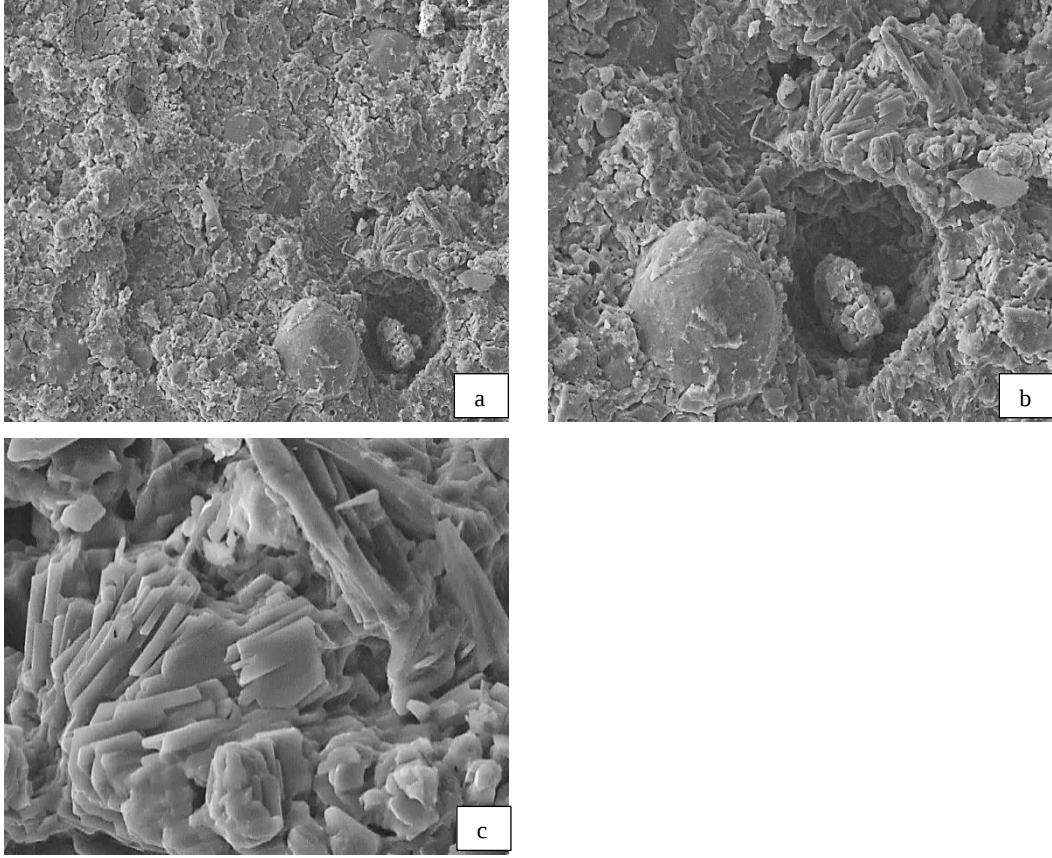
| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 13,14           | SiO <sub>2</sub>               | 18              |
| Al      | 9,72            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12              |
| Na      | 68,90           | Na <sub>2</sub> O              | 62              |
| Fe      | 2,09            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2               |
| Mg      | 5,37            | MgO                            | 6               |

Numunenin yapısında oluşan jel fazının içeriği EDX analizi ile yapılarak Çizelge 7.27’de verilmiştir. 12M derişiminde sodyum hidroksit ile hazırlanan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem gören numunenin jel fazında SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının 2, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının ise kütlece 4,5 olduğu belirlenmiştir.

**Çizelge 7.27.** Alkali derişimi 12M olan 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 37,74           | SiO <sub>2</sub>               | 49              |
| Al      | 20,50           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 24              |
| Na      | 13,16           | Na <sub>2</sub> O              | 11              |
| Fe      | 10,08           | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9               |
| Ca      | 4,56            | CaO                            | 4               |
| Mg      | 2,13            | MgO                            | 2               |

12M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen ve 40°C'ta 15 saatlik sürede ısıt işlem gören numunenin SEM görüntüsü Şekil 7.68'de verilmektedir.



**Şekil 7.68.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Isıt işlem süresinin 15 saate artırılmasıyla numunenin yapısında daha fazla jel fazı oluştuğu ve jel fazın uçucu kül tanelerinin etrafını kapladığı görülmüştür. Şekilde reaksiyona girmemiş uçucu kül ve yanında oluşan çukurluk göze çarpmaktadır.

Ayrıca numunede çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Bu çatlakların basınç dayanımı ölçülmesi esnasında numunenin kırılması sonucunda veya analiz için

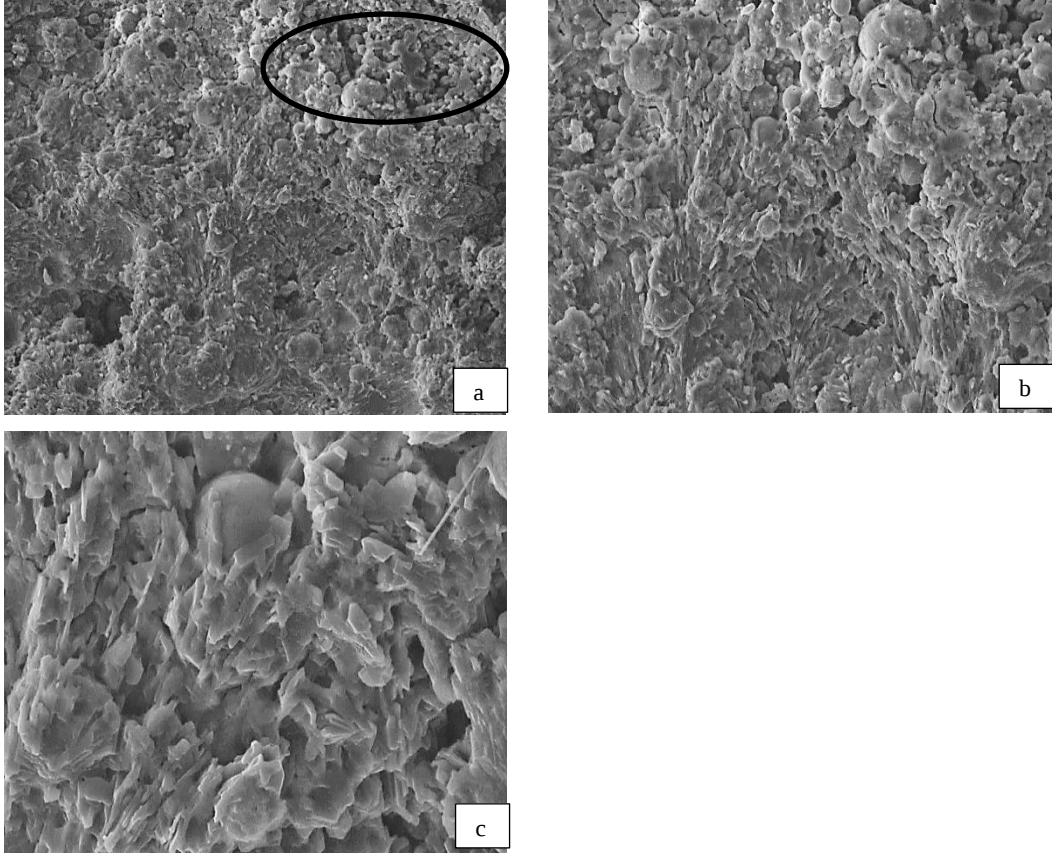
örnek alma esnasında oluştuğu düşünülmektedir. Numunede oluşan jel fazın EDX analizi Çizelge 7.28’de verilmiştir.

**Çizelge 7.28.** Alkali derişimi 12M olan 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 33,63           | SiO <sub>2</sub>               | 42              |
| Al      | 15,3            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17              |
| Na      | 40,19           | Na <sub>2</sub> O              | 32              |
| Ca      | 2,26            | CaO                            | 2               |
| Fe      | 5,70            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5               |
| Mg      | 2,01            | MgO                            | 2               |

EDX analizi sonucunda jel yapısındaki SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranının 2,5 olduğu görülmüştür. SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranını ise 1,3 olarak belirlenmiştir. 12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılan geopolimer numunelerinde SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranının farklı olması oluşan jel fazın homojen olmadığını göstermektedir. Yüksek derişimlerde silisyum ve alüminyumun çözünmesi artmaktadır. Ancak polikondenzasyon engellendiğinden Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O’dan oluşan jel fazının tam olarak oluşmadığı düşünülmektedir (Somna ve ark. 2011).

Şekil 7.69’da 12M derişimindeki sodyum hidroksit ile hazırlanarak 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü verilmektedir.

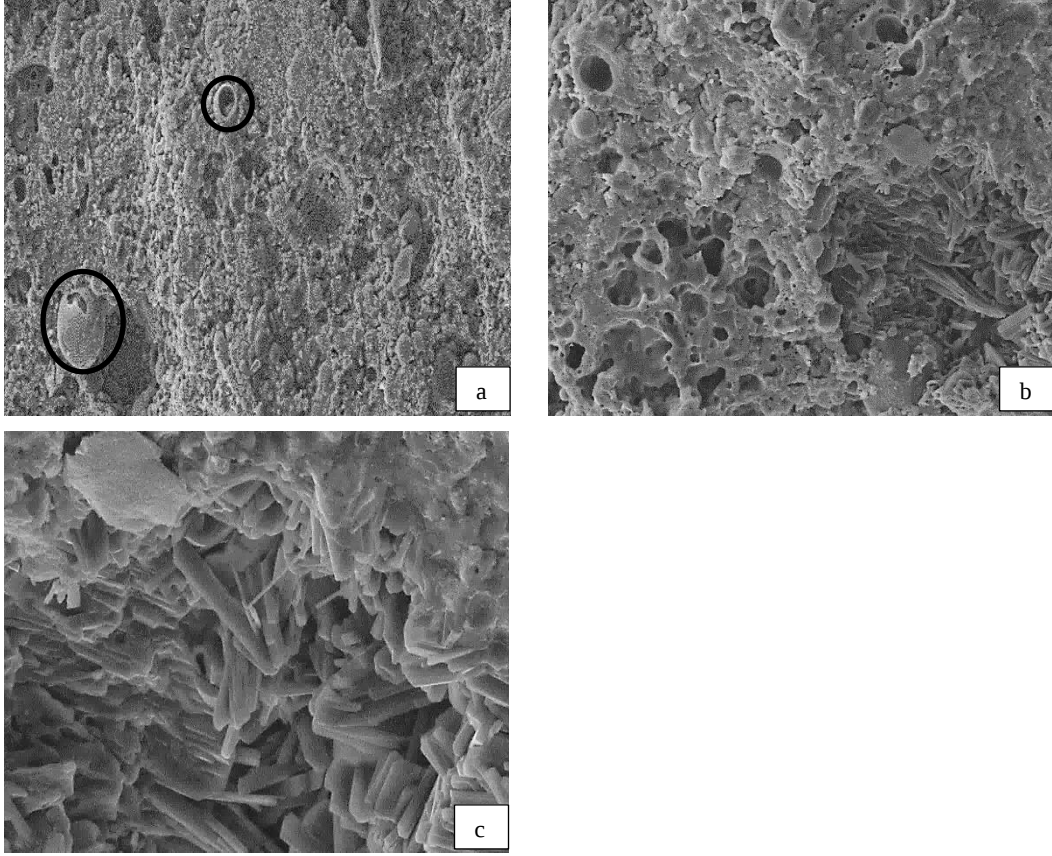


**Şekil 7.69.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Derişimi 12M olan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin taramalı elektron mikroskop görüntüsünde jel fazın belli bir bölgede oluşarak uçucu kül tanelerinin etrafını sardığı ancak numunenin diğer bölümünde ise jel fazın tam olarak oluşmadığı gözlenmiştir. Jel fazın oluşmadığı bölgede reaksiyona girmeden kalan uçucu kül taneleri göze çarpmaktadır. Reaksiyona girmeden kalan uçucu kül tanelerinin 15 saat ısıt işlem görmüş numuneninkinden fazla olduğu gözlenmiştir. Numune yakından incelendiğinde çatlakların oluştuğu görülmüştür.

Alkali çözelti olarak 12M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılan ve ısıt işlem sıcaklığı 80°C olan numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 7.70-7.72’de verilmiştir ve yapıları karşılaştırılmıştır.

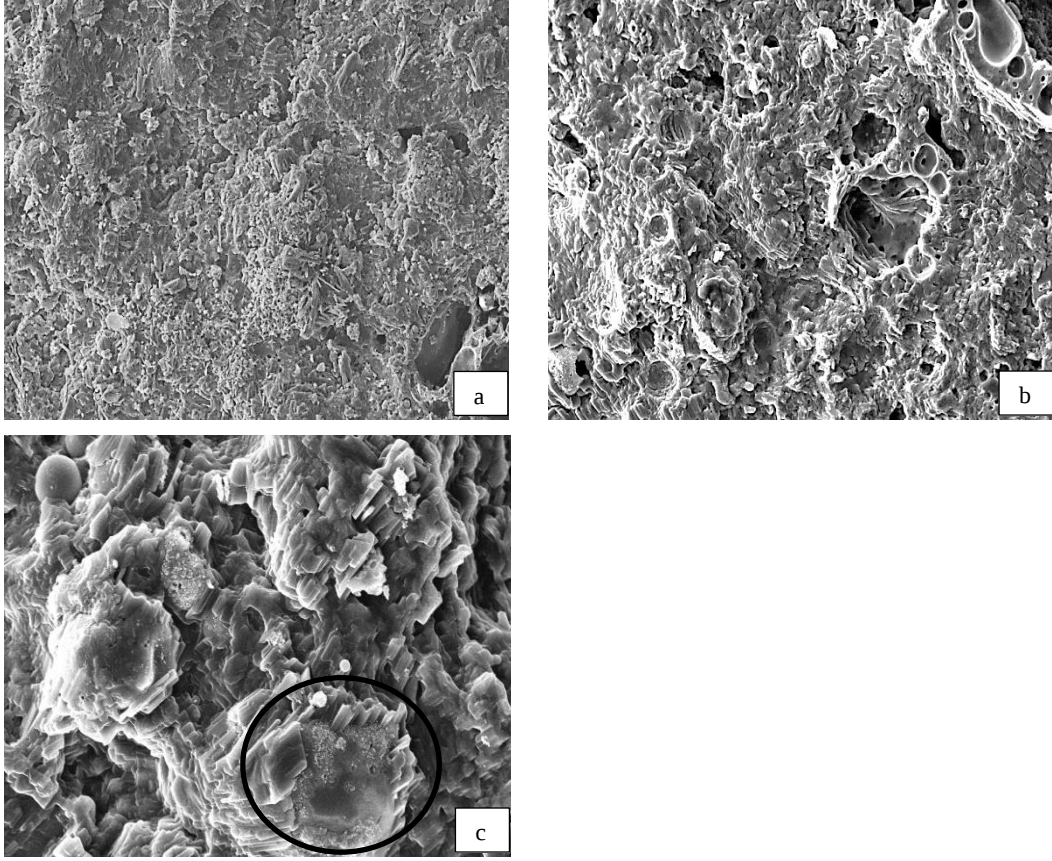
Şekil 7.70’de 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi görmüş numunenin SEM görüntüsü verilmektedir.



**Şekil 7.70.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Alkali derişimi 12M olan 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi görmüş numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde jel yapısının oluşmaya başladığı ve uçucu kül tanelerinin etrafını sarmaya başladığı gözlenmiştir. Jel yapısı yakından incelendiğinde yapının gözenekli olduğu görülmüştür. Bazı uçucu kül tanelerinin ise kısmen çözündüğü gözlenmiştir.

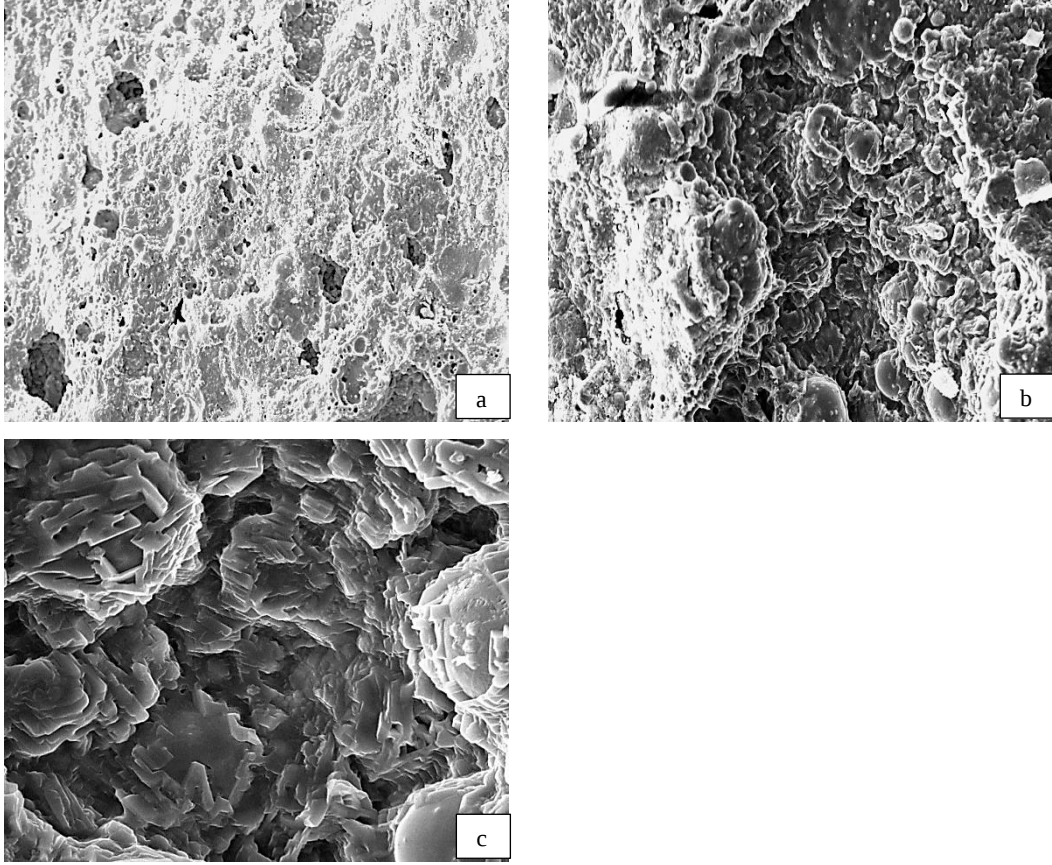
Aynı derişim ve sıcaklıkta 15 saat süre ile ısıtılma işlemi görmüş numunenin görüntüsü Şekil 7.71’de verilmiştir.



**Şekil 7.71.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

15 saat işlem görmüş numunede jel fazın büyük oranda oluştuğu ve az sayıda gözeneklerin olduğu gözlenmiştir. Reaksiyona girmeyen uçucu kül tanelerinin oldukça küçük olduğu görülmüştür. 6 saat ısıt işlem görmüş numuneye göre daha kompakt bir yapı gözlenmiştir. Numune yakından incelendiğinde uçucu kül tanelerinin etrafını jel fazın kapladığı gözlenmiştir.

24 saatte ısıt işlem görmüş numunenin görüntüsü ise Şekil 7.72’de verilmiştir.



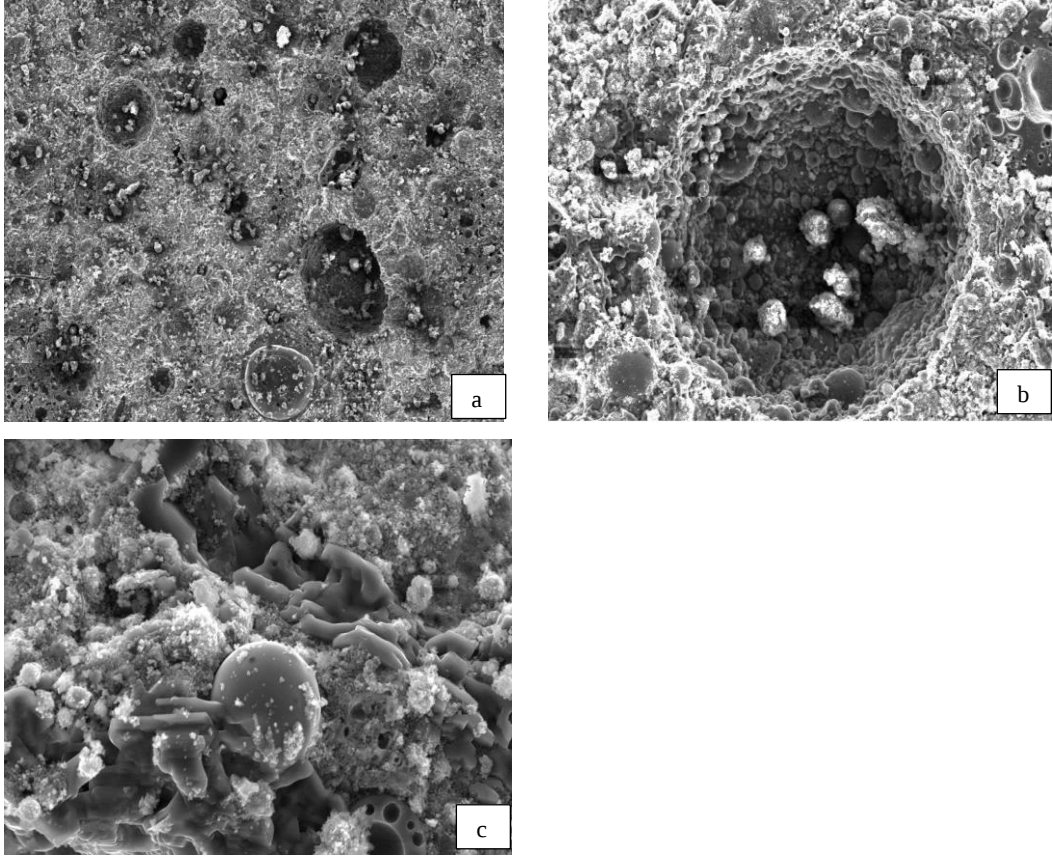
**Şekil 7.72.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Derişimi 12M olan sodyum hidroksit kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin yapısında, 6 ve 15 saat ısıt işlem gören numuneler ile kıyaslandığında oluşan gözeneklerin sayısının fazla olduğu ve bazı gözenek çaplarının büyük olduğu görülmüştür. Gözenek sayısının ve çaplarının artmasının ortamdaki suyun buharlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Reaksiyona girmemiş uçucu kül tanelerinin etrafını jel fazın kapladığı gözlenmiştir.

#### **7.6.1.2. Isıl işlem sıcaklığının sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin yapılarına etkisi**

Geopolimerlerin mekanik ve yapısal özelliklerine etki eden parametrelerin biri de ısıtım işlem sıcaklığıdır. Isıtım işlem sıcaklığının etkisinin yapısal özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması amacı ile aynı derişimde sodyum hidroksit çözeltisi ile hazırlanan ve aynı sürelerde ısıtım işlem gören numunelerin farklı sıcaklıklardaki SEM görüntüleri incelenmiştir. Bu amaçla 4M olan sodyum hidroksit kullanılarak 15 saat, 8M olan sodyum hidroksit kullanılarak 6 saat, 12M olan sodyum hidroksit kullanılarak 15 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda ısıtım işlem gören numunelerin görüntüleri karşılaştırılmıştır.

Alkali derişimi 4M olan sodyum hidroksit kullanılarak elde edilen ve 40°C, 80°C ve 120°C ısıtım işlem sıcaklıklarında 15 saat ısıtım işlem gören numunelerin görüntüleri Şekil 7.73-7.74'te verilmiştir.

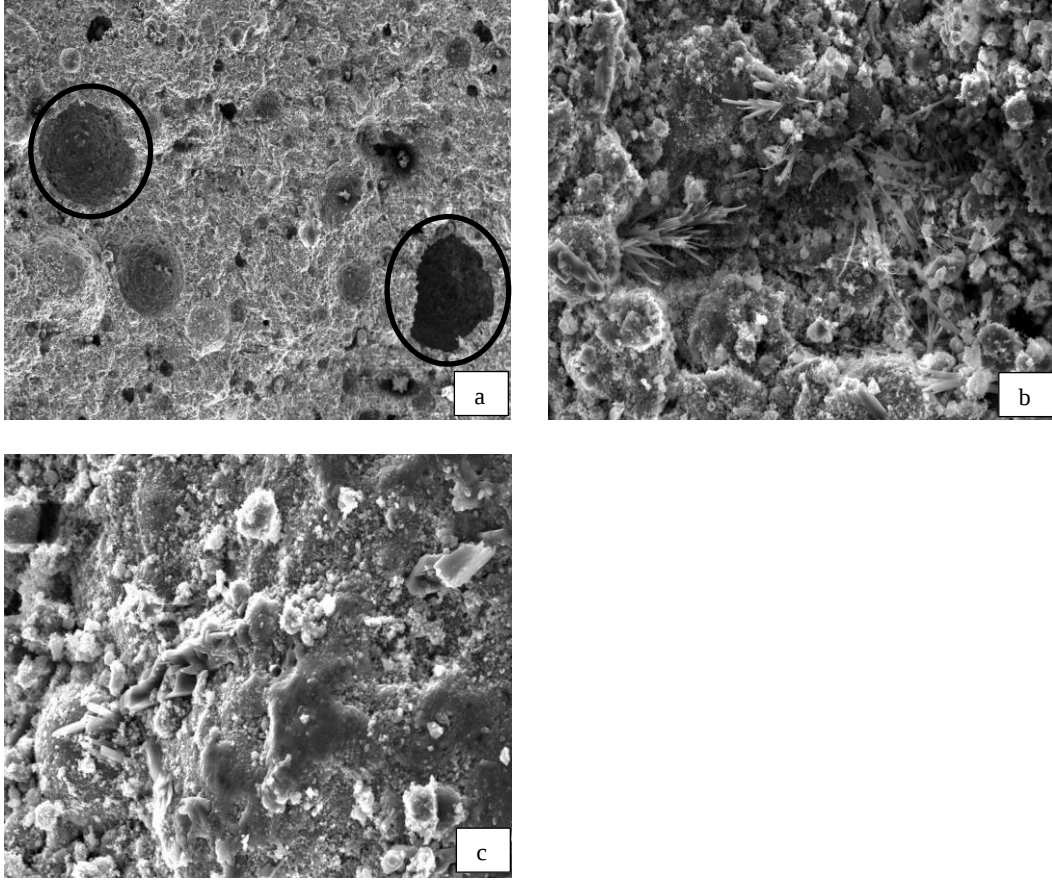


**Şekil 7.73.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

4M olan sodyum hidroksit kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem gören numunede fazla sayıda gözeneklerin oluştuğu gözlenmiştir. Bununla birlikte jel fazın da oluşmaya başlayarak uçucu kül tanelerinin etrafını sarmaya başladığı görülmüştür. Numunenin yapısında jel fazın ve uçucu kül tanelerinin üzerinde kalıntıların oluştuğu da gözlenmiştir. Kalıntı oluşumunun ısıt işlem sıcaklığının ve süresinin yüksek olmasından dolayı suyun buharlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

40°C sıcaklıkta aynı sürede ısıt işlem gören numunenin yapısı ile kıyaslandığında (Şekil 7.62), 80°C sıcaklıkta elde edilen numunenin yapısında oluşan gözeneklerin sayısının arttığı görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla jel fazın daha fazla oluştuğu ve kalıntı oluşumunun arttığı gözlenmiştir.

Aynı derişim ve ısıt işlemlerinde 120°C sıcaklıkta elde edilen numunenin görüntüsü Şekil 7.74'te verilmiştir.



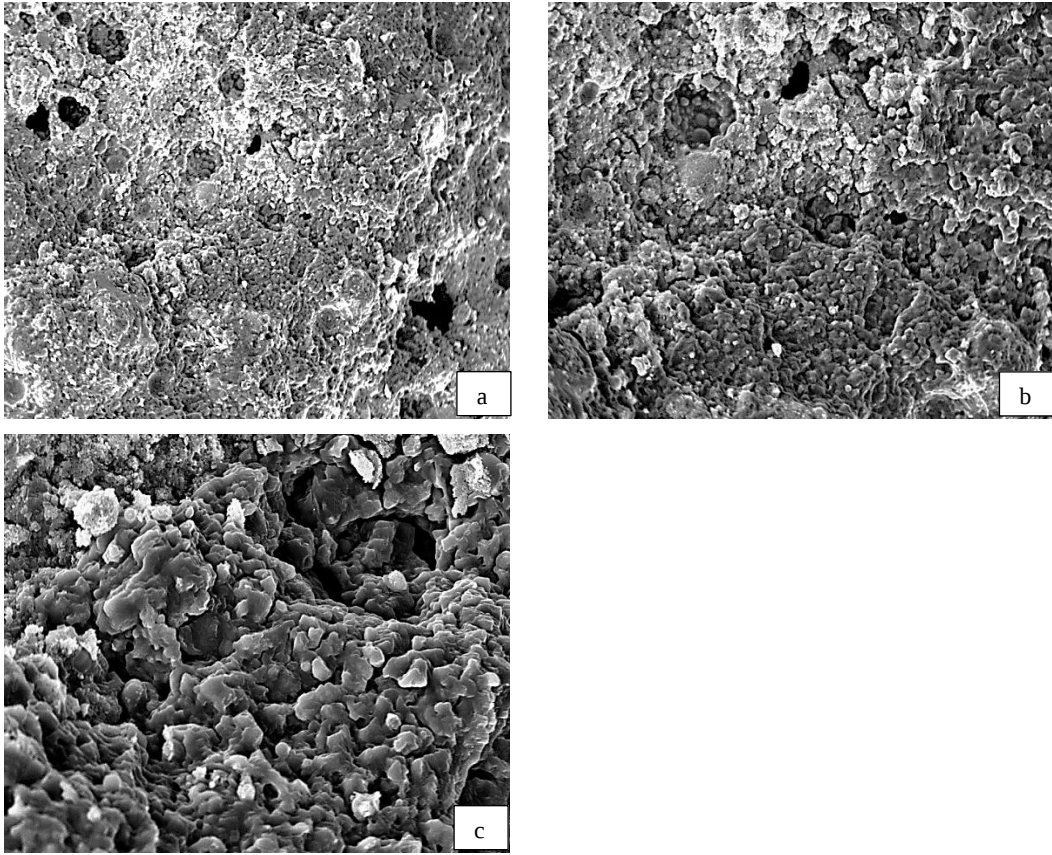
**Şekil 7.74.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlemlerinden geçen numunenin SEM görüntüsü a. 150x b. 1000x c. 3000x

120°C sıcaklıkta ısıt işlemlerinden geçen numunenin yapısı incelendiğinde büyük çaplara sahip gözeneklerin ve çukurlukların oluştuğu görülmüştür. Numunede kristal ve çökelek oluşumu dikkat çekmektedir.

Isıt işlemlerinde sıcaklığının artırılması ile gözeneklerin ve çukurlukların çaplarının ve jel fazın oluşumunun arttığı gözlenmiştir. Gözeneklerin, suyun buharlaşmasından dolayı oluştuğu düşünülmektedir. Isıt işlemlerinde sıcaklığının artması ile numunede gözlenen kalıntıların arttığı gözlenmiştir. Uçucu külden çözünerek sıvı faza geçen elementlerin ısıt işlemlerinde sıcaklığının yüksek olmasından dolayı

suyun buharlaşmasının ardından kalıntı çökelek oluşturabileceği düşünülmektedir (Sidhunata ve ark., 2006).

8M derişimindeki sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve 6 saatlik sürede 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda ısıtıl işlem gören numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri kıyaslanmıştır. Şekil 7.75'te 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin görüntüsü yer almaktadır.

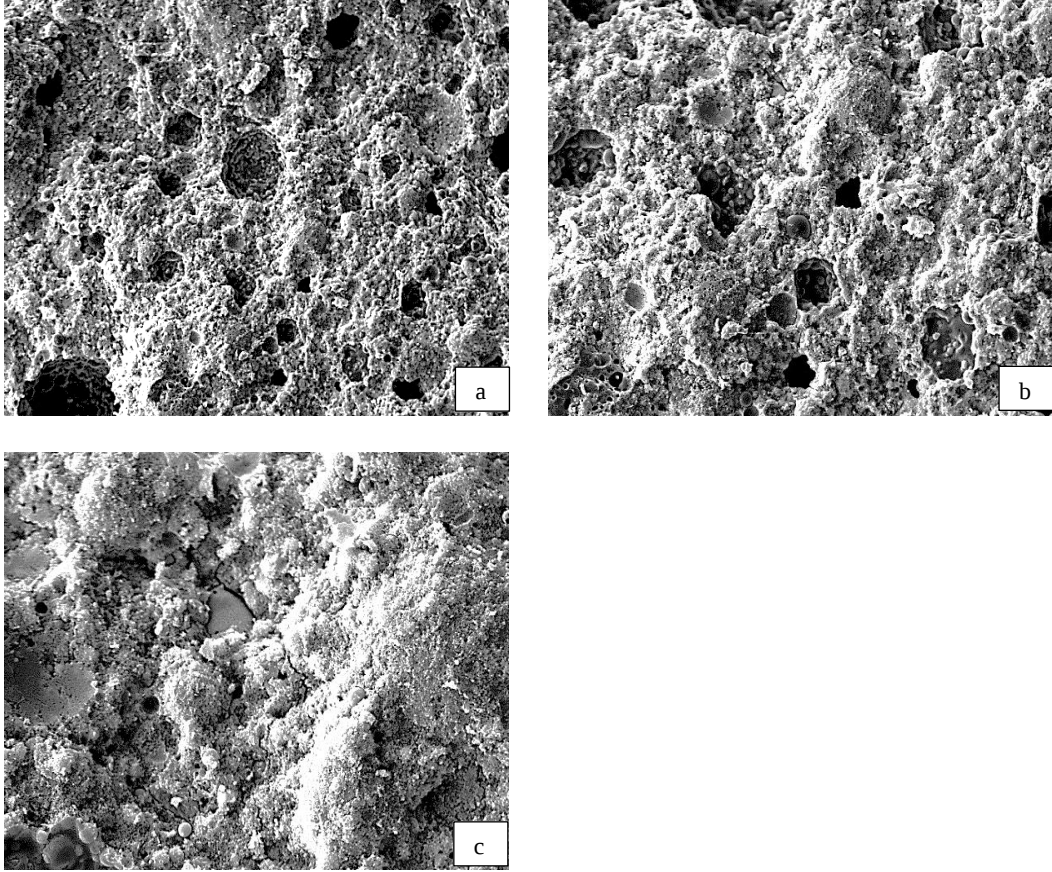


**Şekil 7.75.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

80°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin yapısında çukurların oluştuğu ve reaksiyona girmeyen küçük uçucu kül tanelerinin kaldığı görülmüştür. Şekil 7.64'te verilmiş olan 8M derişimde sodyum hidroksit ile hazırlanan 40°C

sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi gören numune ile kıyaslandığında, çökelek oluşumunun arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7.76'da ise alkali derişimi 8M olan 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi görmüş numunenin SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.76.** Alkali derişimi 8M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi görmüş numunede çukurların daha fazla oluştuğu görülmüştür. Yapıda ince çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Isıtılma işlemi sıcaklığının artırılması ile 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 80°C sıcaklıkta 15 saat ısıtılma işlemi gören numunelerde olduğu gibi, kalıntı oluşumunun da

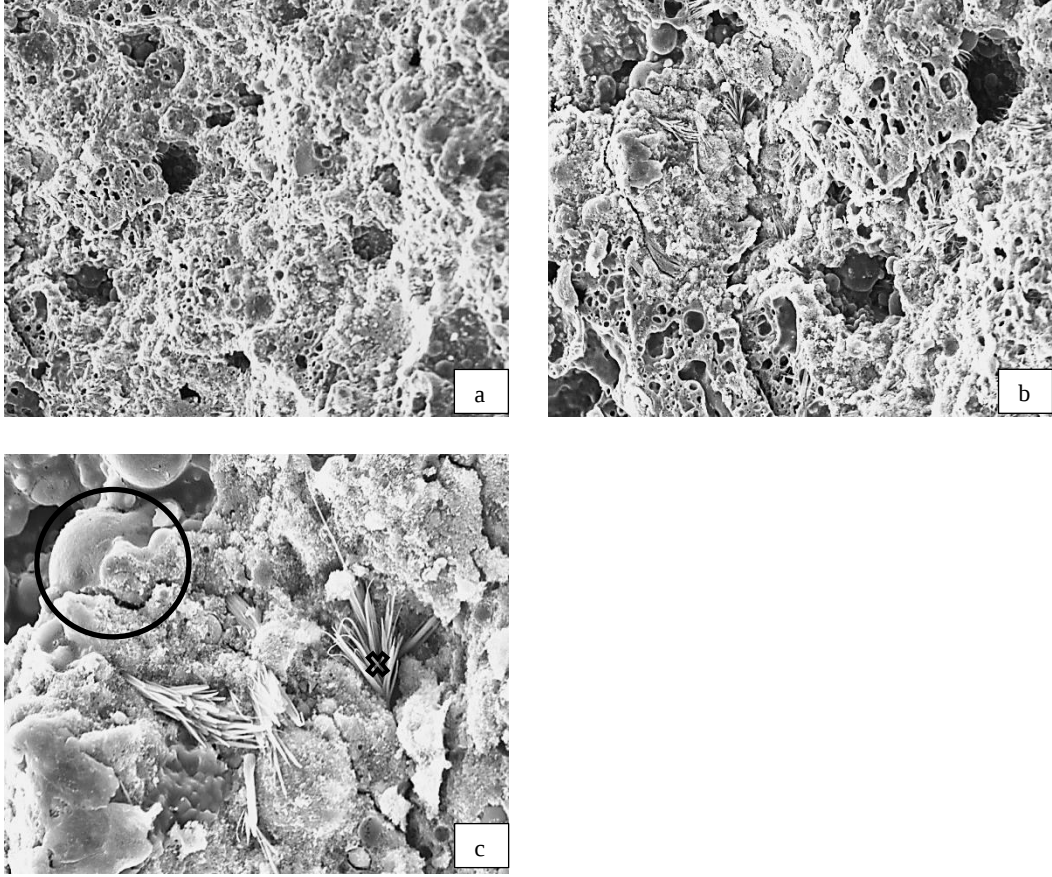
arttığı görülmüştür. Kalıntı oluşumunun ise, suyun buharlaşmasına bağlı olarak ortamda kalan elementlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Numunede gözlenen kalıntıların EDX analizi sonucunda  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranının kütlece %25 olduğu görülmüştür. Bu oran, demirin çözündükten sonra ortamda kaldığını göstermektedir. Çizelge 7.29, kalıntıların EDX analizi sonucunu göstermektedir.

**Çizelge 7.29.** Alkali derişimi 8M olan 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                 | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| Si      | 17,7            | $\text{SiO}_2$          | 38              |
| Al      | 10,70           | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 20              |
| Na      | 6,02            | $\text{Na}_2\text{O}$   | 8               |
| K       | 2,15            | $\text{K}_2\text{O}$    | 3               |
| Fe      | 17,40           | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 25              |
| Mg      | 3,89            | $\text{MgO}$            | 6               |

12M derişimindeki sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak hazırlanan ve 15 saatlik sürede 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda ısıt işlem gören numunelerin görüntüleri incelenerek mikroyapıları kıyaslanmıştır. Şekil 7.77’de 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.77.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Derişimi 12M olan 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunede çok sayıda gözenek ve çukurlukların oluştuğu görülmektedir. Isıt işlem sıcaklığının yüksek olmasına bağlı olarak suyun buharlaşmasının ardından gözenek ve çukurlukların arttığı gözlenmiştir. Jel fazın oluşarak uçucu küllerin üzerini kapladığı ancak jel fazın üzerinde kalıntıların oluştuğu görülmüştür. Ayrıca jel fazın içinde kristallerin oluştuğu da gözlenmiştir. Numunenin yapısında oluşan kristalin EDX analizi sonucu Çizelge 7.30'da verilmiştir.

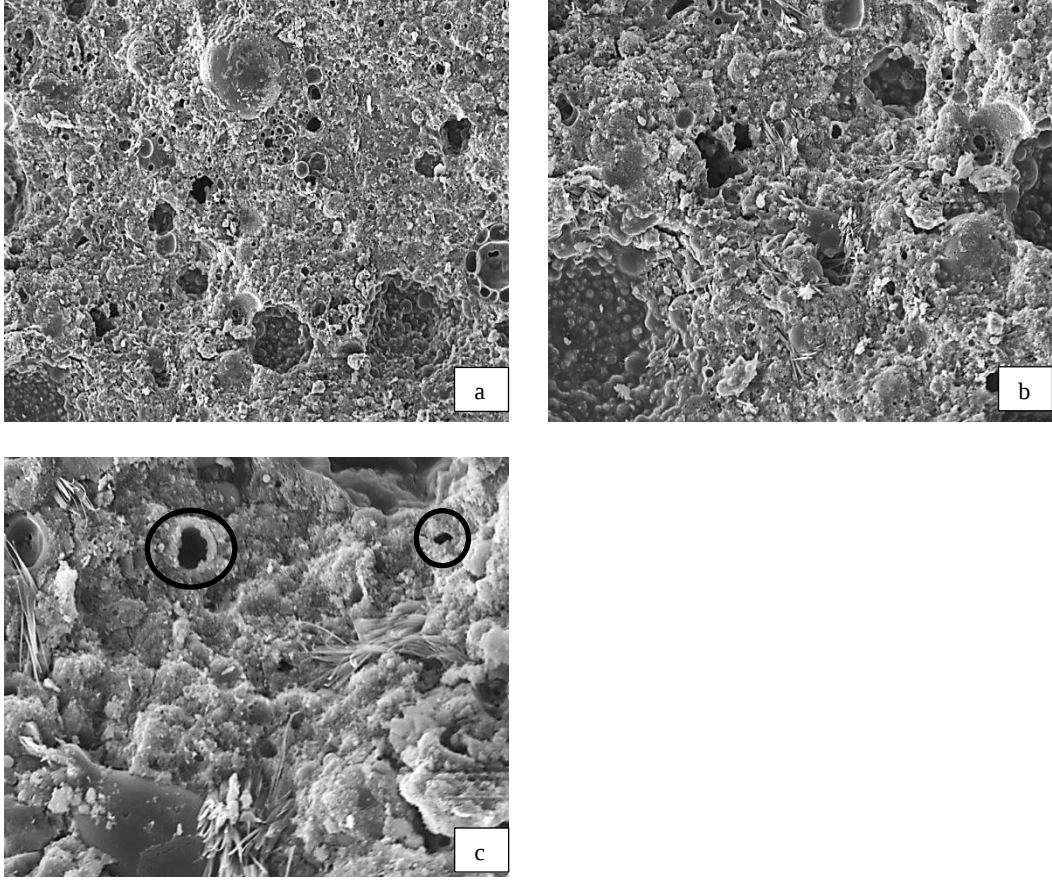
**Çizelge 7.30.** Alkali derişimi 12M olan 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunedeki kristalin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 20,21           | SiO <sub>2</sub>               | 43              |
| Al      | 9,80            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19              |
| Na      | 16,79           | Na <sub>2</sub> O              | 23              |
| K       | 4,87            | K <sub>2</sub> O               | 6               |
| Fe      | 6,81            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9               |

Alkali derişimi 12M olan ve 15 saat süre ile 40°C’de (Şekil. 7.68) ve 80°C’de (Şekil. 7.71) ısıt işlem gören numunelerin görüntüleri ile kıyaslandığında, 120°C’de ısıt işlem gören numunenin yapısında gözeneklerin sayısının ve büyüklüklerinin arttığı gözlenmiştir. Aynı zamanda yapıda kalıntı miktarının da arttığı görülmüştür.

Alkali derişimi 12M olan sodyum çözeltisi kullanılarak hazırlanan ve 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda 24 saatlik süre ile ısıt işlem gören numunelerin görüntüleri, ısıt işlem süresinin etkisinin araştırılması amacı ile kıyaslanmaktadır.

Sıcaklığın 80°C’a artırılması ile yapıda yer alan gözeneklerin de arttığı görülmektedir (Şekil 7.72). 40°C sıcaklıkta işlem görmüş numunenin yapısında olduğu gibi uçucu kül taneleri ve etrafını kısmen saran jel fazı gözlenmektedir (Şekil 7.69). 120°C sıcaklıkta işlem görmüş numunenin görüntüsü Şekil 7.78’de verilmiştir.



**Şekil 7.78.** Alkali derişimi 12M olan NaOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Sıcaklığın 120°C'a artırılması ile yapıda bulunan gözeneklerin daha da arttığı görülmektedir. Reaksiyona girmemiş uçucu kül tanecikleri 40°C ve 80°C'ta işlem görmüş numunelere göre daha az miktardadır. Reaksiyona kısmen girmiş olan uçucu kül tanelerinin olduğu da gözlenmiştir.

Numune yakından incelendiğinde kalıntıların ve kristallerin olduğu gözlenmektedir. EDX analizleri sonucunda kristallerin kütlece %40 oranında sodyumdan olduğu belirlenmiştir. Çizelge 31'da numunede gözlenen kristalin EDX analizi verilmiştir.

**Çizelge 31.** Alkali derişimi 12M olan 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunede kristalin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 12,23           | SiO <sub>2</sub>               | 26              |
| Al      | 7,19            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15              |
| Na      | 40,49           | Na <sub>2</sub> O              | 55              |
| Fe      | 2,75            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4               |

12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin EDX analizi ise Çizelge 32’de verilmiştir.

**Çizelge 32.** Alkali derişimi 12M olan 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin EDX analizi

| Element | Kütlece dağılım | Bileşik                        | Kütlece dağılım |
|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|
| Si      | 39,73           | SiO <sub>2</sub>               | 85              |
| Al      | 5,73            | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11              |
| Na      | 3,10            | Na <sub>2</sub> O              | 4               |

Numunenin EDX analizi sonucunda silisyumun kütlece yüzdesinin yüksek olduğu görülmüştür. Jel fazın üzerinde silisyumun kalıntı oluşturduğu gözlenmiştir.

Isıt işlem sıcaklığının artması ile numunelerin yapılarında oluşan gözeneklerin sayısının ve çaplarının arttığı ayrıca jel fazın üzerinde oluşan kalıntı miktarının arttığı gözlenmiştir.

### **7.6.1.3. Alkali derişiminin sodyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin yapılarına etkisi**

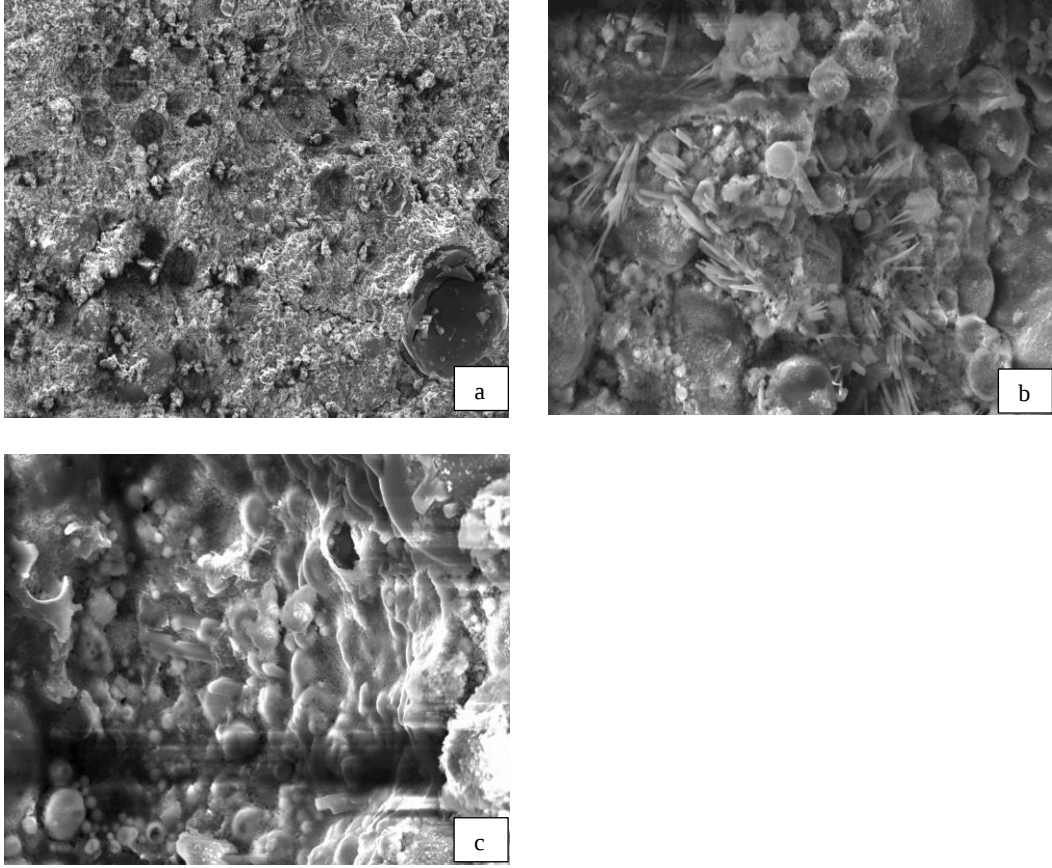
Ortam pH'ı çözünürlüğü dolayısıyla geopolimerlerin yapısını etkileyen önemli bir etkindir. Bu amaçla farklı derişimlerde sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak hazırlanan numunelerin yapısal analizleri taramalı elektron mikroskop kullanılarak araştırılmıştır. Aynı sıcaklık ve sürelerde ısıtılma işlemi gören farklı derişimde sodyum hidroksit çözeltileri ile hazırlanan numunelerin görüntüleri incelenmiştir ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

40°C sıcaklıkta 6 saat ısıtılma işlemi gören ve 4M derişiminde (Şekil 7.61.), 8M derişiminde (Şekil 7.64.) ve 12M derişiminde (Şekil 7.67.) sodyum hidroksit çözeltileri kullanılarak elde edilen numunelerin görüntüleri incelendiğinde alkali derişiminin 4M'dan 8M'a artırılması ile reaksiyona girmeden yapıda kalan uçucu kül tanelerinin sayısının azaldığı görülmüştür. Derişimin 8M'dan 12M'a artırılması ile oluşan yapıların birbirine benzerlik gösterdiği gözlenmiştir.

Sodyum hidroksit derişimi 12M'a artırıldığında kısmen çözünen uçucu kül taneleri gözlenmiştir. Bu durum, alkali derişiminin uçucu kül tanelerinin çözünmesini arttırdığını göstermektedir.

Isıl işlem sıcaklığı 40°C, ısıtılma süresi 15 saat olan ve 4M (Şekil 7.62.), 8M (Şekil 7.65.) ve 12M (Şekil 7.68.) derişimlerinde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin mikroyapıları incelendiğinde alkali derişiminin artması ile numunede daha sıkı bir jel yapısının oluştuğu ve yapıda daha az sayıda uçucu kül tanelerinin kaldığı görülmüştür.

Isıl işlem sıcaklığı 80°C olan ve 6 saat ısıtılma işlemi gören farklı derişimlerde alkali çözelti ile hazırlanan numunelerin yapıları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Şekil 7.79'da 4M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.79.** Alkali derişimi 4M olan NaOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 150x b. 3000x c. 4000x

4M derişiminde sodyum hidroksit ile hazırlanan numunenin yapısı incelendiğinde fazla sayıda gözenek ve çukurlukların oluştuğu görülmüştür. Numune yakından incelendiğinde küçük bir bölgede jel fazın uçucu küllerin etrafını sarmaya başladığı görülmüştür.

Şekil 7.75'te verilen alkali çözelti derişimi 8M olan sodyum hidroksit kullanıldığında, derişimin arttırılmasıyla jel fazın daha fazla oluşmaya başladığı ve gözeneklerin sayısının azaldığı gözlenmiştir.

Sodyum hidroksit derişiminin 12M'a arttırılmasıyla (Şekil 7.70.) daha sıkı bir yapı oluştuğu gözlenmektedir. Ancak jel fazı yakından incelendiğinde gözeneklerin olduğu görülmüştür.

Alkali derişiminin 4M'dan 8M'a arttırılması ile, geopolimer numunelerinin yapılarında reaksiyona girmeden kalan uçucu küllerin azaldığı ve daha sıkı bir yapı oluştuğı gözlenmiştir. Derişimin 8M'dan 12M'a arttırılması ile oluşan yapıların birbirlerine benzer oldukları görülmüştür. Bunun nedeninin ortamdaki OH<sup>-</sup> derişimi yüksek olduğunda uçucu külün çözünmesinin hızlanması ancak belli bir değerden sonra polikondenzasyonun engellenmesinin olduğu düşünülmektedir (Somna ve ark. 2011).

Numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 28 günlük dayanımların derişimin 4M'dan 8M'a arttırılması ile arttığı, 12M'a arttırılması ile hemen hemen aynı kaldığı gözlenmiştir.

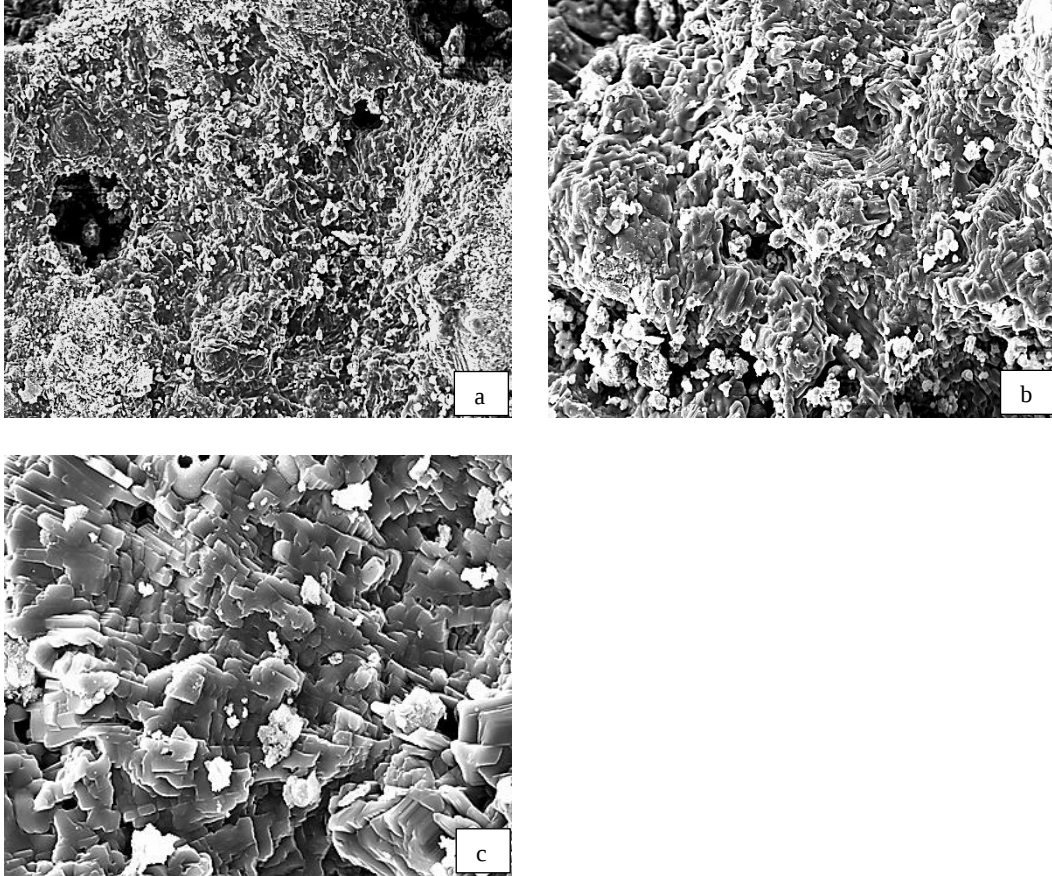
#### **7.6.2. Potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri**

Bu bölümde 4M, 8M ve 12M derişimlerinde potasyum hidroksit kullanılarak üç farklı sıcaklık ve sürelerde elde edilen geopolimerlerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile yapıları incelenmiş ve aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

##### **7.6.2.1. Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin yapılarına etkisi**

Isıl işlem süresinin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin yapılarına etkisinin araştırılması amacı ile 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak 120°C'ta, 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak 40°C'ta, 12M olan KOH kullanılan ve 120°C'ta 6, 15 ve 24 saat ısıtılma gören numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

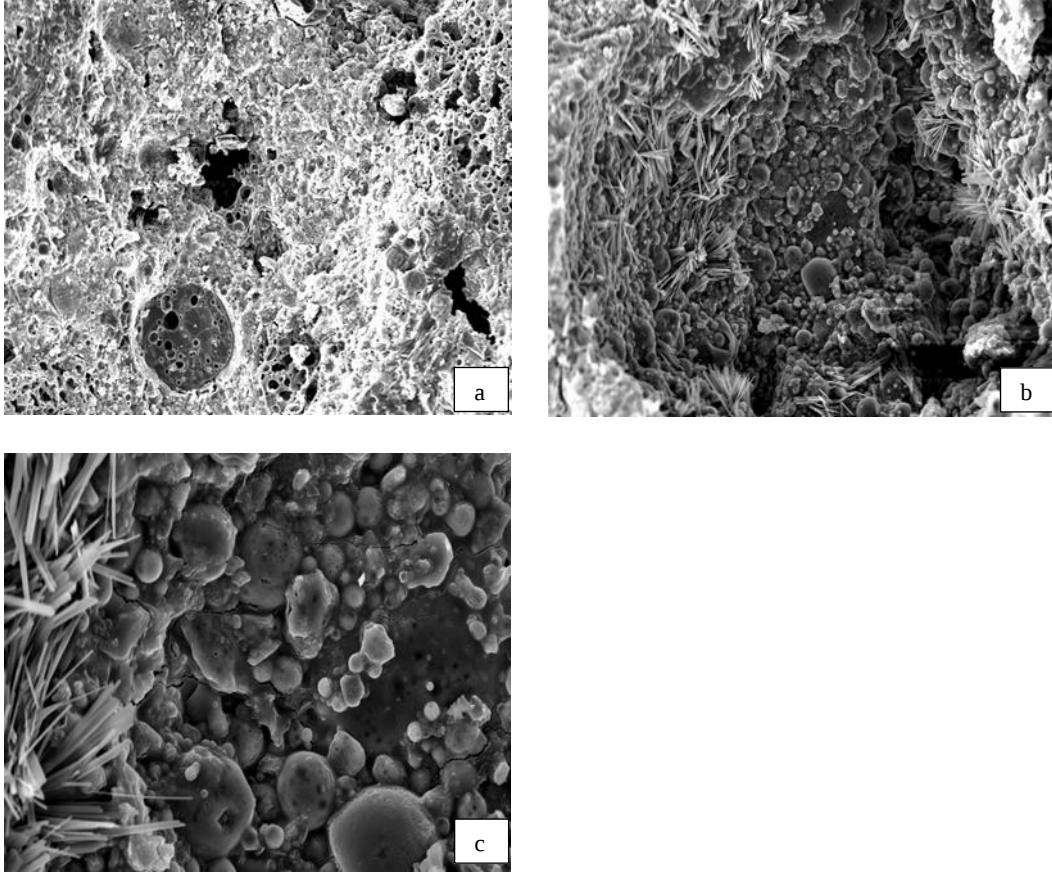
Alkali çözelti olarak 8M derişimindeki potasyum hidroksit kullanılarak elde edilen ve 120°C'ta 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıt işlem gören numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü Şekil 7.80'de verilmektedir.



**Şekil 7.80.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

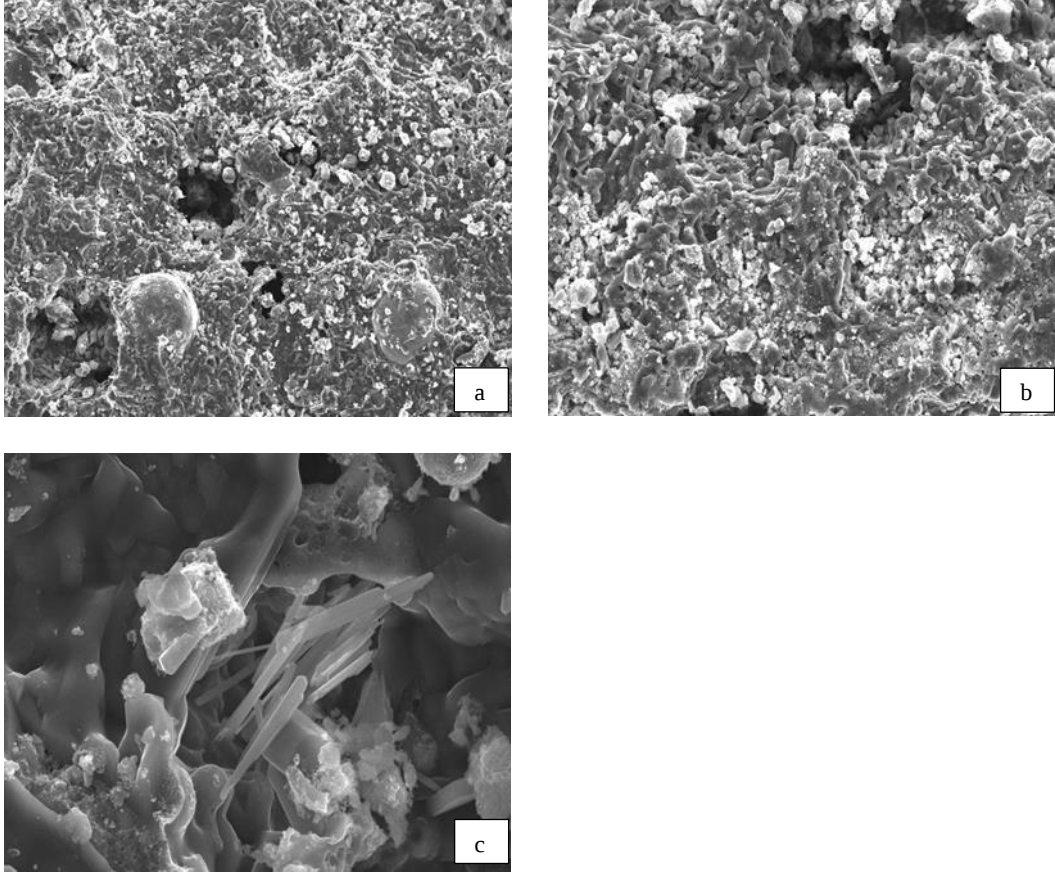
120°C sıcaklıkta ısıt işlem gören numunede büyük gözenekler gözlenmekle birlikte jel yapısının oluşarak uçucu küllerin etrafını sarmaya başladığı görülmüştür. Reaksiyona girmeyen uçucu kül taneciklerinin çok küçük olduğu ve yapıda kalıntıların olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7.81’de 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtılma görmüş numunenin SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.81.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıtılma görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

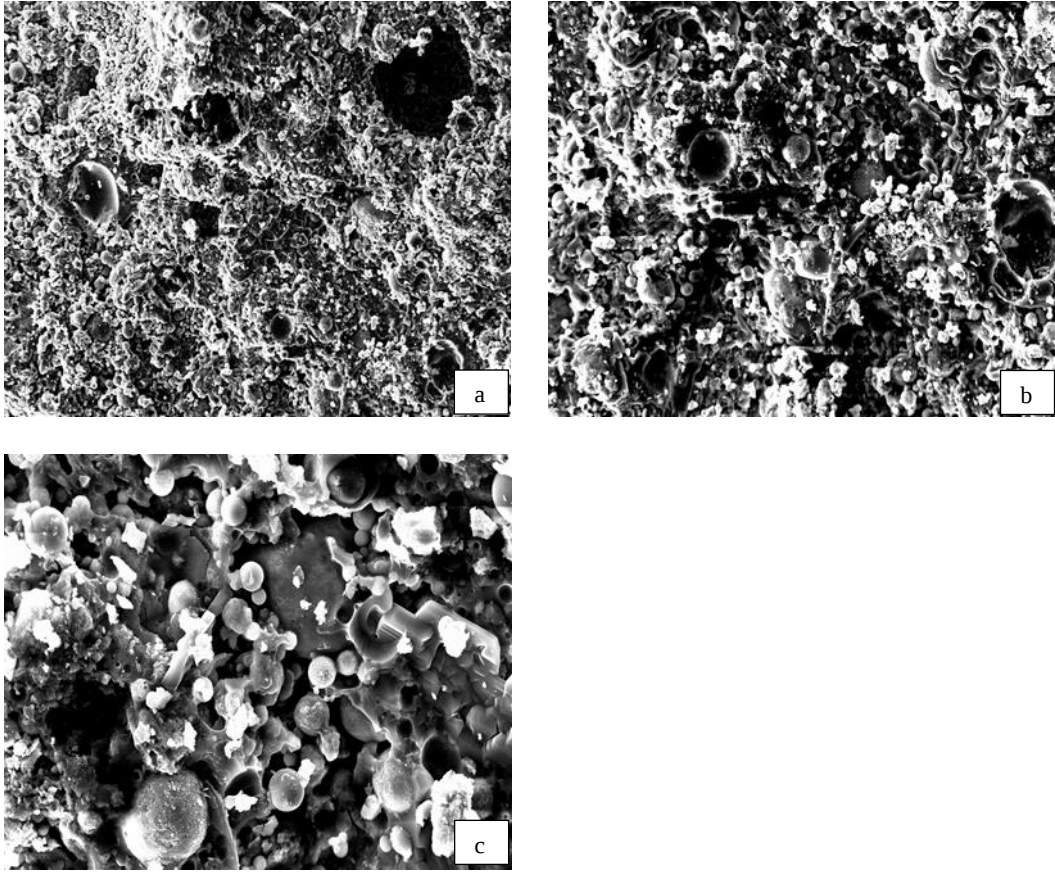
15 saat ısıtılma görmüş numunenin yapısında büyük bir gözenek ve çukurun oluştuğu görülmüştür. Numune yakından incelendiğinde iğne şeklinde kristallerin oluştuğu ve reaksiyona girmeyen uçucu kül taneciklerinin yapıda kaldığı gözlenmiştir. 24 saat ısıtılma görmüş numunenin SEM görüntüsü Şekil 7.82’de yer almaktadır.



**Şekil 7.82.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 5000x

Isıl işlem süresinin 24 saate arttırılmasıyla daha sıkı bir geopolimerik jel yapısının oluştuğu ve uçucu kül tanelerinin etrafını sardığı gözlenmiştir. Jel yapısında aynı zamanda iğne şeklinde kristallerin oluştuğu ve çökeleklerin kaldığı görülmüştür. 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin yapısının, 6 ve 15 saat ısıt işlem gören numunelere göre daha homojen olduğu gözlenmiştir.

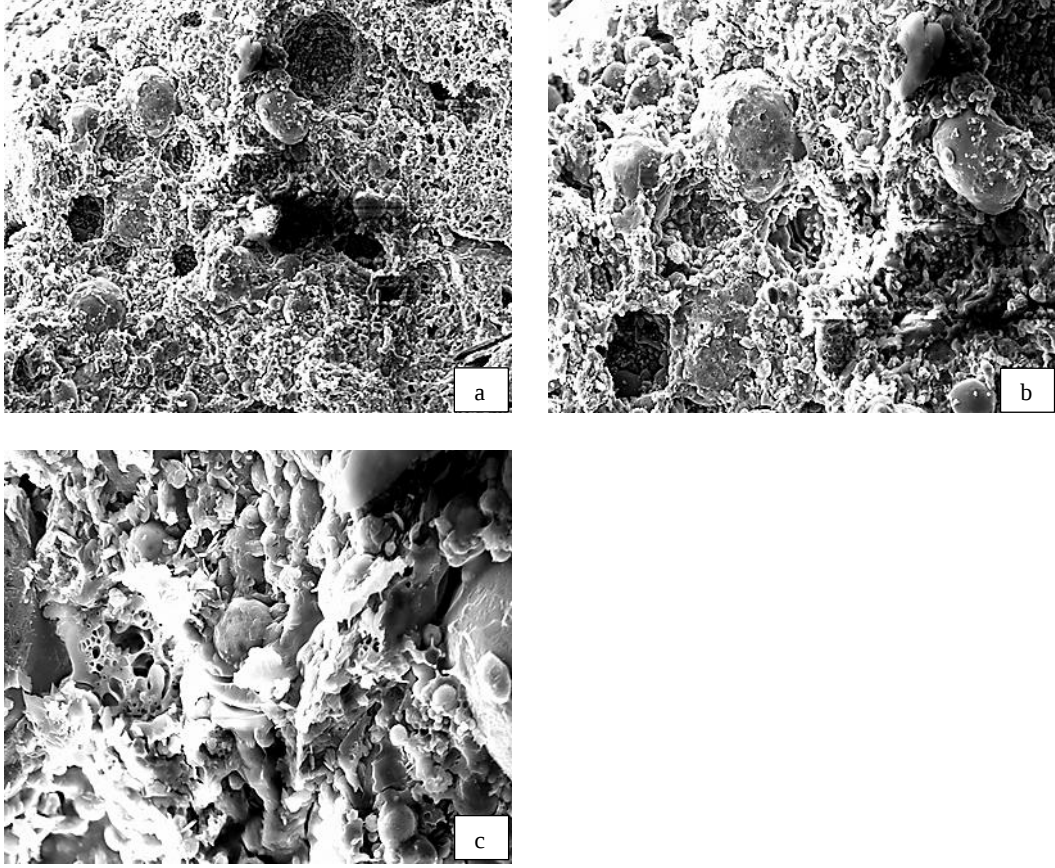
12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılan ve 40°C sıcaklıkta ısıt işlem gören numunelerin görüntüleri aşağıda verilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Isıl işlem süresi 6 saat olan numunenin görüntüsü Şekil 7.83'te yer almaktadır.



**Şekil 7.83.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Numunenin yapısında büyük gözenekler ve çukurluklar göze çarpmaktadır. Yapı incelendiğinde reaksiyona girmemiş ve kısmen çözünmüş uçucu kül tanecikleri görülmektedir. Geopolimerik jel yapısı oluşmaya başladığı gözlenmektedir. Jel fazın ve uçucu kül tanelerinin üzerinde kalıntı olduğu görülmüştür.

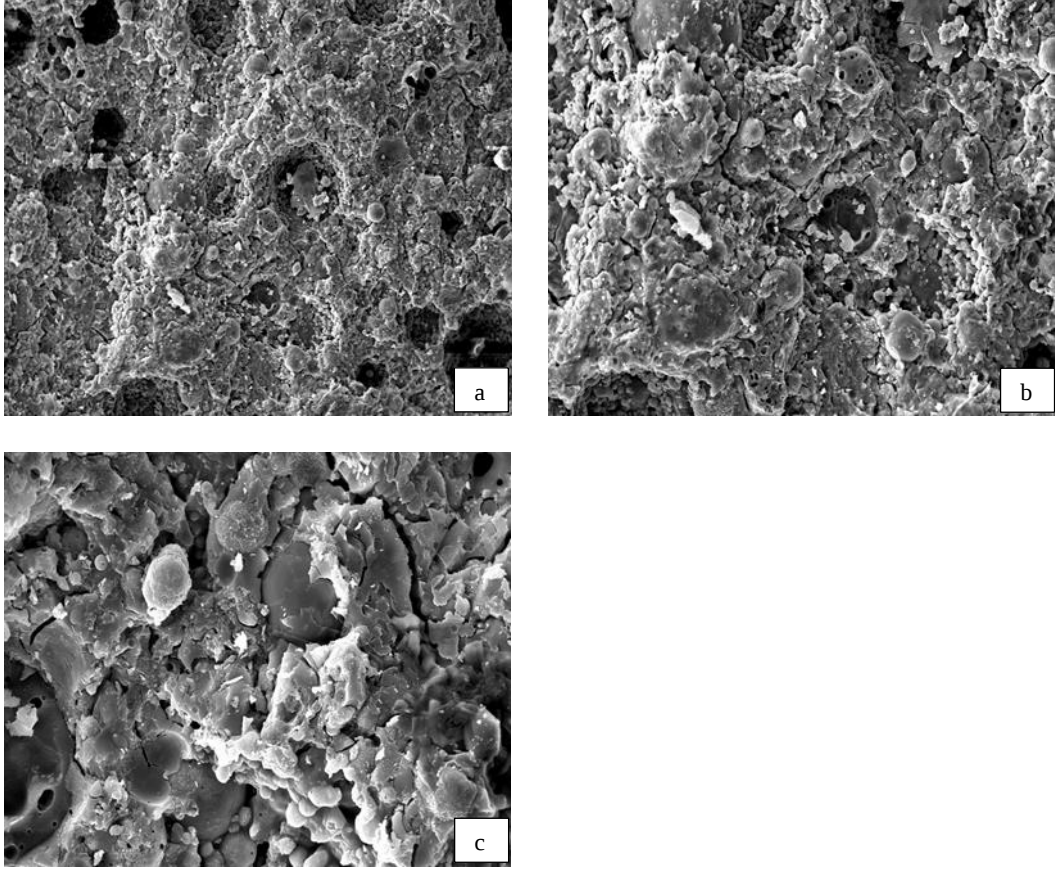
Şekil 7.84'te aynı derişim ve ısıt işlem sıcaklığına sahip olan ve 15 saat işlem gören numunenin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.84.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

12M derişiminde KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin yapısının homojen olmadığı ancak jel fazın oluşmaya başladığı ve uçucu kül tanelerinin üzerini kapladığı görülmüştür. Yapıda büyük gözeneklerin yer aldığı ve büyük uçucu kül tanelerinin reaksiyona girmeden kaldığı gözlenmektedir. 6 saat ısıt işlem gören numune ile kıyaslandığında, jel fazın daha fazla oluştuğu görülmüştür.

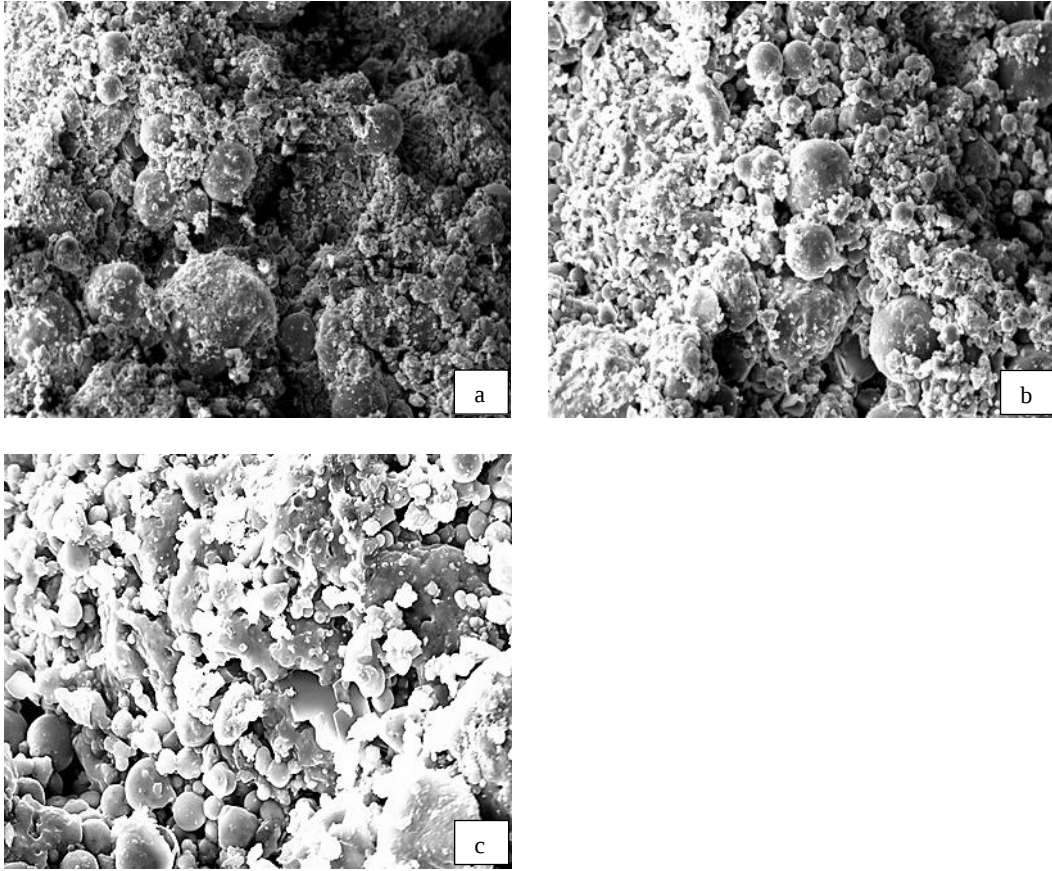
24 saat ısıt işlem görmüş numunenin görüntüsü ise Şekil 7.85'te verilmiştir.



**Şekil 7.85.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

6 ve 15 saat ısıt işlem gören numuneler ile kıyaslandığında 24 saat ısıt işlem gören numunenin yapısındaki gözeneklerin çapının küçük ancak sayısının daha fazla olduğu görülmüştür. Numunede daha sıkı bir jel yapısının oluştuğu gözlenmiştir. Geopolimer jelinin bazı uçucu kül tanelerinin etrafını kapladığı görülmüştür. Numune yakından incelendiğinde yapıda çatlakların oluştuğu göze çarpmaktadır.

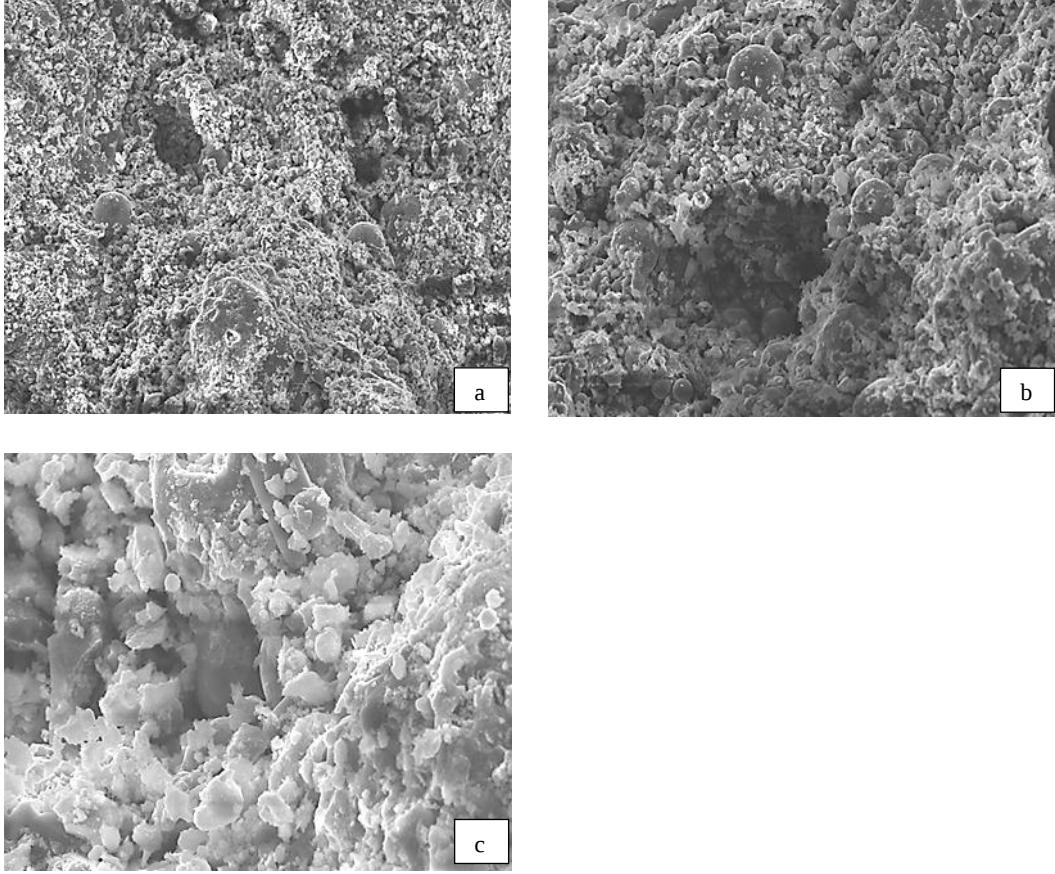
Alkali derişimi 12M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 120°C’ta üç farklı sıcaklıkta ısıt işlem gören numunelerin SEM görüntüleri aşağıda verilmiştir. Şekil 7.86’da 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin görüntüsü yer almaktadır.



**Şekil 7.86.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunenin yapısında reaksiyona girmemiş çok sayıda küçük ve büyük uçucu kül tanelerinin olduğu ve geopolimerik jel yapısının tam olarak oluşmadığı gözlenmiştir. Yapıda jel fazın üzerinde kalıntı olduğu da görülmüştür.

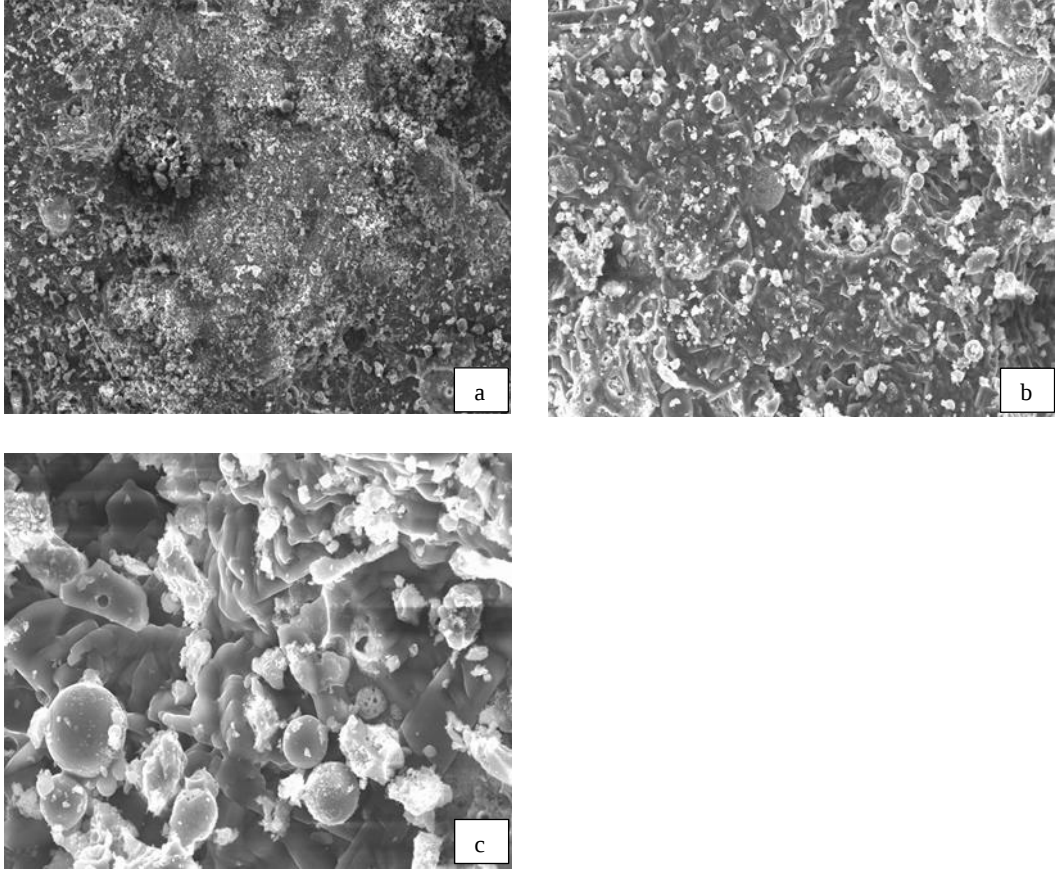
12M derişiminde sodyum hidroksit kullanılarak 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin görüntüsü Şekil 7.87’de verilmiştir.



**Şekil 7.87.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

15 saat ısıt işlem görmüş numunenin görüntüsü incelendiğinde geopolimer jelinin oluşmaya ve uçucu küllerin etrafını kaplamaya başladığı görülmüştür. 6 saat ısıt işlem gören numune ile karşılaştırıldığında kalıntıların oluşumunun arttığı gözlenmiştir.

Aynı derişim ve ısıt işlem sıcaklığında 24 saat süre ile ısıt işlem gören numunenin görüntüsü Şekil 7.88’de verilmiştir.



**Şekil 7.88.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

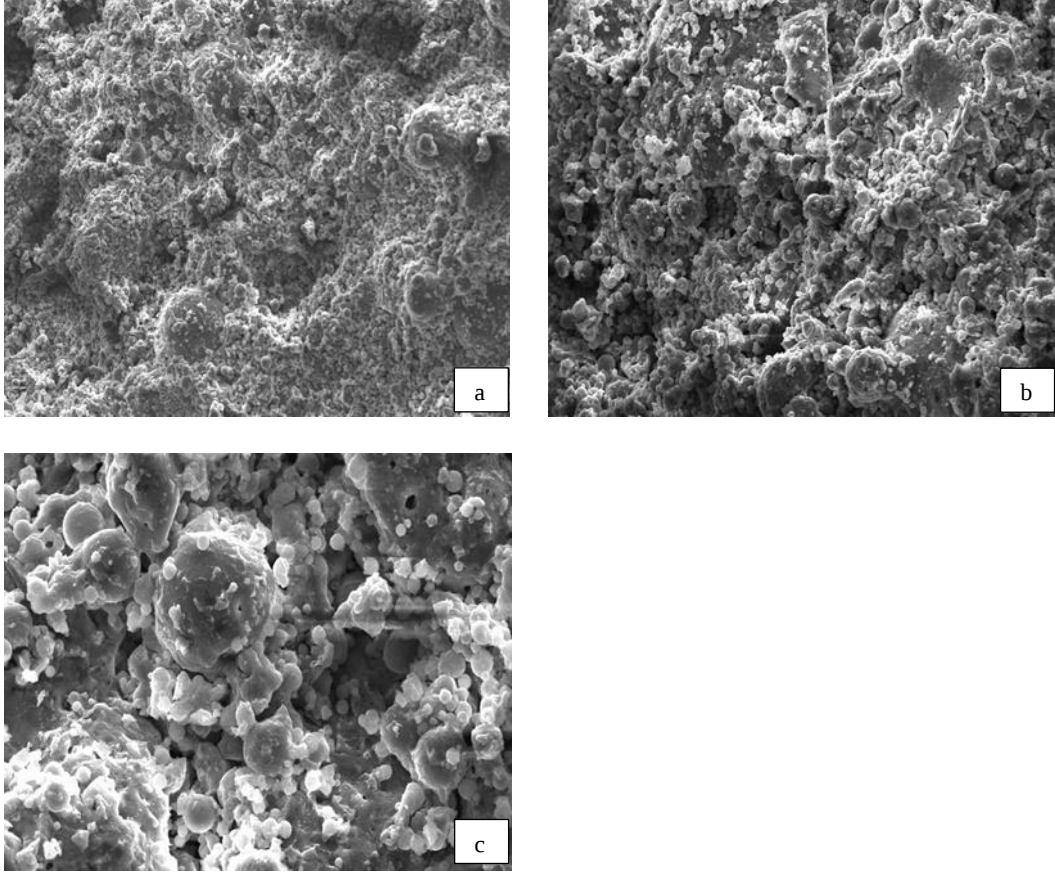
Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin kompakt bir yapısının olduğu ve geopolimer jelinin olduğu gözlenmektedir. Yapıda reaksiyona girmeden kalan uçucu küllerin sayısının az olduğu görülmüştür. 6 saat ve 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin yapıları ile karşılaştırıldığında, 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin yapısının daha homojen olduğu göze çarpmaktadır.

Isıt işlem süresinin arttırılması ile numunelerin yapılarında jel yapısının daha fazla olduğu ve reaksiyona girmeden kalan uçucu küllerin sayısının azaldığı gözlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımları da ısıt işlem süresinin artması ile artmaktadır.

#### **7.6.2.2. Isıl işlem sıcaklığının potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin yapılarına etkisi**

Geopolimer üretiminde ısı işlem sıcaklığı ve süresinin, numunelerin yapılarını etkilemektedir (Duxon ve ark. 2007b; Khale ve Chaudhary 2007). Isıl işlem sıcaklığının etkisi, aynı derişime sahip potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve aynı sürelerde farklı sıcaklıklarda ısı işlem gören numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri karşılaştırılarak araştırılmıştır. Bu amaçla 4M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak 24 saat, 8M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak 24 saat, 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak 6 saat süre ısı işlem gören numunelerin görüntüleri incelenmiştir.

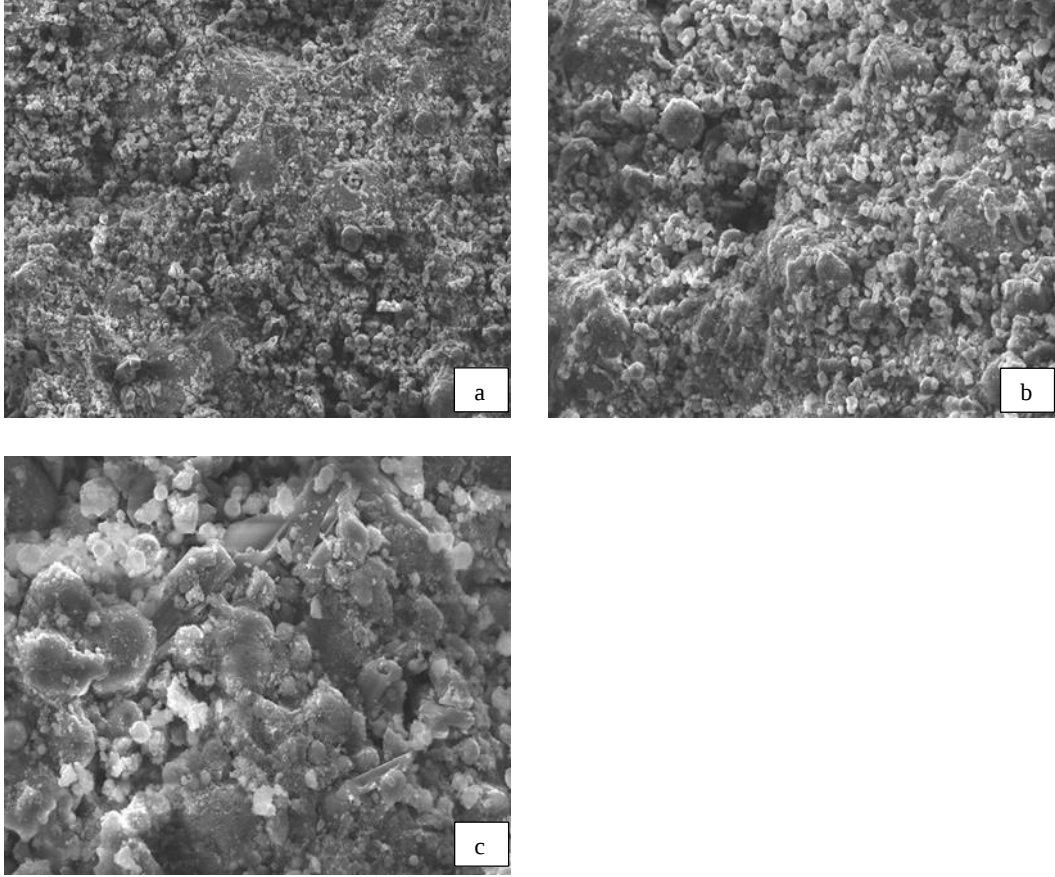
Alkali derişimi 4M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 24 saat ısı işlem gören geopolimerlerin yapılarına işlem sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Şekil 7.89’da 40°C sıcaklıkta işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.89.** Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Numunenin yapısı incelendiğinde geopolimer jelinin oluşmaya başladığı gözlenmiştir. İri ve küçük uçucu kül tanelerinin numune içinde reaksiyona girmeden kaldığı görülmüştür. Numunenin yapısı yakından incelendiğinde ortamda kalıntı oluştuğu görülmektedir.

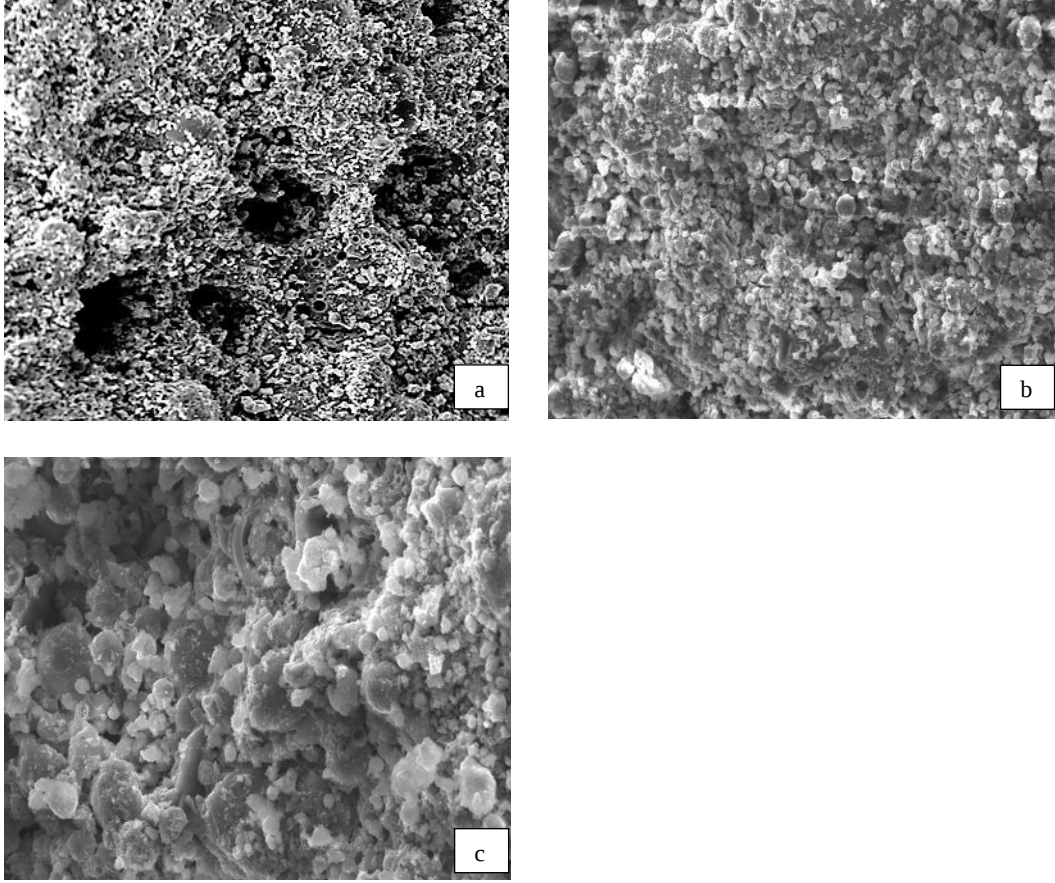
Şekil 7.90'da 80°C sıcaklıkta işlem görmüş numunenin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.90.** Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

80°C sıcaklıkta işlem görmüş numunede jel yapının oluştuğu ve büyük uçucu kül tanelerinin etrafını kapladığı görülmüştür. Küçük uçucu küller reaksiyona girmeden kalmıştır. Numunenin yapısında jel fazın üzerinde kalıntıların oluştuğu görülmüştür. 40°C sıcaklıkta işlem görmüş numune ile kıyaslandığında jel fazın biraz daha fazla oluştuğu gözlenmiştir.

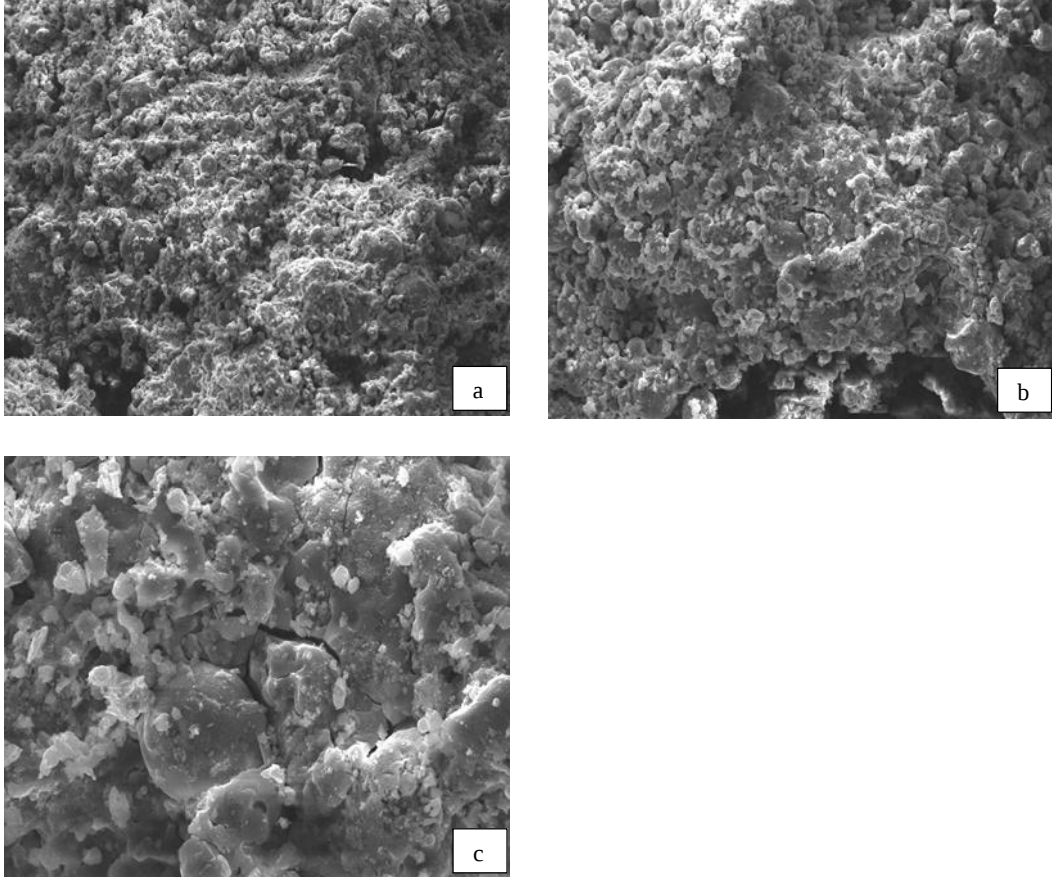
Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü Şekil 7.91’de verilmiştir.



**Şekil 7.91.** Alkali derişimi 4M olan KOH kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt ısıt işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Sıcaklığın 120°C'a arttırılması ile numunede büyük gözeneklerin oluştuğu görülmüştür. Numune yakından incelendiğinde jel fazın oluştuğu ve uçucu kül tanelerinin etrafını kaplamaya başladığı gözlenmiştir. Isıl işlem sıcaklığının 80°C'tan 120°C'a arttırılması ile oluşan jel fazının ve kalıntı oluşumunun benzerlik gösterdiği ancak büyük gözeneklerin oluştuğu görülmüştür.

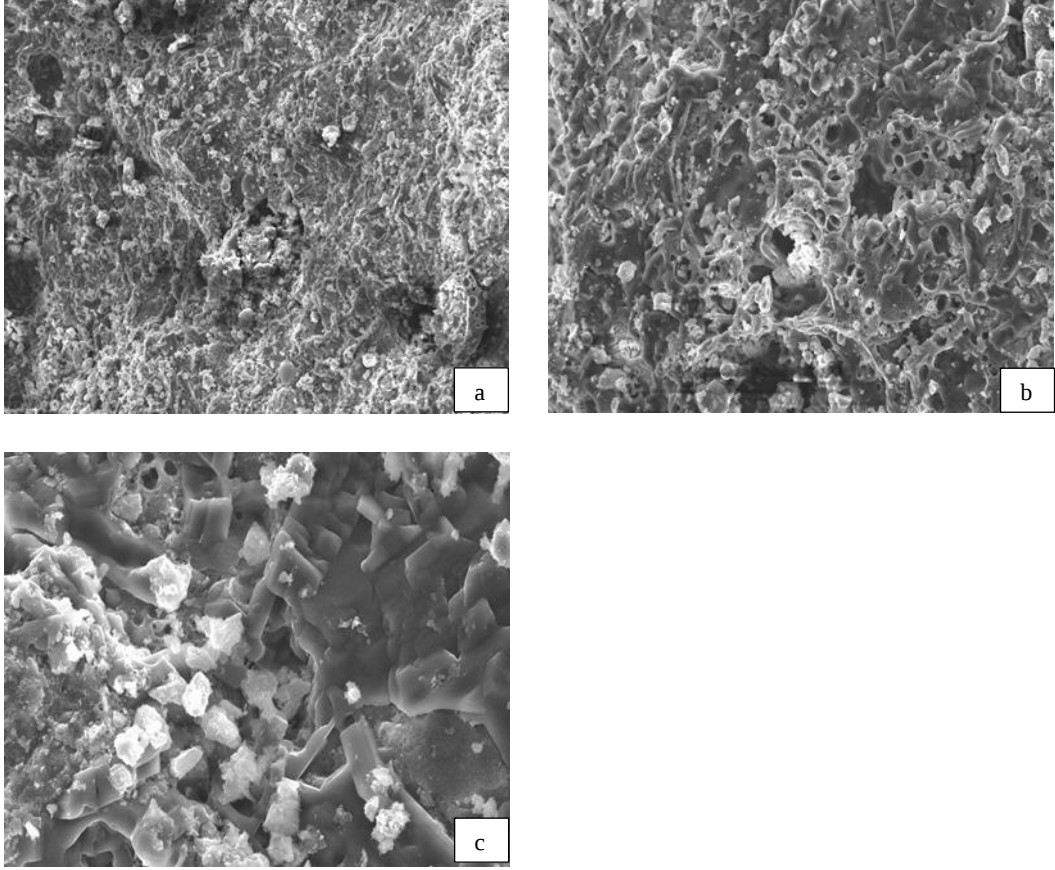
Derişimi 8M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 24 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C ısıt işlem gören numunelerin görüntüleri kıyaslanmıştır. Şekil 7.92'de 40°C sıcaklıkta ısıt işlem gören numunenin görüntüsü yer almaktadır.



**Şekil 7.92.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

Şekilde geopolimerik jel yapısının oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Numunenin görüntüsünde küçük uçucu kül tanelerinin reaksiyona girmeden yapıda kaldığı ve jel fazın ve uçucu kül tanelerinin üzerinde kalıntı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda numunede gözeneklerin yer aldığı ve yakından incelendiğinde çatlakların olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7.93'te aynı derişim ve sürede 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunenin görüntüsü verilmiştir.



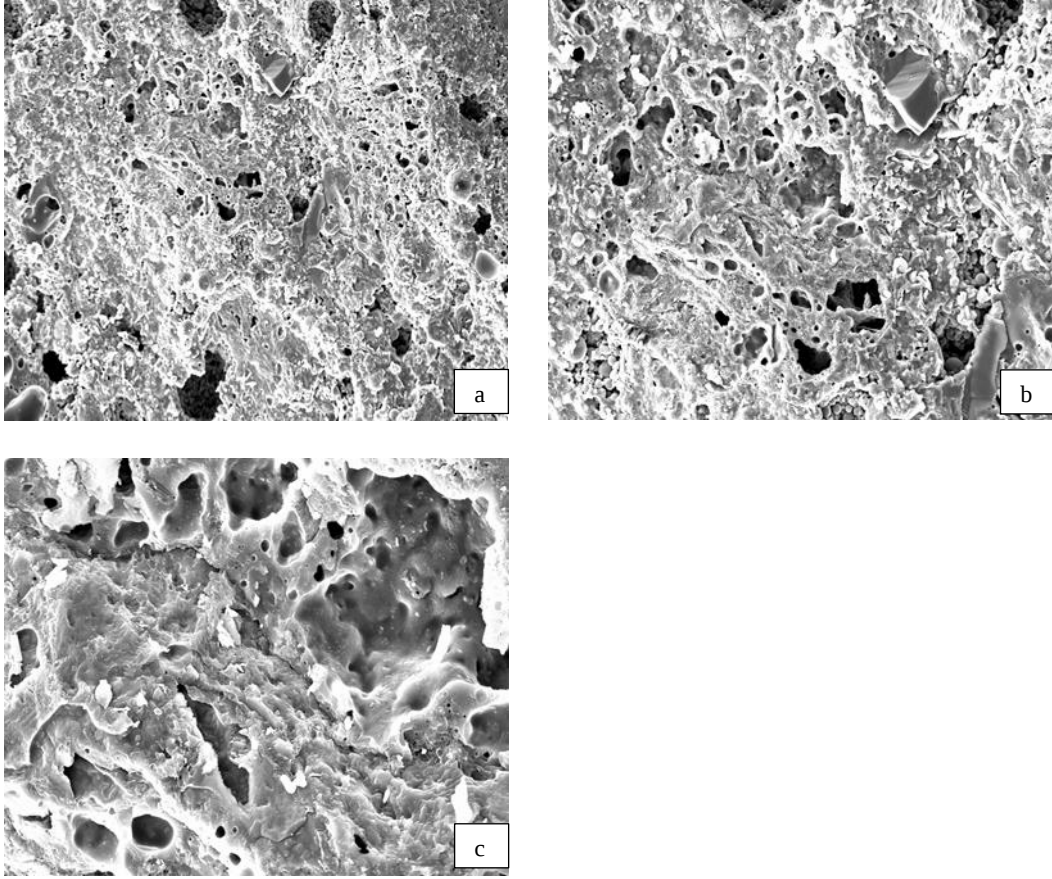
**Şekil 7.93.** Alkali derişimi 8M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

40°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numune ile kıyaslandığında, 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunenin jel yapısının daha kompakt olduğu, daha yakından incelendiğinde ise oluşan jelin yapısında gözenekler oluştuğu görölmüşür. Numunenin yapısında reaksiyona girmeden kalan uçucu kül tanelerinin azaldığı gözlenmiştir.

8M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 24 saat süre ile 120°C sıcaklıkta ısıtıl işlem gören numunenin görüntüsü (Şekil 7.82) ile 40°C ve 80°C sıcaklıkta ısıtıl işlem görmüş numunelerin görüntüleri kıyaslandığında, jel fazında oluşan kalıntı miktarının arttığı gözlenmiştir.

Derişimi 12M olan potasyum hidroksit ile hazırlanan ve 6 saat süre ile 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda ısıtıl işlem gören numunelerin taramalı elektron

mikroskop görüntüleri kıyaslanmıştır. Şekil 7.94'te 80°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunenin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 7.94.** Alkali derişimi 12M olan KOH kullanılan ve 80°C sıcaklıkta 6 saat ısıl işlem görmüş numunenin SEM görüntüsü a. 500x b. 1000x c. 3000x

80°C sıcaklıkta 6 saat ısıl işlem görmüş numunenin görüntüsünde geopolimerik jel fazın oluştuğu ve yapısında çok sayıda gözeneklerin olduğu görülmektedir. Şekil 7.83'te verilen 40°C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunenin görüntüsü ile kıyaslandığında oluşan jel fazın ve gözeneklerin arttığı gözlenmiştir.

Isıl işlem sıcaklığının 120°C'a (Şekil 7.86) arttırılması ile jelin tam oluşmadığı ve reaksiyona girmeden kalan uçucu küllerin sayısının 40°C ve 80°C sıcaklıklarda ısıl işlem görmüş numunelere göre daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Bu durumun, yüksek derişimlerde alkali çözelti kullanıldığında geopolimer hamurunun viskoz olmasından ve karışımın yeterince sağlanamamasından olduğu düşünülmektedir.

Alkali derişimi 12M olan potasyum hidroksit kullanılan ve 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde, sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a arttırılması ile dayanımın arttığı ancak 120°C'a arttırılması ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Basınç dayanımının azalmasının nedeni, 120°C'ta ısıtıl işlem gören numunenin yapısında jel fazın tam olarak oluşmamasıdır.

#### **7.6.2.3. Alkali derişiminin potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin yapılarına etkisi**

Bu bölümde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan ve farklı sıcaklık ve sürelerde ısıtıl işlem gören numunelerin mikroyapılarına alkali derişiminin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 40°C sıcaklıkta 24 saat ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş ve 4M, 8M ve 12M derişiminde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri incelenerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

40°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin görüntüleri incelendiğinde potasyum hidroksit derişiminin 4M'dan (Şekil 7.89) 8M'a (Şekil 7.92) arttırılması ile geopolimer jelinin oluşmaya başlayarak uçucu küllerin üzerini kapladığı ve reaksiyona girmeden kalan uçucu kül tanelerinin daha küçük ve sayılarının daha az olduğu görülmüştür. Derişim 12M'a (Şekil 7.85) arttırıldığında jelin fazın daha fazla oluştuğu ve reaksiyona girmeden kalan uçucu kül tanelerinin azaldığı gözlenmiştir.

120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem gören farklı derişimlerde potasyum hidroksit ile hazırlanan numunelerin görüntüleri incelendiğinde derişimin 4M'dan (Şekil 7.91) 8M'a arttırılması ile (Şekil 7.82) jel fazın daha fazla oluştuğu ve uçucu kül tanelerinin yapıda daha az sayıda kaldığı görülmüştür. Derişimin 12M'a

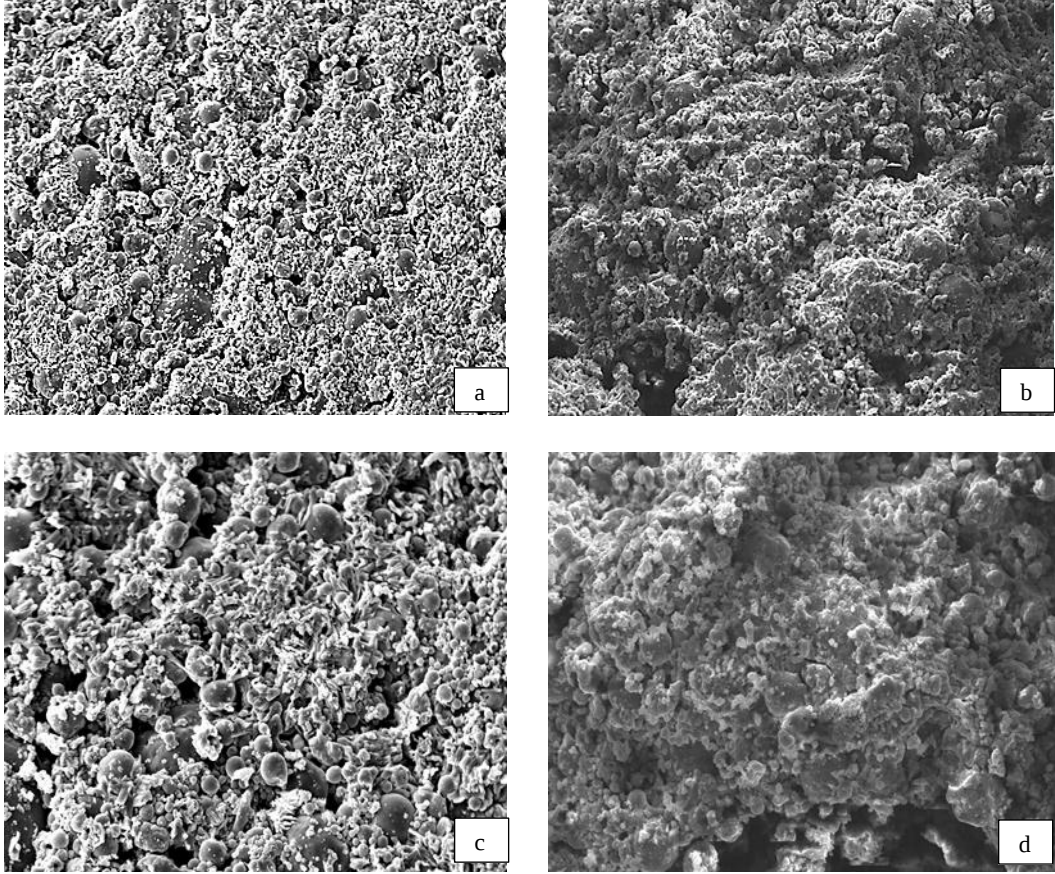
arttırılması ile (Şekil 7.88) homojen bir jel fazın oluştuğu ve reaksiyona girmeden kalan uçucu küllerin az olduğu görülmüştür.

### **7.6.3. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan geopolimerlerin mikroyapılarının karşılaştırılması**

Geopolimer elde edilmesinde kullanılan alkali çözeltideki katyonun, numunelerin yapılarına etkilerinin araştırılması amacı ile sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin görüntüleri incelenmiştir.

8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat, 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat, 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat, 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 ve 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem gören numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri karşılaştırılmıştır.

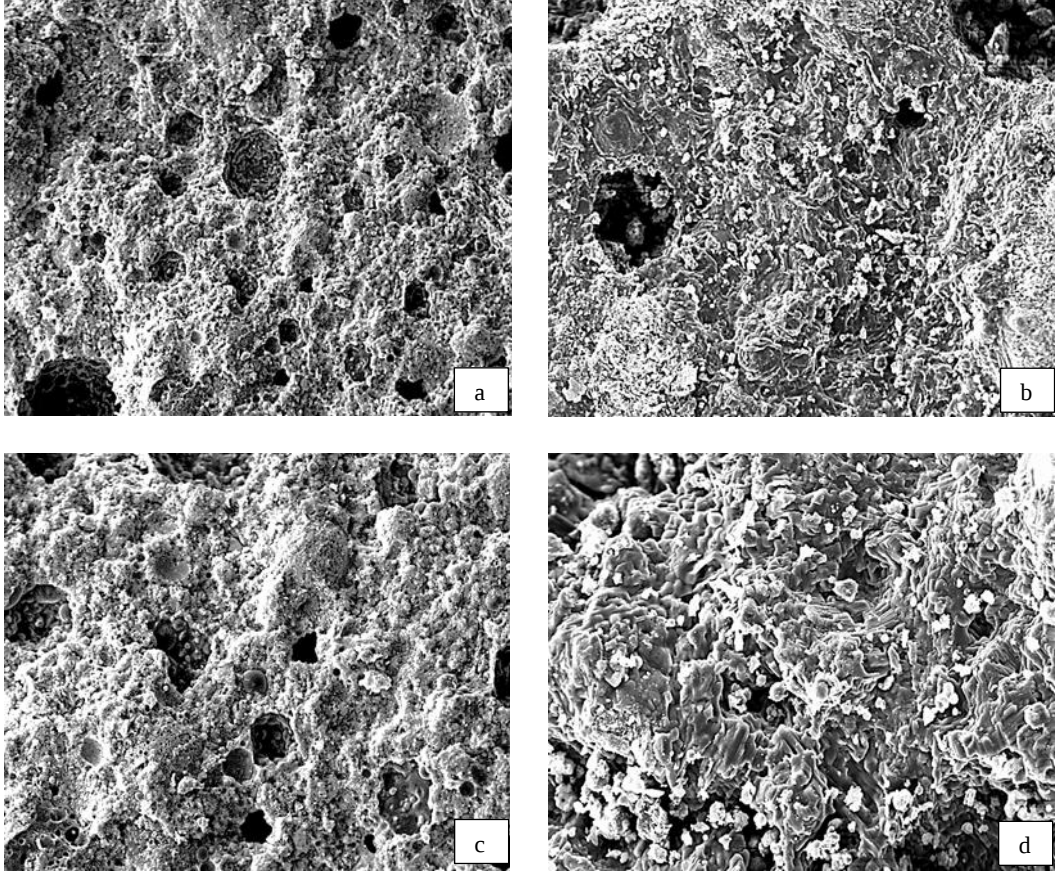
8M derişiminde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıtıl işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri Şekil 7.95'te verilmiştir.



**Şekil 7.95.** 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x)

Şekilde sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunede jel yapısının tam olarak oluşmadığı gözlenirken potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunede jel yapısının daha fazla oluştuğu ve uçucu küllerin etrafını kapladığı görülmektedir. Reaksiyona girmeden kalan uçucu küllerin sayısının sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunede daha fazla olduğu görülmüştür.

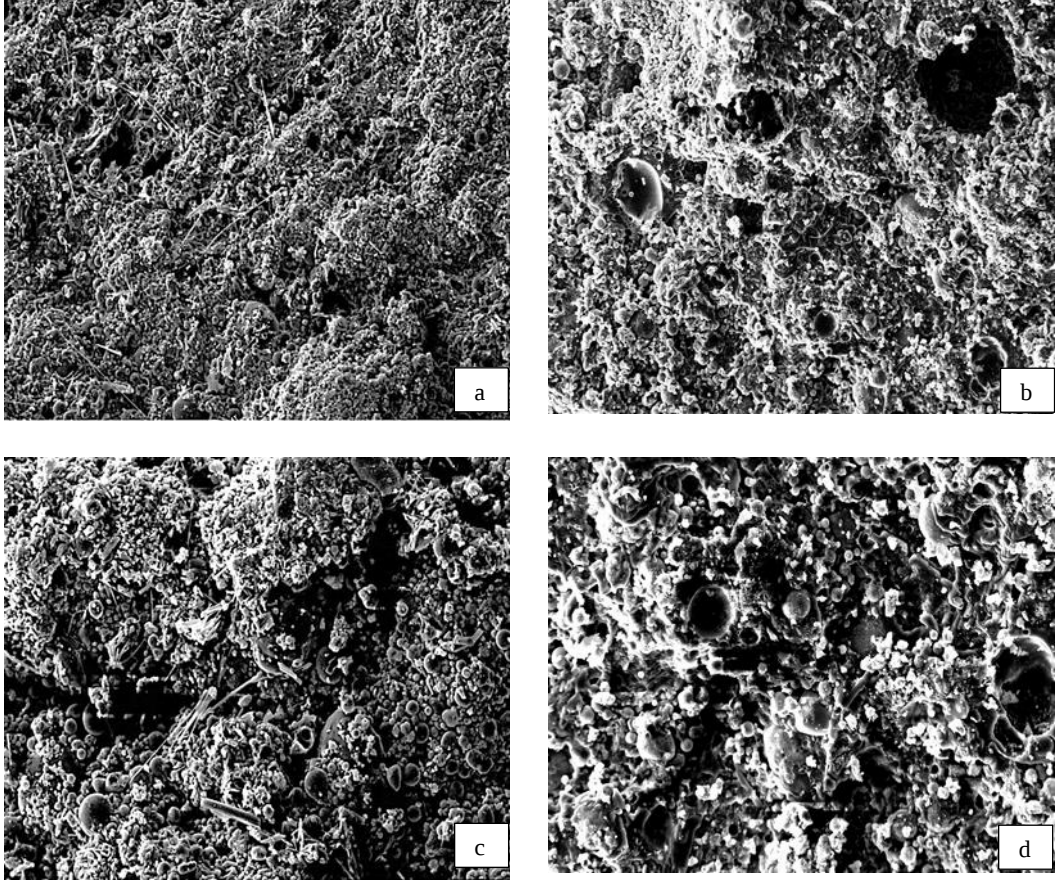
Derişimleri 8M olan alkali çözelti kullanılarak 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem gören numunelerin SEM görüntüleri Şekil 7.96’da verilmiştir



**Şekil 7.96.** 8M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x)

Potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin yapısının, sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numuneye göre daha homojen olduğu ve jel yapısının daha fazla olduğu gözlenmiştir. Sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunede çukurların daha fazla olduğu görülmüştür.

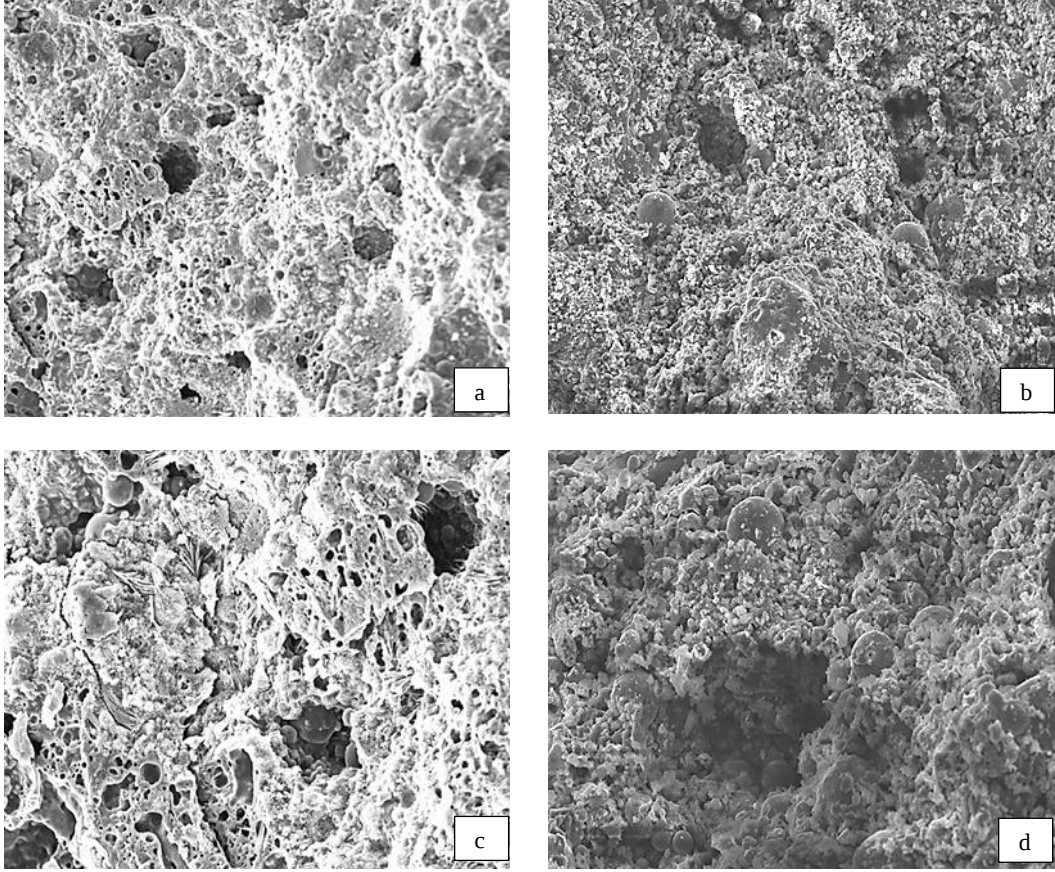
Şekil 7.97, 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntülerini göstermektedir.



**Şekil 7.97.** 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 40°C sıcaklıkta 6 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x)

Şekilde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin yapısında daha iyi bir jel fazın oluştuğu ve daha az miktarda reaksiyona girmeyen uçucu küllerin kaldığı gözlenmiştir.

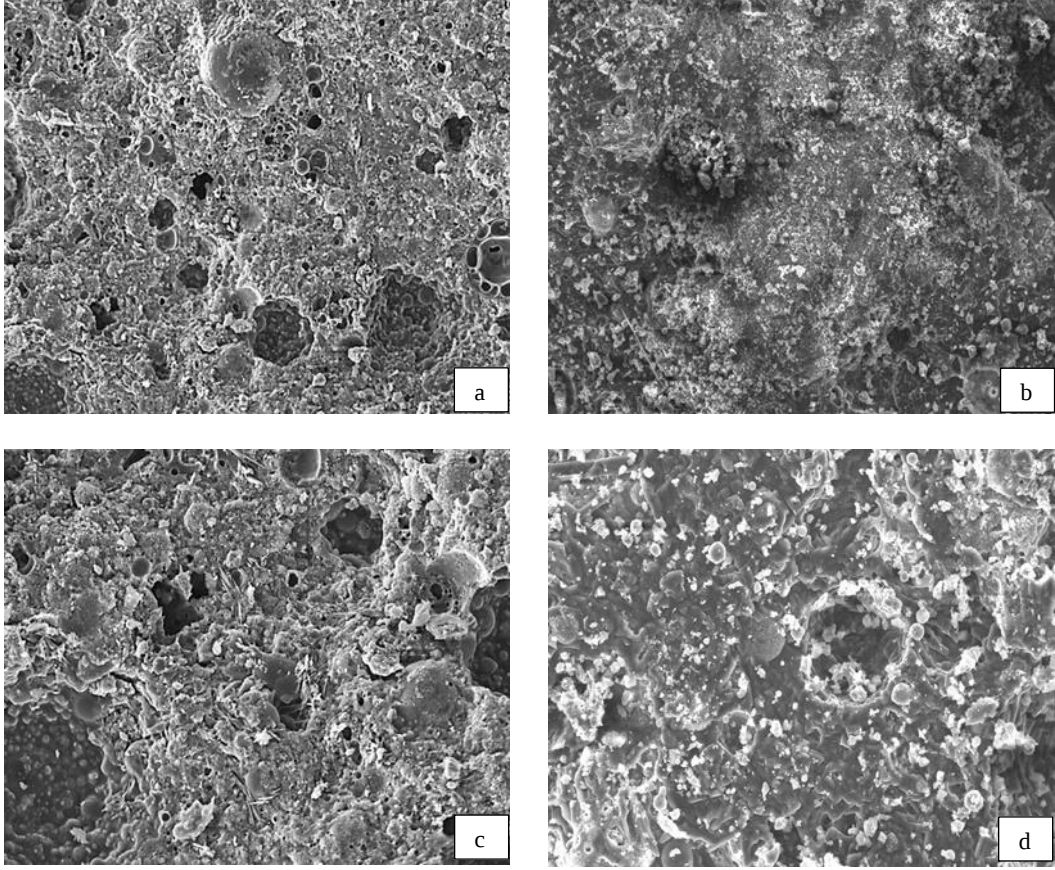
12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri Şekil 7.98’de gösterilmiştir.



**Şekil 7.98.** 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x)

12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 15 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri karşılaştırıldığında sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin yapısında çok sayıda gözeneklerin yer aldığı görülmüştür. Potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunenin daha kompakt olduğu gözlenmiştir.

Şekil 7.99’da ise 12M derişiminde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 7.99.** 12M derişiminde alkali çözelti kullanılan ve 120°C sıcaklıkta 24 saat ısıt işlem görmüş numunelerin SEM görüntüleri a. NaOH ile hazırlanan numune (500x) b. KOH ile hazırlanan numune (500x) c. NaOH ile hazırlanan numune (1000x) d. KOH ile hazırlanan numune (1000x)

Şekilde potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunede iyi ve homojen bir jel yapısının oluştuğu görülmüştür. Sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numune ile kıyaslandığında potasyum hidroksit kullanılan numunenin yapısında gözeneklerin yer almadığı ve reaksiyona girmeden kalan uçucu küllerin çok küçük ve sayılarının az olduğu gözlenmiştir.

## 8. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Dünya çapında kömürün yanmasından yan ürün olarak elde edilen uçucu külün bol bulunması, beton üretiminde geleneksel Portland çimentosuna alternatif olarak kullanılması için fırsat yaratmaktadır. İnşaat endüstrisi tarafından uçucu küllerin kullanımı ile çimentonun neden olduğu karbondioksit emisyonu ve çevresel zararlar azaltmış olacaktır. İnorganik polimerler olarak bilinen geopolimerler, betonda bağlayıcı etken özelliği gösteren alternatif maddelerden biridir. Geopolimerik bağlayıcılar, üretimleri esnasında çimentonun aksine yan ürünlerin kullanılabildiği malzemelerdir (Vijai ve ark. 2010; Sarker 2009).

Geleneksel Portland çimentosu ile üretilen betonla karşılaştırıldığında, geopolimerler birçok avantajlara sahiptirler. Bir ton düşük kalsiyumlu uçucu külden yaklaşık 2,5 metreküp yüksek kaliteli geopolimer beton üretilebilir ve üretim için gerekli kimyasalların toplam maliyeti bir ton Portland çimentosunun maliyetinden daha azdır. Geopolimerlerin üstün özelliklerinden dolayı daha fazla ekonomik yarar sağlanabilir ve CO<sub>2</sub> yüzdesi azaltılabilir. Küresel ısınma açısından değerlendirildiğinde, geopolimer teknolojisi ile çimento ve agrega endüstrinin sebep olduğu CO<sub>2</sub> salınımı yaklaşık %80 oranında azaltılabilir (Vijai ve ark., 2010).

Bu çalışmada, ülkemizde de bol miktarlarda üretimi olan uçucu küllerden biri kullanılarak geopolimer elde edilmesi amaçlanmıştır. Geopolimer üretimi ile termik santrallerde oluşan ve kullanım alanları oldukça kısıtlı olan uçucu küllerin değerli ve alternatif kullanım alanına sahip bir ürüne dönüştürülmesi hedeflenmiştir.

Geopolimer üretimi için hammadde olarak Çatalağzı termik santralinden alınan F sınıfı uçucu küller kullanılmıştır. Uçucu küller, sodyum silikat ve sodyum hidroksit/potasyum hidroksitin birlikte kullanımı ile aktifleştirilmiştir. Elde edilen geopolimer hamuru, farklı sıcaklık ve sürelerde kür edilerek geopolimerizasyon sağlanmıştır. Geopolimer numunelerinin mekanik özelliklerine ve mikroyapılarına katyon, pH ve ısıl işlemin etkileri araştırılmıştır.

Kullanılan alkali çözeltinin derişimi, geopolimerizasyon esnasında alüminosilikatların çözünürlüğünü etkilediğinden önemli bir parametredir (Khale ve Chaudhary 2007; Zaharaki ve ark. 2010). Geopolimer numunelerine alkali derişiminin etkisinin araştırılması amacı ile 4M, 8M ve 12M derişimlerinde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit çözeltileri kullanılmıştır.

Isıl işlemin sıcaklığı ve süresi kimyasal bileşimi ve kristallik derecesini belirleyen önemli parametrelerdir (Silva ve Sagoe-Crentsil 2008). Kür sıcaklığının etkisinin belirlenmesi amacı ile geopolimer hamurları 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarında kür edilmiştir. Kür süresinin etkisinin araştırılması amacı ile her bir sıcaklıkta 6, 15 ve 24 saat süre ile ısıt işlem uygulanmıştır.

Geopolimer numunelerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacı ile kür işleminden sonra 7, 28 ve 90 gün bekletilen numunelere basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Mikroyapılarının araştırılması amacı ile 28 gün bekletilen numunelerin Fourier Transform Infrared Spektrometresi, X-Işını Difraksiyon Spektrometre, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)/ Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektrometre ile yapıları incelenmiştir.

Çatalağzı termik santralinden elde edilen uçucu külün X-Işını Floresan Spektrometre ile mineral bileşimi belirlenmiş ve SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğinin yüksek olduğu görülmüştür. Fourier Transform Infrared spektrometre ile bağ yapısı araştırılmıştır ve Si-O-Si ve Al-O-Si bağlarından kaynaklanan piklerin şiddetlerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Her iki analiz sonucunda uçucu külün geopolimer sentezi için uygun bir hammadde kaynağı olduğu görülmüştür.

İşlem sıcaklığının artması ile geopolimerik reaksiyonlarda artış beklenmektedir. Basınç dayanımlarına ısıt işlem süresinin etkisi incelendiğinde genel olarak sürenin 6 saatten 15 saate arttırılması ile dayanımların arttığı, 15 saatten 24 saate arttırılması ile azaldığı görülmüştür. Isıt işlem sıcaklığının etkisi incelendiğinde ise, çoğunlukla 90 gün yaşlandırılmış numunelerde olmak üzere, sıcaklığın 80°C'tan 120°C'a arttırılması ile basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Dayanım değerlerinin düşmesinin nedeninin yüksek sıcaklıkta kür işlemi sonucu numunelerin ortam sıcaklığına çıkarılması ile meydana gelebilecek çatlamalardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Literatür çalışmalarında da yüksek sıcaklıklarda uzun süreli kür işleminin basınç dayanımını azalttığı ve geopolimer yapısında kırılmaları neden olduğu belirtilmiştir (Khale ve Chaudhary 2007; Fernández Pereira ve ark. 2009). Yüksek sıcaklıklarda ve uzun kür sürelerinde basınç dayanımlarındaki azalmanın suyun buharlaşmasına bağlı olarak yapıda meydana gelen boşluklardan kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

Basınç dayanımları, alkali hidroksit derişiminin arttırılması ile silisyum ve alüminyumun çözünmesinden dolayı artmaktadır (Khale ve Chaudhary 2007; Somna ve ark. 2011). Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda genel olarak derişimin arttırılması ile basınç dayanımlarının arttığı gözlenmiştir. Alkali derişiminin 4M'dan 8M'a arttırılması ile elde edilen artış oranı, derişiminin 8M'dan 12M'a arttırılması ile elde edilenden daha yüksek bulunmuştur. Bazı numunelerin basınç dayanımlarında alkali derişiminin artması ile azalma olduğu görülmüştür. Alkali derişiminin artması geopolimerlerin basınç dayanımını arttırmakta ancak fazla hidroksit iyonu derişimi erken yaşlarda düşük basınç dayanımına yol açan alüminosilikat jelin çökelek oluşturmaya neden olmaktadır (Somna ve ark. 2011).

Basınç dayanımlarının numune yaşı arttıkça artması gerekirken (Somna ve ark. 2011), ısıtıl işlem koşullarında elde edilen bazı numunelerin basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Basınç dayanımlarında azalma gözlenmesi uzun süre ortam koşullarında beklenmesinden dolayı elde edilen numunelerin diğer numunelere göre daha kırılğan bir yapıya sahip olmalarından kaynaklanabilir.

Uçucu küller büyük oranda değişen büyüklük, morfoloji ve reaktiviteye sahip parçacıklar içermektedirler. Külün oluştuğu koşullara ve fırında kullanılan hammaddenin bileşimine bağlı olarak içerikleri değişmektedir. Aynı kaynaktan farklı zamanlarda alınan benzer bileşimlere sahip uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde, önemli oranda değişen dayanımlar gözlenmiştir. Bunun yanında aynı gruptan alınan bazı uçucu kül örneklerinde, erken dayanımların son dayanım ile uyuşmadığı görülmüştür. (van Deventer ve ark. 2007). Laboratuvarında

gerçekleştirilen deneyler esnasında da geopolimer eldesi için kullanılan uçucu küllerin de değişiklik gösterdiği gözlenmiştir.

Fourier Transform Infrared spektroskopisi ile farklı koşullarda sentezlenen geopolimer numunelerinin bağ yapıları ve sentez koşullarının yapıya etkileri araştırılmıştır. Spektrumlar incelendiğinde geopolimerlerin spektrumlarında görülmesi gereken alüminosilikat jelin bütün numunelerde olduğu gözlenmiştir. Parmak izi olarak kabul edilen Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddeti, bağların kuvvetini, zincir uzunluğunun ve oluşan alüminosilikat jelin büyüklüğünü göstermektedir (Bakharev 2005). Elde edilen numunelerde jel yapısının oldukça kuvvetli olması geopolimerizasyonun iyi derecede gerçekleştiğini göstermektedir (Heikal ve ark. 2014).

Isıl işlem süresinin bağ yapısına etkisi incelendiğinde genel olarak sürenin 6 saatten 15 saate artırılmasıyla Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde azalma gözlenirken Si-O gerilme titreşimleri ve Al-O-Si simetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanan piklerin şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Başlangıçta uçucu külde bulunan silisyumun, alüminosilikat jelin yapısına katılmadan alüminyum ve oksijen ile farklı bağlar kurarak Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde azalmaya neden olabileceği düşünülmektedir. Isıl işlem süresi 24 saate arttırıldığında ise alüminosilikat jel oluşumunda ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde artış görülmüştür.

Isıl işlem sıcaklığının numunelerin bağ yapısı üzerine etkisi incelendiğinde, alkali çözelti olarak sodyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimer numunelerinde sıcaklığın 40°C'tan 80°C'a artışta alüminosilikat jel oluşumunda ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Bunun yanında Al-O-Si gerilme titreşimlerinin şiddetleri azalmaktadır. Sıcaklığın 120°C'a arttırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde azalma görülmüştür.

Alkali çözelti olarak potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan geopolimer numunelerinde ise ısıtma işlem sıcaklığının artırılması ile Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde azalma görülmüştür. Sıcaklığın artırılması ile ortamdaki su buharının uzaklaşmasına bağlı olarak OH<sup>-</sup> derişiminin artması ve polikondenzasyonun engellenmesi alüminosilikat jel oluşumunu önleyebilir.

Derişimin geopolimerlerin bağ yapısına etkisi incelendiğinde, artan derişimle birlikte geopolimerlerin parmak izi olan Al-O ve Si-O bağlantılarının asimetrik gerilme titreşimlerinin şiddetlerinde ve Al-O ve Si-O bağlantılarının düzlem içi açılı bükülme titreşimlerinin şiddetlerinde azalma gözlenmektedir. Bunun nedeninin OH<sup>-</sup> derişiminin artmasıyla polikondenzasyonun engellenmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir (Somna ve ark. 2011).

X-Işını kırınım spektrometre analizleri sonucunda geopolimerlerin spektrumlarında özlenen en önemli özellik merkezi yaklaşık 27-29° 2 $\theta$ 'da olup 18-36° 2 $\theta$ 'da bulunan 'özelliiksiz/niteliiksiz tümsek oluşumudur (Duxon ve ark. 2007b; He ve ark. 2012). XRD spektrumlarında geopolimerlerin yapılarında 18-36° aralığında gözlenen tümseğin, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen geopolimerin yapılarında da oluştuğu görülmektedir. Tümseklerin genişliğinin, geopolimerizasyon derecesinin büyüklüğünü ve oluşan geopolimer bağlayıcının saflığını gösterdiği belirtilmektedir (He ve ark. 2012). Numunelerin spektrumları incelendiğinde, oluşan tümseğin genel olarak 15-36° 2 $\theta$  aralığında oluştuğu görülmüştür. Tümseklerin geniş olması dolayısıyla geopolimerizasyonun iyi derecede gerçekleştiği gözlenmiştir.

Elde edilen spektrumlarda numunelerin hepsinde kristal yapının kuvarz ve mullitten oluştuğu gözlenmektedir. Geopolimerlerin yapılarının amorf olduğu ve beklendiği gibi yeni kristallerin oluşmadığı görülmüştür (Xu ve van Deventer 2000). Alkali aktivasyon reaksiyonları ile uçucu külde bulunan amorf ve kristal fazların yapılarında belirgin değişiklik olmamıştır (Rattanasak ve Chindaprasirt 2009; Marjanović ve ark. 2014).

Numunelerin spektrumlarında kuvarza ait piklerin şiddetlerinde az miktarda artma veya azalma gözlenmektedir. Piklerin şiddetindeki değişiklik, kuvarzın bazı numunelerde daha çok çözünmesinden kaynaklanmaktadır (Cristelo ve ark. 2012). Bazı numunelerin spektrumlarında ise oluşan tümseğin konikleştiği gözlenmiştir. Konikleşmenin nedeni ise uçucu külün yavaş çözünmesinden kaynaklanmaktadır (Criado ve ark. 2007).

Geopolimer numunelerinin spektrumlarında genel olarak ısıtma işlem süresinin arttırılması ile 26-27°'de görülen kuvarz pikinin şiddetinde çok az oranda bir azalma gözlenmiştir. Isıtma işlem sıcaklığının arttırılması ile geopolimerik yapıda gözlenen tümseğin büyüklüğü düşük oranda artmıştır. Geopolimerlerin hazırlanmasında kullanılan sodyum hidroksit ve potasyum hidroksitin numunelerin kristal yapılarına etkileri incelendiğinde oluşan kristallerde ve şiddetlerinde bir farklılık olmadığı ancak potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin spektrumlarında geopolimerlerin yapılarında gözlenen tümseğin yüksekliğinin daha fazla olduğu gözlenmiştir.

4M, 8M ve 12M derişimlerde sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde elde edilen geopolimer numunelerinin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu kullanılarak araştırılmıştır.

Bazı numunelerin görüntülerinde yapılarda küçük çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Bu çatlaklar, analizlerden önce numunelere uygulanan basınç dayanımı testlerinde yüklemelerden veya SEM analizleri için örnek alımı esnasında oluşabilir.

Derişimleri ve ısıtma işlem sıcaklıkları farklı olan ve 6, 15 ve 24 saat sürelerde ısıtma işlem gören numunelerin yapıları incelendiğinde, sürenin artması numunelerde oluşan jel fazının arttığı ancak yapıda gözeneklerin sayısının da arttığı gözlenmiştir. Isıtma işlem sıcaklığının etkisi incelendiğinde sıcaklığın artması ile geopolimer jeli oluşumunun arttığı görülmüştür. Jel fazın üzerinde gözlenen kalıntı oluşumunun da arttığı gözlenmiştir. Sıcaklığın arttırılması ile yapıda oluşan gözeneklerin sayısı artmıştır. Gözenek oluşumu yüksek sıcaklıkta suyun daha fazla buharlaşmasından kaynaklanmaktadır (He ve ark. 2012). Çukurlukların ise,

reaksiyona girmemiş uçucu kül taneciklerinin kırılan diğer yüzeyde kalmasıyla oluştuğu düşünülmektedir (He ve ark. 2012).

Geopolimer numunelerinin bazılarının yapılarında sodyumdan oluşan çökelek oluştuğu gözlenmiştir. He ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada derişimin yüksek olmasına bağılı olarak kür işleminde suyun buharlaşmasının ardından reaksiyona girmeyen sodyum hidroksitin çökelek oluşturabileceğı belirtilmiştir (He ve ark. 2012). Bazı numunelerde ise oluşan kalıntılar, numune hazırlanması esnasında uçucu kül içindeki jel oluşturmak üzere çözünen kısımların hidratasyon ürünlerinin yüzeyinin üzerine çökmesinden kaynaklanabilir (Bakharev 2005). Numunelerin yapısında jel fazın ve uçucu kül tanelerinin üzerinde oluşan çökelek ve kalıntıların ısıtma işlem sıcaklığının ve süresinin yüksek olmasından dolayı suyun buharlaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Alkali derişiminin geopolimer numunelerin özellikleri üzerine etkisi incelendiğinde Somna ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada derişimin artması ile çözünmenin arttığı belirtilmiştir (Somna ve ark. 2011). Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlarda alkali derişiminin artması ile reaksiyona girmeden kalan uçucu kül tanelerinin azaldığı ve geopolimerik jel yapısının daha homojen olduğu gözlenmiştir.

Geopolimer eldesinde kullanılan bazı uçucu küller bileşimlerinden ve/veya boyutlarından dolayı diğer kül tanelerinden daha önce reaksiyona girdiklerinden geopolimer numuneleri homojen yapıya sahip değildirler (Cristelo ve ark. 2012). Jel içinde oluşan faz düzensizlikler, uçucu külden bulunan elementlerin farklı hızlarda çözünmesinden kaynaklanabilir. Jel oluşumunun başlangıcında viskozite çok hızlı şekilde artar, dolayısıyla oluşan jel, homojenleşme işlemini engeller. Bundan dolayı jel oluşumundan sonra çözünen elementler lokal olarak reaksiyona girerler (Sidhunata ve ark. 2006).

Deneyler sonucunda elde edilen numunelerin taramalı elektron mikroskop görüntülerinde reaksiyona girmeden yapıda kalan uçucu kül taneleri gözlenmiştir. Bazı uçucu küllerin ise tamamen jel fazı ile kaplanmadığı görülmüştür (Bakharev, 2005b; Sidhunata ve ark. 2006; Rattanasak ve

Chindaprasirt 2009; He ve ark. 2012; Marjanović ve ark. 2014 ). Taramalı Elektron Mikroskobu ile yapılan analizlerde uçucu küllü geopolimerlerin mikroyapıları jel ile bağlanmış kül kompoziti olarak tanımlanabilir (Duxon ve ark. 2007b).

Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanılarak hazırlanan numunelerin mikroyapıları karşılaştırıldığında, potasyum hidroksit kullanılan numunelerde geopolimerik jel yapısının daha çok olduğu gözlenmiştir. Reaksiyona girmeden kalan uçucu kül tanelerinin daha küçük ve sayılarının daha az olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen numunelerin mikroyapı analizleri sonucunda geopolimerizasyonun başarı ile gerçekleştirildiği belirlenmiştir. Basınç dayanımı testleri sonucunda ise bazı sıcaklık ve sürelerde yüksek dayanımlar elde edildiği görülmüştür. Bu koşullarda elde edilen geopolimerler, betona alternatif malzemeler olarak önerilebilir.

İleriki çalışmalarda uçucu külün geopolimerlere dönüşümünün tam olarak gerçekleştirilebilmesi amacıyla hamur hazırlanması esnasında hammaddedeki alüminosilikatların tam çözünmesi için yeterli karışım sağlanmalıdır. Bu amaçla etkin bir karıştırıcı seçilebilir ve karışım süresi arttırılabilir. Ayrıca uçucu küllerin kullanılmadan önce öğütülmesi denenebilir.

Geopolimerlerin üretimleri esnasında kullanılan alkali aktifleştirici çözeltilerde farklı alkali çözelti/sodyum silikat oranları ve alkali çözelti/hammadde oranları denenebilir. Hammadde olarak uçucu kül yerine doğal kaynaklı malzemeler, farklı atık malzeme veya yan ürünler kullanılarak değerlendirilmeleri sağlanabilir.

Geopolimer teknolojisi, yeni bir alan olduğundan gün geçtikçe yeni kullanım alanları keşfedilmektedir. Sentez koşulları ve kullanılan hammaddeler, alkali aktifleştirici/hammadde oranları denenerek geopolimerlerin köpük üretimi, adsorban ve katalizör olarak kullanılmaları araştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Ahmaruzzaman M. (2010), “A review on the utilization of fly ash”, *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**, 327-363.
- Al-Degs Y., Ghir A., Khoury H., Walker M.G., Sunjuk M. ve Al- Ghouti A.M. (2014), “Characterization and utilization of fly ash of heavy fuel oil generated in power stations”, *Fuel Processing Technology*, **123**, 41-46.
- Alvarez-Ayuso E., Querol X., Plana F., Alastuey A., Moreno N., Izquierdo M., Font O., Moreno T., Diez S. ve Vazquez E. ve Barra M. (2008), “Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes”, *Journal of Hazardous Materials*, **154**, 175-183.
- Andini S., Cioffi R., Colangelo F., Grieco T., Montagnaro F. Ve Santoro (2008), “Coal fly ash a raw material for the manufacture of geopolymer-based products”, *Waste Management*, **28**, 416-423.
- Aruntaş H. (2006), “Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 21 (1), 193-203.
- ASTM C:618-12a Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use in Concrete
- Bakharev T. (2006), “Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing”, *Cement and Concrete Research*, **36**, 1134-1147.
- Bakharev T. (2005), “Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing”, *Cement and Concrete Research*, **35**, 1224-1232.
- Bakri A.M.A., Kamarudin H., Bnhussain M., Nizar I.K., Rafiza A.R. ve Zarina Y. (2011), “Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based green polymeric cement”, *Journal of Engineering and Technology Research*, **3(2)**, 44-49.

- Chindaprasirt P., Jaturapitakkul C., Chalee W., Rattanasak U. (2009), “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers”, *Waste Management*, **29**, 539-543.
- Chindaprasirt P., Chareerata T., Sirivivatnanon V. (2007), “Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer”, *Cement and Concrete Composites*, **29**, 224-229.
- Cilla M.S., Colombo P. ve Morelli M.R. (2014), “Geopolymer foams by gelcasting”, *Ceramics International*, **40**, 5723-5730.
- Criado M., Fernández-Jimenez A., Sobrados I., Palomo A., Sanz J. (2012), “Effect of relative humidity on the reaction products of alkali activated fly ash”, *Journal of the European Ceramic Society*, **32**, 2799-2807.
- Cristelo N., Glendinning S., Fernandes L., Pinto A.T. (2012), “Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation”, *Construction and Building Materials*, **29**, 167-174.
- Davidovits J. (2008), *Geopolymer Chemistry & Applications*, Institut Géopolymère, Saint – Quentin, France.
- Diaz E.I., Allouche E.N. ve Eklund S. (2010), “Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers”, *Fuel*, **89**, 992-996.
- Duxon P., Provis J.L., Lukey G.C. ve van Deventer J.S.J. (2007a), “The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete”, *Cement and Concrete Research*, **37**, 1590-1597.
- Duxon P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A. ve van Deventer J.S.J. (2007b), “Geopolymer technology: The current state of the art”, *Journal of Materials Science*, **42**, 2917-293.
- Duxon P., van Deventer J.S.J. ve Provis J.L. (2008), “Commercialisation of geopolymer concrete in Australia: From market push to market pull”, *Global Roadmap for Ceramics ICC2 Proceedings* (Ed:Bellosi A., Babini G.N.), Institute of Science and Technology for Ceramics, National Research Council, Verona, Italy, 713-721.

- Fang Y ve Kayali O. (2013), “The fate of water in fly ash-based geopolymers”, *Construction and Building Materials*, **39**, 89-94.
- Fernández-Jimenez A. ve Palomo A. (2005), “Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure”, *Microporous and Mesoporous Materials*, **86**, 207-214.
- Fernández-Jimenez A., Torre de la A.G., Palomo A., López-Olmo G., Alonso M.M. ve Aranda M.A.G. (2006), “Quantitative determination phases in the alkali activation of fly ash. Part I. Potential ash reactivity”, *Fuel*, **85**, 625-634.
- Fernández Pereira C., Luna Y., Querol X., Antenucci D. ve Vale J. (2009), “Waste stabilization/solidification of an electric arc furnace dust using fly ash-based geopolymers”, *Fuel*, **88**, 1185-1193.
- Ferone C., Roviello G., Colangelo F., Cioffi R. ve Tarallo O. (2013), “Novel hybrid organic-geopolymer materials”, *Applied Clay Science*, **73**, 42-50.
- Font O., Moreno N., Querol X., Izquierdo M., Alvarez E., Diez S., Elvira J., Antenucci D., Nugteren H., Plana F., López A., Coca P. ve Peña F.G. (2010), “X-ray powder diffraction-based method for the determination of the glass content and mineralogy of coal (co)- combustion fly ashes”, *Fuel*, **89**, 2971-2976.
- Görhan G., Kahraman E., Başpınar M.S. ve Demir İ. (2009), “Uçucu kül bölüm II: Kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikler”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **5 (2)**, 33-42.
- Güler G., Güler E., İpekoğlu Ü. ve Mordoğan H. (2005), “Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları”, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, İzmir, 419-423.
- Gündüz T.(1999), *Aletli Analiz*, Gazi Büro Kitabevi Tic. Ltd., Ankara.
- Gürsel A.P. ve Meral Ç., “Türkiye’de Çimento üretiminin Karşılaştırmalı Yaşam Döngüsü Analizi”, 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Urla-İzmir, 13 – 16 Eylül 2012

- Hajimohammadi A., Provis L.J., van Deventer S.J.J. (2011), "The effect of silica availability on the mechanism of geopolymerisation", *Cement and Concrete Research*, **41**, 210-216.
- Hanjitsuwan S., Hunpratub S., Thongbai P., Maensiri S., Sata V., Chindaprasirt P. (2014), "Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium fly ash geopolymer paste", *Cement & Concrete Composites*, **45**, 9-14.
- He J., Zhang J., Yu, Y. ve Zhang G. (2012), "The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study", *Construction and Building Materials*, **30**, 80-91.
- Heikal M., Nassar M.Y., El-Sayed G., Ibrahim S.M. (2014), "Physico-chemical, mechanical, microstructure and durability characteristics of alkali activated Egyptian slag", *Construction and Building Materials*, **69**, 60-72.
- Izquierdo M, Querol X., Davidovits J., Antenucci D., Nugteren H., Fernandez-Pereira C. (2009), "Coal fly ash-slag-based geopolymers: microstructure and metal leaching", *Journal of Hazardous Materials*, **166**, 561-566.
- Jumrat S., Chatveera B., Rattanadecho P. (2011), "Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **38**, 242-248.
- Jun Y., Oh E.J. (2014), "Mechanical and microstructural dissimilarities in alkali-activation for six Class F Korean fly ashes", *Construction and Building Materials*, **52**, 396-403.
- Khale D. ve Chaudhary R. (2007), "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review", *Journal of Materials Science*, **42**, 729-746.
- Komljenović M., Bašćarević Z., Bradić V. (2010), "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers", *Journal of Hazardous Materials*, **181**, 35-42.

- Komnitsas K. (2011), "Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities", *Procedia Engineering*, **21**, 1023-1032.
- Kong L.Y.D., Sanjayan G.J., Sagoe-Crentsil K. (2007), "Comparative performance of geopolymer made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures", *Cement And Concrete Research*, **37**, 1583-1589.
- Lee W.K.W., Van Deventer J.S.J. (2002), "Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **211**, 49-66.
- Li L., Fan M., Brown C.R., Koziel J.A., Van Leeuwen J. (2009), "Production of a new wastewater treatment coagulant from fly ash with concomitant flue gas scrubbing", *Journal of Hazardous Materials*, **162**, 1430-1437.
- Li L., Wang S., Zhang Z. (2006), "Geopolymeric adsorbent from fly ash for dye removal from aqueous solution", *Journal of Colloid and Interface Science*, **300**, 52-59.
- Lyu S., Hsiao Y., Wang T., Cheng T. ve Ueng T. (2013a), "Microstructure of geopolymer accounting for associated mechanical characteristics under various stress states", *Cement and Concrete Research*, **54**, 199-207.
- Lyu S., Wang T., Cheng T. ve Ueng T. (2013b), "Main factors affecting mechanical characteristics of geopolymer revealed by experimental design and associated statistical analysis", *Construction and Building Materials*, **43**, 589-597.
- Ma Y., Hu J., Ye G. (2013), "The pore structure and permeability of alkali activated fly ash", *Fuel*, **104**, 771-780.
- MacKenzie J.D.K. (2008), "Science of geopolymers: State of the art and possible future developments", *Global Roadmap for Ceramics ICC2 Proceedings* (Ed:Bellosi A., Babini G.N.), Institute of Science and Technology for Ceramics, National Research Council, Italy, 703-711.
- Marjanović N., Komljenović M., Bašćarević Z., Nikolić V. (2014), "Improving reactivity of fly ash and properties of ensuing geopolymers through

- mechanical activation”, *Construction and Building Materials*, **57**, 151-162.
- Nath S.K. ve Kumar S. (2013), “Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer”, *Construction and Building Materials*, **38**, 924-930.
- Oh E.J., Jun Y., Jeong Y. (2014), “Characterization of geopolymers from compositionally and physically different Class F fly ashes”, *Cement & Concrete Composites*, **50**, 16-26
- Ohno M. ve Li V. (2014), “A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites”, *Construction and Building Materials*, **57**, 163-168.
- Palomo A., Blanco-Varela M.T., Granizo M.L., Puertas F., Vazquez T. ve Grutzeck M.W. (1999), “Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin”, *Cement and Concrete Research*, **29**, 997-1004.
- Phair J.W. ve Van Deventer J.S.J. (2002), “Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers”, *International Journal of Mineral Processing*, **66**, 121-143.
- Phoo-ngernkham T., Chindaprasirt P., Sata V., Hanjitsuwan S. ve Hatanaka S. (2014), “The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature”, *Materials and Design*, **55**, 58-65.
- Ranjbar N., Mehrali M., Alengaram U.J., Metselaar H.S.C., Jumaat M.Z. (2014a), “Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures”, *Construction and Building Materials*, **65**, 114-121.
- Ranjbar N., Mehrali M., Behnia A., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. (2014b), “Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar”, *Materials and Design*, **59**, 532-539.
- Rattanasak U. ve Chindaprasirt P. (2009), “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer”, *Minerals Engineering*, **22**, 1073-1078.

- Rickard A.D.W., Temuujin J., van Riessen A. (2012), "Thermal analysis of geopolymer pastes synthesised from five fly ashes of variable composition", *Journal of Non-Crystalline Solids*, **358**, 1830-1839.
- Rovnanik P. (2010), "Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer", *Construction and Building Materials*, **24**, 1176-1183.
- Ruiz- Santaquiteria C., Skibsted J., Fernández-Jimenez A. ve Palomo A. (2012), "Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates", *Cement and Concrete Research*, **42**, 1242-1251.
- Ryu S.G., Lee Y.B., Koh K.T. ve Chung Y.S. (2013), "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators", *Construction and Building Materials*, **47**, 409-418.
- Sabah E. ve Çelik M.S., (2002), "Interaction of pyridine derivatives with sepiolite", *Journal of Colloid and Interface Science*, 251, 33-38.
- Sagoe-Crentsil K. ve Weng L. (2007)a, "Dissolution process, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I-Low Si/Al ratio systems", *Journal of Materials Science*, **42**, 2997-3006.
- Sagoe-Crentsil K. ve Weng L. (2007)b, "Dissolution process, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part II-High Si/Al ratio systems", *Journal of Materials Science*, **42**, 3007-3014.
- Sarker K.P. (2009), "Analysis of geopolymer concrete columns", *Materials and Structures*, **42**, 715-724.
- Sathonsaowaphak A., Chindaprasirt P., Pimraksa K. (2009), 'Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar', *Journal of Hazardous Materials*, **168**, 44-50.
- Sazama P., Bortnovsky O., Dědeček J., Tvarůžková Z., Sobalík Z. (2011), "Geopolymer based catalysts-New group of catalytic materials", *Catalysis Today*, **164**, 92-99.

- Sidhunata, van Deventer J.S.J., Lukey G.C., Xu H. (2006), "Effect of curing temperature and silicate concentration on fly ash-based geopolymerization", *Industrial&Engineering Chemistry Research*, **45**, 3559-3568.
- Silva P.D. ve Sagoe-Crentsil K. (2008), "Medium-term phase stability of  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  geopolymer systems", *Cement and Concrete Research*, **38**, 870-876.
- Somna K., Jaturapitakkul C., Kajitvichyanukul P. ve Chindaprasirt P. (2011), "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature", *Fuel*, **90**, 2118-2124.
- Sukmak P., Horpibulsuk S., Shen S., Chindaprasirt P. ve Suksiripattanapong C. (2013), "Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer", *Construction and Building Materials*, **47**, 1125-1136.
- Sun T., Chen J., Lei X. ve Zhou C. (2014), "Detoxification and immobilization of chromite ore processing residue with metakaolin-based geopolymer", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2**, 304-309.
- Sun P. ve Wu H. (2013), "Chemical and freeze-thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars", *Fuel*, **111**, 740-745.
- Swanepoel J.C. ve Strydom C.A. (2002), "Utilisation of fly ash in a geopolymeric material", *Applied Geochemistry*, **17**, 1143-1148.
- Takeda H., Hashimoto S., Honda S. ve Iwamoto Y. (2014), "The coloring of geopolymers by the addition of copper compounds", *Ceramics International*, **40**, 6503-6507.
- Temuujin J., van Riessen A., MacKenzie K.J.D. (2010a), "Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars", *Construction and Building Materials*, **24**, 1906-1910.
- Temuujin J., Minjigmaa A., Rickard W., Lee M, Williams I., Van Riessen A. (2010b), "Fly ash based geopolymer thin coatings on metal substrates and its thermal evaluation", *Journal of Hazardous Materials*, **180**, 748-752.

- Temuujin J., Williams R.P., Van Reissen A. (2009), “effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature”, *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 5276-5280.
- Torgal F.P. ve Jalali S. (2011), *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Springer, London, England.
- Tursun M., Keşan G., Parlak C. Ve Şenyel M. (2013), “Vibrational spectroscopic investigation and conformational analysis of 1-heptylamine: A comparative density functional study”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **114**, 668-680.
- Türker P., Erdoğan B., Katnaş F. ve Yeğınobalı A. (2009), *Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri*, Fersa Matbaacılık, Ankara.
- van Deventer J.S.J., Provis J.L., Duxon P. ve Lukey G.C. (2007), “Reaction mechanism in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products”, *Journal of Hazardous Materials*, **139**, 56-513. b
- van Deventer J.S.J., Provis J.L. ve Duxon P. (2012), “Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement”, *Minerals Engineering*, **29**, 89-104.
- van der Merwe E.M., Prinsloo L.C., Mathebula C.L., Swart H.C., Coetsee E., Doucet F.J. (2014), “Surface and bulk characterization of an ultrafine South African coal fly ash with reference to polymer applications”, *Applied Surface Science*, **317**, 73-83.
- van Jaarsveld J.G.S., van Deventer J.S.J., Lukey G.C. (2002), “The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers”, *Chemical Engineering Journal*, **89**, 63-73.
- Vargas S.A., Dal Molin C.C.D., Vilela C.F.A., de Silva F.J., Pavao B., Veit H. (2011), “The effects of Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers”, *Cement & Concrete Composites*, **32**, 653-660.

- Vijai K., Kumutha R., Vishnuram B.G. (2010), "Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete", *International Journal of the Physical Sciences*, **50**, 1419-1423.
- Yang K., Seo E. Ve Tae S. (2014), "Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake of concrete", *Environmental Impact Assessment Review*, **46**, 43-52.
- Weil M., Jeske U., Dombrowski K. ve Buchwald A. (2007), "Sustainable design of geopolymers-evaluation of raw materials by the integration of economic and environmental aspects in the early phases of material development", *Advances in Life Cycle Engineering for Sustainable Manufacturing Businesses-Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering* (Ed: Takata S., Umeda Y.), Japan, 279-283.
- Williams R.P., Van Riessen A. (2010), "Determination of the reactive component of fly ashes for geopolymer production using XRF and XRD", *Fuel*, **89**, 3683-3692.
- Wongpa J., Kiattikomol K., Jaturapitakkul C., Chindaprasirt P. (2010), "Compressive strength, modulus of elasticity and water permeability of inorganic polymer concrete", *Materials and Design*, **31**, 4748-4754.
- Xu H. ve van Deventer J.S.J. (2000), "The geopolimerisation of alumino-silicate minerals", *International Journal of Mineral Processing*, **59**, 427-266.
- Xu H. ve Van Deventer J.S.J. (2002), "Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolenite/stilbite mixtures using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX and HREM", *Cement and Concrete Research*, **32**, 1705-1716.
- Zaharaki D., Komnitsas K. ve Perdikatsis V. (2010), "Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition", *Journal of Material Science*, **45**, 2715-2724.
- Zhang Z., Provis J.L., Reid A. ve Wang H. (2014), "Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction", *Construction and Building Materials*, **56**, 113-127.