



VİTRİFİYE SEKTÖRÜ FIRIN ATIKLARININ METAL DÖKÜM SEKTÖRÜ İÇİN MULLİT
VE KORDİYERİT MULLİT FİLTRE ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Eray ÇAŞIN

Doktora Tezi

Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs - 2019

VİTRİFİYE SEKTÖRÜ FIRIN ATIKLARININ METAL DÖKÜM SEKTÖRÜ İÇİN MULLİT
VE KORDİYERİT MULLİT FİLTRE ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Eray ÇAŞIN

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. İskender IŞIK

Mayıs - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Eray ÇAŞIN'ın DOKTORA tezi olarak hazırladığı "VİTRİFİYE SEKTÖRÜ FIRIN ATIKLARININ METAL DÖKÜM SEKTÖRÜ İÇİN MULLİT VE KORDİYERİT MULLİT FİLTRE ÜRETİMİNDE KULLANIMI" başlıklı bu çalışma, jürimizce Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

02/05/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

.....

Prof. Dr. İskender IŞIK
Anabilim Dalı Başkanı, Seramik Anabilim Dalı

.....

Prof. Dr. İskender IŞIK (Danışman)
Danışman, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı

.....

Sınav Komitesi Üyeleri

Prof. Dr. İskender IŞIK
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Alpagut KARA
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Hüseyin Özkan TOPLAN
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Veli UZ
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Mustafa TUNCER
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

.....

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 15 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.



Prof. Dr. İskender IŞIK



Eray ÇAŞIN

VİTRİFİYE SEKTÖRÜ FIRIN ATIKLARININ METAL DÖKÜM SEKTÖRÜ İÇİN MULLİT VE KORDİYERİT MULLİT FİLTRE ÜRETİMİNDE KULLANIMI

Eray ÇAŞIN

Seramik Mühendisliği, Doktora Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İskender IŞIK

ÖZET

Bu araştırmada, seramik sağlık gereçleri sinterleme fırını atıkları ile kordiyerit mullit metal döküm filtresi yapılabirliği araştırılmıştır. Küresel ve lamel grafit dökme demir üretimi yapan firmalarda kullanılan kordiyerit mullit filtreler alternatif ürün üretimi yapılmıştır. Araştırmada kullanılan atık malzemeler Ece Banyo A.Ş. üretim tesisinde kullanılan tünel ve roller tip fırınlara ait atıklardır. Bu atıklar 250 mikron altında öğütülmüştür. Hazırlanan atıklar ve diğer hammaddelerin XRF sonuçları tespit edilerek 10 farklı reçete seger çalışması yapılmıştır. Seger çalışmaları Çin Halk Cumhuriyeti'nden temin edilen filtre baz alınarak yapılmıştır. Plaka ve rulo atıkları farklı oranlarda reçete içerisinde kullanılmıştır. Hazırlanan reçeteler 1230 °C, 1250 °C, 1270 °C ve 1290 °C'de sinterlenmiştir. Reçete denemelerinin karakterizasyon analizleri Çin filtresi ile karşılaştırılmıştır. Denemeler sonucunda 9 numaralı reçetenin 1250 °C'de sinterlendiği durumda Çin filtresine en yakın özelliklere sahip filtre reçetesi olduğu tespit edilmiştir. 9 numaralı reçete malzemeleri hazırlanıp köpük ve bal peteği filtre üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen mullit kordiyerit tabanlı bal peteği filtre ile metal döküm sektöründe 1386 °C'de döküm denemesi yapılmış ve filtre başarılı bir performans göstermiştir. Sonuç olarak, söz konusu atıklardan mullit kordiyerit filtre yapımı laboratuvar ölçeğinde üretilmiş olup, sektörde hali hazırda kullanılan filtreler göre kimyasal bileşim ve faz içeriği bakımından aynı, performans bakımından benzer özellikler gösterdiği, piyasada satılan eşdeğerlerine göre yaklaşık %80 oranında üretim maliyetlerini azalttığı ve çevre dostu olduğu saptanmıştır. Yapılan bu filtrenin seri üretiminin yapılabilmesi ve pazarda yerini alabilmesi için gerekenler önerilerde maddeler halinde belirtilmiştir. Ayrıca bu araştırmada; seramik sağlık gereçleri sektöründe sürekli oluşan bu atıkların katma değerli ürün(ler)e dönüşümü ve ithal malzeme yerine ikame edilecek yerli ve milli ürün yapılabirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atık geri kazanımı, geri dönüşüm uygulamaları, kordiyerit, metal döküm filtresi, mullit.

USAGE OF MULLITE AND CORDIERITE MULLITE FILTER MADE WITH SANITARYWARE KILN WASTES FOR METAL CASTING INDUSTRY

Eray ÇAŞIN

Ceramic Engineering, Doctorate Thesis, 2019

Thesis Supervisor: Prof. Dr. İskender Işık

SUMMARY

In this research; the feasibility of cordierite mullite based metal casting filters made from sanitary ware kiln waste additives was studied. An alternative product was manufactured towards cordierite mullite filters used in spherical and lamellar graphite cast iron production companies. The waste utilized in this research was from Ece Banyo Company's tunnel & roller kiln refractory wastes. The wastes were grinded under 250 microns. On the bases of XRF results of the wastes and other selected raw materials, 10 different prescriptions were made according to Seger based on the filter of commercially available equivalences in the market from Republic of China. Plate and roller wastes were used with different amounts in the prescriptions. The prepared prescriptions were sintered at 1230 °C, 1250 °C, 1270 °C and 1290 °C. The characterization of prescriptions were compared with the commercial China filter's analyses. According to the test results, prescription 9 sintered at 1250 °C was determined to have nearly similar properties with respect to China's filter. The 9th prescription materials have been prepared to manufacture mullite cordierite based filter. The produced mullite cordierite based honeycomb filter was tested in a metal casting factory with casting temperature at 1386 °C and performed a successful performance. As a result, it was determined that mullite cordierite based filters manufactured with wastes in laboratory scale has similar chemical composition and phase content to the filters already used in market. It showed about similar performance with respect to the commercially available one. Moreover, the prepared filter decreased the manufacturing costs (approximately 80%) compared to commercially equivalents available in the market and was environmentally friendly. In order to make mass production of this filter and take its place in the market, the needy requirements are stated in the recommendations. In addition to above stated advantages, the conversion of these wastes into value added product such as in this research indicating the feasibility of taking advantages by manufacturing replaced product instead of exported one.

Keywords: Cordierite, metal casting filters, mullite, recycling applications, waste recycling

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde ilgi, bilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım tez danışmanım Prof. Dr. İskender IŞIK'a içtenlikle teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

“TÜBİTAK TEYDEB 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri” kapsamında yapılan bu çalışmada, laboratuvar denemelerinin yapılabilmesi için Ar-Ge Merkezi laboratuvarlarını kullanıma sunan, üretimden çıkan fırın atıklarının kullanılmasına izin veren ve çalışmayı maddi olarak destekleyen başta Ece Holding Yönetim Kurulu Başkanı Erdem ÇENESİZ ve Ece Banyo Ar-Ge Merkezi çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın yapılmasında sektör tecrübelerinden ve konu ile ilgili teknik bilgilerinden yararlandığım Ece Banyo Ar-Ge Merkezi Eski Müdürü Mustafa YAMAN'a, literatür araştırmalarında verdiği yardımlardan ötürü çalışma arkadaşım Merve ÖZCAN'a, sinterleme çalışmalarında vermiş olduğu yardımlardan dolayı Meliha KÜÇÜKBENLİ'ye ve deneme reçetelerinin hazırlanması ve şekillendirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Mustafa ARAT ve Emre ÇINAR'a teşekkür ederim.

Karakterizasyon analizlerinin yapılmasında yardımcı olan, analizlerin yorumlanmasında ve detaylandırılmasında yardımda bulunan Seramik Araştırma Merkezi Ar-Ge ve Teknoloji Geliştirme Müdürü Sn. Pervin GENÇOĞLU'na, Uzman Eda ATAN'a, seramik teknikerleri Mustafa ÇOBANCI ve Orhan ÇETİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Akademik hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen babam Mehmet Turgut ÇAŞIN'a ve annem Nesrin ÇAŞIN'a teşekkürlerimi sunarım. Manevi desteklerini yanımda hissettiğim kayınpederim İsmail Yaman KESİM'e, kayınvalidem Asuman Saadet KESİM'e ve kardeşim Onurcan KESİM'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımnda manevi desteğini esirgemeyen, iyi ve kötü günümde hayatım boyunca yanımda olan ve olacağını bildiğim, hayat arkadaşım, eşim Sabiha ÇAŞIN'a sonsuz sevgimi sunarım.

Doktora eğitimim boyunca birlikte bu yola başladığım, teknik olarak bana desteğini hiç esirgemeyen Ordu Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Seramik Bölümü Öğretim Üyesi Dr. Öğretim Üyesi Nihal DERİN COŞKUN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. KORDİYERİT VE MULLİT	10
2.1. Kordiyerit.....	10
2.1.1. Tanım	10
2.1.2. Kristal kafes yapısı	10
2.1.3. Faz yapısı.....	11
2.1.4. Kordiyerit malzemelerin özellikleri	13
2.1.5. Kullanım alanları	16
2.1.6. Kordiyerit üretimi.....	17
2.2. Mullit.....	19
2.2.1. Tanım	19
2.2.2. Kristal yapısı	19
2.2.3. Faz yapısı.....	22
2.2.4. Mullit malzemelerin özellikleri	23
2.2.5. Kullanım alanları.....	26
2.2.6. Mullit üretimi	26
3. ATIK YÖNETİMİ VE GERİ DÖNÜŞÜM.....	29
3.1. Tanım	29
3.2. Atıkların Geri Dönüşümü.....	30
3.3. Seramik Malzemelerde Geri Dönüşüm	32
3.4. Seramik Sektöründe Uygulanan Geri Dönüşüm Uygulamaları	34
4. METAL DÖKÜM PROSESİ VE SERAMİK FİLTRELER.....	37
4.1. Metal Dökümün Tarihi.....	38

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2. Metal Döküm Yöntemleri	40
4.2.1. Kum kalıp döküm yöntemi.....	40
4.2.2. Kabuk kalıplama	41
4.2.3. Alçı kalıp ile şekillendirme	42
4.2.4. Seramik kalıpla şekillendirme	42
4.2.5. Hassas döküm.....	42
4.2.6. Kokil döküm.....	43
4.2.7. Basınçlı döküm.....	43
4.2.8. Satrifüj döküm.....	44
4.2.9. Sıkıştırılmalı döküm	44
4.2.10. Vakum döküm	45
4.3. Metal Döküm Hataları.....	45
4.3.1. Dolum ile ilgili hatalar	46
4.4. Metal Filtrasyonu ve Seramik Metal Döküm Filtreleri.....	48
4.5. Metal Filtrasyon Prensibi	50
4.6. Kordiyerit ve Mullit Seramiklerle Yapılan Önceki Çalışmalar.....	53
4.6.1. Kordiyerit malzemeler ile yapılan çalışmalar.....	54
4.6.2. Mullit tabanlı malzemeler üzerine yapılan çalışmalar.....	58
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	62
5.1. Piyasa Filtresi Analizleri	63
5.1.1. Piyasa filtresinin kimyasal analizi	64
5.1.2. Piyasa filtresinin mineralojik analizi	65
5.1.3. Piyasa filtresinin mikro yapı analizi	67
5.2. Reçete Çalışmaları	71
5.2.1. Fırın plaka analizleri.....	71
5.2.2. Fırın rulo analizleri.....	73
5.2.3. Reçete girdi malzemeleri.....	74
5.3. Reçete Denemeleri ve Analizleri	76
5.3.1. 1 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	81
5.3.2. 2 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	85
5.3.3. 3 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	89
5.3.4. 4 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	93
5.3.5. 5 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	97
5.3.6. 6 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	101
5.3.7. 7 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	105
5.3.8. 8 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	109

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.3.9. 9 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	112
5.3.10. 10 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları	116
5.4. Filtre Şekillendirme Çalışmaları	120
5.5. Filtre Numunelerin Kurutulması ve Sinterlenmesi	125
5.6. Metal Döküm Denemeleri.....	131
6. SONUÇLAR	138
KAYNAKLAR DİZİNİ	147
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Seramik malzemelerin üretim prosesi	2
1.2. Seramik Fırınların Refrakter Malzeme ile Kaplı Örneklendirmesi	5
1.3. Sinterleme aşamalarını gösteren tünel fırın tasarımı	7
1.4. Tünel fırın arabası	8
2.1. Düşük simetrik kordiyeritin kristal yapısı.....	11
2.2. MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ faz diyagramı	12
2.3. Egzoz sisteminde bulunan katalitik konvertörün makro yapısı.....	17
2.4. Mullit kristallerinin çubuğu yapısı	19
2.5. Mullit kristalinin kafes yapısı	20
2.6. Al-Si tetrahedra bağ yapısı.....	21
2.7. Oktahedral AlO ₆ atomlarının dizilimi	21
2.8. Al ₂ O ₃ – SiO ₂ faz diyagramı.....	22
4.1. Metal döküm işlemlerinde uygulanan teorik soğuma grafiği.....	38
4.2. Kum kalıp döküm için tipik kalıp tasarımı	41
4.3. Kabuk Kalıp tekniği ile metal şekillendirme.....	42
4.4. Hassas döküm prosesi	43
4.5. Santrifüj döküm kalıbı	44
4.6. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi	45
4.7. Soğuk kapatma hatası örneği	47
4.8. Eleme tipi filtrasyon.....	51
4.9. Kek filtrasyonu.....	52
4.10. Derin yatak filtrasyonu.....	52
5.1: Pingxiang nanxiang chemical packing co. ltd. şirketinden tedarik edilen kordiyerit mullit esaslı metal döküm filtresi.....	64
5.2. Bragg kanunu	66
5.3. Çin Halk Cumhuriyeti'nden filtrenin mineralojik analiz sonuçları.....	66
5.4. Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin SEM görüntüsü, çubuk ölçeği 100µ'dur.	68
5.5. Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin SEM görüntüsü, çubuk ölçeği 10µ'dur.	69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6. Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin SEM görüntüsü, çubuk ölçeği 2µ'dur.....	70
5.7. Optimal marka sinterleme fırın	72
5.8. Ece banyo üretim tesisinde tünel ve roller fırınlarda altlık olarak kullanılan fırın plakasının X ışını difraktometresi ile yapılan mineralojik analizi.....	73
5.9. Ece banyo gereçleri üretim tesisinde kullanılan roller fırın rulo malzemelerinin X ışınları difraktometresi ile yapılan mineralojik analizi.....	74
5.10. Hazırlanan reçetelerde kullanılan ingiliz kilinin mineralojik analizi.	75
5.11. Hazırlanan reçetelerde kullanılan bulgaristan kaoleninin mineralojik analizi.	76
5.12. Hazırlanan reçetelerde kullanılan fırın tuğlası mineralojik analizi.	76
5.13. Fırın atıklarının reçete denemeleri için hazırlanması (a: Sulu Öğütme, b: Eleme).	78
5.14. Hazırlanan başlangıç hammaddelerinin tartımı.....	78
5.15. Reçete deneme numunelerinin kızdırma kaybı hesaplamaları.	79
5.16. Reçete denemelerinin sinterlenmesi.....	81
5.17. Hazırlanan 1 Nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).	82
5.18. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	83
5.19. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	83
5.20. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	84
5.21. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	84
5.22. Hazırlanan 2 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).	86
5.23. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	87
5.24. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	87

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.25. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	88
5.26. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	88
5.27. Hazırlanan 3 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C)	90
5.28. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	91
5.29. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	91
5.30. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	92
5.31. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	92
5.32. Hazırlanan 4 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).	94
5.33. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	95
5.34. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	95
5.35. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır.)	96
5.36. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	96
5.37. Hazırlanan 5 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).	98
5.38. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır)	99
5.39. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	99

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.40. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	100
5.41. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	100
5.42. Hazırlanan 6 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C)	102
5.43. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	103
5.44. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	103
5.45. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	104
5.46. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	104
5.47. Hazırlanan 7 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C)	106
5.48. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	107
5.49. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	107
5.50. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	108
5.51. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	108
5.52. Hazırlanan 8 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C)	109
5.53. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	110
5.54. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	110

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.55. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	111
5.56. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	111
5.57. Hazırlanan 9 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).	113
5.58. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	114
5.59. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	114
5.60. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	115
5.61. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	115
5.62. Hazırlanan 10 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).	117
5.63. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	118
5.64. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	118
5.65. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	119
5.66. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).	119
5.67. Seramik metal döküm filtresi üretim akış şeması.	121
5.68. Optik dilatometre ile belirlenen 9 nolu reçetenin sinterleme davranışı grafiği.	122
5.69. Şekillendirme sonrası parçalanmış metil metakrilat katkılı köpük filtre.	124
5.70. Şekillendirme sonrası parçalanmış PEG 4000 katkılı köpük filtre.	125
5.71. Seramik bünyelerdeki su moleküllerinin konumu	126
5.72. Seramik bünyelerde sinterleme aşamaları ve boyun oluşumu.	127
5.73. Fırın sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan sıcaklık halkaları	131

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.74. Hazırlanan deneme kalıbının dökümden önceki kapatılmış şekli.....	132
5.75. Hazırlanan deneme kalıbı ve filtrenin kalıp içerisinde bulunduğu konum.....	133
5.76. Hazırlanan deneme kalıbının döküm yolluğu ve filtre konumu.....	133
5.77. Döküm denemesinde kullanılan metal eriyik aktarma potası.	134
5.78. Metal ergitme potası ve fırını.....	134
5.79. Kalıp kapatıldıktan sonra kalıbın içerisinde kalan deneme filtresi.	135
5.80. Döküm sonrası soğumaya bırakılan deneme kalıbı.....	135
5.81. Deneme kalıbının açılması.....	136
5.82. Bilyeli temizleme makinesi ile kalıntı kumların giderilmesi.	136
5.83. Deneme filtresi ve metalik malzemenin döküm yolluğu ile birlikte görülmesi.....	137

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Refrakter malzemelerin sınıflandırılması.....	6
2.1. MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ sisteminin fazlarının ismi ve formülleri.....	13
2.2. Kordiyerit malzemelerin young modülü ve eğilme dayanımları.....	15
2.3. Kordiyerit malzemelerin bazı mekanik özellikleri.....	15
2.4. Kordiyerit malzemelerin elektriksel özellikleri.....	16
2.5. Mullit seramiklerin tipik özellikleri	25
2.6. Mullitlerin elektriksel özellikleri.....	25
4.1. Filtrasyon İşleminin avantaj ve dezavantajları.....	50
5.1. Piyasada satılan (Çin Halk Cumhuriyeti) filtrenin XRF ile yapılan kimyasal analiz sonuçları.	64
5.2: Çizelge 5.1.'deki filtrenin seger analizi sonuçları.....	65
5.3. Fırın plaka kimyasal analizi.	72
5.4. Ece banyo üretim tesisinde kullanılan fırın rulo malzemesi kimyasal analizi.	73
5.5. Hazırlanan reçete malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları (sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).	75
5.6. Deneme reçeteleri seger hesaplamaları.	77
5.7. Deneme reçetelerinin 1230 °C'de ölçülen kızdırma kayıpları (%).	80
5.8. Hazırlanan 1 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).	81
5.9. Hazırlanan 2 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).	85
5.10. Hazırlanan 3 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	89
5.11. Hazırlanan 4 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	93
5.12. Hazırlanan 5 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	97
5.13. Hazırlanan 6 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	101
5.14. Hazırlanan 7 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	105

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
5.15. Hazırlanan 8 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	109
5.16. Hazırlanan 9 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	112
5.17. Hazırlanan 10 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).....	116
5.18. Ece banyo gereçlerinde kullanılan seramik sağlık gereçleri çamurlarının reolojik özellikleri.....	123
5.19. Şekillendirme çalışmalarında kullanılan bağlayıcılar ve bağlayıcının kimyasal içerikleri.	123
5.20. Sinterleme işleminin sıcaklığın yükselme aşamasında oluşan reaksiyonlar ve dikkat edilmesi gereken sıcaklık aralıkları	129
5.21. Sinterlemenin işleminin sıcaklığın düştüğü aşamada oluşan reaksiyonlar ve dikkat edilmesi gereken sıcaklık aralıkları	129
5.22. Laboratuar denemelerinin sinterleme sıcaklık aralık ve süreleri.....	130

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
A.Z.	Ateş Zaiyatı
AB	Avrupa Birliği
Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
CAD/CAM	Bilgisayar Destekli Tasarım / Bilgisayar Destekli Üretim
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Analizi
FFC	Fine Fire Clay Çamuru
MAS	MgO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂ Fazı
MOR	Kopma Modülü
PPİ	İnç Başına Düşen Gözenek Sayısı (Pores per Inches)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TEOS	Tetraetilortosilikat
TEYDEB	Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
VC	Vitreous China Çamuru
XRD	X – Işını Difraksiyonu
XRF	X – Işını Florasans
% a.	Ağırlıkça Yüzde

1. GİRİŞ

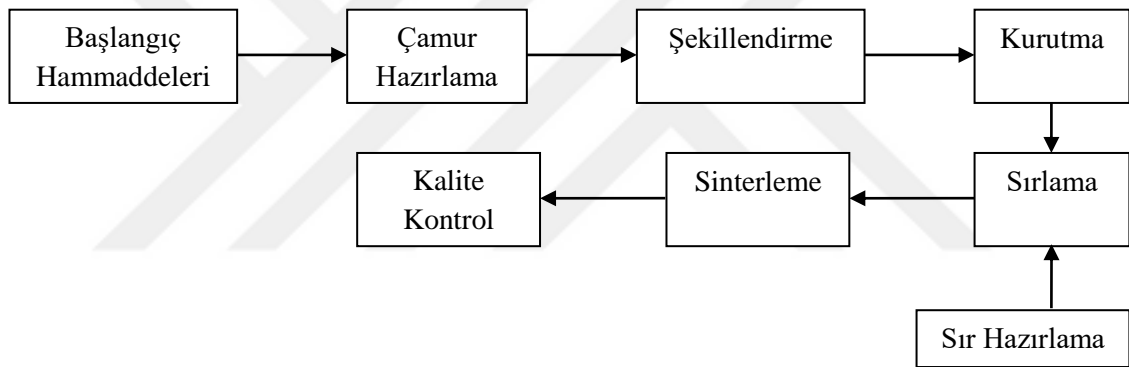
Dünyamızda son birkaç yüzyılda en çok araştırılan konu küreselleşmedir. Küreselleşme ile birlikte serbest ticaret ortaya çıkmış ve sanayileşme oranı artmıştır. 16. yüzyıldan itibaren başlayan hızlı nüfus artışı ve özellikle Avrupa'da köyden kente göçler, beraberinde 18. yüzyıl başlarında İngiltere'de ortaya çıkan ve tüm dünyaya yayılan sanayi devrimini getirmiştir. Sanayi devrimi ile birlikte gelişen üretim yöntemleri günümüzde 4. aşamasını geçirmektedir. Üretim proseslerinde kullanılan robotik sistemler ile üretim miktarları artmıştır. Üretim miktarları arttıkça yalın üretim tekniklerini uygulamayan firmalarda atık miktarları da artmıştır. Yalın üretime göre atık olarak kabul edilen aşırı üretim, aşırı işleme, üretimden doğan hatalar, işçilik hataları, aşırı depolama, taşıma, hareket ve üretimdeki gecikmeler her türden endüstriyel atık miktarlarını da arttırmaktadır (Veres vd., 2018).

Sanayi devriminden sonraki süreçlerde, endüstriyel atıkların insan sağlığına ve çevreye verdiği olumsuz etkiler atık yönetimi kavramını doğurmuştur. Atık; istenmeyen, reddedilen veya ömrünü tamamlamış malzemeler olarak adlandırılır (Dinçer, 2018). Hammadde olarak kullanılabilen endüstriyel atıkların ekonomiye entegrasyonu, ikincil hammadde olarak atık kullanımını teşvik etmiştir. Özellikle ikincil hammadde kullanımının teşviki için firmalar arası bağlantıların desteklenmesi, bilgi alışverişi yoluyla uyumunun iyileştirilmesi, büyüme ve yenilikçiliği teşvik ederek iyileştirilmiş bir sistem kurulmalıdır (Patricio vd., 2015).

Sanayileşme, üretim tesislerinin ve yan kuruluşlarının kurulmasıyla, bir ülkenin ekonomisinin gelişmesinde önemli bir faktör haline gelmiştir. Bununla birlikte, bu tesislerden atılan atıklar çevreye ve insan sağlığına zarar vermektedir. Atıklar yer altı ve yüzey sularına zamanla karışarak toprakların verimini düşüren, buna bağlı olarak da insan sağlığını da tehdit eden malzemelerdir (Ho vd, 2012). Avrupa Birliği (AB), atıkların azaltılması konusunda ciddi yaptırımlar ve çalışmalar yapmaktadır. Bu sayede üretim sistemlerinde yapılan her türlü optimizasyon atık yönetimini beraberinde getirmektedir. Üretimde insan gücünün kullanıldığı sistemlerde kaynakların optimizasyonu atıkların yeniden kullanımını vurgulamaktadır. Bu yapı üretim proseslerinden çıkan nihai ürünlerin (veya yarı mamullerin) ilk önce atık haline gelmemelerini, eğer atık haline dönüştüyse geri kullanımını açıklamaktadır (Nehrenheim, 2014). Atık yönetimi, çevre sağlığını koruyarak kentsel çevrenin kalitesini yükseltmek, ekonomik yeterlilik ve verimliliği desteklemek için uygulanmaktadır (Gündüzalp ve Anıl, 2016). Günümüzde atık yönetimi ve bu kavramın içini dolduran geri dönüşüm, geri kazanım ve

yeniden kullanım gibi kavramları birçok endüstriyel işletme yaygın olarak kullanmaktadır (Nehrenheim, 2014).

Seramik sektörü; doğal hammaddeler kullanılarak nihai ürün üretilen, belirli bir sıraya, üretim mantığına ve düzene göre işleyen üretim prosesleridir. Kil, kaolen, kuvars ve feldspat gibi doğada bulunan ve işlenebilir özellikteki hammaddelerin hazırlanarak, üretimi istenen malzemeye göre düzenlenmiş proseslerden geçirilerek, son aşamasında da ısıl işlem uygulanarak üretilen bir malzemedir. Seramik yüzey kaplama malzemeleri, sofr gereçleri ve seramik sağlık gereçleri, geleneksel ve modern üretim yöntemlerinin bir arada kullanılarak üretim yapılan seramik malzemelerdir. Seramik malzemelerin üretim proseslerinde de diğer endüstriyel üretim proseslerinde olduğu gibi atık malzemeler çıkmaktadır. Şekil 1.1’de seramik malzemelerin genel üretim prosesi çizelgesi verilmektedir.



Şekil 1.1. Seramik malzemelerin üretim prosesi (Kang, 2005).

Seramik sağlık gereçleri üretim proseslerinden çıkan atıkları daha iyi tanımlayabilmek için bu üretimin proseslerinin anlaşılması gerekmektedir. Seramik sağlık gereçleri veya diğer bir adıyla vitrifiye seramik malzemeler, kil, kuvars, kaolen ve feldspat hammaddelerinin belirli bir reolojide hazırlanan seramik döküm çamuru haline getirilerek döküm yöntemi ile şekillendirilmesi ile başlamaktadır. Bu aşamadan sonra diğer seramik malzemelerin üretimi de hemen hemen aynı şekilde uygulanmaktadır. Kurutma aşamasına gönderilen ürünler, yarı mamul kontrol aşamasından sonra sırlama işlemine tabi tutulmaktadır. Sır, ürünün hijyenik, estetik ve dayanıklı olmasını sağlayan bir kaplama malzemesidir. Seramik çamuru üretiminde kullanılan hammaddeler haricinde (kil hariç), camlaştırıcı, ergitici ve isteğe bağlı olarak opaklaştırıcı hammaddeler ile hazırlanan sır, ürün üzerindeki camsı yapının oluşmasını sağlar. Sır uygulanan yarı mamuller sinterleme aşamasından geçirilir. Sinterleme işlemi, seramik

malzeme üretiminde en çok enerji harcanan prosestir. Burada harcanan enerji yaklaşık olarak üretimin tamamının harcadığı enerjinin %60'ı kadardır. Bu işlemde sağlık gerecini oluşturan hammaddeler, ısı işlem altında başlangıçtaki mineralojik özelliklerini değiştirerek farklı bir yapıya geçerler. Sinterleme sırasında kaolen yapısında bulunan kaolinit kristal şeklini değiştirmeden ayrışır ve 550-600 °C arasında meta-kaoline (Reyes vd., 2013), 950-1000 °C arasında spinel fazına (Chakraborty, 2013), 1100 °C ve sonrasında mullit yapıya dönüşürler (Reyes vd., 2013). Üretim prosesinin her aşamasında atık olarak nitelendirilen malzemeler çıkmaktadır.

Seramik sağlık gereçleri üretiminde döküm prosesi ağırlıklı olarak alçı kalıplar kullanılan geleneksel yöntemler ile yapılmaktadır. Bu yöntemlere ek olarak günümüzde polimer kalıplar ile şekillendirme de kullanılmaya başlanmıştır. Polimer kalıplar yüksek basınçlara dayanıklı olduğundan üretim proseslerini hızlandıran ve üretim verimliliğini arttıran sistemlerdir. Her iki yöntemde de seramik döküm çamurunun kalıp cidarlarında kalınlık aldırılarak ürün oluşturulması sağlanmaktadır. Bu aşamada büyük miktarda atık oluşumu meydana getiren faktörler bulunmaktadır. Tüm seramik sağlık gereçleri üreticilerinin ortak yaşadığı sıkıntılardan biri olan yarı mamul kayıpları, yeniden kullanılabilir olmasına karşın hatanın proses içerisinde geçirdiği zamana bağlı olarak işçilik maliyetlerinin artmasına olanak tanımaktadır. Bu aşamada gerçekleşen kayıplar birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterir. Kalıbın içerisinde susuzlaştırma işlemi yapıldıktan sonra oluşacak hatalı ürünler tekrar su ile açılarak ve döküme uygun olarak belirlenen reolojik özelliklere göre ayarlanarak yeniden döküm çamuru haline getirilebilmektedir. Döküm yoluyla üretim yapan her işletme bu işlemi uygulamaktadır.

Kurutma aşamasından çıkan hatalı ürünler aynı işlemle yeniden kullanılabilir hale getirilmektedir. Bu işlem sinterleme sürecinin başına kadar kullanılan, geri dönüşümü kolay bir aşamadır. Ancak sinterleme aşamasından sonra bu geri dönüşümü gerçekleştirmek, ürün kuru haldeyken yapılan geri dönüşüme göre nispeten zor ve maliyetlidir. Sinterleme sonrası oluşacak atıkların büyük bir kısmı atık olarak doğaya bırakılmaktadır. Bilimsel araştırmalar sonucunda bu atıkların öğütülerek tekrar seramik çamuru haline getirilmesi veya farklı malzemelerin üretiminde ikincil hammadde olarak kullanımı yaygınlaştırılmaya çalışılmaktadır. Literatür araştırmalarında gözlemlenen bulgular, üretim proseslerinde uygulanabilir çıktılar haline getirilerek atıkların geri kazanımını ve yeniden kullanımını destekler niteliktedir.

Seramik malzemelerin üretim aşamalarının her birinde kullanılan ve malzemeye nihai halini veren işlem sinterleme veya ısıl işlem prosesi olarak adlandırılır. Isıl işlem seramik malzemenin mukavemet kazanması için yapılan bir işlem olup, bu aşamada kullanılan ısıl işlem sıcaklığı çeşitli seramik ürünler için farklılık gösterir. Sinterleme, şekillendirilen bünyeye termal enerji uygulayarak yoğunluk kontrollü malzemeler ve bileşenler üretmek için kullanılan bir işlemdir. Bu işlem eski çağlardan beri çanak ve çömlek pişirilmesinde kullanılan bir tekniktir. Sinterlemenin bilimsel temeller göz önünde bulundurularak çalışılması 1940'lerden sonra başlamıştır. Günümüzde sinterlemenin önemi ve faydalı kullanımları seramik malzeme üretimi ve toz metalürjisi gibi alanlarda sıklıkla görülmektedir (Kang, 2005).

Isıl işlemdeki sıcaklık farklılıkları, fırın tasarımında kullanılan refrakter malzeme seçimini doğrudan etkilemektedir. Seramik malzeme üretimi yapan tesisler, maliyetleri de göz önünde bulundurdıklarından kullanılacak optimum sinterleme sıcaklığına göre dayanıklı olabilecek malzemeleri seçmektedirler. Ayrıca büyük işletmelerde sinterleme işlemi için kullanılan açık sistem fırınlarda, fırının ulaştığı maksimum sıcaklığa göre değil, o aşamada görülen tepe sıcaklığa göre fırın malzemesi belirlenir.

Seramik sağlık gereçlerinde kullanılan sinterleme fırınlarının ısı ile temas eden bölgeleri Şekil 1.2'de gösterildiği gibi refrakter malzemeler ile kaplıdır. Fırının yan duvarları ve üst duvarı tamamen refrakter özellikli malzeme ile kaplanmıştır. Kamara tip fırınlarda refrakter malzeme seçimi, fırının çıkabileceği maksimum sıcaklığa dayanıklı malzemelerden seçilerek kaplanır. Tünel tipi fırınlarda ise sinterleme aşamalarının sıcaklık değişkenliklerine göre farklı malzemeler ile kaplanmaktadır. Kamara tip fırınlarda sıcaklık artarken ürünler buldukları konumda sabit dururlar. Tünel tipi fırınlarda ise, fırın; sinterleme mantığına göre farklı sıcaklık bölümlerine sahiptir ve ürünler fırın arabaları üzerinde fırın boyunca ilerleyerek sinterleme işlemine tabi tutulurlar. Bundan dolayı tünel fırınlarda farklı modüllerde farklı refrakter kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Ayrıca tünel fırınlarda da kamara fırınlarda da fırın arabaları vardır ve bu arabaların üzerindeki kaplama malzemeleri, fırındaki maksimum sinterleme sıcaklığına dayanıklı malzemeler ile kaplıdır. Refrakter malzemelerin ısıl iletim katsayıları düşük olduğundan, fırın içerisindeki ısı kayıplarının önlenmesini sağlarlar.



Şekil 1.2. Seramik Fırınlarda Refrakter Malzeme ile Kaplı Örnekler (https://www.keithcompany.com/).

Refrakter malzemeler termal kararlılığı olan, bağlayıcı malzemeler ve katkı malzemelerinden oluşan, metalik olmayan, gözenekli ve heterojen yapıda malzemeler olup kimyasal ve fiziksel kararlılıklarını koruyabilen malzemelerdir (Osarenmwind ve Abel, 2014). Yüksek sıcaklıklara dayanıklı, yüksek termal şok direnci ve düşük termal genişleme katsayısına sahip olmasıyla birlikte refrakter malzemeler ısı işleme yapılan fırın, ark ocakları ve reaktör gibi makinelerde ısı yalıtım sağlayan malzemelerdir. Refrakter malzeme çeşitleri arasında ateş tuğlaları, seramik elyaflar, fırın kaplama malzemeleri gibi çeşitli uygulamalar için farklı kombinasyonlarda ve şekillerde yapılmış uygulamalar aklı gelmektedir. Refrakterin niteliği yalnızca yapısıyla değil, kullanıldığı proses bileşeninin ve yapılan ısı işleme kalitesi ve riskli durumlarda gösterdiği performansla alakalıdır. Refrakter malzemeler silisyum, alüminyum, magnezyum, kalsiyum ve zirkonyum oksitleri, karbürleri, nitrürleri ve borürlerinden üretildikleri gibi grafit gibi oksitsiz malzemelerden de üretilirler (Bhatia, 2011). Çizelge 1.1’de refrakter malzemelerin sınıflandırılması görülmektedir.

Çizelge 1.1. Refrakter malzemelerin sınıflandırılması (Yılmaz vd., 2015a).

Refrakter Malzemeler			
Kullanım Sıcaklığına Göre	Üretim Yöntemine Göre		Kimyasal ve Mineralojik Özelliklerine Göre
Düşük Kalite	Şekilli Refrakterler	Şekilsiz Refrakterler	Asidik
Orta Kalite	Sulu Şekillendirme	Elyaf	Bazik
Yüksek Kalite	Yarı Yaş Şekillendirme	Tel	Nötr
Süper Kalite	Kuru Şekillendirme	Granül	
	Eriterek Şekillendirme	Agrega	
	Elyaf Döküm	İri Taneli	
	Plaka Elyaf		

Refrakter malzemelerin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

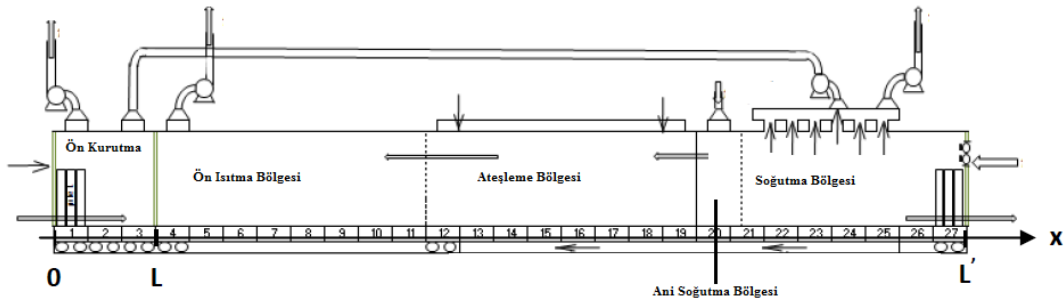
- Yüksek sıcaklıklarda yapısını bozmadan, deformasyon gibi şekil değişikliklerine uğramadan, kararlı bir yapıda kullanılırlar,
- Fırına yüklenen malzemenin ağırlığına ve darbelere karşı dayanıklıdırlar,
- Ani ısı değişimlerinde termal şoka uğramazlar,
- Isıl işlem sırasında ortamdaki gazlara ve reaksiyonda çözünen malzemelere karşı kimyasal kararlılık göstererek dayanırlar,
- Düşük termal genleşme katsayısına sahiptirler,
- Bazı uygulamalarda poroziteleri düşük istendiği gibi bazı ısı uygulamalarında da poroz yapı istenmektedir. Her iki durumda da ısı işleme dayanıklı ve ısı yalıtımı yüksek malzemelerdir (Yılmaz vd., 2015a).

Seramik yer ve duvar kaplama malzemeleri olarak kullanılan yer ve duvar karolarının üretim proseslerinde de, seramik sağlık gereçlerinde olduğu gibi sinterleme fırınları kullanılır. Bu proseste kullanılan fırın tasarımı, ürün yüksekliğinin seramik sağlık gereçlerine nazaran yüksek olmamasından kaynaklı olarak dar ve geniş olarak tasarlanmıştır. Bu tip fırınlara roller fırın denmektedir. Roller denmesindeki asıl amaç, ürünlerin rulolar üzerinde sinterleme aşamasına alınmasıdır. Burada kullanılan rulo malzemeleri de seramik sağlık gereçlerindeki fırın malzemeleri ile benzer özellikler göstermektedir.

Seramik sağlık gereçleri sektöründe kullanılan fırınlarda ağırlıklı olarak mullit, korundum ve kordiyerit refrakter malzemeler kullanılır. Fırınlarda kullanılan refrakter tuğlaların

bulk yoğunlukları $2,42-2,95 \text{ g/cm}^3$, görünür poroziteleri kullanım sıcaklığına göre %15-25 arasında değişkenlik gösterir. Bu refrakter tuğlaların fırın arabalarında kullanıldığından baskı mukavemetleri ve darbe dayanımları da yüksek olması istenmektedir.

Seramik sağlık gereçleri tünel fırınlarında ürünlerin sinterleme aşamasından (Şekil 1.3.) geçmesi için fırın arabaları kullanılmaktadır. Fırın arabaları tasarımı, içerisinde kullanılacak fırının tasarımına göre yapılmaktadır. Fırın arabalarının alt kısmı metal malzemeden yapılır. Fırındaki yakma işlemini sağlayan brülörler fırın arabalarının ürün ile temas etmeyen alt ve üst kısımlarından ateşi istenilen boyda ve sıcaklıkta sağlarlar. Metal aksamın üst kısmı Al_2O_3 (alümina) esaslı tuğla malzemeleri ile kaplıdır. Ayrıca ısı kaçaklarını önleyebilmek için fiber battaniyeler kullanılır. Bu battaniyeler arabaların yapışma yüzeylerinden kaçabilecek ısının fırın içerisinde kalmasını sağlarlar. Battaniyeler genellikle seramik elyaf malzemelerinden yapılır ve kullanılan maksimum sıcaklığa dayanıklı yalıtım malzemeleridir.



Şekil 1.3. Sinterleme aşamalarını gösteren tünel fırın tasarımı (Soussi vd., 2017).

Fırın arabalarının yan ve üst bölgeleri, ısı kaçaklarını engellemek ve orta kısımda bulunan sıcaklığı fırın boyunca sabit tutabilmek için alümina tuğla ile kaplanmaktadır. Bu bölgeler sinterleme işleminin yapıldığı fırının alt bölgesinde kalmaktadır. Bu bölümün üzerine refrakter ayaklar ve plakalar konularak, sinterleme işlemine tabi tutulacak olan ürünler plakalar üzerine konular ve fırın boyunca arabanın ilerlemesi sağlanır. Kullanılan fırın plakaları kordiyerit ve mullit malzemelerden yapılır ve alt kısımda kalan sıcaklığı üst kısma iletebilecek termal iletkenliğe sahip malzemelerdir. Fırın arabalarının tasarımı Şekil 1.4'te görüldüğü gibidir.



Şekil 1.4. Tünel fırın arabası (Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş. üretim tesisinden görüntü).

Dünya’da seramik sektöründen kazanılan katma değer, ülkelere kazandırdığı ithalat ve ihracat kabiliyeti ülkemizde de bu sektörün lokomotif sektörlerden biri haline gelmesinin önünü açmıştır. Ülkemizdeki yerli hammaddelerin bu sektörlerde kullanılarak ekonomimize verdiği katkı, seramik sektörüne bağlı alt sektörlerle de katkı sağlaması ve az miktarda ithalat ile maksimum ihracat yapabilme potansiyeli ile ülkemizde öncü olan sektörler arasındadır. Yerli hammaddelerden üretilen seramik malzemelerin atıklarının da hammadde olarak yeniden seramik veya farklı sektörlerde kullanımının artırılması, doğa için ve ülke ekonomisi için de katkı oluşturabileceği mümkündür. Seramik sektörünün gelişimi için çalışan kamu kurumları, üniversiteler, araştırma merkezleri ve Ar-Ge merkezleri göz önüne alındığında belirlenen hedeflere ulaşma konusunda başarı sağlanabileceği açıktır.

Bu araştırmanın amacı, seramik sağlık gereçleri üretimi yapan işletmelerde kullanılan fırın atık malzemelerinin geri dönüşümü sağlanarak, metal döküm sektörü için kordiyerit ve kordiyerit mullit seramik filtre üretiminin araştırılmasıdır. Çalışmada kullanılan atık malzemeler, Ece Banyo Gereçleri Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi üretim tesisinde sinterleme fırını olarak kullanılan tünel ve roller tip fırınlardan çıkan refrakter malzemeler ile sağlanmıştır. Ece Banyo üretim tesisinde sinterleme işlemleri için kullanılan 3 adet roller fırın, 1 adet tünel fırın ve ikinci pişirim işlemi yapmak için de 1 adet kamara fırın mevcuttur. Tünel ve kamara

fırınlarda plaka malzemesi olarak Şekil 1.4'de görülen fırın arabasında ürünlerin alt kısmında bulunan kordiyerit mullit refrakter plakalar kullanılmaktadır. Roller fırınlarda kullanılan rulo ve plaka malzemeleri de kordiyerit ve mullit tabanlı malzemelerdir (Çaşın vd., 2018). Fırınlarda kullanılan bu malzemeler belirli periyotlarda değiştirilir. Ayrıca işçilik hatalarından kaynaklı olarak bu malzemeler kırılabilen ve yerine yeni malzemeler kullanılmaktadır. Bu araştırmanın amacı; atık malzemelerin geri dönüşümü sağlanarak ilk girdi maliyetleri düşük, katma değeri yüksek bir metal döküm filtresi elde etmektir. Reçete ve karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen veriler, piyasada bulunan kordiyerit mullit tabanlı metal döküm filtreleri ile aynı özellikler gösterebilmesine göre değerlendirilmiştir. Metal döküm filtre şekillendirme işlemleri polimerik sünger şekillendirme metodu ve presle şekillendirme metodu olmak üzere yaş ve kuru yöntemlerle yapılmıştır. Şekillendirme çalışmaları sonucunda presle bal peteği şeklinde filtre üretimi sağlanmıştır. Şekillendirilen bal peteği filtre, endüstriyel metal döküm sektöründe döküm denemesi yapılarak test edilmiştir.

Atık malzemelerden üretilen bal peteği kordiyerit mullit filtreler ülkemizde metal döküm sektöründe küresel grafit dökme demir ve lamel grafit dökme demir üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Filtre malzemeleri Çin Halk Cumhuriyeti başta olmak üzere ithal olarak bulunabilmektedir. İthal girdi malzemelerindeki navlun ve gümrük maliyetleri malzemenin fiyatını arttıran ek maliyetlerdir. Ülkemizde bu tip malzemelerin üretiminin desteklenmesi hatta atık geri kazanımları ile bu malzemelerin üretilebilmesi, ülke ekonomisine katkıda bulunulması açısından gerekli ve önemli konulardır.

Araştırma sonucunda elde edilen metal döküm filtresi atık geri dönüşümünden elde edildiğinden piyasada üretilen metal döküm filtrelerine göre üretim maliyetleri oldukça düşüktür. Piyasada satılan kordiyerit ve mullit tabanlı metal döküm filtreleri genellikle ithal olarak ülkemize geldiğinden, piyasaya sürüldüğü takdirde ülke ekonomisine vereceği katkı da oldukça yüksek olacaktır. Ayrıca doğal yollarla çözünmesi uzun yıllar süren bu tip sinter malzemelerin doğaya atılmaması sağlanacaktır.

2. KORDİYERİT VE MULLİT

2.1. Kordiyerit

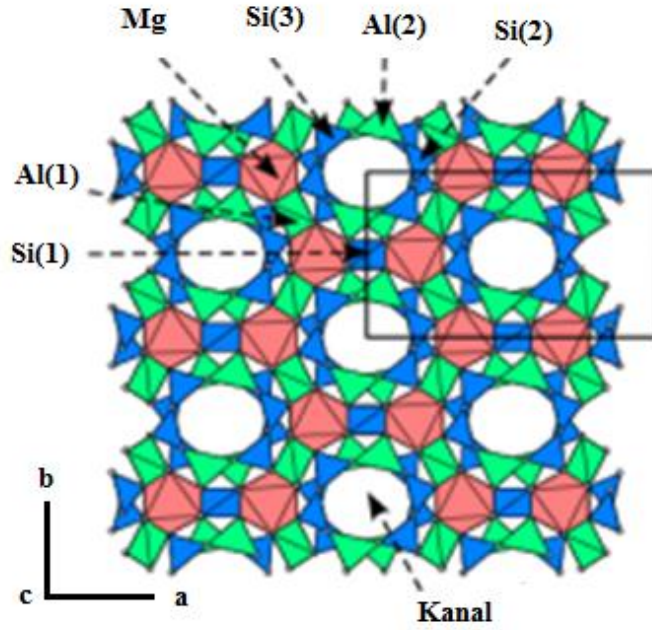
2.1.1. Tanım

Kordiyerit, MgO, SiO₂ ve Al₂O₃ (MAS) faz diyagramında oluşan bir fazdır. Stokiyometrik kompozisyonu 5SiO₂.2MgO.2Al₂O₃ formülü ile gösterilmektedir. Yüksek termal şok direncinin istendiği yüksek sıcaklık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir (Menchi ve Scian, 2005). Ayrıca elektriksel özelliklerinden dolayı endüstride çeşitli kullanım alanlarına sahiptir (Amista vd., 1995). Kordiyerit yüksek sıcaklıkta katı hal reaksiyonuyla başlangıç malzemelerinin (oksit, hidroksit, karbonat bileşikleri, kil, kaolen, talk, klorit vb. malzemeler) karışımları kullanılarak elde edilebilen malzemelerdir (Menchi ve Scian, 2005).

Kordiyerit malzemeler düşük dielektrik sabiti, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek sıcaklıklarda mekanik ve kimyasal kararlılık gösteren malzemelerdir (Kang vd, 2018). Bu özellikleri nedeniyle kordiyerit seramik malzemeler katalizör, kondansatör, mikro elektronik uygulamalar, refrakter ürünler, entegre devre kartları, gaz türbinleri için ısı eşanjörleri, membran filtreler, termal şok direnci istenen seramik malzeme uygulamaları ve gözenekli seramik üretiminde kullanılan malzemelerdir (Aşkın vd., 2017). Kordiyeritin 3 farklı polimorf yapısı bulunmaktadır. Bunlar β- kordiyerit (düşük sıcaklıklarda kararlı form), μ-kordiyerit (β-kordiyerit yapının yarı kararlı hali) ve α-kordiyerit (yüksek sıcaklıkta kararlı form) olarak tanımlanmaktadır (Kang vd, 2018). Kordiyerit seramikler $\alpha=1-2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ gibi düşük termal genleşme katsayısına ve $\epsilon_r= 5-6$ F/m düşük dielektrik sabitine sahip olmakla birlikte yüksek termal şok direnci ve yüksek mekanik dirence sahiptirler. Ayrıca kordiyerit malzemeler yüksek refrakterlik özellikleri göstermektedir (Soltan vd., 2018).

2.1.2. Kristal kafes yapısı

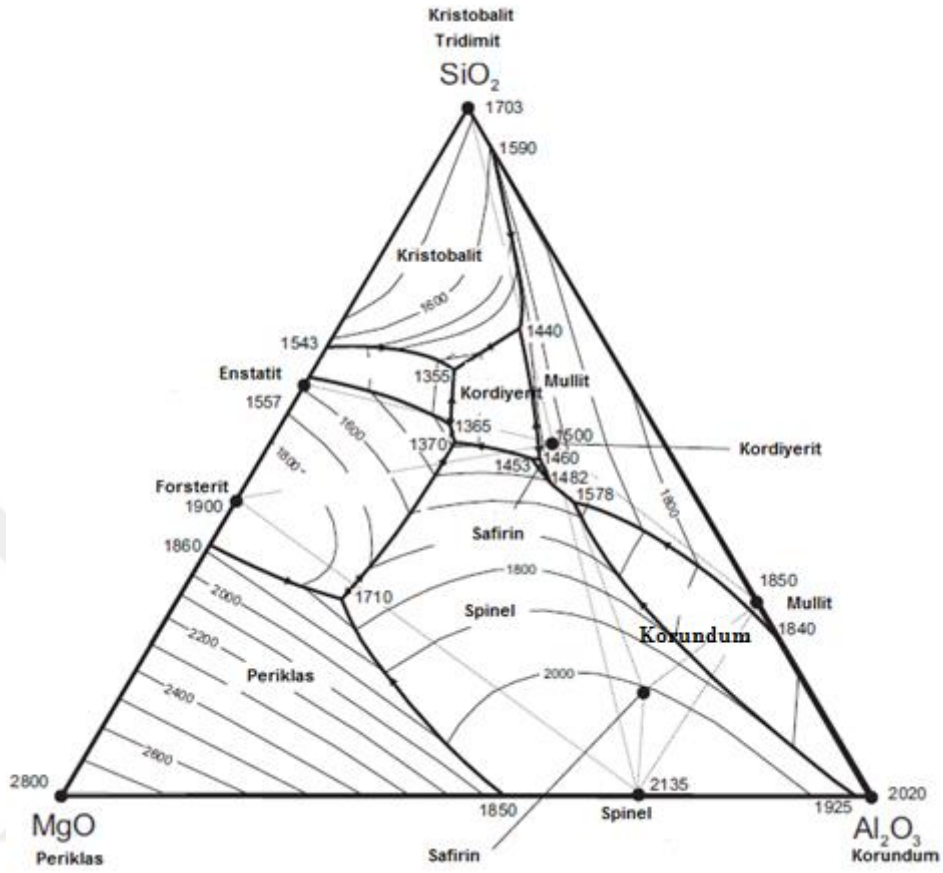
Kordiyerit malzemelerin yapısı incelendiğinde düşük simetrik yapıda, ortorombik bir sistemde a eksenini boyunca dizilimi olduğu görülmektedir. Şekil 2.1'de düşük simetrik kordiyeritin kristal sistemi verilmiştir. Kordiyerit yapısına bakıldığında ortorombik sistemde olduğu görülmektedir. Si₄Al₂O₁₈ altılı halka yapısı SiO₄ ve AlO₄ tetrahedraları ile bir tetrahedron oluşturmaktadır. Kordiyeritin diğer bir polimorfu olan indialit ise yüksek simetrikli hegzagonal yapıda bulunmaktadır (Ohsato vd., 2013).



Şekil 2.1. Düşük simetrlili kordiyeritin kristal yapısı (Ohsato vd., 2013).

2.1.3. Faz yapısı

Kordiyeritin ilk faz diyagramı 1918 yılında (Kumar vd., 2015) Rankin ve Mervin tarafından yapılan araştırmalar ile $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ üçlü sisteminde bulunan bir faz olarak literatürde yer almaktadır. Sinterleme sıcaklığı $1430\text{ }^{\circ}C$ olmasıyla birlikte $30\text{ }^{\circ}C$ gibi dar bir aralıkta erime aralığı ($1463\text{ }^{\circ}C$) belirtilmiştir (Ogiwara vd., 2011). $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ faz diyagramı Şekil 2.2'de verilmiştir. Faz diyagramında da görüldüğü üzere $1453\text{ }^{\circ}C$ 'de ötektik noktada kordiyerit sıvı faza geçmektedir.



Şekil 2.2. MgO-Al₂O₃-SiO₂ faz diyagramı (Fabrichnaya vd. 2004).

MgO-Al₂O₃-SiO₂ faz diyagramının incelendiğinde kordiyerit fazının 1250 °C üzerinde sinterleme yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir (Fabrichnaya vd. 2004). Kordiyerit MgO, Al₂O₃ ve SiO₂'nin katı hal sinterleme reaksiyonu ile oluştuğu gibi 1100-1400 °C arasında bu oksitleri bulduran malzemelerin reaksiyonu ile de oluşabilmektedir (Zirczy, 1972). Kordiyerit malzemelerin üretimi esnasında uygulanacak aşırı sinterleme korundum, spinel, mullit ve silika gibi ikincil fazların oluşmasına sebebiyet verir. Kordiyerit ile aynı faz aralığında bulunan bu ilişkili ikincil fazlar başlangıç hammaddelerinin kimyasal yapılarına ve tane boyutlarına bağlıdır (Fabrichnaya vd. 2004).

MgO-Al₂O₃-SiO₂ sisteminde görülen fazlar ve formülleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1. MgO-Al₂O₃-SiO₂ sisteminin fazlarının ismi ve formülleri (Mao vd., 2006).

Faz İsmi	Formülü
Kordiyerit	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈
Korundum	Al ₂ O ₃
Kristobalit	SiO ₂
Halit	(Al ⁺³ ,Mg ⁺²) ₁ (O ⁻²) ₁
Mullit	(Al ⁺³) ₁ (Al ⁺³) ₁ (Al ⁺³ ,Si ⁺⁴) ₁ (O ⁻²) ₅
Olivin	Mg ₂ SiO ₄
Proto Piroksen	MgSiO ₃
Safirin	Mg ₇ Al ₁₈ Si ₃ O ₄₀
Spinel	(Al ⁺³ ,Mg ⁺²) ₁ (Al ⁺³ ,Mg ⁺²) ₂ (Mg ⁺²) ₂ (O ⁻²) ₄
Tridimit	SiO ₂

Kordiyerit malzemelerin kristal yapısı incelenecek olursa, ilk olarak 1824 yılında hegzagonal olarak tanımlanmıştır. Yine aynı yılda Mohs ilk olarak ortorombik simetri olduğunu prizmatik kuvars olarak tanımlayarak kabul ettirmiştir. 1928 yılında yapılan araştırmalar sonucunda temel doğal kordiyeritin ortorombik (pseudo-hegzagonal) simetride olduğu doğrulanmıştır (Zech, 1973). Ortorombik birim hücrenin kenar uzunlukları a=17,10; b=9,78; c=9,33 Å olarak bulunmuştur. Beril mineralinin (Be₃Al₂Si₆O₁₈) kristal yapısının pseudo-hegzagonal yapısı olarak Mg₂Al₄Si₅O₁₈ formülü benzerlik göstermektedir (Zirczy, 1972).

1936 yılında yapılan çalışmalarda rastgele dizilmiş olan Al ve Si atomlarının alumina tetrahedraları ve magnezya oktahedraları ile birbirine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Kordiyeritin keşfinden sonra ise 3 polimorfu tanımlamıştır;

- 1300 – 1460 °C arasında katı hal reaksiyonu ile elde edilen veya 1050 – 1460 °C arasında kristallenen yüksek sıcaklıkta kararlı α-kordiyerit formu,
- Camın hidrotermal davranışı ile oluşan β-kordiyerit formu,
- 800 – 900 °C arasında camın kristallenmesi ile oluşan yarı kararlı düşük sıcaklık μ-kordiyerit formu olmak üzere sınıflandırılmıştır (Lee, 1975).

2.1.4. Kordiyerit malzemelerin özellikleri

Termal Genleşme

Kordiyerit malzemelerin termal genleşme katsayısı 1-2,5x10⁻⁶/°C arasında olduğu literatür araştırmalarında saptanmıştır. Kordiyerit, kullanıldığı seramik malzeme içerisinde ısıl genleşme değerini doğrudan bir etkileyen bir yapıya sahiptir. Sistemdeki kordiyerit fazındaki

artış, termal genişlemenin azalmasına sebep olmaktadır (Lee, 1975). Bu değer göz önüne alındığında kordiyerit malzemelerin termal genişleme katsayısının düşük olduğu söylenebilmektedir. Kordiyerit malzemelerin ısıtma ve soğutma aşamalarında göstermiş olduğu termal genişleme katsayıları, kristal yapısında a, b ve c eksenlerinde farklılık göstermektedir. A ve b eksenleri boyunca $2,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, c ekseninde $0,9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Oda sıcaklığından $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar rapor edilen termal genişleme katsayısı değeri $1-5,7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir (Kuscer vd., 2017). Kordiyerit üzerine yapılan çalışmalarda, plazma sprej metodu ile elde edilen malzemelerde $2,94 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ termal genişleme katsayısı bulunduğu da literatürde yer almaktadır (Rohan vd., 2004).

Yapılan çalışmalar ve araştırmalarda, termal genişleme davranışları incelenen kordiyerit malzemelerin üzerine uygulanan ısı miktarının artmasıyla oluşan termal genişlemelerin yüksek oranda anizotropik bir yapısal genişlemeye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Yapılan bir çalışmada anizotropik genişlemenin Mg oktahedral tabaklarında olduğu tespit edilmiştir. Magnezyum ve oksijen arasındaki bağ $775 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta uzama gösterir. Bu uzama aynı sıcaklıklarda Si-O ve Al-O arasında sabittir (<http://shodhganga.inflibnet.ac.in/>).

Mekanik Özellikler

Malzemelerin yük altında deformasyona uğrayabilmesi için sertlik, tokluk ve dayanım olgusunu birbirinden ayırt etmek önemlidir. Dayanım malzemelerin kırılma ve aşırı deformasyona karşın gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerin uzunluğunda meydana gelen değişikliklere karşı gösterilen direnç de Young Modülü olarak isimlendirilmektedir. Young Modülü malzemelerin mekaniksel özelliklerini en iyi şekilde tanımlayan ve elastisite modülü olarak da ifade edilen en önemli parametrelerden biridir (Roylance, 2018). Mekanik özellikleri gösterebilmek için plazma sprej yöntemi ile üretilen kordiyerit malzemelerin Young Modülü ve eğilme dayanımları Çizelge 2.2'de verilmiştir. Çizelgede görülen lineer olmayan bazı değerler, çekme gerilimleri altında mikro çatlakların yavaşça açılması ve malzemenin sertliğinin düşmesinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2.2. Kordiyerit malzemelerin young modülü ve eğilme dayanımları (Rohan vd., 2004).

	E_{total} (GPa)	E_{init} (GPa)	MOR (MPa)	$E_{Surface}$ (GPa)	E_{Cross} (GPa)
Kordiyerit 350	13 ±1	16 ±1	40 ±1	38±9	39±9
Kordiyerit 450	13 ±1	16 ±1	34 ±1		
Kordiyerit 350 HT	55 ±1	57 ±1	51 ±1	66±6	65±10
Kordiyerit 450 HT	56 ±1	60 ±1	52 ±1		

Çizelgenin ilk sütununda gözlemlenen değerler spreyleme uzaklığını mm olarak göstermektedir. HT olarak tabir edilen kordiyeritler ısıtma işlemi görmüş olan malzemelerdir. E_{total} çatlak oluşumuna kadar hesaplanan Young modülü değerleridir. E_{init} Young modülünün yüklemenin başlangıcındaki değeri, MOR ise kopma modülüdür. Kopma modülüne eğilme dayanımı da denilmektedir. $E_{Surface}$ ve E_{Cross} değerleri de çatlak ve kesit alanında hesaplanan Young modülünü göstermektedir (Rohan vd., 2004).

Kordiyerit malzemelerin bazı mekaniksel özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir. Hesaplanan veya ölçümü yapılan değerler oda sıcaklığında ölçülen değerlerdir.

Çizelge 2.3. Kordiyerit malzemelerin bazı mekanik özellikleri ([https://www.azom.com /article.aspx? ArticleID=5070](https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5070)).

Özellik	Değer (25°C)
Yoğunluk	2,5 gr / cc
Sertlik	7 - 7,5 Mohs
Çekme Gerilimi	3,5 – 5,5 kpsi
Elastik Modül	12 x 10 ⁶ psi
Eğilme Dayanımı	8 – 17 kpsi
Basınç Dayanımı	30 – 51 kpsi

Elektriksel Özellikler

Bir malzemenin et kalınlığının elektriksel deşarjdan veya dielektriksel çökümünden önce dayanabileceği voltaj değerine o malzemenin dielektriksel dayanımı denir. Değeri V / mil (kV/m) olarak ifade edilir. Dielektriksel dayanım voltajın, uygulanan voltaj oranının, yüzey etkisinin ve malzemenin et kalınlığının bir fonksiyonudur. Dielektriksel dayanım ne kadar iyi ise malzeme o kadar yalıtkandır. Malzemenin et kalınlığı arttıkça dielektrik dayanımı da artar. Malzemenin hacimsel özdirenci, malzemenin akım ve akım yoğunluğuna paralel potansiyel gradyanı arasındaki orandır (Campo, 2008).

Dielektriksel dayanım, maksimum voltaj gradyanı olarak tanımlanmaktadır. Dielektrik bozunma iletim bandında ani hızlandırılan yüksek kinetik enerjili elektronların iletkenlik bandına yükseltgenmesini kapsar (<http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream>). Kordiyerit malzemelerin elektriksel özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4. Kordiyerit malzemelerin elektriksel özellikleri (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5070>).

Özellik	Değer
Dielektrik Dayanımı	212 ac V/mil
Dielektrik Sabiti	5 (@ 1MHz)
Hacimsel Özdirenç	10^{11} ohm ^{-cm}

2.1.5. Kullanım alanları

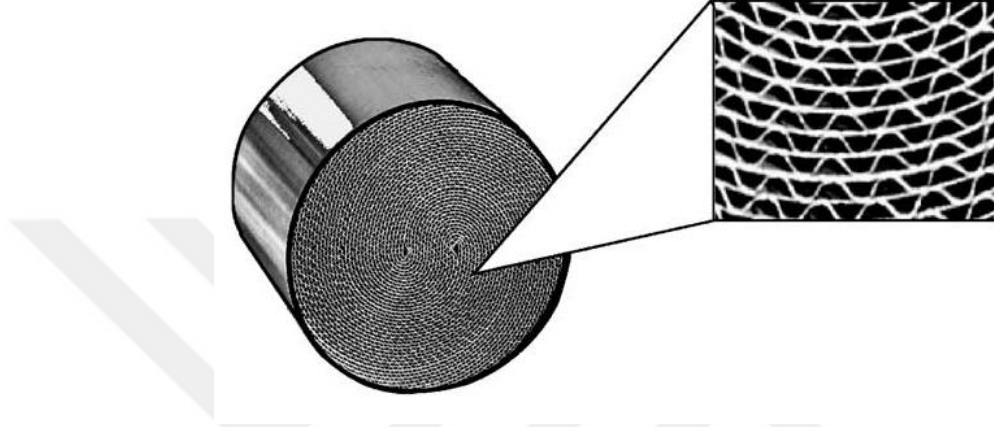
Kordiyerit malzemeler yüksek sıcaklıklarda yüksek elektrik direncine sahip malzemelerdir (Awano vd., 1992). Düşük termal genleşme katsayısı esas olarak ilgili faz bileşiminin miktarına ve yapısına ek olarak kordiyeritin düşük ve yüksek sıcaklık polimorflarının kristal yapısına ilişkindir (Fabrichnaya vd. 2004).

Kordiyerit seramik malzemeler katalizör uygulamalarında, fırın refrakterlerinde, devre kartlarında, ısı değiştiricilerde, termal şoka dirençli sofra gereçlerinde, gözenekli malzemelerde, seramik membranlarda, mikro elektronik uygulamalar gibi geniş bir ürün yelpazesinde kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak kordiyerit seramikler yüksek hızlı füzelerin radar antenlerini korumak amaçlı ve uzay mekiklerindeki anten kaportalarında da kullanılmaktadır (Fabrichnaya vd. 2004). Bu sayede uzay aracı atmosfer dışına çıkarken radar antenlerinin uğrayacağı termal şokları engelleyerek antenin zarar görmesini engeller.

Düşük termal genleşme katsayısına sahip olan kordiyerit seramik malzemeler bu özelliğinin dışında üstün bir termal şok direncine sahiptir. Yaklaşık olarak 50 MPa basınç altında bir eğilme dayanımına sahip olan kordiyerit seramik malzemeler eriyik metal döküm yapan prosesler için filtre üretiminde kullanıldığı gibi otomobil egzozlarında da katalizör sistemi içerisinde değerlendirilmektedir (Kuscer vd., 2017).

Araba motorlarının egzoz çıkışlarında bulunan sistem içerisinde kordiyerit malzemedan yapılmış filtre barındıran katalitik konvertör sistemleri bulunmaktadır. Arabalarda kullanılan katalitik konvertör sisteminin mikro yapısı Şekil 2.3'te verilmiştir. Paslanmaz çelik bir koruma

içerisinde bal peteği şeklinde yerleştirilen kordiyerit veya metal filtre, içerisinden geçen CO, HC ve NO_x gibi çevreye zararlı gazların miktarını azaltır. Kordiyerit monolitik filtreler üretim maliyetlerini düşürdüğünden dolayı katalitik konvertör içinde kullanılmaktadır (Kaşpar vd., 2003).



Şekil 2.3. Egzoz sisteminde bulunan katalitik konvertörün makro yapısı (Kaşpar vd., 2003).

Kordiyerit tabanlı refrakter malzemeler termo mekanik özelliklerinin ve termal şok dirençlerinin yüksek olması nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan fırınların iç döşemelerinde kullanılmaktadır (Hipedinger vd., 2015). Yoğun kordiyerit olarak adlandırılan kordiyerit tabanlı seramik malzemeler yalıtım uygulamalarında, ısıtma elemanlarında ve elektrik uygulamalarında kullanılır. Gözenekli kordiyerit seramikler ise hafif yapısal malzemeler olup ısı yalıtım uygulamalarında, katalizör sistemlerinde kullanılmaktadır (<http://vicar-sa.es/en/portfolio/cordierite-dense-and-porous>). Genellikle kordiyerit tabanlı refrakterler içerisinde, aynı faz sistemi içerisinde bulunan mullit fazı ile birlikte bulunmaktadır.

Kordiyerit malzemeler, düşük dielektrik sabitine sahip olmasından dolayı elektrik ve elektronik uygulamalarda da kullanılmaktadır. Geleneksel olarak elektronik endüstrisinde alümina altlıkların yerine kullanılmaktadır. Bununla birlikte termal genleşme katsayısının düşük olmasından dolayı mikro devrelerinde kullanılmaktadır (Camerucci vd., 2001).

2.1.6. Kordiyerit üretimi

Kordiyerit, MAS sisteminde bulunan ve sistemde bulunan oksit bağlı elementlerden oluşan veya üretilebilen bir malzeme ve fazdır. Genellikle doğal hammaddelerden yararlanarak

üretim yapılır. Sinterleme esnasında olabildiğince az camsı faz oluşumu istenir. Saf kordiyerit üretimi oldukça zordur ve üretimi ile ilgili birkaç çalışma saptanmıştır. Genellikle kordiyerit tabanlı üretilen malzemeler içerisinde mullit, korundum, spinel, forsterit ve kristobalit gibi MAS içerisinde bulunan diğer fazlar da gözlemlenmektedir. Kordiyerit üretiminde kullanılan başlıca doğal hammaddeler kaolen, alümina, talk ve sepiyolittir. Abalı'nın yaptığı çalışmada talk, kil ve alümina tozlarının karışımından 1300 °C'de kordiyerit fazı oluşumu görülmüştür. 1300 °C'a kadar olan sinterleme bölgesinde oluşan kordiyerit fazı incelenmiş ve bu kordiyeritin saflığının ve kordiyerit faz miktarının düşük olduğu tespit edilmiştir. Yapılan karakterizasyon analizleri ve fiziksel, kimyasal ve mekaniksel özelliklerin sonuçlarına göre endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir bir malzeme olduğu açıklanmıştır (Abalı, 2006).

Kordiyerit üretimi için kullanılan en temel üretim yöntemi katı hal sinterlemesi metodudur. Yüksek saflıkta kordiyerit üretimi için zor bir yöntemdir. Yapılan çalışmalarda, yüksek saflıkta kordiyerit üretimini sol-jel metodu ile yaptıkları rapor edilmiştir. Yapılan çalışmada 1000 – 1350 °C arasındaki 4 farklı sıcaklıkta sinterlenen toz malzemelerin faz değişkenlikleri incelenerek μ -kordiyerit tozları elde edilmesi sağlanmıştır. Sol-jel metodu, bir malzemenin üretimi için gerekli sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklıkta, yüksek saflıkta, homojen ürünler elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. Sol-jel yönteminde başlangıç maddeleri olarak kullanılan alkoksitler ve metal tuzları kullanılarak üretilen yüksek saflıkta kordiyerit sentezi faydalı bir yöntem olarak rapor edilmiştir (Choo vd., 2008).

Kordiyerit kaolen ve magnezyum hidroksit başlangıç malzemeleri kullanılarak, etanol içerisinde toplanmasını sağlayarak üretimi yapıldığı literatür araştırmalarında gözlemlenmiştir. Kurama vd. (2004)'nin yapmış olduğu çalışmada, Türkiye'de bulunan 3 farklı kaolen hammaddesi başlangıç malzemesi kullanılarak ultra ince $Mg(OH)_2$ parçacıklarını etanol içerisinde bor oksit ilavesi ile yoğunlaşma davranışlarını incelemişlerdir. Borik asit gibi erime sıcaklığını düşüren ergitici ajanlar kullanılarak düşük sıcaklıklarda sinterleme sağlanıp kordiyerit eldesi yapılmıştır. Başlangıç malzemeleri 4 saat boyunca farklı sıcaklıklarda sinterlenerek α -kordiyerit elde edilmiştir.

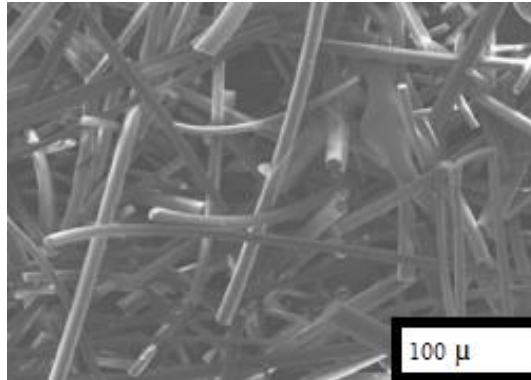
Alüminyum, magnezyum ve silisyum oksitlerin stokiometrik oranlarda katı hal sinterlemesi ile veya kristallendirme reaksiyonu ile kordiyerit toz malzemeler üretilir. Başlangıç malzemeleri olarak magnezyum oksit ve kaolinit karışımı hammaddeler, kalsine alümina ve uçucu kül, talk, silika ve alümina, kaolinitik killer, sepiyolit ve jipsit gibi mineral ve hammadde

karışımları kullanılarak kordiyerit tozları ve kordiyerit tabanlı ürünlerin üretimi literatür çalışmalarında gözlemlenmiştir (Günay, 2011).

2.2. Mullit

2.2.1. Tanım

Normal atmosferik basınç altında $Al_2O_3 - SiO_2$ sistemindeki en kararlı faz olan mullit, endüstriyel seramik ürünlerde bulunan en temel fazdır. Kimyasal kompozisyonu $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ olan mullit ortorombik ve uzun çubuk şeklinde kristal yapıda camsı faz içerisinde gözlemlenir (Davis ve Pask, 1971). Yüksek sıcaklıklara dayanım, yüksek sürünme direnci, düşük termal genleşme katsayısı, yüksek termal ve kimyasal stabilitesi ile yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan bir malzemedir (Sánchez-Soto vd., 2018). Al_2O_3 içeriği yüksek sedimenter kayaların olduğu İskoçya'daki Mull adasında bulunan mullit, adını bu adadan almıştır. Mullit ve mullit bazlı seramik malzemeler ile ilgili çok sayıda araştırma ve çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların genelinde mullit malzemelerin yüksek ısıl kararlılıklarından, düşük termal genleşme ve düşük termal iletkenlik özelliklerinden yararlanılmıştır (Fisher vd., 2012). Doğada nadir bulunmasına rağmen alümina ve silika bazlı seramik malzemeler içerisinde oluşturulan ve yapının mukavemetini arttıran bir yapıya sahiptir. Mullit malzemenin çubuksu yapısı Şekil 2.4'te verilmiştir.

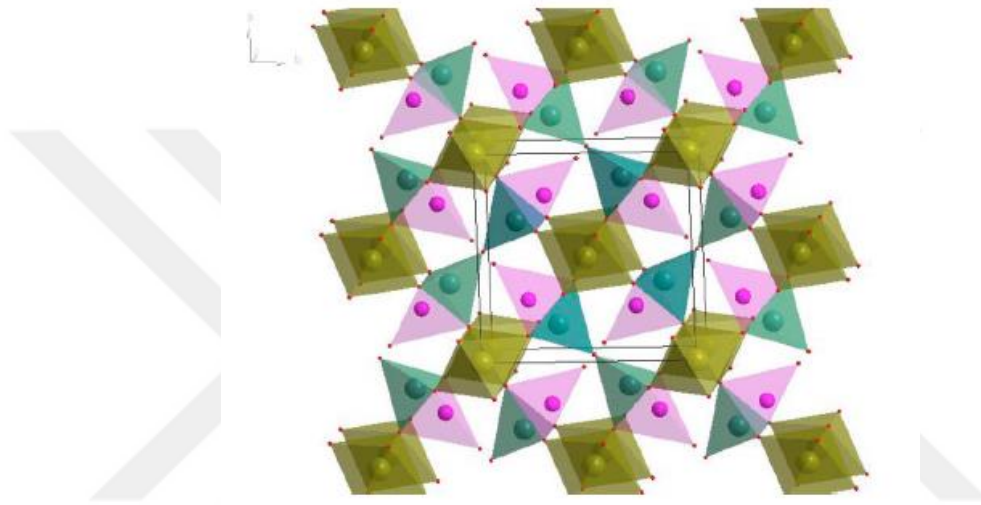


Şekil 2.4. Mullit kristallerinin çubuksu yapısı (Wang vd., 2015).

2.2.2. Kristal yapısı

Mullitin karakteristik kristal yapısı, c ekseninde paralel dizilmiş AlO_6 oktahedralarının köşelerini ortak kullanan ve ortorombik bir zincir yapısı oluşturmaktadır (Fisher vd., 2012). 3:2

mullit olarak tanımlanan stokiyometrik kompozisyonu $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ olan mullitin birim hücrenin boyutları $a=0,7540$ nm, $b=0,7680$ nm ve $c=0,2885$ nm ölçüleri ile ortorombik yapıdadır. Mullit birim hücrenin dizilimi, kenarlarda ve merkezinde AlO_6 oktahedralarının zincirlerinden oluşur. Bu zincirler aynı zamanda c eksenine paralel uzanan çift zincir oluşturan $(\text{Al,Si})\text{O}_4$ tetrahedraları ile birleşir (Anggono, 2005). Şekil 2.5'te c eksenini boyunca uzanan mullit kristal yapısı verilmiştir.

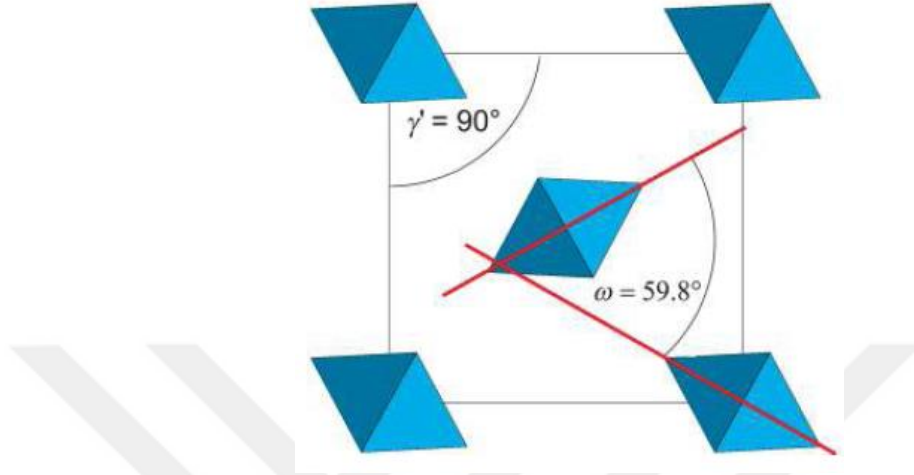


Şekil 2.5. Mullit kristalinin kafes yapısı (Kaduk, 2009).

Şekilde köşelerden birbirine bağlı polihedralar üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturmuştur. Genellikle yalnızca Al atomları tarafından dolu bir oktahedral kısım vardır. Bir tetrahedra bölgesi ($\text{Al}_2 / \text{Si}_3$) kısmen Si ve Al dolu olmasına karşın ikincil tetrahedra bölgesi Al atomları tarafından düşük bir doluluk oranına sahiptir. Bu atomlar birbirleri ile çok yakın dizilmiş atomlardır. Al ve Si doluluk oranları değiştikçe oksijen atomlarının oranları da değişmektedir. Al ve Si atomları çapraz balı olarak ikili zincir şeklinde birbirine bağlı olup O atomları bu zincir yapısı arasında köprü görevi görerek dizilim sağlamaktadırlar (Fisher vd., 2012).

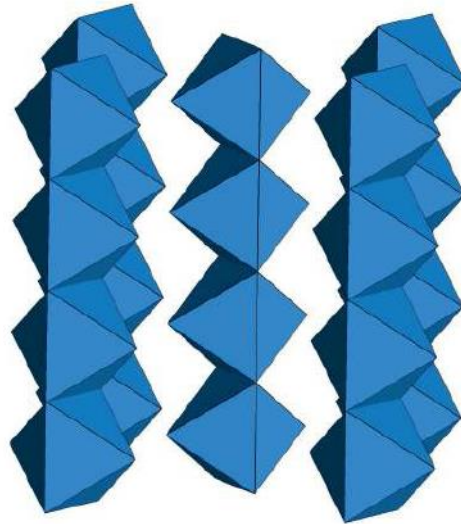
Mullitin X-Işını kırınımı silimanitle benzer şekilde görülmektedir. Silimanit 1:1 silika oranlı $\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}$ kimyasal formülü ile yüksek basınçta oluşan bir alümina silikat yapısıdır. Silimanit ve mullit alümina oktahedralarının zincirlerinden oluşmaktadır. Bu zincirler Si – O ve Al – O köşe paylaşım tetrahedraları ile çapraz bağlanmıştır. Mullit silika bakımından silimanite göre daha zengin (3:2 mullit) veya alümina bakımından zengin (2:1 mullit) bir katı çözüldür.

Şekil 2.6'da mullit yapısında bulunan bir Al-Si tetrahedral yapısında bulunan atomların bulunma açıları belirtilmiştir (Fisher vd., 2012).



Şekil 2.6. Al-Si tetrahedra bağ yapısı (Fisher vd., 2012).

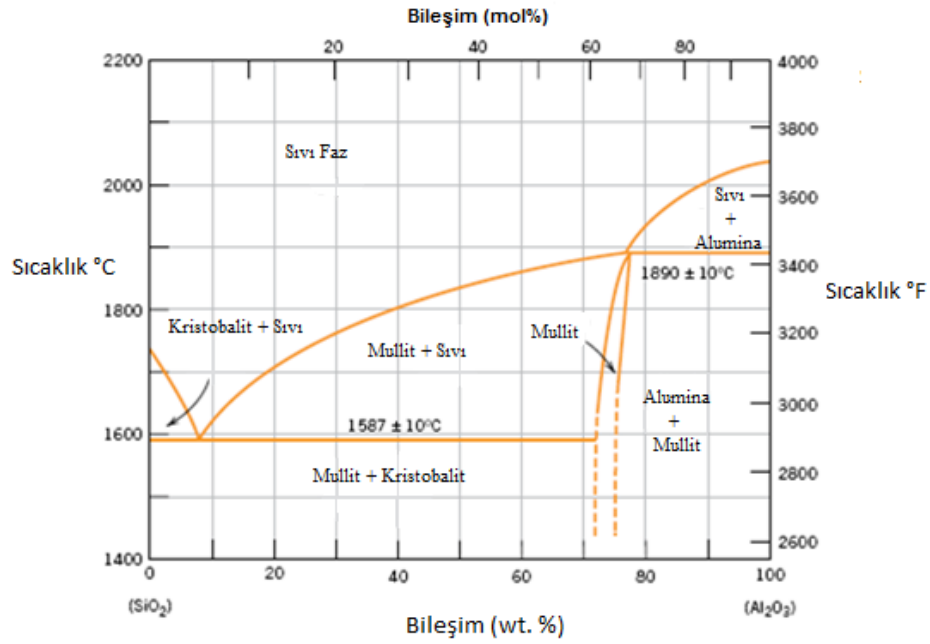
Şekil 2.7'de de AlO_6 atomlarının oktahedral dizilimi verilmiştir. Şekildeki oktahedral yapı a eksenine paralel, b ekseninde 10° , c ekseninde 5° döndürülmüş olarak görülmektedir (Fisher vd., 2012).



Şekil 2.7. Oktahedral AlO_6 atomlarının dizilimi (Fisher vd., 2012).

2.2.3. Faz yapısı

Mullit bazlı seramik malzemeler genellikle refrakter malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Mullit teknolojisi oldukça olgunlaşmış bir teknolojidir fakat halen erime davranışları ve $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ faz diyagramındaki mullit faz sınır şekilleri hakkında soru işaretleri vardır (Duval vd., 2008). $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ faz diyagramı Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ faz diyagramı (Klug vd., 1987).

Ağırlıkça %71,8 Al_2O_3 içeriği bulunan karışım 1810 °C’de uygunsuz bir biçimde eriyik faza geçmektedir (Davis ve Pask, 1971). Mullit üretiminde yapılan çalışmalarda 1853 °C ve üzerinde safirin içerisinde mullitin büyümediğini ancak 1800 °C’de mullit kristallerinin kararlı olduğunu rapor edilmiştir. 1853 °C’de ara yüze yakın mullit kristalleri bulunmuş ancak bu sıcaklıktan sonra camsı faz içerisinde olgunlaşan mullitin camsı faz özellikleri ile aynı olduğundan maksimum 1828 °C altında, %52 alümina içerikli reçetelerde peritektik noktaya ulaşmadan olgunlaştığı gözlemlenmiştir (Klug vd., 1987).

Yapılan farklı çalışmalarda, $3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ve $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ’den katı solüsyonda bulunduğunu rapor etmişlerdir. Bu mullit yapılarını 3:2 mullit ve 2:1 mullit olarak adlandırmışlardır. Faz diyagramlarında ise silika – mullit ötektik sıcaklığının üzerinde bir

sıcaklıkta daha yüksek alümina konsantrasyonlarına geçiş yapan mullit katısı tarif edilmiştir (Duval vd., 2008).

$Al_2O_3-SiO_2$ faz diyagramı incelendiğinde, mullitin uygunsuz bir şekilde eridiği görülmektedir. Bu sonuç, α -alümina ve silika arayüzündeki mullitin peritektik sıcaklığın üstündeki sıcaklıklarda difüzyon çifti tekniği kullanılarak bulunmamasına dayanmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda başlangıç malzemesi olarak kullanılan α -alümina ve silika karışımlarının 1828 °C üzerinde %50'den fazla alümina içeren karışımlarda, alümina oranının yetmediği gözlemlenmiştir (Pask ve Schneider, 2005).

2.2.4. Mullit malzemelerin özellikleri

Termal genleşme

Mullit, yaklaşık olarak $4,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ gibi düşük bir termal genleşme katsayısına sahip olduğundan refrakter malzemelerin üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda düşük sıcaklıklarda düşük ve lineer olmayan termal genleşmeler gösterirken yaklaşık 300 °C'de gösterdiği genleşme daha büyük ve doğrusaldır. Mullitin yüksek sıcaklıklardaki hacimsel büyümesi alümina içeriğine göre azalır. Termal genleşmenin anizotropisi de alümina içeriğine göre azalır. 295 K ve 1300 K arasında ölçülen termal genleşme değerlerinde lineer olmayan davranışlar bulgular arasındadır (Krenzel vd., 2019).

Mullitin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımındaki en önemli faktörü ani sıcaklık değişkenliklerine karşı göstermiş olduğu mükemmel termal direnç, yüksek sıcaklıklarda mükemmel kimyasal ve termal kararlılıktır. Yapılan araştırmalar ve bulgular sonucu mullit içerisindeki alümina oranının artması termal genleşmenin daha da düşmesini sağlamaktadır (Schneider, 1990).

Proses parametreleri ve reaksiyon mekanizması

Mullit tozlarının sentezlenmesi ile ilgili birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerde kullanılan başlangıç malzemeleri, kararlı veya kararsız faz dengelerinin sağlanması, sinterleme sıcaklıkları arasındaki farklılıklar en belirgin ayırıcı faktörlerdir. Yapılan çalışmalarda sol-jel yöntemi ile oluşturulan mullit tozlarında reaksiyonda gözlemlenen kritik noktalar α -alümina ve silika tozlarının arasındaki reaksiyonlarıdır. Bu yöntem kullanıldığında α -alümina tozlarının sistem içerisindeki oranı mullit oluşum reaksiyonunu farklı yönlere çekebileceği gözlemlenmiştir. Alümina ve silikanın sabit sıcaklıklarda aralarında yaptığı reaksiyon, işlem

tekrarlandığında dahi alümina-silika ara yüzünde herhangi bir değişim olmadığını göstermiştir (Pask ve Schneider, 2005). Sentezleme yöntemlerinden hangisi kullanılırsa kullanılсын alümina ve silikanın reaksiyona girdiği oranları önemli bir parametredir.

Mekanik özellikler

Günümüzde yüksek reaktiviteye sahip, homojen ve saf mullit tozları, yüksek yoğunluklu $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ içeriğine sahiptir. Bu malzemelerde, mullit faz oranı 3:2 olarak tanımlanır. Mullit tozları üretmek için kullanılan başlangıç malzemeleri yüksek saflıkta, düşük safsızlık oranlarına sahip malzemelerdir (Osendi ve Baudin, 1996). İnce, saf mullit tozlarının üretimde kullanılması, alümina da dahil olmak üzere diğer birçok seramik malzemedden daha yüksek sıcaklıklarda, daha yüksek deformasyon direnci ve sertliği ile yoğun polikristal mullit elde edilmesini mümkün kılmıştır. Mullit erime sıcaklığı olan $1890\text{ }^\circ\text{C}$ 'a kadar iyi bir kimyasal kararlılığa sahip olmasıyla birlikte, sabit sıcaklıkta bağımsız oksijen boşluk yapısına sahiptir. Bu da mullitin özellikle sünmeye karşı olan direncini arttırmaktadır (Duval vd., 2008).

Mullit bazlı malzemeler iyi bir sürünme direnci ve yüksek sıcaklıklarda yüksek baskı dayanımlarına sahip olmasından dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda gösterdiği eğilme mukavemeti ve sürünme direnci mullit içerisinde bulunan camsız tane sınırlarının oranına göre değişiklik gösterir. Mullit içerisinde camsız faz tane sınırlarının olmadığı durumlarda oda sıcaklığından $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar mükemmel termal şok direnci sağlar. Yüksek sıcaklıkta çalışılması istenilen mullit seramiklerde tane sınırlarının camsız fazdan arındırılması istenir. Bu nedenlerden dolayı yüksek sıcaklık potansiyelini karşılayabilecek yoğun bir seramik malzeme elde edilmesi gerektiğinde mullitin işlenme aşamaları önemli bir hal almaktadır. Çizelge 2.5'te mullit seramiklerin bazı mekaniksel özellikleri verilmiştir (Anggono, 2005).

Çizelge 2.5. Mullit seramiklerin tipik özellikleri (Davis ve Pask, 1971; Anggono, 2005).

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	3,16 – 3,22
Erime Sıcaklığı	°C	1850
Sertlik	GPa	25 °C – 13-15, 1000 °C – 10
	Mohs	7,5
Kırılma Tokluğu	MPa/m	25 °C – 1,5-3
Young Modülü	GPa	140-250
Bulk Modülü	d=2,779 g/cm ³ (x10 ⁶ psi)	13,20
Bağlanma Mukavemeti	MPa	150-500
Termal Genleşme Katsayısı	x10 ⁶ K	300-900°C – 5,6-7,0
Isıl İletkenlik Katsayısı	W/mK	100 °C – 6,07; 600 °C – 4,31; 1400 °C – 3,89
Kopma Modülü	d=2,779 g/cm ³ (x10 ³ psi)	25 °C - 8500
Poisson Oranı	d=2,779 g/cm ³	25 °C – 0,238

Elektriksel özellikler

Yapılan çalışmalarda mullit bazlı seramik malzemelerin dielektriksel direnç değerlerinin yüksek olduğu saptanmıştır. Mullit kristallerinin faradik akım özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda, mullit bazlı seramik-metal kompozitlerin 1000V elektrik akımına dayandığı rapor edilmiştir. Mullit bazlı seramik malzemelerin elektriksel iletkenlik çalışmalarını yapan Malki ve vd. (2014) ise, 550 °C ile 1400 °C arasında ölçüm alan empedans spektroskopisi ile elde ettikleri bulgulara göre 900 °C’de $5,4 \times 10^{-9} \text{ Scm}^{-1}$, 1400 °C’de ise $1,2 \times 10^{-5} \text{ Scm}^{-1}$ olarak rapor etmişlerdir.

Düşük dielektrik sabiti ve yüksek elektriksel direnç özelliklerine sahip malzemeler yeni teknoloji bilgisayarlarda altlık malzemesi olarak kullanılmaktadır. Seramik altlık malzemesi olarak kullanılan mullit, düşük dielektrik katsayısına sahip olduğundan dolayı alümina altlıklara göre %17’ye kadar sinyal iletimini geciktirdiği rapor edilmiştir (Aksay vd., 1991). Çizelge 2.6’da mullit malzemelerin elektriksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. Mullitlerin elektriksel özellikleri (Davis ve Pask, 1971).

Dielektrik Sabiti	6
Spesifik Elektrik Direnci	600 °C – $10^6 \Omega \text{ cm}$
	1400 °C – $10^4 \Omega \text{ cm}$

2.2.5. Kullanım alanları

Yapılan çalışmalarda mullit bazlı seramik malzemelerin genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanıldığı gözlemlenmiştir. Mullit kristal yapısı itibariyle çubuksu yapısını yüksek sıcaklıklara kadar bozmadan koruyabildiğinden ve girdi olarak kullanılan malzemelerde mukavemet arttırıcı, termal şok direncini arttırıcı ve tokluk sağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Termal şok etkisine maruz kalacak malzemelerde genellikle tercih edilen mullit, metalik malzemelerle de kompozit malzeme olarak kullanılmaktadır.

Çeşitli başlangıç malzemeleri ile üretilen sentetik mullit, hidrotermal işlem, reaksiyon sinterleme veya kimyasal buhar çöktürme gibi farklı üretim teknikleri ile üretilir. Mullit malzemelerin en geniş kullanım alanı mullit bazlı refrakter malzemelerdir. Cam ve çelik endüstrisi bu tip malzemelerin iki ana kullanıcıdır. Demir çelik endüstrisinde mullit kullanımı sürünme direncinin ve termal şok direncinin yüksek olması istendiği aşamalarda kullanılır. Yakma elemanları, döküm potaları, cam ergitme potaları gibi malzemelerde tuğla şeklinde kullanılır. Seramik sinterleme fırınlarında tuğla ve destek malzemeleri olarak mullit bazlı refrakter malzemelerin kullanımı da yaygındır (www.azom.com/article.aspx?ArticleID=925).

2.2.6. Mullit üretimi

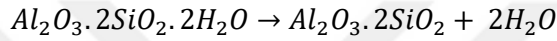
$Al_2O_3 - SiO_2$ sisteminde bulunan en önemli malzeme olan mullit, doğada nadir hatta neredeyse bulunmayan bir malzemedir. Geleneksel seramiklerde ve teknik seramiklerde yaygın olarak kullanılan mullit, oda sıcaklığından 1880 °C sıcaklığa kadar kristal yapısını bozmayan bir malzemedir (Brasileiro vd., 2012).

Seramik malzemelerin üretiminde kullanılan kil ve kaolen türü hammaddeler, SiO_2 ve Al_2O_3 tabanlı malzemelerdir. Seramik malzemelerin üretiminde kullanılan alkali içeriği yüksek feldspatlar ile kil ve kaolen türü hammaddelerin erime ve reaksiyon sıcaklıkları düşmektedir. Sinterleme denilen pişirme sürecine gelen seramik malzeme ısı işlem altında kristal ve mineralojik yapısını değiştirerek mullit yapısını oluşturur. Bu sayede seramik malzemeye kırılma tokluğu, darbe dayanımı ve sertlik gibi başlangıç hammaddelerinin sahip olmadığı özellikler kazandırır.

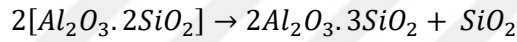
Sentetik mullit üretiminin çeşitli yöntemleri vardır. Bu yöntemlerden biri alümina ve kaolen tozlarının reaksiyon sinterleme metodu ile sentezlenmesidir. Başlangıç malzemesi olarak seçilen kaolen ile saf alümina tozları kullanılarak yapılmaktadır. Kaolen tozlarının termal

dekompozisyonu mullit ve amorf silika oluşturur. Silika alümina ile reaksiyona girdiğinde tekrar mullit oluşturur. Kullanılan bir diğer yöntem alümina ve amorf silika tozlarının sinterlenmesi ile mullit oluşturmaktır. Her iki yöntemde de başlangıç malzemeleri öğütüldükten sonra polimerik bağlayıcı ilavesi yapılır. Toz malzemeler 1100 – 1600 °C sıcaklık aralığında 5°C/dakika sıcaklıkla sinterlenir (Pereira vd., 2014).

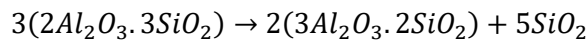
Kaolen dehidratasyonu ile oluşan endotermik reaksiyon karakteristik olarak gözlemlenen ilk reaksiyondur. Bu reaksiyon 500-600 °C arasında gerçekleşir ve çıkan amorf faza meta-kaolen adı verilir. Meta-kaolen dönüşümü reaksiyonu aşağıdaki gibidir (Davis ve Pask, 1971).



Kaolen sinterleme reaksiyonunda görülen ikinci reaksiyon egzotermik bir reaksiyon olan ve 950-1000 °C arasında gerçekleşen meta-kaolen – spinel faz dönüşümüdür. Spinel fazı içerisinde amorf silika fazı ayrışır ve aşağıdaki gibi bir reaksiyon meydana gelir (Davis ve Pask, 1971).



1050-1100 °C arasında gerçekleşen ikinci egzotermik reaksiyon spinel yapının silika fazından kurtulup mullit yapı oluşumu reaksiyonudur. Yüksek sıcaklıklarda ilerleyen reaksiyonlarda mullit gelişimi devam eder ve 3/2 kompozisyona sahip mullit ve kristobalit elde edilir (Davis ve Pask, 1971).



Günümüzde yüksek saflıkta mullit tozu üretimi için kullanılan bir çok yöntem bulunmaktadır. 1650 °C sıcaklıkta %98'inin teorik yoğunluğu 3.17 g/cm³ olan yüksek sıcaklıklarda mükemmel dayanım gösteren yüksek saflıkta mullit tozları üretilmektedir. Mullit / kordiyerit tozu üretimi için çeşitli yöntemler denenmiştir. Bu proseslerden birinde mullit ve kordiyerit tozları hazırlanmış ve kordiyeritin erime sıcaklığı olan 1455 °C sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklıkta sinterlenerek üretilmektedir. Diğer bir yöntemde ise mullit ve kordiyerit tozları birlikte %60'ı inorganik koloidal süspansiyon kullanılarak sol-jel metodu ile hazırlanmaktadır. Ziegler prosesi kullanılarak %0,1 impürite içeren (TiO₂, Fe₂O₃, Na₂O) kristalin böhmit minerali ile mullit ve kordiyerit tozlar elde edilmektedir. Kordiyerit ve mullit tozları elde edebilmek için deiyonize su içerisinde SiO₂ oranı %96,5 olan ve alkali seviyesi %

0,03'ün altında olan koloidal silika takviyesi yapılarak tozlar üretilmektedir. Bu süspansiyona suda çözülmüş $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ katıldığında kordiyerit solü oluşturulur (Ismail vd., 1990).



3. ATIK YÖNETİMİ VE GERİ DÖNÜŞÜM

3.1. Tanım

Dünya'daki nüfusun artmasıyla birlikte artan tüketim, doğal kaynakların giderek daha sınırlı kullanılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Doğal kaynak rezervlerinin azalması, hammadde fiyatlarının artmasına ve buna bağlı olarak üretim yapan firmaların ürün maliyetlerine etki etmektedir. Örgütsel anlamda daha yeşil bir gelecek için büyük adımlar atılmış olursa da, atık üretimi ve bu atıkların yönetimi konusunda sürdürülebilirlik çalışmaları devam etmektedir. 2011 yılında yayınlanan Atık Yönetimi Kanunu'nda atık yönetimi "atıkların toplanması, taşınması, geri kazanımı ve bertarafı, bu tür işlemlerin izlenmesi ve denetlenmesi, bertaraf tesislerinin bakımı" olarak tanımlamıştır (Saari, 2017).

Atık Avrupa Komisyonu tarafından "sahibinin attığı veya atılması gereken bir obje veya nesne" olarak tanımlanmaktadır. Aynı zamanda Norveç Kirlilik Kontrol Yasası atıkların "hizmet endüstrilerinden, üretim endüstrilerinden ve artıma tesislerinden gelen maddeler dahil olmak üzere, kişisel eşya veya maddelerin atılmış nesnelere" olarak tanımlamıştır (Choi, 2016). Avrupa Birliği Atık Çerçeve Direktifine göre atık; "sahibinin attığı veya atması gereken herhangi bir madde veya nesne" anlamına gelmektedir. Endüstriyel atık ise "endüstriyel üretim ve imalattan kaynaklanan atık" olarak tanımlanmaktadır (Saari, 2017).

Atık bazen yanlış yere konan bir kaynak olarak tanımlanırken bazen de üretim prosesleri içerisinde istenmeyen malzeme olarak tanımlanır. Atık yararlı olduğu düşünülmeyen katı veya yarı katı haldeki materyallerdir (Konya vd., 2013). Organik malzemeler içeren atıklar, ekosistem içerisindeki mikro organizmalar tarafından parçalanır. Bu parçalanmadan dolayı ekosistem içerisindeki diğer organizmalara faydalı hale dönüşmektedir. Birçok bilim insanı ekosistem içerisindeki bu döngünün iyi bir uyum içerisinde olduğunu raporlamışlardır. Örneğin; ağaçtan düşen yapraklar parçalandıktan sonra toprağın verimini arttırmaktadır (Choi, 2016). Günlük aktivitelerde farklı içeriklere sahip atıklar ortaya çıkmaktadır. Bunlar evsel atıklar, endüstriyel atıklar, kanalizasyon atıkları, boya kutuları gibi atıklardır (Konya vd., 2013). Bu tür atıkların çevresel etkileri olduğu gibi ekonomik olarak da ülkelere zarar vermektedir. Bu nedenlerden dolayı atık yönetimi önem kazanmaktadır.

Atık yönetimi toplama, taşıma, işleme, izleme ve geri dönüşüm olarak tanımlanır. Bir başka tarifile atıkların geri kazanımı için bir yoldur. Atık yönetimi katı, sıvı veya gazların yönetimini kapsar. Atık yeniden kullanımı karakterizasyon, ayrıştırma, öğütme, küçültme ve

yeniden kullanma proseslerini içerir (Konya vd., 2013). Katı atıklar; kaynakları, üretilen atık türlerinin oranları ve kompozisyonları ile sınıflandırılmalıdır. Atık yönetim sistemleri bu üç alanda finansal, düzenleyici ve kurumsal karar almada kontrol ve gözlem için gereksinimdir (Fossberg vd., 1999).

Endüstriyel atıkların yeniden kullanımı, atığı üreten firma için kullanılabilir bir hammadde haline dönüştürülemediğinde, bu atıkları elden çıkarmadan yararlı bir kullanıma yönlendirilmesine atık değiştirimi denilmektedir. Kuzey Amerika’da bulunan bazı büyük eyaletlerde 50’den fazla atık değişim noktası bulunmaktadır ve bu hizmeti ücretsiz olarak endüstriyel üretim tesislerine sunmaktadır. Atık değiştirme ve öngörülen atık miktarlarına endüstriyel ürün üreticilerinin tepkileri, Doğu Asya ülkelerinin ikincil malzeme pazarları oluşturmasında faydalı olacağını göstermektedir (Fossberg vd., 1999).

Literatür araştırmaları sonucu, atık yönetimi konusundaki çalışmalar daha çok atık yönetiminin yürütülmesi odaklı olmuştur. Yöntemin yürütülmesinden kasıt, yöntemin nasıl uygulandığı, kiminle uğraştığı ve yöntemin ne başardığı ile ilgilidir. Atık yönetiminin fonksiyonuna ve uygulanabilirliğine dikkat eden, çevreye atık tarafından olumsuz etkilerin önlenmesi için yapılan çalışmalar, atıkların verimli kullanılmasının araştırılmasından daha çok incelenmiştir (Choi, 2016).

Her ne kadar atık, atığı oluşturan kişi veya kurumun herhangi bir ek değer getirmemesi nedeniyle arzu edilmese de, bu atığı istenmeyen kılan başka özelliklere de sahiptir. Her şeyden önce atık depolamak potansiyel olarak depolanabilir diğer ürünlere göre yer kapladığından pratik bir yöntem değildir. Uluslararası Standardizasyon Örgütü’nün (ISO) belirlediği ve tüm dünyada uygulanan 14001 Çevre Yönetim Sistemi, bir kuruluşun çevresel performansını bir bütün olarak iyileştirmeye yöneliktir. Bu standart, kuruluşun kaynaklarını daha verimli kullanarak atık miktarlarını azaltmasını, rekabet avantajı ve paydaşların güvenin kazanarak çevre performanslarını iyileştirmesine yardımcı olmaktadır (Saari, 2017).

3.2. Atıkların Geri Dönüşümü

Yaşamını sürdüren her bir birey, her gün birçok farklı ürün satın alır. Alınan bu ürünler üzerinde ambalaj gibi raf ömrünü uzatan malzemeler barındırmaktadır. Ayrıca insanlar tüketim malzemelerini uygun koşullar altında saklayamadıklarında bu malzemeleri atık haline dönüştürmektedirler. Ülkeler, iç politikalarında aldıkları kararlar çerçevesinde çıkardıkları kanunlar ve yönetmelikler doğrultusunda evsel atıkları yerel yönetimler bünyesinde toplatıp geri

dönüşüm tesislerinde çeşitli işlemlerden geçirilerek yeniden kullanıma uygun ürünleri üretebilme imkanı sağlamaktadır. Bu geri dönüşüm işlemleri sayesinde doğaya verilen zarar da düşük seviyelere indirilmeye çalışılmaktadır.

Türkiye’de 02.04.2015 tarihli 29314 sayılı Resmi Gazete ile yayınlanan “Atık Yönetimi Yönetmeliği” Madde 1’de (Ek – 1) açıklanan amaç doğrultusunda çevre ve insan sağlığı açısından zararı bulunan atıkların bertarafı, geri dönüşümü, geri kazanımı gibi yollarla doğal kaynak kullanımını azaltmayı hedeflemiştir (Resmi Gazete, 2015).

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı’nın Atık Yönetimi Yönetmeliği’ne göre atık; “üreticisi ve fiilen elinde bulunduran gerçek veya tüzel kişi tarafından çevreye atılan veya bırakılan ya da atılması zorunlu olan herhangi bir madde veya materyali” olarak tanımlanmaktadır. Atık yönetimini ise “Atığın oluşumunun önlenmesi, kaynağında azaltılması, yeniden kullanılması, özelliğine ve türüne göre ayrılması, biriktirilmesi, toplanması, geçici depolanması, taşınması, ara depolanması, geri dönüşümü, enerji geri kazanımı dâhil geri kazanılması, bertarafı, bertaraf işlemleri sonrası izlenmesi, kontrolü ve denetimi faaliyetlerini” kapsayan süreç olarak özetlemektedir. Bu yöntem hakkında plan yapıp atık yönetimini sağlamak, kısa ve uzun vadeli programlar çerçevesinde devlet politikalarının içerisinde bulundurmaya da görev ve sorumlulukları arasında bulundurmaktadır (Resmi Gazete, 2015).

Endüstriyel ürün üreten tüm tesislerde, proseslerde yaşanan olumsuzluklar nedeniyle oluşan atıklar bulunmaktadır. Atık olarak nitelendirilen bazı malzemelerin işletmeler içerisinde geri dönüşüm sağlanır. Bazı atıkların ise geri dönüşümü olanaksız olduğundan doğaya bırakılmak zorunda kalınmaktadır.

Seramik malzeme üretiminde, prosesler arası ve proses sonunda çıkan atıklar incelenecek olursa, sinterleme işlemine girmeden önce çatlak, kırık veya benzeri bir hata ile karşılaşılacak ürünler yarı mamul olarak nitelendirilen malzemelerdir ve geri dönüşümü çamur haline getirilerek yapılabilmektedir. Buna rağmen sinterleme aşamasından çıkan ve ıskarta olan malzemelerin geri dönüşümü genellikle yapılamamakta ve doğaya atılmaktadır. Ayrıca üretimde kullanılan yardımcı malzemeler de atık olarak doğaya bırakılmaktadır. Bunların yanı sıra sinterleme ve kurutma aşamalarında enerji atıkları (baca gazları, ısı vs.) da geri kazanımlar ile kullanılabilirlerdir.

Seramik malzemelerin üretiminde sinterleme fırınlarında kullanılan enerji çoğu üretici tarafından yeniden kazanım, yani geri dönüşüm ile enerji verimliliği sağlamaktadır. Özellikle

tünel tipi sinterleme fırınlarında enerji geri kazanımında atık ısıların reküperatör yardımı ile fırının farklı bölümlerinde kullanılması, atık ısıların üretimin farklı bölümlerine aktarılması ve yine atık ısıların yanma havasının ısıtılması gibi temel geri kazanım mekanizmaları ile enerji geri dönüşümü sağlanmaktadır.

Üretimde yüksek enerji verimliliğine duyulan ihtiyaç tüm üreticiler için kaçınılmazdır. Küresel enerji talebinin üçte birini karşılayan, tüketimin artması ve enerji açısından zengin fosil bazlı yakıtların tüketilmesine zemin hazırlayan geleceğin, artan enerji maliyetlerinin kısa ve uzun vadede enerji güvensizliği getirmesi muhtemel gözükmemektedir. Üreticilerin fosil bazlı yakıtlara olan bağımlılığının azaltılması ve aynı zamanda üretim faaliyetlerinin çevresel etkilerinin azaltılması bakımından enerji geri kazanımı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmelidir (Wooley vd., 2018). Seramik malzemelerin üretiminde en büyük girdi maliyeti olarak görülen enerji harcamaları ile ilgili birçok geri kazanım çalışmaları yapılmaktadır.

Seramik sektörü sinterleme ve kurutma işlemlerinden dolayı enerji yoğun bir prosesdir. Seramik fırınlarının iç yapısının, oluşturulan ısı enerjisini içeride tutmak amaçlı malzemeler ile yalıtım yapılarak tasarlanmaktadır. Bir seramik fırınının iç sıcaklığı 1215 °C'ye ulaşabilir. Sinterleme işleminde enerji maliyetinin yüksek olması ve atık ısıların kullanılabilirliği enerji geri kazanımını mümkün kılmaktadır. Özellikle yüksek sıcaklıktaki baca gazı ve soğutma havası fırınlardan salınır. Yapılan çalışmalarda soğutma havasındaki ısının geri kazanımı ile %17 tasarruf edildiği görülmüştür. Bazı çalışmalar brulör yanma sistemlerini değiştirerek enerji verimliliğini incelemişlerdir (Çağlayan ve Çalışkan, 2018).

3.3. Seramik Malzemelerde Geri Dönüşüm

Seramik malzemeler kil, kaolen, kuvars ve feldspat hammaddelerinin belirli prosesleri takiben hazırlanarak üretilmektedir. Üretim rakamları arttıkça kullanılan hammadde miktarı da artış gözlenmektedir. Çevresel olarak sürdürülebilir bir yaklaşım, doğal kaynakların korunmasına, üretim maliyetlerinin olabilecek en az seviyeye indirilmesine ve atık kaynaklı çevresel kirliliğin yönetilmesine yardımcı olması bakımından seramik malzeme üretiminde ortaya çıkan atık ürünlerin yeniden kullanılması gerekmektedir (Tarhan vd., 2017).

Porselen karo üretiminde endüstriyel atıkların ve alternatif hammaddelerin yeniden kullanımı ile ilgili birçok literatür çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir çoğu laboratuvar çaplı çalışmalardır (Tarhan vd., 2017). Yapılan bir çalışmada, granit ve kuvarsit gibi doğal

taşların kesilmesi ve parlatılması sonucu oluşan endüstriyel çamurların yer karosu çamurları ile karıştırılarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinde sağlanan verimlilikler değerlendirilmiştir (Torres vd., 2007).

Endüstriyel ve ekonomik büyümeler toplumların yaşam kalitesini arttırdığı gibi, üretim sistemlerinin çevreyi etkileyen atıkların belirli yöntemler altında bertarafı ve geri dönüşümünün de sağlanması gereklidir (Juan vd., 2010). Ekolojik ürünlerin kullanımı ve doğal kaynak tüketiminin azaltılmasının optimize edilmesi için yapılan teşvikler, seramik sektöründe de önemli bir noktaya gelmiştir. Cam malzemelerin geri dönüşümü ile yapılan seramik sır ve engop bünyeleri için fritler son yıllarda geri dönüşüm için uygulanan yöntemlerden biridir. Özellikle seramik karolarının yüzey kaplama malzemesi olan engop ve sırlarda camın geri dönüştürülmesi ile hazırlanan frit, üretim maliyetlerini de düşürmektedir (Fraga vd., 2011).

Herhangi bir üretim sisteminden çıkan atığın yine aynı üretim sistemi için üretim girdi malzemesi olarak kullanımı, en faydalı atık yönetimi yöntemidir. El-Fadaly vd. (2010)'nin yaptıkları çalışmada, seramik sinterlenmiş karo atıklarının yeniden üretim sisteminde kullanılması çevresel atıkların azaltılarak üretim maliyetlerinin düşürülmesini sağlandığı bildirilmiştir. Bu ve bunun gibi çalışmalar yapılarak girdi maliyetleri azaltılabilmektedir.

Seramik malzeme üretim tesislerinden çıkan atıkların farklı malzemeler için girdi hammadde olarak kullanımı da araştırma konuları arasında yer almıştır. Yapılan bazı çalışmalarda; seramik atıkları ile trafik gürültüsü yüksek olan yerlerde ses bariyeri olarak kullanılacak seramik atığı katkılı malzemeler geliştirilmektedir (Arenas vd., 2016).

Seramik üretim tesislerinde, üretim esnasında yaşanan kuru mamul kayıplarının geri dönüşümü ile yeniden çamur haline getirilmesi hemen her firma tarafından uygulanan bir geri kazanım yöntemidir. Seramik sektöründe yapılan bu tip geri dönüşüm çalışmaları ile üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve doğal hammadde kullanımının azaltılması gibi şirketlerin kendi ürettiği ürünleri yeniden kullanımının yanı sıra, sektörün en büyük gideri olan enerji maliyetlerinin düşürülmesi için fazlasıyla çalışma yapılmıştır.

Seramik üretim tesislerinden çıkan bir başka atık malzeme olan sulu çamur ve sır atıkları, birçok firma tarafından geri kazanım yöntemleri kullanılarak üretim proseslerine geri kazandırılmaktadır. Üretim proseslerine kazandırılmayan atıklar ise susuzlaştırma işlemlerinden geçirildikten sonra uygun çöp alanlarına atılmaktadır (Manfredini vd., 1991).

3.4. Seramik Sektöründe Uygulanan Geri Dönüşüm Uygulamaları

Seramik malzemeler, yüksek ısı altında sertleşen, organik ve metalik olmayan malzemeler olarak tanımlanır. Seramik bazlı ürünlerin üretimi esnasında kullanılan ısıl işlem prosesi yüksek sıcaklıkta yapılmaktadır. Ürün başına düşen maliyetlerde enerji tüketimi önemli bir yer tutmaktadır. Enerji tasarrufu veya geri kazanımı, seramik ürün üzerindeki kalitenin ve maliyet azaltmanın yapılması için de önemli bir parametredir (Ordu ve Öztürk, 2017). Seramik sektöründe enerji geri kazanımı yapabilmek için sistem içerisindeki parametrelerin tekniğe uygun şekilde optimize edilmesi gerekmektedir.

Seramik malzeme üretiminde harcanan enerjinin büyük bölümünü sinterleme işlemi tutarken, kurutma işleminde harcanan enerji de küçümsenmeyecek miktardadır. Bu proseste yapılacak optimizasyon daha verimli kurutma yapılmasını sağlarken, ürünlerin ilerleyen proseslerde daha verimli olmasını da sağlamaktadır.

Isıl işlem yapılan tünel tipi fırınlarda, soğutma bölgesinden gelen sıcak hava genellikle kurutma prosesinde kullanılır. Ayrıca buradaki sıcak hava ateşleyicilerde de kullanılmaktadır. Sıcak hava geri kazanımı yapılacak olan kurutma fırınları ile fırın arasındaki mesafe, geri kazanımın yapılabilmesi için önemli bir parametredir. Bu tip bir enerji geri kazanımı ciddi anlamda tasarruf sağlamaktadır. Seramik ürün üretim sektöründe yapılan ve genellikle rastlanan bir enerji geri kazanım çalışması da yanma havası ısıtmasıdır. Yanma havası ısıtma işlemlerinde ısı eşanjörleri kullanılır. Fırın soğutma bölgesinde kullanılan ısının geri kazanımı içinse kojenerasyon sistemi kullanılmaktadır. Kojenerasyon sistemi içerisine alınan sıcak hava fırın soğutma bölgesine konumlandırılan ısı eşanjörü ile beslenir (Ordu ve Öztürk, 2017).

Seramik fırınları termodinamik ve ısı transferi prensiplerine göre çalışır. Atık ısı kazanımı ateşleyici fırın elemanlarının optimum hava/yakıt oranında yanma işlemini gerçekleştirebilmesi için yanma havasındaki ısıyı arttırmak için kullanılır. Fırında harcanacak olan enerji tüketimi normal koşullar altında belirlendikten sonra atık ısı geri kazanım miktarı, yapılacak olan çalışmaya göre belirlenmelidir. Fırın soğutma bölgesinden alınacak atık ısı ile yanma havasını ısıtmak seramik sektöründe sık rastlanan bir uygulamadır. Bu uygulama ile %5'e kadar doğalgaz tasarrufu sağlanabilmektedir (Çağlayan ve Çalışkan, 2018). Yanma işlemini gerçekleştiren ateşleyici elemanlarda yapılan otomasyon uygulamaları ile enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Ateşleyici elemanın hangi bölgede olduğu ve hangi sıcaklık aralığında

işlem göreceği otomasyon yardımı ile sınırlandırıldıktan sonra cihaz kendi ısı dengelerini bilgisayar yardımı ile dengelemektedir.

Yapılan bazı çalışmalar seramik malzeme üretimi yapan firmaların üretimden çıkan nihai ürün atıklarının farklı malzemelerin üretiminde kullanılabildiğini göstermektedir. Satış için uygun olmayan kalitede ürünlerin genel üretime oranı, seramik malzemeyi üreten firmanın kalite anlayışına veya hatayı bertaraf etme yöntemine göre değişkenlik gösterir. Seramik sağlık gereçleri üretiminden çıkan sırlı seramik ürün atıkları genellikle silika, alümina ve demir oksit içeriğine sahiptir. Toplam alkali oranı yaklaşık %4,5 civarındadır ve mineralojik olarak incelendiğinde kuvars, mullit, zirkon ve potasyum feldspat içerir. Bu malzemelerin beton üretiminde yapısal amaçlı uygunluğu incelenen bir çalışmada farklı seramik atığı oranları beton karışım reçetelerine eklenerek kullanılabilirliğin uygunluğu araştırılmıştır. Bu tür atıkların tekrar kullanılması, seramik malzemelerin seçimi ve geri dönüşümü konusunda uzmanlaşmış firmalara iş imkanı sağlaması bakımından ekonomik fayda sağladığı gibi, doğal hammaddelerin harcanmasında yaşanacak azalma ve doğal alanların kirletilmesindeki azalmalar da çevresel yarar sağladığı görülmüştür (Juan vd., 2010).

Benzer bir çalışmada, Hindistan'daki nüfus yoğunluğu ile birlikte inşaat sektöründeki artış ve bu artışa bağlı inşaat malzemelerinde görülen yüksek fiyatlar göz önünde bulundurularak betonda seramik atıklarının kullanımını araştırmışlardır. Seramik atık malzemeler ile birlikte kısmen agrega değişimi yaparak, betonun temel özelliklerini sağlayabilecek bir atık seramik katkılı beton malzeme üretimi araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda seramik atıklarının agrega olarak beton harçlarında kullanım oranı %15'e kadar arttırıldığında basınç dayanımının normal agrega kullanılan beton malzemeye göre %58 arttığı, daha yüksek oranlarda katkılандığında ise basınç dayanımındaki artışın düştüğü görülmüştür. Bu çalışmada yapılan en yüksek agrega değişim oranı %50'dir ve bu oran kullanıldığında maliyetten %18,85 oranında tasarruf edildiği bildirilmiştir (Jacob vd., 2017).

Al-Hamaiedh (2010)'in yapmış olduğu çalışmada, mermer kesim atıklarının seramik çamurlarındaki mekanik mukavemet ve deformasyon gibi temel mekaniksel özellikleri incelenmiştir. Sonuçlara göre; seramik üretiminde kullanılan bentonit yerine girilen atık mermer çamurunun karoların fiziksel özelliklerini önemli derecede etkilemediğini göstermiştir. Fiziksel özelliklerin etkilenmediği göz önünde bulundurularak mermer atık çamurlarının karo üretiminde bentonit yerine kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Seramik sağlık gereçleri, seramik yer ve duvar kaplama seramikleri ve sofra gereçleri sektörlerinde üretim maliyetlerini düşürebilmek için işletmede kullanılan çamur reçetelerinde düşük miktarlarda kırık malzemeyi geri dönüşüm yöntemleri ile üretime hammadde olarak almaktadırlar. Özellikle son yıllarda, atık öğütme tesisleri kurularak belirli bir firmanın atığını alıp farklı firmalara uygun fiyatlara hammadde olarak pazarlayan firmalar da söz konusudur. Bu, hem atığı alıp istenilen tane boyutuna öğütebilen firma için katma değer, hem de kullanıcı firma için ciddi anlamda düşük maliyetli bir hammadde anlamına gelmektedir.



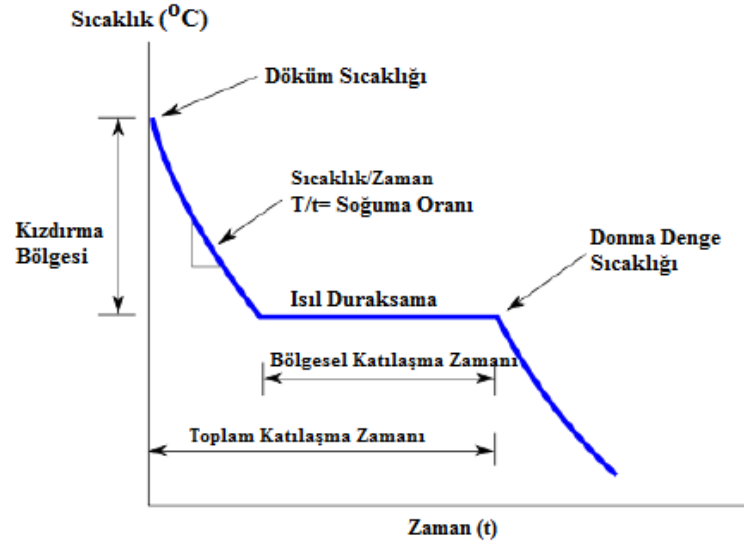
4. METAL DÖKÜM PROSESİ VE SERAMİK FİLTRELER

Metal döküm prosesi, sıvı metalin istenilen şekle sahip oyuk bir boşluk içeren kalıba dökülmesi ve ardından soğutulmasını ve katılaşmasını kapsar. Döküm yöntemi farklı yöntemlerle yapılması şekillenmesi zor malzeme üretiminde kullanılır. Döküm yapılan malzemeler genellikle iki veya daha fazla metalik bileşiğin birlikte eritilmesinden sonra kum kalıplara yapılan döküm malzemeleridir (Jarfors ve Seifeddine, 2015).

Döküm prosesleri arasında belirgin farklılıklar olsa da, hepsinin ortak özellikleri vardır. Örneğin tüm döküm işlemlerinde bir metal alaşımı eritilir ve daha sonra şeklini aldirmek istenilen kalıba dökülür. Zaman içerisinde soğuyarak katılaşması sağlanır. Katılaşma sırasında çoğu metal küçülür ve bu nedenle bu küçülme oranı hesaplanarak hassas döküm işlemi yapılır (Poli, 2001).

Döküm bir katılaşma işlemidir. Metalik malzemelerde katılaşma prosesi, metal malzemenin özelliklerini direk olarak etkiler. Döküm esnasında yaşanan hataların çoğu katılaşma sırasında meydana gelir. Katılaşma iki aşamada gerçekleşir; kristal büyüme ve çekirdeklenme. Çekirdeklenme aşamasında katı parçacıklar sıvı içerisinde oluşur. Bu parçacıkların oluşması esnasında, parçacıkların iç enerjisi parçacığı çevreleyen sıvıdan daha düşüktür. Oluşan katı partikül ile sıvı arasında bir ara yüzey oluşumu sağlanır. Bu ara yüzeyin oluşumu için gerekli olan enerji çekirdeklenme aşamasında ortaya çıkar ve malzeme donma sıcaklığının altında bir sıcaklığa karar soğur. Daha sonra kristal büyüme aşaması gerçekleşir (Jarfors ve Seifeddine, 2015).

Metalik malzemelerdeki soğuma grafikleri, döküm kalitesini belirlemedeki en önemli parametredir. Soğuma eğrisinin en önemli kısmı mikro yapıyı ve özelliklerini etkileyen soğuma hızıdır. Genel olarak hızlı bir şekilde soğutulan dökümün bir yüzeyi ince tane yapısına sahipken diğer yavaş soğutulan yüzeyi ise kaba tanelere sahip olacaktır. Şekil 4.1.'de teorik olarak terminolojiyi anlatan soğuma eğrisi görülmektedir (Jarfors ve Seifeddine, 2015). Grafikte de görüldüğü gibi metalik malzeme en üst limit sıcaklıkta döküm işlemine tabi tutulur ve belirli bir sıcaklık/zaman oranına göre kontrollü olarak soğutulur. Daha sonra ısı belirli bir bölgede tutularak kristal büyümesi oluşması sağlanır ve donma denge sıcaklığının altına soğutularak kaliteli ve kontrollü bir soğuma elde edilir.



Şekil 4.1. Metal döküm işlemlerinde uygulanan teorik soğuma grafiği (Jarfors ve Seifeddine, 2015).

Döküm yoluyla şekillendirilen metalik malzemeler farklı kalıp malzemeleri ve yöntemler ile şekillendirilebilmektedir. Bu malzemeler kum kalıp döküm, basınçlı, hassas, strafor modelli kalıp ve sürekli döküm gibi yöntemler ve malzemelerdir. Kum kalıp dökümde erimiş metal kum malzemedan hazırlanan kalıbın içerisine dökülür. Kalıp, model kalıp etrafına kum sıkıştırılması ile şekillenir. Basınçlı sistemlerde ise kalıpların malzemesi de metalden yapılmaktadır. Eriyik metal basınç yardımıyla metal kalıpların içerisine doğru zorlamalı bir akış ile yönlendirilir ve kalıp dolduktan sonra katılaşmaya bırakılır (Callister, 2014).

Tüm döküm işlemleri erimiş bir metalin bir kalıp boşluğuna doğru doldurularak şekillendirme işlemidir. İşlem kalıp içerisindeki sıvının katı forma dönüştürülmesi olarak devam etmektedir (Poli, 2001).

4.1. Metal Dökümün Tarihi

İnsanoğlu zekasını ve yaratıcılık iç güdülerini, emeğini azaltacak şeyler geliştirmek için kullanmıştır. Doğada bulunan birçok materyalden kase, alet ve silahlar yapmıştır. Zaman içerisinde altın, bakır, demir gibi metalleri keşfeden insan, bu metalleri eriterek şekillendirmiştir. Odun ve kömürü kullanarak demir, bakır ve altın gibi madenleri eritmeyi başaran insanoğlu böylece farklı çağlarda bakır ve demiri kullanarak ihtiyaçları doğrultusunda

nesneler üretmeyi başarmıştır. Döküm, her uygarlığın ilerlemesinde büyük rol oynayan önemli işlemlerden biridir. Tarih öncesi dönemlerin isimleri, o çağda yaygın olarak kullanılan metallerin isimlerinden gelmektedir (<http://www.industrialmetalcastings.com/>).

Döküm işlemi basit, ucuz ve çok yönlü bir metal şekillendirme yöntemidir. Bu işlem 500 yıldan uzun bir süredir kullanılan bir proses olmasına rağmen günümüzde de en yaygın kullanılan metal şekillendirme yöntemidir. Günümüze kadar birçok teknolojik gelişme döküm prosesine uygulanmıştır. Fakat temel ilkeler aynı kalmıştır. Tarihçiler ilk dökümün ne zaman yapıldığı hakkında kesin bir bilgiye sahip olmamakla birlikte milattan önce 4000-3000 arasındaki dönemde Mezopotamya’da bakır döküm yapıldığı söylenmektedir. Demir Çağı olarak adlandırılan çağ, insanlığın gelişiminde ayrılan 3 dönemin (Taş Devri, Tunç Devri, Demir Çağı) sonuncusudur. Demir çağı, demir üretiminin en gelişmiş metal işleme çağı olduğunu simgelemektedir. M.Ö. 4000’li yıllarda Sümerler ve Mısırlılar tarafından ilk demir kullanımı olduğu düşünülürken, 14. yüzyılda Portekizli araştırmacılar aracılığıyla döküm teknolojisi Hindistan ve Orta Doğu’dan Avrupa’ya gelmiştir (<http://shodhganga.inflibnet.ac.in/>).

18. yüzyıla kadar döküm teknolojilerinde olan gelişmeler önemli olmasına rağmen, 19. yüzyıldan itibaren döküm ve döküm teknolojisi büyük ölçüde ilerleme kaydedilmiştir. İngiltere’de 1809 yılında satrifüj döküm yöntemi geliştirilmiştir. İlk kalıp makinesi 1837 yılında Pittsburg’da Jarvis Adams Co. tarafından geliştirilmiştir. 1863 yılında optik mikroskopi alanındaki gelişmeler ile metalografinin gelişmesi döküm işlemlerinde fiziksel analiz yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. 1900’lerin başında İngiltere’de düşük basınçlı kalıplar için ilk patent alınmıştır. 1905 yılında ise H.H. Doehler tarafından ilk patentli kalıp döküm makinesi çıkarılmıştır. 1925 yılında X ışını radyografi analizleri kullanılarak ilk döküm kalitesi incelendi ve tüm askeri uçaklarının metal parçalarının dökümünden sonra bu analizlerin yapılması ve bu analiz standartlarından geçmesi gerektiğine karar verilmiştir. Metal dökümde kullanılan bağlayıcılar ile ilgili 1944 yılında Almanya’da top mermisi üretimi için kimyasal olarak kürlenmiş ısıl reaktif malzemeler geliştirilmiştir. 1948’de sfero sadece laboratuvar dökümlerinde değil endüstriyel uygulamalarda da döküm malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır (Khan vd., 2017).

Kalıp malzemelerinde sertliği arttırmak için 1950’lerde yüksek basınçlı kalıplarla döküm denemeleri yapılmıştır. 1971’de vakumlu şekillendirme veya V-Proses metodu geliştirilerek metal dökümde ilerleme sağlanmıştır. 1974’te Fiat sfero işlemine yönelik kalıplarda gelişmeler sağlamıştır. 1988’de hızlı prototipleme ve CAD/CAM teknolojilerinin

gelişmesi ile daha kopleks yapılar bilgisayar destekli üretilmeye başlandı. 1990'ların ortalarında mikro yapı simülasyon teknikleri ve analiz yöntemleri sayesinde metalurjik malzemelerin ve döküm bileşenlerinin mekanik özelliklerini tayin etmek kolaylaşmıştır (Khan vd., 2017).

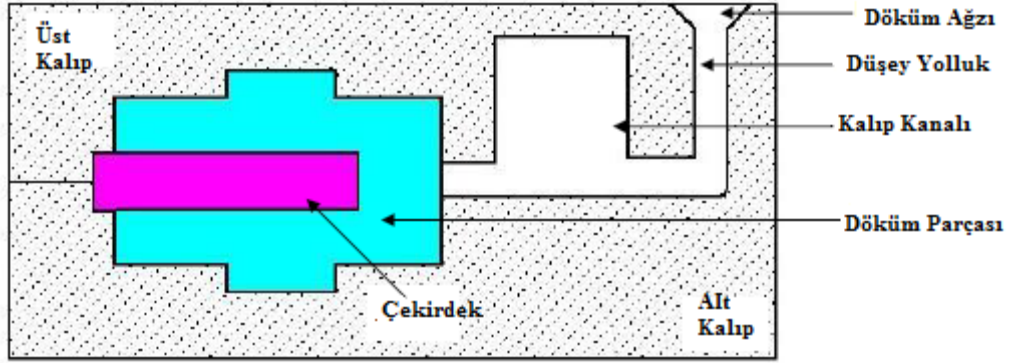
4.2. Metal Döküm Yöntemleri

Metal döküm işlemi, net şekilli ürün üretmenin en basit ve doğrudan üretim yöntemlerinden biri olduğu düşünülmektedir. İşlem esas olarak döküm ürününün elde edilmesi için erimiş metalin döküleceği istenilen şekildeki kalıbın boşluğuna ihtiyaç duymaktadır. En yaygın haliyle erimiş metal kalıba dökülür ve soğutma işlemine tabi tutulur. Soğuyan metal büzüleceğinden ilave metal eriyik kalıba gönderilir. Sonuç olarak asgari kusurlu ürün üretimi sağlanmış olur.

Modern metal döküm çeşitli parametrelere göre sınıflandırılmaktadır. Kalıp tipine göre kum, kokil kalıp gibi, yerçekimi, vakum, basınç etkisi altında kalıp boşluğunda erimiş metal akışına dayalı, sıvı metal kesim gibi metalin durumuna bağlı ve katı, gaz, hava ve vakum gibi kalıp boşluğunun durumuna göre sınıflandırılabilir. Genel olarak bu işlemlerin iki veya daha fazlası bir araya getirilerek döküm işlemleri yapılır (Khan vd., 2017).

4.2.1. Kum kalıp döküm yöntemi

Kum döküm, erimiş metalin bir kum kalıba dökülmesi ve kalıbın içinde katılaşmaya bırakılması olarak tanımlanır. Kum malzemesinin bileşimi yüksek saflıkta silika, bentonitik kil, organik katkı malzemeleri ve sudan oluşan refrakter özellikli malzemelerdir. Kum kalıp hazırlanırken teksir kalıp üzerine kum sıkıştırılarak kuma teksir kalıpta istenilen şekli vermektedir. Dökümdeki delikler ve iç boşluklar çekirdek adı verilen bileşenlerin kalıp içerisine yerleştirilerek oluşturulur. Refrakter sıkıştırıldıktan ve kimyasal olarak sertleştikten sonra kalıp ayırma çizgisinde açılır ve kalıp çıkarılır. Kalıp tasarımı yaparken metal eriyiğın geçeceği döküm ağzı bırakılır (<https://nptel.ac.in/courses/107103012/module2/lec1.pdf>). Kum kalıp ile döküm yöntemi Şekil 4.2'de verilmiştir.

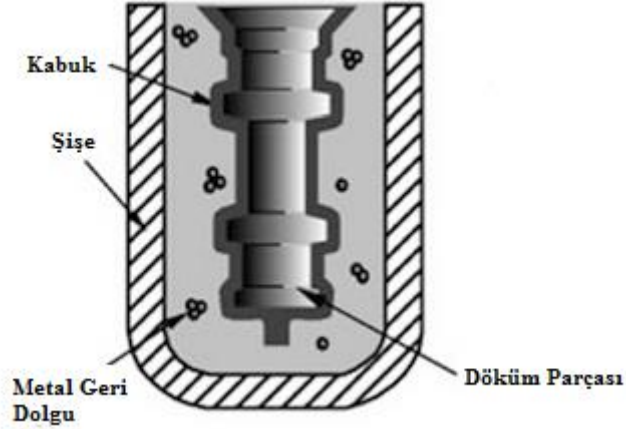


Şekil 4.2. Kum kalıp döküm için tipik kalıp tasarımı (<https://nptel.ac.in/>).

Kum kalıpların özelliklerine bakılacak olursa, kompleks şekilli ürünler üretmenin önünü açmaktadır. Hem iç hem de dış kısmı karmaşık şekilli olan metalik ürünler bu yöntem ile üretilmektedir. Ayrıca çok yüksek ağırlığa sahip ürünler de kum kalıpla döküm yöntemi kullanılarak şekillendirilebilmektedir. Döküm bileşenleri diğer imalat teknikleri ile üretilen metallere göre daha sağlam ve stabildir (<https://nptel.ac.in/>).

4.2.2. Kabuk kalıplama

Kabuk kalıplama işlemi, termoset bir reçine kaplı kum kutu üzerine yerleştirilmiş ısıtılmış bir metal kalıp kullanılarak yapılan döküm yöntemidir. Kumun kürlenmesi belirli bir sürede kalıbın ters çevrilmesi ile yapılır. Fazla kum kutu ters çevrildiğinde giderilir. Daha sonra kabuk kalıptan çıkarılır ve önceden yapılmış diğer kalıp parçası ile birleştirilir. Kabuk kalıplama tekniği kurşun, çinko, magnezyum ve titanyum haricindeki tüm metalik malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan bir tekniktir. Bu teknikle üretilen parçalar genellikle yüksek hassasiyet isteyen mekanik parçalar, dişli gövdeleri, silindir başlıkları, bağlantı elemanları ve aktarma organları gibi parçalardır. Şekil 4.3'te kabuk kalıp döküm tekniği şematik olarak gösterilmiştir (Khan vd., 2017).



Şekil 4.3. Kabuk Kalıp tekniği ile metal şekillendirme (Khan vd., 2017).

4.2.3. Alçı kalıp ile şekillendirme

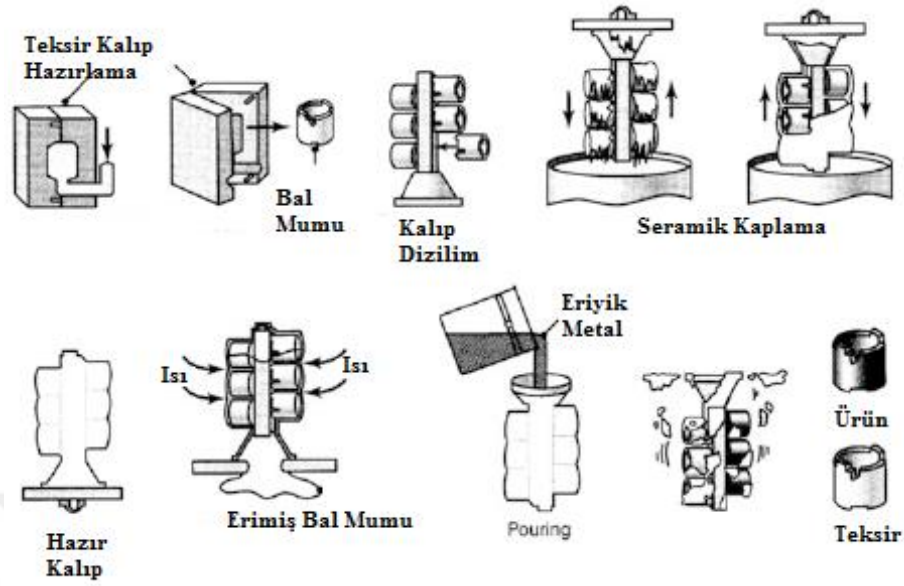
Alçı kalıp ile şekillendirme yönteminde iki parçalı bir kalıp oluşturulduktan sonra metal eriyik bu kalıbın içerisine dökülür ve soğumaya bırakılır. Nihai döküm parçası kalıp kırılarak çıkarılır. Bu döküm tekniğinde alçı malzemesi yüksek sıcaklıklarda formunu koruyamayacağından düşük erime sıcaklığına sahip metallerle sınırlıdır (Khan vd., 2017).

4.2.4. Seramik kalıpla şekillendirme

Seramik kalıplamada teksir üzerine seramik malzemeden hazırlanan harç dökülür ve kimyasal olarak kurummasına izin verilir. Kalıp kurutulur ve sinterlenir. Erimiş metal daha sonra bu sinterlenen kalıp içerisine dökülür ve soğumaya bırakılır. Alüminyum, magnezyum ve çinko gibi metaller, ayrıca bakır ve kalay gibi alaşımlı malzemelerin dışında kalan tüm metallerde bu teknik kullanılabilir (Khan vd., 2017).

4.2.5. Hassas döküm

Hassas döküm işlemi talaşlı imalat veya döküm yoluyla metal kalıp hazırlama işlemi ile başlamaktadır. Metal kısım üzerine bal mumu malzemesinden teksir çıkarılır. Oluşturulan teksir tasarımı üzerine refrakter özellikli seramik malzeme ile kalıbı alınır. Sinterleme işleminden sonra bal mumu erir ve eriyik metal seramik kalıba dökülür. Ürünü kalıptan çıkarmak için kalıp kırılır. Bu teknik genellikle “kayıp bal mumu dökümü” olarak da bilinir. Tüm metal malzemeler hassas döküm yöntemi ile şekillendirilebilir. Şekil 4.4’te hassas döküm prosesi verilmiştir (Khan vd., 2017).



Şekil 4.4. Hassas döküm prosesi (Khan vd., 2017).

4.2.6. Kokil döküm

Kokil döküm erimiş metalin bir potadan kalıba döküldüğü işlemi kapsamaktadır (<https://www.harrisoncastings.com/>). Genellikle kalıcı kalıp dökümü olarak adlandırılır (Khan vd., 2017). Kalıp boşluğu yerçekimi kuvveti haricinde hiçbir kuvvet olmadan doldurulur. Bu işlem hızlı katılaşmadan dolayı kum döküme göre daha iyi yüzey kalitesi ve mekanik özellik sağlar. Kum döküme nazaran daha yüksek döküm kapasitesine sahiptir ancak metal kalıpların maliyeti kum kalıba göre daha yüksektir (<https://www.harrisoncastings.com/>).

Kokil döküm parametreleri özellikle katılaşma ve mekanik özellikler olmak üzere döküm kalitesini olumlu yönde etkiler. Kokil dökümün tercih edilmesindeki temel faktör büyük miktarda özdeş parça elde edilebilmesi ve alüminyum alaşımlarda mükemmel döküm özelliği sağlayabilme açısından (Reddy ve Rajanna, 2009).

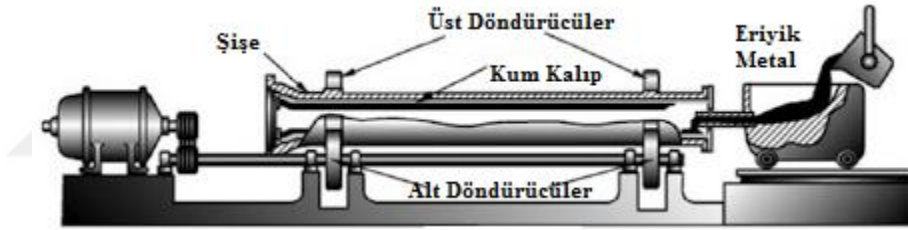
4.2.7. Basınçlı döküm

Basınçlı döküm çok sayıda üretim yapabilmek için hızlı, güvenli ve uygun maliyetli bir üretim prosesidir. Temel olarak, yüksek basınç altında erimiş metalin çelik bir kalıp içerisine doldurularak katılaşması prensibi ile işlemektedir. Basınçlı kalıplara dökülen metal eriyik hızlı bir şekilde soğutulduktan sonra otomatik olarak kalıptan çıkarılır. Basınçlı dökümün avantajı, diğer döküm yöntemlerine göre maliyetinin daha düşük olması, yüzey kalitesi ve ölçüleri aynı

olan homojen ürün üretimidir (<http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html>). Bu döküm tekniği çinko, alüminyum, magnezyum, kurşun, kalay ve bakır gibi demir dışı alaşımların dökümüne uygun olduğu not edilmiştir (Khan vd., 2017).

4.2.8. Santrifüj döküm

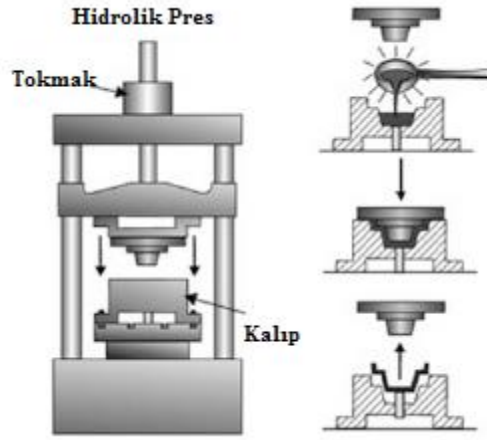
Santrifüj döküm yöntemi metal matrisi ve parçacıkları kalıba dağıtmak için döner bir kalıbın merkezci ivmesinden yararlanarak yapılan döküm yöntemidir. Şekil 4.5'te bu döküm yönteminde kullanılan kalıplar silindirik, demir, grafit ve çelikten yapılmaktadır. Çekirdek yapmak için kum veya refrakter malzeme kullanılmaktadır. Daha çok silindirik yüzeyler elde etmek için kullanılan bu yöntem ile kare veya diğer şekilli malzemeler de üretilmektedir. Fakat nihai ürünlerin iç yüzeyleri yuvarlak olacaktır. Bu teknik daha çok su borusu, kanalizasyon borusu, doğalgaz hattı, fren kampanaları gibi silindirik malzemelerin üretiminde kullanılır (Ebotha vd., 2016).



Şekil 4.5. Santrifüj döküm kalıbı (Khan vd., 2017).

4.2.9. Sıkıştırılmalı döküm

Bu yöntem döküm ve dövme işleminin kombinasyonudur. Bu işlem ile üretilen metalik parça, malzeme özelliklerinin en yüksek mekanik özelliklerine sahip üründür. Bu yöntemde önceden ısıtılmış kalıbın alt kısmına eriyik metal dökülür. Metal katılaşmaya başlar başlamaz kalıbın üstü kapanır ve soğuma işlemi bitene kadar basınç uygulanır. Yüksek basınç ve erimiş metal alaşımın metal kalıp yüzeyi ile yakın teması minimum gözeneklilik ve mükemmel mekanik özellik kazandırır (<http://www.themetalcasting.com/squeeze-casting.html>). Bu yöntem aynı zamanda “sıvı metal dövme” veya “yük basınçlı döküm” olarak da bilinir. Çoğunlukla demir dışı alaşımlar bu yöntem ile dökülür. Fren rotorları, motor pistonları, süspansiyon parçaları gibi metalik parçalar bu yöntem ile şekillendirilir (Khan vd., 2017). Şekil 4.6.'da yöntem şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.6. Sıkıştırırmalı döküm yöntemi (Khan vd., 2017).

4.2.10. Vakum döküm

Vakumlu döküm sisteminde ince kum ve polimer malzeme karıştırılarak kalıp oluşturulur. Ardından bu kalıp aminer buharı ile kürlenir. Daha sonra kalıp robot kol vasıtasıyla eriyik metal içerisine batırılır. Eriyik metalin sıcaklığı, alaşımın likidüs eğrisinden 55 °C yukarıda olduğundan, kalıbın yüzeyine temas eden eriyik metal katılaşmaya başlar. Kalıp tamamen dolduktan sonra eriyik metalden çekilir (Khan vd., 2017).

4.3. Metal Döküm Hataları

Döküm işlemi ürünün tamamlanma süreci boyunca hata oluşma riskini taşıyan bir işlemdir. Bu nedenle döküm parçalarının imalatında hatasız ürün elde edebilmek için döküm prosesinde gerekli önlemler alınmalıdır. Döküm hataları çoğunlukla proses parametreleri ile alakalıdır. Bu nedenle hatasız üretim yapabilmek için proses parametreleri ve işlem sırasının iyi belirlenip uygulanması gerekmektedir (Rajkolhe ve Khan, 2014). Döküm parçalarının imalatında hata oluşma riski her zaman olasıdır. Bu nedenle dökümde yaşanan kusurların sebepleri hakkında bilgi sahibi olmak, hatanın kök nedenini ve çözüm yollarını tanımlayabilmek, ürünün kaliteli ve hatasız üretimi açısından önemlidir (Ingle ve Sorte, 2017).

Döküm işlemlerinde hata oluşma riski prosesin başarılı yapılmadığını ortaya koymaktadır. Yapılan araştırmalar ve kusurların giderilmesi için yapılan çalışmalar, döküm kalitesinin ve sayısının artması ile döküm ürünü başına düşen maliyetlerin azaltılmasına yöneliktir. Döküm kusurlarının en aza indirilmesi için döküm prosesinde gerekli önlemler

alınmalıdır. Döküm prosesi kontrol altına alınsa bile insan faktörüne yönelik hatalara da dikkat edilmelidir. Döküm kusurları, sebepleri ve çözüm yöntemleri arasında çeşitli ilişkiler kurulmuş olup farklı teknik ve analiz yöntemleri geliştirilmektedir (Mehta vd., 2018).

Döküm hataları çoğunlukla işlem parametreleri ile ilgilidir. Bu nedenle hatasız parça üretebilmek için belirlenen parametrelerin kontrolü şarttır. Döküm kusurlarının ilk anda tespiti, önleyici faaliyet uygulama açısından da önemlidir. Parametreleri doğru belirlenmiş ve tasarlanmış bir döküm malzemesi, yüzey kalitesi ve malzeme kalitesi kontrol edilmiş ve doğru hazırlanmış bir kalıp ve doğru uygulanan bir döküm prosesi hatasız döküm elde edebilmek için önemlidir. Parametrelerin kontrolünün yapılmaması durumunda bazı döküm hataları oluşmaktadır. Bu hataları 3 ana başlıkta incelenebilir (Ingle ve Sorte, 2017).

1. Doldurma ile ilgili hatalar
2. Şekil bozuklukları
3. Termal özellikler ile ilgili hatalar

4.3.1. Dolum ile ilgili hatalar

Hava deliği (Blowhole)

Metalik malzemenin katılaşması sırasında oluşan ürün içeriden çıkan gazın yüzeyde bıraktığı bir hatadır. Genellikle kalıbın havalandırmasının zayıf kalmasından, kalıbın içerisinde bulunan çekirdeğin aşırı nem almasından veya döküm yapılan malzemenin doğru sıcaklık değerinde dökülememesinden kaynaklıdır (Ingle ve Sorte, 2017).

Kum kalıntısı

Kum kalıntısı, kum döküm yoluyla şekillendirilen metalik malzemelerde en çok rastlanan hatalardan biridir. Bu döküm kusuru, kalıp yüzeyinin önceki dökümlerden ve buna bağlı termo-mekanik etkilerden dolayı aşınmasından meydana gelmektedir. Kalıbın cidarlarında ve maça bölgelerinde etki eden önemli basma ve kayma gerilimleri kum tanelerinin erozyonuna sebep olmaktadır. Ayrıca metalik malzeme ile kullanılan çekirdeğin uyuşmazlığı da kum tanelerinin çözünmesine sebebiyet verir ve metalik malzeme üzerinde boşluklara sebep olur. Bu hatayı gidermenin yollarından biri çekirdek mukavemetinin artırılmasıdır. Daha yüksek oranda bağlayıcı kullanarak çekirdeğin mukavemetini arttırmaktadır (Ingle ve Sorte, 2017).

Soğuk kapatma

Eriyik metal iki taraflı döküm yolluğu ile kalıba girdiğinde akışkan metal bir yerde birbiri ile çarpışır. Metalik alaşım için düşük sıcaklıkta döküm çarpışma anında füzyonu önler ve füzyondan önce akışkan metalin katılaşmasına ve soğuk kapanmalara neden olabilir. Soğuk kapanma genellikle erimiş metalin viskozitesinin olmayışı veya döküm yolluk tasarımının hatalı olmasından kaynaklanır. Bu hatayı önlemenin en iyi yolu viskoz akışın artırılmasıdır (<https://www.intouch-quality.com/>). Şekil 4.7 bu hataya örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.7. Soğuk kapatma hatası örneği (Ingle ve Sorte, 2017).

Gaz gözenekleri

Metal malzemede dökümden sonra görülen gözeneklilik hatası katılma sırasında kabarcıkların sıkışmasından kaynaklanmaktadır. Hava buharının sıkışmasından kaynaklı olarak sıkça gözlemlenen bu hata, yanmış yağlayıcı malzemeden kaynaklı da gözlemlenmektedir. Metal kalıp içerisindeki boşlukları doldurmaya başladığında hava yüzeye tutunur. Hava kabarcıkları kalıp içerisine metalik eriyik daha çok döküldüğünde sıkışır.

Metalik yüzeyde görülen bu poroziteler metalin döküm sıcaklığının uygun olan sıcaklıktan daha düşük olduğunda, eriyiğin viskoz akışının yetersiz olduğunda, yavaş döküm yapıldığında sıkça gözlemlenir. Ayrıca döküm esnasında döküme ara verilmesi veya eriyik içerisindeki cürufaların toplanamaması ve döküm kalıbının içerisine girmesinden kaynaklı hata oluşumu gözlemlenir (Ingle ve Sorte, 2017).

4.4. Metal Filtrasyonu ve Seramik Metal Döküm Filtreleri

Erimiş metal şekillendirme işlemleri metallerin erimesi, taşınması, alaşımlanması ve döküme hazırlanmasında eriyik faz içerisinde istenmeyen metalik olmayan maddeler oluşur. Erimiş metal oldukça reaktiftir. İşlem aşamaları sırasında gazlar ve bulunduğu pota içerisindeki refrakter malzemeler ile reaksiyona girme eğilimindedir. İstenmeyen fazlar ya sıvı ya da katı haldedir. Metalik eriyik, proses boyunca sıvı faz içerisinde oluşan istenmeyen malzemeler bertaraf edilmeden dökülürse nihai ürünün kullanılamaz hale gelmesini sağlayabilmektedir. Birçok modern ve gelişmiş üretim sistemi, verimliliği arttırmak ve üretim esnasında oluşacak kusurları ortadan kaldırmak için, döküm proseslerinde kullanılan en etkili hata giderme yöntemi olan metal filtrasyonunu kullanırlar (Sheffler ve Colombo, 2005).

Metal dökümde filtrasyon, akışkan metal içerisindeki metalik olmayan cürufların toplanmasını sağlar. Filtre yapısı metal eriyik içerisindeki cürufları, filtre malzemesinin özelliklerine göre kimyasal ve fiziksel olarak toplar. Çeşitli araştırmalar metal döküm filtrelerinin döküm kaynaklı hataların %80'ini engellediğini göstermektedir (<https://www.vesuvius.com>). Cüruf ve akış kontrolü, metal eriyik içerisinde metalik olmayan özellikle mikro yapı kusurlarının giderilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlardır. Bu nedenle metal döküm filtrelerinin kullanılması metalik olmayan kalıntıları gidermek için kullanılmalıdır. Demir ve alüminyum dökümlerde sıkça rastlanan filtrasyon uygulaması çelik dökümde pek yaygın değildir (Wetzig vd., 2018). Döküm esnasında metal eriyik içerisinde bulunan cüruflar mekanik özelliklere, yüzey kusurlarına olumsuz yönde etkide bulunduğu gibi, döküm verimini azaltır ve üretim maliyetini artırır (Bagherian vd., 2009).

Seramik döküm filtreleri iki farklı formda üretilmektedir. Piyasada bulunan filtreler köpük veya bal peteği filtrelerdir. Her iki filtre tipinin de metalik malzemeye kattığı özellik farklıdır. Köpük filtreler gözenek yapısına bağlı olarak metal filtrasyonunu sağlarken bal peteği filtreler hem filtrasyon hem de düzgün ve homojen bir eriyik akışı sağlar. Her iki tipteki filtre de metal döküm malzemesinin kalitesini arttıran malzemelerdir.

Hücresel katı malzemeler incelendiğinde seramikler, polimerler ve metaller olarak 3 ana grupta incelenmektedir. Bu 3 sınıf arasında en az derecede karakterize edilen malzeme seramik hücresel katı malzemelerdir. Her üç malzemedeki de temel özellikleri belirleyen faktörler köpüğün yapıldığı katı maddenin özellikleri, hücre topografyası ve şeklidir (Scheffler ve Colombo, 2005).

Polimer köpük malzemeler kullanılarak üretilen makro poroziteye sahip seramik köpük filtreler ilk olarak 1963 yılında üretilmiştir. Bu tür malzemelerin üretimi için polimer köpük şekillendirme yöntemi en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. İşlem seramik sulu süspansiyonunu açık hücreli ve esnek bir polimer köpük üzerine kaplamayı içerir. Fazla malzemenin uzaklaştırılması ve kurumadan sonra polimer yakılır ve seramik malzeme tek bir aşamada sinterlenir. Köpük malzeme olarak birçok polimer malzeme kullanılabilir. Bunlar poliüretan, poli vinil klorür, polistren gibi polimerler olabilir (Scheffler ve Colombo, 2005).

Genellikle uygun bir süspansiyon haline getirilebilecek ince taneli seramik tozları seramik köpük filtre üretimi için uygundur. Sıvı süspansiyonun reolojik özellikleri sıvı şekillendirme yapılan seramik malzemelerde önemli olduğu kadar bu proses için de çok önemlidir. Katı madde oranı % 50-70 arasında tercih edilir. Bu değerlerin üzerinde bir değer polimer köpük malzeme üzerinden seramik malzemenin uzaklaştırılması sırasında aşırı yüksek viskoziteye neden olabilir. Seramik süspansiyonlar tiksotropiktir, yani viskoz akış sabit bir kayma hızında zamanla azalır ve gerilmenin giderilmesiyle malzeme viskozitesi artar. Bu özellik köpük malzemenin aşırı drenaj olmadan kaplanmasını sağlar. Köpük malzeme uygun bir şekilde kaplandığında seramik yapının mukavemet kazanabilmesi için kurutma işlemi uygulanır. Daha sonraki aşamada kafes sistemini oluşturan organik köpük malzeme ön ısıtma işlemine tabi tutularak yakılır. Bu işlem polimer köpük malzemenin cinsine bağlı olarak 350 – 800 °C arasında bir sıcaklıkta yapılır. Hem ön ısıtma işlemde hem de sinterleme aşamasında sıcaklık geçişlerine dikkat edilmelidir (Scheffler ve Colombo, 2005).

Seramik filtrelerin farklı bir formu da bal peteği filtrelerdir. Bal peteği filtreler doğrudan ekstrüzyon yöntemi ile şekillendirilmektedir. Bu işlemde kullanılan seramik süspansiyonun katı miktarı yüksek hamur şeklindedir. Bal peteği filtre oluştururken makro gözenek yapısı 1 cm'den 1 mm'ye kadar değişir. Bu değişim seramik malzemenin mikro yapısına, kimyasal ve mineralojik özelliklerine, tane boyutuna ve bağ yapısına bağlı olarak değişir. Bal peteğinin kesit geometrisi birbirine simetrik yapıda bir mozaik desen gibidir. Kanal bağlantıları üçgen, kare veya küresel olabilir (Scheffler ve Colombo, 2005). Filtre şekline göre hazırlanan ekstrüzyon kalıbı vakum pres çıkışına bağlanır ve hazırlanan çamur vakum presen geçirilerek uzun sucuk şeklinde filtre malzemesi oluşturulur. Endüstriyel üretim yapan firmalarda vakum pres çıkışında bulunan bant üzerinde malzemeyi eşit uzunlukta kesebilen çelik teller bulunur ve bu çelik teller vasıtasıyla ürünler kesilir. Kurutma işlemi uygulanan

seramik filtreler, filtre üretiminde kullanılan hammaddelerin doğru sinterleme sıcaklığında ve rejiminde sinterlenir.

Metal döküm prosesinde yapılacak olan filtrasyon işleminin avantajları, kullanılan filtre formuna göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 4.1’de filtre formlarına göre filtrasyon işleminin avantaj ve dezavantajları verilmiştir (Akpınar, 2009).

Çizelge 4.1. Filtrasyon İşleminin avantaj ve dezavantajları (Akpınar, 2009).

	Avantajlar	Dezavantajlar
Bal Peteği Filtreler	<ul style="list-style-type: none"> · Metal eriyik lineer akış ile kalıba doldurulur. · Metalik malzemelerde büzülme problemlerini ortadan kaldırır. · Açık gözeneklilik oranı yüksektir. 	<ul style="list-style-type: none"> · Diğer filtre tiplerine göre pahalıdır. · Hücresel yapısı sebebiyle viskoz akışın başlaması ve sürekliliği zordur. · Eleme verimleri köpük filtrelerle oranla düşüktür.
Köpük Filtreler	<ul style="list-style-type: none"> · Gözeneklilik oranı en yüksek filtrelerdir. · Eleme verimi yüksektir. · Ağ yapısı nedeniyle yüzey alanı en geniş filtre çeşididir. · Kimyasal filtrasyon yapabilme yeteneği vardır. · Döküm prosesi esnasında gaz çıkışlarına olanak sağlar. 	<ul style="list-style-type: none"> · Kırılma ve depolama esnasında şeklini koruyamama potansiyeline sahiptir. · Gözeneklerinin tıkanması olasılığı akışın sürekliliğini etkiler.

4.5. Metal Filtrasyon Prensibi

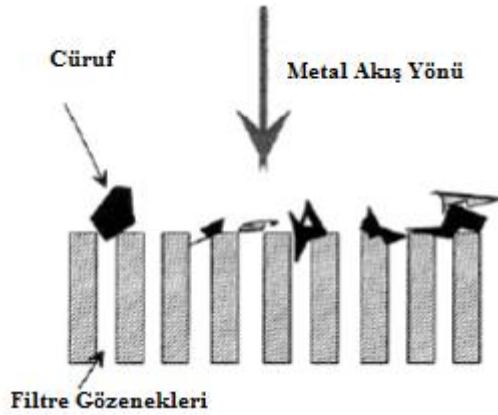
Döküm yoluyla şekillendirilen metalik malzemelerin seramik filtrelerle temizlenmesi önemli bir unsurdur. Metal döküm prosesinde Bernoulli prensibine göre döküm yapılmalıdır. Bernoulli prensibi akışkanlar mekaniğinde önemli bir teoridir. Bernoulli denkleminin çözümlendiği teori, yerçekimi alanındaki sabit akış için ideal sıvının temel yasasını tanımlar. İdeal akışkan yerçekimi alanında bir borudan akarken kazandığı hızın, sıvının boru içerisinde oluşturduğu basınç arasındaki ilişkiyi tanımlar (Qui ve Duan, 2017) Bernoulli prensibine göre “ideal bir sıvının yatay akışında sıvının hızının yavaş olduğu yere göre, sıvının hızının yüksek olduğu yerler arasındaki basınç daha az olur” prensibini savunur (<https://tr.khanacademy.org/>).

Hidrolik koşullar eriyiğin seramik filtre içerisinden akması sırasında filtrasyon teknolojisinin genel etkinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Laminer ve türbülans akış

terimleri metal eriyiklerinin seramik filtrelerden akarken, seramik malzemenin poroz yapısı akış özelliklerini belirlemektedir (Bažan ve Stránský, 2007)

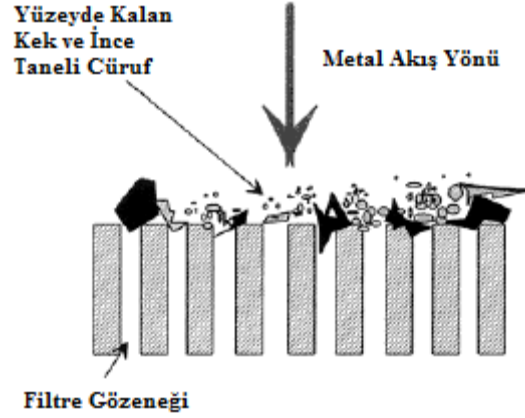
Metal filtrasyonu, metalin homojenliğinin artmasını mekanik özelliklerin iyileşmesini ve birçok metal döküm kusurunun oluşmamasını sağlamakla birlikte metal döküm yüzeylerinin iyileştirilmesini sağlar (Demir, 2018). Filtrasyon işlemi yapılırken, metal eriyiğin seramik filtre içerisinden akarken gösterdiği türbülans akış ve laminar akış gibi akışkan mekaniği özelliklerinin bilinmesi akışkanın kalıp içerisindeki hareketinin kontrol edilmesini sağlar.

Metal filtrelerin mekanizması 3 farklı şekilde incelenebilir. Bunlar eleme, kek filtrasyonu ve derin yatak filtrasyonudur. Eleme şeklinde filtrasyonda filtre gözeneklerinden metal eriyik geçerken, eriyik içerisindeki fiziksel büyüklüğü filtre gözenek boyutundan yüksek olan parçalar filtre üzerinde kalmaktadır. (Şekil 4.8) (<http://www.ductile.org/>).



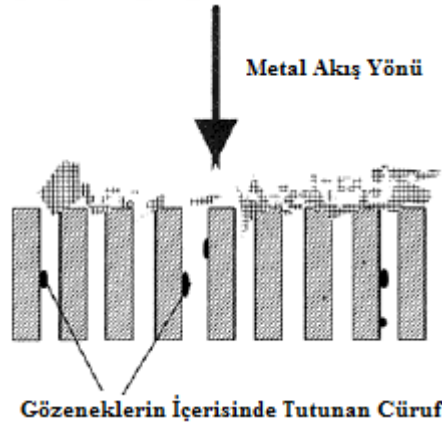
Şekil 4.8. Eleme tipi filtrasyon (<http://www.ductile.org/>).

Kek filtrasyonunda metal eriyik filtre üzerinden geçerken eriyik içerisindeki cüruf “filtre keki” olarak tabir edilen tabakayı oluşturur. Bu kek filtrasyon ortamı olarak işlev görmektedir. Ayrıca filtrenin üst kısmında biriken bu tabaka filtre gözeneklerinden daha küçük istenmeyen partikülleri de tutmaktadır. Şekil 4.9’da kek filtrasyonu görülmektedir (<http://www.ductile.org/>).



Şekil 4.9. Kek filtrasyonu (<http://www.ductile.org/>).

Filtrelerin içyapısı küçük çapıklar ve cüruf parçacıkları yakalayabilmektedir. Akıştaki küçük değişkenlikler partiküllerin filtre gözeneklerinin duvarlarına yapışmasını sağlar. Yapışan partiküller de akış devam ettikçe diğer malzemeleri de üzerine toplar. Bu tip filtrasyon tekniği derin yatak filtrasyonu olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.10'da derin yatak filtrasyonu gösterilmektedir (<http://www.ductile.org/>).



Şekil 4.10. Derin yatak filtrasyonu (<http://www.ductile.org/>).

Bir akışkanın, bir boru içerisindeki hareketi birçok mekanik etkene bağlıdır. Bu mekanik etkenleri akışkanlar mekaniği açıklamaktadır. Metal eriyiğin kalıp içerisindeki hareketini anlayabilmek için, akışkanların hareketini etkileyen faktörlerin öncelikli olarak bilinmesi gerekir.

Gözenekli yapıların oluşturulması yalnızca seramik malzemeler için değil, kompozit köpük malzeme üretiminde de önemli rol oynamaktadır. Yapılması istenilen köpük malzemenin matematiksel modellemesi çalışma koşullarına ve sistemine uygun olarak yapılması gerekir. Buna ek olarak hücreli seramiklerin mekanik özellikleri yapılacak işlemin doğruluğu açısından çok önemli bir parametredir. Göz önünde bulundurulması gereken mekaniksel özellikler, kullanım alanı genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları veya ani sıcaklık değişimlerinin olduğu işlemler olduğundan aşağıdaki sıraya göre dikkat edilmelidir (Sheffler ve Colombo, 2005).

- Elastik modül (Young Modülü)
- Poisson Oranı
- Kırılma Tokluğu
- Çekme Dayanımı
- Basma Dayanımı
- Termal Şok Dayanımı

Hücreli seramik malzemelerin üretiminde kullanılan malzemelerin mekaniksel özelliklerinin, nihai üründe göstereceği mekaniksel performans dışında ürünün işlem sırasındaki çalışma performansı gözeneklilik miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Gözenekli seramiklerdeki hacimsel gözeneklilik miktarı arttıkça mekaniksel özelliklerin düştüğü görülmektedir (Sheffler ve Colombo, 2005).

Hücreli gözenekli seramiklerin içerisinde geçen sıvı malzemenin akış hızı birçok çalışmada kilit noktalardan biri olmuştur (Sheffler ve Colombo, 2005). Mekaniksel özellikler kadar metal döküm prosesi için önemli bir parametre olan akış hızı, döküm yapılan malzemenin yüzey ve yapısal özellikleri için önemlidir.

4.6. Kordiyerit ve Mullit Seramiklerle Yapılan Önceki Çalışmalar

Bu bölümde, kordiyerit ve mullit malzemelerin seramik sektöründe kullanımı için yapılan teknik çalışmalardan bahsedilmiştir. Kordiyerit ve mullit malzemeler ile üretilen yeni ürünler, üretim yöntemleri, geri kazanım uygulamaları ve yardımcı malzemeler ile oluşturulan kordiyerit ve mullit tozları hakkında yapılan araştırmalar incelenmiştir.

4.6.1. Kordiyerit malzemeler ile yapılan çalışmalar

Kordiyerit toz üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar

Kordiyerit malzemeler yüksek sıcaklıkta katı hal reaksiyonları ile başlangıç malzemeleri olan hidroksit, oksit, karbonat, kaolen, kil, talk vb. malzemelerin kalsine edilerek elde edilen, başlangıç malzemelerinin oksit haldeki formudur. Yüksek sıcaklıkta üretilen kordiyerit, başlangıç malzemelerinin arasında gerçekleşen katı hal reaksiyonları, reaksiyonun hızı ve mekanizmasını etkileyen işlem koşullarından etkilenmektedir. Bu koşullar doğrultusunda bazı sıcaklıklarda α -kordiyerit oluşumu gözlenmiş, bazı koşullarda da amorf fazdan kordiyerit oluşumu gözlenmiştir. Menchi ve Scian'ın yaptığı çalışmada, sol jel tekniği ile üretilen kordiyerit tozlarının oluşum mekanizması incelenmiştir. Sol jel prosesinde jelleşmeyi sağlayan psedöböhmitten üretilen alüminyum asetat, tetraetilortosilikat (TEOS), hidrate magnezyum asetat ve fenol formaldehit reçine kullanılarak başlangıç jeli oluşturulmuştur. Başlangıç malzemeleri jelleştirildikten sonra 1300 °C'de kalsine edilip yüksek kalitede kordiyerit tozu oluşumu incelenmiştir.

Ogiwara vd., (2011) yapmış oldukları çalışmada, $\text{Li}_2\text{O-Bi}_2\text{O}$ katkılı termal genişmesi düşük, düşük sıcaklıkta sinterlenen α -kordiyerit üretimini incelemiştir. 1240 °C'de kalsine edilen toz, izopropil alkol içerisinde öğütüldükten sonra ağırlıkça %3 $\text{Li}_2\text{O-Bi}_2\text{O}$ katkılanarak tekrar öğütme prosesine alınmıştır. Hazırlanan toz malzeme 12 saatlik bir ısıl işleme tabi tutulduktan sonra oksijen ortamında 900-1200 °C'de tekrar ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemlerin arasında 200 MPa basınç altında izostatik pres ile şekillendirilmiştir.

Abalı (2006)'nın yaptığı çalışmada, farklı hammadde kaynaklarından üretilen kordiyerit seramiklerin üretimi incelenmiştir. Başlangıç malzemeleri olarak Çanakkale bölgesi killeri, Seydişehir alüminası ve talk kullanılmıştır. Bu malzemeler ile yapılan karışımı öğütme prosesine aldıktan sonra presleyerek 1100-1300 °C'de sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerin sonucunda, 1100 °C'de kordiyerit oluşumunun düşük oranda olduğu mineralojik analiz verilerinden saptanmıştır. 1100 °C'de kordiyerit fazının ana bileşenlerinden olan SiO_2 kuvars fazında olup, kristobalit faz oluşumu saptanmamıştır. Kordiyerit oluşumu yerine de yüksek oranda spinel fazı saptanmıştır. 1300 °C'de yapılan sinterleme işleminde ise kordiyerit faz oluşumunun yüksek oranda olduğu mineralojik ve mikro yapı analizleri ile de doğrulanmıştır. Endüstriyel olarak üretilen kordiyerit tozlarının mekanik mukavemeti 110 MPa, termal genişleme katsayısı ise 2.5×10^{-6} 1/K olup, 1300 °C'de üretilen

tozların mekanik mukavemetinin 96,28 MPa ve termal genleşme katsayısının $2,56 \times 10^{-6}$ 1/K olduğu saptanarak endüstride kullanılabilirliği saptanmıştır.

Choo vd., (2008) yüksek saflıkta kordiyerit toz sentezlemesi üzerine yapmış olduğu çalışmada, sinterleme sıcaklığının saflık oranına etkisi araştırılmıştır. Menchi ve Scian.'nın yapmış olduğu çalışmada olduğu gibi sol jel yöntemi ile üretilen tozlarda magnezyum nitrat heksahidrat, alüminyum nitrat nonhidrat ve TEOS kullanılmıştır. 1000 °C'den başlayıp 1350 °C'ye kadar 4 farklı sıcaklıkta sinterlenen tozlar EDX analizi ile mikro yapıda kordiyerit oluşumu incelenmiştir. Yüksek saflıkta elde edilecek kordiyerit tozlarının 1350 °C'de oluştuğunu, 1000 °C'de başlayan spinel fazının 1200 °C'de azaldığını ve 1300 °C'den sonra safirin ve kristobalit fazlarının çıktığını rapor etmişlerdir.

Kordiyerit tozları, MgO, SiO₂ ve Al₂O₃ sistemi incelendiğinde 1350 °C'de oluştuğu ve sinterlenme aralığının dar olduğu anlaşılmaktadır. Bu oksitleri içerisinde ihtiva eden kaolin ve magnezyum hidroksit ile daha düşük sıcaklıklarda kordiyerit tozu elde edilebilme yönteminin araştırılmasını Kurama vd. (2004) araştırmaları sonucunda saptadıkları bulgulara göre rapor etmişlerdir. Çok ince Mg(OH)₂ ve kaolin tozlarının kullanılması düşük sıcaklıklarda toz sentezlenmesini mümkün kılmaktadır. α-kordiyerit tozlarının sentezlenmesinde tane boyutunun etkisi dışında kimyasal kompozisyon olarak SiO₂/ Al₂O₃ oranının yüksek olduğu farklı kaolin denemelerinde daha yüksek oranda kordiyerit oluşumu gözlemlendiği saptanmıştır. Yüksek yığın yoğunluğu elde etmek için katkı yapılan B₂O₃ oranı %1'ler seviyelerinde olduğunda kordiyerit oluşumunun arttığı rapor edilmiştir.

Kordiyerit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar

Kordiyerit malzemeler, sert ısı değişimlere karşı gösterdiği mükemmel şok direnci ve düşük termal genleşme katsayısına sahip malzemeler olarak bilinmektedir. Genellikle yüksek ısı değişkenliklerin olduğu veya yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilirler. Fuji vd. (2007)'nin yapmış olduğu çalışmada, polimerizasyon reaksiyonları ile katı malzeme içerisinde köpük oluşturularak petek yapılı kordiyerit filtre oluşumu aşamaları rapor edilmiştir. Uygulamada kullanılan monomer malzemeler damıtık su içerisinde dağıtılarak ön karışım numunesi hazırlanmış daha sonra polikarboksilat amonyum tuzu dağıtıcı ajan olarak katılmıştır. Yapılan çalışmada polimerleşme reaksiyonu oluşturabilmek için tane boyutları 3-5 µ aralığındaki polimer ve monomerler kullanılmıştır. Seçilen kordiyerit tozları monomer, polietilen ve dağıtıcı ajan ile birlikte 12 saat öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Öğütmeden

sonra hava kabarcıklarının ortamdaki uzaklaşması için 10 dakika beklenmiştir. Bu karışım Trietanolamine polioksietilen eter sülfat içerisine bırakılarak köpük oluşumu sağlanmıştır.

Kordiyerit malzemelerin cam seramik uygulamalarında da kullanıldığı literatürde rapor edilmiştir. Chen vd., (2018)'nin yaptığı çalışmada, doğal sır hammaddeleri ile (talk, kaolin, Na-feldspat vb.) kimyasal reaksiyonu hızlandıran reaktif maddeler ile (lityum karbonat, kalsiyum karbonat vb.) karıştırıldıktan sonra fritleştirme reaksiyonu ile transparan sır üretimi yapılmıştır. Fosfor katkısı ile spodümen ve anortitin erime sıcaklıkları 150-180 °C azaltılarak kordiyerit olgunlaşma sıcaklığı da 40 °C aşağıya çekilerek kristal faz içerisinde olgunlaşması sağlanmıştır.

Kordiyerit seramik sektöründe termal ve mekanik özelliklerinden dolayı ısı işlemlerde kullanılan refrakter özellikli bir malzemedir. Kordiyerit refrakterlerin özellikleri yüksek sıcaklığa ve termal şok durumlarına maruz kaldığında farklı termal genişlemelere sahip olan mikro yapı ve kristal fazlar arasındaki karmaşıklıktan etkilenir. Kordiyerit refrakterler üzerine yapılan çalışmalarda termal şok davranışları üzerinde durulmuştur. Mikro yapı ve sinterleme sıcaklığının kırılma tokluğunu ve kordiyeritin yoğunlaşmasını etkilediği gözlemlenmiştir. Refrakter malzemenin sinterleme sıcaklığının 1300 °C'ye çıkartıldığında kırılma tokluğunun da arttığı görülmüştür (Sembiring vd., 2016). İbrahim vd. (1995)'nin yapmış olduğu çalışmada, kordiyerit mullit kompozitlerin kil, talk, boksit ve kuvars kullanılarak üretilen refrakter malzemelerin özellikleri incelenmiştir. Üretilmesi beklenen %70-30 kordiyerit kompozisyonunda gözlemlenen mullit oluşumu istenilen seviyede olmadığı görülmüştür. 1250 °C'de oluşan mullit kristallerinin 1350 °C'de kordiyerit kristallenmesini tetikleyerek kordiyerit miktarını arttırdığı görülmüştür.

Singh ve Sharma (2009)'nin yapmış olduğu çalışmada, kordiyerit fırın malzemelerinin termal dayanımlarının artırılarak kullanım ömrünün artırılması araştırılmıştır. Çalışmada düşük demir içerikli hammaddeler kullanılmıştır. Kullanılan hammaddeler Hindistan ve Çin bölgelerinden seçilen killer, talk ve kalsine alümina kullanılarak belirlenen farklı sitokiyometrik oranlarda reçeteler ile kordiyerit refrakter üretimi araştırılmıştır.

Zaionts ve Pankratova (2009)'nin yapmış olduğu çalışmada da Rusya bölgesinde seramik fabrikalarında farklı sıcaklıklarda sinterleme yapan fırınlarda kullanılan refrakterik kil ve manyezit ile yapılan kordiyerit fırın refrakterleri araştırılmıştır.

Chowdhury vd., (2007)'nin yapmış olduğu çalışmada, kordiyerit seramiklerin sentezlenmesi, özellikleri ve uygulama alanları incelenmiştir. 2 kısım olarak yayınladıkları

raporlarında, ilk kısımda kordiyerit toz sentezi ve kordiyerit malzemelerin özelliklerinden bahsetmiştir. İkinci kısımda ise kordiyerit seramiklerin kullanım alanları incelenmiştir. Bu rapora göre kordiyerit seramik malzemeler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan fırınlarda refrakter malzeme olarak, genellikle aynı faz diyagramı içerisinde bulunan mullit ile birlikte kompozit malzeme olarak, kaplama ve ince film üretiminde, filtre üretiminde, altlık ve destek malzemesi, optik, elektronik ve elektro manyetik uygulamalarında olan çalışmaları bildirmiştir. Güneş enerjisi üretim tesislerinde kullanılan güneş panellerinde yüksek yoğunluklu, mükemmel mekanik özellikte, sürünme ve ısıl şok direnci yüksek olan andaluzit, mullit-kordiyerit, korundum-mullit-spinel ve korundum-spinel-zirkonya gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bununla birlikte düşük süneklik ve kırılgenliğinden dolayı büyük ölçekli seramik boru sistemlerinin üretimi zordur. Bu tip malzemelerin küçük ebatlarda üretilip güçlü bağlayıcı özellikteki yapıştırma elemanları ile birbirine bağlamak, bu malzemelerin üretiminde kolaylık sağlamaktadır. Xu vd., (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada, geniş aralıklı termal genleşme katsayısı, kimyasal kararlılığı, termal döngü özellikleri ve termal şok direncine sahip olan kordiyerit cam seramiklerin ısı iletimi gerçekleştiren seramik boru hatlarında içerisinde kaolin, talk, alümina ve TiO₂ gibi inorganik hammaddeler katılarak oluşturulan yapıştırıcıların geliştirilmesi rapor edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yapıştırıcı ajanlar üretilmiş ve seramik boru hatlarına uygulanmıştır. Bu hammaddeler kullanılarak hazırlanan iki farklı termal genleşme değerinde yapıştırıcılar seramik borulara uygulanmış ve termal şok döngülerine maruz bırakılmıştır. Kayma gerilimleri karşılaştırılan yapıştırıcıların 100 döngüden sonra kayma gerilimlerinin %162,48 arttığı gözlemlenmiştir. Termal şok deneyleri sonucunda yüksek sıcaklıklarda mükemmel yapışma sağlayan seramik matrisli kordiyerit bazlı yapıştırıcıların geliştirilmesine katkıda bulunulmuştur.

Kordiyerit bazlı cam seramikler birçok alanda kullanılan malzemelerdir. Ghosh vd. (2014)'nin yapmış olduğu çalışmadaki gibi farklı kompozisyonlarda ve faz sistemi içerisinde kordiyerit cam seramiklerin çeşitli yöntemlerle uygulamaları araştırılmıştır. Seramik duvar ve yer karosu üretiminde sırlama sır geliştirme işlemlerini farklı teknolojiler ile geliştirilmesinin önünü açan malzeme olmuştur. Soğuk pota indüksiyon eritme yöntemi ile eritilen kordiyerit cam seramikler elektronik, optik ve refrakter sektörlerinde kullanılan ilk cam seramik malzemeler olmuştur (Soleimani vd., 2015).

4.6.2. Mullit tabanlı malzemeler üzerine yapılan çalışmalar

Mullit toz sentezleme yöntemleri

Mullit minerali doğada nadir bulunan elementlerdendir. Sentetik mullit seramik malzemeler grubunda önemli bir yer tutar (Fisher vd., 2012). Seramik malzemeler içerisinde bulunan en temel kristal yapı olan mullit (Sánchez-Soto vd., 2018), elektronikten optik malzemelere, refrakter malzemelerden teknik seramiklere kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir (Aksay vd., 1991; Chargui vd., 2018). Mullit farklı başlangıç malzemeleri ile çeşitli reaktif proseslerde ve farklı sıcaklıklarda sentezlenebilmektedir (Chargui vd., 2018).

Kaolinit, andaluzit, kyanit ve silimanit gibi içerisinde doğal alüminasilikat yapılar barındıran kil ve kaolen grubu malzemelerden katı hal sinterleme yöntemi ile mullit sentezlenebildiği gibi bazı oksitler, hidroksitler, inorganik tuzlar, alümina ve silika gibi organo metalik malzemeler ile de mullit sentezlenebilmektedir. Kaoliniti 1000 °C üzerinde sıcaklıklarda sinterlendiğinde

$2Al_2Si_2O_5(OH)_4 \rightarrow 0,66(3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 2,68SiO_2$ şeklinde reaksiyon ile çözünmektedir (Komameni vd., 2005).

1924 yılında yapılan bir çalışmada olduğu çalışmalarda mullitin alümina ve silika başlangıç malzemeleri ile sentezlenmesi α -alümina ve kuvarsın saf formları kullanılarak deneyler yapmışlardır. Kullanılan hammaddeler homojenleştirilerek yüksek sıcaklıklara ısıtılmış ve bu işlem 5 kez tekrar edilerek oluşan fazların etkileşimleri araştırmıştır. 1974 ve 1990 yıllarında yapılan çalışmalarda ise, 2/1 kompozisyonuna sahip 20-50 mm uzunluğundaki mullit kristallerini Czocharlski kristal geliştirme metodu ile sentezlemişlerdir. Sıvı faz sinterleme ile mullit üretiminin bir metodu olan bu metot haricinde sol-jel gibi sıvı fazda mullit kristalleri oluşturma yöntemleri yıllardan beri çalışılmaktadır. Katı ve sıvı faz sinterleme haricinde kimyasal buhar çöktürme (CVD) yöntemi ile de mullit sentezlemesi yapılabilmektedir. (Komameni vd., 2005).

Tüm mullit sentezleme yöntemlerinde başlangıç malzemesi olarak alümina ve silika esaslı başlangıç malzemeleri kullanılmaktadır. Ayrıca Saeidabadi vd., (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada mullit bazlı seramik kompozit üretiminde spark plazma sinterleme metodu kullanılarak tam yoğunlaştırılmış malzeme üretimini incelemiştir. Bu yöntemdeki temel amaç

uzatılmış ısıtma hızı ve kotrollü ısıtma koşulları ile yüksek sıcaklıklarda uygulanan basınçla sinterleme yapmaktır.

Mullit kullanılarak üretilen malzemeler

Mullit, doğal seramik hammaddelerinden, seramik sistemleri içerisinde yüksek sıcaklıklarda oluşan bir mineraldir. Mullit yapıya sertlik ve tokluk özellikleri kazandırmaktadır. Geleneksel seramik malzemelerin tamamında kullanılan kil ve kaolen hammaddelerinin katı hal sinterleme teknikleri ile oluşturulan en temel seramik fazlarından birisidir. Bu belirgin faz, birçok farklı özellikteki malzemelerin üretilmesinde kullanılarak literatürde geniş bir yer bulmuştur.

Mullit malzemeler sahip oldukları düşük ısı iletkenliği, düşük termal genleşme katsayısı ve yoğunluğu, yüksek mekanik dayanım, yüksek erime noktası ve kimyasal kararlılığı, mükemmel termal şok direnci ve sürünme direncine sahip malzemelerdir (Feng vd., 2018). Bu özelliklerinden dolayı mullit malzemeler birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemelerden biri olan fren disklerinde kullanılan mullit malzemelerden yapılan disklerin sürtünme dirençlerinin artırılması için Cai vd. (2015)'nin yapmış olduğu çalışmada, fren diski malzemesinin üretiminde mullit ilavesi ile yoğunluk ve sertliğin arttığı gözlenmiştir. Yapılan mullit katkısı ile malzemede gözlemlenen eğilme azalırken, malzemenin özgül ısı kapasitesinin de arttığı gözlemlenmiştir. Mullit malzeme ile kompozit fren diski karşılaştırıldığında mullit malzemelerin yüke ve hıza karşı daha az hassas olduğu görülmüştür.

Zhou vd. (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada, köpük jel döküm metodu ile gözenekli silika/mullit seramik üretimi silika bazlı çentik atıkları kullanılarak yapılmıştır. Gözenekli seramik malzemeler geniş spesifik yüzey alanına sahip, iyi mekaniksel ve kimyasal stabiliteye sahip malzemeler olarak ısı yalıtım malzemesi, filtrasyon ajanları ve biyo-malzemeler gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin üretiminde kullanılan jel döküm yöntemi yüksek gözenekliliğe sahip malzeme üretimini mümkün kılmaktadır.

Farklı katkı yapılarak mullit malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar da literatürde verilmiştir. Mahnicka-Goremikina vd. (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada, ZrO_2 ve WO_3 katkılı gözenekli mullit seramiklerin termal özelliklerini incelemişlerdir. Bu metal oksitlerin mullit seramiğin sinterleme sıcaklığını $1750\text{ }^\circ\text{C}$ 'den sırasıyla $1650\text{ }^\circ\text{C}$ ve $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye düşürebilmektedir. Katkı yapılan zirkonyum oksit ve tungsten oksitin sinterleme sıcaklıklarını düşürmesinin sebebini korundum fazı üzerinde mullit fazının

kurmuş olduğu baskı olarak yorumlamışlardır. ZrO_2 katkısı mullit kristallerinin uzamasını engellemektedir. WO_3 katkısı ise mullit kristallerinin uzunluğuna göre nispeten daha küçük korundum-mullit fazının oluşmasını sağlayarak kompleks yapı bir yapı oluşturmuştur.

Mahnicka-Goremikina vd. (2014)'nin yapmış olduğu diğer bir çalışmada ise yine metal oksitlerin gözenekli mullit seramiklerin içerisine katkı yapıldığında, porozite oranının miktarsal olarak arttığında arttığı gözlemlenmiştir. Gözeneklilik arttıkça termal iletkenliğin de düştüğü görülmüştür. Her iki çalışma da incelendiğinde metal oksit katkısı ile sinterleme işlemine tabi tutulan gözenekli mullit seramiklerin sinterleme sıcaklıkları 100-250 °C arasında düştüğü görülmüştür.

Mullit tabanlı seramik membranlar, yüksek sıcaklıkta çalışabilen yüksek aşınma direncine sahip olan güçlü filtrasyon yapabilme özelliğindeki malzemelerdir. Rashad ve Balasubramanian (2018)'nin yapmış olduğu çalışmada kil ve alüminyum florid trihidrat ($AlF_3 \cdot 3H_2O$) kullanılarak gözenekli mullit seramik malzeme üretimini incelemiştir. Kil malzemelerdeki düşük Al_2O_3 oranına takviye olarak yapılan AlF_3 , mullit yapı malzeme oluşmasını sağlamıştır. Ayrıca eklenen AlF_3 , sinterleme esnasında mullit faz oluşumunu kuvvetlendirdiği gibi gözeneklilik özelliklerini de büyük ölçüde etkilemiştir. Ağırlıkça %40 eklenen AlF_3 1400 °C'de sinterlendikten sonra %62 görünür porozite oluşturmuştur. Bunun yanında sert mullit tabanlı bir yapı oluşumunu da sağlamıştır. Sistem içerisine flor eklenmiş olsa dahi, mullit kristalizasyon mekanizmasının karmaşık olmasından dolayı topaz ve flo-ro-topaz fazlarının oluşumu gözlenmemiştir. Mullit kristalleri 700 °C'den itibaren çekirdeklenmeye yol açan bir dizi gaz fazı reaksiyonuna sahiptir. Bu reaksiyonlar esnasında yüksek sıcaklıklarda metakaolenden birincil mullitler kristallenir ve bu reaksiyon kinetiği farklı bir fazın oluşumunu engeller.

Geleneksel seramik malzemelerde kullanılan hammaddeler, kil, kuvars ve feldspat olarak gruplanmaktadır. Saf kil olarak tabir edilen kaolen ve kil grubu hammaddeler bünyelerinde alümina ve silika oksitleri içerir (Dağışan Bulucu, 2016). Bu oksitler yüksek sıcaklıklarda seramik malzemelerin temel faz olan mullit fazının oluşmasını sağlar. Geleneksel seramik malzemeler içerisindeki mullit kristalizasyon oluşum kinetiği yapılan bazı analizler ile incelenmiştir. Marinoni vd. (2010)'nin yapmış olduğu çalışmada, yüksek sıcaklık X ışını difraksiyonu (HT-XRPD) analiz yöntemi kullanılarak mullit fazının dönüşüm kinetiği incelenmiştir. Kullanılan kil, kuvars ve feldspat karışımlarındaki kuvars ve feldspat oranlarının değişkenliğinin mullit oranındaki değişimi incelenmiştir. yapılan HT-XRPD analizi sonucunda

kuvars / feldspat oranı bakımından faz bileşiminin oran değiştiğinde etkilenmediği gözlemlenmiştir. Ancak feldspat içeriğindeki artışın mullit aktivasyon enerjisini dūřürdüęü ve mullit kristallerinin büyümesini engellediği bulunmuştur.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Metal eriyiklerin içerisinde metal olmayan ilavelerin varlığı, döküm işleminde tekrar karşılaşılan kusurların en yaygın nedenlerinden biri olduğu yukarıda ifade edilmişti. Metal eriyiklere yapılan bu katkılar, hemen hemen tüm metallerde bulunan ve şekilleri, boyutları, sayısı ve dağılımına bağlı olarak metallerin deformasyon özelliklerini ve nihai ürünün kalitesini etkileyebilen malzemelerdir. Günümüz şartlarında yapılan geleneksel metal döküm yolluk sistemleri bile yüksek kalite standartlarını karşılamak için yeteri kadar cüruf tutma kabiliyetinde değildir. Bu da seramik filtrelerin kullanımını mümkün kılmaktadır. Metal dökümde filtrasyon yapmanın amacı, metal eriyik içerisindeki katı malzemeleri sıvı fazdan ayırmaktır. Seramik filtre üzerinden dökülen metalik eriyik filtrenin içerisinde geçerken, filtre eriyik içerisindeki katı malzemeleri süzmektedir (Taşıçukur vd., 2007).

Metal döküm sektöründe kullanılan seramik döküm filtreleri çeşitli malzemelerden elde edildiği bildirilmiştir. Bu malzemeler alümina, alümina mullit, silisyum karbür, zirkonyum oksit ve kordiyerit mullit filtrelerdir. Bu filtreler pik, sfero ve çelik döküm proseslerinde alaşımın oranına göre eriyik faza geçiş sıcaklığı tespit edilerek kullanılır. Kordiyerit mullit filtreler, yapısal olarak düşük termal genleşme katsayısına ve yüksek termal mukavemete sahip malzemelerdir. Ayrıca faz yapısına bakıldığında ise 1450 °C'ye kadar katı formunu koruyan malzemelerdir.

Seramik sağlık gereçleri fırınlarında kullanılan kordiyerit bazlı refrakter fırın atıklarının seramik döküm filtresi üretilebilirliğinin araştırılması için Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş.'nde bulunan fırınlardaki atıklar kullanılmıştır. Ece Banyo üretim tesisinde 2 farklı tipte birinci pişirim fırını vardır. Bunlar roller tipi ve tünel tipi fırın olmak üzere iki çeşittir. Tünel fırın arabalarının üst kısmında üzerine ürün koymak için kullanılan kordiyerit mullit bazlı refrakter plaka ile roller fırınlarda refrakter plakanın fırın boyunca ilerlemesini sağlayan kordiyerit mullit bazlı refrakter roller barların atıkları kullanılarak filtre yapımı araştırılmıştır.

Çalışmaya, filtre üretiminde kullanılacak olan malzemelerin karakterizasyon analizleri ile başlanmıştır. Ayrıca piyasada satılan kordiyerit mullit tabanlı filtrelerin de karakterizasyon analizleri yapılmıştır. Başlangıç malzemelerinin kimyasal ve mineralojik analizleri piyasa filtresinin analizleri ile karşılaştırılarak seger hesaplamaları yapılmış ve teorik olarak üretilebilecek 10 farklı reçete denemesi yapılmıştır. Bu deneme reçeteleri fiziksel olarak üretilmiş ve 4 farklı sıcaklıkta (1230°C - 1250°C - 1270°C - 1290°C) sinterleme işlemi

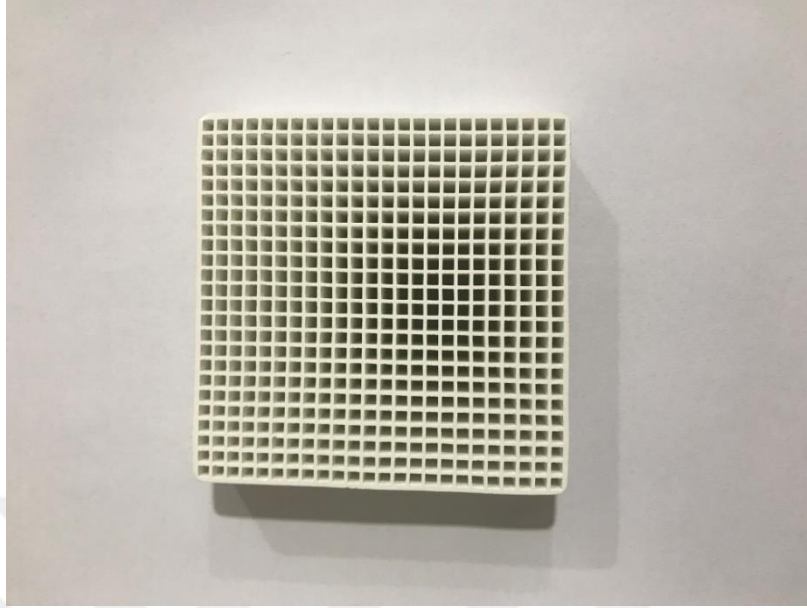
uygulanmıştır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra numuneler üzerine kimyasal, mineralojik ve mikro yapı analizleri uygulanmış ve piyasa filtresine teorik olarak en yakın reçete belirlenmiştir. Bu reçete büyük çaplı laboratuvar çalışmaları yapılarak köpük şekillendirme ve yarı yaş pres yöntemi ile bal peteği şeklinde şekillendirme yapılmıştır. Şekillendirme işlemi sonucunda çıkan ürünlerden numune alınarak Duduoğlu Metal Döküm San. Tic. A.Ş.'nde döküm denemesi yapılmış ve filtre performansı gözlemlenmiştir.

Araştırmalar boyunca yapılan tüm karakterizasyon analizleri Seramik Araştırma Merkezi bünyesinde yapılmıştır. Kimyasal analizler Rigaku ZSX Primus X ışını floresans (XRF) cihazı ile yapılmıştır. Numuneler tungsten karbür kobalt (WC-Co) halkalı öğütücüde 63µm altına öğütüldükten sonra 105°C±5°C etüvde 4 saat kurutulmuştur. Ham numunenin ~1000°C'de kızdırma kaybına bakılmıştır. Daha sonra numuneler Classie M4 marka eritiş cihazında deney için alınan numunenin 7 katı kadar lityum tetraborat ile eritildikten sonra kimyasal analiz yapılmıştır. Mineralojik analizler Rigaku Rint Series X ışını difraktometre (XRD) cihazı ile yapılmıştır. Cu tüpüne 40 kV gerilim ve 30 mA akım uygulanarak elde edilen CuK ışınımı ($\lambda=1,54046 \text{ \AA}$) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler 2θ, 5°'den 70°'ye 2°/dk ile taranarak incelenmiştir. Mikro yapı görüntüleme analizleri ise Zeiss EVO 50 EP ve Zeiss SUPRA 50 VP enerji saçınımlı X ışını (EDX) bağlantılı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.

5.1. Piyasa Filtresi Analizleri

Kordiyerit mullit tabanlı filtreler pik ve sfero döküm ile metalik ürün üreten firmalar tarafından tercih edilen filtrelerdir. Bu tip filtrelere alternatif olarak genellikle alümina mullit bazlı filtreler kullanılmaktadır. Kordiyerit ve kordiyerit mullit bazlı filtreler piyasada genellikle Çin Halk Cumhuriyeti'nde üretilip satılmaktadır.

Yapılan araştırmalar sonucunda Çin Halk Cumhuriyeti'nde kordiyerit mullit filtre üretimi yapan 5 farklı firmadan numune talep edilmiştir. Bu firmalardan biri olan Pingxiang Nanxiang Chemical Packing Co. Ltd. şirketinden numune alınmıştır. Numuneler bal peteği filtre şeklindedir. Numune olarak tedarik edilen filtre Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1: Pingxiang nanxiang chemical packing co. ltd. şirketinden tedarik edilen kordiyerit mullit esaslı metal döküm filtresi.

5.1.1. Piyasa filtresinin kimyasal analizi

Wilhelm Conrad Röntgen tarafından yapılan X ışınlarının keşfi, X ışını tüpünden belirli bir uzaklıkta bulunan malzemelerin üzerine floresan etkisine dayanmaktadır. Bu prensiple yıllar önce keşfedilen X ışını, gaz dolgu X ışını tüplerinin gelişmesi ile radyasyonun anlık algılanmasını sağlamıştır (Langhoff vd., 2006). X ışınının floresans özelliği 1970’li yıllardan beri kullanılarak birçok analitik probleme çare olmuştur. Malzemelerin içerisinde küçük, büyük ve eser miktardaki elementlerin analizinin yapılmasını sağlamıştır (Streli vd., 1999). XRF neredeyse her malzemenin elementer analizi için iyi kurgulanmış ve tahribatsız deney yapabilen bir araçtır (Chen vd., 2008).

Çin Halk Cumhuriyeti’nden tedarik edilen kordiyerit mullit filtre numunesinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.1.’da verilmiştir.

Çizelge 5.1. Piyasada satılan (Çin Halk Cumhuriyeti) filtrenin XRF ile yapılan kimyasal analiz sonuçları.

% a.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂	A.Z.	Toplam
Piyasa Filtresi	37,47	55,32	0,47	0,37	5,98	0,13	0,25	0	99,99

Piyasa filtresine ait Seger analizi Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

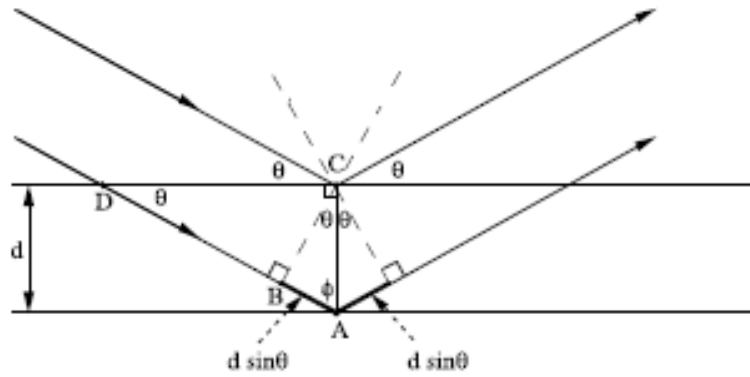
Çizelge 5.2: Çizelge 5.1.'deki filtrenin seger analizi sonuçları.

CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂
0,04	0,95	0,01	0,00	1	3,50	0,02	3,99	0,02
RO		R₂O	RO₂		R₂O₃		SiO₂/Al₂O₃	
0,15		0,00	0,63		0,55		1,14	

Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen metal döküm filtresinin seger analizine bakıldığında SiO₂ ve Al₂O₃ oranının birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hesaplamalardan çıkan MgO oranının diğer oksit değerlerine göre yüksek oranda olması XRD analizlerinde gözlemlenen kordiyerit ve mullit fazlarının bulunabilirliğini arttırmaktadır.

5.1.2. Piyasa filtresinin mineralojik analizi

Mineralojik analiz veya diğer bir adıyla “kırınım (difraksiyon) analizi”, x ışını dalgaları, atomlar arasındaki boşluklara benzer dalga boylarına sahip ışın göndermelidir. Kırınım deneyleri için üç tip dalga etkili olmuştur. Von Laue ve Bragg tarafından bulunan X-ışını kırınımı (XRD) bu analizi yapmak için öncü olmuştur. X-ışınının salınan elektrik alanı elektronları hareket ettirir ve hızlı giden bir dalga oluşturur (Fultz ve Howe, 2013). William Lawrence Bragg, x ışını kırınımının kristallerdeki atomların düzlemleri tarafından yansımından ortaya çıktığı şekli ile görselleşebileceğini keşfetmiş ve bu yansıyan ışınların farklı kristal düzlemlerde farklı gözlemlenebileceğini göstermiştir (Humphreys, 2013). XRD temeli Bragg yasasına dayanmaktadır. Şekil 5.2.'de verilen yasaya göre θ açısı ile gelen ve kristale çarpan x ışını yine aynı açı ile saçılmaktadır. Bu aradaki açı kırınım açısıdır ve farklı kristallerde farklı açı ile kırınım gerçekleşir.



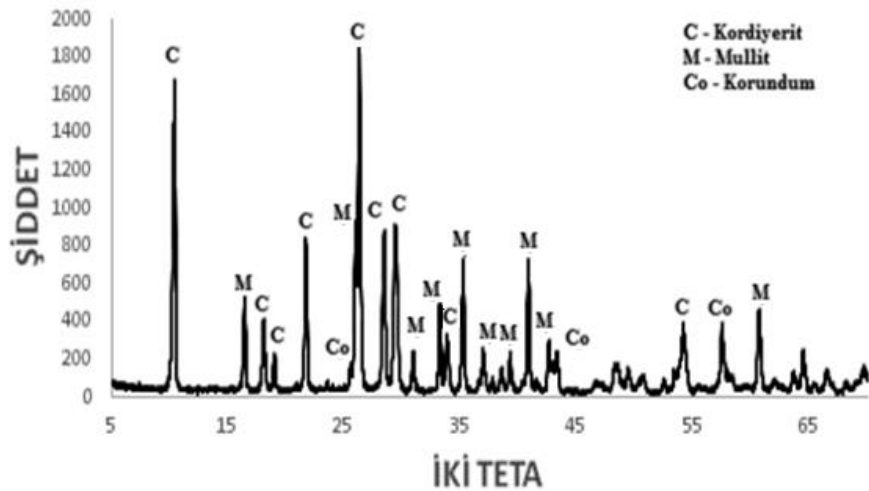
Şekil 5.2. Bragg kanunu (Fultz ve Howe, 2013).

Bu kanuna göre $2d \sin \theta$ uzunluğundaki bir ışın tüpünden etkileyen iki x ışınları için yol uzunluğundaki fark, bir dalga boyuna eşit olduğunda oluşmaktadır. Bu tanım formüle edildiğinde;

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

Bragg formülü oluşmaktadır.

Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen kordiyerit mullit filtre numunesi üzerinde yapılan mineralojik analiz sonuçları Şekil 5.3.'de verilmiştir.



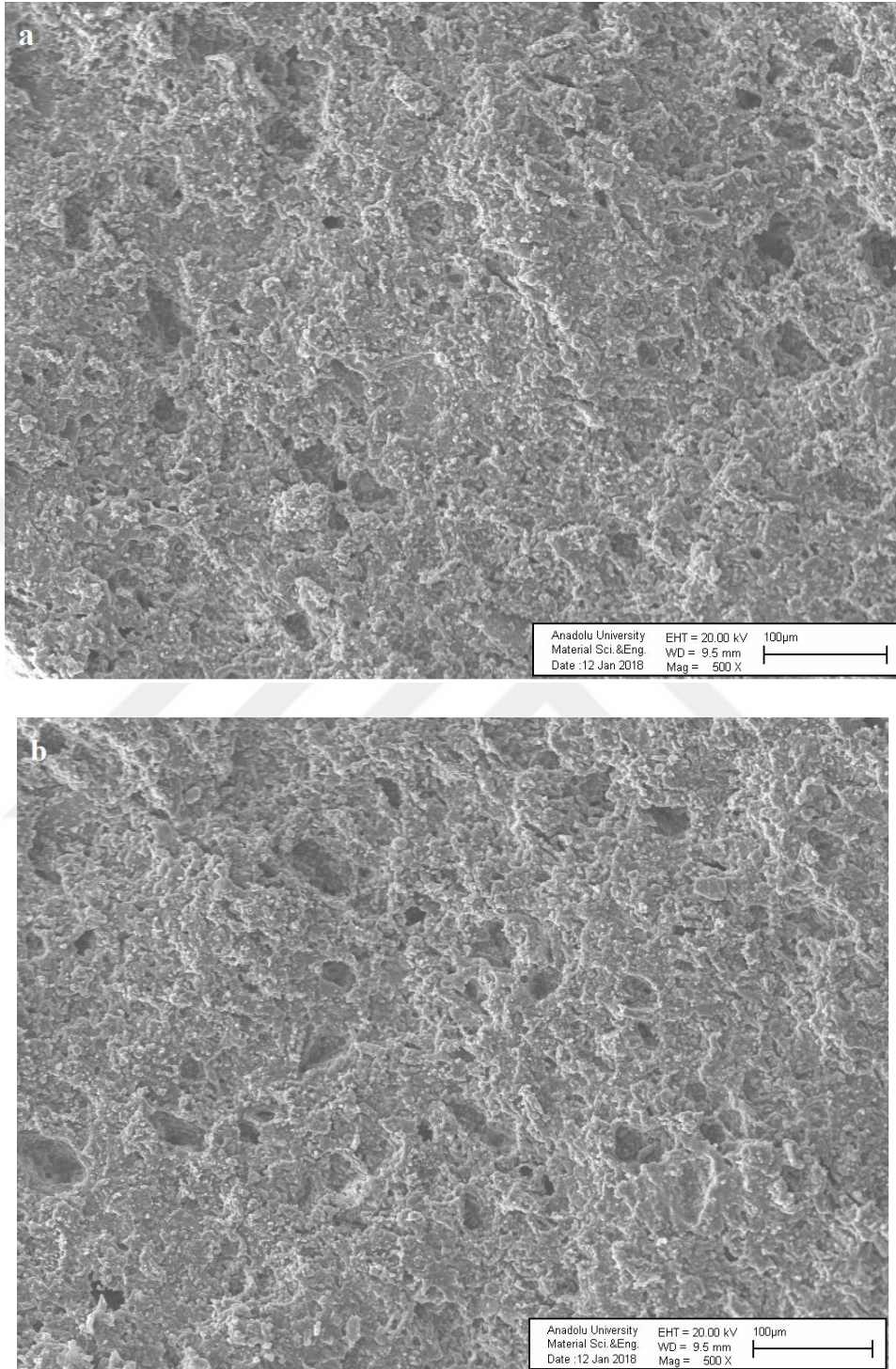
Şekil 5.3. Çin Halk Cumhuriyeti'nden filtrenin mineralojik analiz sonuçları.

Bu mineralojik analizden çıkan sonuca göre; yapının mullit ve kordiyerit olduğu görülmektedir. Kimyasal analiz sonuçları ile birlikte karşılaştırıldığında yapı içerisinde kordiyerit ve mullit oluşumu sağlayan oksitler dışında kalan oksitlerin (Fe_2O_3 , CaO , K_2O , TiO_2) az miktarda olduğu görülmektedir. Kordiyerit oluşumunu sağlayan MgO , aynı faz diyagramında bulunan mullit ile beraber yüksek yoğunlukta yapı içerisinde görülmüştür.

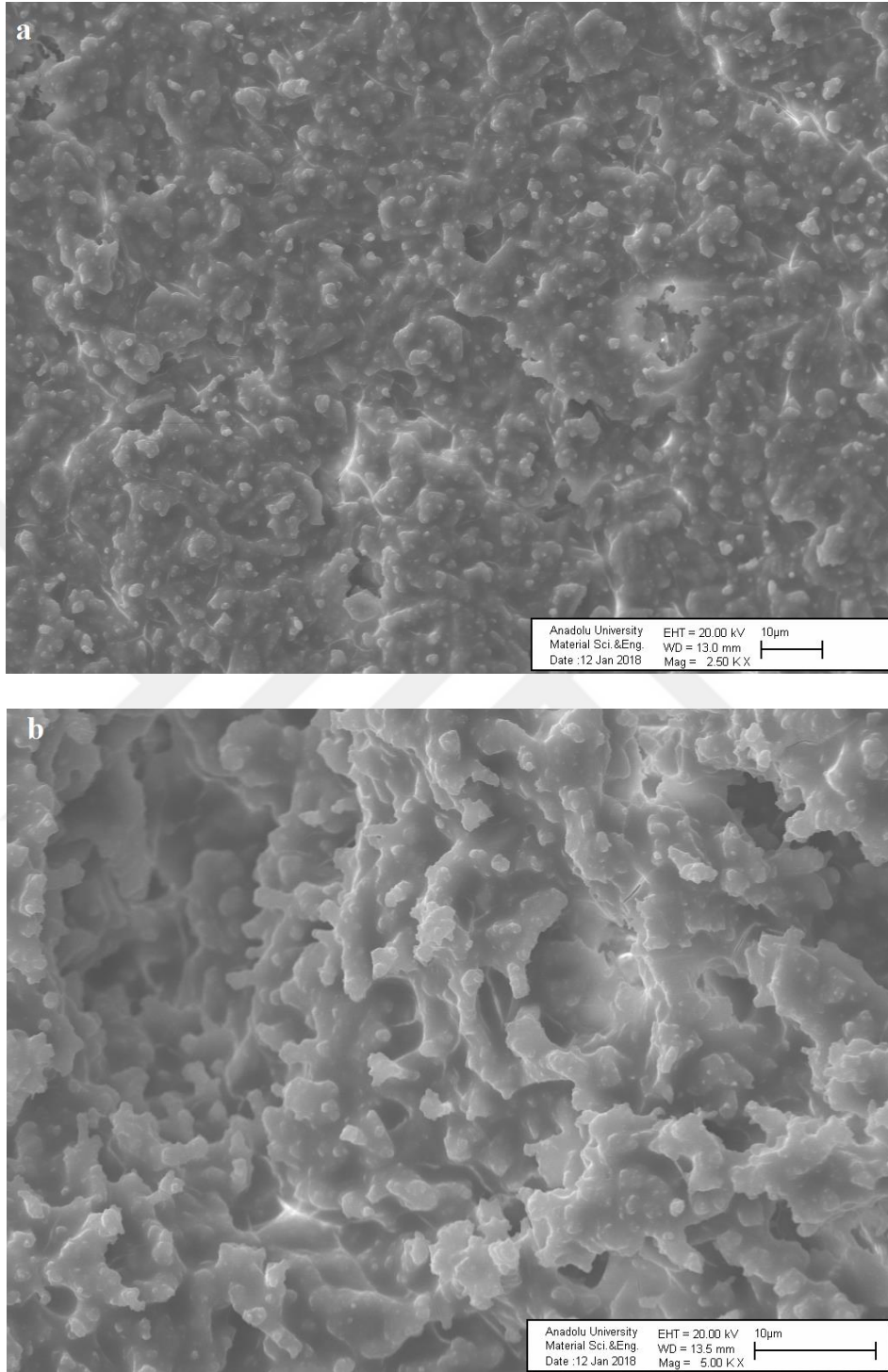
5.1.3. Piyasa filtresinin mikro yapı analizi

Konvansiyonel optik mikroskoplarda 1000 kat büyütme oranlarına kadar görüntüleme yapılmaktadır. Daha iyi bir çözünürlük için görüntüleme için kullanılan radyasyonun dalga boyunun arttırılması şarttır. Elektron mikroskoplarında bulunan elektronlar 2-1000 keV gibi yüksek enerji değerlerine sahiptir. Taramalı elektron mikroskopları (SEM – Scanning Electron Microscope) yüzey topografyası hakkında bilgi sahibi yapabilen mikroskoplardır. Bu topografyayı çıkarırken ayrıca kimyasal kompozisyonu ve kristal yapısını da göz önüne çıkarır. SEM cihazları büyük bir derinliğinden yararlanarak yüzey pürüzlülüğü ne olursa olsun tüm görüntülediği alana aynı anda odaklanabilir. 1nm'lik çözünürlüğe kadar (1000000x büyütme) büyütme yapabilir. Ayrıca yüzey topografyasını yüksek çözünürlükle çıkarırken elektriksel özellikler, kristal sistemler ve kimyasal kompozisyon gibi malzeme özelliklerini de açığa çıkarmaktadır (Vernon-Parry, 2000).

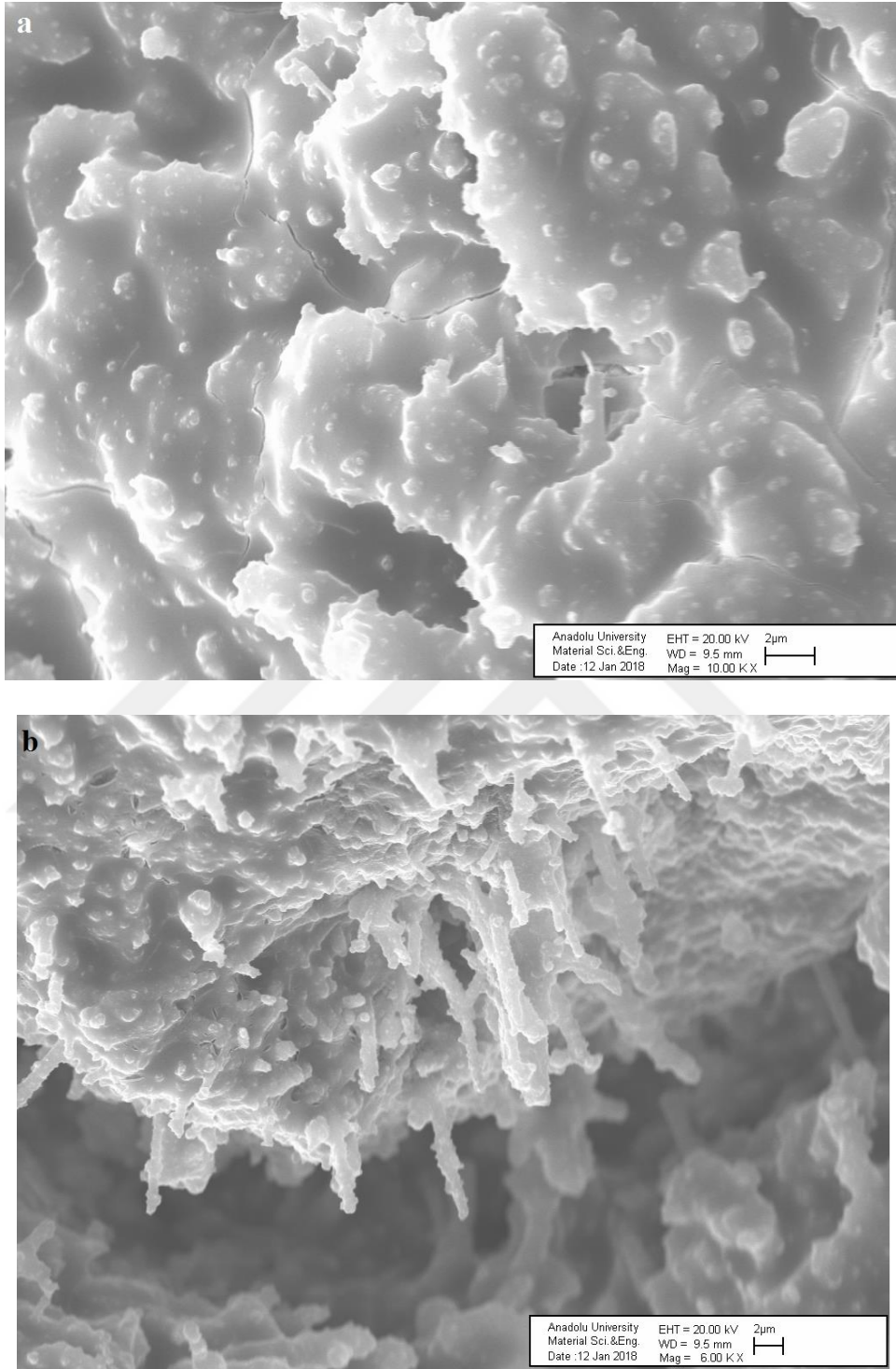
Çalışmada Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin taramalı elektron mikroskobu ile mikro yapı görüntüleri incelenmiştir. Ayrıca mikro yapı analizi haricinde yüzey üzerinde seçilen belirli noktalardan kimyasal kompozisyona da bakılmıştır. Yüzeyin yapısını ve kristal yapıyı görebilmek için 2μ , 10μ ve 100μ 'da görüntüleme yapılmıştır. Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.4. Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin SEM görüntüsü, çubuk ölçeği 100µ'dur.



Şekil 5.5. Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin SEM görüntüsü, çubuk ölçeği 10µ'dur.



Şekil 5.6. Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin SEM görüntüsü, çubuk ölçeği 2µ'dur.

Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, plaka yapıların kordiyerit, çubuksu yapıların da mullit fazları olduğu tahmin edilmektedir. Mikro yapının kimyasal ve mineralojik sonuçlar ile uyumlu olduğu düşünülmektedir.

5.2. Reçete Çalışmaları

Reçete çalışmalarında, Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş. bünyesinde bulunan fırın atıkları kullanılmıştır. Kordiyerit mullit tabanlı plakalar çeşitli ebatlarda kullanılmaktadır. Üretimde kullanılan 490*765*25 mm 490*765*30 mm ölçülerindeki plakalar kullanılmıştır. Fırın plakaları yıllık bazda 1740 adet alınmaktadır. Bu malzemelerin fiyatı ortalama plaka başına 46 \$'dır. Her bir plakanın ortalama ağırlığı 26,5 kg gelmektedir. Yapılan hesaplamalara göre Ece Banyo Gereçleri fırın plakalarını yıllık ortalama 46 ton civarında kullanmaktadır. Fırın rulosu olarak kullanılan kordiyerit mullit tabanlı rulolar ise yıllık 300 adet alınmakta olup toplamda ortalama 2 ton atık çıkmaktadır. Ortalama bir fırın rulusunun maliyeti ise 16,90 \$'dır (1 Dolar = 5,50 TL).

Kordiyerit, MgO-Al₂O₃-SiO₂ üçlü faz diyagramında mullit ile birlikte bulunan alümina silikat yapıda bir malzemedir (Menchi ve Scian, 2005). Kordiyerit oluşumunu tetikleyen temel oksit magnezyum oksittir. Kordiyerit oluşumundaki dikkat edilmesi gereken en önemli husus 1250 °C'nin üzerindeki dar sinterlenme aralığıdır. Kordiyerit malzeme üretim esnasında μ -kordiyerit önce 1000 °C sıcaklık altında kristalize olur ve sonra 1200 °C'nin üzerinde α -kordiyerite dönüşebilir. Bu sıcaklık aralıklarındaki ani değişkenliklerde korundum, spinel, mullit veya serbest kuvars gibi sekonder fazların oluşumu gözlenmektedir (Soltan vd., 2018).

Çalışmada kullanılan deneme reçeteleri belirlenmeden önce fırından alınan kordiyerit mullit tabanlı fırın atıklarının kimyasal ve mineralojik analizleri yapılmıştır. Çin Halk Cumhuriyeti'nden tedarik edilen filtrenin Seger analizi çıkarıldıktan sonra deneme reçetelerinin Seger analizlerinin piyasa filtresine benzerlik göstermesi sağlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda 10 adet deneme reçetesi farklı girdi hammaddeleri ile kullanılarak hazırlanmıştır.

5.2.1. Fırın plaka analizleri

Ece Banyo Gereçleri üretim prosesinde sinterleme işlemi yapılmak için kullanılan Optimal marka 106 metre fırın kullanılmaktadır. Fırın çıkış bölümünden alınan fotoğraf Şekil 5.7.'de verilmiştir. Fırında kullanılan vagonların üzerinde şekilde görüldüğü gibi üretilen ürünler sinterlenmektedir.



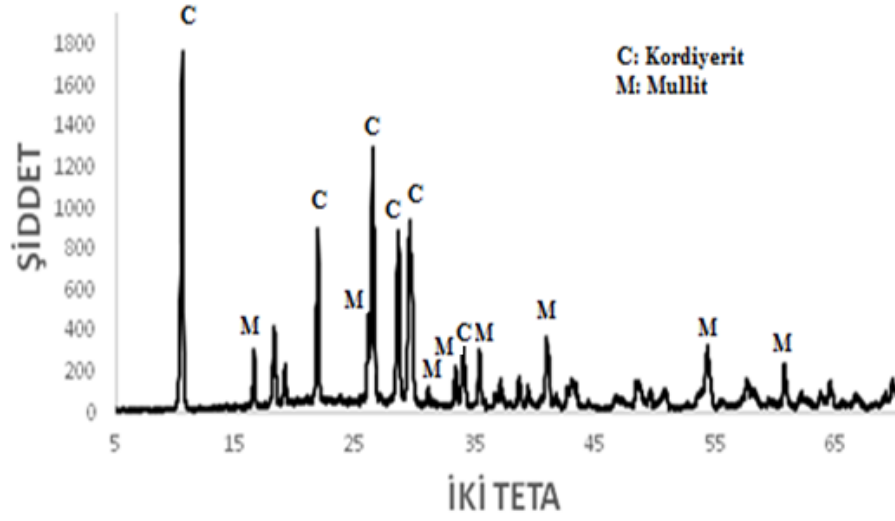
Şekil 5.7. Optimal marka sinterleme fırın (Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş.).

Ece Banyo Gereçlerinde tünel fırınlarda ve roller fırınlarda kullanılan altlık plakaların kimyasal analizleri Çizelge 5.3. 'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Fırın plaka kimyasal analizi.

% a.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	A.Z.	Toplam
Fırın Plaka	45,82	46,44	0,93	5,95	0,45	0,41	0	100

Girdi malzemesi olarak kullanılan fırın plakalarının mineralojik analizi Şekil 5.8. 'de verilmiştir. Plaka atıklarının sonuçlarına göre çıkan fazlar kordiyerit ve mullit olarak tespit edilmiştir. Reçetede çalışmalarında kullanılmak istenen ve nihai üründe oluşması beklenen fazlar da kordiyerit ve mullit fazıdır.



Şekil 5.8. Ece banyo üretim tesisinde tünel ve roller fırınlarda altlık olarak kullanılan fırın plakasının X ışını difraktometresi ile yapılan mineralojik analizi.

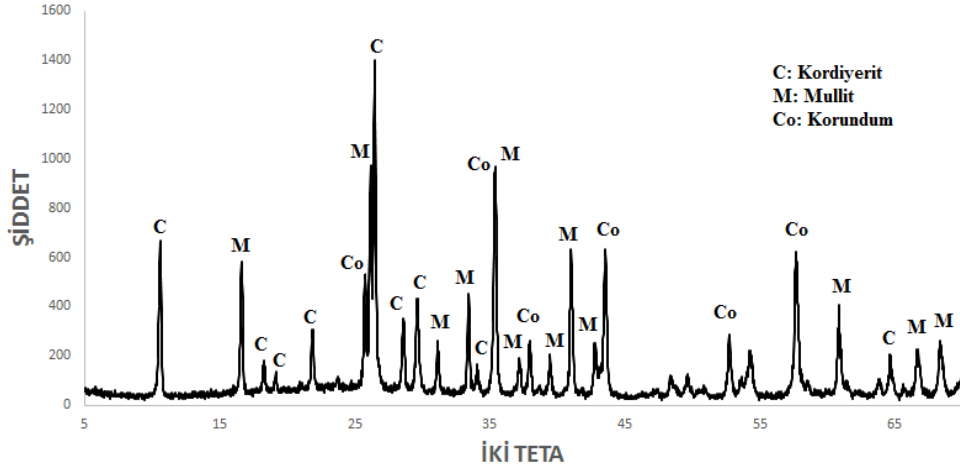
5.2.2. Fırın rulo analizleri

Ece Banyo Gereçlerinde sinterleme işlemi yapabilmek için kullanılan ve Dünya’da yalnızca Ece Banyo Gereçleri üretim tesisinde kullanımda olan Roller Tipi sinterleme fırınlarında kullanılan ruloların kimyasal analizleri Çizelge 5.4.’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Ece banyo üretim tesisinde kullanılan fırın rulo malzemesi kimyasal analizi.

% a.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	A.Z.	Toplam
Fırın Rulo	31,31	63,69	0,56	2,35	0,96	0,90	0,23	0,00	100

Fırın rulo malzemelerinin mineralojik analizi ise Şekil 5.9’da verilmiştir. Rulo malzemesinde kordiyerit, mullit ve korundum fazları tespit edilmiştir. Plaka ve rulo fırın atıkları XRD sonuçları karşılaştırıldığında, rulo malzemesinde mullit pikinin yüksek olması, mullit faz oranının kordiyerit oranından fazla olabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.9. Ece banyo gereçleri üretim tesisinde kullanılan roller fırın rulo malzemelerinin X ışınları difraktometresi ile yapılan mineralojik analizi.

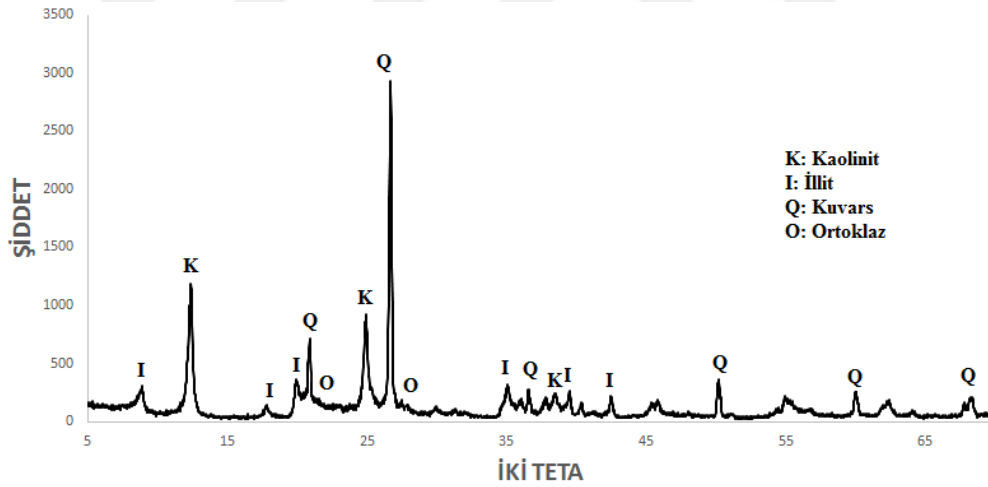
5.2.3. Reçete girdi malzemeleri

Reçete çalışmalarında kullanılacak olan tüm girdi malzemeleri Ece Banyo Gereçleri çamur ve sır hazırlama girdi hammaddeleri olarak kullanılabilirler. Bu hammaddeler seçilirken atık olarak kullanılan fırın plaka ve rulo malzemelerinin piyasa filtre özelliklerinde yapılabirliği göz önünde bulundurulmuştur. Bu hammaddeler dışında kordiyerit oluşumunu tetikleyecek olan temel oksit MgO içerikli iki farklı manyezit kullanılmıştır. Reçetelerde bağlayıcı olarak seramik sağlık gereçleri sektöründe sıkça kullanılan İngiliz Kili ile bünyede şekillendirme aşamasında yardımcı malzeme olabilecek Bulgaristan Kaoleni kullanılmıştır. Kil ve kaolen tipi malzemeler $Al_2O_3 - SiO_2$ tabanlı malzemeler olduğundan ve içeriklerinde MgO bulunmadığından mullit oluşumun destekleyecek (özellikle kaolen) farklı katkıları da kullanılmıştır. Genellikle sırda kullanılan ve CaO – MgO içerikli bir malzeme olan Dolomit girdi malzeme olarak kullanılmıştır. Ayrıca Ece Banyo Gereçlerinde fırınlarda kullanılan diğer bir atık malzeme olan alümina mullit bazlı fırın tuğlaları da girdi olarak kullanılmıştır. Ayrıca mullit oranını arttırabileceği düşünülen alümina kullanılmıştır. Hazırlanan reçete bileşenlerinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 5.5’de verilmiştir.

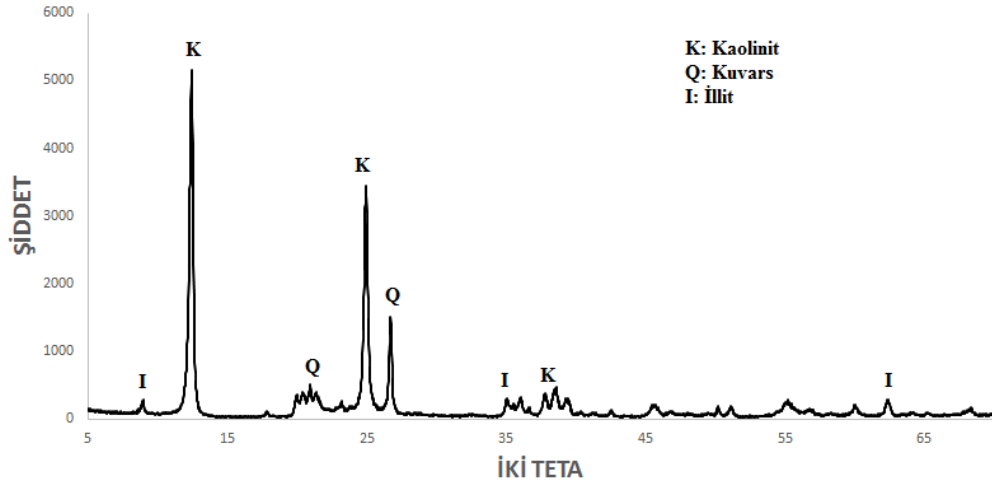
Çizelge 5.5. Hazırlanan reçete malzemelerinin kimyasal analiz sonuçları (sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

Hammadde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	A.Z.	Toplam
Alümina	0,28	97,04	0	0	0	0	0	0	2,68	100
Kaolen	51,11	34,89	0,96	0	0	0	0,72	0	12,32	100
Kil	57,81	27,26	1,09	0,13	0	0,67	1,59	1,1	10,35	100
Fırın Tuğlası	41,05	54,99	0,98	0,82	0	0,78	0,48	0,54	0,36	100
Dolomit	0,3	0	0,13	34,15	20,14	0	0	0	45,28	100
Manyezit 1	1,17	0,01	0,42	1,94	96,46	0	0	0	0	100
Manyezit 2	5,53	0,09	1,2	2,04	91,14	0	0	0	0	100

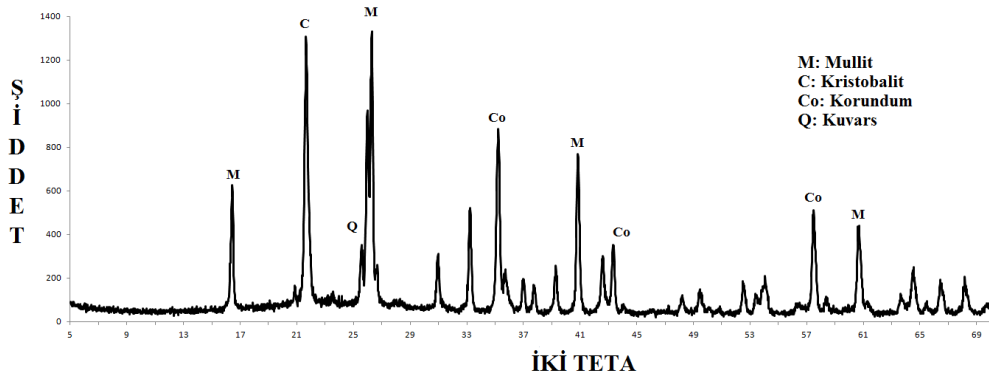
Girdi hammaddelerinden kil, kaolen ve fırın tuğlası mineralojik analiz sonuçları Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de verilmiştir. Kullanılan kil hammaddesi seramik sağlık gereçlerinde sık kullanılan illitik killere aittir. Seramik sağlık gereçleri üretim proseslerinde kullanılan çamur reçetelerinde kullanılan bu kille hem bağlayıcı hem de plastik özellik göstermektedirler.



Şekil 5.10. Hazırlanan reçetelerde kullanılan İngiliz kilinin mineralojik analizi.



Şekil 5.11. Hazırlanan reçetelerde kullanılan bulgaristan kaoleninin mineralojik analizi.



Şekil 5.12. Hazırlanan reçetelerde kullanılan fırın tuğlası mineralojik analizi.

5.3. Reçete Denemeleri ve Analizleri

Analiz sonuçlarının çıktıları göz önünde bulundurularak tüm girdi malzemelerinin farklı reçetelerde kullanıldığı 10 farklı reçete yapılmıştır. 10 farklı reçetenin Seger hesaplamaları yapılmış ve yapılan hesaplamaların sonuçları piyasa filtresi ile benzer olma durumu kontrol edilmiştir. Seger analizlerinden çıkan farklı sonuçlar olsa da reçete çalışmaları sonucunda çıkabilecek olan farklı mineralojik ve kristal yapılar incelenmiştir. Deneme reçetelerinin teorik olarak hesaplanan Seger analizi sonuçları Çizelge 5.6.'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Deneme reçeteleri Seger hesaplamaları.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	Piyasa Filtresi
CaO	0,21	0,00	0,30	0,00	0,28	0,30	0,31	0,29	0,01	0,01	0,04
MgO	0,75	0,96	0,64	0,89	0,70	0,67	0,65	0,68	0,89	0,91	0,95
K ₂ O	0,03	0,04	0,03	0,06	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,04	0,01
Na ₂ O	0,02	0,00	0,03	0,05	0,00	0,01	0,02	0,01	0,06	0,04	0,00
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Al ₂ O ₃	3,12	3,19	2,24	4,38	2,04	2,20	2,36	2,19	3,13	3,10	3,50
Fe ₂ O ₃	0,03	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
SiO ₂	4,12	5,59	2,91	6,03	2,85	2,98	2,96	2,83	3,67	4,26	3,99
TiO ₂	0,03	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
RO	0,15	0,13	0,21	0,10	0,23	0,21	0,20	0,22	0,15	0,15	0,15
R ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00
RO ₂	0,67	0,79	0,65	0,71	0,67	0,66	0,64	0,64	0,63	0,69	0,63
R ₂ O ₃	0,51	0,45	0,50	0,51	0,48	0,49	0,51	0,50	0,54	0,50	0,55
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,32	1,75	1,30	1,38	1,40	1,35	1,25	1,29	1,17	1,37	1,14

Reçete denemelerinin seger analizleri karşılaştırıldığında; R9 denemesinin SiO₂/Al₂O₃ oranı tedarik edilen Çin filtresine en yakın olan oran olarak tespit edilmiştir. Bu oranın birbirine yakın olması mullit fazının görme olasılığını arttırmaktadır. Ayrıca MgO oranının 0,89 olması da kordiyerit fazının oluşumunu gösterebilmektedir. CaO fazı yüksek gözlemlenen reçetelerde kızırdırma kayıplarının yüksek çıkma olasılığı göz önünde bulundurulmuştur.

Reçetelerde kullanılacak olan hammaddeler Ece Banyo üretim tesisinden ve tedarikçi firmalardan temin edilerek laboratuvar çaplı hazırlanmıştır. Fırın atıkları ayrı ayrı temin edildikten sonra önce kırma, daha sonra ince taneli öğütme işlemi kullanılmıştır. Ece Banyo Ar-Ge Merkezi bünyesinde bulunan bilyeli sulu öğütme değirmenleri ile malzemeler öğütülmüştür (Şekil 5.13. a). Öğütme işleminden sonra tüm malzeme etüvde kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonunda 60 Mesh (250 µ) elekten elenmiştir (Şekil 5.13. b). Bu işlemler plaka, rulo ve tuğla atıklarına uygulanmıştır.



Şekil 5.13. Fırın atıklarının reçete denemeleri için hazırlanması (a: Sulu Öğütme, b: Eleme).

Reçetede kullanılacak diğer hammaddeler tedarikçilerden veya üretim birimlerinden hazır olarak temin edildiğinden ön hazırlık işlemi uygulanmamıştır.

Reçete miktarlarına göre deneme yapabilmek için 500 gr'lık reçeteler rutubetsiz kuru halde hesaplanarak tartılmış (Şekil 5.14) ve hammaddeler öncelikli sulu süspansiyon içerisinde karıştırılmıştır. Reçetede kullanılacak kil ve kaolen hammaddeleri süzölmüş kil ve kaolendir. Süzölmüş haldeki kil ve kaolen hammaddelerinin tane irilikleri küçöltölmüş ve sulu süspansiyon içerisinde dağılma işlemleri kolaylaştırılmıştır. Sulu süspansiyon içerisindeki kuru madde miktarı yaklaşık olarak 55,5% alınmıştır. Bu sayede herhangi bir dağıtıcı ajan kullanmadan kil ve kaolen hammaddeleri su içerisinde dağılmıştır. Reçete hazırlama süresi her bir reçete için yaklaşık olarak 120 dakika sürmektedir.



Şekil 5.14. Hazırlanan başlangıç hammaddelerinin tartımı.

Hazırlanan deneme reçeteleri alçı kalıp üzerinde suyu bertaraf edilerek yarı yaş (yaklaşık rutubet 18%) hale getirilmiş ve daha sonra etüvde $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Kurutma işlemlerinden sonra her bir deneme reçetesinden 4'er adet olmak üzere pelet numuneler hazırlanmıştır. Her bir numunenin kızdırma kaybına bakabilmek için kuru halde tartımları alınmış ve 4 farklı sıcaklıkta sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemleri Ece Banyo Ar-Ge Merkezinde bulunan Protherm PLF 130/15 marka kül fırında sinterlenmiştir (Şekil 5.15).



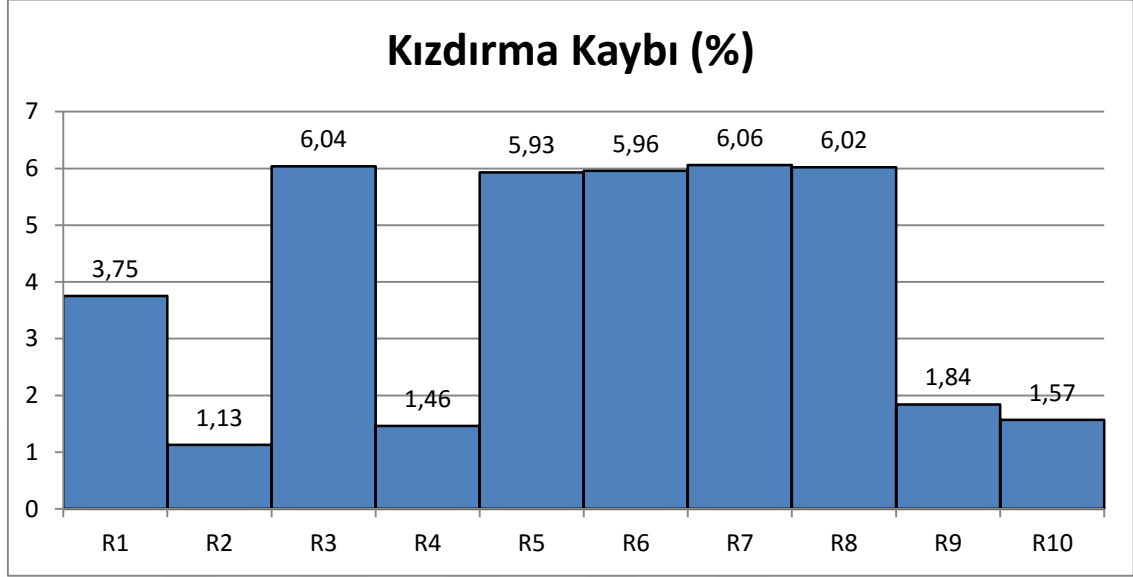
Şekil 5.15. Reçete deneme numunelerinin kızdırma kaybı hesaplamaları.

Kızdırma kaybı hesaplaması, kuru haldeki ürün ile sinterlenmiş ürün arasındaki ağırlık farkının % olarak hesaplanmasıdır. Bu hesap;

$$A. Z. = \frac{\text{Kuru Ağırlık} - \text{Pişmiş Ağırlık}}{\text{Kuru Ağırlık}} \times 100$$

Formülünden hesaplanarak yapılmaktadır. Reçetelerin ortalama kızdırma kayıpları Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Deneme reçetelerinin 1230 °C’de ölçülen kızdırma kayıpları (%).



Reçeteleri kızdırma kayıpları incelendiğinde ve seger analizleri ile karşılaştırıldığında, CaO oranı yüksek olan reçetelerdeki kızdırma kayıplarının yüksek olduğu görülmüştür. Düşük kızdırma kaybına sahip olan reçete denemelerinde pişmiş küçülmenin ve deformasyon oranının düşük olduğu tahmin edilmektedir.

Tüm deneme reçeteleri 4 farklı sıcaklıkta sinterlenmiştir. Bu işlemi yapmanın nedeni her bir sıcaklık aralığında oluşacak mineral yapılarının tayin edilip üretilecek olan malzemenin doğru sıcaklıkta sinterlenmesini sağlamak içindir. Deneme numuneleri sinterlendikten sonra tüm sıcaklıklardaki analiz numuneleri Seramik Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan analiz cihazları ile kimyasal, mineralojik ve mikro yapı karakterizasyonları yapılmıştır (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Reçete denemelerinin sinterlenmesi.

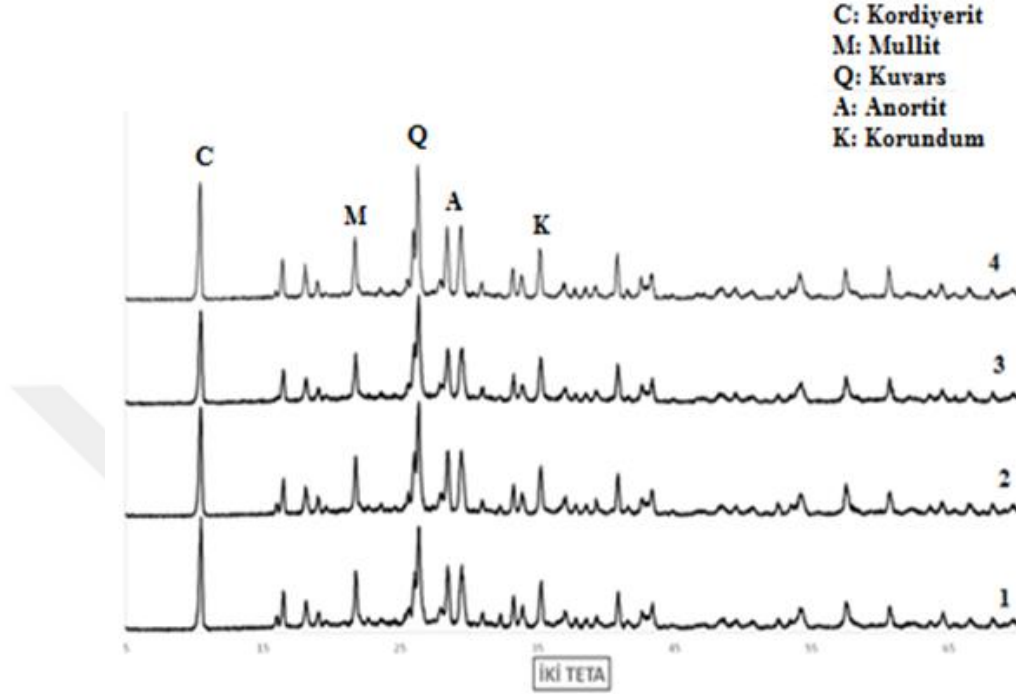
5.3.1. 1 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

1 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.8'de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre MgO miktarı 4,95 ile 5,19 arasında değiştiği görülmüştür. Farklı sıcaklık değerlerinde sinterlendiğinde bile yapının oksit bileşen oranlarının değişmediği görülmüştür.

Çizelge 5.8. Hazırlanan 1 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,27	5,1	49,61	40,08	0,05	0,9	2,26	0,54	1,01	0,16	99,98
1250°C	0	5,09	49,63	40,12	0,06	0,9	2,29	0,5	0,97	0,16	99,72
1270°C	0,18	4,95	50,06	39,89	0,05	0,88	2,26	0,56	0,96	0,21	100
1290°C	0,15	5,19	49,92	40,02	0,05	0,92	2,24	0,48	0,95	0,1	100,02

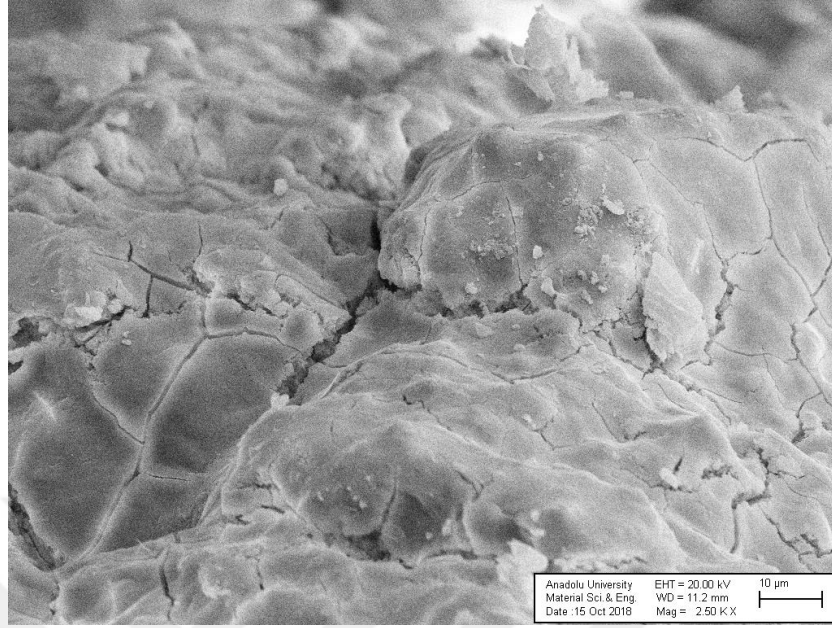
Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.17’de verilmiştir.



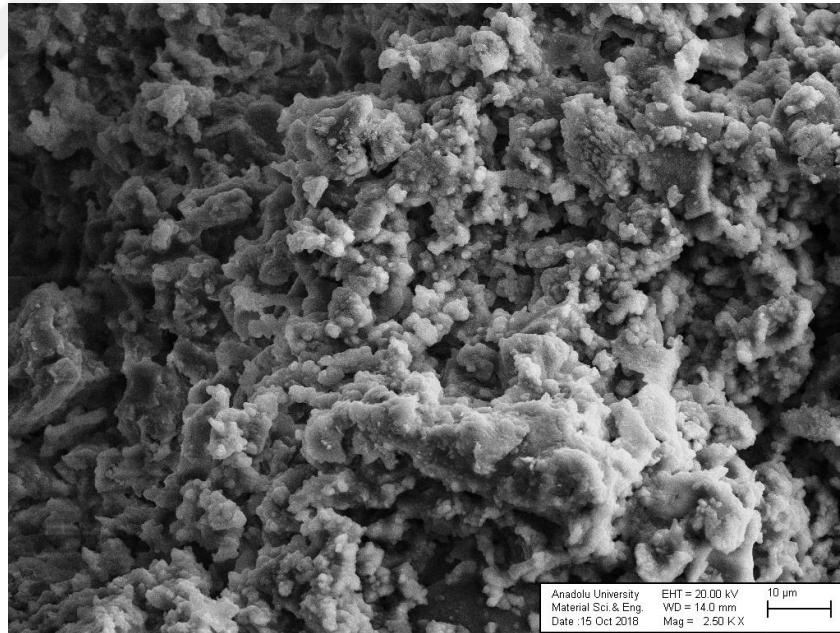
Şekil 5.17. Hazırlanan 1 Nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

Mineralojik analiz sonuçlarına göre, farklı sıcaklıklarda aynı fazlar görüldüğü gözlemlenmiştir. Fazlar arasında kordiyerit, korundum, kuvars, mullit, anortit ve andaluzit görülmüştür. Hammadde olarak kullanılan atıkların mineralojik yapısında kordiyerit ve mullit fazları olduğundan bu fazlar yapılan analizlerin sonucunda açıkça görülmüştür. Bu denemelerde mullit ve kordiyerit yapının desteklenebilmesi için alümina ve dolomit kullanılmıştır. Anortit yapının kullanılan dolomitteki CaO’ten kaynaklı olarak oluştuğu, andaluzitin ise reçete içerisindeki Al₂O₃ oranını arttırdığından ve sinterleme aşamasında bünyedeki serbest silis ile reaksiyona girerek oluştuğu görülmüştür. Kimyasal analiz sonuçlarına bakıldığında bünyedeki Al₂O₃ oranının SiO₂ oranından yüksek olduğu görülmüştür. Bu analizler birlikte incelendiğinde anortit ve andaluzit fazlarının çıkması olasıdır.

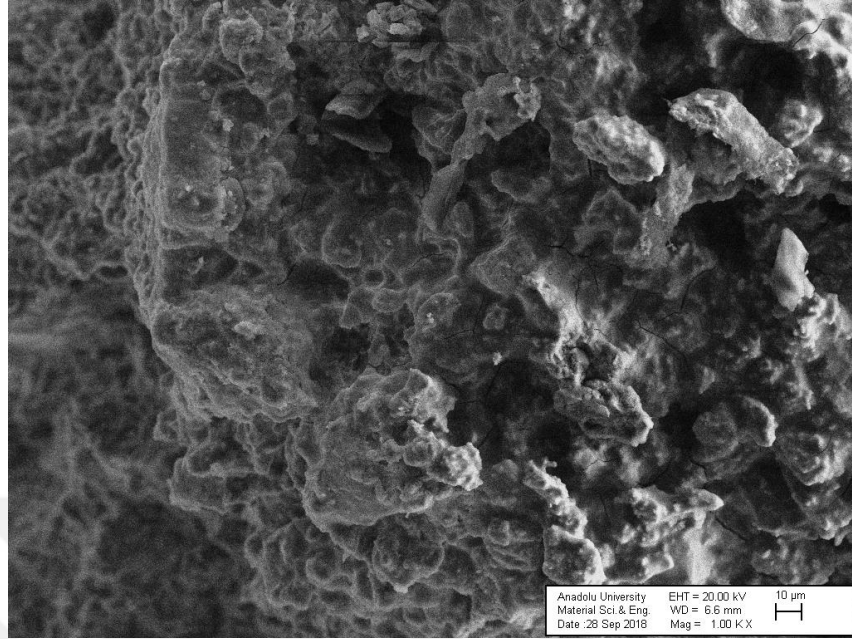
Reçetenin farklı sıcaklıklarda yapılan sinterleme deneylerinden çıkan numunelerin mikro yapı analizleri Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir.



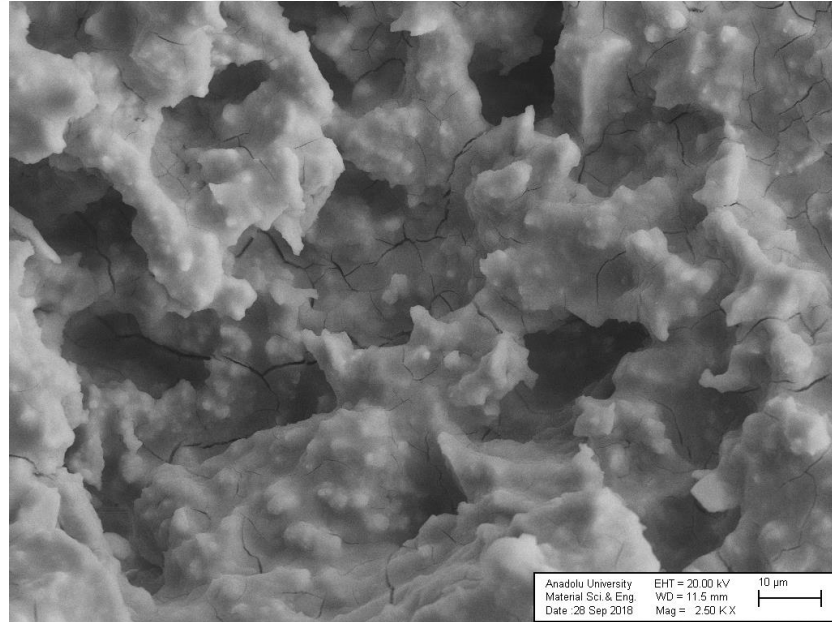
Şekil 5.18. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.19. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.20. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.21. Hazırlanan 1 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).

Mikro yapı analizleri incelendiğinde 1230 °C’de sinterlenen denemede yapıdaki camsız faz oranının çok yüksek olduğu görülmüştür. 1230 °C’de kordiyerit fazları mikro yapı analizinde plaka şeklinde seçilebilse de sıcaklık 1290 °C’ye kadar arttırıldığında camsız fazın tüm fazları kapattığı görülmüştür.

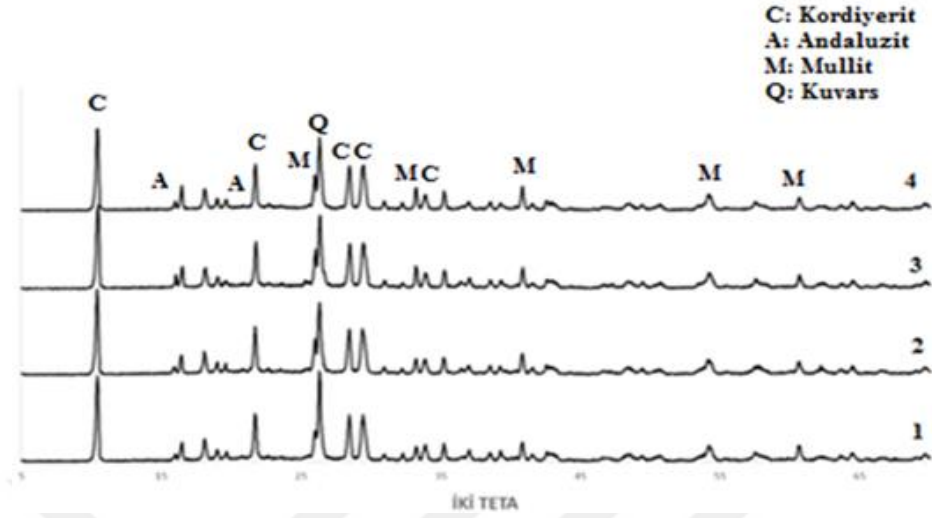
5.3.2. 2 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

2 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.9’da verilmiştir. Kordiyerit oluşumunu sağlayan MgO miktarının yüksek olması, mineralojik analizlerde gözlemlenebilecek kordiyerit fazını desteklemektedir. Ayrıca farklı sıcaklık değerlerinde sinterleme yapıldığı halde oksit oranlarının aynı gelmesi, analizin doğruluğunu ve yapılan deneyin doğruluğunu ispatlamaktadır.

Çizelge 5.9. Hazırlanan 2 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

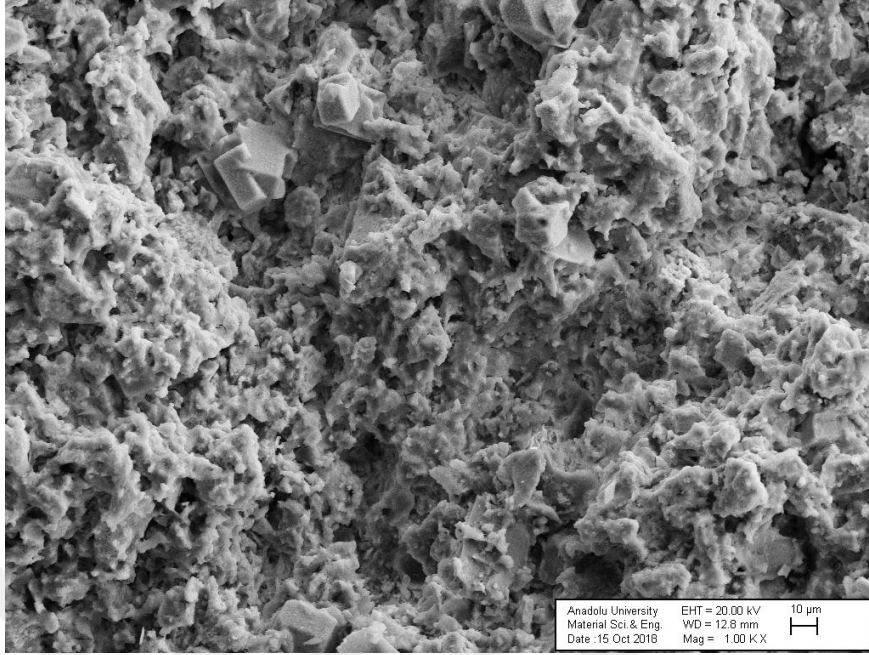
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0	5,93	43,85	47,41	0,05	0,89	0,23	0,5	1,08	0,05	99,99
1250°C	0,3	5,77	43,71	47,41	0,05	0,88	0,21	0,51	1,05	0,11	100
1270°C	0,21	6,02	43,7	47,25	0,05	0,91	0,22	0,52	1,05	0,07	100
1290°C	0	5,95	43,87	47,33	0,05	0,9	0,21	0,52	1,1	0,07	100

Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.22’de verilmiştir. 4 farklı sıcaklıkta yapılan sinterleme denemelerinde çıkan fazlar kordiyerit, mullit, kuvars ve andaluzittir. Mineralojik analiz sonuçları irdelendiğinde kordiyerit ve mullit fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bünyede oluşan andaluzit fazı diğer fazlardan az miktarda olduğundan pik boyu diğerlerine göre daha düşük görülmüştür.

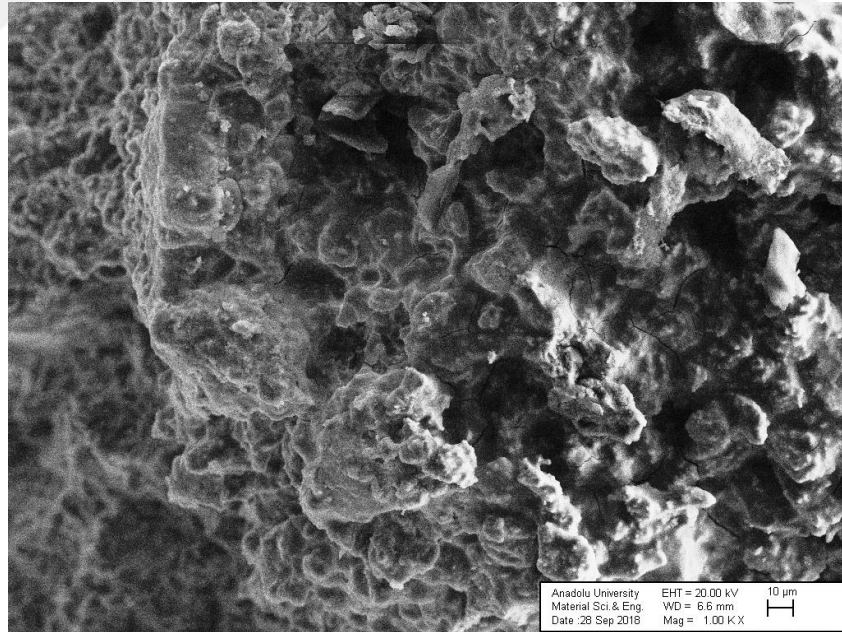


Şekil 5.22. Hazırlanan 2 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

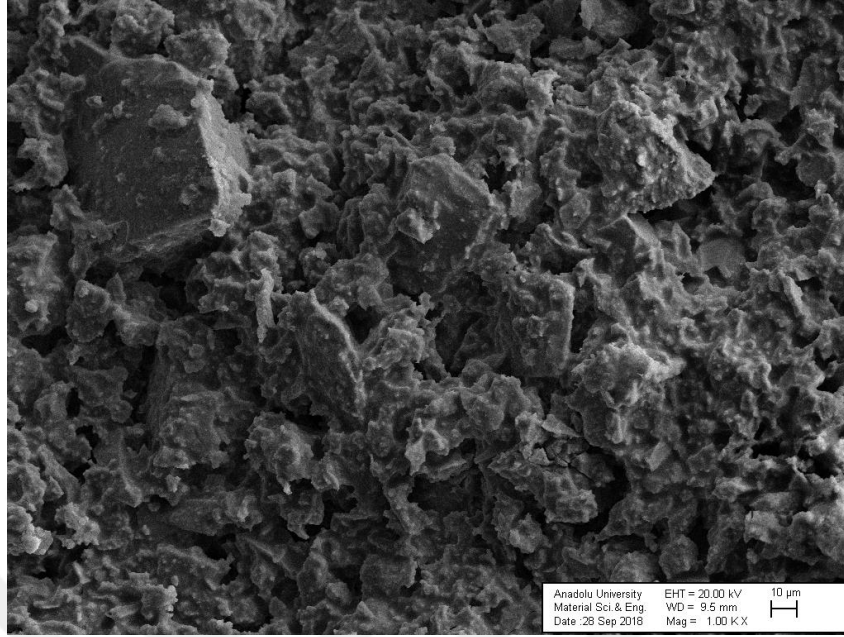
Reçete denemesinin farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerinin mikro yapı analizleri Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilmiştir. Mikro yapı analizlerinde kordiyerit fazı gözlemlenmiştir. Sıcaklık yükseldiğinde camsı faz oranının arttığı görülmüştür fakat camsı fazda görülen çatlaklar malzemenin yüksek sıcaklıktan soğuma evresine geçerken oluştuğu ve yapıyı bir arada tutmadığı gözlemlenmiştir. Bu mikro yapı hatası malzemenin yüksek sıcaklıklarda baskı mukavemetini ve termal şok direncini azaltmaktadır.



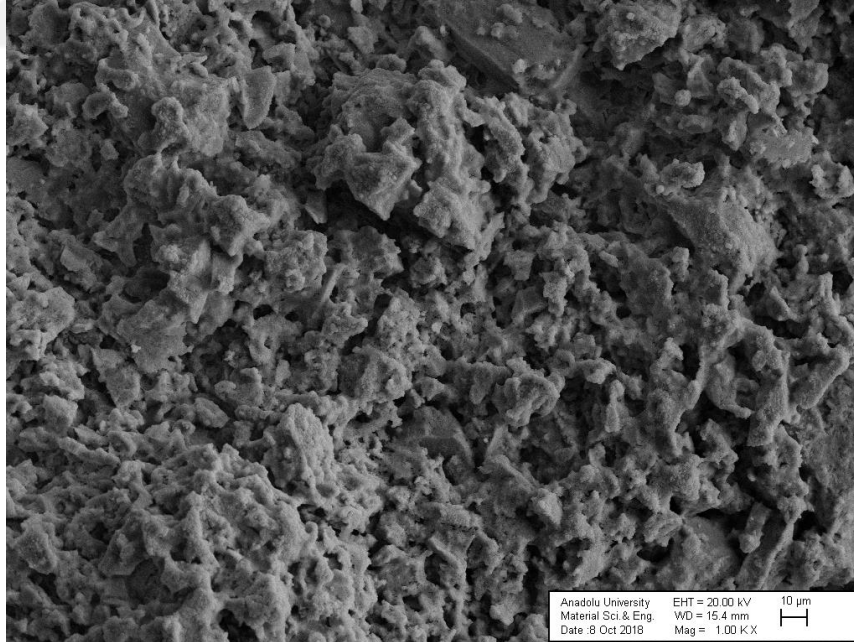
Şekil 5.23. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.24. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.25. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).



Şekil 5.26. Hazırlanan 2 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10µ uzunluğundadır).

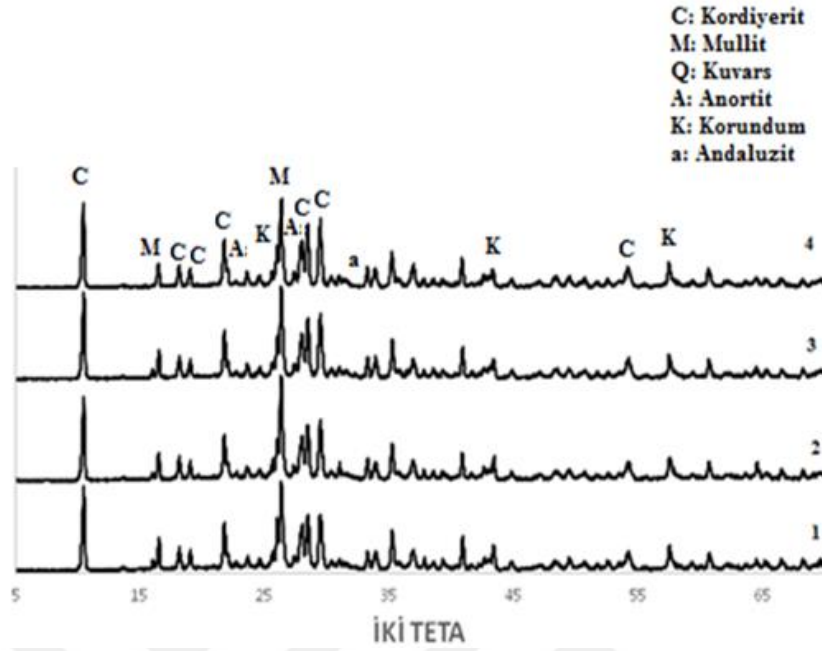
5.3.3. 3 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

3 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.10'da verilmiştir. Reçete denemelerinde kullanılan dolomit miktarı arttırıldığında CaO oranının arttığı görülmüştür. Gözlemlenmek istenen kordiyerit ve mullit fazlarını oluşturacak Al_2O_3 , SiO_2 ve MgO fazları yeterli miktardadır. Fakat kimyasal analizde gözlemlenen CaO miktarı farklı fazların oluşmasına sebep olmaktadır.

Çizelge 5.10. Hazırlanan 3 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

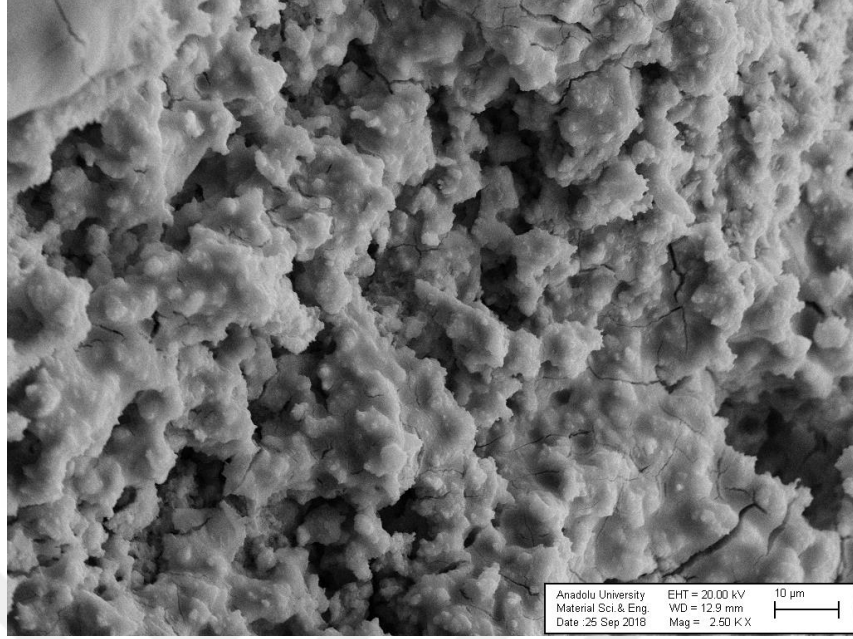
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,35	5,45	49,11	38,32	0,04	0,99	4,42	0,43	0,81	0,08	100
1250°C	0,47	5,48	49,22	38,14	0	0,93	4,37	0,4	0,88	0,11	100
1270°C	0	5,64	49,09	38,28	0,04	0,95	4,54	0,43	0,87	0,16	100
1290°C	0,36	5,57	48,97	38,29	0,05	0,96	4,43	0,37	0,88	0,12	100

Mineralojik analizlerin sonuçlarına göre, dolomit kullanılan reçetelerde anortit görülme olasılığı yüksektir. Ayrıca kimyasal analiz sonuçlarında yüksek oranda görülen Al_2O_3 andaluzit fazını doğrulamaktadır. Literatür araştırmalarında kordiyerit esaslı malzemelerin refrakter özellik kazanması için yapıda mullit ve anortit gibi fazların oluşturulduğu da rapor edilmiştir. Anortitin termal genleşme katsayısını arttırdığı da bilinmektedir (Çelik, 2008). Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.27'de verilmiştir.

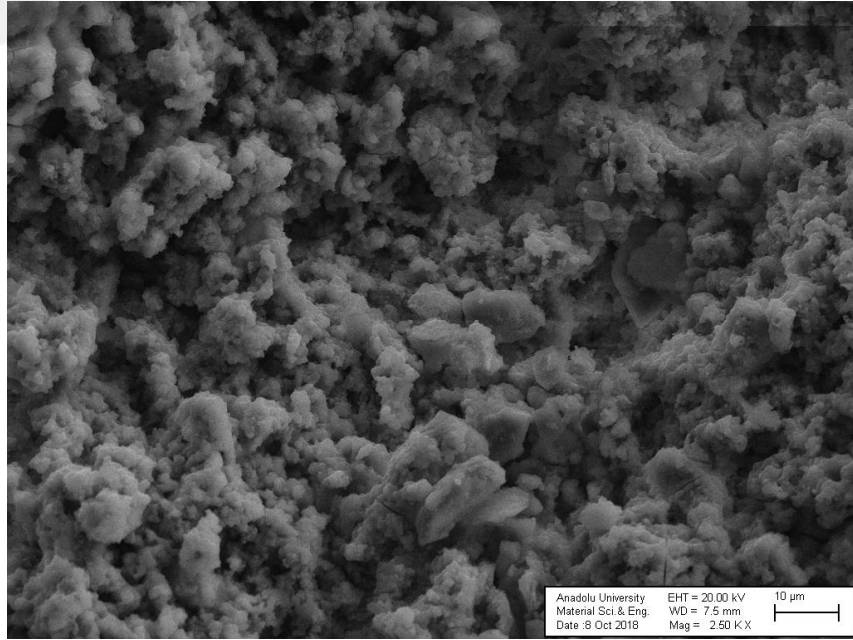


Şekil 5.27. Hazırlanan 3 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

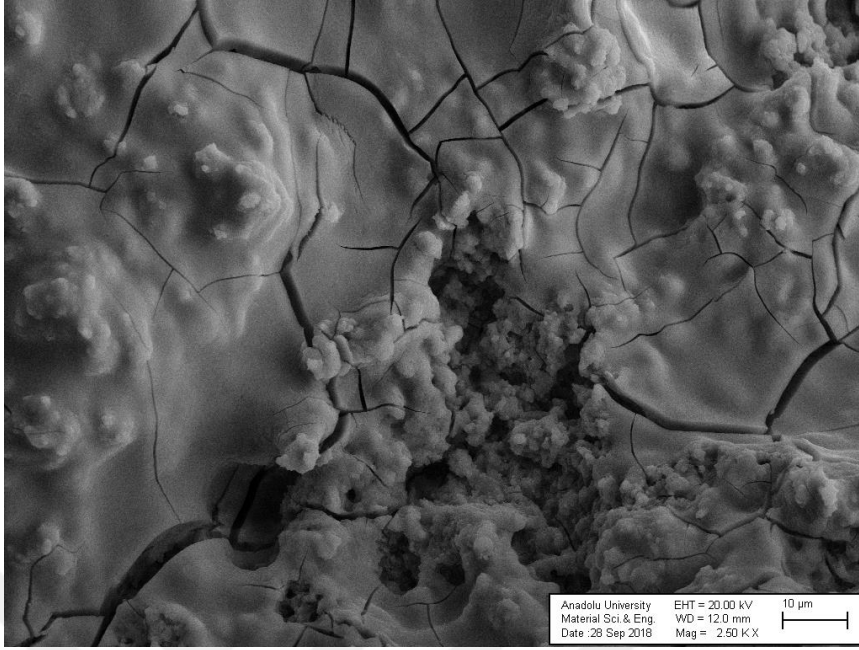
Mikro yapı analizleri incelendiğinde 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen denemelerde camsı yapıda mikro çatlaklar görülmektedir. Bu çatlakların 1270 °C'ye kadar daha da genişlediği gözlemlenmiştir. Ancak 1290 °C'de yapılan denemelerde çatlakların daraldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni camsı fazın bu sıcaklıkta çatlakları daha iyi doldurduğu olarak yorumlanmıştır. Ayrıca tüm denemelerin mineralojik analizleri mikro yapı analizleri ile birlikte yorumlandığında kordiyerit ve mullit fazlarının olduğu tahmin edilmektedir. Mikro yapı analizlerinde anortit ve andaluzit fazlarına rastlanmamıştır. Reçete kompozisyonlarının farklı sıcaklıklarda sinterlenene numunelerinin mikro yapı analizleri Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31'de verilmiştir.



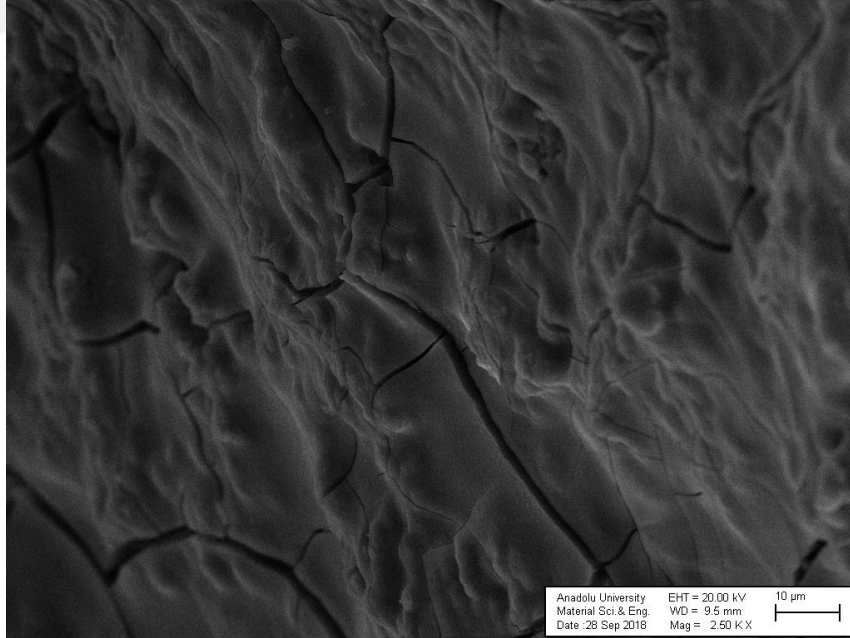
Şekil 5.28. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.29. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.30. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.31. Hazırlanan 3 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).

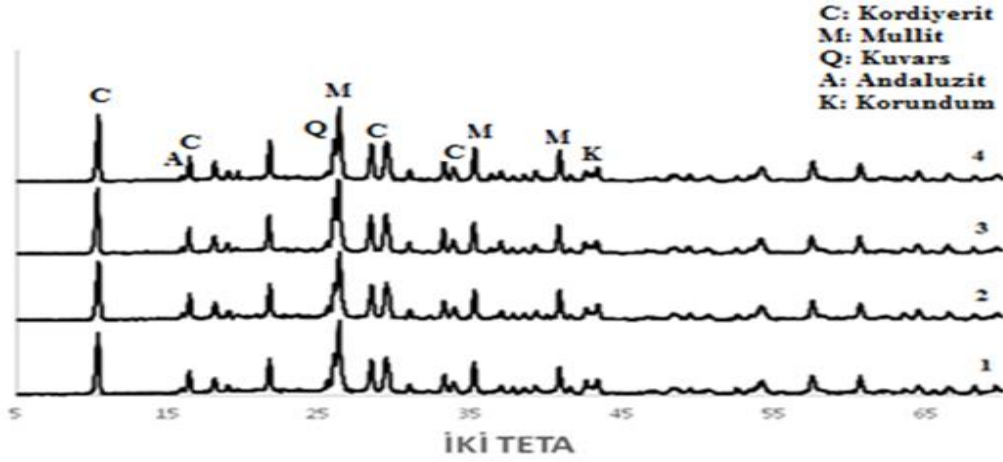
5.3.4. 4 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

4 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.11.'de verilmiştir. MgO oranının düşük olduğu ve Al₂O₃ oranının da yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.11. Hazırlanan 4 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

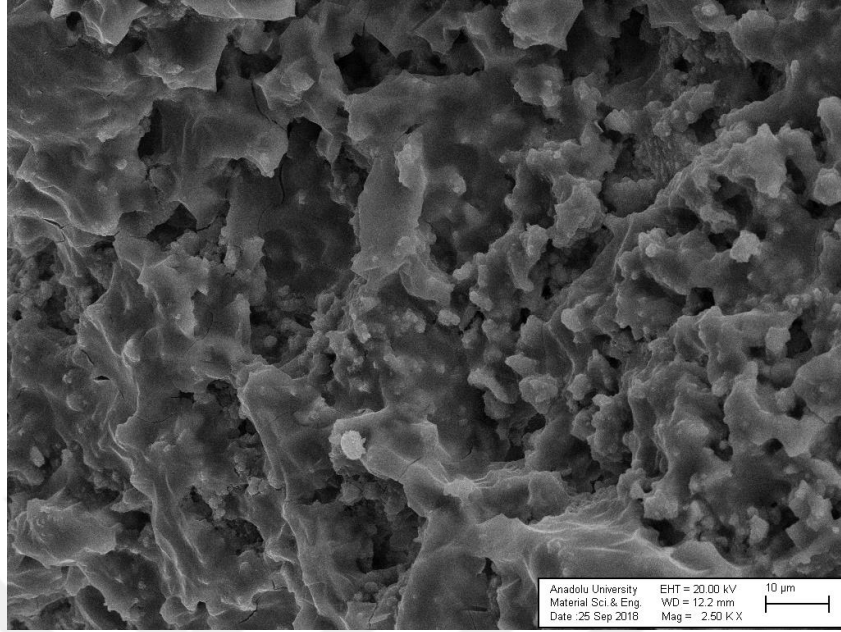
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,32	4,46	50,45	41,62	0,04	0,96	0,28	0,46	1,34	0,07	100
1250°C	0,33	4,51	50,17	41,81	0,05	0,99	0,25	0,48	1,37	0,04	100
1270°C	0,37	4,4	50,68	41,65	0,05	1,00	0,26	0,42	1,15	0,02	100
1290°C	0,34	4,52	50,95	41,58	0,04	0,99	0,25	0,43	0,88	0,02	100

Mineralojik analiz sonuçları kimyasal analiz sonuçları ile birlikte incelendiğinde yapıdaki yüksek miktardaki Al₂O₃'nin andaluzit oluşumunu tetiklediği görülmüştür. Yapılan 4 farklı sıcaklıktaki sinterleme denemesinde de andaluzit fazına rastlanmıştır. Piklerden de görüleceği gibi en baskın olan iki faz kordiyerit ve mullit fazlarıdır. Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.32'de verilmiştir.

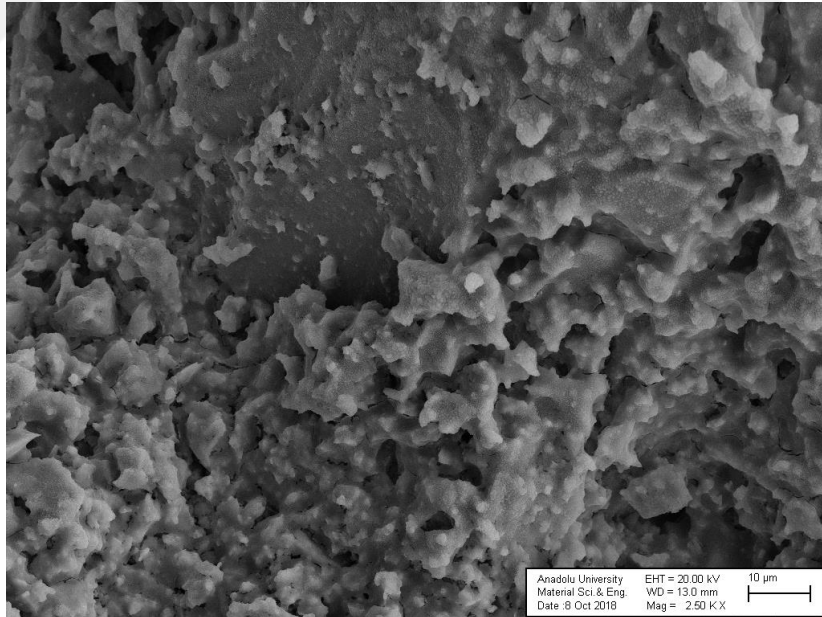


Şekil 5.32. Hazırlanan 4 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

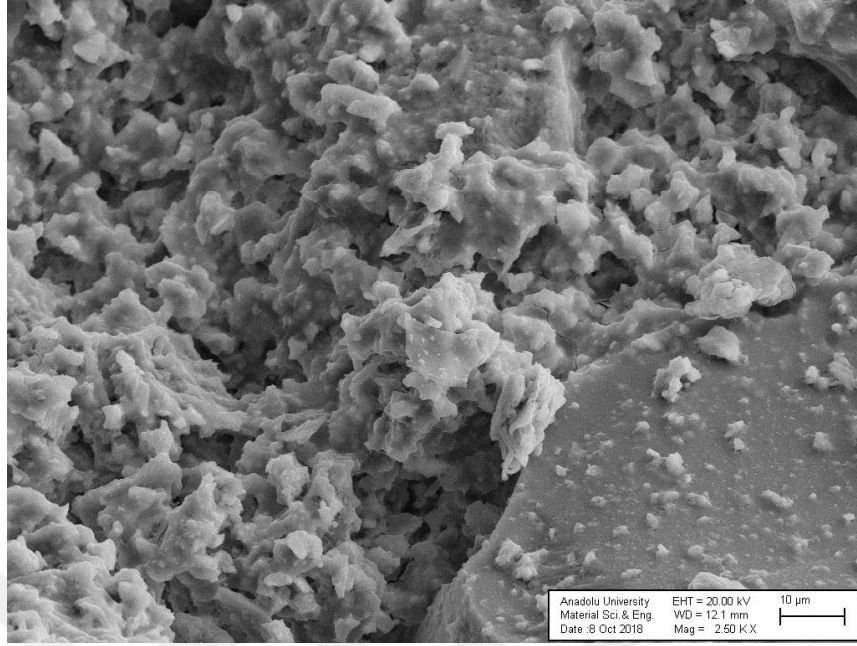
Reçetenin farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerinin mikro yapı analizleri Şekil 5.33, Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şkil 5.36'da verilmiştir. Mikro yapı analizlerinde görülen kordiyerit plakaları yapının içerisinde dağınık haldedir fakat 1230 °C'den itibaren oluşan yüksek orandaki camsı faz bu plaka yapıları bir arada tutmaktadır. R2 ve R3 denemelerinde görülen mikro yapı çatlak kusurları bu denemede gözlemlenmemiştir. Ayrıca mineralojik analiz sonucunda yüksek oranda çıktığı anlaşılan mullit fazı mikro yapı analizlerinde görülememiştir. Camsı fazın yüksek oranda olması sebebiyle mullit kristallerinin boyunun uzun olmadığı düşünülmektedir.



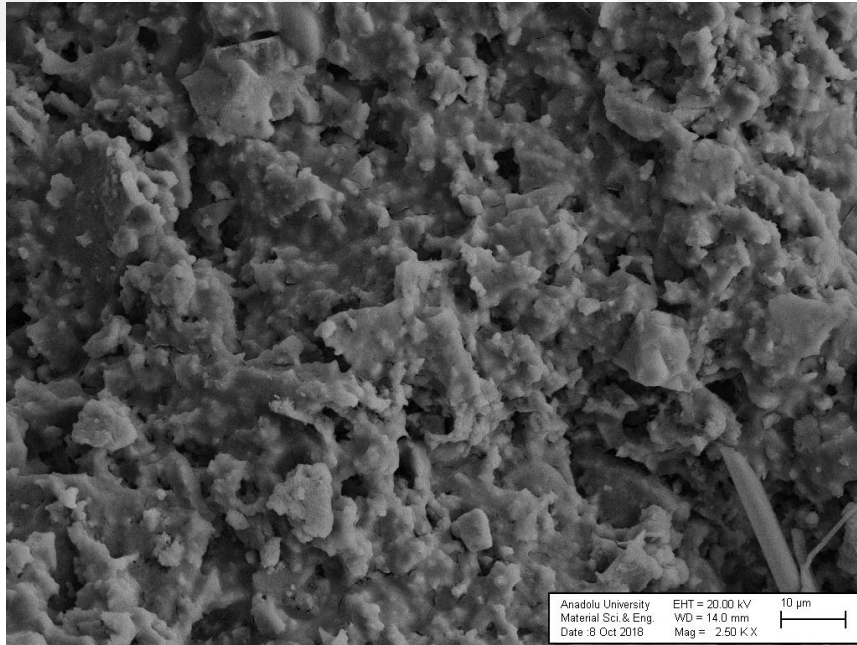
Şekil 5.33. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.34. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.35. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır.)



Şekil 5.36. Hazırlanan 4 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).

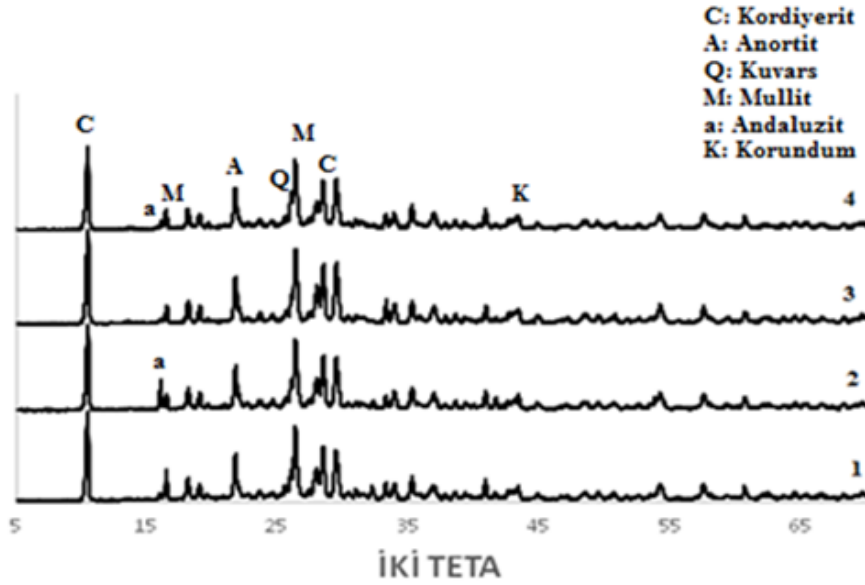
5.3.5. 5 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

5 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.12.'de verilmiştir. MgO ve CaO kaynağı olan dolomitin her iki oksit değerini kimyasal analiz sonuçlarında arttırdığı görülmüştür. Piyasa filtresi kimyasal analizlerinde görülen Al₂O₃ yapılan denemelerin sonuçları ile karşılaştırıldığında, piyasa filtresindeki oranın denemede çıkan orana göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.12. Hazırlanan 5 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

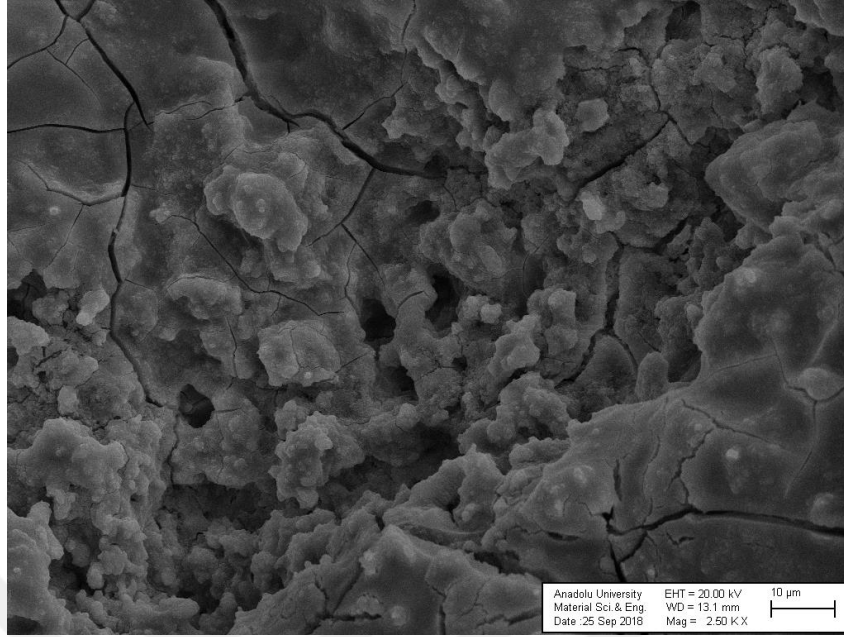
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0	6,44	46,92	39,96	0,04	0,77	4,49	0,42	0,93	0,03	100
1250°C	0,22	6,63	46,81	39,74	0,04	0,76	4,39	0,44	0,90	0,07	100
1270°C	0,22	6,49	46,57	40,04	0,04	0,76	4,46	0,44	0,97	0,01	100
1290°C	0	6,44	46,98	39,91	0,04	0,75	4,35	0,47	0,92	0,14	100

Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.37'de verilmiştir. Analizlerde farklı sıcaklıkta sinterlenen denemelerde farklı fazlar olduğu gözlemlenmiştir. Korundum fazı 1230 ve 1270 °C'lerde görülmezken, 1270 °C'de andaluzit fazı tespit edilmemiştir. Kordiyerit ve mullit fazları belirgin bir şekilde tespit edilmesine rağmen farklı sıcaklıklarda gözlemlenen anortit ve andaluzit fazları deneysel çalışmaların tekrarlanması gerektiğini göstermektedir. Analizler sonucunda, dolomit kullanımının anortit fazının oluşmasını tetiklediği görülmüştür.

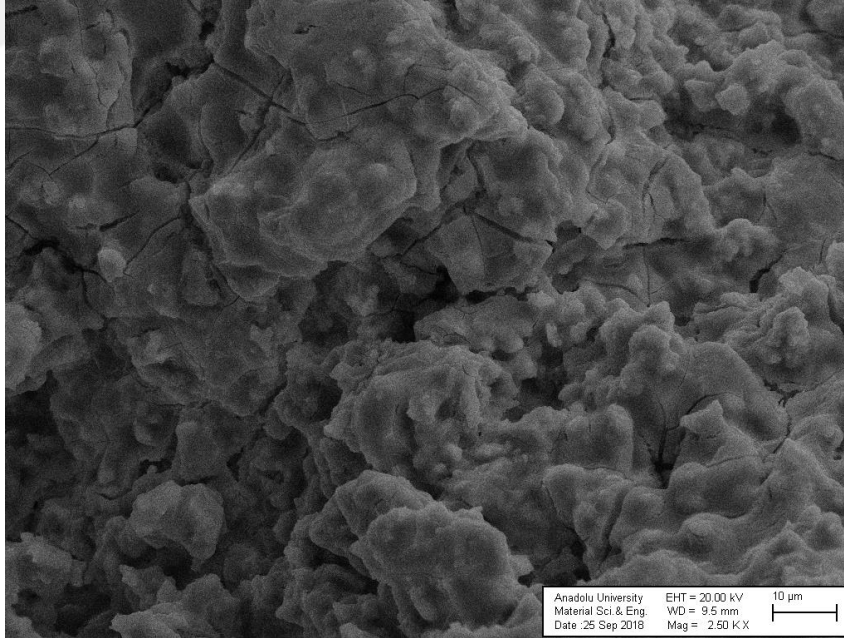


Şekil 5.37. Hazırlanan 5 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

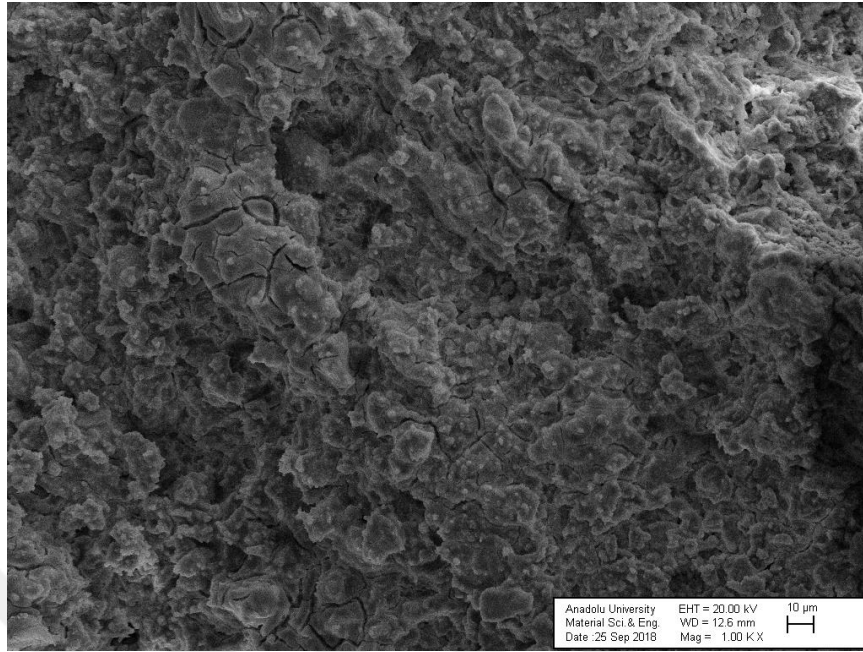
Reçetenin farklı sıcaklıklarda sinterlenen numunelerinin mikro yapı analizleri Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’de verilmiştir. Yapıda tespit edilen anortit fazının tüm sıcaklıklarda net bir şekilde gözlemlenen mikro yapı çatlaklarının oluşumuna sebep olduğu diğer denemelerin mikro yapı sonuçları ile karşılaştırıldığında yorumlanabilmektedir. Bunun nedeninin eriyik fazda dolomit anortit oluşumunu sağlarken camsı yapının birbirinden ayrışmasına neden olduğu tespit edilmiştir.



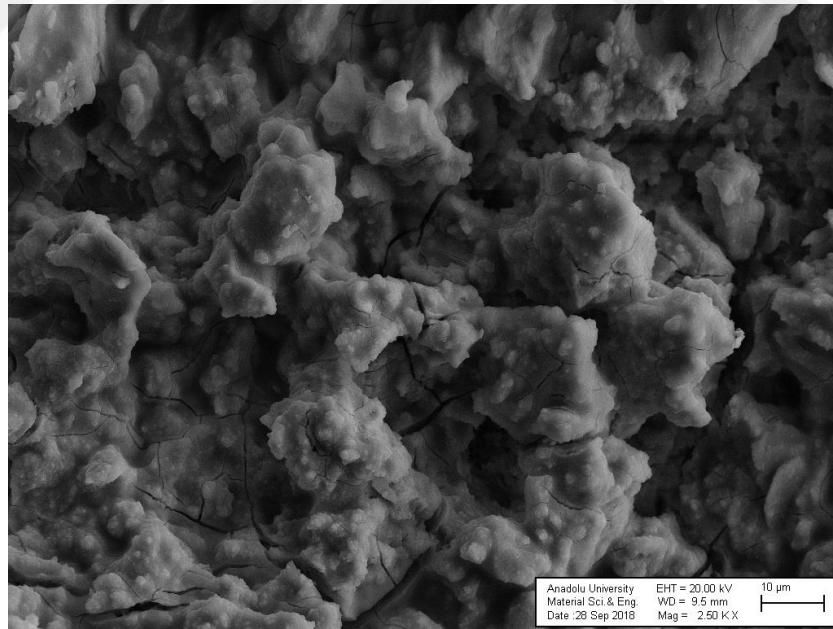
Şekil 5.38. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.39. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.40. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.41. Hazırlanan 5 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).

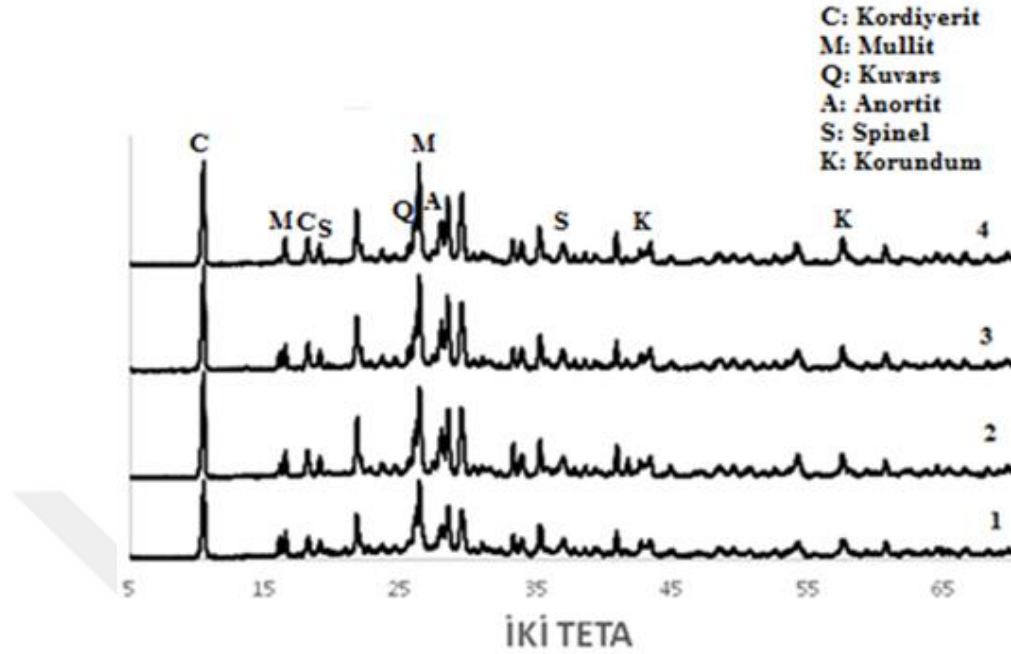
5.3.6. 6 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

6 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.13.'de verilmiştir. Reçetede MgO fazının desteklenebilmesi için kullanılan dolomit CaO miktarını oransal olarak arttırmıştır. CaO oranının fazla olması nihai ürünün pişme küçülmesini de etkileyeceği tahmin edilmektedir.

Çizelge 5.13. Hazırlanan 6 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

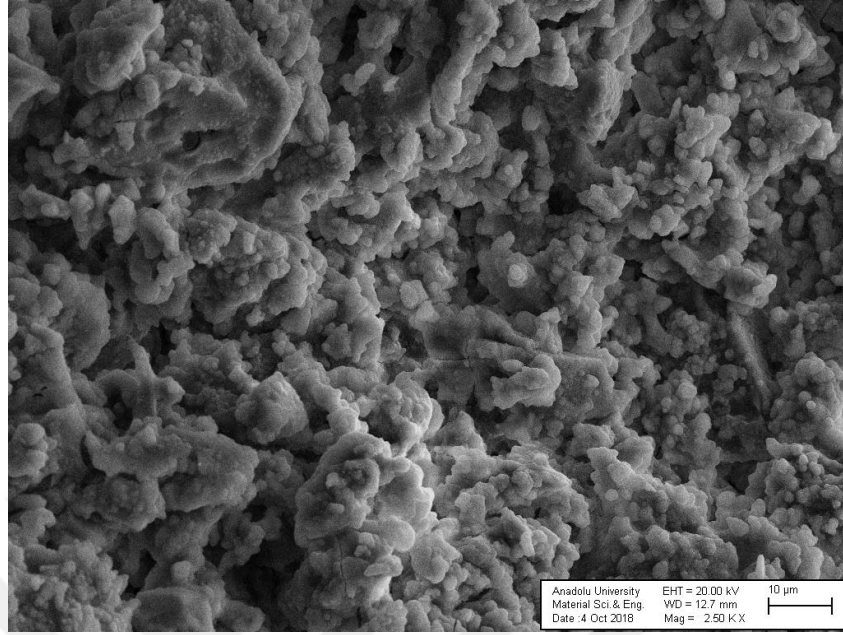
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,18	5,8	47,77	39,05	0,05	0,88	4,52	0,54	0,91	0,3	100
1250°C	0,22	6,06	47,52	39,18	0,05	0,88	4,5	0,51	0,94	0,14	100
1270°C	0,23	5,76	48,13	38,87	0,05	0,86	4,51	0,5	0,92	0,17	100
1290°C	0	5,85	48,16	38,99	0,05	0,88	4,49	0,51	0,89	0,18	100

Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.42'de verilmiştir. Bu denemede iki farklı atık kullanılmış, alümina ve dolomit ilavesi de yapılmıştır. Yapılan tüm denemelerde çıkan fazlar haricinde 1290 °C'de spinel fazına rastlanmıştır. Spinel fazı MgAl₂O₄ içeren bir fazdır. Sinterleme aşamasında serbest halde Al₂O₃'ün ve MgO'in 920-950 °C'de oluşturduğu bir fazdır (<http://www.wikizero.biz/>).

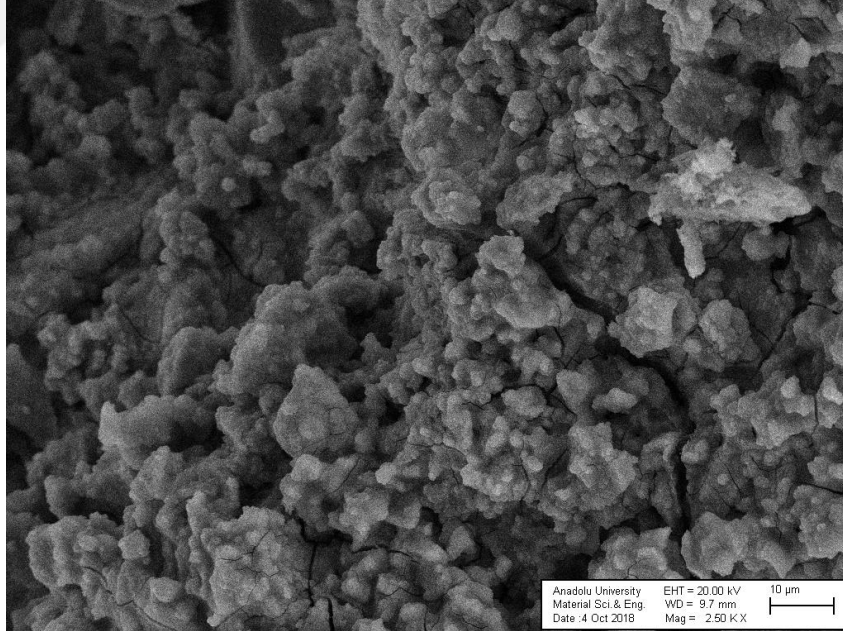


Şekil 5.42. Hazırlanan 6 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

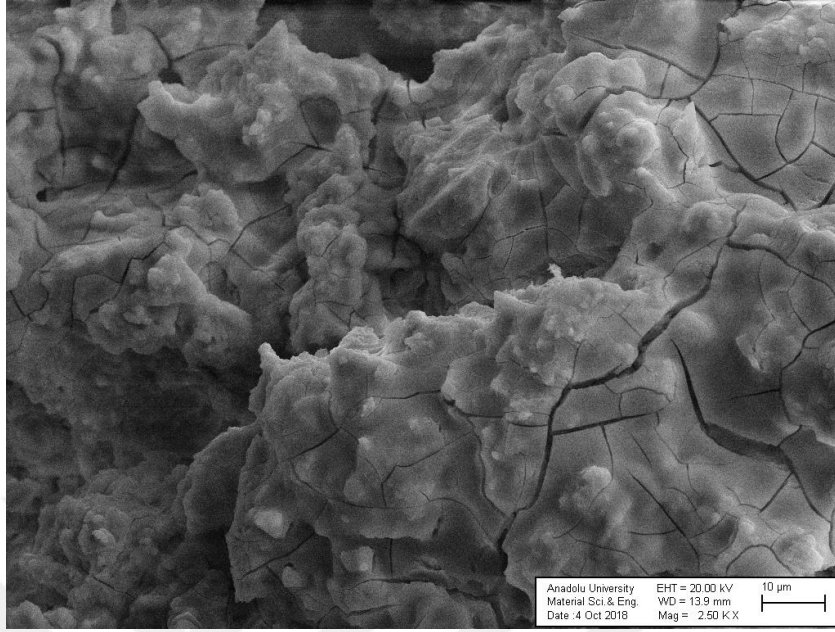
Mikro yapı analizleri incelendiğinde, piyasa filtrelerinde gözlemlenen mikro yapı oluşmuştur. Fakat 1230 °C'den başlayıp 1290 °C'ye kadar tüm denemelerde görülen mikro yapı çatlakları nihai üründeki termal şok direncini ve mekanik mukavemeti düşürmektedir. Reçetenin mikro yapı analizleri Şekil 5.43, Şekil 5.44, Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da verilmiştir.



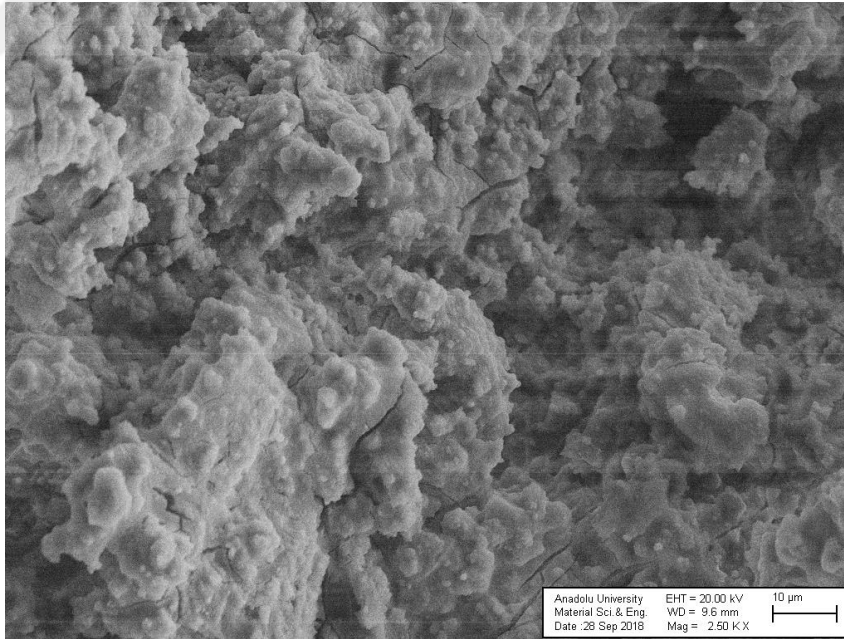
Şekil 5.43. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.44. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.45. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.46. Hazırlanan 6 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).

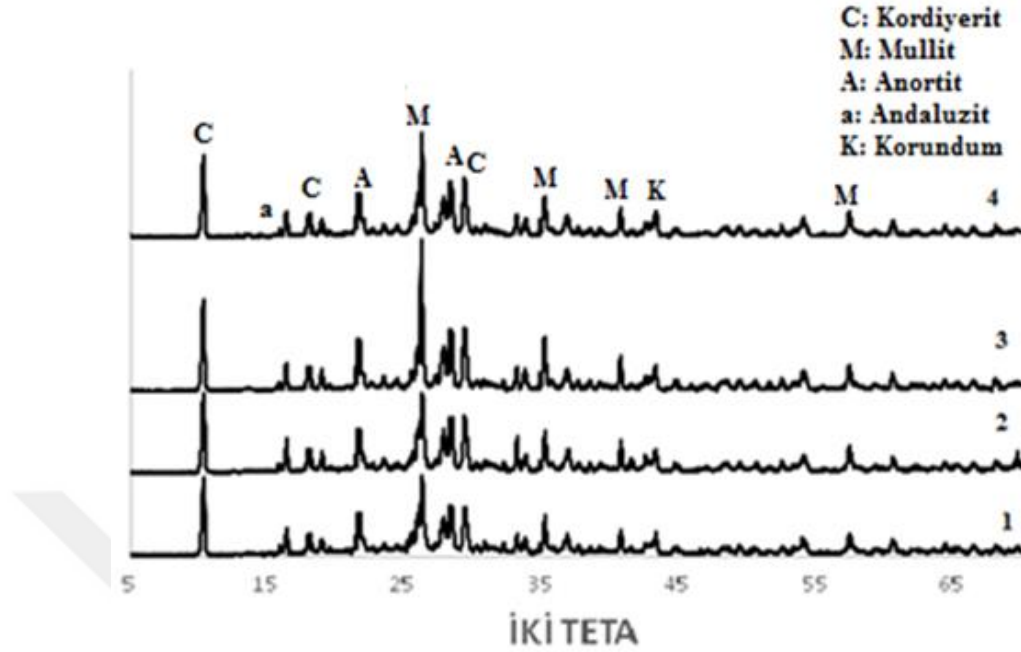
5.3.7. 7 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

7 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.14.'de verilmiştir. MgO içeriği R4 denemelerinden sonraki en düşük seviyede olan denemelerdir. Mineralojik analiz sonuçları ile birlikte bakıldığında kordiyerit pikleri gözlemlenmiştir. CaO'in oranının yüksek olması kızdırma kayıplarını ve pişme küçülmelerini de etkilemektedir.

Çizelge 5.14. Hazırlanan 7 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

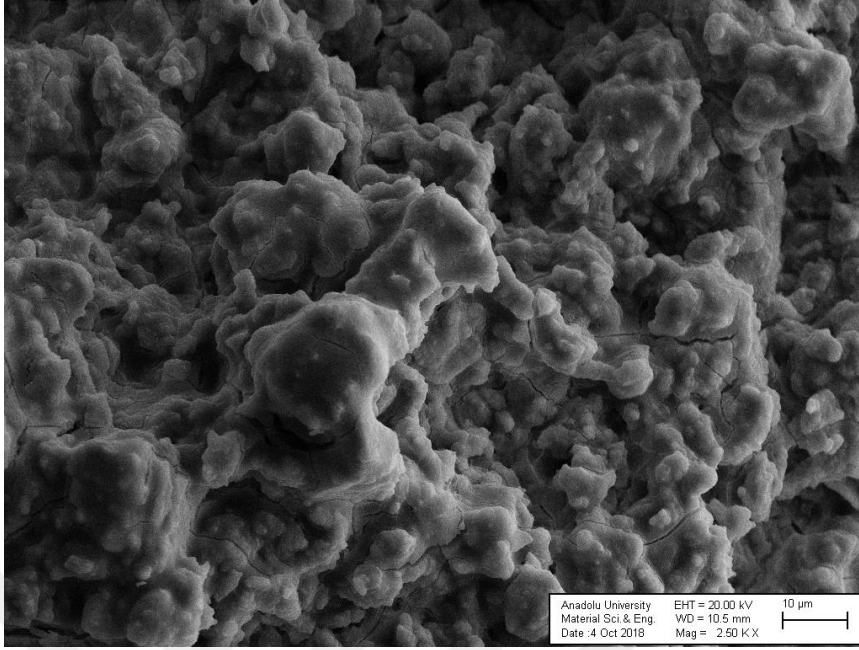
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,00	5,35	49,69	37,79	0,03	0,91	4,48	0,55	0,95	0,25	100
1250°C	0,19	5,24	49,83	37,73	0,05	0,90	4,49	0,51	0,88	0,18	100
1270°C	0,26	5,34	49,41	37,88	0,04	0,91	4,42	0,49	1,15	0,10	100
1290°C	0,34	5,31	49,97	37,30	0,05	0,90	4,49	0,51	0,89	0,24	100

Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.47'de verilmiştir. Diğer denemelerde olduğu gibi andaluzit fazı gözlemlenmiştir. Bu fazın oluşumu malzemenin yüksek sıcaklıklarda tutunmadığını göstermektedir. Mikro yapı analizleri ile birlikte bakıldığında andaluzit fazının oluşumu kristal çatlak büyümelerini de açıklamaktadır. Yapıdaki oksitler yüksek sıcaklıklarda eriyik faz içinde çözünüp serbest halde alümina ve serbest kuvars birleştiğinde andaluzit fazı oluşur. Bu fazın varlığı eriyik faz içerisinde çözünmeyen oksitler olduğunu gösterir.

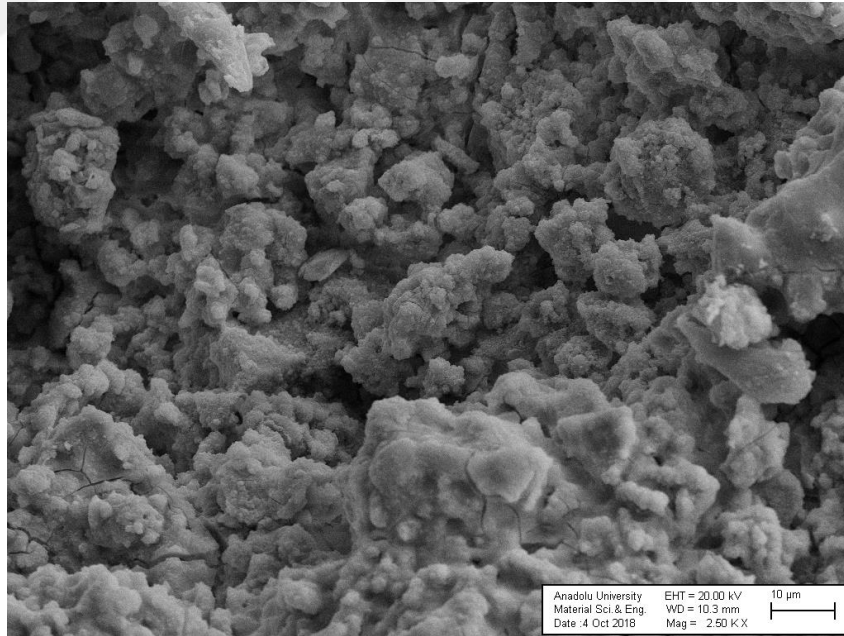


Şekil 5.47. Hazırlanan 7 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

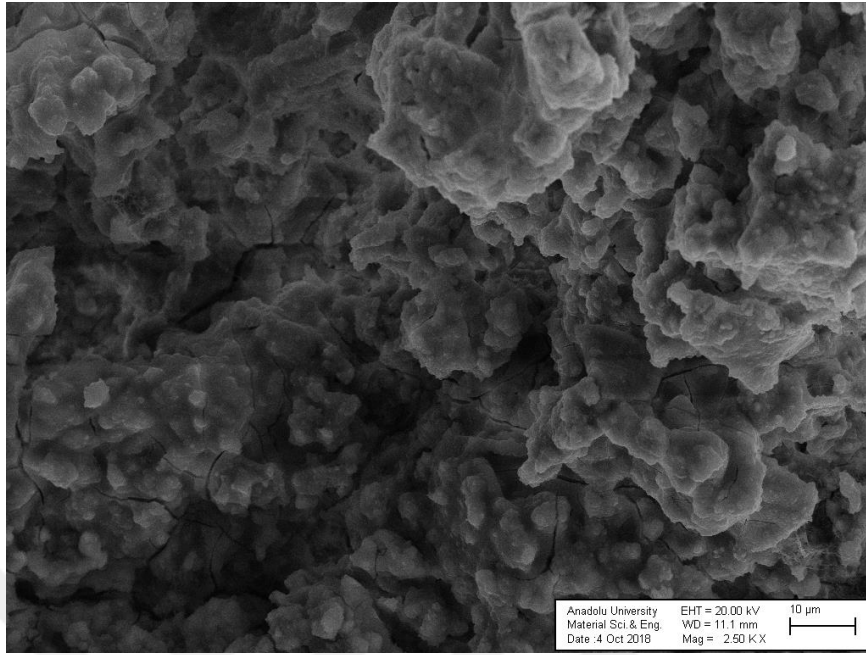
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ bileşiği olan dolomit, 1000-1100 °C arasındaki sıcaklıklarda karbonatlı yapısından kurtularak çözünür ve CaO ve MgO formuna dönüşür. Bu esnada reaksiyondan çıktı olarak CO_2 gazı açığa çıkar. Reçetede kullanımında mikro yapı çatlaklarını önleyici ve MgO oranının arttırıcı katkı olarak düşünülen dolomit kullanılan reçetelerin tamamında mikro yapı çatlaklarının gözlemlenmesi, dolomit kullanımının uygun olmadığını göstermektedir. Mikro yapı analizleri bu deneme için incelendiğinde, diğer denemelerde olduğu gibi kordiyerit plakaları görülmesine rağmen mikro yapısal çatlaklar da sinterleme sıcaklığı arttıkça genişlemektedir. Reçete denemelerinin mikro yapı analizleri Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de verilmiştir.



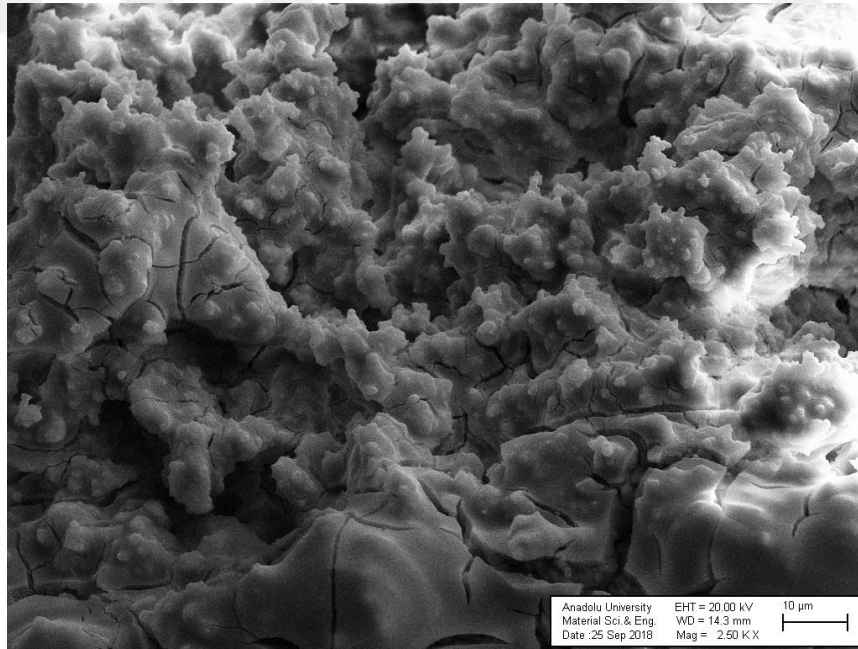
Şekil 5.48. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.49. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.50. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.51. Hazırlanan 7 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).

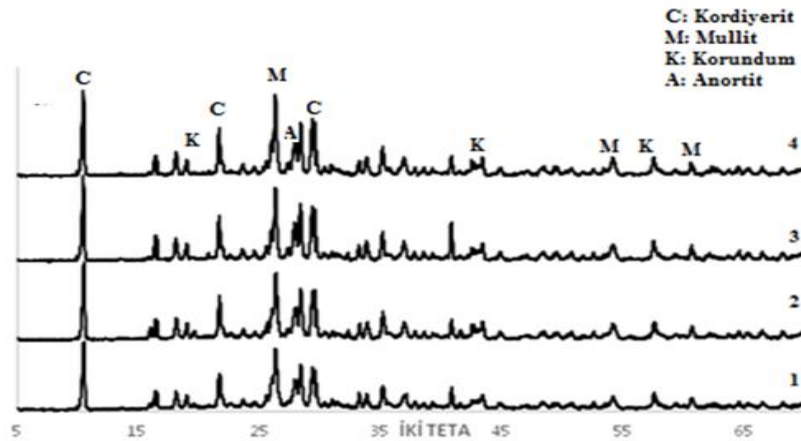
5.3.8. 8 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

8 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.15.'de verilmiştir. R7 denemesine göre Al_2O_3 oranı düşük olmasına rağmen MgO oranı istenilen %6 seviyesindedir.

Çizelge 5.15: Hazırlanan 8 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

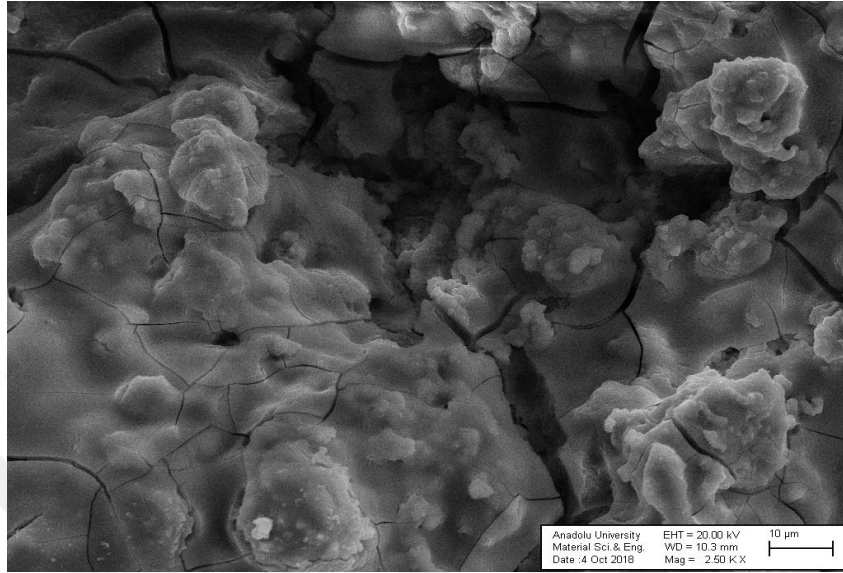
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,00	5,94	48,48	38,74	0,05	0,81	4,42	0,37	1,03	0,16	100
1250 °C	0,00	6,07	48,71	38,47	0,04	0,80	4,42	0,41	0,93	0,15	100
1270 °C	0,37	6,10	49,78	38,14	0,03	0,79	4,41	0,44	0,86	0,08	100
1290 °C	0,22	6,17	48,55	38,39	0,04	0,83	4,42	0,42	0,88	0,08	100

Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.52'de verilmiştir. Piyasada satılan ve köpük filtre üretimi için baz alınan filtrelerde gözlemlenen mineralojik yapıya anortit oluşumu hariç en çok benzerlik gösteren reçete denemesidir. Tüm denemelerde oluşan kordiyerit ve mullit yapının oluşumu bu denemede de gözlemlenmiştir.

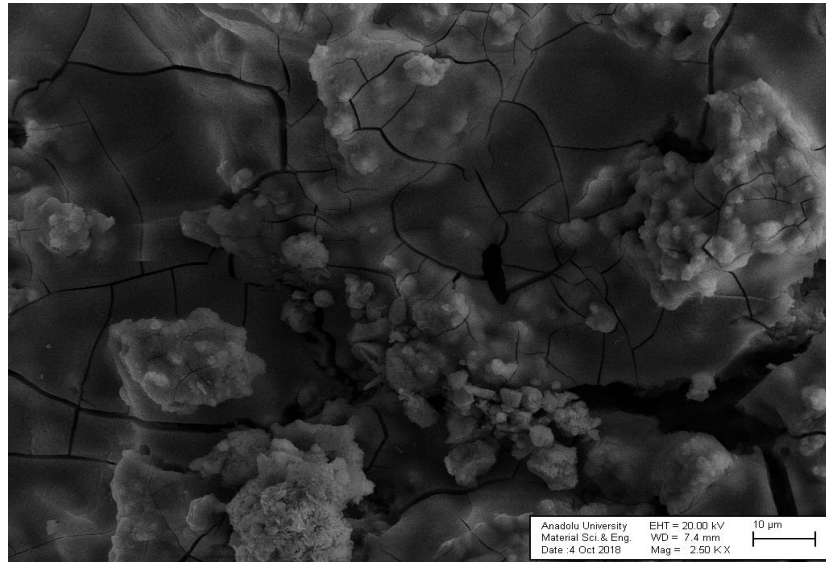


Şekil 5.52. Hazırlanan 8 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinterlenmesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

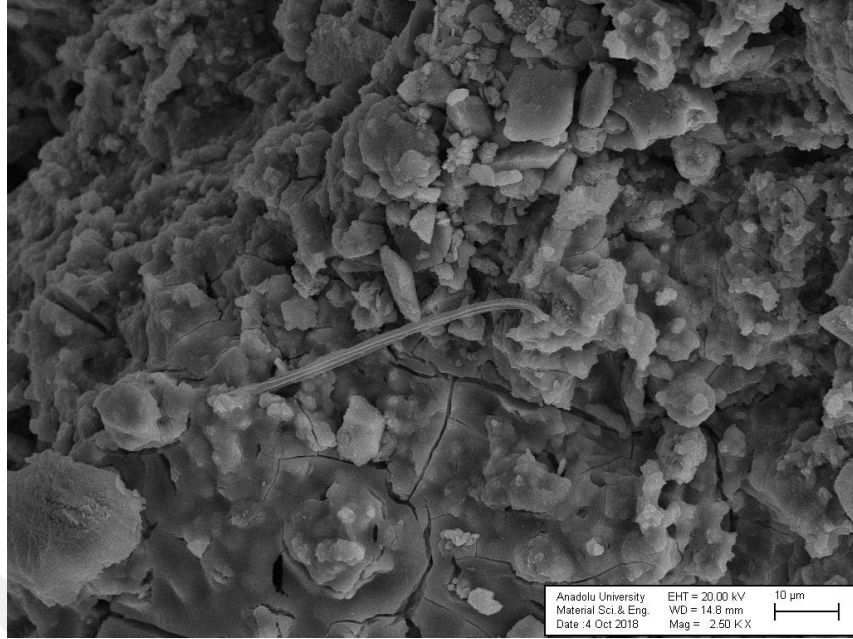
8 nolu reçete çalışmasının mikro yapı analizleri Şekil 5.53, Şekil 5.54, Şekil 5.55 ve Şekil 5.56'da verilmiştir.



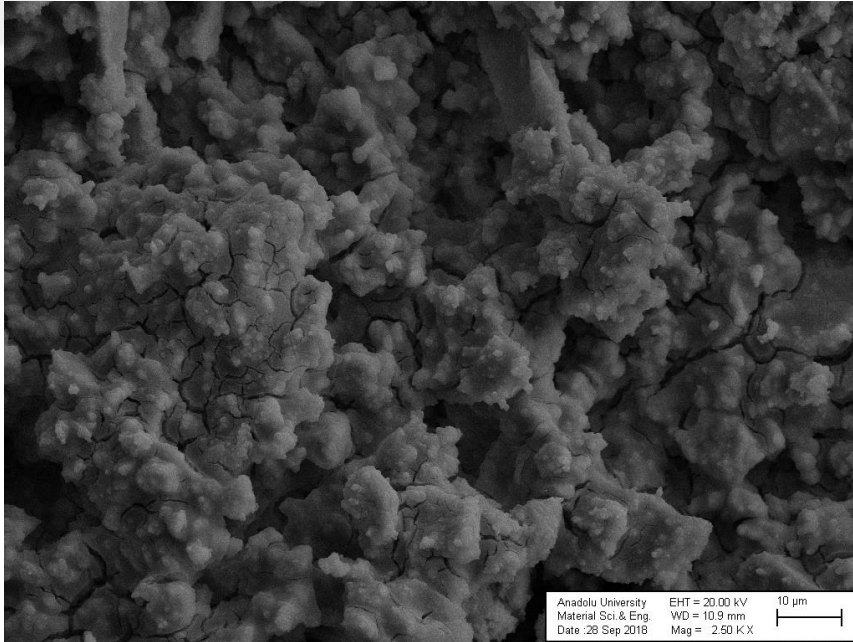
Şekil 5.53. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.54. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.55. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.56. Hazırlanan 8 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).

1250 °C’de gözlemlenen mikro yapı çatlakları 1270 °C’den sonra azalmış ve olan çatlakların genişlikleri 1250 °C’de sinterlenen numunedeki genişlikten daha azdır. Fakat bu çatlakların Şekil 5.56’da tekrar arttığı ve büyüdüğü gözlemlenmiştir. 1270 °C’de yapılan sinterleme denemelerinde eriyik fazda gözlemlenen ayrışmalar ve 1290 °C’de görülen mikro yapı çatlakları, reçetenin denemelerde kullanılamayacağı yorumu yapılabilirliğini açıklamaktadır.

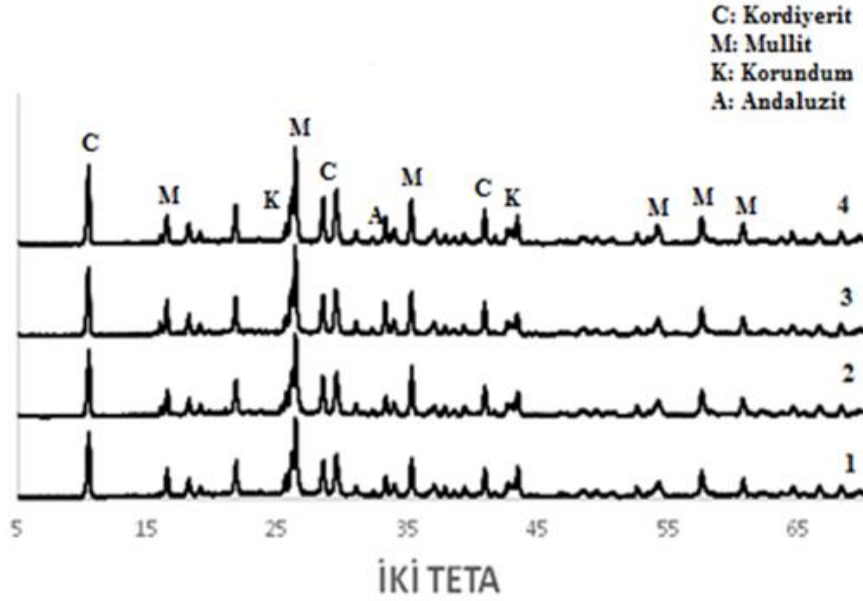
5.3.9. 9 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

9 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.16’da verilmiştir. Kimyasal analizlerde görülen MgO oranı, kordiyerit oluşumunun sağlanması için uygun gözükmemektedir. CaO miktarının düşük olması kızdırma kayıpları analizlerinde görülen düşük değerlerin sağlanmasını doğrulamaktadır. Tüm denemeler için yapılan kimyasal analiz sonuçlarında gözlemlenen en yüksek alkali oranına sahip reçetelerden biridir. Alkali oranının yüksek olması erime sıcaklıklarının dengelenmesi açısından önemli rol oynamaktadır.

Çizelge 5.16. Hazırlanan 9 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

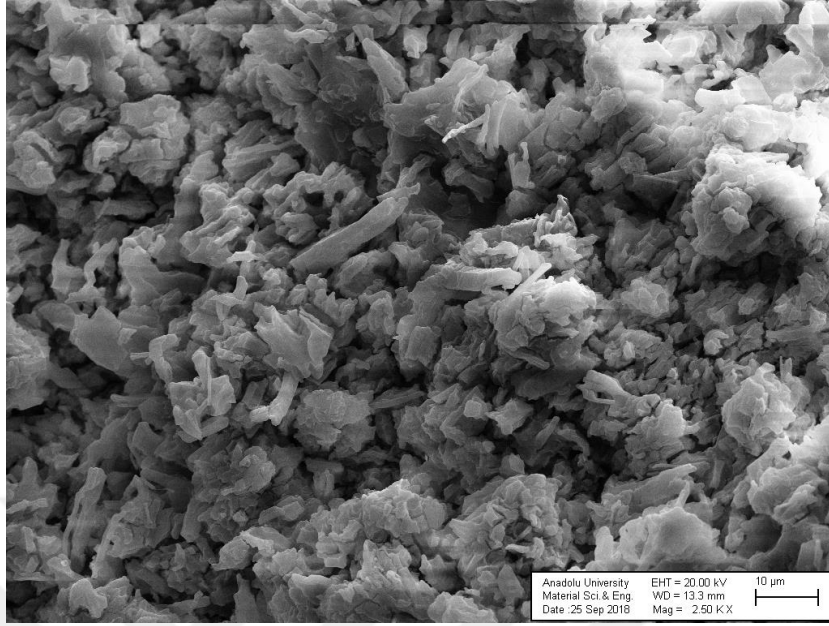
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,41	6,23	53,22	37,22	0,04	1,04	0,50	0,35	0,81	0,18	100
1250°C	0,36	6,06	53,37	37,27	0,04	1,03	0,35	0,41	0,93	0,18	100
1270°C	0,37	5,78	53,61	37,36	0,04	1,05	0,35	0,39	0,91	0,16	100
1290°C	0,39	6,20	53,25	37,36	0,04	1,04	0,34	0,38	0,89	0,11	100

Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.57’de verilmiştir. Mineralojik analiz sonuçları ile kimyasal analiz sonuçları birlikte yorumlandığında, sistem içerisinde görülen Al₂O₃ oranının yüksek olması mullit pik boyunu da etkilemiştir. Mullit piklerinin en yüksek gözlemlendiği reçete denemesidir. Piyasa filtresi denemelerinde görülen mineralojik yapıdan tek farklı andaluzit fazının oluşumudur.

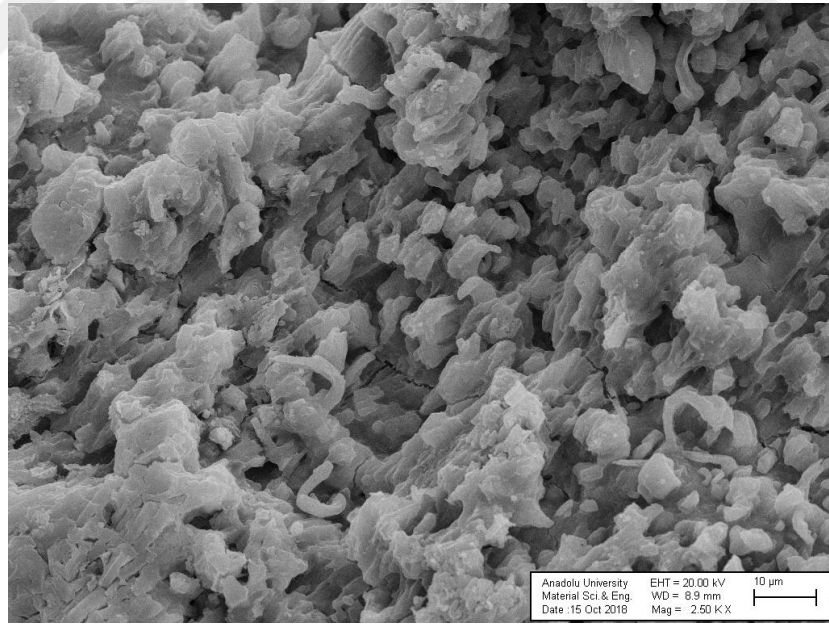


Şekil 5.57. Hazırlanan 9 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

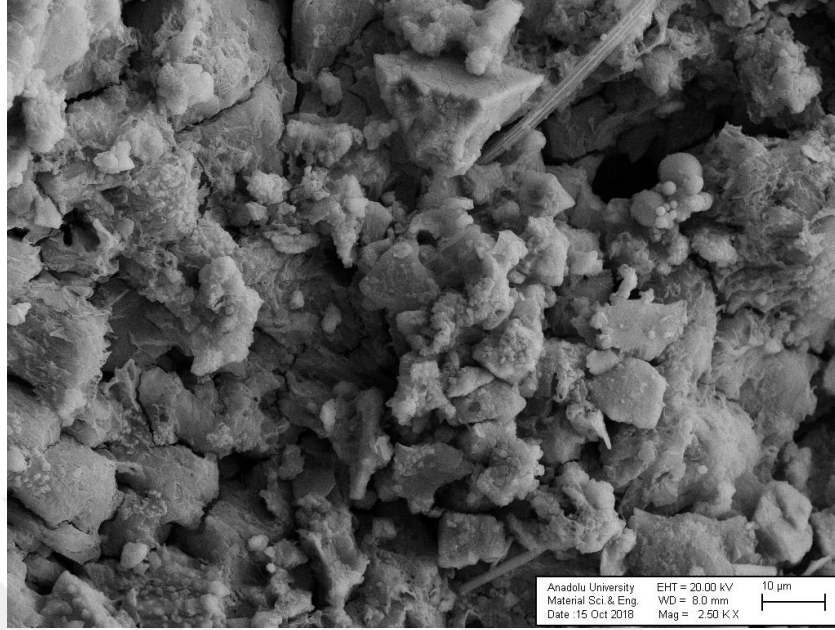
Mikro yapı analizlerinde gözlemlenen sonuçlara göre, özellikle 1290 °C sinterleme denemelerinde görülen eriyik faz içerisindeki mullit ve kordiyerit fazları istenilen yapının oluştuğunu göstermektedir. Özellikle 1270 °C’de ve 1290 °C’de sinterlenen numnelerde gözlemlenen çubuksu yapıların mullit fazı olduğu, plaka şeklinde tabakalı yapıların da kordiyerit olduğu tahmin edilmektedir. Her iki sıcaklıkta da mikro yapı analizleri incelendiğinde, sistemde mikro yapı çatlaklarının olmadığı da gözlemlenmiştir. Çin filtresinin aynı ölçekte yapılan mikro yapı analizleri ile karşılaştırıldığında yapıların içerisinde oluşan fazların birbirine benzer olduğu düşünülmektedir. Reçete denemelerinin mikro yapı analizleri Şekil 5.58, Şekil 5.59, Şekil 5.60 ve Şekil 5.61’de verilmiştir.



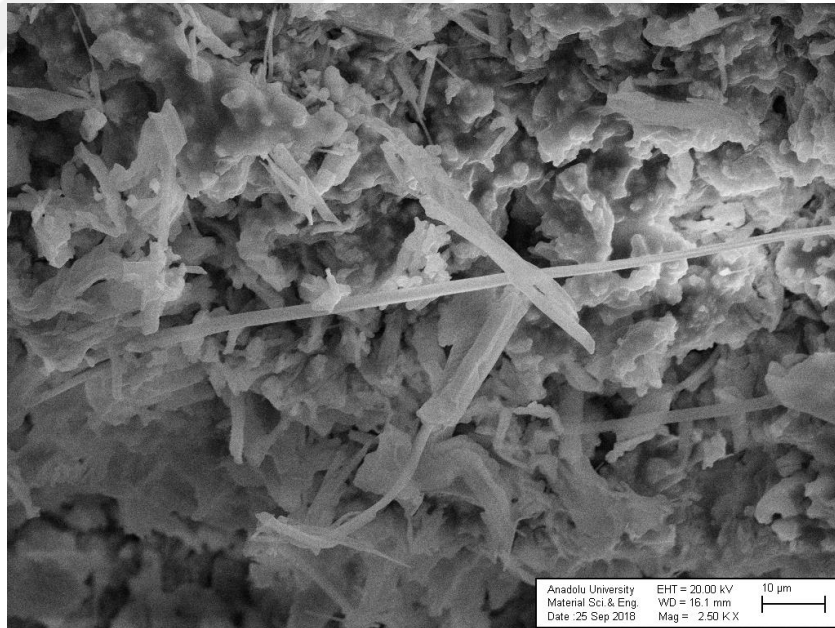
Şekil 5.58. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.59. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10μ uzunluğundadır).



Şekil 5.60. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.61. Hazırlanan 9 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).

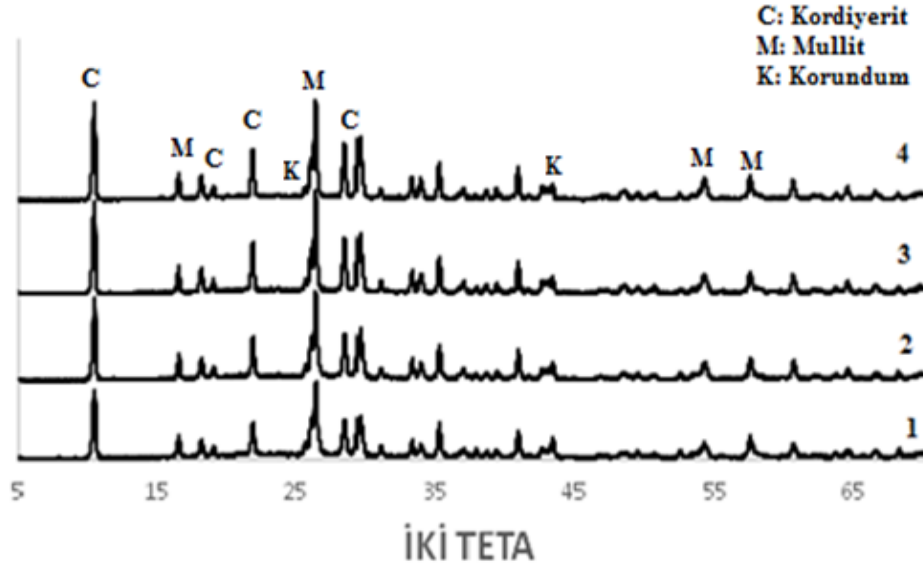
5.3.10. 10 nolu deneme reçetesi analiz sonuçları

10 numaralı reçete denemesinin kimyasal analiz sonucu Çizelge 5.17’de verilmiştir. Bu denemede sağlanan sonuçlar diğer denemelerdeki sonuçlar ile karşılaştırıldığında; en yüksek SiO₂ değeri, en yüksek ikinci MgO değeri ve en yüksek toplam alkali değerine sahip reçetedir.

Çizelge 5.17. Hazırlanan 10 nolu deneme reçetenin farklı sıcaklıklardaki sinterlemelerinin kimyasal analiz sonuçları (Sonuçlar % a. olarak ifade edilmiştir).

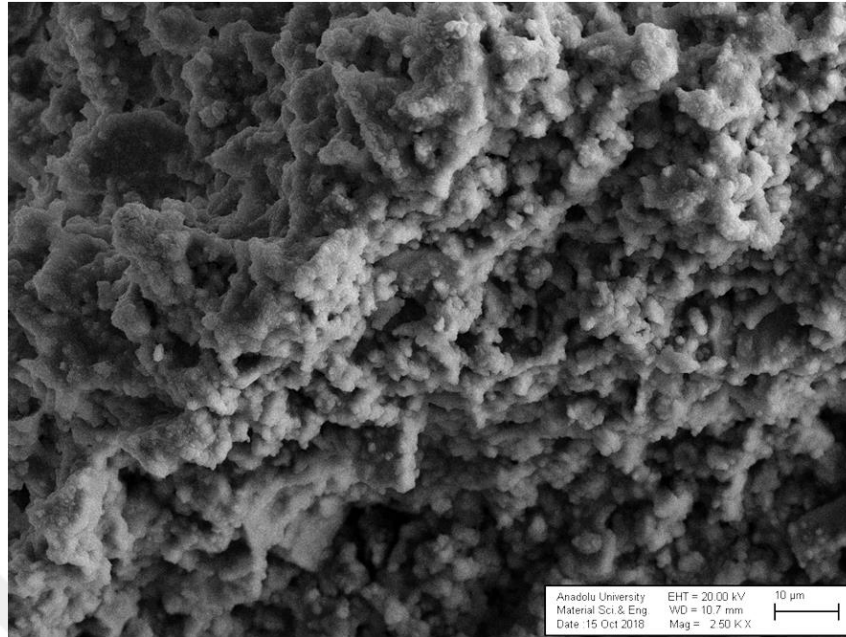
Sinterleme Sıcaklığı	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	A.Z.	Toplam
1230 °C	0,37	6,20	49,13	40,72	0,05	1,13	0,48	0,43	1,26	0,23	100
1250°C	0,44	6,16	48,46	41,50	0,03	1,13	0,48	0,45	1,14	0,21	100
1270°C	0,35	6,29	48,79	41,14	0,05	1,14	0,48	0,51	1,13	0,12	100
1290°C	0,29	6,12	48,53	41,38	0,05	1,13	0,49	0,51	1,42	0,08	100

Reçete denemelerinin mineralojik analizleri Şekil 5.62’de verilmiştir. 4 farklı sıcaklıkta yapılan denemelerin sonucunda da kordiyerit, mullit ve korundum fazları gözlemlenmiştir. Tüm denemelerin içerisindeki en stabil olan deneme reçetesidir. Mikro yapı analizleri ile birlikte incelendiğinde özellikle kordiyerit fazı plaka şeklinde görülmektedir.

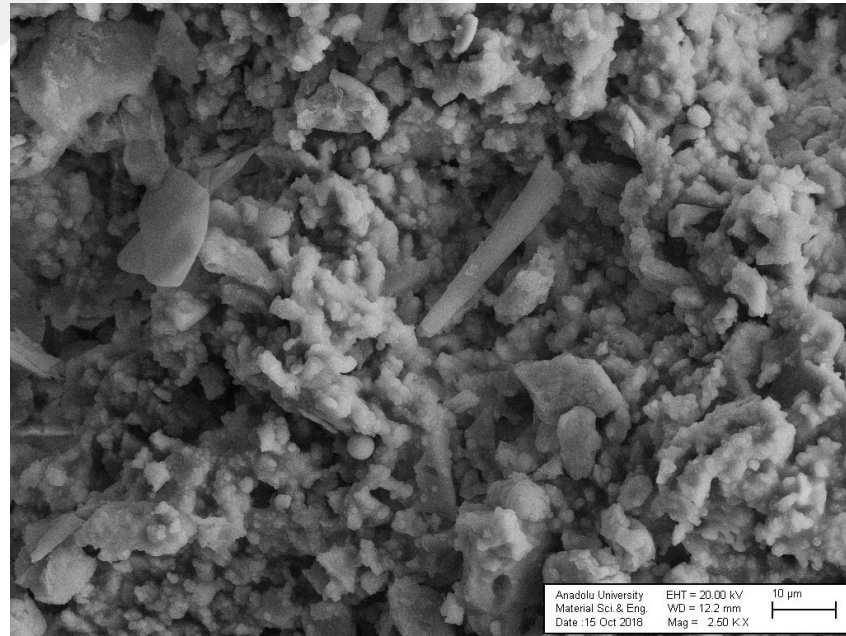


Şekil 5.62. Hazırlanan 10 nolu örneğin farklı sıcaklıklarda sinternemesinin XRD ile yapılan mineralojik analiz sonuçları (1: 1230 °C, 2: 1250 °C, 3: 1270 °C, 4: 1290 °C).

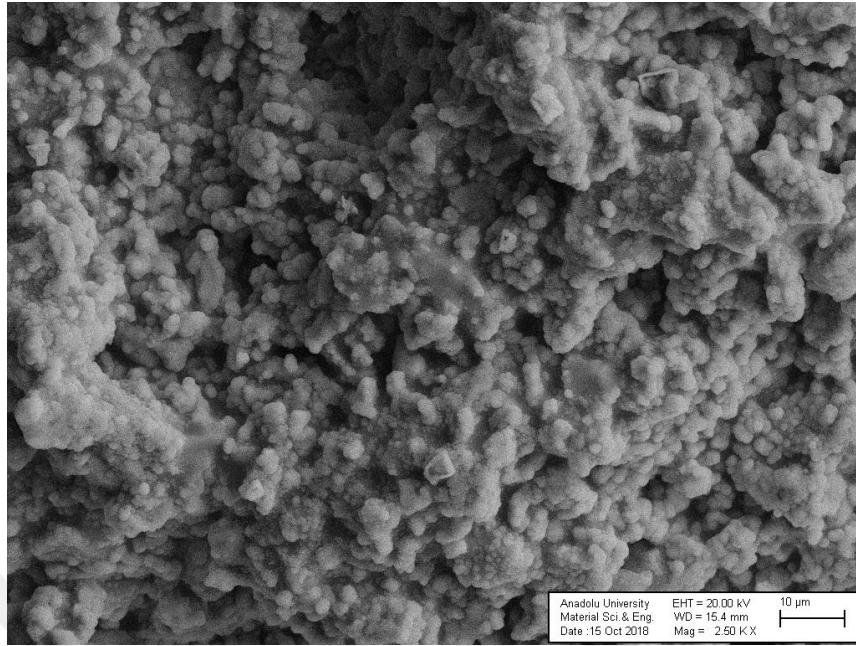
1230 °C, 1250 °C ve 1270 °C’de yapılan sinterleme denemelerinde kordiyerit fazları olduğu tahmin edilen plaka yapılarının net bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. 1290 °C’de yapılan sinterleme denemelerinde mikro yapı analizleri sonucunda yapılan gözleme göre camsı fazın arttığı görülmüştür. 1270 °C’de görülen mikro yapı ile piyasa filtresinde görülen mikro yapı birbirine benzer özellikler göstermektedir. Reçete denemelerinin mikro yapı analizleri Şekil 5.63, Şekil 5.64, Şekil 5.65 ve Şekil 5.66’da verilmiştir.



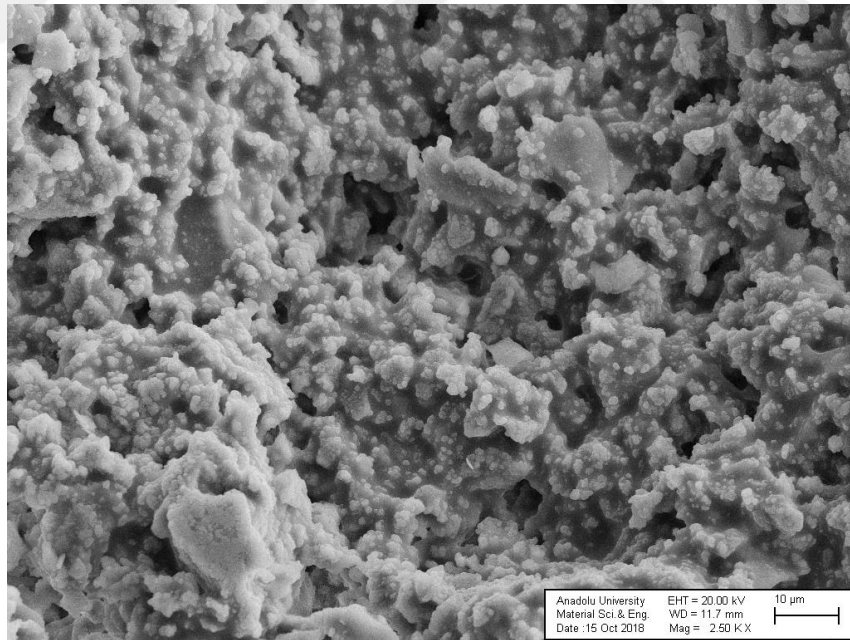
Şekil 5.63. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1230 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.64. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1250 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



Şekil 5.65. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1270 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).



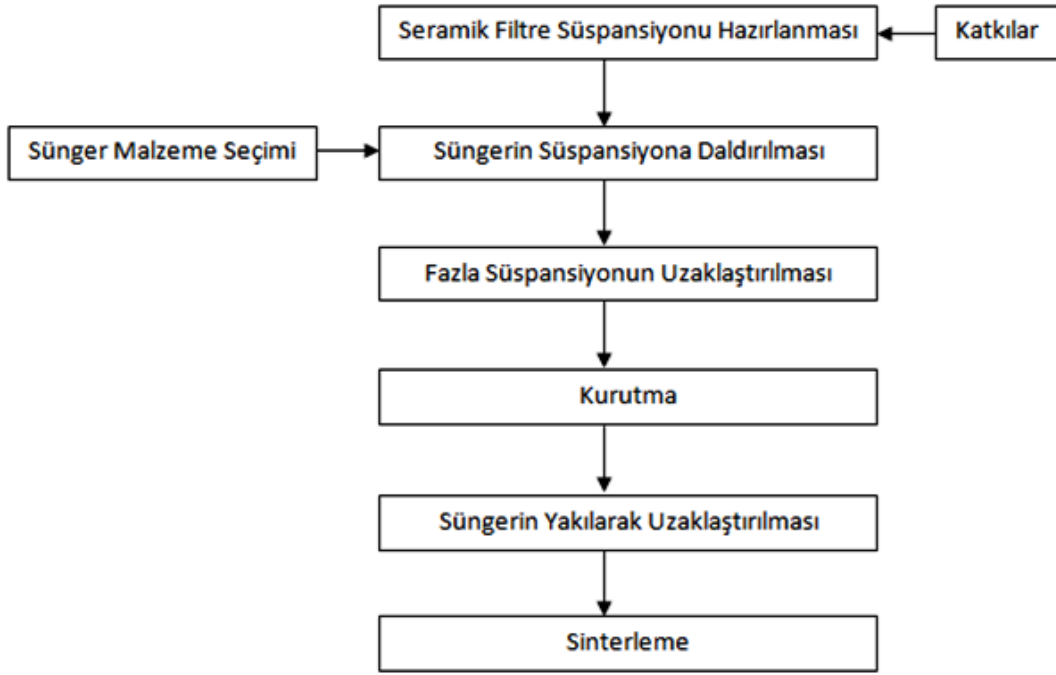
Şekil 5.66. Hazırlanan 10 nolu örneğin 1290 °C sıcaklıkta sinterlenen mikro yapısı (Çubuk 10 μ uzunluğundadır).

5.4. Filtre Şekillendirme Çalışmaları

Günümüzde eriyik metal döküm prosesleri, artan kalite talepleri doğrultusunda filtrasyon işlemi uygulamaktadır. Filtrasyon teknolojisi filtreleme verimliliği haricinde filtre özelliklerinin öneminin üzerinde durulduktan sonra gelişimini sürdürmüştür. Kullanılan filtrenin tutarlı bir akış hızına, iyi bir filtrasyon gücüne, yüksek kapasitede çalışabilmesine ve boyutsal olarak doğruluğa ve stabiliteye sahip olması gerekir. Metal döküm filtresi özellikleri, tüm alanlarda optimum performans sağlayacak şekilde tasarlanır. Piyasada çeşitli seramik filtre tipleri mevcuttur. Bunlar preslenmiş hücresel gözenekli, ekstrüzyonla şekillendirilmiş hücresel gözenekli ve köpük filtreler olarak üç tiptir. Pres ile şekillendirilen hücresel gözenekli filtrelerin gözenekleri genellikle yuvarlak şekilli, ekstrüzyon ile şekillendirilen hücresel gözenekli filtrelerin ise kare şeklindedir. Köpük filtrelerin gözenek yapıları ise şekillendirildikleri malzemenin gözenek yapısı ile aynı özellikte ve genelde ağ yapıdadır (<http://www.ductile.org/>).

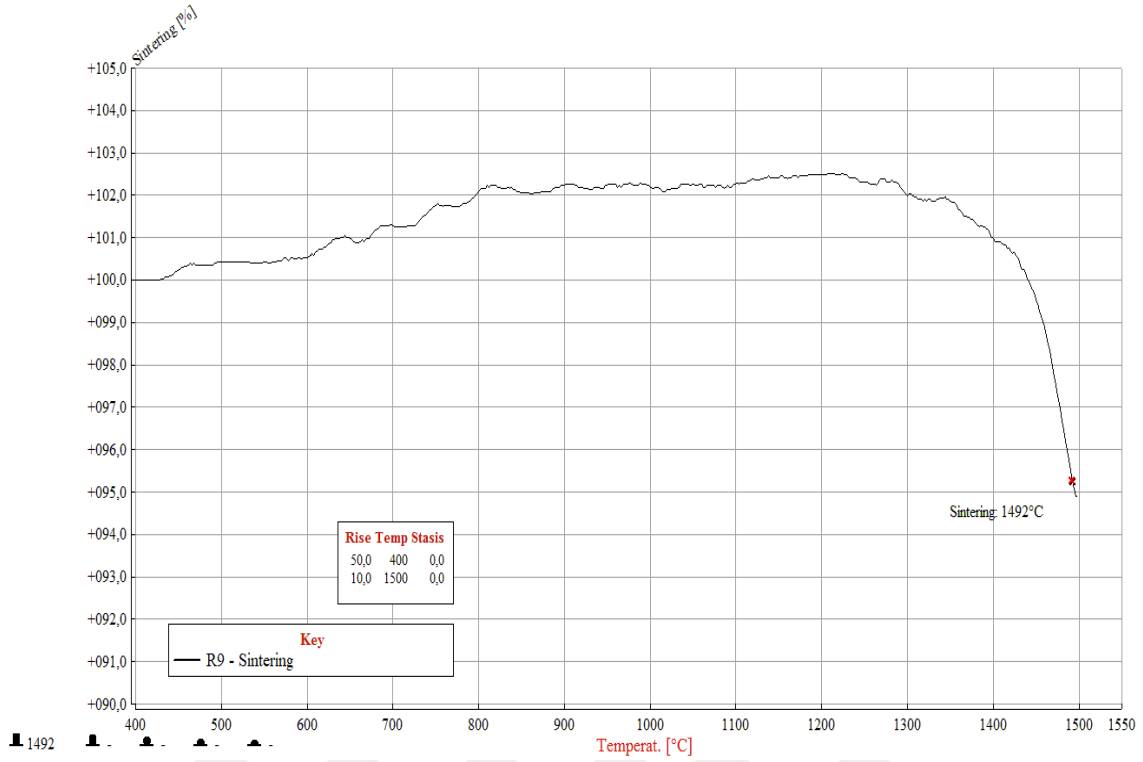
Filtre seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler filtrasyon verimliliği, metal eriyik kapasitesi, eriyik akış hızı, boyutsal doğruluk, dayanım ve maliyettir. Bu parametrelere göre 3 farklı şekillendirme yöntemi ile şekillendirilmiş filtre tipi seçilmektedir. Ayrıca, dayanım parametresi de göz önüne alınarak filtre malzemesi seçilmektedir.

Deneysel çalışmalarda polimerik sünger metodu ile şekillendirme yöntemi kullanılarak başlanmıştır. Bu yöntem için uygulanan işlemlerin akış şeması Şekil 5.67’de verilmiştir.



Şekil 5.67. Seramik metal döküm filtresi üretim akış şeması.

Seramik metal döküm filtresi prosesine uygun olarak analizleri yapılan 10 farklı reçeteden, piyasada satılan filtre numunesine en yakın özelliklerde olan 9 numaralı deneme reçetesinin sıvı süspansiyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan 9 numaralı reçete süspansiyonunun, şekillendirme sonrasında dayanabileceği maksimum sıcaklığın görülebilmesi için optik dilatometre analizi yapılmıştır. Optik Dilatometre sonucuna göre; şekillendirilecek olan filtre malzemesinin 1492 °C'ye kadar dayanabileceği görülmüştür. Optik dilatometre ile belirlenen sinterleme davranışı grafiği Şekil 5.68'de verilmiştir. Şekillendirme aşamasında kullanılması gerekli olan sünger seçimi yapılmıştır. Sünger malzemesi 350 °C'de çözünebilen polimerik özellikte olan 3 farklı gözenek açıklığına (10,20 ve 30 ppi) sahiptir.



Şekil 5.68. Optik dilatometre ile belirlenen 9 nolu reçetenin sinterleme davranışı grafiği.

Polimerik sünger yardımı ile şekillendirilecek olan filtre malzemesi belirlenen reçete ve bu şekillendirme yöntemi için uygun olabilecek reolojik özelliklerde bir filtre süspansiyonu hazırlanarak polimerik süngerin bu süspansiyon ile doyması sağlanmıştır. Bu aşamada polimerik süngere süspansiyonun bağlanabilmesi ve yapışması ile süngerimsi yapıda oluşturulacak et kalınlığının filtre ürünün fiziksel ve mekanik özelliklerine göre ayarlanması çalışmaları yapılarak optimum süspansiyon yoğunluğu belirlenmiştir. Reolojik olarak uygun hale gelebilmesi için Ece Banyo Gereçleri'nde üretilen işletme çamurları ile şekillendirme aşamaları denemeleri yapılmış, daha sonra filtre süspansiyonu için optimum şartlar belirlenmiştir.

Seramik sağlık gereçleri çamurlarında kullanılan kil ve kaolen miktarı, uygulanan şekillendirme yöntemi göz önünde bulundurulduğunda genellikle %50 civarlarındadır. Bu oran işletme ve dökümhane şartlarına, işletmenin bulunduğu iklim koşullarına göre değişkenlik göstermektedir. Çizelge 5.18'de Ece Banyo Gereçleri bünyesinde kullanılan çamurların reolojik özellikleri ve denemeler sonunda çalışmalarda kullanılan reolojik değerler karşılaştırmalı olarak

verilmiştir. Yapılan tüm çalışmalarda ortam sıcaklıkları ve hazırlanan çamur numunelerinin sıcaklıkları 25 °C olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 5.18. Ece banyo gereçlerinde kullanılan seramik sağlık gereçleri çamurlarının reolojik özellikleri.

	Vitreous China (VC) Çamuru	Fine Fire Clay (FFC) Çamuru	Filtre Çamuru
Yoğunluk	1803	1905	1620 – 1650
Birinci Viskozite	304	270	328
İkinci Viskozite (6 dk.)	228	200	292
Tiksotropi	76	70	36

VC ve FFC çamurlarının mevcut reolojik değerleri ile yapılan şekillendirme çalışmalarında polimerik filtre malzemesi üzerinde kalınlık aldırılmış fakat aynı reolojik özellikler filtre çamuruna uygulandığında kalınlık alma problemleri oluşmuştur. Burada gözlemlenen temel sebebin filtre reçetesi içerisinde bulunan organik bağlayıcıların (kil) ve kalınlık almaya yardımcı organik malzemelerin (kaolen) az olmasından kaynaklı olduğu tespit edilmiştir. Bu problemleri giderebilmek için aynı reolojik özellikler korunarak kimyasal bağlayıcı kullanılmıştır. Bu bağlayıcılar seçilirken farklı kimyasal özelliklerde olmasına dikkat edilerek seçilmiştir. Bu bağlayıcılar ve bağlayıcı kimyasal içerikleri Çizelge 5.19’da verilmiştir.

Çizelge 5.19. Şekillendirme çalışmalarında kullanılan bağlayıcılar ve bağlayıcının kimyasal içerikleri.

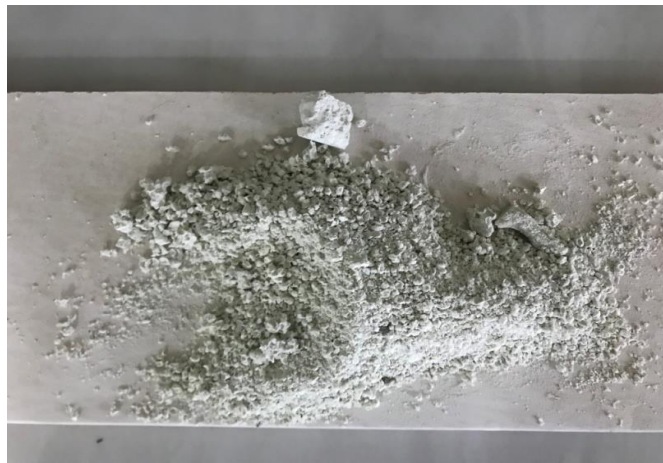
Kimyasal Bağlayıcı Adı	Kimyasal İçerik
Reolam CS 218 – Reolam CS 390	Sentetik Polimer
Castimo Mix Mikro Likit	Metil Metakrilat
Duratek AV 95/A – B	Epoksi Reçine
PEG 4000	Poli Etilen Glikol

Kullanılan tüm bağlayıcılar farklı tipte bağlayıcılar olup sinterleme aşamasında düşük sıcaklıklarda bünyeden uzaklaşmaktadır. Bu sayede bünyenin kimyasal özelliklerini bozmadan şekillendirme imkanı sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda farklı oranlarda bağlayıcı katkısı şekillendirme denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bağlayıcı katkıları yapıldıktan sonra reolojik özellikler şekillendirme çalışmalarına uygun hale getirilmiştir. Denemeler sonucunda bazı katkılarda kalınlık alma problemlerinin olduğu, bazı katkılarda kurutma prosesinden sonra kuru

mukavemetin düşük olmasından dolayı çatlak ve kırıklar olduğu, bazı katkıları ile de sinterleme aşamasından sonra pişme mukavemetinin istenilen ölçüde olmadığı tespit edilmiştir.

Su bazlı sentetik polimer olan Reolam CS 218 ve amin katkısı ile geliştirilmiş Reolam CS 390 malzemeleri ile 6 farklı deneme yapılmıştır. Her iki polimer malzeme de %0,01 ve 0,05 oranlarında test edilmiştir. Her iki katkı oranında da şekillendirme başarısız olmuştur. Ayrıca her iki polimerik malzeme % 50-50 oranında karıştırılarak %0,01 ve 0,05 oranlarında katkı yapılmıştır. Tüm denemelerde polimerik sünger malzemesi üzerinde kalınlık aldırma problemleri gözlemlenmiştir.

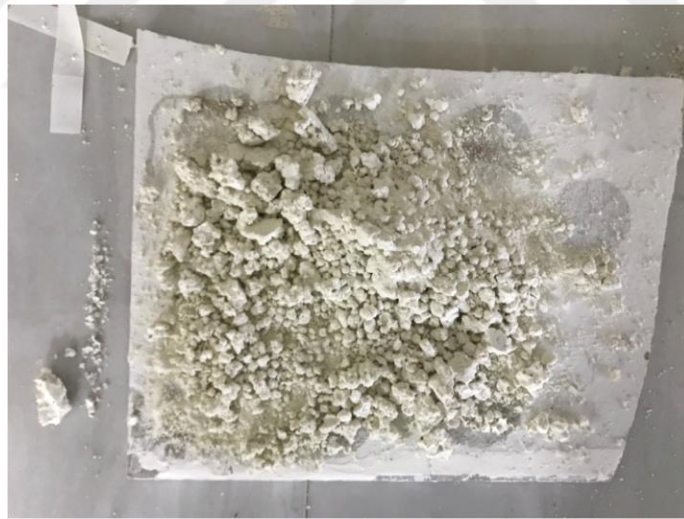
Metil Metakrilat malzemeler polimerik reçine üretiminde kullanılan poli metil metakrilat bileşiklerinin monomerleridir. Reçine sistemi içerisinde bağlayıcı özellik göstermektedir. Seramik sağlık gereçleri sektöründe yüksek basınçlı döküm tezgahlarının polimer kalıplarının üretiminde kullanılan monomer malzemelerden biridir. Şekillendirme çalışmalarında % 0,1 ve 0,5 oranlarında katkıları yapılmıştır. Özellikle %0,5 oranında yapılan denemelerde şekillendirme aşamasında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak monomerin 100 °C olan kaynama sıcaklığına sahip olmasından dolayı kurutma aşamasında monomerin çözünerek kimyasal gazları ortama bıraktığı görülmüştür. Şekillendirilen filtre numuneleri 1250 °C ve 1270 °C'de sinterlenmiştir. Her iki sinterleme işleminden sonra filtre numunelerinin pişmiş mukavemetlerinin olmadığı görülmüştür. Ayrıca sinterleme sonrasında çıkan köpük filtrenin, metil metakrilat ilavesi kaynaklı olarak renginin değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 5.69).



Şekil 5.69. Şekillendirme sonrası parçalanmış metil metakrilat katkılı köpük filtre.

Duratek firmasından temin edilen epoksi reçine malzemeleri için farklı oranlarda 6 ayrı test yapılmıştır. Temin edilen epoksi reçineler iki ayrı malzemeden oluşmaktadır. Bu iki malzeme %65-35 oranlarında karıştırılarak 80 °C'de 12 saat kürlendikten sonra herhangi bir hacimce küçülme olmaksızın katılaştırılır ve uygulandığı alanda mukavemet sağlar. Yapılan denemelerin tamamında %0,2 ile 0,5 oranları kullanılmıştır. Kalınlık alma ve malzemenin sinterleme aşamasına kadar bütünlüğünü koruması açısından herhangi bir problem gözlemlenmemiştir. Ancak monomer malzemelerin denemelerinde görüldüğü gibi kurutma aşamasında sağlığa zararlı gazlar tespit edilmiştir. Sinterleme işlemleri 1250 °C ve 1270 °C'lerde uygulanmıştır. Sinterleme aşamasından sonra çıkan numunelerde parçalanmalar görülmüştür.

PEG 4000 kodlu ürün seramik sağlık gereçleri ve seramik kaplama sektöründe kullanılan bir polimer bazlı sıvı bir dağıtıcıdır. Süspansiyon içerisinde 4 farklı deneme yapılarak % 0,5, 1, 3 ve 5 oranlarında katkı yapılmıştır. Yapılan tüm denemelerde polimerik sünger üzerinde şekillendirme yapılamamıştır (Şekil 5.70).



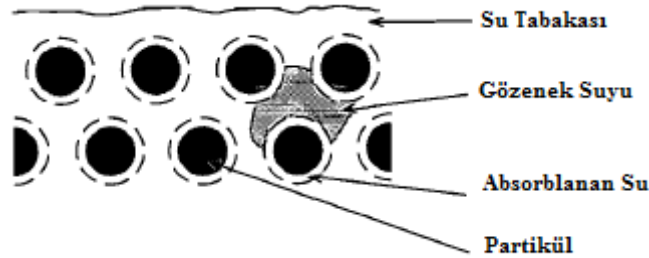
Şekil 5.70. Şekillendirme sonrası parçalanan PEG 4000 katkılı köpük filtre.

5.5. Filtre Numunelerin Kurutulması ve Sinterlenmesi

Kurutma işlemini anlamak, seramik üreticilerinin kurutma sorunlarını çözmelerine ve daha etkili kurutma prosesleri geliştirmelerine yardımcı olmaktadır. Ancak seramik bünyeler farklı şekilde kurduğundan reel bir kurutma anlayışı kazanmak, kurutma işleminin belirli bir

seramik bünye üzerindeki etkilerinin gözlemini ve ölçümünü gerektirir. %15-20 su oranı ile şekillendirilmiş bir seramik bünye kurutulduğunda, bünye küçülür ve su kaybeder (<https://www.ceramicindustry.com>).

Eşit olarak dağılmış suya sahip higroskopik bir bünye ısıtılmış bir hava akışında kurutulduğunda, su buharlaşır ve havaya salınır. Bünyenin dış katmanındaki su önce buharlaşır ve bünye içerisindeki su molekülleri hareket eder. Kurutma prosesi devam ettikçe buharlaşma su transferinin azalmasıyla içe kısımlara doğru kaymaktadır. Bünye içerisinde buharlaşan su yüzeye doğru çıkar ve ortama bırakılır. Buharlaşmanın kademeli olarak içe kayması iç difüzyon direncini artırır ve kurutma hızının aniden düşmesine neden olur. Şekil 5.71’de seramik bünye içerisinde bulunan su molekülleri ve buldukları konum gösterilmiştir. Bünyede bulunan bu sular farklı fiziksel özelliklerdedir ve aynı anda değil ardışık olarak uzaklaşır. Yüzeydeki su tabakası en çabuk ve en kolay uzaklaşan su tabakasıdır. Yüzeyde bulunan su bünyede kaldığı sürece partiküller birbirinden izoledir. Bu aşamada şekillendirilmiş seramik bünye sürekli küçülmekte ve partiküller tarafından absorblanan su yüzeye aktarılana kadar devam eder. Bu aşamanın sonunda bünye plastikliğini kaybeder ve suyun bıraktığı boşlukları hava doldurur. Böylece kuruma küçülmesi de oluşmuş olur (Asami, 1993).

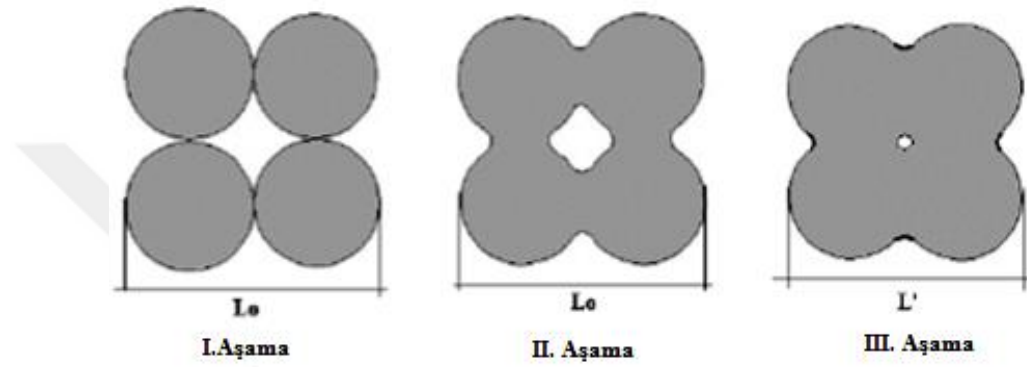


Şekil 5.71. Seramik bünyelerdeki su moleküllerinin konumu (Asami, 1993).

Kurutma aşamasında bünyeden ayrılan fiziksel su seramik malzemelerin üretim proseslerinin ilerleyen aşamalarında şekillendirilmiş ürüne zarar vermemesi için bünyeden uzaklaştırılır. Isınan su molekülleri genişleceğinden sinterleme aşamasında bünye içerisinde kalan su molekülleri seramik malzemenin ani şekil bozukluklarına neden olmaktadır. Şekillendirme ve kurutma sonrası malzemenin mukavemet kazanmasına sebep olur.

Seramik bünyeleri oluşturan partiküller şekillendirme esnasında sıkı paketlenmiş bile partiküller arasında boşluklar kalır ve bu boşluklar porozite olarak adlandırılır. Gözenek

miktarını seramik malzemeyi oluşturan hammaddelerin içerisindeki partiküllerin tane boyut dağılımı belirler. Sinterleme aşamasında difüzyon hızı arttığından birbiri ile temas eden partiküller arasında karşılıklı atomik difüzyon gerçekleşir ve boyun oluşumu ile partiküller birbiri ile birleşir. Bu sayede porozite miktarı azalır (<http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr>). Sinterleme aşamasında boyun oluşumu ve partiküllerin birbiri ile birleşmesi Şekil 5.72.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.72. Seramik bünyelerde sinterleme aşamaları ve boyun oluşumu (<http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr>).

Birinci aşamada birbiri ile temas halinde olan partiküller boyun oluşturmaya başlar. İkinci aşamada ise malzeme yoğunluğu bünye içerisinde artar ve bünye içindeki gözenek miktarı zamanla doğru orantılı bir şekilde azalır. Üçüncü aşamada ise taneler arasındaki boşluk kapanır ve gözenek miktarı en düşük seviyeye gelir. Bu işlem oldukça yavaş ilerler. Taneler sıcaklık etkisi ile büyür ve gözenekleri olabilecek en düşük orana indirir (<http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr>).

Köpük filtre şekillendirilmesi yapılırken Şekil 5.37'deki üretim prosesinde de görüldüğü gibi kurutma aşamasından sonra sinterleme öncesi sünger malzemenin yakılarak sistemden uzaklaştırılması sağlanmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda filtre malzemesi yakma işlemi 500 °C'de yapılmıştır. Ayrıca bu işlem yapılmadan sinterlenen numune filtreler de denemesi yapılarak işlemler arasında oluşan farklılıklar gözlemlenmek istenmiştir. Fakat kuru mukavemetlerin düşük olmasından, polimerik sünger malzemesi üzerinde çamurun kalınlık alma problemlerinden ve sinterleme sonrası pişmiş mukavemetin de düşük olmasından kaynaklı olarak polimerik süngerin bünyeden uzaklaştırıldığı ve uzaklaştırılmadığı takdirde ne gibi problemler ile karşılaşılacağı çözümlenememiştir.

Kurutma prosesi Ece Banyo Ar-Ge Merkezi laboratuvarında bulunan etüvde 105 ± 5 °C'de 16 saat bekletilerek yapılmıştır. Ürünler şekillendirme aşamasından sonra süzülmesi için dış ortamda 2 saat bırakılmış ve daha sonra 16 saatlik kurutma prosesine alınmıştır.

Sinterleme işlemleri reçete çalışmalarında 4 farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Bu sıcaklık farklılıklarında oluşacak fazların yapısı ve kimyasal yapısının değişkenliği, ayrıca mikro yapıdaki camsı faz oluşumları ile mullit ve kordiyerit fazlarının oluşma oranlarına bakılmıştır. Bu sonuçlara göre 1250-1270 °C aralığında numunelerin sinterlenebileceği belirlenmiş ve deneysel çalışmalarda bu sıcaklık aralıkları kullanılmıştır.

Sinterleme çalışmaları Ece Banyo Ar-Ge Merkezi laboratuvarında bulunan kül fırında 1250 ve 1270 °C'de yapılmıştır. Fırında en üst sıcaklıklara çıkılırken sıcaklıklar kademeli olarak arttırılmıştır. Uygulanan rejim seramik sağlık gereçlerinde uygulanan rejim ile benzer özellikler gösterebilmesi açısından yakın belirlenmiştir. Uygun rejim belirlenirken Çizelge 5.20 ve Çizelge 5.21'de verilen seramik malzemelerin sinterlenmesinde dikkat edilmesi gereken sıcaklık geçişleri göz önünde bulundurulmuştur.

Çizelge 5.20. Sinterleme işleminin sıcaklığın yükselme aşamasında oluşan reaksiyonlar ve dikkat edilmesi gereken sıcaklık aralıkları (Fraser, 2010).

Sıcaklık (°C)	Sıcaklığın Yükseldiği Aşamada Oluşan Reaksiyonlar
20-200	Kalan gözenek suyu bünyeden buharlaşarak uzaklaşır. Bu su içeriği %1'den küçük olmalıdır. Eğer ürün kuru değilse ve pişirme hızı yüksekse patlama veya kılcal çatlak riski fazla olur.
200-500	Ürünün hızlı pişirildiği bölgedir.
470-700	Kimyasal bağlı su bünyeden uzaklaşır. Karbonatlar bozunmaya başlar. Bünye gözenekli olduğundan dolayı gaz çıkışları önemli değildir. Fakat pişirim hızına dikkat edilmelidir. 573 °C'de kuvars dönüşümü olduğundan kontrollü bir geçiş ile sinterleme işlemi yapılmalıdır. Ürün bu bölgede genişler ve endotermik reaksiyonlar oluşur.
650-1000	Çamur içerisinde bulunan kil minerallerindeki serbest karbon bünyeden uzaklaşır. Bu esnada bünyeden gaz çıkışı olduğundan bu bölgede yavaş geçilmesi gerekir.
880-1100	Bünyenin küçüldüğü aşamadır. Sülfatlar bozunur ve sır-bünye ara yüzeyi oluşmadan önce bünyedeki sülfat uzaklaştırılmalıdır.
1030-1170	Sır-Bünye ara yüzeyi oluşur. Mullit fazı oluşmaya başlar. Pişmiş mukavemet artar.
1100-1230	Eğer ara yüzey oluşmuşsa gazlar sırsız kısımlardan çıkar. Sır eridiğinde ve olgunlaştığında pişirme hızı yavaşlatılmalıdır veya olgunlaşma sıcaklığında tutulup erimiş sırdan çıkan hava kabarcıkları vs. çıkması hızlandırılır. Reaksiyon tabakası oluşur. Bünye küçülmesi ve vitrifikasyon devam ederken düzgün yerleştirilmemiş veya desteklenmemiş ürünün deformasyon olma riski de devam eder.

Çizelge 5.21. Sinterlemenin işleminin sıcaklığın düştüğü aşamada oluşan reaksiyonlar ve dikkat edilmesi gereken sıcaklık aralıkları (Fraser, 2010).

Sıcaklık (°C)	Sıcaklığın Düştüğü Aşamada Oluşan Reaksiyonlar
1230-750	Erimiş sır likidüs noktasına doğru soğur. Sırda camlaşma ve kristalleşme olmaya başlar. Yüzey parlaklığı bu noktada sağlanır.
750-600	573 °C'de kuvars dönüşümü tersinir reaksiyon ile gerçekleşir. Bu sıcaklığa kadar sıcaklık düzenliliğini sağlamak için soğutma makul şekilde yavaş yapılmalıdır.
600-500	573 °C'de kuvars dönüşümünden kaynaklı soğuma çatlaklarını önlemek için bu bölge yavaş geçilmelidir.
500-150	225 °C'de kristobalit dönüşümünün neden olduğu çatlama riskinden korunmak için yavaş geçilmelidir.

Laboratuar denemelerinde kullanılan rejim Çizelge 5.22'de verilmiştir. Soğuma rejimi laboratuar çaplı denemelerde yapılamamaktadır. Bunun sebebi laboratuarda bulunan fırınlarda yalnızca ısıtma rejimi yapılmaktadır. Ayrıca zaman sütununda yazan değerler dakika cinsinden

olup, aralıktaki maksimum sıcaklıkta bekleme süreleridir. Sıcaklık aralıklarının farkına göre sıcaklık artış hızı değişkenlik göstermiştir.

Çizelge 5.22. Laboratuvar denemelerinin sinterleme sıcaklık aralık ve süreleri.

Sıcaklık (°C)	Zaman (dk)
0-200	15
200-400	25
400-500	20
500-573	45
573-650	30
650-800	45
800-900	30
900-1000	30
1000-1100	40
1100-1230	60

Denemeler 9 nolu deneme reçetesi ile yapılmıştır. Reçetede bulunan yüksek atık miktarından kaynaklı olarak sinterleme sonrası deneme numunelerinde parçalanmalar görülmüştür. Filtre bünyesinin bir arada tutunamaması, polimerik sünger üzerinde malzemenin farklı oranlarda kalınlık almasına bağlı olduğu belirlenmiştir. Fakat kalınlık arttırıcı ajanlar kullanılan reçetelerde de aynı problemler gözlemlenmiş, fırın sinterleme rejiminde değişiklik yapılmıştır. Şekillendirilen bağlayıcı katkılı ve katkısız deneme numuneleri Ece Banyo bünyesinde bulunan tünel fırınlarda, fırın arabalarında ürün konulan kordiyerit plakaların alt kısmına yerleştirilmiştir. Bu bölgede fırın sıcaklıklarını arttıran brulörler bulunduğu için sıcaklık 1255-1260 °C aralığında görülmektedir. Fırın sıcaklıkları seramik sağlık gereçleri ürünleri üretilen fırın olduğundan kademeli olarak çıkmakta ve sıcaklığın en yüksek olduğu tepe noktasından sonra kontrollü bir şekilde soğutmaya geçmektedir. Tünel fırın rejimi yaklaşık 13 saat 30 dakikadır. Köpük filtre olarak şekillendirilen numuneler fırın plakalarının alt kısımlarına konulmuş ve 13,5 saatlik rejim ile sinterlenmiştir. Fakat sinterlenen tüm denemeler laboratuvar denemelerinde olduğu gibi parçalanmıştır.

Sünger filtre ile şekillendirilen numunelerde yapılan sinterleme denemelerinin sonucunda döküm denemesi yapabilecek bir ürün elde edilememiştir. Bu bakımdan bal peteği şeklinde ürünler şekillendirilmiş ve sinterlenmiştir. Bal peteği şeklinin verilebilmesi için çelik dökümden yapılan kalıp hazırlanmış ve 50 ton baskı gücü olan bir hidrolik pres ile % 8 nem oranında şekillendirme yapılmıştır. Şekillendirme aşamalarında kimyasal bağlayıcı katkısı yapılmamıştır. Nemlendirme işlemi püskürtme yöntemi ile yapılarak tanelerin topaklanması ve

homojen granül haline gelebilmesi sağlanmıştır. Bu sayede basınç altında taneler birbiri ile daha sıkı paketlenmektedir.

Şekillendirilen bal peteği filtre numuneleri hem laboratuvar kül fırınında hem de Ece Banyo bünyesindeki tünel fırınlarda iki farklı rejim ile sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının maksimum noktası tünel fırından çıkan sıcaklık halkası sonucuna göre belirlenerek, laboratuvar çaplı deneme ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Fırın sıcaklığını ölçmek için kullanılan sıcaklık halkaları Şekil 5.73'te verilmiştir. Her iki filtre numunesinde de Şekil 5.69 ve Şekil 5.70'deki gibi parçalanmalar gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.73. Fırın sıcaklıklarını ölçmek için kullanılan sıcaklık halkaları (<https://www.schupp-ceramics.com/>).

5.6. Metal Döküm Denemeleri

Üretilen filtre numunelerinin döküm performanslarını değerlendirebilmek için Çorum Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Duduğolu Çelik Döküm Sanayi A.Ş.'nde döküm denemesi yapılmıştır. Denemede kullanılan filtre bal peteği filtredir. Döküm denemesi sonunda filtrenin tek parça kalıp kalmadığına ve metal malzemenin döküm kalitesine bakılmıştır.

Denemeler yapılmadan önce yapılan deneme reçetelerinin Seger analizlerinden çıkan teorik erime sıcaklığı hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken kimyasal analizden çıkan her bir elementin erime sıcaklığına ve konsantrasyon içerisindeki molarite oranlarından çıkan Seger

hesaplamasındaki değer ile oranlanarak bulunmuştur. Filtre şekillendirmelerinde kullanılan 9 ve numaralı reçetenin teorik erime sıcaklıkları 1413 °C'dir. Döküm yapılmadan önce bu sıcaklık değerleri teorik olarak hesaplanmış ve döküm sıcaklığının bu sıcaklık değerlerinin altında olması istenmiştir. Ayrıca optik dilatometre analizinden çıkan sonuç ta göz önünde bulundurulmuştur. Döküm yapılacak olan metalik malzeme pik demir olup 1386 °C'de döküm gerçekleşmiştir. Deneme filtresinin döküm testinin yapılabilmesi için içerisinde silis kumu kullanılan bir kalıp yapılmış ve filtre konulacak yer kalıp üzerinde belirlenmiştir. Kalıp hazırlandıktan sonra döküm işlemleri gerçekleştirilmiş ve soğuması için 24 saat boyunca dökümhane ortamında bırakılmıştır. Kalıptan çıkarılan metalik malzeme üzerindeki kumların ve istenmeyen parçaların giderilmesi için bilyeli temizleme makinesinde 3 dakika boyunca metal bilye bombardımanına tutulmuştur. Bu işlem sonucunda istenilen şekillendirilmiş ürün ortaya çıkmıştır. Malzeme ile döküm yoluğu arasında seramik deneme filtresinin tek parça halinde kaldığı görülmüştür. Metal döküm işlemleri ile ilgili adımlar ve nihai ürün Şekil 5.74'ten Şekil 5.83'e kadar sırası ile verilmiştir.



Şekil 5.74. Hazırlanan deneme kalıbının dökümden önceki kapatılmış şekli.



Şekil 5.75. Hazırlanan deneme kalıbı ve filtrenin kalıp içerisinde bulunduğu konum.



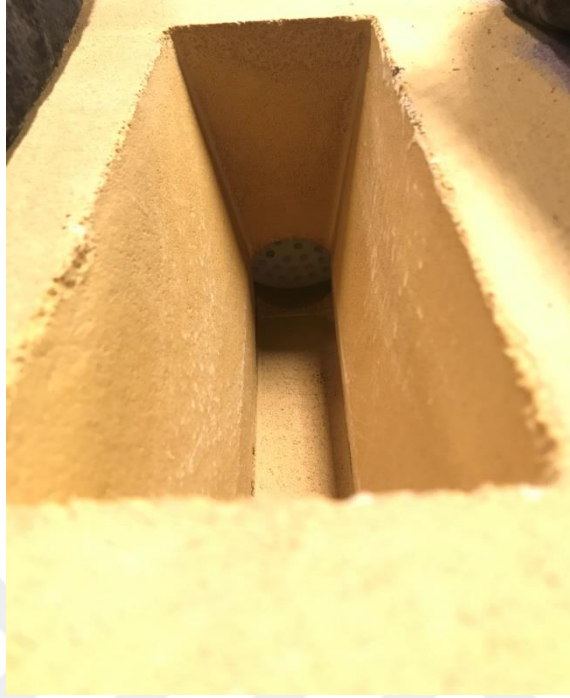
Şekil 5.76. Hazırlanan deneme kalıbının döküm yolluğu ve filtre konumu.



Şekil 5.77. Döküm denemesinde kullanılan metal eriyik aktarma potası.



Şekil 5.78. Metal ergitme potası ve fırını.



Şekil 5.79. Kalıp kapatıldıktan sonra kalıbın içerisinde kalan deneme filtresi.



Şekil 5.80. Döküm sonrası soğumaya bırakılan deneme kalıbı.



Şekil 5.81. Deneme kalıbının açılması.



Şekil 5.82. Bilyeli temizleme makinesi ile kalıntı kumların giderilmesi.



Şekil 5.83. Deneme filtresi ve metalik malzemenin döküm yoluğu ile birlikte görölmesi.

Yapılan karakterizasyon, şekillendirme, sinterleme ve döküm denemeleri sonucunda pik-sfero metal dökümde kullanılabilecek özelliklerde kordiyerit mullit tabanlı bal peteği filtre üretilmiştir. Köpük filtre üretim denemelerinde gerçekleşen şekillendirme hataları ve sinterleme sürecinde pişmiş mukavemetin sağlanamaması dolayısıyla bal peteği filtre üretilmiş ve deneme yapılmıştır.

6. SONUÇLAR

Bu araştırmada; seramik sağlık gereçleri sektöründe kullanılan fırın atıklarının değerlendirilmesi ve geri kazanımı sağlanarak metal döküm sektöründe kullanılabilir bir metal döküm filtresi yapılmıştır. Filtre üretiminde kullanılan 3 farklı atık malzeme ve 5 ayrı katkı malzemesi Ece Banyo Gereçleri A.ř. tarafından karşılanmış olup 2 farklı katkı ise KÜMAş A.ř. tarafından karşılanmıştır. Bu araştırma, seramik sağlık gereçleri üretimi yapılan Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.ř. firmasından çıkan fırın atıklarının çevreye atılmadan bu şekilde bir geri kazanım ile katma değerli bir malzeme üretimini mümkün kılmıştır.

Araştırmada baz alınan atık kriterleri, kordiyerit mullit tabanlı 2 farklı malzemedir. Tünel fırınlarda kullanılan plakalar kordiyerit içeriği yüksek kordiyerit mullit malzemelerdir. Roller fırınlarda kullanılan malzemeler ise mullit içeriği yüksek mullit kordiyerit malzemelerdir. Her iki geri kazanım hammaddesi de ithal olarak piyasada bulunmaktadır. Bu malzemeler refrakter özellikli olup, ürün sinterlenen fırınlarda tekrarlanan periyotlarda ısıl değişkenliklere maruz kalmaktadır. Üretim içerisinde gerek sinterleme gerekse işçilik hatalarından dolayı bu plakalar ve rulo malzemeleri kırılmakta ve atık olarak bertaraf edilmektedir. Bu araştırmanın yapılmasındaki en büyük etken katma değer sağlanabilecek olan bir ürünün doğaya atılmasını önlemektir.

DeneySEL çalışmalarda kullanılan katkı malzemeleri sıralanacak olursa, Al_2O_3 içeriği yüksek olan, alümina mullit tabanlı fırın tuğlaları ilk olarak incelenmesi uygundur. Katkı malzemesi olarak görülen ve tüm tip fırınlarda fırın duvarlarının iç bölgelerinde, fırın vagonlarının çevre ve iç kısımlarında kullanılan bu tuğlalar, aynı kordiyerit plaka ve rulo malzemelerinde olduğu gibi şekilsel bozukluklarda atık olarak doğaya atılmaktadır. Yapılan reçete denemelerinde belirli oranlarda kullanılan bu atık malzemenin farklı uygulamalarda da kullanılabilirliği bu çalışma ile ispatlanmıştır.

Diğer bir katkı malzemesi olan dolomit, seramik sağlık gereçleri sektöründe bazı firmalarda sır uygulamalarında ana girdi hammaddesi olarak kullanılmaktadır. Dolomit içerisinde MgO ve CaO 'in karbonatlı bileşiklerini barındıran bir mineraldir. Cam, tuğla ve seramik sektöründe kullanılan bir bileşendir. Özellikle refrakter endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. $900\text{ }^{\circ}C$ 'de $CaCO_3$ ve $MgCO_3$ bileşikleri ayrışma reaksiyonu ile bünyelerindeki 1 mol CO_2 'yi ayırarak CaO ve MgO haline dönüşür. Literatürde araştırılan bazı çalışmalarda gözenekli seramik malzeme üretiminde gözenek yapıcı olarak kullanıldığı görülmüştür (Bessa

vd., 2017). Dolomit içerisinde bulunan oksitlerden biri olan MgO, 1170 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterlenen sırlarda kullanılır. Sır içerisindeki MgO oranı arttığında yüzeylerde matlaşma gözlemlenir (<https://www.lameridiana.fi.it/>). MgO oranı sırlarda az olduğunda sıra parlaklık verir fakat bu oran arttıkça matlaşma görülür. Düşük genleşme katsayısına sahip bir oksit olan MgO, sır çatlaklarını önlemede yardımcı görev almaktadır (Yılmaz vd., 2015, b). Dolomitin diğer bir ana bileşeni olan CaO ise seramik sırlara katıldığında sistemde bulunan SiO₂ ile ara tabaka oluşturur. Sır ve çamur arasında sinterleme sürecinde oluşabilecek termal genleşmeleri önlemek ve sırda oluşacak çatlakların önüne geçebilmek için CaO ilavesi sırlarda önemli bir katkıdır (Çelik, 2008). Seramik sırlarda kullanılan ve termal genleşme oranını düşürdüğü literatürde de rastlanan her iki oksiti içeren dolomit, bu çalışmadaki reçetelerde değişken oranlarda kullanılmıştır.

Sistemdeki Al₂O₃ oranını arttırmak ve seramik malzemelerde sıkça kullanılan alümina hammaddesi bu çalışmada değişken oranlarda kullanılmıştır. Reçetelerde kullanılan atık miktarlarına ve bu atıkların bünye içerisindeki Al₂O₃ oranını arttırarak mullit oluşumuna yardımcı olabilmesi için kalsine alümina kullanılmıştır.

Bağlayıcı etki gösteren kil hammaddesi ile şekillendirme aşamasında malzemenin kalınlığını arttıran hem de sistemdeki Al₂O₃ oranını arttıran kaolen hammaddeleri, seramik sağlık gereçleri sektöründe kullanılan hammaddelerdendir. Bu hammaddeler yurtdışından ithal olarak gelse de, reçete çalışmalarındaki kullanım oranları camsı faz oluşumunu arttırmamak ve reçetelerdeki MgO oranını oransal olarak düşürüp kordiyerit fazını camsı faz içerisine hapsedmemek için az miktarda kullanılmıştır.

Ece Banyo Gereçleri A.Ş. dışından tedarik edilen kalsine manyezit numuneleri %90-97 oranları arasında MgO içerdiğine sahiptir. Çok düşük oranlarda kullanılan kalsine manyezit reçetelerdeki MgO oranlarını arttırdığı gibi kordiyerit oluşumunu da desteklediği görülmüştür.

Reçete denemeleri hazırlanırken, Çin filtresinin kimyasal analiz sonuçlarından çıkan verilere göre hareket edilmiştir. Reçete çalışmalarında kullanılması planlanan hammaddeler belirlenerek kimyasal ve mineralojik analizleri yapılmıştır. Reçetelerin oluşturulabilmesi için seger analizlerinin çıkarılması sağlanmıştır. 10 farklı seger analizi çalışılmasının sebebi, farklı yardımcı hammaddeler ile farklı kompozisyonlarda filtre üretilebilirliğinin mümkün olabileceği kanıtlamak için düşünülmüştür. Seger analizlerinde Çin filtresinin SiO₂/Al₂O₃ oranı ve kompozisyon içerisindeki MgO oranı dikkate alınarak reçete seger analizleri oluşturulmuştur.

Çin filtresinin seger hesaplamasında bu oranın 1,14 olduğu ve bu orana en yakın olan reçetenin 9 nolu reçete olduğu görülmüştür. Ayrıca Çin filtresinde 0,95 olarak hesaplanan MgO miktarı 2 nolu reçetede çok yaklaşmasına rağmen, mikro yapıda görülen çatlaklar sebebiyle şekillendirilmesi tercih edilmemiştir.

Deneme yapılmak üzere hazırlanan hammaddelerden tüm reçete kompozisyonları hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde mineralojik analiz yapılmıştır. Çin filtresinin XRD analizinde mullit ve kordiyerit pikleri gözlemlenmiştir. Çin filtresinin mineralojik kompozisyonunun mullit kordiyerit yapıda olduğu tahmin edilmektedir. Bu sonuca, mullit pikinin şiddetinin kordiyerit pikine göre yüksek olmasından yola çıkarak varılmıştır. Kullanılan hammaddelerden fırın plakasında kordiyerit pikinin şiddetinin yüksek olduğu, fırın rulolarında ise mullit pikinin yüksek olduğu görülmüştür. Oluşturulmak istenen faz yapısının Çin filtresine benzer özelliklerde olabilmesi için, kullanılan atık malzemelerin mineralojik yapıları dikkate alınarak reçetelerdeki kullanım oranları değiştirilmiştir. Reçetelerin büyük kısmında kordiyerit piklerinin yüksek olduğu görülmüştür. Mikro yapı analizleri ile XRD analizleri karşılaştırıldığında, mikro yapıda gözlemlenen çatlakların kordiyerit piklerinin yüksek geldiği reçetelerde gözlemlendiği tespit edilmiştir. Mikro yapı çatlakları ürünün yüksek sıcaklıklardaki baskı mukavemetini düşürür. Ürün mukavemetinin düşük olması döküm esnasında filtre bünyesinde oluşacak termal gerilimleri kaldıramamasına ve mikro yapı çatlaklarının makro çatlaklar oluşturmasına sebep olmaktadır. Döküm denemesi yapılan 9 numaralı reçetede mullit piki kordiyerit pikine göre daha şiddetlidir.

Literatür araştırmalarında malzemelerin Young modülleri karşılaştırıldığında mullitin 140 GPa, kordiyeritin ise 13-66 GPa olduğu görülmektedir. Sinterleme esnasında elastisitenin bünye içerisinde değişkenlik göstermesi, özellikle kordiyerit piklerinin baskın olduğu denemelerdeki mikro yapıdaki çatlakların belirgin olmasını açığa çıkardığı düşünülmektedir. Yapılan tüm reçete denemelerinde kordiyerit ve mullit fazlarının varlığı tespit edilmiştir.

Reçete kompozisyonları hazırlanıp 4 farklı sıcaklıkta sinterlenerek hem mineralojik hem de kimyasal analizleri incelenmiştir. Kimyasal analiz sonuçları, seger hesaplamalarında saptanan değerler ile benzer özelliklerde olduğu tespit edilmiştir. CaO miktarının yüksek olduğu seger hesaplamalarının kimyasal kompozisyonlarında da yüksek oranda olduğu görülmüştür. Çin filtresi ile reçete denemelerinin kimyasal analizleri karşılaştırıldığında, reçete bazında uygulanabilir reçetenin 9 nolu deneme olduğu ortaya çıkmaktadır. Kimyasal analizlerde çıkan majör oksit fazları mineraloji yapının oluşmasını da belirleyeceği için, özellikle mullit oluşumu

için gerekli SiO_2 ve Al_2O_3 oksitlerinin miktarlarına dikkat edilmiştir. Ayrıca MAS faz diyagramında görülen üçüncü oksit olan MgO ; SiO_2 ve Al_2O_3 ile birlikte bulunduğu kordiyerit fazı oluşturduğundan XRF analizlerinde dikkat edilen diğer bir oksit olmuştur. Reçete kompozisyonlarında Na_2O ve K_2O oranlarının düşük olması, yüksek sıcaklıklarda camsı faz oranının düşük olmasını sağlar.

Çalışmalarda çıkan bulgular ve sonuçların irdelenmesi reçete bazlı ve karşılaştırmalı olarak aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Bu çalışmada 10 farklı reçete denemesi yapılmış, belirtilen tüm katkı malzemeleri reçetelerde farklı oranlarda kullanılmış ve kullanılacak reçeteler belirlendikten sonra reçete şekillendirme çalışmaları yapılmıştır.
- R9 ve R10 denemeleri haricindeki tüm denemelerde mikro yapı çatlakları gözlemlenmiştir. Çatlak gözlemlenen tüm reçete denemelerinin mineralojik analizleri incelendiğinde, kordiyerit piki baskın olan reçetelerin mikro yapılarında çatlaklar görülmüştür. Mikro yapısal hataların termal uygulamalarda yaşanacak ani ısı değişkenliklerinde malzemede şekilsel bozukluklara yola açacağı düşünülmektedir.
- Kimyasal kompozisyonları incelenen reçetelerde en yüksek Al_2O_3 oranına sahip olan deneme 9 numaralı denemedir. Kimyasal kompozisyon olarak Çin filtresine en çok benzerlik gösteren deneme 9 numaralı deneme olmuştur.
- Reçetelerde yapılan dolomit katkısı sırda yaptığı etki gibi bir etki yaratmamıştır. Dolomit kullanılan tüm reçetelerde mikro yapı çatlakları gözlemlenmiştir.
- CaO oranının yüksek olduğu reçete denemelerinde anortit fazının görüldüğü gözlemlenmiştir. Kalsiyum alümina silikat yapıda olan anortit, dolomit kullanılan reçetelerde CaO 'in sistem içerisindeki Al_2O_3 ve SiO_2 ile bileşik oluşturmasından dolayı saptandığı tahmin edilmektedir. Termal genleşme katsayısı kordiyerit malzemelere göre yüksek olan anortit, reçete denemelerinde anortit içeriği tespit edilen reçetelerde de genleşme katsayısının yüksek olabileceğine dikkat edilmelidir.
- Andaluzit fazı gözlemlenen denemelerde Al_2O_3 oranının yüksek olması beklenmesine rağmen R2 denemesinde Al_2O_3 oranının düşük olması, yalnızca bu denemede yorumlanamamıştır. Denemelerdeki andaluzit oluşumu serbest Al_2O_3 ve SiO_2 bileşiminden yüksek sıcaklıkta oluşan bir fazdır. Bu yorumun daha iyi yapılabilmesi için mineralojik analiz üzerinden oransal faz analizi yapılması açıklayıcı sonuç için yol gösterici olacaktır.

- R1 denemesinde MgO oranı piyasa filtresindeki orana göre çok düşük kalmıştır. Bu oranın düşük olması andaluzit ve anortit gibi fazların oluşumuna olanak sağlamıştır.
- R2 denemesi hariç yapılan tüm denemelerde SiO₂ oranı Al₂O₃ oranına göre daha düşüktür.
- Piyasa filtresi kimyasal analizlerine en yakın olan reçete denemesi R9'dur. R10 denemesinde yapılan kimyasal analiz sonuçları birebir örtüşmese de mineralojik yapısı piyasa filtresine benzer özelliktedir.
- R9 reçetesi şekillendirme çalışmaları için tüm karakterizasyon analizleri sonuçları irdelendikten sonra uygun bulunmuştur. Ayrıca bu reçetelerde kullanılan atık miktarları diğer denemelerde kullanılan orana göre en yüksek reçetedir. Bu reçete denemesinde %80'in üzerinde bir oranda atık kullanılmıştır. Piyasada satılan tüm metal döküm filtreleri doğal hammaddelerden yapılmaktadır. Bu göz önüne alındığında, araştırmada kullanılan deneme reçetelerinde atık kullanımının yüksek olmasından üretim maliyetinin %70 oranında düşürülmesine olanak sağlamıştır.
- Şekillendirme çalışmalarında R9 reçetesi kullanılmıştır. Köpük şekillendirme yapılacağından seramik sağlık gereçleri çamur reolojilerinden ve üretim yöntemlerinden yararlanılmıştır. Köpük malzemeler ile şekillendirme yapılamadığından kalınlık aldırıcı veya topaklaştırıcı kimyasal katkıları kullanılmıştır. Kimyasal katkı kullanılması nedeniyle, bu katkıların sinterleme aşamasında düşük sıcaklıklarda çözünerek bünyeden çıkması ve kimyasal ve mineralojik olarak reçete yapısını bozmamasından kaynaklanmaktadır. Bağlayıcı katkısı yapılmasına rağmen köpük filtreler şekillendirilememiş, şekillendirme işleminde başarı sağlanan filtreler de sinterleme denemelerinden sonra parçalanmıştır. 2 farklı rejimde ve 2 farklı fırında sinterleme yapılmasına rağmen köpük filtre elde edilememiştir.
- Köpük filtre şekillendirme yöntemi ile şekillendirilemeyen R9 reçete malzemesi toz haline getirilip kurutularak hidrolik pres ile bal peteği filtre üretimi yapılmıştır. Bu yöntemde taneler basınç altında sıkıştıklarından malzemeyi bir arada tutabilmektedir. Köpük üzerine emdirme yöntemi ile şekillendirme ile pres şekillendirme karşılaştırıldığında, sinterleme sonrasında dahi pres ile şekillendirilen malzemede pişme mukavemetinin köpük filtreye göre yüksek olduğu görülmüştür. Şekillendirilen numunelerde parçalanma problemi gözlenmemiştir. Köpük malzeme üzerinde şekillendirilememe sebebi atık miktarının yüksek olması ve atıkların tamamının refrakter özellikte olup kalınlık olarak şekillenebilme yeteneğinin olmamasıdır. Pres ile

şekillendirilme esnasında, kalıptan ürünü çıkarırken üründe çatlak hatası gözlenmiş, fakat sinterleme ve metal döküm sürecinde bu hatanın herhangi bir etkisinin olduğu gözlemlenmemiştir.

- Sinterleme sıcaklıklarının 1230-1290 °C arasında seçilmesinin nedeni farklı sıcaklıklarda oluşabilecek camsı yapının piyasa filtresinde gözlemlenen camsı yapıyla karşılaştırılabilmesi içindir. Ayrıca bu çalışmanın amaçlarından birisi de seramik sağlık gereçleri sinterleme fırınlarında sinterlenebilecek sıcaklık aralıklarında olması planlanmıştır. Seramik sağlık gereçleri ürünleri sinterleme sıcaklığı 1210-1230 °C arasındadır. Sinterleme fırınının brulör bölgesi sıcaklıkları da 1250-1270 °C arasında değişmektedir. Bu sıcaklık değerlerinden herhangi birinde istenilen fazlar yakalandığı takdirde sinterleme işlemi maliyeti olmayacağı planlanmıştır. Seçilen R9 reçetesinin laboratuvar ve işletme fırınlarında yapılan denemelerde seçilen sinterleme sıcaklığı 1250 °C'dir. Bu sıcaklık değeri seramik malzemenin yapılan sıcaklık halkaları ile ölçülmüştür.

Reçete denemeleri ile Çin filtresinin analiz sonuçları karşılaştırıldığında 9 numaralı reçetenin şekillendirme ve döküm çalışmaları için uygun olacağı tespit edilmiştir. Yalnız 9 numaralı reçetenin sinterleme davranışının tespit edilmesi için yapılan optik dilatometre analizinde 1492 °C sıcaklığa kadar yapısını bozmadığı görülmüştür. Optik dilatometrede sinterleme sıcaklığı malzemenin sinterlenip erime fazına geçmeye başlayacağı son nokta olarak yorumlanmaktadır. Bu dikkate alındığında, şekillendirilen filtrenin 1492 °C'a kadar olan döküm denemelerinde başarı sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Yapılan döküm denemesindeki ölçülen sıcaklık 1386 °C olduğu ve filtrenin bozulmadan kalabildiği göz önünde bulundurulduğunda optik dilatometre analizinden çıkan sonucun doğrulamaktadır.

Reçete denemeleri hazırlanırken, numunelerin kızdırma kayıpları incelenmiştir. karakterizasyon analizlerinin sinterlenmiş numunelere yapılmasından dolayı kimyasal analiz sonuçlarında kızdırma kayıpları düşük görülmektedir. Çizelge 5.7'de tespit edilen kızdırma kayıpları, numune şekillendirme işleminden sonra kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin tamamının ağırlıkları ölçülerek pişmiş ağırlıklarına oranlanmış ve reçetelerin her birinin kendi arasında ortalama değerleri alınarak hesaplanmıştır. Reçetelerde kullanılan dolomit miktarı arttıkça kızdırma kaybının arttığı tespit edilmiştir. Kızdırma kayıplarının artması sinterlenmiş üründe yüksek deformasyonlar ve yüksek küçülme değerlerine sahip olabileceği tahmin edilmektedir.

Şekillendirme çalışmaları için belirlenen ve şekillendirildikten sonra döküm denemeleri yapılan 9 numaralı reçetenin toplam ürün maliyeti çıkarılarak Çin filtresinin maliyeti ile karşılaştırılmıştır. Ekonomik analiz yaparken Ece Banyo Gereçleri içerisinde çıkan atıkların geri dönüşümü yapıldığından, atıkların fiyatları hesaba dahil edilmemiştir. Yıllık bazda yapılan tespitlere göre Ece Banyo Gereçleri firmasından çıkan rulo atıklarının toplam miktarı 2 tondur. 2 ton atık malzemeye göre yapılabilecek 9 numaralı reçete miktarı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre, reçetede kullanılacak kil, kaolen ve kalsine manyezit maliyeti toplamda 174 \$'dır. Tüm ürünleri üretmek için gerekli öğütme maliyeti ise 57,27 \$'dır. Yıllık bazda yapılabilecek olan reçetenin toplam maliyeti 231,27 \$/ton'dur.

Filtre üretim akış şeması incelendiğinde, presle şekillendirilmede kullanılacak toz malzemenin belirli bir oranda homojen bir şekilde nemlendirilmesi gerekmektedir. Ayrıca tek bir presle bir kişi günlük 120 ürün şekillendirebileceği tahmin edilmektedir. Bu analizler dikkate alınarak hesaplanan 3 adam/ay oranındaki işçilik maliyeti, şekillendirilecek olan kümülatif reçete ağırlığının adet bazında ürüne dönüştürüldükten sonra 8000\$ civarında olacağı öngörülmektedir. Bu hesaplamalar dahilinde toplam maliyet ürün başına 0,48 \$ olmaktadır. Bu maliyetin %97'sini işçilik maliyeti kapsamaktadır. Çin filtrelerinin adet fiyatlarının navlun bedeller dahil 4 \$/adet olduğu düşünüldüğünde 1/8 oranında karlılık sağlayacak bir ürün üretilmiştir.

Atık yönetimi, atık geri dönüşümü, atık geri kazanımı gibi terimlerin çok fazlaca kullanıldığı günümüzde teknolojinin ve sanayinin gelişmesi ile birlikte bu tip uygulamaların da artması gerektiğinin işletmeler için önemli olduğu bilim insanları tarafından vurgulanmaktadır. Atık geri kazanım projelerinin işletmeler bazında arttırılarak doğaya ve ülke ekonomisine katkı sağlanması gerektiği işletmelerde eğitimler verilerek bilgilendirilmelidir.

Seramik sağlık gereçleri üretimi yapan tüm şirketler ana atık hammaddeleri olan plaka malzemelerini kullanmaktadır. Seramik yüzey kaplama malzemeleri, porselen, sofa gereçleri ve izolatör üreten diğer seramik firmaları da belirli oranlarda rulo malzemelerini kullanmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen çıktılar farklı firmaların bu tip atık geri kazanım uygulamalarında ortak çalışabilme etkinliğini arttırmaya yönelik literatür çalışması olmuştur.

Ülkemizde son dönemlerde yapılan Ar-Ge harcamaları ve sektörel bazda spesifik çalışmalara destek verilmesi, Üniversite-Sanayi işbirlikleri ile teorik bilginin üretim yöntemleri ile buluşması, kalifiye insan gücü yetiştirmek için üretilen programlar sayesinde maliyeti

yüksek ithal girdilerin ülkemizde farklı yöntemler ile üretilmesini mümkün kılmıştır. Akademik eğitimin sanayide kullanılabilir ürün haline gelebilmesi mevcut potansiyeli ortaya çıkaracağı gibi ihracat performansını geliştireceği değerlendirilmelidir. Ayrıca sanayi atıklarının katma değerli ürün haline gelmesi ve bu ürünlerin piyasada bulunan ürünlerin fiyatlarına göre daha ucuza satılması, dışa bağımlı olunan birçok ürüne alternatif olabilecek ürünlerin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Geri dönüşüm ve geri kazanım sistemlerinin uygulanmasıyla doğaya verilen tahribat azalırken, ülke ekonomisine yapılan katkı da artacaktır.

Araştırmaların ve yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına ek olarak aşağıda verilen öneriler uygulanarak farklı filtre kompozisyonları üretilebilir.

- Şekillendirme problemleri köpük filtre ile şekillendirme yönteminde gözlemlenmiştir. Bu tip bir atık geri kazanım yöntemi ile köpük malzeme şekillendirilmesi istendiğinde, atıkların sinter malzeme olduğu göz önünde bulundurularak, reçete denemelerinde kullanılacak kil ve kaolen miktarı artırılarak köpük üzerinde kalınlık alması sağlanabilir. Özellikle killerin kuru ve pişmiş mukavemetleri kaolenlere göre yüksek olduğundan, kaolinitik killer seçilerek yapılacak olan reçete denemelerinde başarılı sonuçlar alınabilir. Kil ve kaolen miktarının artması yüksek sıcaklıklarda camsı faz miktarının artmasına sebep olarak sıcaklık altında malzemenin baskı mukavemetini düşürebilir. Ön şekillendirme çalışmalarında oransal içeriği %52 olan kil ve kaolen karışımı hammaddelerden oluşan seramik sağlık gereçleri çamuru ile (Vitreous China) filtre şekillendirilmesi yapılmış ve başarılı bir sonuç alınmıştır.
- Mevcut reçete denemelerinde kullanılan kalınlık arttırıcı ve bağlayıcı kimyasal katkıları ile farklı sinterleme rejimleri uygulanarak malzemelerin pişme mukavemetleri arttırılabilir. Sinterleme rejimi zamanı, mevcut denemelerdeki zaman aralığından daha yüksek bir aralıkta, kontrollü sinterleme yapıldığı takdirde pişme mukavemetlerinin artacağı göz önünde bulundurulabilir.
- Dolomit ve sinter manyezit haricinde farklı katkıları yapılarak mullit oranı daha yüksek olan kordiyerit mullit tabanlı seramik filtreler üretilebilir.
- Bu çalışmada seramik sağlık gereçleri sektöründe kullanılan ve atık haline gelen seramik malzemelerin geri kazanımı ile katma değerli bir ürün üretilmiştir. Seramik sağlık gereçleri üretim proseslerinden çıkan farklı atıklar ile farklı katma değerli malzemeler yapılabilirliği araştırılmalıdır. Araştırma konusunun seramik sektöründe atık kullanımını ve farklı malzemeler üretmek için seramik üretiminden çıkan atıkların

değerlendirilebilir nitelikte olduğunu ispatlar niteliktedir. Bu araştırmanın seramik sektörüne atık kullanımı konusunda ışık tutacağı düşünülmektedir.

- Reçete denemelerinin mikro yapı analizlerinde gözlemlenen çatlakların giderilebilmesi için çalışma yapılabilir. Bu çatlakların oluşumunun engellenerek malzemenin dayanım sıcaklıkları tespit edilebilir. Ayrıca yapılan mikro yapı analizleri ile birlikte enerji dağılımlı X-ışını analizi (EDX) de yapılması, mikro yapı içerisinde belirlenecek noktalardaki kimyasal içeriğin anlaşılmasına da yardımcı olabilir.
- XRD piklerinde tahmin edilen kordiyerit ve mullit fazlarının kantitatif oranlarının tespit edilebilmesi için Rietveld hesaplamaları yapılabilir. Kantitatif analiz yapıldığı takdirde Çin filtresinin de deneme reçetelerinin de mineralojik kompozisyonları tespit edilebilir.
- Reçetelerin maliyet analizlerinin yanı sıra yeni tesis kurulumu ve kurulum için gerekli yatırım bedeli hesaplanıp amortisman giderleri satıştan elde edilebilecek kar miktarı ile orantılanarak kara geçiş noktası çıkarılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Abalı, S., (2006). Farklı hammadde kaynaklarından kordiyerit seramik üretimi, *Metalurji Dergisi*, 147, s. 20–22.

Akpınar, S., (2009). Kordiyerit Mullit Esaslı Karbür Katkılı Sıvı Metal Filtreleri, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Aksay, I. A., Dabbs, D. M., Sarıkaya, M., (1991). Mullite for structural, electronic, and optical applications, *Journal of the American Ceramic Society*, 74, s. 2343–2358.

Al-Hamaiedh, H., (2010). Reuse of marble sludge slime in ceramic industry. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 4(3), s. 264–271.

Amista, P., Cesari, M., Montenero, A., Gnappi, G., Lan, L., (1995). Crystallization behaviour in the system MgO-Al₂O₃-SiO₂, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 192–193, s. 529–533.

Anggono, J., (2005). Mullite ceramics: its properties, structure, and synthesis, *Jurnal Teknik Mesin*, 7(1), s. 1–10.

Arenas, C., Vilches, L. F., Leiva, C., Alonso-Fariñas, B., Rodríguez-Galán, M., (2016). Recycling ceramic industry wastes in sound absorbing materials, *Materiales de Construcción*, 66(324), 106-112.

Asami, S., (1993). Drying fine ceramics, *Drying Technology*, 11(4), s. 733-747.

Aşkin, A., Tatar, İ., Kılınç, Ş. ve Tezel, Ö., (2017). The utilization of waste magnesite in the production of the cordierite ceramic, *Energy Procedia*, 107, s. 137–143.

Awano, M., Takagi, H., Kuwahara, Y., (1992). Grinding effects on the synthesis and sintering of cordierite, *Journal of American Ceramic Society*, 75(9), s. 2535–2540.

Bagherian, E., Ariffin, M. K. A., Sulaiman, S., Yas, M. R., Mojavertoosi, A. R., (2009). Casting alloy filtration with ceramic foam filter, *International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, Malaysia.

Bažan, J., Stránský, K., (2007). Flowing of the melt through ceramic filters, *Materiali in Tehnologije*, 41(2), s. 99–102.

Bessa, L. P., Terra, N. M., Cardoso, V. L., (2017). Macro-porous dolomite hollow fibers sintered at different temperatures toward widened applications, *Ceramics International*, 43, s. 16283-16291.

Bhatia, A., (2011). Overview of Refractories, s.1-54.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Brasileiro, M. I., Rodrigues, A. W. B., Menezes, R. R., Neves, G. A., Santana, L. N. L., (2012). The kaolin residue and its use for production of mullite bodies, Sustainable Development Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment, (Editör: Ghenai, C.), United Arab Emirates.
- Cai, P., Wang, Y., Wang, T., Wang, Q., (2015). Improving tribological behaviors of friction material by mullite, Tribology International, 93, s. 282–288.
- Callister, W. D., (2014). Materials Science and Engineering, Volume: 9, John Wiley High Education, United States of America.
- Camerucci, M. A., Urretavizcaya, G., Castro, M. S., ve Cavalieri, A. L., (2001). Electrical properties and thermal expansion of cordierite and cordierite-mullite materials, Journal of the European Ceramic Society, 21, s. 2917–2923.
- Campo, E. C., (2008). Selection of Polymeric Materials, William Andrew Publishing,
- Çelik, C. O., (2008). Kordiyerit + Mullit, Kordiyerit + Anortit, Kordiyerit + Anortit + Mullit Kompozit Refrakterlerin Mikroyapısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli
- Chakraborty, A. K., (2014). Phase Transformation of Kaolinite Clay, Springer, India.
- Chargui, F., Hamidouche, M., Belhouchet, H., Jorand, Y., Doufnoune, R., ve Fantozzi, G., (2018). Mullite fabrication from natural kaolin and aluminium slag, Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 57(4), s. 169–177.
- Chen, P., Lv, M., Ji, Y., (2018). Effect of phosphorus on microstructure development in cordierite transparent glaze, Ceramics International, 44(8), s. 9991–9994.
- Chen, Z. W., Gibson, W. M., ve Huang, H., (2008). High definition X-Ray fluorescence: Principles and techniques, X-Ray Optics and Instrumentation, 2008, s. 1–10.
- Choi, H. J., (2016). The Environmental Effectiveness of Solid Waste Management. A Case Study of Oslo, Norway., Master Thesis, University of Oslo, Norveç.
- Choo, Y. P., Chow, T. Y., Mohamad, H., (2008). Effect of sintering temperature on the synthesis of high purity cordierite. AIP Conference Proceedings, 989, s. 161–163.
- Chowdhury, A., Maitra, S., Das, H. S., Sen, A., Samanta, G. K., Datta, P., (2007). Synthesis, properties and applications of cordierite ceramics, part 2, Interceram, 56(2), s. 98-102.
- Çağlayan, H., Çalışkan, H., (2018). Investigation of the energy recovery in the burners of the ceramic factory kiln, Energy Procedia, 144, s. 118-124.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Çaşın, E., Işık, İ., Yaman, M., (2018). Manufacturing Cordierite Mullite and Mullite Filters from Sanitary Ware Kiln Wastes for Use in Metal Casting Industry, *Journal of Materials Science and Engineering B*, 8(3), s. 129–135.

Dağaçan Bulucu, E., (2016). MBM 301 Seramikler Ders Notları, Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Türkiye.

Davis, R. F., Pask, J. A., (1971). Mullite, *Refractory Materials*, (Editör: Alper, M. A.), Volume:5, Part:4, s. 37–76.

Demir, A., (2018). Fabrication of alumina ceramic filters and performance tests for aluminium castings, *7th International Advances in Applied Physics and Materials Science*, 134(1), s. 332–334.

Dincer, I., (2018). *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier, England.

Duval, D. J., Rishud, S. H., Shackelford, J. F., (2008). *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*, (Editörler: Shackelford, J. F., Doremus, R. H.), Springer, s. 27-39.

Ebhota, W. S., Karun, A. S., Inambao, F. L., (2016). Centrifugal casting technique baseline knowledge, applications, and processing parameters: Overview, *International Journal of Materials Research*, 107(10), s. 960–969.

El-Fadaly, E., Bakr, I. M., ve Abo Breka, M. R., (2010). Recycling of ceramic industry wastes in floor tiles recipes. *Journal of American Science*, 6(10), s. 241–247.

Fabrichnaya, O., Costa e Silva, A., Aldinger, F., (2004). Assesment of *International Journal of Materials Research and Advanced Techniques*, 95, s., 793-805.

Feng, G., Jiang, F., Jiang, W., Liu, J., Zhang, Q., Wu, Q., Hu., Q., Miao, L., (2018). Novel facile nonaqueous precipitation in-situ synthesis of mullite whisker skeleton porous materials, *Ceramics International*, 44(18), s. 22904–22910.

Fischer, R. X., Gaede-Köhler, A., Birkenstock, J., Schneider, H., (2012). Mullite and mullite-type crystal structures, *International Journal of Materials Research*, 103(4), s. 402–407.

Fossberg, M., Boyer, G., Rabinowitz, B., Lewis, L., (1999). *What a Waste: Solid Waste Management in Asia*, The International Bank of Reconstruction and Development/ The World Bank, United States of America.

Fraga, D., Gyzova, A., Kozhukharov, S., Allepuz, S., Lazaro, C., Trilles, V., Carda, J., (2011). Development of new ecological ceramic tiles by recycling of waste glass and ceramic materials, *Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio*, 51(2), s. 139–144.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Fraser, H., (2010). Seramik Hataları ve Çözüm Yöntemleri, (Çeviren: Mete, Z., Özkan, İ.) Karakalem Kitapevi Yayınları, İzmir.

Fuji, M., Shiroki, Y., Menchavez, R. L., Takegami, H., Takahashi, M., Suzuki, H., Izuhara, S., Yokoyama, T., (2007). Fabrication of cordierite filter by in-situ solidification for high temperature dust collection, *Powder Technology*, 172(1), s. 57–62.

Fultz, B., ve Howe, J. (2013). *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of Materials*, Springer, Germany.

Ghosh, S., Pal, K. S., Mandal, A. K., Biswas, N., Bhattacharya, M., ve Bandyopadhyay, P., (2014). Cordierite based glass-ceramic glazed floor tiles by microwave processing, *Materials Characterization*, 95, s. 192–200.

Günay, E., (2011). Sintering behavior and properties of sepiolite-based cordierite, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 35, s. 83–92.

Gündüzalp, A., Anıl, G. S., (2016). Atık, Çeşitleri, Atık Yönetimi, Geri Dönüşüm ve Tüketici: Çankaya Belediyesi ve Semt Tüketicileri Örneği, Hacettepe Üniversitesi Sosyolojik Araştırmalar E-Dergisi, s. 1–19.

Hipedinger, N. E., Scian, A. N., Aglietti, E. F., (2015). Phase development during thermal treatment of a fast-setting cordierite-mullite refractory, *Journal of Procedia Materials Science*, 9, s. 305–312.

Ho, Y., C., Show, K., Y., Guo, X., X., Norli, I., Alkarkhi Abbas, F., M., Mor, N., (2012). Industrial Discharge and Their Effect to the Environment, *Industrial Waste*, s. 1–33.

http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/70511/49859/sinterleme_mekanizmalar%C4%B1.pdf Erişim Tarihi: 17.02.2019

<https://nptel.ac.in/courses/107103012/module2/lec1.pdf> Erişim Tarihi 28.01.2019

http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/153781/8/08_chapter%201.pdf Erişim tarihi: 28.01.2019

<https://tr.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation> Erişim Tarihi: 01.02.2019

<http://vicar-sa.es/en/portfolio/cordierite-dense-and-porous/> Erişim Tarihi: 23.02.2019

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=925> Erişim Tarihi: 24.10.2018

<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5070> Erişim Tarihi 18.10.2018

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

<https://www.ceramicindustry.com/articles/84768-characterizing-ceramics-during-the-drying-process> Erişim Tarihi: 16.02.2019.

<http://www.ductile.org/magazine/1999%20Issue%201.pdf> Erişim Tarihi: 01.02.2019

<https://www.harrisoncastings.com/casting/aluminium-gravity-die-casting/> Erişim tarihi: 29.01.2019

<http://www.industrialmetalcastings.com/history.html> Erişim tarihi: 28.01.2019

<https://www.intouch-quality.com/blog/21-casting-defects-and-how-to-prevent-them-in-your-products#Coldshut> Erişim tarihi 31.01.2019.

https://www.keithcompany.com/photo_gallery.php?cat_id=5?cat_id=5 Erişim Tarihi: 01.02.2019

<https://www.lameridiana.fi.it/pdf/EN%20Notes%20on%20glazes.pdf> Erişim Tarihi: 24.02.2019

<https://www.schupp-ceramics.com/en/details-176/optimierte-qualitaetssicherung-durch-prozess-temperatur-kontrollringe-ptcr.html> Erişim Tarihi: 27.03.2019

<http://www.themetalcasting.com/pressure-die-casting.html> Erişim tarihi: 29.01.2019.

<http://www.themetalcasting.com/squeeze-casting.html> Erişim Tarihi: 29.01.2019.

[https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/investmentcasting/Brochures/FP262_STELEX%20ULTRA%20paper%20\(e\)%20240316.pdf.downloadasset.pdf](https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/investmentcasting/Brochures/FP262_STELEX%20ULTRA%20paper%20(e)%20240316.pdf.downloadasset.pdf) Erişim Tarihi: 02.02.2019.

<http://www.wikizero.biz/index.php?q=aHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvS2FvbGluaXRl> Erişim Tarihi: 22.02.2019.

Humphreys, C. J., (2013). The significance of Bragg's law in electron diffraction and microscopy, and Bragg's second law, *Acta Crystallographica Section A*, 69, s. 45-50.

Ingle, V., Sorte, M., (2017). Defects, root causes in casting process and their remedies: Review, *Journal of Engineering Research and Application*, 7(3), s. 47-54.

Ismail, M. G. M. U., Tsunatori, H., ve Nakai, Z., (1990). Preparation of mullite cordierite composite powders by the sol-gel method: its characteristics and sintering, *Journal of the American Ceramic Society*, 73(3), s. 537-543.

Jacob, A. E., Aggrawal, A., Kuswaha, Y. K., (2017). Utilization of ceramic waste as a replacement of aggregates and its effect on variation of expenditure, *Journal of the Engineering Research-Online*, 5(3).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Jarfors, A. E. W., Seifeddine, S. (2015). Metal Casting, Hand Book of Manufacturing Engineering and Technology, Rai Technology University, India.

Juan, A., Medina, C., Guerra, M. I., Morán, J. M., Aguado, P. J., Sanchez De Rojas, M. I., Frias, M., Rodríguez, O., (2010). Re-use of ceramic wastes in construction, *Ceramics Materials*, s. 197-214.

Kaduk, J. A., (2009). A rietveld tutorial—mullite, *Powder Diffraction*, 24(04), s. 351–361.

Kahn, M. A. A., Sheikh, A. K., Al-Shear, B. S., (2017). Evolution of Metal Casting Technologies: A Historical Perspective, Springer, Saudi Arabia.

Kang, J., Wang, J., Zhou, X., Yuan, J., Hou, Y., Qian, S., Li, S., Yue, Y., (2018). Effects of alkali metal oxides on crystallization behavior and acid corrosion resistance of cordierite-based glass-ceramics, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 481, s. 184–190.

Kang, S., (2005). Sintering, Densification, Grain Growth and Microstructure, s. 2-8.

Kašpar, J., Fornasiero, P., Hickey, N., (2003). Automotive catalytic converters: current status and some perspectives, *Journal of Catalysis Today*, 77, s. 419–449.

Klug, F. J., Prochazka, S., Doremus, R. H., (1987). Alumina-silica phase diagram in the mullite region, *Journal of American Ceramic Society*, 70(10), s. 750–759.

Komarneni, S., Schneider, H., Okada, K., (2005). Mullite Synthesis and Processing. Mullite, Wiley, s. 251-348.

Konya, R., Zitte, L., Ugwulor, Q., (2013). Characterization of wastes and their recycling potentials; A case study of East-West Road, Port Harcourt, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 17(2), s. 233-238.

Krenzel, T. F., Schreuer, J., Laubner, D., Cichocki, M., Schneider, H., (2019). Thermo-mechanical properties of mullite ceramics: New data, *Journal of the American Ceramic Society*, 102(1), 416–426.

Kumar, M. S., Perumal, A. E., Vijayaram, T. R., (2015). Synthesis, characterization and sintering behavior influencing mechanical, thermal and physical properties of pure cordierite and cordierite–ceria, *Journal of Advanced Ceramics*, 4(1), s. 22-30.

Kurama, S., Özel, E., ve Ay, N., (2004). Synthesis and sintering of cordierite at low temperature from kaolin and magnesium hydroxide, *Journal of Key Engineering Materials*, 264–268, s. 925–928.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kuscer, D., Bantan, I., Hrovat, M., Malič, B., (2017). The microstructure, coefficient of thermal expansion and flexural strength of cordierite ceramics prepared from alumina with different particle sizes, *Journal of the European Ceramic Society*, 37(2), s. 739–746.

Langhoff, N., Arkadiev, V. A., Simionovici, A. S., Erko, A., (2006). *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*, Springer, Germany.

Lee, J. D., (1975). *Properties of Flux-Grown Cordierite Single Crystals*, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, United States of America.

Mahnicka-Goremikina, L., Svinka, R., ve Svinka, V., (2014). Influence of metal oxides additives on the porous mullite ceramics, *Key Engineering Materials*, 604, s. 293–296.

Mahnicka-Goremikina, L., Svinka, R., Svinka, V., (2018). Influence of ZrO₂ and WO₃ doping additives on the thermal properties of porous mullite ceramics, *Ceramics International*, 44(14), s. 16873–16879.

Malki, M., Hoo, C. M., Mecartney, M. L., Schneider, H., (2014). Electrical conductivity of mullite ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 97(6), s. 1923–1930.

Manfredini, T., Marzola, G., Nunziello, S., Pellacani, G. C., Pozzi, P., Tubertini, O., (1991). The recycling of ceramic sludges in the production process: An option for ceramic tile factories to reach zero pollution, *Environmental Technology*, 12(10), s. 927–934.

Mao, H., Hillert, M., Selleby, M., Sundman, B., (2006). Thermodynamic assessment of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(1), s. 298–308.

Marinoni, N., Pagani, A., Adamo, I., Diella, V., Pavese, A., Francescon, F., (2010). Kinetic study of mullite growth in sanitary-ware production by in situ HT-XRPD. The influence of the filler/flux ratio, *Journal of the European Ceramic Society*, 31(3), s. 273–280.

Mehta, N. D., Gohil, A. V., ve Doshi, S. J., (2018). Innovative support system for casting defect analysis – A need of time, *Materials Today: Proceedings*, 5(2), s. 4156–4161.

Menchi, A. M., Scian, A. N., (2005). Mechanism of cordierite formation obtained by the sol-gel technique, *Journal of Materials Letters*, 59(21), s. 2664–2667.

Nehrenheim, E., (2014). *Waste Management: Introduction. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier Inc., Sweden.

Ogiwara, T., Noda, Y., Shoji, K., Kimura, O., (2011). Low temperature sintering of α -cordierite ceramics with low thermal expansion using Li₂O–Bi₂O₃ as a sintering additive, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 119(9), s. 706–709.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ohsato, H., Kim, J. S., Cheon, C. I., Kagoyima, I., (2013). Millimeter-wave dielectrics of indialite/cordierite glass ceramics: Estimating Si/Al ordering by volume and covalency of Si/Al octahedron, *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 121(8), s. 649–654.

Ordu, Ş., Öztürk, E., (2017). Çimento Fabrikalarında Alternatif Hammadde ve Yakıt Kullanımı: Örnek Çalışma, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 90(282), s. 87–90.

Osarenmwinda, J., Abel, C. P., (2014). Performance Evaluation of Refractory Bricks produced from locally sourced Clay Materials, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 18(2), s. 151.

Osendi, M. I., Baudín, C., (1996). Mechanical Properties of Mullite Materials, *Journal of the European Ceramic Society*, 16, s. 217–224.

Pask, J. A., Schneider, H., (2005). Phase Equilibria and Stability of Mullite, *Mullite*, (Editör: Schneider, H. Ve Komarneni, S.), Wiley Verlag GMBH, Germany.

Patrício, J., Costa, I., Niza, S., (2015). Urban material cycle closing - Assessment of industrial waste management in Lisbon region., *Journal of Cleaner Production*, 106, s. 389–399.

Pereira, D., Biasibetti, G. R. S., Camerini, R. V., Pereira, A. S., (2014). Sintering of mullite by different methods, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(4), s. 391–396.

Poli, C., (2001). *Design for Manufacturing: A Structured Approach*, Butterworth – Heinemann, United Kingdom.

Qui, R., Duan, C., (2017). The principle and applications of Bernoulli equation, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 916, 012038.

Rajkolhe, R., Khan, J. G., (2014). Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process: A Review, *International Journal of Research in Advent Technology*, 2(3), s. 2321–9637.

Rashad, M., Balasubramanian, M., (2018). Characteristics of porous mullite developed from clay and $AlF_3 \cdot 3H_2O$, *Journal of the European Ceramic Society*, 38(10), s. 3673–3680.

Reddy, A. C., Rajanna, C., (2009). Design of gravity die casting process parameters of Al-Si-Mg alloys, *Journal of Machining and Forming Technologies*, 1, s. 1–25.

Resmi Gazete, (2015). Atık Yönetimi Yönetmeliği, *Gazete Sayısı*: 29314.

Reyes, L. S. Y., Rodríguez, J. S., Sueyoshi, S. S., (2013). Microstructural characterization of sanitaryware, the relationship spinel and mullite, *Journal of Ceramic Processing Research*, 14(4), s. 492–497.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Rohan, P., Neufuss, K., Matějček, J., Dubský, J., Prchlík, L., Holzgartner, C., (2004). Thermal and mechanical properties of cordierite, mullite and steatite produced by plasma spraying. *Ceramics International*, 30, s. 597–603.

Roylance, D., (2018). *Mechanical Properties of Materials*, Massachusetts Institute of Technology, United States of America.

Saari, A., (2017). *The Benefits of Efficient Waste Management for Organizations*, International Business Bachelor's Thesis, Aalto Üniversitesi, Finlandiya.

Saeidabadi, E. K., Salahi, E., Ebadzadeh, T., (2019). Preparation mullite/Si₃N₄ composites by reaction spark plasma sintering and their characterization, *Ceramics International*, 45(5), s. 5367–5383.

Sánchez-Soto, P. J., Eliche-Quesada, D., Martínez-Martínez, S., Garzón-Garzón, E., Pérez-Villarejo, L., Rincón, J. M., (2018). The effect of vitreous phase on mullite and mullite-based ceramic composites from kaolin wastes as by-products of mining, sericite clays and kaolinite, *Materials Letters*, 223, s. 154–158.

Scheffler, M., Colombo, P., (2005). *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Germany.

Schneider, H., (1990). Thermal expansion of mullite, *Journal of the American Ceramic Society*, 73 (7), s. 2073-2076.

Sembiring, S., Simanjuntak, W., Situmeang, R., Riyanto, A., Sebayang, K., (2016). Preparation of refractory cordierite using amorphous rice husk silica for thermal insulation purposes, *Ceramics International*, 42(7), s. 8431–8437.

Singh, K. C., Sharma, L. K., (2009). Improved cordierite kiln furniture - Some studies. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 68(4), s. 173–177.

Soleimani, F., Aghaei, A. R., Zakeri, M., Eshraghi, M. J., Alizadeh, M., (2015). Production of glass-ceramic from high frequency induction melted cordierite glass, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 429, s. 219–225.

Soltan, A. M. M., El-Shimy, H., EL-Raouf, F. A., Fuchs, F., Köenig, A., Yahya, A. M., AbdelFattah, M. M., Serry, M., Pöllmann, H., (2018). Microstructure and phase composition of cordierite-based co-clinker, *Ceramics International*, 44(6), s. 5855–5866.

Soussi, N., Kriaa, W., Mhiri, H., Bournot, P., (2017). Reduction of the energy consumption of a tunnel kiln by optimization of the recovered air mass flow from the cooling zone to the firing zone, *Applied Thermal Engineering*, 124, s. 1382–1391.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Streli, C., Wobrauschek, P., Kragamer, P., (1999). X-Ray fluorescence spectroscopy, applications, *Encyclopedia of Spectroscopy & Spectrometry*, s. 2478-2487.
- Tarhan, B., Tarhan, M., Aydın, T., (2017). Reusing sanitaryware waste products in glazed porcelain tile production. *Ceramics International*, 43(3), s. 3107–3112.
- Taşlıçukur, Z., Balaban, C., Kuşkonmaz, N., (2007). Production of ceramic foam filters for molten metal filtration using expanded polystyrene, *Journal of the European Ceramic Society*, 27(2–3), s. 637–640.
- Torres, P., Manjate, R. S., Quaresma, S., Fernandes, H. R., Ferreira, J. M. F., (2007). Development of ceramic floor tile compositions based on quartzite and granite sludges, *Journal of the European Ceramic Society*, 27(16), s. 4649–4655.
- Veres, C., Marian, L., Moica, S., Al-Akel, K., (2018). Case study concerning 5S method impact in an automotive company, *Procedia Manufacturing*, 22, s.900–905.
- Vernon-Parry, K. D., (2000). Scanning electron microscopy: An introduction, *The 27th International Symposium on Compound Semiconductors*, 13, s. 40-44.
- Wang, X., Su, D., He, J., Ji, H., ve Li, X., (2015). Ultra-low thermal conductivity and high strength of aerogels/fibrous ceramic composites, *Journal of the European Ceramic Society*, 36(6), s. 1487–1493.
- Wetzig, T., Luchini, B., Dudczig, S., Hubáľková, J., Aneziris, C. G., (2018). Development and testing of carbon-bonded alumina foam filters for continuous casting of steel, *Ceramics International*, 44(15), s. 18143–18155.
- Woolley, E., Luo, Y., Simeone, A., (2018). Industrial waste heat recovery: A systematic approach, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29, 50–59.
- Xu, X., Xu, X., Wu, J., Lao, X., (2017). Fabrication and characterization of cordierite-based glass-ceramic adhesives for bonding solar heat transmission pipelines, *Ceramics International*, 43(1), s. 149–156.
- Yılmaz, Ş., Toplan, H. Ö., Demirkıran, Ş., (2015a). Refrakter Malzemeler, *Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Seramik Malzemeler Dersi Notları*, s. 136–155.
- Yılmaz, Ş., Toplan, H. Ö., Demirkıran, Ş., (2015b). Seramik Sırlar, *Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Seramik Malzemeler Dersi Notları*, s. 118-135.
- Zaients, R. M., Pankratova, G. F., (1963). Cordierite kiln furniture made of refractory clays and magnesite, *Glass and Ceramics*, 20(3), s. 146–149.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhou, L., Li, Z., ve Zhu, Y., (2019). Porous silica/mullite ceramics prepared by foam-gelcasting using silicon kerf waste as raw material, *Materials Letters*, 239, s. 67–70.

Zirczy, N. G., (1972). Kinetics of Cordierite Formation, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, United States of America.



EKLER

Ek-1: Atık Yönetimi Yönetmeliği (Yayın Tarihi: 2 Nisan 2015, Sayı 29314)

2 Nisan 2015 PERŞEMBE

Resmî Gazete

Sayı : 29314

YÖNETMELİK

Çevre ve Şehircilik Bakanlığından:

ATIK YÖNETİMİ YÖNETMELİĞİ BİRİNCİ BÖLÜM

Amaç, Kapsam, Dayanak ve Tanımlar

Amaç

MADDE 1 – (1) Bu Yönetmeliğin amacı;

a) Atıkların oluşumundan bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeden yönetiminin sağlanması,

b) Atık oluşumunun azaltılması, atıkların yeniden kullanımı, geri dönüşümü, geri kazanımı gibi yollar ile doğal kaynak kullanımının azaltılması ve atık yönetiminin sağlanması,

c) Çevre ve insan sağlığı açısından belirli ölçütlere, temel şart ve özelliklere sahip, bu Yönetmeliğin kapsamındaki ürünlerin üretimi ile piyasa gözetimi ve denetimine, ilişkin genel usul ve esasların belirlenmesidir.

Kapsam

MADDE 2 – (1) Bu Yönetmelik;

a) Ek-4 atık listesinde verilen atıkları,

b) Genişletilmiş üretici sorumluluğu çerçevesinde yönetimi sağlanan elektrikli ve elektronik eşya, ambalaj, araç, pil ve akümülatör ürünlerini,

kapsar.

(2) Bu Yönetmelik hükümleri;

a) Atmosfere salınan gaz emisyonları,

b) Radyoaktif atıkları,

c) Atıksuları,

ç) Kullanılamaz durumdaki patlayıcıları ve atıklarını,

d) Kontamine olmamış hafriyat toprağını,

e) Kazılmamış kirlenmiş (yerinde) toprak,

f) Hayvan kadavralarını, tarımsal amaçlı kullanılan hayvansal dışkıyı,

g) Biyogaz ya da kompost gibi geri kazanım tesisleri ile beraber yakma, yakma veya düzenli depolama tesislerine gönderilen hayvansal atıklar hariç diğer hayvansal yan ürünleri,

ğ) Tarım ormancılık faaliyetlerinde veya doğaya zarar vermeyen ve insan sağlığını tehdit etmeyen prosesler ya da metotlar aracılığıyla biyokütleden enerji üretiminde kullanılan diğer doğal ve zararsız tarımsal veya ormancılık madde ve malzemelerini,

h) Türkiye'nin deniz yetki alanlarında bulunan gemilerin ürettiği atıklar ile yük artıklarının, limanlarda kurulu bulunan atık kabul tesislerine ve/veya atık alma gemilerine verilmesini,

kapsamaz.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Çaşın, Eray

Doğum Yeri : Kadıköy, İstanbul

Doğum Tarihi : 01.11.1985

e-mail: eraycasin@gmail.com

Eğitim Bilgileri

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı	2012
Lisans	Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Seramik Mühendisliği	2009
Lise	Üsküdar Çağrı Bey Anadolu Lisesi	2003
İlköğretim	Kadıköy Muhsin Adil Binal İlköğretim Okulu	1996

İş Deneyimi

Görevi	Çalıştığı İşyeri Adı	Çalıştığı Tarih
Ar-Ge Merkezi Yetkilisi	Ece Banyo Gereçleri A.Ş.	2018
Ar-Ge Merkezi Araştırmacı	Ece Banyo Gereçleri A.Ş.	2015
Ar-Ge Mühendisi	Ece Banyo Gereçleri A.Ş.	2014
Ar-Ge Mühendisi	Özer Kiremit A.Ş.	2009

Yayınlar

Çaşın, E., Işık, İ., Yaman, M., (2018), Manufacturing Cordierite Mullite and Mullite Filters from Sanitary Ware Kiln Wastes for Use in Metal Casting Industry, Journal of Materials Science and Engineering B, 8(3), s. 129–135.

Çaşın, E., Işık, İ., (2018), Manufacturing Cordierite Mullite Filter From Sanitaryware Kiln Wastes, Poster Sunumu, Seres 2018, Eskişehir.

Çaşın, E., Işık, İ., Yaman, (2017), M., Preliminary Study For The Manufacturing Of Cordierite Mullite And Mullite Filters For Use In Metal Casting Industry From Sanitary Ware Kiln Wastes, Tam Metin Bildiri, Mtm 2017, İstanbul

Çaşın, E., Işık, İ., Yaman, (2017), Kordiyerit Tabanlı Vitrikiye Fırın Atıklarının Seramik Köpük Filtre Üretiminde Kullanımının Ön Arastırması, Sözlü Sunum, Imstec 2017, Nevşehir.

Çaşın, E., Kara, A., Gençoğlu, P., Yaman, M., (2015), Seramik Sağlık Gereçleri Üretimi Esnasında Olusan Katı Atıkların Metal Döküm Sanayi İçin Mullit, Alümina Mullit Filtre İmalatında Kullanılabilirliğinin Arastırılması, Tam Metin Bildiri, 9. Afyon Seramik Kongresi, Afyon.

Kara, a., Çaşın, E., Gençoğlu, P., Yaman, M., (2015), Development Of Alumina- Mullite And Mullite Filters For Metal Casting Industry From Fired Ceramic Sanitaryware Wastes, Tam Metin Bildiri, Ecers 2015, Toledo, İspanya.,

Çaşın, E., (2014), New Casting And Glazing Techniques In Sanitaryware Production, Sözlü Sunum, Seres 2014, Eskişehir.

Çaşın, E., Yılmaz, B., (2012), Biomimetic Ceramic Designer, Sözlü Sunum, 10th Global Conference On Sustainable Manufacturing, İstanbul

Çaşın, E., Yılmaz, B., (2011), Device Design For Drawing And Painting On Traditional Kütahyaware And Ceramics, Tam Metin Bildiri, Seres 2011, Eskişehir.

Yürüttüğü ve Çalıştığı Projeler

TÜBİTAK TEYDEB, Proje Yürütücüsü, Yüksek Performanslı Pmma Esaslı Basıncılı Döküm Kalıplarının Gelistirilmesi, Yürütülen Kurulus: Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş., 01.07.2018 – 30.06.2018

TÜBİTAK TEYDEB, Proje Yürütücüsü, Vitrikiye Sektörü Fırın Atıklarının Metal Döküm Sektörü İçin Mullit Ve Kordiyerit Mullit Filtre Üretiminde Kullanımı, Yürütülen Kurulus: Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş., 01.08.2017 – 31.01.2019

TÜBİTAK TEYDEB, Araştırmacı, Seramik Sağlık Gereçlerinde Birinci Pisirimden Gelen Hava, Leke, Parça Hatalarının Lazer Sinterleme Metodu İle İkinci Pisirime Girmeden Tamir Edilmesi, Yürütülen Kurulus: Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş., 01 Mart 2016 - 28 Subat 2017.

TÜBİTAK TEYDEB, Araştırmacı, Polimer Esaslı Katkılar Kullanılarak Sanitaryware Porselen Bünyelerin Yerli Hammaddeler İle Reolojik Ve Fiziksel Özelliklerinin Gelistirilmesi, Yürütülen Kurulus: Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş., 01 Ekim 2015 - 30 Eylül 2016.

TÜBİTAK TEYDEB, Araştırmacı, Seramik Sağlık Gereçleri Üretimi Esnasında Olusan Katı Atıkların Metal Döküm Sanayi İçin Müllit, Alümina Müllit Filtre İmalatında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yürütülen Kurulus: Ece Banyo Gereçleri San. ve Tic. A.Ş., 01 Haziran 2015 - 31 Mayıs 2016.

SAN-TEZ, Araştırmacı, Kütahya Çinilerinde E-ticaret Tabanlı Yeni Ürün Tasarımı ve Modeli, Yürütülen Kurulus: Dumlupınar Üniversitesi, 01 Aralık 2012 - 01 Nisan 2014.