

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRU AKIM ELEKTRİK ARK FIRININDA ERGİMİŞ
MAGNEZYA ÜRETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Cüneyt GÜRCAN**

Anabilim Dalı : METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ÜRETİM METALURJİSİ

MAYIS 2002

**DOĞRU AKIM ELEKTRİK ARK FIRININDA ERGİMİŞ
MAGNEZYA ÜRETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Cüneyt GÜRCAN
(506001302)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. Süheyla AYDIN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Onuralp YÜCEL
Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)**

MAYIS 2002

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, öneri ve yardımlarını ve yapıcı eleştirilerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Süheyla AYDIN'a ve çalışmamda yardımlarıyla katkılarda bulunan Doç. Dr. Onuralp Yücel'e ve Prof. Dr. Serdar Özgen'e en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tezin hazırlanışı aşamasında bana yardımlarıyla destek olan ve bana çok şey öğreten Met.Y.Müh. C. Fahir Arısoy'a ve Met.Y.Müh. Şeref Sönmez'e tezimi bitirmemde bana en büyük desteği veren Met.Müh.Nuri SOLAK'a, Met.Müh.Aybars Güven' e ve Met.Müh. Ahmet Öztürk'e çok teşekkür ederim.

Manevi desteklerinden dolayı sevgili annem Semra GÜRCAN'a, sevgili babam Hüseyin GÜRCAN'a ve değerli arkadaşım Figen YUMAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2002

Cüneyt GÜRCAN

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	V
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	x
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. ERGİMİŞ MAGNEZYA ÜRETİMİ	4
2.1. Kalsine ve Sinter Magnezya Üretimi	5
2.1.1. Doğal Yollarla Sinter Magnezya Üretimi	5
2.1.2. Sentetik Yollarla Sinter Magnezya Üretimi	7
2.1.2.1. Deniz Suyundan Sinter Magnezya Üretimi	7
2.1.2.2. Mg Bazlı Tuzlardan Sinter Magnezya Üretimi	9
2.2. Elektrik Ark Fırınında Ergimiş Magnezya Üretimi	10
2.3. Üretilen Malzemelerin Özellikleri	13
3. ERGİMİŞ MAGNEZYANIN KULLANIM ALANLARI	15
3.1. Refrakterler	15
3.2. Magnezya-Karbon Refrakterler	17
3.2.1. Cüruf Refrakter Etkileşimi	18
3.2.2. Magnezya-Karbon Refrakterlerdeki MgO Taneleri ve Aşınma Mekanizması	21
3.2.2.1. MgO Tanesinin Fiziksel Özellikleri ve Aşınma	22
3.2.2.2. MgO Tanesinin Kimyasal Özellikleri ve Aşınma	25
3.3. Isıtıcı Elemanlarda Kullanılan Ergimiş Magnezya	26
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
4.1. Kullanılan Hammaddeler	28
4.1.1. Hammaddelerin Kimyasal Analizleri	28
4.1.2. Hammaddelerin Fiziksel Özellikleri	28
4.2. Cihaz ve Aletler	28
4.3. Deneylerin Yapılışı	29
4.3.1. Hammadde 1 için Ergitme Deneyleri	31
4.3.2. Hammadde 2 için Ergitme Deneyleri	33
4.4. Hammadde 1 için Ergitme Deneyi Sonuçları	34
4.4.1. Optik mikroskopta yapılan incelemeler	36
4.4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Yapılan İncelemeler	38
4.4.3. Fiziksel ve kimyasal analizler	40
4.4.4. X Işını Difraksiyonu Analizleri	42
4.5. Hammadde 2 için Ergitme Deneyi Sonuçları	44

4.5.1. Optik Mikroskopta Yapılan İncelemeler	45
4.5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri	47
4.5.3. Fiziksel ve Kimyasal Analizler	49
4.5.4. X ışını difraksiyonu analizleri	51
4.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	52
5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
5.1. Genel Sonuçlar	53
5.2. Öneriler	54
KAYNAKLAR	55
EKLER	57
ÖZGEÇMİŞ	58

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. MgO' in çeşitli sıcaklıklardaki elektriksel direnç değerleri	11
Tablo 2.2. Ham manyezit, kalsine magnezya, doğal sinter magnezya, sentetik sinter magnezya ve ergimiş magnezyanın spesifikasyonları	14
Tablo 3.1. Refrakterlerde kullanılan seramik oksitler ve ergime sıcaklıkları....	15
Tablo 3.2. MgO bünyesinde oluşabilecek ikincil fazlar ve ergime sıcaklıkları	25
Tablo 4.1. Sinter magnezya hammaddelerinin kimyasal analizleri	28
Tablo 4.2. Sinter magnezya hammaddelerinin fiziksel özellikleri	28
Tablo 4.3. Hammede 1' in eritilmesi sırasındaki fırın parametreleri	31
Tablo 4.4. Hammede 2' nin eritilmesi sırasındaki fırın parametreleri	33
Tablo 4.5. Fırından çıkarılan ergimiş magnezya numunesinin bölgelere göre fiziksel ve kimyasal analizleri	41
Tablo 4.6. Fırından çıkarılan ergimiş magnezya ingotun bölgelere göre fiziksel ve kimyasal analizleri.....	49
Tablo A.1. Ülkelere göre sinter magnezya ve fused magnezya üretim miktarları ve üretim tipleri.....	57

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : MgO'in kristal yapısı.....	4
Şekil 2.2 : Ergimiş magnezya üretim akış şeması.....	5
Şekil 2.3 : Doğal yollarla magnezya üretimi akış diyagramı.....	6
Şekil 2.4 : Deniz suyundan sinter - MgO üretim akış diyagramı.....	8
Şekil 2.5 : Mg bazlı tuzlardan sinter MgO üretim akım şeması.....	9
Şekil 2.6 : Elektrik ark fırınında magnezyanın ergitilme süreci.....	10
Şekil 2.7 : Fırından çıkarılan ingot yapısının görüntüsü.....	12
Şekil 2.8 : Ergimiş magnezya ingotunun şematik yapısı ve soğuma sonrası bölgeler.....	13
Şekil 3.1 : Sıvı cüruf ile refrakterin yüzey gerilimi arasındaki temas açısının şematik gösterimi.....	19
Şekil 3.2 : Refrakter tanelerinin ara açısının şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.3 : Ortalama periklaz kristal boyutu ile aşınma arasındaki ilişki.....	22
Şekil 3.4 : Magnezya-karbon refrakterlerde MgO taneleri ve grafit morfolojisi.....	23
Şekil 3.5 : Magnezya tanesinin kristal boyutu ile ağırlık kaybı arasındaki ilişki.....	23
Şekil 3.6 : MgO tanesinin periklaz kristallerinin büyümesi ile açık ve kapalı porlardaki değişim.....	24
Şekil 3.7 : Cüruf penetrasyonu sonucu sinter MgO ve ergimiş magnezya tanelerinin davranışı.....	26
Şekil 3.8 : Isıtıcı bir elemanın iç görüntüsü.....	26
Şekil 4.1 : Ergimiş magnezya üretimi için kullanılan elektrik ark fırının şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.2 : Magnezya harçtan yapılmış ergitme işleminin gerçekleştirdiği hazneler.....	30
Şekil 4.3 : Ergitme işlemi sonrası fırın içindeki malzemenin görüntüsü.....	30
Şekil 4.4 : Hammadde 1 için fırın direncinin ergitme süresine göre değişimi.....	32
Şekil 4.5 : Hammadde 2 için fırın direncinin ergitme süresine göre değişimi.....	34
Şekil 4.6 : Soğuma sonrası potanın şematik gösterimi ve numunelerin aldığı bölgeler.....	35
Şekil 4.7 : Fırının bir numaralı ve üç numaralı bölgesinden alınan numuneler.....	35
Şekil 4.8 : Fırının iki numaralı bölgesinden alınmış numuneler.....	35
Şekil 4.9 : Ergimiş magnezya üretiminde kullanılan sinter magnezyanın optik görüntüleri.....	36
Şekil 4.10 : Ergimiş magnezyanın hızlı katılaşmış bölgelerinden alınmış optik mikroskop görüntüleri.....	37
Şekil 4.11 : Ergimiş magnezyanın yavaş katılaşmış bölgelerinden alınmış optik mikroskop görüntüleri.....	37

Şekil 4.12 :	Elektrik ark fırınında ergitilen sinter magnezyanın ve üretilen ergimiş magnezyanın taramalı elektron mikroskobu görüntüleri..	38
Şekil 4.13 :	Ergimiş magnezyanın yavaş soğuması sonucu oluşmuş kolonsal uzamış tek bir MgO tanesinin ve yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.....	39
Şekil 4.14 :	Kolonsal uzamış tek bir MgO tanesi yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	40
Şekil 4.15 :	Fırından çıkarılan numune ve analizlerin alındığı bölgeler.....	41
Şekil 4.16 :	Fırına şarj edilen sinter magnezya ve fırından çıkarılan ergimiş magnezya numunelerinin X ışınları analizi.....	43
Şekil 4.17 :	Düşük kalitede sinter magnezyanın ergitilmesi ile elde edilen ingot yapısı	44
Şekil 4.18 :	Fırından çıkarılan ingotun ikiye ayrılmasıyla elde edilen parçalar.....	44
Şekil 4.19 :	Fırından çıkarılan ingotun ikiye bölünmesiyle elde edilen parça	45
Şekil 4.20 :	Fırından çıkarılan ingotun üzerinde rakamlarla işaretlenmiş bölgelerden alınan numunelerin optik mikroskop fotoğrafları.....	46
Şekil 4.21 :	Düşük kalitedeki sinter magnezyanın taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.....	47
Şekil 4.22 :	İngot üzerinde rakamlandırılan bölgelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri.....	48
Şekil 4.23 :	Fırında ergitilen sinter magnezyanın MgO-CaO-SiO ₂ faz diyagramı üzerinde gösterilen katılaşma haritası.....	50
Şekil 4.24 :	Fırına şarj edilen sinter magnezya ve fırından çıkarılan ingotun 2 rakamıyla gösterilen kolonsal kristalli bölgesinin X ışınları analizi.....	51

DOĞRU AKIM ELEKTRİK ARK FIRININDA ERGİMİŞ MAGNEZYA ÜRETİMİ

ÖZET

Ergimiş Magnezya, kalsine veya sinter magnezyanın elektrik ark fırınında, 2800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ergitilmesi ile üretilmektedir. Elektrofused magnezya çok düşük empürite içeriği, geniş kristal boyutu ve yüksek yoğunluğunun yanı sıra bilinen en iyi termal ve elektriksel yalıtkanlardan biridir. Bu özelliklerinden dolayı fused magnezya, yüksek kalitede refrakter malzeme üretiminde ve ısıtıcı elemanlarda yalıtkan dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır.

Çelik üretiminde aşınmanın yüksek oranda meydana geldiği yerlerde kullanılan magnezya-karbon refrakterlere ergimiş magnezya tanelerinin katılması refrakterlerin performansını ve dayanıklılığı oldukça arttırmaktadır.

Magnezya-karbon refrakterlere performans açısından baktığımızda bu refrakterlerde kullanılan magnezya tanelerinin belli parametreleri çok önemlidir. Bunlar bulk yoğunluk, periklaz kristal boyutu, ikincil fazların dağılımı ve kimyasal içerik gibi özelliklerdir.

Yapılan çalışmada, 270 kVA'lık tek fazlı doğru akım elektrik ark fırınına düşük kalitede ve yüksek kalitede sinter magnezya şarj edilmiş ve ergitildikten sonra soğumaya bırakılmıştır. Soğuma sonrası fırının değişik bölgelerinden kırılarak alınan numunelerin karakterizasyonu optik mikroskop, yaş analiz, taramalı elektron mikroskopu ve X ışını difraksiyonu, cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler empürite içeriği, kristal boyutu ve yığın yoğunluğu gibi özellikleri dikkate alınarak incelenmiştir.

Yüksek kalitede ve düşük kalitede sinter magnezyanın ergitilmesiyle ilgili deney sonuçları aşağıda verilmiştir;

- Yüksek kalitede sinter magnezyanın ergitilmesi sırasında 7,25 kWh/kg elektrik enerjisi harcanırken, düşük kalitedeki sinter magnezyanın ergitilmesinde bu değer 4,85 kWh/kg değerine düşmüştür.
- Ergimiş magnezyanın kristal zonlarının büyümesi fırın içindeki sıcaklık farklılıklarına göre değişmektedir.
- Yüksek kalitedeki sinter magnezyanın ortalama periklaz kristal boyutu 100µm iken üretilen ergimiş magnezyanın kristal boyutu 800µm' u bulmaktadır. Düşük kalitedeki sinter magnezyanın kristal boyutu 40µm iken ergitildikten sonra 700µm' u bulmaktadır.
- İncelemeler sonucunda ikincil faz empüritelerinin ergimiş malzemelerde, bölgesel rafinasyon sonucunda azaldığı gözlemlenmiştir.
- % 96, 93 MgO içeren yüksek kaliteki sinter magnezya ergitildikten sonra MgO içeriği % 99,02 değerine çıkmıştır. % 92,73 MgO içeren sinter magnezya ergitildiğinde ise MgO içeriği % 95,53' ü bulmuştur.
- Yüksek kalitedeki sinter magnezyanın 3,40 g/cm³ olan bulk yoğunluk değeri ergitildikten sonra 3,47 g/cm³ değerine ulaşmıştır. Düşük kalitedeki sinter

magnezyanın $3,37 \text{ g/cm}^3$ olan bulk yoğunluk değeri de $3,40 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaşmıştır

FUSED MAGNESIA PRODUCTION IN A DIRECT CURRENT ELECTRIC ARC FURNACE

SUMMARY

Sintered or calcined magnesia is smelted in an electric arc furnace at temperatures above 2800°C to produce fused magnesia. Electrofused magnesia is considered to be one of the best thermal and electrical insulators with low impurity content, large crystal size and high density. On account of these properties, fused magnesia is used in the production of high quality refractory material and as an electrical insulator in heating elements.

Due to its excellent corrosion resistance, the addition of fused magnesia grains can greatly enhance the performance and durability of basic refractories such as magnesia-carbon bricks which are used in high wear areas in steelmaking.

From a performance viewpoint in magnesia-carbon refractories several parameters of magnesia quality were critical. These parameters are bulk density, periclase crystallite size, second phase distribution and chemical composition.

In this study high quality and low quality sintered magnesia was smelted in a 270 kVA DC electric arc furnace. Then smelted magnesia was allowed to cool and solidify in situ in the furnace. After solidification, the samples taken from the different parts of the furnace were characterized by using optical microscope, chemical analysis, scanning electron microscope and X ray diffraction techniques. Samples were investigated according to their second phase impurity content, crystal size, and bulk density.

Experimental results of melting high and low quality sintered magnesia are listed in below;

- Electrical energy consumption of melting high quality sintered magnesia was determined as 7.25 kWh/kg. In the other hand when melting low quality sintered magnesia this value decreased to 4.85 kWh/kg.
- The size of crystallization growth zones of fused magnesia was affected by the temperature gradient of the furnace.
- After the melting of high quality sintered magnesia, the mean periclase crystal size of the material increased 100µm to 800µm. Besides, melting of low quality sintered magnesia resulted in increase from 40µm to 700µm.
- The results of the experiments showed that the second phase impurity contents of the fused materials decreased by zone refinement.
- % 96.93 MgO content of high quality sintered magnesia increased to % 99.02 MgO after the melting process. Furthermore, % 92.73 MgO content of low quality sintered magnesia increased to % 95.53 MgO.
- Bulk density of high quality sintered magnesia increased 3.40 g/cm³ to 3.47 g/cm³ and the bulk density of low quality sintered magnesia increased 3.37 g/cm³ to 3.40 g/cm³ after the melting process.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Refrakter malzemeler yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri üstün fiziksel ve kimyasal dayanıklılık nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda çalışan bir çok endüstri kolunda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Refrakter malzemeler kullanıldıkları ortamdaki çalışma şartlarına göre çok geniş ürün yelpazesine sahiptirler.

Refrakterlerin en çok kullanıldığı yerler; demir-çelik, demirdışı metal, çimento, cam, seramik ve kimyasal üretim endüstrileridir.

Refrakter malzemeler, oksit karakterde olanlar ve oksit karakterde olmayanlar şeklinde ikiye ayrılırlar. Bu refrakterler kendi içlerinde fiziksel özelliklerine göre; şekilli veya şekilsiz, kimyasal özelliklerine göre; bazik, asidik ve nötr refrakterler olarak ayrılabilirler.

Günümüzde refrakter malzeme kullanımında demir-çelik endüstrisi başı çekmektedir. Bu yüzden demir-çelik üretimindeki yenilikler ve değişiklikler refrakter endüstrisini büyük oranda etkilemektedir.

Bazik cüruf-bazik refrakter, asidik cüruf-asidik refrakter uygulaması demir-çelik üretiminde esastır. Günümüzde çelik üretimi büyük oranda bazik cüruf uygulaması ile gerçekleştiğinden, refrakter endüstrisi bazik refrakter üretimine çok büyük önem vermeye başlamıştır.

Bazik refrakterlerin temel hammaddesini, magnezyum oksit (MgO) ve magnezyum oksidin CaO , SiO_2 , Cr_2O_3 ve Al_2O_3 gibi refrakter oksitlerle yaptığı bileşikler oluşturmaktadır.

Bazik refrakter hammadresi üretim yöntemleri daha kaliteli refrakter beklentisi yüzünden büyük gelişmeler göstermiştir. Öncelikle sadece doğal yollardan üretilen sinter magnezya daha sonra deniz suyundan ve magnezyum içerikli bazik tuzlardan, sentetik yollardan kazanımla üretilmeye başlanmıştır. Son yıllarda teknolojik gelişmelerle birlikte, kalsine veya sinter magnezyanın elektrik ark fırınlarında ergitilmesiyle elde edilen ürün olan ergimiş magnezya bazik refrakterlerin bünyesinde kullanılmaya başlanmıştır.

Magnezya (MgO) esaslı bazik refrakterler çelik üretim proseslerinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Refrakterlerden, çelik üretim proseslerindeki gelişmelere paralel

olarak, çok yüksek sıcaklıklarda çalışabilme, cüruf ve çelik korozyonuna karşı daha dirençli olma gibi özellikler beklenmektedir. Bu bağlamda ergimiş magnezya çok önemli bir malzemedir. Ergimiş magnezya, birbirine çok iyi kenetlenmiş kristal yapısı nedeniyle sinter magnezyaya göre hem fiziksel hem de kimyasal kararlılık açısından çok daha üstündür. Düşük empürite içeriği, yüksek yoğunluk, büyük kristal boyutu ve yüksek sıcaklıklara karşı gösterdiği direnç gibi özellikler ergimiş magnezyanın, sinter magnezyayla birlikte bazik refrakterlerin bünyesinde sıklıkla kullanılmasını sağlamaktadır.

MgO'nin oda sıcaklığındaki elektrik direnci çok yüksektir. Bundan dolayı ergimiş magnezya ısıtıcı elemanların üretiminde yalıtkan dolgu maddesi olarak geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Bazik refrakterlere katılan ergimiş magnezya taneleri refrakterin performansını ve dayanıklılığını büyük oranda arttırmaktadır. Çok üst seviyelerdeki korozyon direnci nedeniyle refrakter kalitedeki ergimiş magnezya, çelik üretiminde yüksek aşınmanın meydana geldiği bölgelerde refrakter tuğlanın bünyesinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Ergimiş magnezya tanelerinin en sıklıkla katıldığı refrakterler magnezya-karbon refrakterlerdir. Ergimiş magnezya katkılı magnezya-karbon refrakterler çelik üretiminde; bazik oksijen konvertörlerinde, elektrik ark fırınlarında ve ikincil metalurji potalarında cüruf seviyesinde ve çelik seviyesinde en çok kullanılan refrakterlerdir.

MgO'ü ergitmek için 2800°C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkmak gerekmektedir. Bundan dolayıdır ki ergimiş magnezya üretimindeki hakim teknoloji elektrik ark fırınlarıdır. Genellikle üç fazlı elektrik ark fırınları kullanılabildiği gibi tek fazlı elektrik ark fırınları da rahatlıkla kullanılabilmektedir.

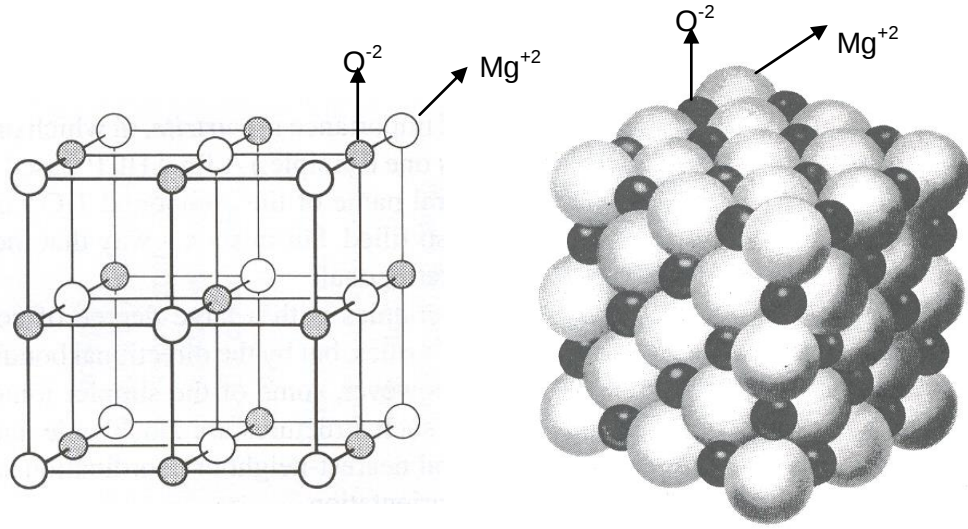
Ülkemizdeki refrakter üreticileri çelik endüstrisi için ürettikleri magnezya-karbon refrakter tuğlalar içinde kullandıkları ve tuğlanın dayanıklılığını ve performansını son derece arttıran ergimiş magnezya tanelerini yurtdışından satın almaktadır. Manyezit cevheri açısından oldukça zengin olan ülkemiz henüz ergimiş magnezya üretim teknolojisine yabancıdır. Bu çalışmanın bu nedenle ergimiş manyezit üretim teknolojisine ışık tutması amaçlanmıştır. Günümüze kadar ülkemizde ergimiş magnezya üretime yönelik her hangi bir çalışma yapılmamıştır. Ark fırınında yapılacak laboratuvar tipi bir çalışma ve bu çalışmanın sonuçları ile ileride bu yönde yapılacak çalışmalar için bilgi birikimi sağlanacaktır.

Bu çalışmada laboratuvar ölçekteki elektrik ark fırınında, ergimiş magnezya üretim koşulları araştırılmıştır. Deneyler sırasında elektrik ark fırınına hammadde olarak Kütahya yöresi manyezit cevherlerinden üretilen iki değişik kalitedeki sinter

magnezya şarj edilmiştir. Deneyler 270 kVA' lık daldırma tip tek fazlı elektrik ark fırınında yapılmıştır. Deneyler sonucunda kullanılan sinter magnezya kalitesine göre ergitme koşulları incelenmiş ve üretilen ergimiş magnezyanın ayrıntılı karakterizasyonu yapılmıştır.

2. ERGİMİŞ MAGNEZYA ÜRETİMİ

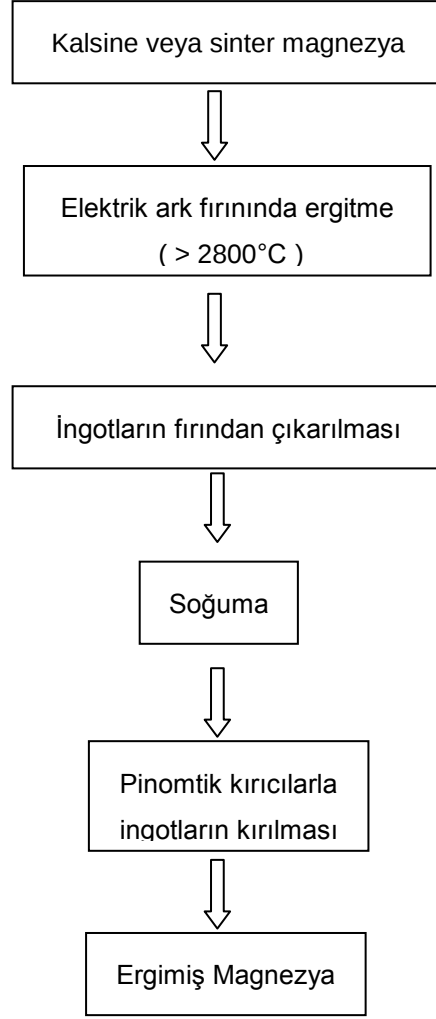
Magnezyum elementinin oksijenle yaptığı bileşik olan magnezya, (MgO) 2800°C gibi yüksek bir ergime sıcaklığına sahiptir. MgO kristal sistemi kübik yapıdadır ve NaCl yapısının aynısıdır. Na atomları yerinde Mg atomları, Cl atomları yerinde de O atomları bulunmaktadır[1].



Şekil 2.1. MgO 'in kristal yapısı[1]

Magnezyanın bazı refrakterlerin temel hammaddesi olmasının sebebi sahip olduğu yüksek ergime sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda kararlı olan oksit yapısıdır. Saf MgO 'in ergime sıcaklığı $2825^{\circ} \pm 20^{\circ}\text{C}$ civarındadır [2]. Çok yüksek olan bu sıcaklığa ulaşmak ve magnezyayı eritmek için elektrik ark fırınları kullanılmaktadır. Üç fazlı elektrik ark fırınları kullanılabildiği gibi tek fazlı elektrik ark fırınları da başarıyla kullanılabilmektedir [3].

Ergimiş magnezya üretiminde hammadde olarak kalsine veya sinter magnezya kullanılmaktadır. Kalsine ve sinter magnezya üretiminden sonra ergimiş magnezya üretimine geçilmektedir[4]. Şekil 2.2' de ergimiş magnezya üretimi akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.2. Ergimiş magnezya üretim akış şeması [4]

2.1. Kalsine ve Sinter Magnezya Üretimi

Magnezya (MgO) üretiminin hammaddesel temelleri; doğal kazanımla, hammadde kaynaklarında bulunduğu şekliyle, manyezit cevherinden ($MgCO_3$), veya sentetik kazanımla, büyük oranda deniz suyundan ve magnezyum bazlı tuz çözeltilerinden oluşmaktadır. Üretilen malzemeye sinter magnezya adı verilmektedir[5].

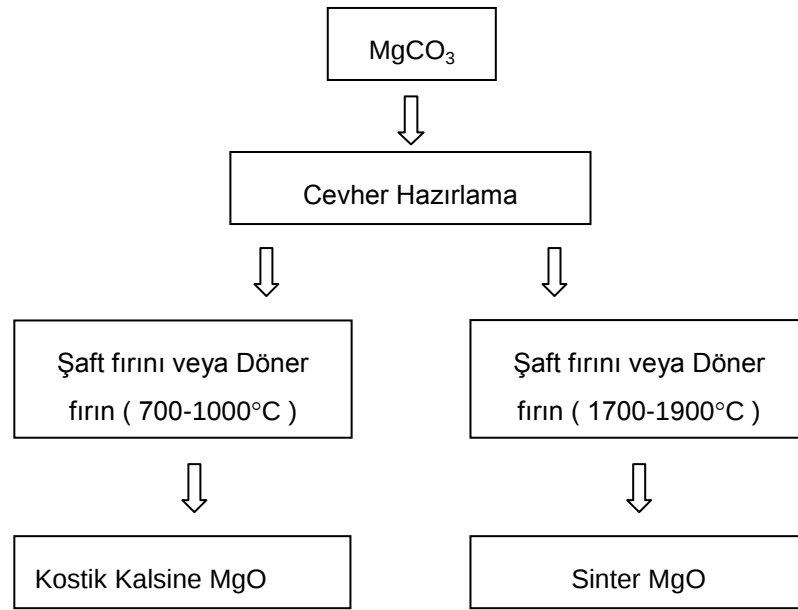
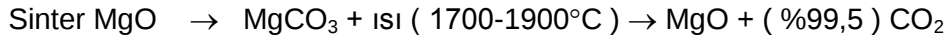
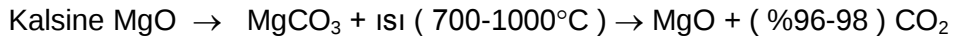
Bazı refrakter endüstrisinin sinter magnezya ihtiyacı, yaklaşık olarak %67 oranında doğal hammadde kaynakları olan manyezit cevherinden, geri kalan %33'ü ise sentetik olarak sağlanmaktadır. Sentetik üretimin ise %70'i deniz suyundan, diğer %30'u Mg bazlı tuz çözeltilerinden oluşmaktadır[6].

2.1.1. Doğal Yollarla Sinter Magnezya Üretimi

Doğal yollarla üretilen sinter magnezyanın büyük orandaki hammadde kaynağı manyezit ($MgCO_3$) cevheridir. Manyezit teorik olarak bileşiminde %52,3 CO_2 , ve

%47,7 MgO içermektedir. Kriptokristalin (amorf) ve kristalin (iri kristalli) olmak üzere iki şekilde bulunur. Pratikte manyezit cevheri içinde bir miktar demir, kireç, alümina ve silis bulunabilir. Cevherin kalitesi içerdiği bileşiklerin miktarlarına göre artar yada azalır[7].

Manyezit cevheri ısıtılınca dekompozisyona uğrayarak içindeki CO₂ içeriğini kaybetmekte ve magnezya (MgO) haline dönüşmektedir. Manyezitin 700-1000°C sıcaklıkları arasındaki ısı işlemi ile kostik kalsine magnezya, 1700-1900°C sıcaklıkları arasındaki ısı işlemi ile de sinter magnezya üretilmektedir. Aşağıda kalsine ve sinter MgO'nin oluşum reaksiyonları görülmektedir[8]. Şekil 2.3' de kostik kalsine magnezya ve sinter magnezyanın üretimi akım şeması verilmiştir



Şekil 2.3. Doğal yollarla magnezya üretimi akış diyagramı[8]

Doğadan çıkarılan manyezit cevheri öncelikle kırma öğütme ve eleme gibi mekanik cevher hazırlama işlemlerinden geçmektedir. Daha sonra ağır ortam ayırma, manyetik separatör veya flotasyon teknikleriyle bir kısım empüritelerin elimine edilmesiyle cevherin tenörü yükseltilmektedir. Bu aşamadan sonra ise cevhere döner fırınlarda veya şaft fırınlarında sıcaklık uygulaması yapılarak sinter MgO yada kostik kalsine MgO üretilmektedir[7].

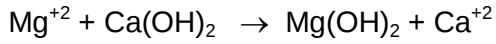
2.1.2. Sentetik Yollarla Sinter Magnezya Üretimi

Günümüzde uygulaması yaygınlaşan sentetik sinter MgO kazanım yöntemleri ile daha saf hammaddeler elde edilebilmektedir. Üretim yöntemleri deniz suyundan ve Mg bazlı tuz çözeltilerinden olmak üzere ikiye ayrılmaktadır[6].

2.1.2.1. Deniz Suyundan Sinter Magnezya Üretimi

Doğal kaynaklardan elde edilen manyezit cevheri içindeki empüritelerin yeterince uzaklaştırılamaması ve refrakter endüstrisinin daha saf hammaddeye ihtiyaç duyması, deniz suyundan magnezya üretim teknolojisinin gelişmesine sebep olmuştur[7].

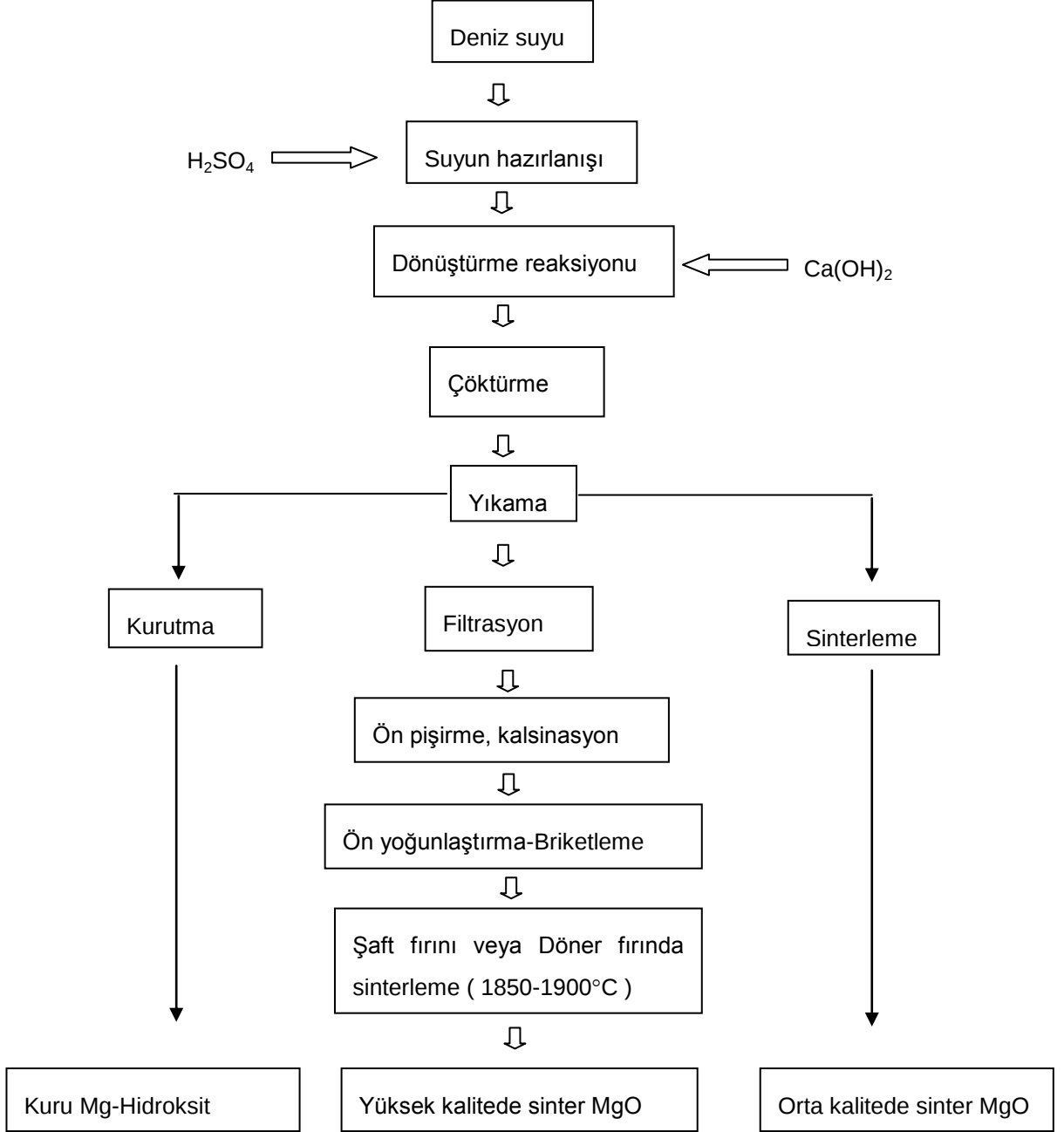
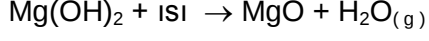
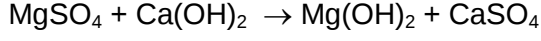
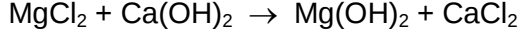
Denizden pompalarla çekilen su çöktürme havuzlarına alınır. Suyun içerisindeki kum ve diğer yabancı maddeler çöktürülür. Deniz suyunun içerisinde bulunan karbonik asit iyonu ve karbonat iyonu konsantrasyonunu azaltmak için deniz suyu sülfirik asitle karıştırılır sonra dekarbonizasyon kulesinden geçirilir. Bu işlem sonrasında HCO_3^{-2} ve CO_3^{-2} iyonları konsantrasyonu 80 ppm seviyesinden 2-5 ppm seviyesine kadar düşer. Reaktörde deniz suyu ile daha önceden hazırlanmış olan kireç sütü karıştırılır ve Mg^{42} iyonunun $\text{Mg}(\text{OH})_2$ halinde çökmesi sağlanır. Bu çökelmeyi sağlayan kimyasal reaksiyon aşağıdaki gibidir[7].



Bu reaksiyon sonucunda oluşan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ deki MgO'nin tane büyüklüğü 0,05-0,1 mikron arasındadır. $\text{Mg}(\text{OH})_2$,daha sonra magnezya tanelerinin büyütülmesi için kalınlaştırma tankına alınır. Kalınlaştırma tankının tabanından alınan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ temiz su ilavesiyle seyreltilir ve saflaştırma tanklarında kalsiyum ve silikat gibi safsızlıklardan arındırılır.

Bu aşamalardan sonra $\text{Mg}(\text{OH})_2$, %70 su içermektedir. Vakumlu filitrelerden geçirilerek su miktarı %50 seviyesine düşürülür. Ayrıca yoğunluğu da yükseltilmiş olur. Elde edilen $\text{Mg}(\text{OH})_2$ kekleri kurutulur, 1000°C'de kalsine edilir ve peletlenir. Daha sonra 1850-1900°C'de döner fırında veya şaft fırınında sinterlenerek sinter MgO üretilir. Şekil 2.4' te deniz suyundan sinter magnezya üretim akış şeması verilmiştir[7].

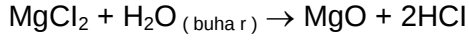
Üretimin temel prensibi aşağıdaki reaksiyonlarla ifade edilmektedir;



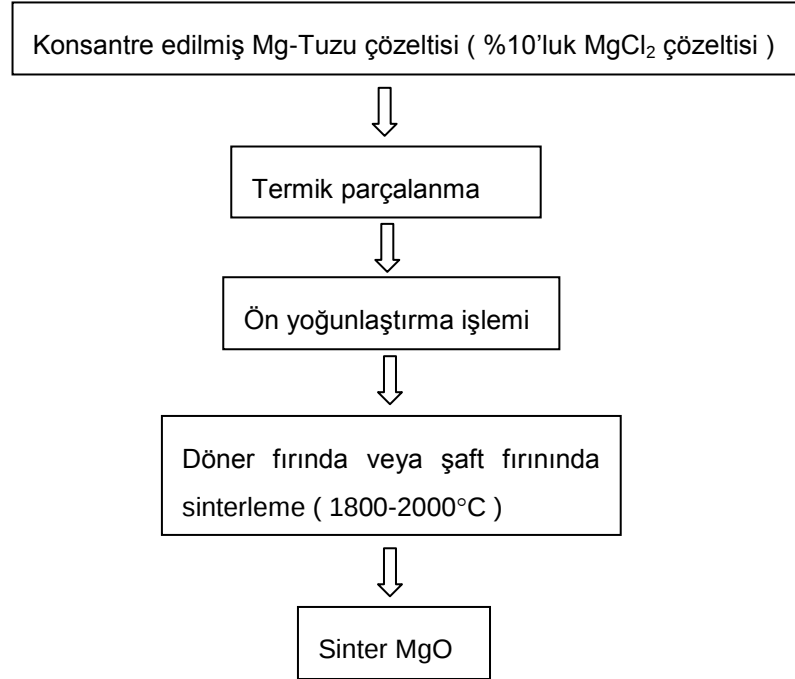
Şekil 2.4. Deniz suyundan sinter- MgO üretim akış diyagramı[7]

2.1.2.2. Mg Bazlı Tuzlardan Sinter Magnezya Üretimi

Sentetik üretimin bir başka yolu ise, Mg bazlı tuzlardan sağlanmaktadır ve büyük oranda $MgCl_2$ tuzlarından yapılmaktadır. Göller ve yeraltı suları yüksek oranda $MgCl_2$ tuzu içeren kaynaklardır. Tuz çözeltisi, 600-800°C'ye kadar su buharı altında reaktörlerde termik olarak parçalanmaktadır. Termik parçalanma reaksiyonu aşağıda verilmektedir[8].



Termik yolla $MgCl_2$ 'ün parçalanmasıyla sinter MgO üretimi, Şekil 2.5'de verilmektedir.

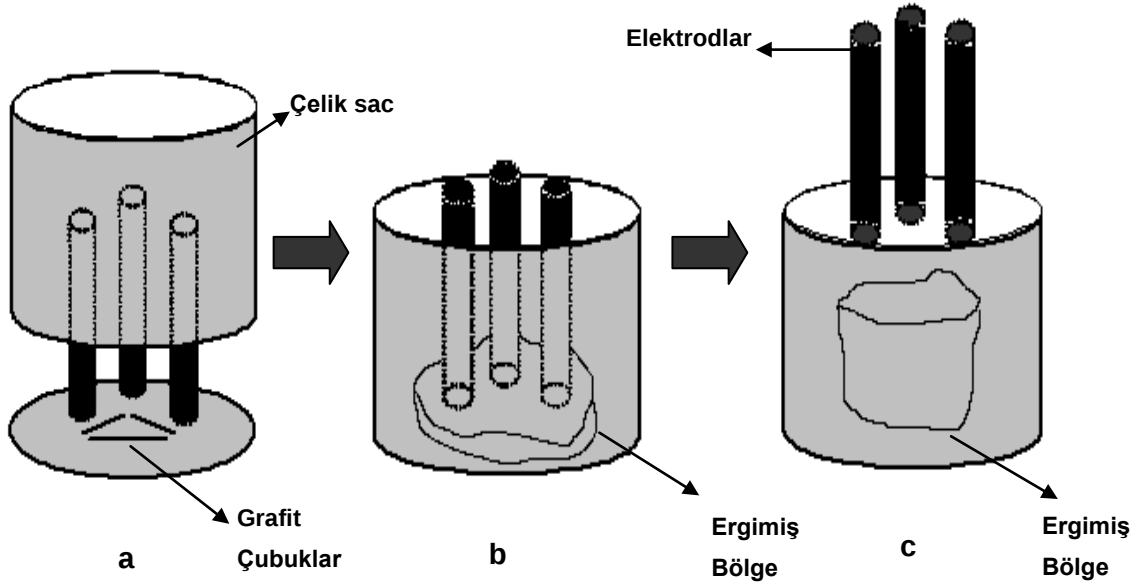


Şekil 2.5. Mg bazlı tuzlardan sinter MgO üretim akım şeması[8]

Refrakter malzeme endüstrisine hammadde sağlayan tüm bu üretim yöntemleriyle oldukça saf sinter MgO üretimi mümkün olmaktadır. Fakat refrakterlerin bünyesinde kullanılan sinter MgO tanelerinin saflığı yanı sıra kristal boyutu ve yoğunluğu gibi fiziksel özellikleri de çok önemlidir. Kristal boyutu büyük ve yoğunluğu yüksek malzemeler daha kararlı olduklarından dolayı refrakterin performansını son derece arttırmaktadırlar[9].

2.2. Elektrik Ark Fırınında Ergimiş Magnezya Üretimi

Üretim genellikle üç fazlı elektrik ark fırınlarında gerçekleştirilmektedir. Fırın tabanı ve fırın duvarları ergitilecek malzemenin aynısıyla örülmektedir ve fırının çelik sacı su soğutmalıdır. Fırının tabanında 2m çapında çelikten yapılmış bir çember bulunmaktadır. Bu çemberin üzerine üst çapı 1,80m, alt çapı 2,10m ve sac kalınlığı 2,54cm olan çelik pota yerleştirilmektedir. Tranformatör kapasitesi 1000-5000kVA arasındadır. Ergitme 100-300V ve 2000-10000A gibi şartlarda yapılmaktadır. Elektrodlar otomatik bir mekanizma sayesinde rahatlıkla yukarı ve aşağıya hareket etmektedirler. Bu olay sabit bir elektrik gücü uygulanmasını ve elektrik akımının istenen değerler dışına çıkmamasını sağlamaktadır. Ayrıca fırında gerektiğinde kullanılabilecek bir sallama mekanizması da mevcuttur. Ergitme sırasında iki çeşit yöntem vardır. Bunlardan ilki direnç ısıtması yapılan daldırma yöntemidir. Daldırma yönteminde elektrodlar ergimiş malzemenin içine daldırılmış şekilde çalışılır. İkinci yöntem ise açık ark uygulamasıdır. Bu yöntemde yüksek voltaj uygulaması ile elektrodlarla ergitilecek malzeme arasında uzun bir ark oluşmaktadır. Ergitilecek malzemeye temas yoktur[9].



Şekil 2.6. Elektrik ark fırınında magnezyanın ergitilme süreci a) Üçgen pozisyonunda grafit çubukların yerleştirilmesi, b) Ergimiş magnezya havuzunun oluşması, c) Elektrodların kaldırılarak ergitmenin tamamlanması[10]

Üretim prosesi, yüksek safiyetteki kalsine veya sinter magnezyanın (% 90-95 MgO) elektrik ark fırınına şarj edilmesiyle başlamaktadır. Şarj edilen malzeme, kendi direnci ve elektrik arkının oluşturduğu ısı sayesinde ergitilebilmektedir. MgO'nin oda sıcaklığındaki elektrik direncinin $10^{15}\Omega.cm$ gibi çok yüksek bir değerde olması prosesin başlangıcında ark oluşmasını zorlaştırmaktadır.

Bu zorluğu aşmak için Şekil 2.6-a' da görüldüğü gibi elektrodların arasına üçgen pozisyonunu alacak şekilde grafit çubuklar yerleştirilir [2,10].

Elektrodlara elektrik akımı verilmeye başlandığında yerleştirilen üçgen pozisyonundaki grafit çubuklar, geçen akım nedeniyle hızlı bir şekilde ısınarak çevresindeki malzemenin kolaylıkla ergimesi için gerekli ek ısıyı sağlarlar. Ergiyen magnezyanın elektriksel iletkenliği hızlı bir şekilde artar [2, 10]. Tablo 2.1' de MgO' in çeşitli sıcaklıklardaki elektriksel direnç değerleri verilmiştir [3].

Tablo 2.1. MgO' in çeşitli sıcaklıklardaki elektriksel direnç değerleri

Sıcaklık (° C)	Elektrik Direnci ($\Omega \cdot \text{cm}$)
25	10^{15}
850	$2 \cdot 10^8$
980	$3 \cdot 10^7$
2100	$4,5 \cdot 10^2$
2800	0,0285

Şekil 2.6-b 'deki ergimiş magnezya havuzcuğunun oluşmasıyla birlikte ergiyen bölge kendi kendine elektrik akımını iletecek duruma gelir ve üçgen pozisyonunda yerleştirilen grafit çubuklar ortamdan uzaklaştırılır. Prosesin bu aşamasından sonra, ergimiş bölgede bulunan elektrodlar, her yeni malzeme şarjından sonra yukarıya çekilerek işleme devam edilir. Fırına her yeni şarj yapıldığında, malzeme katı olduğundan ve elektriği iletmediğinden dolayı fırın akımı düşer. Malzeme ergidikten sonra akım tekrar yükselir ve tekrar şarj yapılarak elektrodlar yukarıya doğru çekilir. Proses bu şekilde, elektrik akımı, şarj besleme hızı ve elektrod hareketi gibi parametreler kontrol altında tutularak Şekil 2.6-c' deki gibi fırın tamamen doluncaya kadar sürer [10]. Elektrodların çekme hızını, beslenen malzemenin tane boyutu da etkilemektedir. Ergitilecek kısmın hacim olarak sabit olduğu düşünülürse, ince taneli malzemenin ergimek için, kalın taneli malzemeye oranla daha fazla ısıya ihtiyacı olacaktır. Bu nedenle elektrodların ince malzeme içinde daha uzun süre durması gerekmektedir. Sonuç olarak elektrod çekme hızı, hammadde olarak ince taneli malzeme kullanıldığında daha yavaş gerçekleştirilmektedir [11].

Fırın içine şarj edilen magnezyanın hepsi ergitilememektedir. Yalnızca fırının ortasında yer alan belli bir alanda magnezyanın ergime sıcaklığına ulaşılmaktadır. Ergimeyen malzeme fırın refrakterini oluşturmakta ve ergiyen bölge ile fırının çelik sacı arasında koruyucu bir bariyer görevi görmektedir[10].

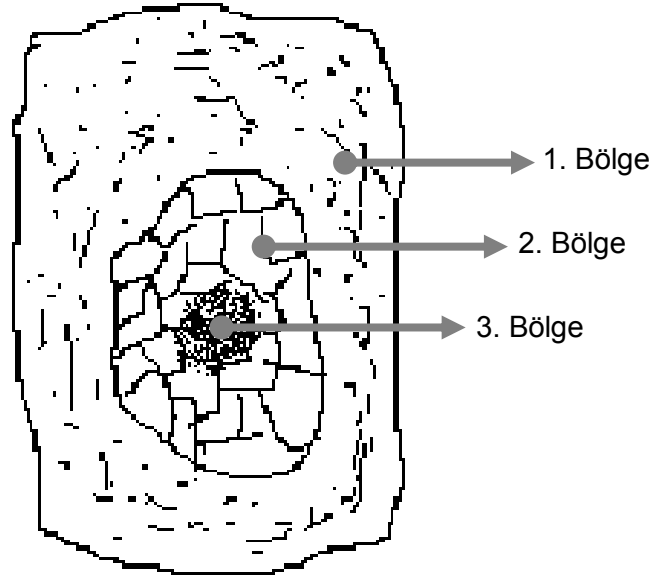
Ergitme tamamlandıktan sonra Şekil 2.7' te görüldüğü gibi çelik pota yukarıya kaldırılmakta ve ergimiş magnezya ingotlar fırından çıkarılmaktadır.



Şekil 2.7. Fırından çıkarılan ingot yapısının görüntüsü

Ergitme işleminden sonra fırından çıkarılan ingot atmosfer şartlarında soğumaya bırakılmaktadır. Ergimiş bölge etrafını saran ergimemiş bölge sayesinde çok yavaş soğumaktadır. Ergimiş bölgenin yavaş soğuması sonucu, bu bölgede MgO kristalleri büyümekte ve MgO' ten daha geç katılacak ikincil fazlar (empüriteler) ingotun göbek bölgesine ötelenmekte ve burada birikmektedir. Sonuçta ingotun göbek bölgesi ve ergimemiş bölge arasında kalan kısımda çok büyük kristalli ve oldukça saf MgO kalitesine ulaşılmaktadır[12].

Şekil 2.8' de ingotun şematik yapısı ve oluşan bölgeler görülmektedir. 1. Bölge ergimemiştir sadece sinterlenmiştir. Ergitme sırasında çelik sacı yüksek sıcaklıklardan korumasının yanı sıra, soğutma sırasında ergimiş bölgenin yavaş soğumasını sağlamaktadır. 2. bölge büyük kristalli ve oldukça saf magnezya kalitesini içermektedir. 3. bölge ise magnezyadan daha geç katılacak CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ gibi empüritelerin toplandığı yerdir. 1. bölge sinter kalitesinde ürün olarak kullanılabilir.



Şekil 2.8. Ergimiş magnezya ingotunun şematik yapısı ve soğuma sonrası bölgeler

Oluşan ingotlar yaklaşık 20 ton ağırlığındadır. Bir kaç günlük soğutamadan sonra ingotlar pinomatik kırıcılarla kırılarak ergimiş magnezya elde edilmektedir[12].

2.3. Üretilen Malzemelerin Özellikleri

Gerek doğal gerekse sentetik kaynaklardan üretilen sinter magnezyanın yoğunlukları ve kristal büyüklükleri belli bir sınırı aşmamaktadır. Üretilen kalsine magnezya veya sinter magnezyanın elektrik ark fırınlarında eritilmesi ile yoğunluğu teorik miktarlara yakın ve çok büyük kristalli bir ürün olan ergimiş magnezya üretilmektedir. Tablo 2.2’ de ham manyezit, kalsine magnezya, doğal sinter magnezya, sentetik sinter magnezya ve ergimiş magnezyanın özellikleri verilmektedir[7,9].

Tablo 2.2’ de Türkiye’ deki kriptokristalin (amorf) manyezit yataklarından çıkarılan ham manyezit cevheri ve bu cevherden üretilen, kalsine magnezya ve sinter magnezyanın kimyasal ve fiziksel analizlerinin alt ve üst sınırları verilmiştir. Ergimiş magnezya ve deniz suyu sinter magnezya üretimi Türkiye’de olmadığından dolayı dünya üretim değerlerinin ortalaması alınmıştır[7].

Tablo 2.2. Ham manyezit, kalsine magnezya, doğal sinter magnezya, sentetik sinter magnezya ve ergimiş magnezyanın spesifikasyonları[7,9]

İçerik	H.M.	K.K.M.	S.M.	F.M.	D.S.S.M.
% MgO	45.0-46.6	82.0-93.5	93.0-96.0	96.0-99.8	96.0-99.0
% CaO	0.40-1.20	2.00-2.50	1.50-3.50	0.05-1.50	0.70-2.30
% SiO ₂	0.40-4.00	2.50-9.00	1.20-2.50	0.05-0.50	0.10-0.70
% Fe ₂ O ₃	0.3-1.00	0.10-0.60	0.30-0.50	0.04-0.12	0.10-0.20
% Al ₂ O ₃	0.20-1.00	0.10-0.60	0.10-0.50	0.05-0.010	0.10-0.30
CaO/SiO ₂	0.30-1.00	0.30-0.80	1.00-2.00	1.00-3.00	1.00-5.00
b.y. (g / cm ³)	2.90-3.00	3.00-3.10	3.30-3.45	3.45-3.57	3.30-3.40
P.K.B. (µm)	-	-	40-100	> 500	30-70

H.M. : Ham manyezit F.M. : Ergimiş magnezya D.S.S.M. : Deniz suyu sinter magnezya
K.K.M. : Kostik kalsine magnezya S.M. : Sinter magnezya b.y. : Bulk yoğunluk
P.K.B. : Periklaz (MgO) kristal boyutu

3. ERGİMİŞ MAGNEZYANIN KULLANIM ALANLARI

Ergimiş magnezya, yüksek sıcaklıklarda gösterdiği fiziksel ve kimyasal kararlılığı nedeniyle refrakterlerde kullanılmasının yanı sıra yüksek yalıtkanlığı nedeniyle ısıtıcı elemanlarda yalıtkan dolgu maddesi olarak kullanım alanı bulmaktadır[13].

3.1. Refrakterler

Refrakterler genellikle doğada bulundukları halleriyle seramik oksit karakterdedirler. Seramik oksitler yüksek sıcaklıkta kullanılmaya müsait metal veya metaloid elementlerin oksijenle yaptıkları bileşiklerdir. Bir çok seramik oksit iyonik bağlı olup, iyonik bağlı malzemelerin genel karakteristiklerine sahiptir. Bu özellikler, saydamlık, elektrik ve ısı iletimine direnç ve kimyasal kararlılıktır. Bu özelliklerinin yanı sıra seramik oksitler yüksek elastik modül, yüksek sertlik, gevreklik, yüksek ergime sıcaklığı, düşük termal genleşme, ve korozyona karşı direnç gösterirler[14]. Tablo 3.1' de refrakter hammaddesi olarak kullanılan seramik oksitler ve ergime sıcaklıkları verilmiştir.

Tablo 3.1. Refrakterlerde kullanılan seramik oksitler ve ergime sıcaklıkları[15]

Faz	Kimyasal Formül	T _E (°C)
Silika	SiO ₂	1723
Alumina	Al ₂ O ₃	2050
Magnezya	MgO	2800
Kalsiyum oksit	CaO	2572
Forsterit	2MgO.SiO ₂	1890
Spinel	MgO. Al ₂ O ₃	2135
Mullit	3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	1810
Dikalsiyum silikat	2CaO. SiO ₂	2130
Kromit	Cr ₂ O ₃	2275
Zirkonya	ZrO ₂	2690

Refrakterler çok nadir tek faz halinde ve saf olarak bulunurlar, genellikle refrakter mikroyapıları tablo 2.1’de verilen seramik oksitlerin bir veya birkaçını içerir. Bundan dolayı bir refrakterin ergime sıcaklığı için kesin bir değer verilemez[15].

Refrakterlerin çeşitli işlemlerden geçtikten sonra üretilmiş, oksit karakterde olmayan çeşitleri de vardır. Bunlara örnek olarak grafit (C), silisyum karbür (SiC), alüminyum nitrid (AlN), titanyum karbür (TiC), titanyum borür (TiB₂), bor nitrid (BN) ve metallere molibden (Mo) ve tungsten (W) verilebilir[16].

Refrakterler iki şekilde sınıflandırılırlar[8];

i) Fiziksel özelliklerine göre

- Şekli refrakterler

Değişik refrakter hammaddelerin, bağlayıcıların ve diğer ilavelerin harmanlanıp preslenmesiyle, tuğla veya özel bloklar halinde üretilirler ve kullanılırlar[8].

- Şekilsiz refrakterler

Monolitik halde kullanılırlar. Dökülebilir refrakterler, plastik refrakterler ve püskürtme refrakterler bu gruba girer. Şekli refrakterlerin kullanımının zor olduğu yerlerde bu refrakterler kullanılabilir. Ayrıca fırın refrakterlerinin geçici tamirinde sıklıkla kullanılmaktadırlar[8].

ii) Kimyasal özelliklerine göre

- Asidik refrakterler

Silika refrakterler (SiO₂), şamot refrakterler (Al₂O₃.SiO₂), zirkon refrakterler (ZrO₂. SiO₂)

- Bazik refrakterler

Magnezya refrakterler (MgO), magnezya-krom refrakterler (MgO.Cr₂O₃), magnezya-spinel refrakterler (MgO. Al₂O₃), dolomit refrakterler (MgO.CaO), forsterit refrakterler (MgO.SiO₂)

- Nötr refrakterler

Yüksek alüminalı refrakterler (Al₂O₃.SiO₂), karbon refrakterler (C), Silisyumkarbür refrakterler (SiC), kromit refrakterler (Cr₂O₃. Al₂O₃.MgO.FeO) [8]

Refrakterlerin en çok kullanıldığı yerler demir-çelik, demirdışı metal, cam, çimento, seramik ve kimyasal endüstrileridir. Bu endüstrilerden demir-çelik üretimi %65 gibi yüksek bir oranla refrakter kullanımında başı çekmektedir. Bu nedenle demir-çelik

Üretim teknolojisindeki herhangi bir yenilik veya değişiklik refrakter malzeme teknolojisini direkt olarak etkilemektedir[5].

elik retiminde bazik oksijen konvertrlerinde ve ikincil metalurji işlemlerinde meydana gelen gelişmeler ile birlikte çeliğin pota içinde kalma süresi ve işlemler sırasında meydana gelen sıcaklıklar artmıştır. Bu nedenle refrakterlerden daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme ve etkisi artmış cüruf korozyonuna karşı daha dayanıklı olma gibi özellikler beklenmektedir[5].

Bazik refrakter olarak kullanılan MgO tanelerinin özelliklerinin, refrakterin performansı ve dayanıklılığına etkisinin iyi anlaşılabilmesi için refrakterlerin çalıştığı ortamlardaki aşınma mekanizmasının iyi bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir.

Günümüzde ergimiş magnezya ve sinter magnezya tanelerinin en çok kullanıldığı refrakterler, elik endüstrisinde kullanılan magnezya-karbon refrakterlerdir[8].

3.2. Magnezya-karbon refrakterler

Magnezya-karbon refrakterlere eklenen ergimiş magnezya taneleri, sahip oldukları yüksek yoğunluklar, büyük kristal boyutu ve düşük ikincil fazlar nedeniyle refrakterin dayanım ömrünü son derecede arttırmaktadır. Refrakter kalitedeki ergimiş magnezyadan beklenen özellikler aşağıdaki gibidir[4].

- Yüksek MgO içeriği (% 96-%99)
- Düşük silis (SiO₂) içeriği
- CaO / SiO₂ = 2 / 1
- Yüksek yoğunluklar (3,47-3,55 g/cm³)
- Büyük periklaz (MgO) kristal boyutları (>500µm)

Bazik oksijen fırınları, elektrik ark fırınları ve ikincil metalurji potalarında kullanılan magnezya-karbon refrakterlerin aşınma mekanizmasının iyi anlaşılması, daha kaliteli refrakter üretilmesi için şarttır[8].

Magnezya-karbon refrakter tuğlaların yapısında; doğal yollarla veya sentetik yollarla üretilmiş sinter magnezya taneleri, karbon türevi olan grafit, fenolik reçine ve antioksidantlar bulunmaktadır. Son yıllarda üstün aşınma dirençleri nedeniyle ergimiş magnezya taneleri de bu refrakterlerin bünyesine katılmaktadır[8].

MgO-C refrakter tuğlalarda aşınma aşağıda yer alan faktörlerin kombinasyonu şeklinde meydana gelmektedir[8].

- I. Magnezya tanesinin cüruf tarafından çözündürülmesi
- II. Cüruf içindeki FeO tarafından bünyedeki karbonun oksidasyonu
- III. Çalışma ortamındaki gazlar tarafından karbonun oksidasyonu
- IV. Sıvı çelik akışından kaynaklanan aşınma
- V. Termal veya mekanik kaynaklı dökülmeler
- VI. Hurda çarpması sonucu kırılma

Refrakter malzemelerin fırın ortamındayken gaz, cüruf ve sıvı metalle yaptıkları reaksiyonların iyi anlaşılması bunların etkisinin azaltılmasının ön koşuludur. Cüruf direnci, bir refrakter malzemenin, gaz ve buhar fazı da dahil olmak üzere, her türlü kimyasal etkilere karşı mukavemetini belirlemektedir. Refrakter tuğla ile temas eden aşındırıcı bileşiklerin kimyasal bileşimleri çok farklı olup, buna bağlı olarak aşınma prosesleri de farklılık göstermektedir[8].

3.2.1. Cüruf-Refrakter Etkileşimi

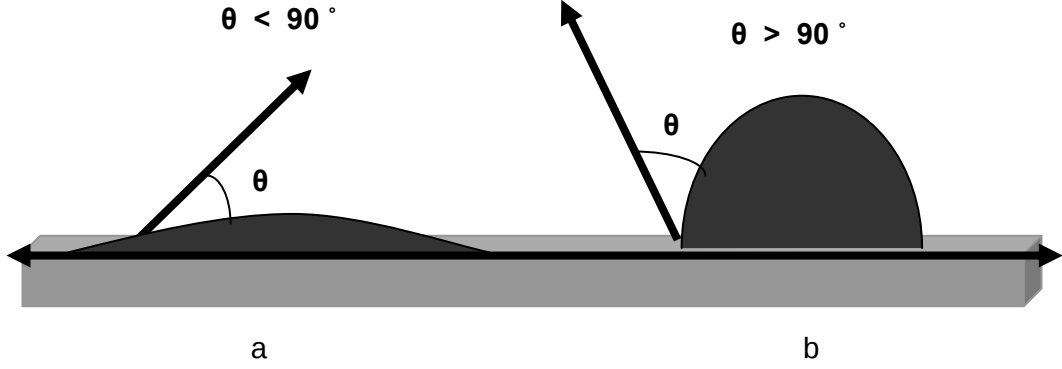
Üç çeşit cüruf-refrakter etkileşimi gerçekleşmektedir[6]. Bunlar;

- I. Sıvı cüruf ile refrakter arasında meydana gelen reaksiyonlar sonucu arayüzeyde ince bir tabaka oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka, refrakter astar duvarındaki çözünmeyi daha da hızlandırmaktadır.
- II. Cüruf-refrakter reaksiyonu sonucu arayüzeyde oluşan yüksek viskoziteye sahip tabaka, cüruf yayınmasını yavaşlatıcı etkide bulunmaktadır.
- III. Sıvı cüruf-refrakter arasındaki reaksiyon son derece yavaş ilerleyebilmektedir. Sıvı cüruf ancak porlardaki basıncın etkisiyle, refrakter içinde yayınmaktadır. Ancak bu arada çözünen refrakterin, cüruf viskozitesini düşürmesi ve arayüzey gerilimini yükseltmesiyle yayınıma hızlanmaktadır.

Refrakterlerin cüruf ile etkileşimi genel olarak şu parametrelere bağlıdır: refrakter malzemenin bileşimi, cüruf bileşimi, sıvı cürufün viskozitesi ile ortam sıcaklığı. Ayrıca kimyasal karakter olarak ele alındığında, bazik karakterli refrakterlerin, bazik esaslı cüruflara ve asidik refrakterlerin de asidik esaslı cüruflara daha dirençli oldukları bilinmektedir[17].

Refrakter astarın temasta olduğu sıvı cüruf tarafından korozyona uğratılması, üç safhadan geçerek meydana gelmektedir[6]. Bunlar;

1) Refrakter yüzeyinin cüruf tarafından ıslanması: Refrakterlerin cüruf ile etkileşiminde ilk aşama, refrakterin cüruf tarafından ıslanabilme özelliğidir. Şekil 3.1' de görüldüğü üzere, yüzey geriliminin meydana getirdiği temas açısına



(θ) bağlı olarak ıslanabilme olayında iki farklı durum söz konusudur.

Şekil 3.1. Sıvı cüruf ile refrakterin yüzey gerilimi arasındaki temas açısının şematik gösterimi; (a) Islanma, (b) Islanmazlık durumunu gösterir.

Temas açısının 90°'den küçük olduğu durumda, cüruf refrakter üzerinde yayılma gösterir ve refrakteri ıslatır. Cüruf korozyonunun gerçekleşmesi için önce bu ıslanmanın meydana gelmesi gerekmektedir ki; genelde sıvı-katı sistemlerinde böyle bir durum gözlenmektedir. Eğer temas açısı 90°'den büyükse; cüruf, refrakter yüzeyi üzerinde damlalar şeklinde kalacak ve ıslanma olayı meydana gelmeyecek yani refrakter korozyonu az oranda gerçekleşecektir[6].

Sıvı-katı sistemlerinde sıvının bir kılcal boşluk içerisine sızma derinliğini gösteren temel denklem aşağıdaki gibidir;

$$h = \frac{2 \gamma \cos \theta}{r \rho g}$$

h = sızma derinliği

θ = sıvı ile katı arasındaki temas açısı

γ = sıvının yüzey gerilimi

r = kılcal boşluğun yarıçapı

ρ = sıvının yoğunluğu

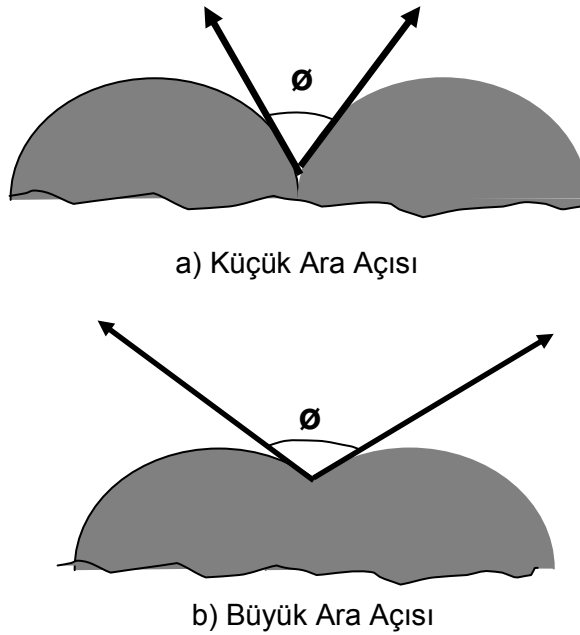
g = yerçekimi ivmesi

Bu denklem, cüruf penetrasyon derinliğinin, cürufun yüzey geriliminin, cürufun yoğunluğunun ve cüruf ve tuğla arasındaki temas açısının bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir[18].

2) Cürufun gözeneklere dolması : Cüruf-refrakter arayüzeyinde ıslanma gerçekleştikten sonra, cüruf refrakterin yüzeyindeki açık gözeneklerden içeriye

sızmaya başlar. Bu aşamada, refrakterin açık porozite yüzdesi önemli rol oynar ve porozite düştükçe cüruf etkileşimine direnç artar[6].

3) Cürufun refrakter tanelerini korozyonu : Refrakterin gözeneklerinden içeri sızan cürufun etkisinde, birbirlerine komşu iki refrakter tanesinin, yüzey gerilimleri arasındaki açı belirleyici olmaktadır. Şekil 3.2-a' dan da görüldüğü gibi, ara açısı (θ) küçüldükçe tanelerin cürufla teması artacaktır. Ara açısının 0° 'ye yaklaşması durumunda, cüruf iki tane arasına ince bir tabaka halinde girmiş olacak ve taneleri hızla birbirinden ayıracaktır. Şekil 3.2-b' de taneler arası açının büyümesi, taneler arasındaki katı-katı bağ yapısını daha geliştireceği için cüruf direncinin yüksek olmasını sağlayacaktır[6].



Şekil 3.2. Refrakter tanelerinin ara açısının şematik gösterimi

Refrakterlerin sıvı metal veya cüruf ile korozyonunu etkileyen parametrelerin başında sıcaklık gelmektedir. Sıcaklığın yükselmesi, cürufun viskozitesini düşürmesinin yanısıra reaksiyonun hızını arttırarak etkileşimin hızlanmasına neden olmaktadır. Cürufun kimyasal bileşiminin refrakter aşınmasında önemli bir yeri vardır. Aynı zamanda ergime sıcaklığını, ötektik noktaya doğru düşürecek bileşimler ve bünyede bulunan cüruf fazı etkisi yapan ikincil fazların miktarları da refrakter aşınmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Refrakter malzemelerin etkileri açısından bakıldığında, kimyasal karakterinin yanında porozitesi de önemli bir özelliktir. Yüksek poroziteli tuğlalardan örülen bir astarın bünyesine sıvı metal veya cüruf hızla nüfuz eder ve reaksiyon yüzeyi malzemenin derinliklerine ilerler. Bu nedenle refrakter malzemenin üretiminde porozitenin minimum olabileceği şekilde, tane iriliği

dağılımının optimize edilmesi ve şekillendirme sırasında maksimum yoğunluğun elde edilmesi gerekmektedir[6].

Refrakter uygulamasında bazik cüruflara karşı bazik refrakterler asidik cüruflara karşıda asidik refrakterler kullanılmaktadır. Çelik üretiminde bazik cüruflarla çalışıldığından dolayı bazik refrakterler kullanılmaktadır[17].

Bazik refrakterlerin dayanıklılığının ve performansının geliştirilmesinde refrakter içinde kullanılan hammaddelerin çok büyük önemi vardır. Hammaddelerin geliştirilmesi konusundaki çalışmalar günümüzde de devam etmektedir.

3.2.2. Magnezya-Karbon Refrakterlerdeki MgO Taneleri ve Aşınma Mekanizması

Refrakterlerde kullanılan hammaddenin özelliklerinin de refrakterin aşınma davranışı üzerinde büyük etkileri vardır. Magnezya-karbon refrakterlerin ana hammaddesi MgO taneleridir. Kullanılan MgO tanesinin kolay aşınması refrakterin performansını ve dayanıklılığını düşürmektedir[19].

Magnezya-karbon refrakterler kullanım yerleri dolayısıyla devamlı cüruf ile temas halindedir. Refrakterin bünyesine penetre olan cüruf, magnezya tanesi içindeki periklaz (MgO) kristallerini bünyesine alarak magnezya tanelerini çözmektedir. Bu olay iki şekilde meydana gelmektedir[19];

- Cüruf içindeki CaO ve SiO₂ gibi bileşenlerin tane sınırlarına sızarak magnezya tanesini refrakter bünyesinden ayırması ve çözmesi
- Cüruf içindeki FeO'in periklaz kristalleri içine yayınması ve düşük sıcaklıkta ergiyen fazların oluşması sonucu magnezya tanesinin çözülmesi

Magnezya tanelerinin cüruf korozyonuna karşı dayanıklı olması istenmektedir. Refrakter tuğla içerisinde kullanılacak MgO hammaddesi seçiminde MgO tanesinin[20];

i) Fiziksel Özellikleri :

- Bulk yoğunluğu
- Ortalama periklaz kristal boyutu,

ii) Kimyasal özellikleri :

- MgO saflığı,
- İkincil faz dağılımı ve bunların kimyasal kompozisyonu, (CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, B₂O₃)

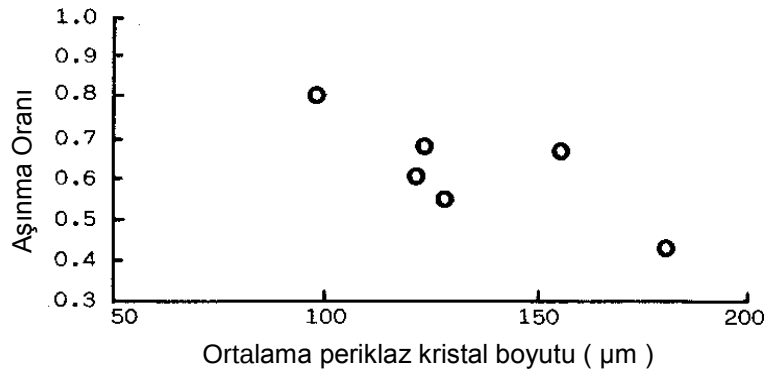
- İkincil fazların kimyasal dengesi (özellikle CaO / SiO₂ oranı)

dikkat edilecek özelliklerdir. MgO tanesinin aşınmaya karşı direnci bu özelliklere bağlı olarak değişmektedir[20].

3.2.2.1. MgO Tanesinin Fiziksel Özellikleri ve Aşınma

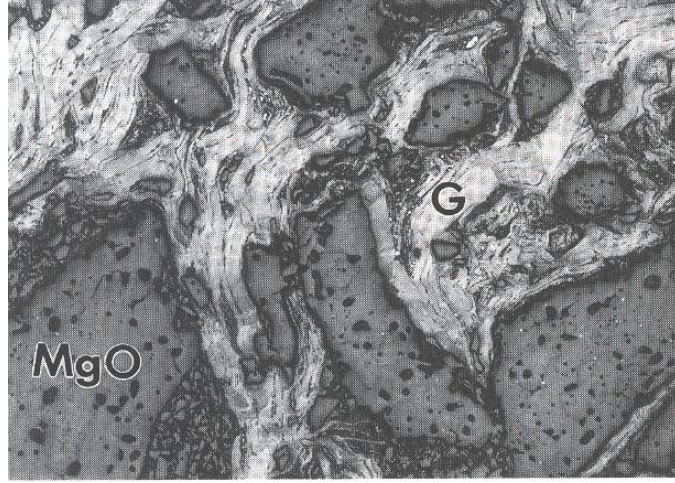
Yoğunluk malzeme porozitesiyle yakından ilgili olduğu için çok önemli bir parametredir. MgO tanesinin teorik yoğunluğu 3,57 g/cm³ değerindedir. Şaft fırını veya döner fırında sinterlenerek üretilen magnesia tanelerinin yoğunlukları ise 3,40-3,45 g/cm³ arasında değişmektedir. Teorik yoğunluk ile, ticari olarak üretilen sinter magnezyanın yoğunluğu arasındaki farkın sebebi MgO tane bünyesinde bulunan açık ve kapalı porlardır. Ayrıca düşük yoğunluklu ikincil fazların bulunuşuda bunu etkilemektedir. Genellikle açık porozite miktarı toplam porozitenin yarısı civarındadır. Porozitenin diğer kısmı periklaz (MgO) kristallerinin tane sınırlarında bulunmaktadır ve cüruf atağı bu tane sınırlarında hızlı bir şekilde gerçekleşebilmektedir. MgO tanesinin yoğunluğu arttığında, taneler arası porozite azalmaktadır. 3,40 g/cm³ üzerindeki yoğunluklar bu etkiyi yaratmak için yeterli olabilmektedirler[21].

MgO tanelerinin içerdikleri periklaz kristal boyutu büyüdükçe, kristal yüzey alanı ve açık porozite miktarı azalmaktadır. Sonuçta magnezya tanesinin aktivitesi azalmakta ve demir oksit bakımından zengin cürufların sızmasına ve aşındırmasına karşı daha dayanıklı hale gelmektedir. Şekil 3.3' teki grafikte ortalama periklaz kristal boyutu ile aşınma oranının nasıl değiştiği görülmektedir[21].



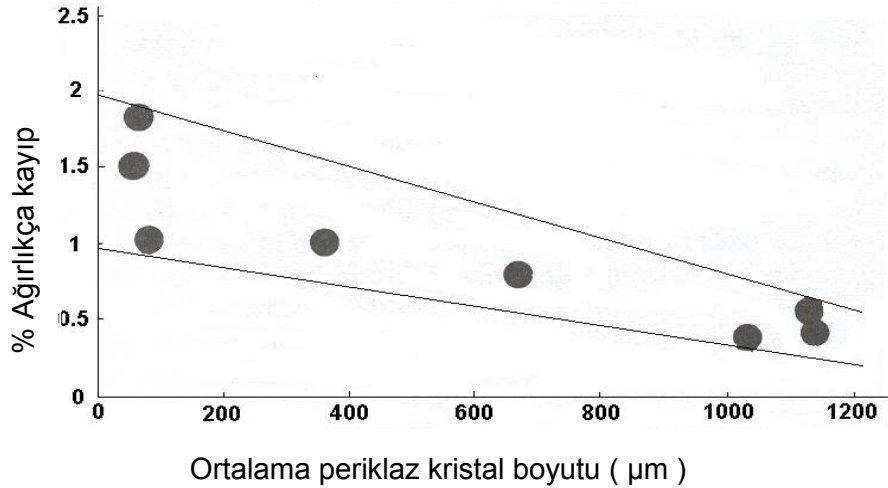
Şekil 3.3. Ortalama periklaz kristal boyutu ile aşınma arasındaki ilişki[21]

Magnezya-karbon refrakterlere% 25'e varan oranlarda katılan grafit Şekil 3.4' de görüldüğü gibi MgO tanelerinin etrafını sararak, cürufun refrakteri ıslatma açısını yükseltmesi sonucu refraktere ıslanmazlık özelliği katmaktadır ve refrakterin porozitesini düşürerek refrakterin cüruf korozyonuna karşı direncini önemli ölçüde geliştirmektedir[5].



Şekil 3.4. Magnezya-karbon refrakterlerde MgO taneleri ve grafit morfolojisi[5]

Fakat özellikle yüksek sıcaklık (1650 °C) bölgelerinde kullanılan refrakterlerdeki grafit, refrakterin içindeki MgO tanesiyle reaksiyona girerek ($MgO + C \rightarrow Mg + CO$) MgO'ı redüklemektedir. Mg buharı fırın atmosferine geçmekte ve bunun sonucunda ağırlık kayıpları meydana gelmektedir. Bu reaksiyon tam anlamıyla önlenemez ama yavaşlatılabilir. Şekil 3.5' de görüldüğü üzere periklaz (MgO) kristal boyutu büyüdükçe, yüzey alanı azalır ve kristal termodinamik açıdan daha kararlı hale gelir ve sonuçta reaksiyonun oluşumu yavaşlar[20].

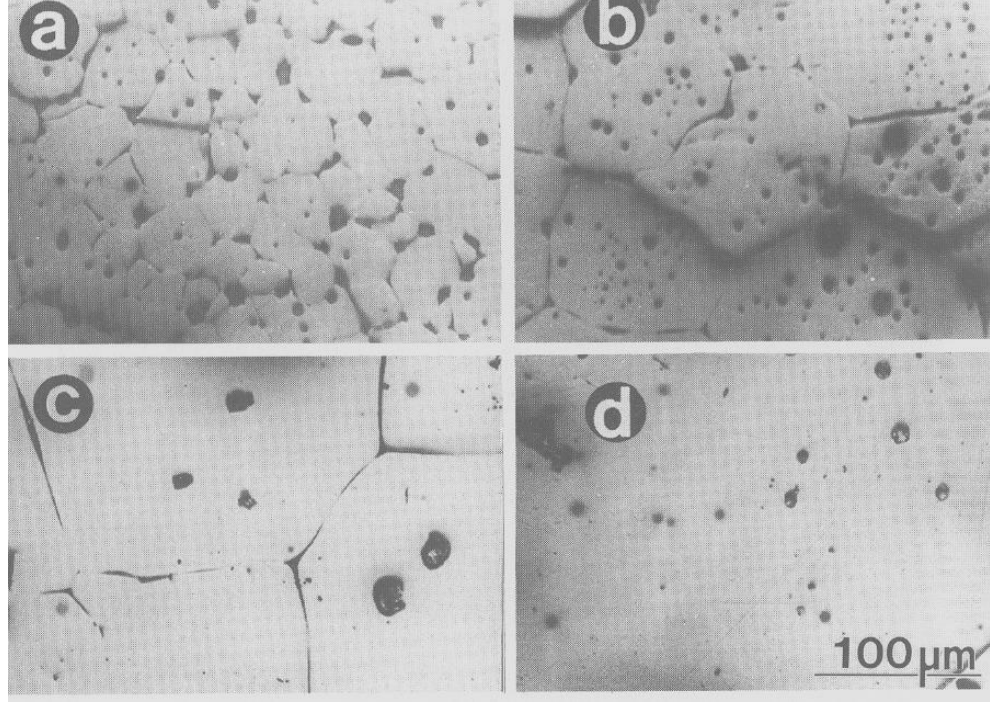


Şekil 3.5. Magnezya tanesinin kristal boyutu ile ağırlık kaybı arasındaki ilişki[20]

Çok büyük kristalli, yoğunlukları teorik miktara (3,57 g/cm³) yakın ve aşınmaya karşı yüksek direnç gösteren MgO taneleri üretmek için konvansiyonel sinterleme teknikleri yeterli olmamaktadır[21].

Kalsine veya sinter magnezyanın elektrik ark fırınlarında ergitilmesiyle ergimiş magnezya üretilmektedir. Ergimiş magnezya taneleri, sinter magnezya taneleriyle karşılaştırıldığında üstün özellikler göstermektedir. Sinter MgO tanelerinin periklaz

kristal boyutu 40-100 μm arasında değişirken, ergimiş magnezya tanelerinin periklaz kristal boyutu 500 μm ' un üzerindedir. Sinter MgO tanelerinin yoğunluğu 3,40-3,45 g/cm^3 arasında iken ergimiş magnezya tanelerinin yoğunluğu 3,47-3,55 g/cm^3 arasında değişmektedir. Malzemenin yoğunluğundaki artış porozitenin azalması anlamına gelmektedir. Ergimiş magnezya tanelerinin poroziteleri oldukça düşük seviyelerdedir. Şekil 3.6' da periklaz (MgO) kristalinin büyümesiyle açık ve kapalı porlardaki değişim görülmektedir[21].



Şekil 3.6. MgO tanesinin periklaz kristallerinin büyümesi ile açık ve kapalı porlardaki değişim a) Standart sentetik magnezya tanesi, b) Büyük kristalli sentetik magnezya tanesi, c) Büyük kristalli doğal magnezya tanesi, d) Çok büyük kristalli ergimiş magnezya tanesi [21]

Şekil 3.6-a' da sentetik kazanımla üretilmiş MgO tanesi ve kristallerin (65 μm) sınırlarındaki tanelerarası porozite görülmektedir. Şekil 3.6-b' de ise kristallerin büyümesi sonucunda porlar, periklaz kristallerinin içine hapsolmuşlardır. Şekil 3.6-c' de doğal kazanımla üretilmiş bir MgO tanesi ve kristalleri görülmektedir. Şekil 3.6-d' de yüksek kalitedeki ergimiş magnezya tanesi görülmektedir. Ergimiş magnezya tanesinin kristalleri 800 μm ' un üzerindedir ve porozitesi oldukça az olduğundan dolayı yoğunluğu teorik değerlere yakındır[21].

3.2.2.2. MgO Tanesinin Kimyasal Özellikleri ve Aşınma

MgO tanesinin aşınmasında tanenin kimyasal bileşiminin çok büyük önemi vardır. MgO tanesi içindeki ikincil fazların dağılımı ve bunların kimyasal dengesi, tanenin aşınma mekanizmasında önemli rol oynamaktadır[5].

MgO tanesi için ikincil fazlar , CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃, B₂O₃ gibi oksit bileşenleridir. Bu fazlar periklaz kristallerinin tane sınırlarında, ya da katı çözelti halinde periklaz kristalleri içinde yer alırlar. Bu oksitler miktarlarına ve oranlarına göre, MgO tanesi içinde veya tane sınırlarında erken ergiyen fazlar meydana getirebilir ve refrakterin aşınmaya karşı direncini azaltabilirler. Tablo 3.2' de CaO/SiO₂ oranına göre MgO bünyesinde oluşabilecek ikincil fazlar ve ergime sıcaklıkları verilmiştir[5].

Tablo 3.2. MgO bünyesinde oluşabilecek ikincil fazlar ve ergime sıcaklıkları[22]

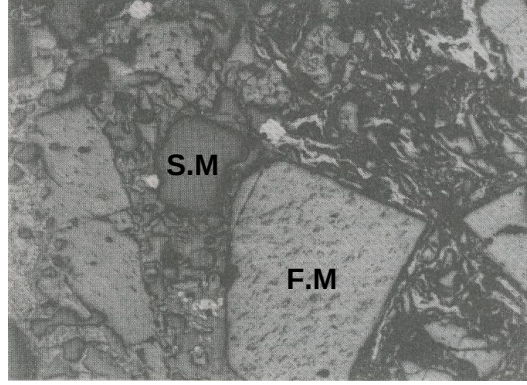
CaO/SiO ₂	Faz	Formül	Gösterim	T _E (°C)
< 0,93	Forsterit	2MgO.SiO ₂	M ₂ S	1900
0,93	Montisellit	CaO.MgO.SiO ₂	CMS	1490
0,93-1,40	Montisellit	CaO.MgO.SiO ₂	CMS	1490
1,40	Mervinit	3CaO.MgO.2SiO ₂	C ₃ MS ₂	1575
1,40-1,86	Mervinit	3CaO.MgO.2SiO ₂	C ₃ MS ₂	1575
1,86	Dikalsiyum silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	2130
1,86-2,80	Dikalsiyum silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	2130
2,80	Trikalsiyum silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	1900
>2,80	Trikalsiyum silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	1900
	Kireç	CaO	C	2565

MgO tanesi içinde veya kristal tane sınırlarında hangi fazın oluşacağını CaO/SiO₂ oranı belirlemektedir.

Tablo 3.2' de görüldüğü üzere CaO/SiO₂ oranının 1,86 ile 2,80 arasında değiştiği durumlarda MgO tane sınırlarında oluşacak kalsiyumsilikat faz yapısı yüksek sıcaklıkta ergiyecektir ve taneler aşınmaya karşı daha dirençli olacaktır[5].

B₂O₃ bazik refrakterler için çok kritik ve istenmeyen bir empüritedir. Eğer MgO tanesi içinde % 0.02 oranından fazla B₂O₃ bulunursa, B₂O₃ tane sınırlarındaki kalsiyum silikat bağının ergime sıcaklığını 1200°C gibi çok düşük seviyelere çeker. Bunun sonucunda MgO tanesi çok rahat çözünecek ve refrakter kolaylıkla aşınacaktır[5].

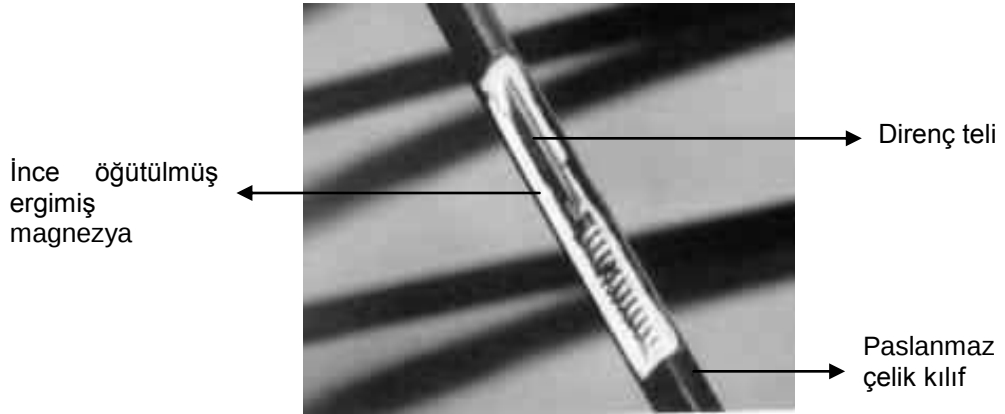
Ergimiş magnezya taneleri sinter magnezya tanelerine göre çok düşük oranda ikincil fazlar içermektedir. Bu özelliğinin yanı sıra kristal boyutu ve yoğunluğunun sinter magnezyaya göre yüksek olması ergimiş magnezya tanelerinin cürufun meydana getirdiği aşınmaya karşı daha dirençli olmasını sağlamaktadır. Şekil 3.7' de cürufun penetre ettiği bir magnezya-karbon tuğladaki sinter magnezya tanesi ve ergimiş magnezya tanesi görülmektedir. Sinter magnezya tanesi cüruf tarafından çözünmüştür. Fakat ergimiş magnezya tanesi yapısını korumaktadır[20].



Şekil 3.7. Cüruf penetrasyonu sonucu sinter MgO ve ergimiş magnezya tanelerinin davranışı (S.M : Sinter magnezya E.M : Ergimiş magnezya) [20]

3.3. Isıtıcı Elemanlarda Kullanılan Ergimiş Magnezya

Ergimiş magnezya oda sıcaklığındaki elektriksel direncinin çok yüksek olması nedeniyle ısıtıcı elemanlarda yalıtkan dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.8' de ısıtıcı bir eleman ve ergimiş magnezyanın kullanımı görülmektedir[4].



Şekil 3.8. Isıtıcı bir elemanın iç görüntüsü[4]

İnce öğütülmüş ergimiş magnezya, direnç teli ile paslanmaz çelik kılıf arasında yer almaktadır. Elektriksel kalitedeki ergimiş magnezyadan beklenen özellikler aşağıdaki gibidir[4].

- Düşük bor,kükürt ve demir içeriği
- $\text{CaO} / \text{SiO}_2 = 1 / 2$ (Refrakter kalitedekinin tam tersidir bunun sebebi SiO_2 ' in elektriksel özellikleri geliştirmesidir.)
- % 70 ile % 97 arasında değişen MgO oranları içerirler. İçerdikleri MgO oranlarına göre kullanım yerleri değişir;
 - a. Yüksek sıcaklık uygulamalarında ($> 950^\circ \text{C}$) ; % 94-97 MgO
 - b. Orta seviyedeki sıcaklık uygulamalarında ($> 800^\circ \text{C}$) ; % 93-96 MgO
 - c. Düşük sıcaklık uygulamalarında ($< 600^\circ \text{C}$) ; % 70-93 MgO

Bunların dışında ergimiş magnezyanın çok yüksek saflıktaki kaliteleri ($> \%99 \text{ MgO}$) optik donanımlar, nükleer reaktörler ve roket enjektörleri gibi ileri teknoloji uygulamalarında kullanılmaktadır[7].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Hammaddeler

Doğru akım elektrik ark fırınında ergimiş magnezya üretmek için yapılan deneylerde Kütahya yöresi kriptokristalin (amorf) yapılı manyezit cevherinden üretilen iki değişik sinter magnezya hammaddesi kullanılmıştır. Hammaddelerden biri yüksek kalitede iken diğeri düşük kalitededir.

4.1.1. Hammaddelerin Kimyasal Analizleri

Tablo 4.1' de kullanılan sinter magnezya hammaddelerinin kimyasal analizleri verilmiştir. Hammadde 1 yüksek kalitede %96.93 MgO içeren, hammadde 2 ise düşük kalitede %92,73 içeren sinter magnezyayı tanımlamaktadır.

Tablo 4.1. Sinter magnezya hammaddelerinin kimyasal analizleri (Ağ, %)

Sinter MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO
Hammadde 1	0,86	1,81	0,30	0,10	96,93
Hammadde 2	4,04	2,12	1,01	0.10	92,73

4.1.2. Hammaddelerin Fiziksel Özellikleri

Kullanılan sinter magnezya hammaddelerinin fiziksel özellikleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

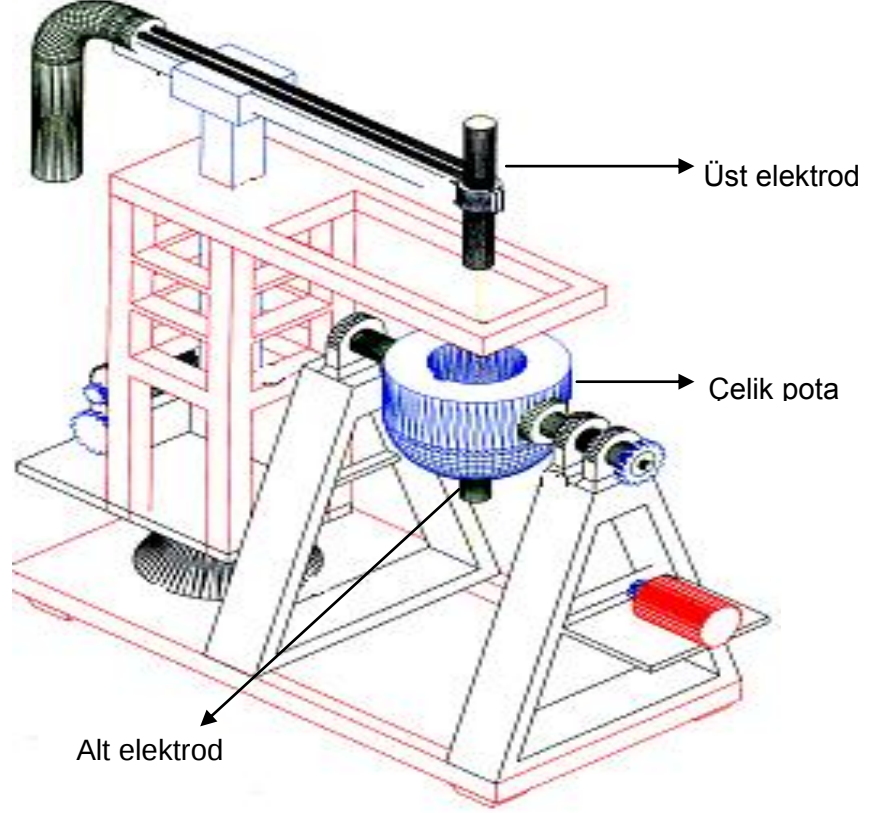
Tablo 4.2. Sinter magnezya hammaddelerinin fiziksel özellikleri

Sinter MgO	Bulk yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama periklaz kristal boyutu (µm)	Tane boyutu aralığı (mm)
Hammadde 1	3,40	100	5-15
Hammadde 2	3.37	40	10-20

4.2. Cihaz ve Aletler

Ergimiş magnezya üretim amaçlı sinter magnezyanın ergitilmesi deneyleri 270 kVA'lık laboratuvar tipi tek fazlı elektrik ark fırınında gerçekleştirilmiştir. Elektrodlar su soğutmalı olup, üst elektrod (anod) yukarı aşağı doğru hareketli, alt elektrod

(katod) sabittir. Üst elektrodun hareketi otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Şekil 4.1’ de ergitme deneyleri için kullanılan elektrik ark fırınının şematik çizimi görülmektedir.



Şekil 4.1. Ergimiş magnezya üretimi için kullanılan elektrik ark fırınının şematik gösterimi

Üretilen ergimiş magnezyanın karakterizasyonunda Zeiss marka optik mikroskop, Noran marka EDS ünitesi destekli Jeol 5410 taramalı elektron mikroskobu, Philips marka X ışını difraksiyon cihazı ve yaş analiz methodları kullanılmıştır.

4.3. Deneylerin Yapılışı

Sinter magnezyanın ergitilme işlemine başlamadan önce, elektrik ark fırınının potası içerisine, ergitilecek malzemeyle aynı bileşime sahip magnezya harçtan silindirik hazneler yapılmıştır. Hammadde 1’ in ergitildiği haznenin çapı 13 cm, derinliği 24 cm’dir. Hammadde 2’ nin ergitildiği haznenin çapı 20 cm, derinliği ise 17 cm’dir. Bu haznelerin yapılmasındaki amaç ısıyı belli bir bölgede toplamak ve pota duvarından geçebilecek istenmeyen bileşimlere karşı ergitlecek malzemeyi korumaktır. Hammadde 1 ve hammadde 2 için ergitme işleminin gerçekleştirildiği hazneler Şekil 4.2’ de verilmiştir.



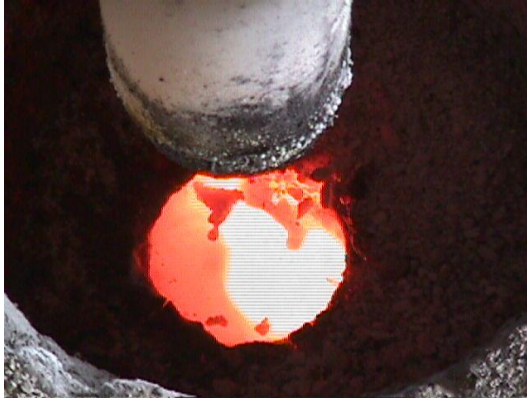
(a)



(b)

Şekil 4.2. Magnezya harçtan yapılmış ergitme işleminin gerçekleştirdiği hazneler (a) Hammadde 1 için hazırlanan hazne, (b) Hammadde 2 için hazırlanan hazne

Ark başlatılmadan önce üst elektrod indirilmiş ve alt elektroda temas eder hale getirilerek, elektrod pozisyonu sıfırlanmıştır. Daha sonra elektrik arkının uygulanmasıyla birlikte hammadde şarj edilmiştir. Şarj edilen hammaddenin ergimesi sonrasında, elektrod bir kademe daha yukarıya hareket ettirilerek tekrar hammadde şarj edilmiştir. Fırın haznesi tamamen dolana kadar bu işleme devam edilmiştir. Ergitme sırasında şarj edilen malzemeyle birlikte sinter magnezya harcın bir kısmı da ergimektedir. Fakat hammadde ve harç aynı bileşimde olduğu için bu olay sorun yaratmamaktadır. Ergitmenin tamamlanmasından sonra fırın soğumaya bırakılmıştır. Şekil 4.3' de ergitme işlemi sonrası fırın içinin görüntüsü verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.3. Ergitme işlemi sonrası fırın içindeki malzemenin görüntüsü (a) Hammadde 1 için, (b) Hammadde 2 için

4.3.1. Hammadde 1 için Ergitme Deneyleri

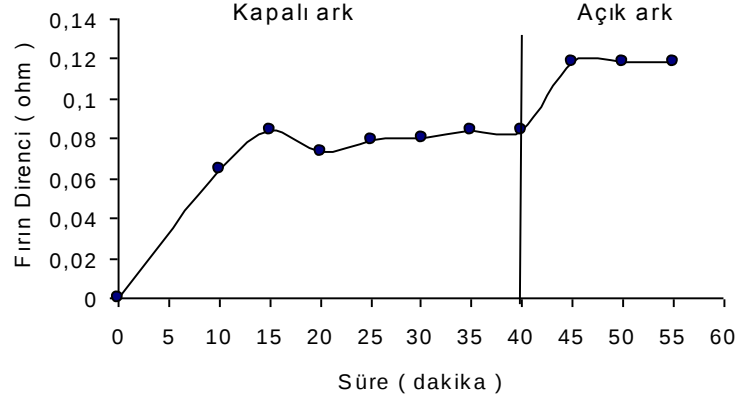
Hammadde 1'in ergitilmesi sırasında uygulanan akım, voltaj, güç ve elektrot yüksekliği gibi fırın parametreleri Tablo 4.3' te verilmiştir.

Tablo 4.3. Hammade 1' in ergitilmesi sırasındaki fırın parametreleri

t (dakika)	Güç (kwh)	V (volt)	I (amper)	Elektrot yüksekliği (mm)	R (ohm)
0	0	0	0	0	0
10	15,25	65	1000	83,05	0,065
15	25,75	80	950	90,90	0,084
20	29,75	70	950	92,92	0,073
25	37,25	75	950	105,68	0,078
30	44,75	80	1000	145,54	0,080
35	49,75	80	950	173,16	0,084
40	57,25	80	950	208,44	0,084
45	64,5	95	800	243,42	0,118
50	68,25	95	800	246,42	0,118
55	72,75	95	800	246,42	0,118

Deney sırasında 10kg malzeme şarj edilmiştir. Ergitme deneyi 55 dakika sürmüştür 55 dakika sonunda toplam harcanan güç 72,75 kWh olarak tespit edilmiştir. Ergitme sırasında voltaj ve akım gibi değerler her 5 dakikada bir fırının panosundan okunarak kaydedilmiştir. Daha sonra bu değerlerden yararlanılarak her 5 dakika için fırın direnci formül 4.1 yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Tablo 4.3' te görülmektedir. Daha sonra fırın direncinin zamana bağlı değişim grafiği çizilmiştir. Şekil 4.4' de bu grafik verilmiştir.

$$\frac{V}{I} = R \quad (4.1.)$$



Şekil 4.4. Hammadde 1 için fırın direncinin ergitme süresine göre değişimi

Şekil 4.4' te görüldüğü gibi ilk 15 dakika içinde, şarj edilen malzemenin elektrik iletkenliğinin çok düşük olması nedeni ile, fırın direnci artmıştır. Elektrığe karşı gösterdiği direnç malzemenin ergimesini sağlamaktadır. Malzemenin ergimesiyle birlikte elektrik iletkenliğinin artması sonucunda ergitmenin 15. dakikasından sonra 20. dakikaya kadar fırının direnci düşmüştür. Ergitmenin bundan sonraki aşamalarında ergimiş havuzcuğun oluşmasıyla birlikte elektrod biraz daha yukarı kaldırılarak yeni malzeme şarj edilmiştir. Yeni malzemenin şarj edilmesiyle birlikte fırın direnci yine yükselmiştir. Ergitmenin 25. dakikasına gelindiğinde 10kg' lık hammaddeden geri kalan kısımda fırına şarj edilerek, şarj işlemi tamamlanmıştır. Bu dakikadan sonra fırın direnci 40. dakikaya kadar az miktarda yükselmiştir. Bunun sebebi malzemenin içinde bulunan üst elektrodun, yavaş yavaş yukarı çekilmesidir. Üst elektrodla alt elektrod arasındaki mesafe arttıkça ark uzunluğu artmakta dolayısıyla fırın direncide az miktarda artmaktadır. Ergitmenin 40. dakikasına kadar elektrodlar arasında oluşan arkın üstü şarj edilen malzemeye devamlı örtülerek kapalı ark uygulaması yapılmıştır. Bu işlemde üst elektrod devamlı malzemeye temas halindedir. Ergitmenin 40. dakikasından sonra elektrod ergimiş malzemenin dışına çıkarılmış ve açık ark uygulamasına geçilmiştir. Elektrodlar arası mesafenin artması ve ayrıca açık ark uygulamasında havanın direncinin de ön plana çıkması fırın voltaj değerlerini arttırmış dolayısıyla fırının direncide artmıştır. 55. dakika sonunda ark kesilmiş ve fırın soğumaya bırakılmıştır.

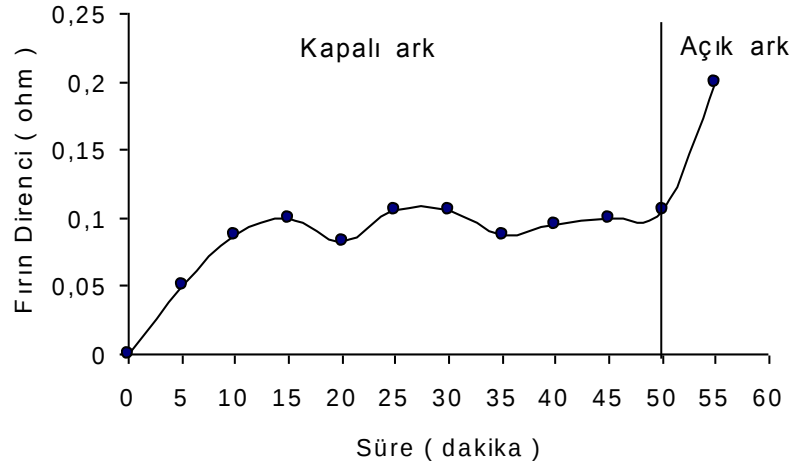
4.3.2. Hammadde 2 İçin Ergitme Deneyleri

Hammadde 2' nin ergitilmesi sırasında uygulanan akım, voltaj, güç ve elektrot yüksekliği gibi fırın parametreleri Tablo 4.4' te verilmiştir.

Tablo 4.4. Hammede 2'nin ergitilmesi sırasındaki fırın parametreleri

t (dakika)	Güç (kwh)	V (volt)	I (amper)	Elektrot yüksekliği (mm)	R (ohm)
0	0	0	0	0	0
5	3	30	600	5,22	0,050
10	5,5	70	800	10,14	0,080
15	12	80	800	20,86	0,100
20	18	75	900	30,36	0,083
25	23	85	800	49,44	0,106
30	27	85	800	49,45	0,106
35	43	70	800	55,78	0,087
40	48	85	900	79,34	0,094
45	58	90	900	103,78	0,100
50	67	95	900	111,82	0,105
55	72,5	120	600	170,28	0,200

Deney süresince 15 kg malzeme şarj edilmiştir. Ergitme süresi 55 dakikadır. Ergitme işlemi sonucunda toplam 72,5 kWh güç harcanmıştır. Panodan okunan voltaj ve akım değerleri sayesinde her 5 dakika için fırın direnci tespit edilmiştir. Fırın direncinin süreyle değişim grafiği Şekil 4.5' te verilmiştir.



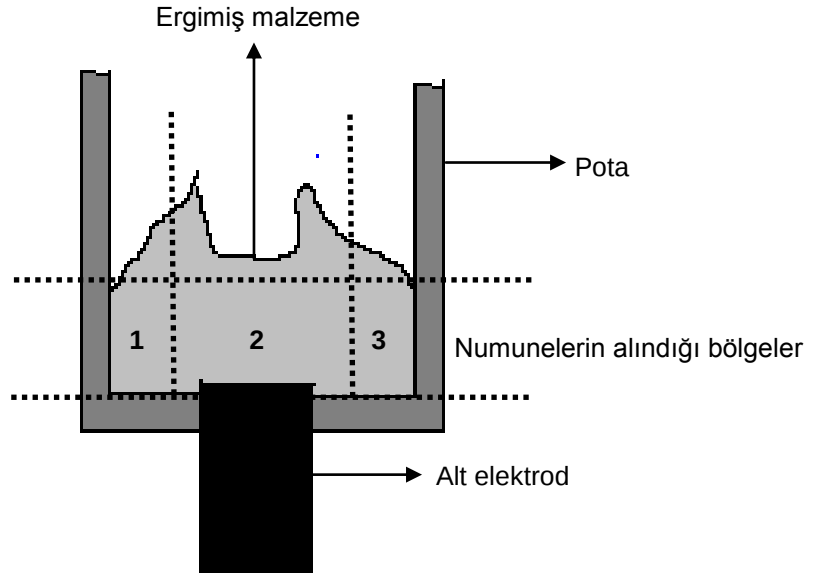
Şekil 4.5. Hammadde 2 için fırın direncinin ergitme süresine göre değişimi

Hammadde 2' nin ergitme sürecinde de hammadde 1' deki benzer bir durum söz konusudur. Ergitme işleminin ilk 15 dakikasında şarj edilen malzemenin elektrik iletkenliğinin düşük olmasından dolayı fırın direnci artmıştır. Ergitmenin 15. dakikasından 20. dakikasına kadar olan süreçte fırın direncinde, malzemenin ergimesinden kaynaklanan bir düşüş vardır. Ergitmenin 20. dakikasından sonra yapılan yeni şarj sonucu 30. dakikaya kadar fırın direnci tekrar artmıştır. Ergitmenin 30 ve 35. dakikaları arası yeni şarj edilen malzemenin ergimesiyle fırın direncinde tekrar düşüş gözlemlenmiştir. 35. dakikadan sonra 15 kg'lık malzemeden geri kalan kısımda fırına şarj edilerek şarj işlemi tamamlanmıştır. Ergitmenin 50. dakikasına kadar kapalı ark uygulaması yapılmıştır. Bu dakikadan sonra üst elektrod, ergimiş malzemenin içinden çıkarılarak açık ark uygulaması sonucu ergitme işlemi tamamlanmıştır.

Ayrı iki hammadde için yapılan ergitme işlemleri sonrasında fırın içinde bulunan ergimiş malzeme soğumaya bırakılmıştır. Bir günlük bir soğuma sürecinden sonra fırın haznesinin belirli bölgelerinden alınan numunelerin karakterizasyonuna geçilmiştir. Fırından alınan numunelerin karakterizasyonunda optik mikroskop, EDS destekli taramalı elektron mikroskobu, x ışını difraksiyonu ve yaş analiz gibi yöntemler kullanılmıştır.

4.4. Hammadde 1 İçin Ergitme Deneyi Sonuçları

Şekil 4.6' da elektrik ark fırını potası içinde bulunan ergimiş malzemenin şematik bir gösterimi ve soğuma sonrası numunelerin alındığı bölgeler görülmektedir.



Şekil 4.6. Soğuma sonrası potanın şematik gösterimi ve numunelerin alındığı bölgeler

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’ de fırından alınan numunelerin resimleri verilmiştir. Alınan numunelere bakıldığında kolonlar şeklinde uzamış MgO kristallerinin bulunduğu bölgeler rahatlıkla tespit edilebilmektedir.



Şekil 4.7. Fırının bir numaralı ve üç numaralı bölgesinden alınan numuneler

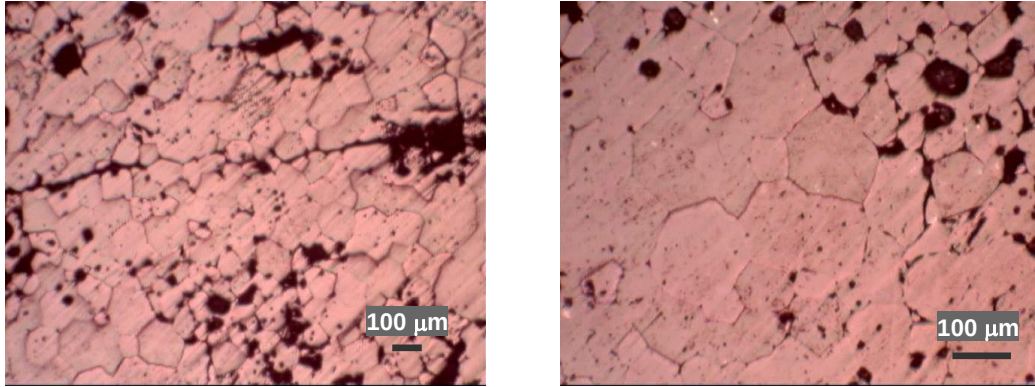


Şekil 4.8. Fırının iki numaralı bölgesinden alınmış numuneler

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’ de verilmiş resimlere bakıldığında, fırının bir ve üç numaralı bölgelerinden alınmış numunelerin, fırının iki numaralı bölgesinden alınmış numunelere göre daha dar kristal bölgeleri içerdiği görülmektedir. Bunun nedeni bir ve üç numaralı bölgeler fırın duvarına daha yakın olduğundan, bu bölgelerdeki soğuma, iki numaralı bölgeye göre daha hızlı gerçekleşmektedir. İki numaralı bölgeden alınan numuneler ise oldukça geniş kristal bölgeleri içermektedir. İki numaralı bölgedeki soğuma hızı diğer bölgelere göre oldukça yavaştır. Bunun sebebi, Şekil 4.6’ da görüldüğü gibi iki numaralı bölgenin alt elektroda yakın olmasıdır. Ayrıca bu bölge ısı kayıplarının meydana geldiği fırın duvarlarına uzaktır. Yavaş soğuma sonucu MgO kristalleri ısı akışına ters yönde ve fırının en soğuk bölgesinden en sıcak bölgesine doğru kolonsal olarak büyümektedir.

4.4.1. Optik mikroskopta yapılan incelemeler

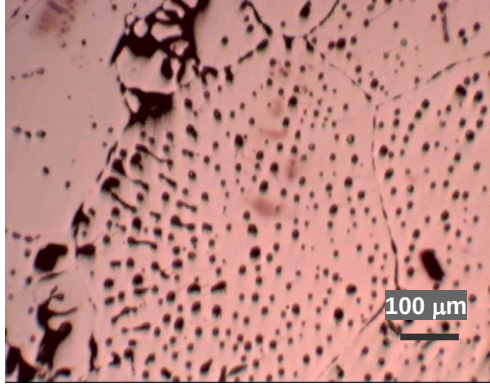
Ergimiş magnezya üretiminde kullanılan sinter magnezyanın ve sinter magnezyanın ergitilmesinden sonra elde edilen ürünlerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’ de verilmiştir.



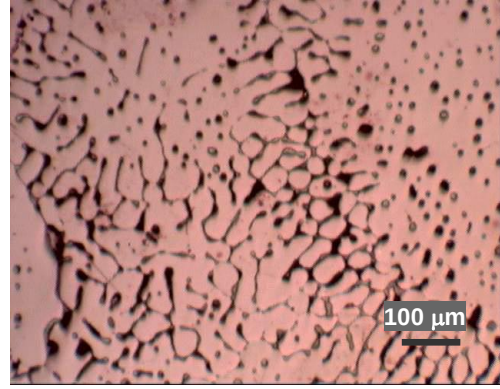
Şekil 4.9. Ergimiş magnezya üretiminde kullanılan sinter magnezyanın optik görüntüleri

Şekil 4.9’ da sinter magnezyanın morfolojisi görülmektedir. Sinter magnezyanın ölçülen ortalama periklaz (MgO) kristal boyutu 100µm’ dur. Ölçüm, değişik bölgelerden alınan kristal boyutu değerlerinin ortalaması alınarak yapılmıştır. İkincil faz empürileri ve porlar periklaz kristal tane sınırlarında ve periklaz tanelerinin içinde yer almaktadırlar.

Sinter magnezya ergitildikten sonra elde edilen ergimiş magnezyanın optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’ de yer almaktadır. Şekil 4.10’ daki optik mikroskop görüntüleri hızlı katılaşmış bölgelerden, Şekil 4.11’ de yer alan görüntüler ise daha yavaş katılaşmış bölgelerden alınmıştır.



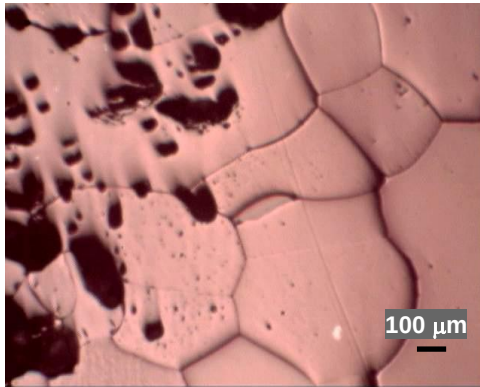
(a)



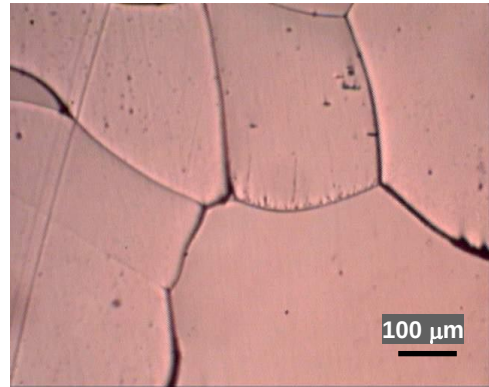
(b)

Şekil 4.10. Ergimiş magnezyanın hızlı katılaşmış bölgelerinden alınmış optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.10' da ergimiş magnezyanın, hızlı katılaşmış bölgelerinden alınan numunelerin optik görüntülerine bakıldığında Şekil 4.10-b' de ikincil faz empüritelerinin tane sınırlarına göç ettiği açıkça görülebilmektedir. Tane sınırları henüz tam oluşmamıştır. İkincil fazların tane sınırlarına göçü tamamlanamadan malzeme katılaşmıştır. Periklaz kristallerinin içlerinde siyah noktalar halinde bulunan porlar da Şekil 4.10-a' da açıkça görülebilmektedir.



(a)



(b)

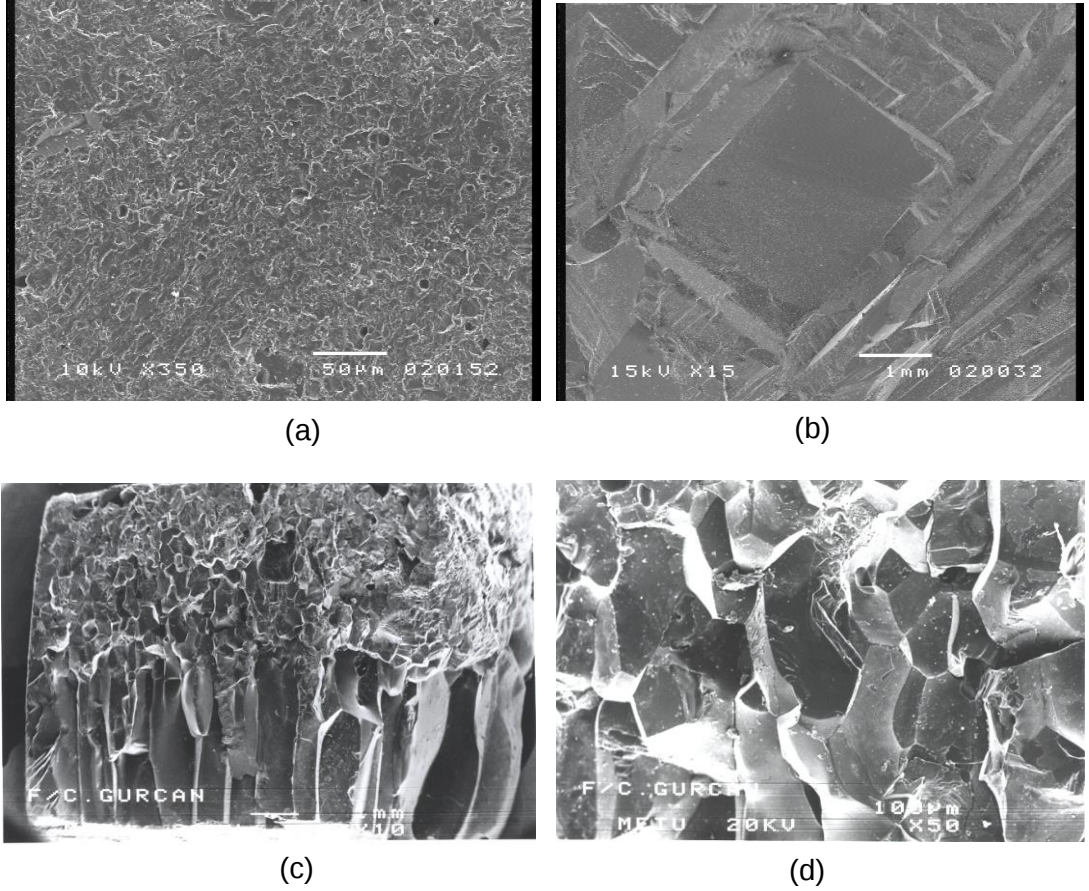
Şekil 4.11. Ergimiş magnezyanın yavaş katılaşmış bölgelerinden alınmış optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.11' de ergimiş magnezyanın yavaş katılaşmış bölgelerinden alınan numunelerin morfolojisine bakıldığında çok büyük periklaz (MgO) kristalleri içerdikleri görülmektedir. Hesaplanan ortalama periklaz kristal boyutu $800\mu m$ civarındadır. Şekil 4.11-a' daki resimde sol tarafta yer alan siyah lekeler porlardır. Kristallerin büyümesi kristal tane sınırlarının hareketi ile meydana gelmektedir. Bu nedenle tane sınırlarında bulunan porlar da tane sınırının hareketi ile birlikte ötelenmektedirler. Şekil 4.11-b' de yavaş soğuma sonucu porlardan ve ikincil faz empüritelerinden büyük oranda arınmış oldukça saf magnezya yapısının morfolojisi

görülmektedir. Bu yapıda ikincil fazlar çok ince bir film şeklinde periklaz kristallerinin tane sınırlarında yer almaktadır. Kristal boyutunun büyümesiyle birlikte kristal tane sınırlarının yüzey alanıda azalmaktadır. Bu olay sistemin enerjisini azaltmakta ve yapı daha kararlı hale gelmektedir.

4.4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu ile Yapılan İncelemeler

Elektrik ark fırınında ergitilen sinter magnezyanın ve üretilen ergimiş magnezyanın taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.12' de verilmiştir.



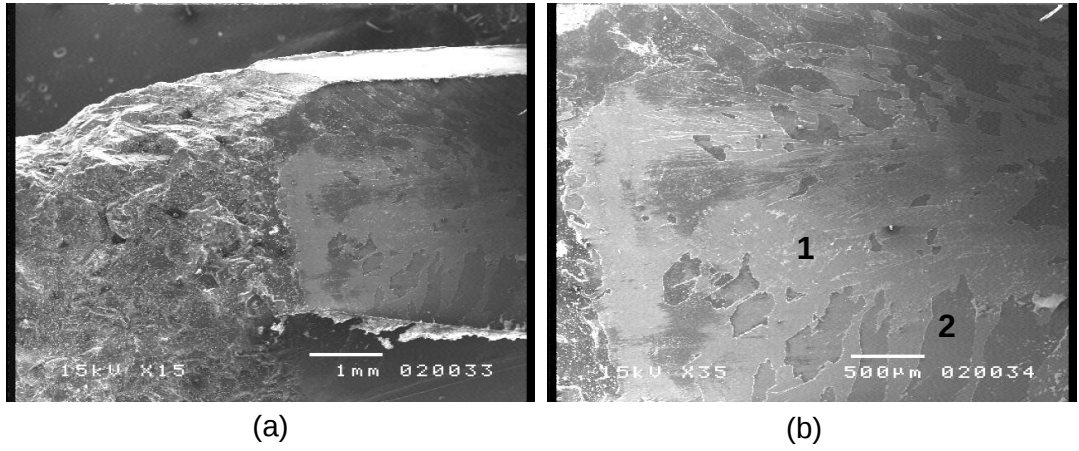
Şekil 4.12. Elektrik ark fırınında ergitilen sinter magnezyanın ve üretilen ergimiş magnezyanın taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (a) Sinter magnezya, (b) Anormal tane büyümesi yapısı, (c) Kolonsal büyümüş tane yapısı, (d) Eş eksenli tane yapısı

Şekil 4.12-a' daki görüntü ergimiş magnezya üretiminde kullanılan yüksek kalitedeki sinter magnezyaya aittir. Sinter magnezyanın fırında ergitilmesi sonrasında üretilen ergimiş magnezyanın taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.12-b, Şekil 4.12-c ve Şekil 4.12-d' de verilmiştir.

Şekil 4.12-b' de yer alan görüntüde yaklaşık 4mm boyutundaki tanenin etrafında daha küçük boyuttaki kolonsal taneler yer almaktadır. Bu yapı ergimiş magnezyanın yavaş soğumasıyla meydana gelen anormal tane büyümesini

göstermektedir. Şekil 4.12-c' de numunenin üst kısmında eş-eksenli bir yapının meydana geldiği, daha sonra tanelerin kolonlar halinde uzadıkları görülmektedir. Kolon uzunlukları yaklaşık olarak 6 mm kadardır. Kolon morfolojisi tamamlandıktan sonra numunenin geri kalan kısmında yine eş-eksenli bir yapı yer almaktadır. Morfolojik değişimin sebebi soğuma hızındaki farklılıklardır. Daha hızlı soğuyan bölgelerde eş-eksenli yapı oluşmuş, daha yavaş soğuyan bölgelerde ise kolonsal yapı meydana gelmiştir. Şekil 4.12-d' de eş-eksenli olarak tanımladığımız bölgenin yapısı görülmektedir.

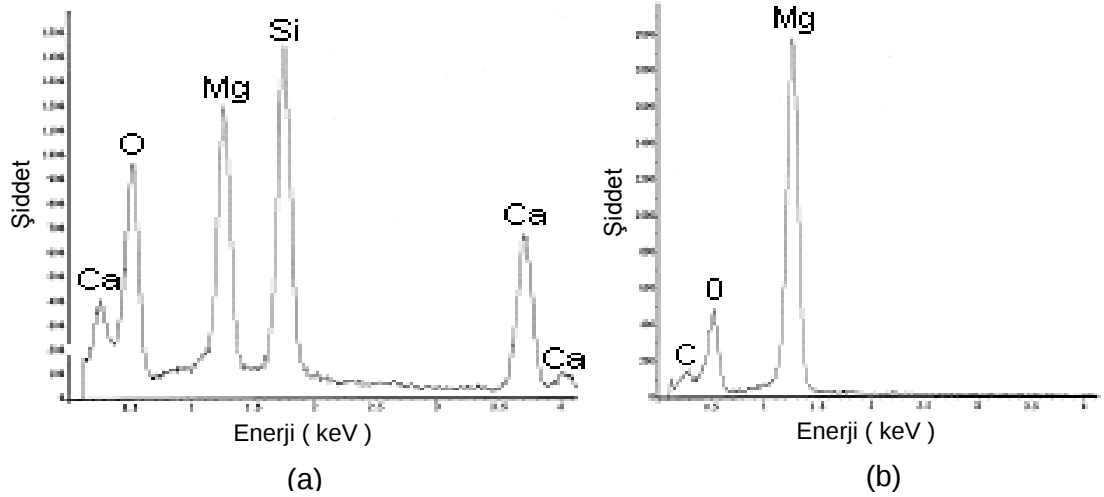
Şekil 4.13' de kolonsal uzamış tek bir MgO tanesi ve yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.13. Ergimiş magnezyanın yavaş soğuması sonucu oluşmuş kolonsal uzamış tek bir MgO tanesinin ve yüzeyinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (a) Kolonsal uzamış MgO tanesi (b) MgO tanesinin yüzeyi

Şekil 4.13-a' daki görüntüde eş eksenli taneler ve bu tanelerin bitiminden başlayan kolonsal şekilde büyümüş yaklaşık 5 mm boyutundaki tek bir MgO tanesi görülmektedir. Şekil 4.13-b' de ise bu tanenin yüzeyi görülmektedir.

Şekil 4.14' de ise Şekil 4.13-b' deki tane yüzeyinde 1 ve 2 şeklinde numaralandırılmış bölgelerin EDS analizleri verilmiştir.



Şekil 4.14. Kolonsal uzamış tek bir MgO tanesi yüzeyinden alınmış EDS analizleri (a) 1 rakamıyla gösterilen bölgenin analizi, (b) 2 rakamıyla gösterilen bölgenin analizi

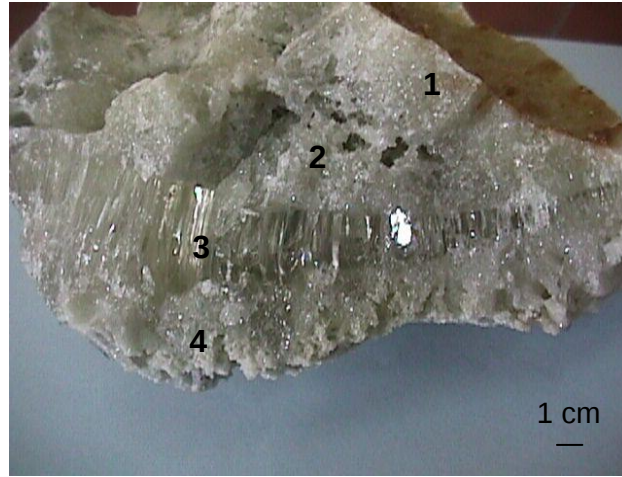
Şekil 4.14-a' da yer alan bir numaralı bölgenin EDS analizine bakıldığında bu bölgede Ca ve Si piklerinin şiddeti oldukça yüksek çıkmıştır. Bu bölgede MgO'nin yanında, yüksek miktarda CaO ve SiO₂ gibi ikincil faz empürileri bulunmaktadır. Şekil 4.14-b' de yer alan iki numaralı bölgenin EDS analizine bakıldığında ise bu bölgede Ca ve Si piklerine rastlanılmamaktadır. Bu bölgede ikincil faz empürilerinin bulunmadığı yapının sadece MgO' ten oluştuğu gözlenmektedir. CaO ve SiO₂ gibi ikincil fazlar tanenin yüzeyini ince bir film şeklinde sarmıştır.

Şekil 4.14-b' de görülen karbon pikinin kaynağı numunenin yüzeyindeki ince karbon kaplamadır. Numune yalıtkan olduğundan taramalı elektron mikroskobuna alınırken yüzeyi karbon kaplanmıştır.

Ergimiş magnezya fırın içinde yavaş soğurken MgO taneleri kolonsal şekilde büyümektedir. Ayrıca MgO taneleri içinde bulunan CaO ve SiO₂ gibi ikincil fazlarda yavaş soğuma sonucunda en geç katılacak yerler olan tane sınırlarına göç etmektedir ve bu bölgelerde birikmektedir. Şekil 4.13-b' de 1 rakamıyla gösterilen bölgede görüldüğü üzere, CaO ve SiO₂ gibi ikincil fazlar kolonsal uzamış MgO kristallerinin tane sınırlarında ince bir film şeklinde yer almaktadır.

4.4.3. Fiziksel ve kimyasal analizler

Şekil 4.15' de fırından çıkarılan bir numunenin resmi yer almaktadır. Numune rakamlarla gösterilen değişik bölgelere ayrılmıştır ve bu bölgelerin yaş analiz yöntemiyle kimyasal bileşimi, mazot absorpsiyon yöntemiyle de bulk yoğunluk değerleri saptanmıştır.



Şekil 4.15. Fırından çıkarılan numune ve analizlerin alındığı bölgeler

Tablo 4.5' de ergimiş magnezya numunesinin üzerinde belirtilen bölgelerin ve fırına şarj edilen sinter magnezyanın kimyasal ve fiziksel analizleri verilmiştir.

Tablo 4.5. Fırından çıkarılan ergimiş magnezya numunesinin bölgelere göre fiziksel ve kimyasal analizleri

Numune	Kimyasal analizler (Ağ, %)					Fiziksel analizler
Ergimiş magnezya	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Bulk yoğunluk (g/cm ³)
Bölge 1	0,28	1	0,24	0,05	98,39	3,44
Bölge 2	0,26	0,8	0,41	0,05	98,34	3,45
Bölge 3	0,22	0,41	0,22	0,02	99,02	3,47
Bölge 4	0,54	1,66	0,4	0,05	97,3	3,4
Sinter magnezya	0,86	1,81	0,30	0,10	96,93	3,4

Tablo 4.5' de fırından çıkarılan numunenin ve fırına şarj edilen sinter magnezyanın kimyasal bileşimlerine bakıldığında, yavaş soğuma nedeniyle kristallerin kolonsal şekilde uzadığı üçüncü bölgede; safiyetin % 99,02 MgO gibi çok yüksek bir değere ulaştığı, silis oranının % 0,22 gibi düşük seviyelere indiği, CaO içeriğinin % 0,41 değerine kadar düştüğü gözlenmiştir. Yavaş soğuma sonucu üçüncü bölgede bölgesel bir rafinasyon meydana gelmiştir. Bölgesel rafinasyon MgO'ten daha geç katılan ikincil faz empüritlerinin yavaş soğuma sonucu bünyeden uzaklaşmasıyla meydana gelmektedir.

Ayrıca eş eksenli tanelerin bulunduğu 1,2 ve 4 rakamlarıyla gösterilen bölgeler de şarj edilen sinter magnezyadan daha az empürite içermektedirler.

Bulk yoğunluğu değerlerine bakıldığında fırına şarj edilen sinter magnezyanın 3.4g/cm^3 olan bulk yoğunluğu değerinin üçüncü bölgede 3.47g/cm^3 değerine ulaştığı görülmektedir.

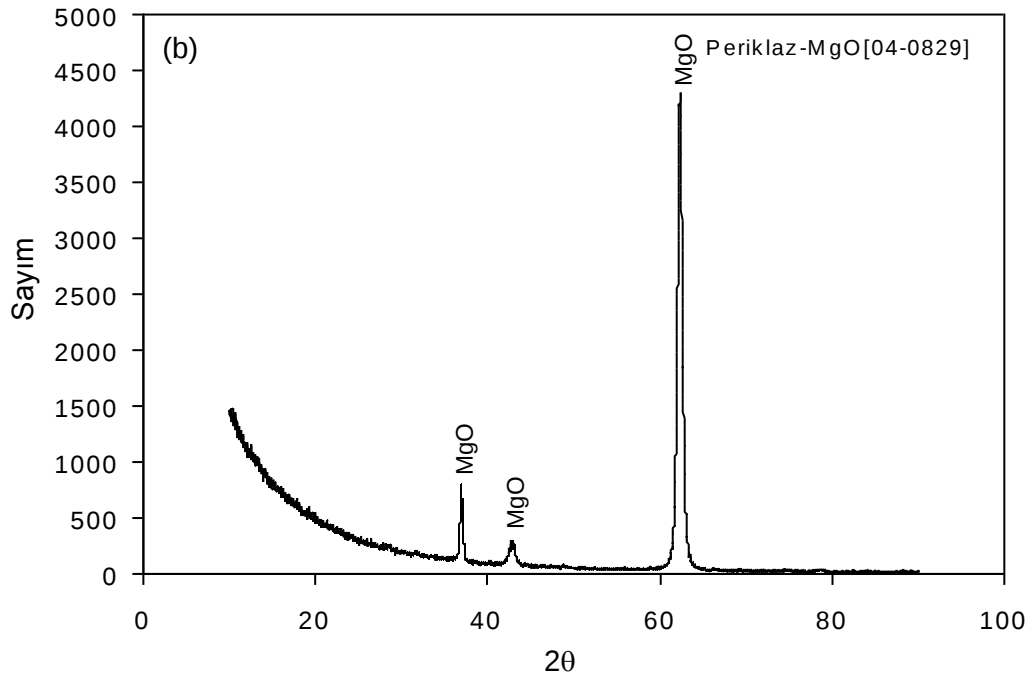
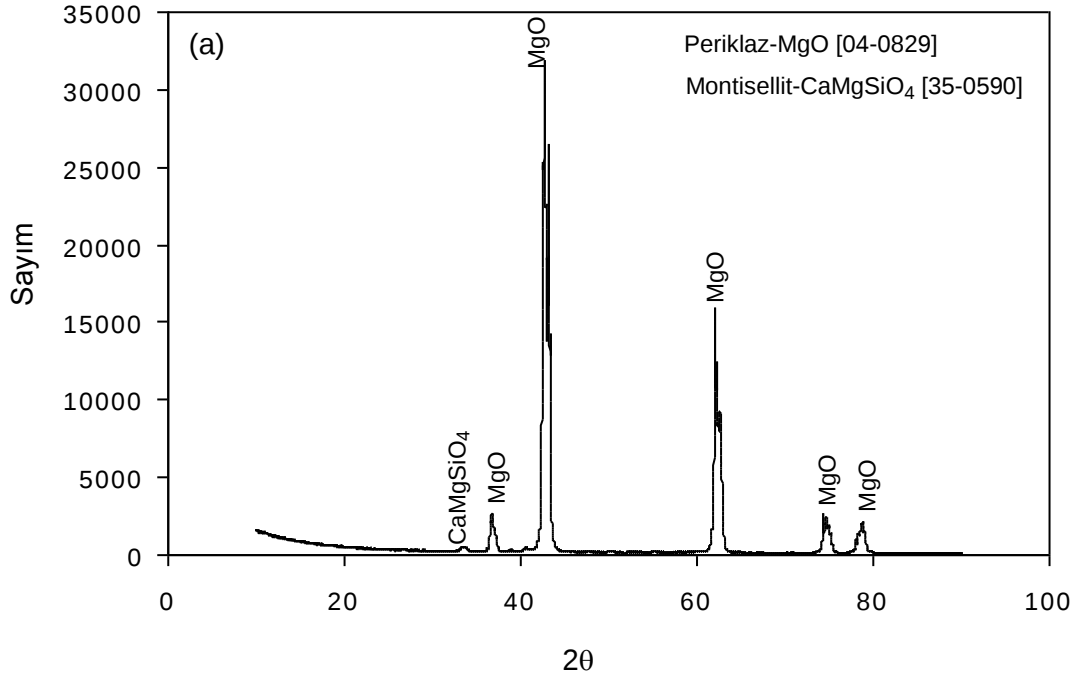
4.4.4. X Işını Difraksiyonu Analizleri

Şerj edilen sinter magnezya ve üretilen ergimiş magnezyanın içinde bulunan fazların belirlenmesi için yapılan X ışını difraksiyon analizleri Şekil 4.16' da verilmiştir.

MgO bünyesindeki ikincil fazların büyük önemi vardır. İkincil fazların miktarına ve oranına göre MgO' in fiziksel ve kimyasal özellikleri değişmektedir. İkincil fazlar açısından daha saf bir MgO bünyesi, fiziksel ve kimyasal olarak daha kararlıdır.

X ışınları analizi için fırına şarj edilen sinter magnezyadan ve fırından çıkarılan ergimiş magnezya numunelerinin kolonsal şekilde uzamış kristal bölgelerinden numuneler hazırlanmıştır. Şekil 4.16-a' da şarj edilen sinter magnezyanın, Şekil 4.16-b' de ise üretilen ergimiş magnezyada kolonsal kristallerin bulunduğu bölgenin X ışını analizi verilmiştir.

Şekil 4.16-a' da yer alan X ışını analizleri sonuçlarına bakıldığında hammadde olarak kullanılan sinter magnezyanın bünyesinde ikincil faz olarak montisellit (CaMgSiO_4) bulunmaktadır. Şekil 4.16-b' de yer alan ergimiş magnezya numunelerde kolonsal kristallerin bulunduğu bölgenin X ışını analizleri sonucuna bakıldığında herhangi bir ikincil faz piki bulunmadığı yapının saf MgO olduğu görülmektedir. Yavaş soğumayla birlikte meydana gelen bölgesel rafinasyon sonucunda, kolonsal kristallerin bulunduğu bölge, ikincil fazlar açısından oldukça saf hale gelmiştir.



Şekil 4.16. Fırına şarj edilen sinter magnezya ve fırından çıkarılan ergimiş magnezya numunelerinin X ışınları analizi (a) Sinter magnezya (b) Ergimiş magnezya numunelerinde kolonsal kristallerin bulunduğu bölge

4.5. Hammadde 2 İçin Ergitme Deneyi Sonuçları

Hammadde 2, düşük kalitede sinter magnezyadır. Hammadde 2 elektrik ark fırınında ergitildikten sonra fırında soğumaya bırakılmıştır. Bir günlük bir soğumadan sonra fırından çıkarılan yapı ingot halindedir. Şekil 4.17' de çıkarılan ingotun görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.17. Düşük kalitede sinter magnezyanın ergitilmesi ile elde edilen ingot yapısı (a) İngot, (b) İngotun alt bölgesi

Ergitme sırasında fırına 15kg şarj yapılmıştır. Çıkarılan ingotun ağırlığı 12kg, çapı 18cm, uzunluğu 15cm'dir. 3kg'lık kayıp işlem sırasında ergimiş malzemenin fırın dışına sıçramasından ve ingotun fırından çıkarılırken üzerindeki parçaların dökülmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.17-b' de 1 rakamıyla işaretlenmiş bölge elektrik ark fırınında ergitme sırasında elektrodun şarj ile temas ettiği bölgedir. Bu bölge çevresini saran bölgeden farklı bir yapıya sahiptir.



Şekil 4.18. Fırından ıkarılan ingotun ikiye ayrılmasıyla elde edilen parçalar

Şekil 4.18' de görüldüğü gibi, ingotun iç yapısının anlaşılabilmesi için, ingot ortasından kırılarak ikiye ayrılmıştır.

Şekil 4.19' da ingotun ortadan ikiye ayrılmasıyla elde edilen parçalardan birinin resmi verilmiştir. Parçaya bakıldığında değişik renkteki bölgeler ve bu bölgeleri birbirinden ayıran keskin sınırlar görülmektedir.



Şekil 4.19. Fırından çıkarılan ingotun ikiye bölünmesiyle elde edilen parça

Şekil 4.19' da görülen parça üzerinde yapılacak tüm analizler ve incelemeler için parçanın üzerinde rakamlarla işaretlenmiş bölgelerden numuneler alınmıştır. Numunelerin karakterizasyonunda optik mikroskop, EDS destekli taramalı elektron mikroskobu, yaş analiz ve X ışını difraktometrisi teknikleri kullanılmıştır.

4.5.1. Optik Mikroskopta Yapılan İncelemeler

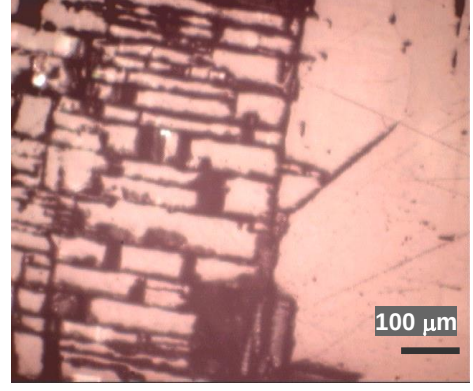
Şekil 4.19' da rakamlarla işaretlenmiş bölgelerin optik karakterizasyonu sonucunda elde edilen optik fotoğraflar Şekil 4.20' de verilmiştir. Tüm bölgeler için ortalama periklaz kristal boyutları ölçülmüştür.

Şekil 4.20-a' daki birinci bölgenin optik mikroskop resmine baktığımızda oldukça büyük MgO taneleri olduğu görülmektedir. Bu bölgenin ortalama periklaz kristal boyutu yaklaşık 700 μm değerindedir. MgO taneleri içinde ve tane sınırlarında çok az miktarda empürite ve porozite bulunmaktadır.

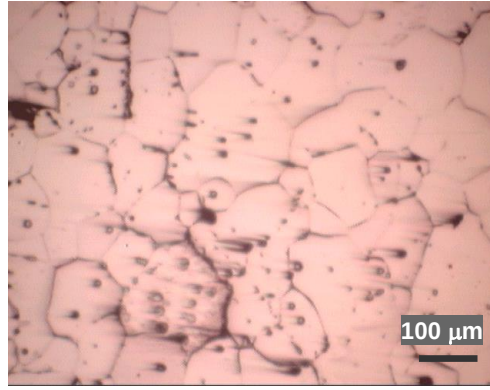
Şekil 4.20-b' deki ikinci bölgenin optik mikroskop fotoğrafında anormal büyümüş tane yapısı görülmektedir. Kristaller kolonsal şekilde uzamışlardır. Porlar kolonsal uzayan kristallerin tane sınırlarında yer almaktadır. Bu bölgedeki ortalama periklaz kristal boyutu yaklaşık 400 μm değerindedir.



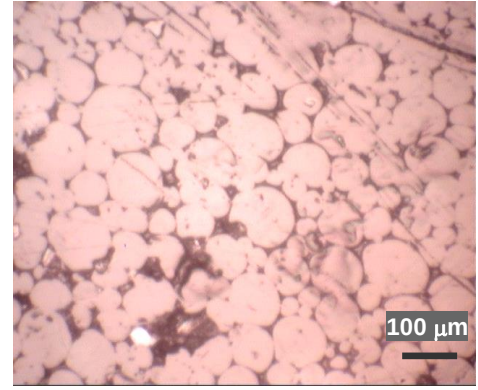
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.20. Fırından çıkarılan ingotun üzerinde rakamlarla işaretlenmiş bölgelerden alınan numunelerin optik mikroskop fotoğrafları (a) 1. bölge, (b) 2. bölge, (c) 3. bölge, (d) 4.bölge

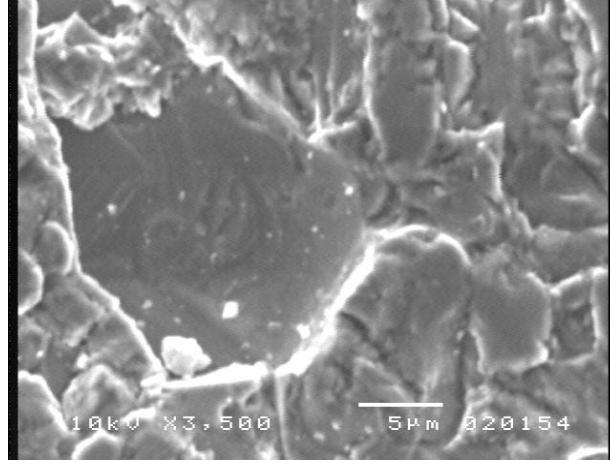
Şekil 4.20-c' de optik fotoğrafı görülen üçüncü bölgenin ortalama periklaz kristal boyutu ikinci ve üçüncü bölgelere göre daha düşük seviyedir. Hesaplanan ortalama periklaz kristal boyutu 150μm civarındadır.

Şekil 4.20-d' de optik fotoğrafı verilen bölge ingoton orta kısmı yani 4 rakamıyla gösterilen bölgedir. Bu bölge için hesaplanan ortalama periklaz kristal boyutu 60μm civarındadır. MgO tanelerinin etrafını saran ikincil faz empürileri rahatlıkla görülebilmektedir.

Optik mikroskop incelemelerinin sonucu olarak; ortalama periklaz kristal boyutu ingotonun 1 numaralı bölgesinden 4 numaralı bölgesine doğru düşmektedir. Ayrıca soğuma hızlarının farklılığından dolayı bazı bölgelerde eş eksenli taneler oluşurken bazı bölgelerde ise anormal tane büyümesi görülmektedir. İkinci bölgede kolonsal taneler gözlenirken, diğer bölgelerde ise eş eksenli tane yapısı gözlenmiştir.

4.5.2. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Şekil 4.21' de hammadde olarak kullanılan düşük kalitedeki sinter magnezyanın taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir.

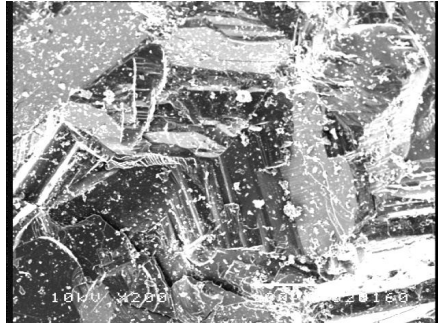


Şekil 4.21. Düşük kalitedeki sinter magnezyanın taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

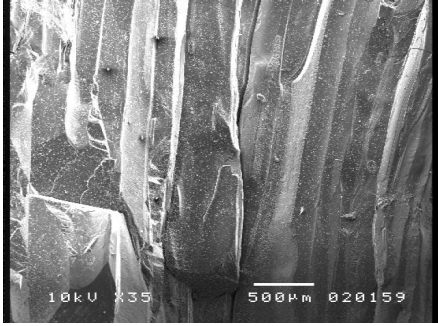
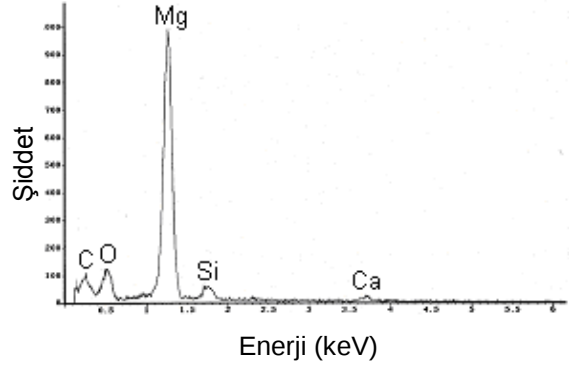
Taramalı elektron mikroskobu incelemelerinde, optik mikroskop incelemelerinde olduğu gibi Şekil 4.19' da rakamlarla gösterilmiş ingot bölgeleri kullanılmıştır ve her bölgeden EDS analizi alınmıştır. Bölgelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 4.22' de verilmiştir.

Şekil 4.22' de verilmiş olan EDS analizlerine baktığımızda Şekil 4.22-a ve Şekil 4.22-b' de yer alan ingotun birinci ve ikinci bölgesinden alınan EDS analizi çok düşük şiddette Ca ve Si pikleri içermektedir. İngotun ikinci bölgesinden, dördüncü bölgesine gidildikçe Ca ve Si piklerinin şiddetleri artmaktadır. Şekil 4.19' da 4 rakamıyla gösterilmiş olan ingotun orta kısmının EDS analizi Şekil 4.22-d' de yer almaktadır. Bu bölgedeki Ca ve Si piklerinin şiddeti diğer bölgelere göre yüksektir. EDS analizlerinin tümünde görülen karbon piki, yalıtkan olan numunenin elektron mikroskobuna alınırken karbon kaplanmasından kaynaklanmaktadır.

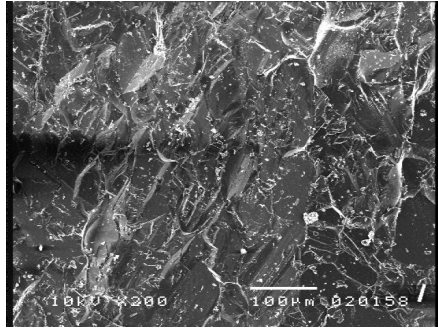
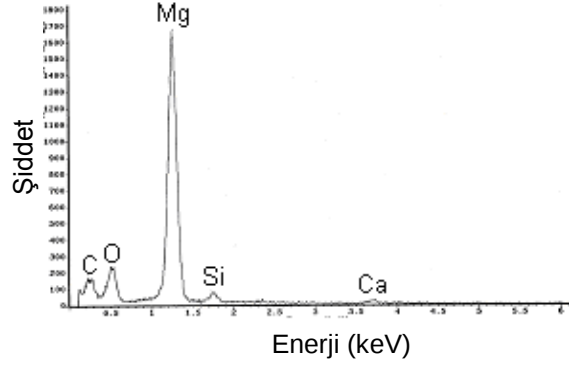
Sonuç olarak ingotun dış bölgesinden orta bölgesine gidildikçe CaO ve SiO₂ gibi empüritelerin miktarı artmaktadır. Yavaş soğuma sonucunda MgO' ten daha geç katılan CaO ve SiO₂ gibi ikincil fazlar ingotun orta kısmına hareket etmekte ve burada toplanmaktadır. Bölgesel olarak meydana gelen rafinasyon sonucunda, Şekil 4.19' da ingotun 1 ve 2 rakamlarıyla gösterilen dış bölgesinde bulunan CaO ve SiO₂ gibi empüriteler, ingotun 4 rakamıyla gösterilen orta kısmına hareket etmiştir.



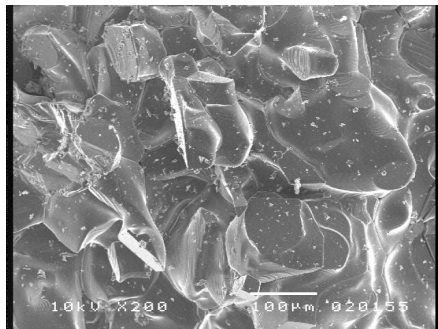
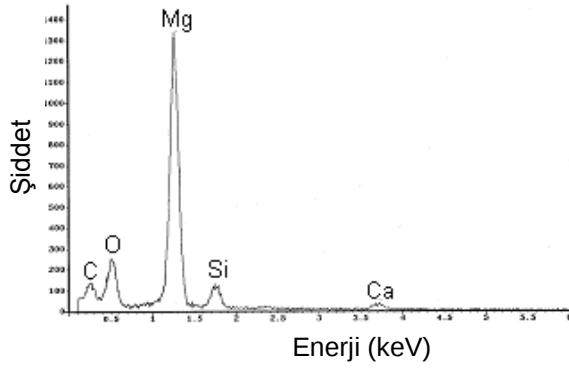
(a)



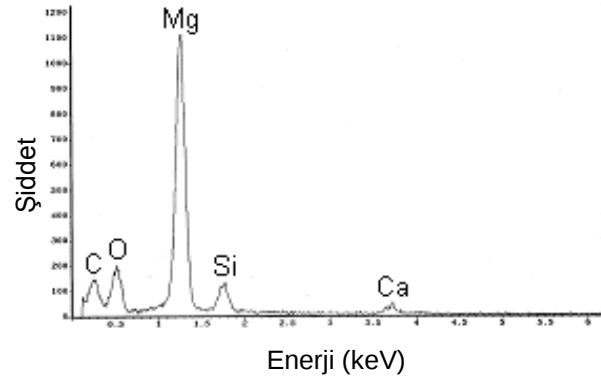
(b)



(c)



(d)



Şekil 4.22. İngot üzerinde rakamlandırılan bölgelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri (a) 1. bölge, (b) 2.bölge (c) 3.bölge (d) 4.bölge

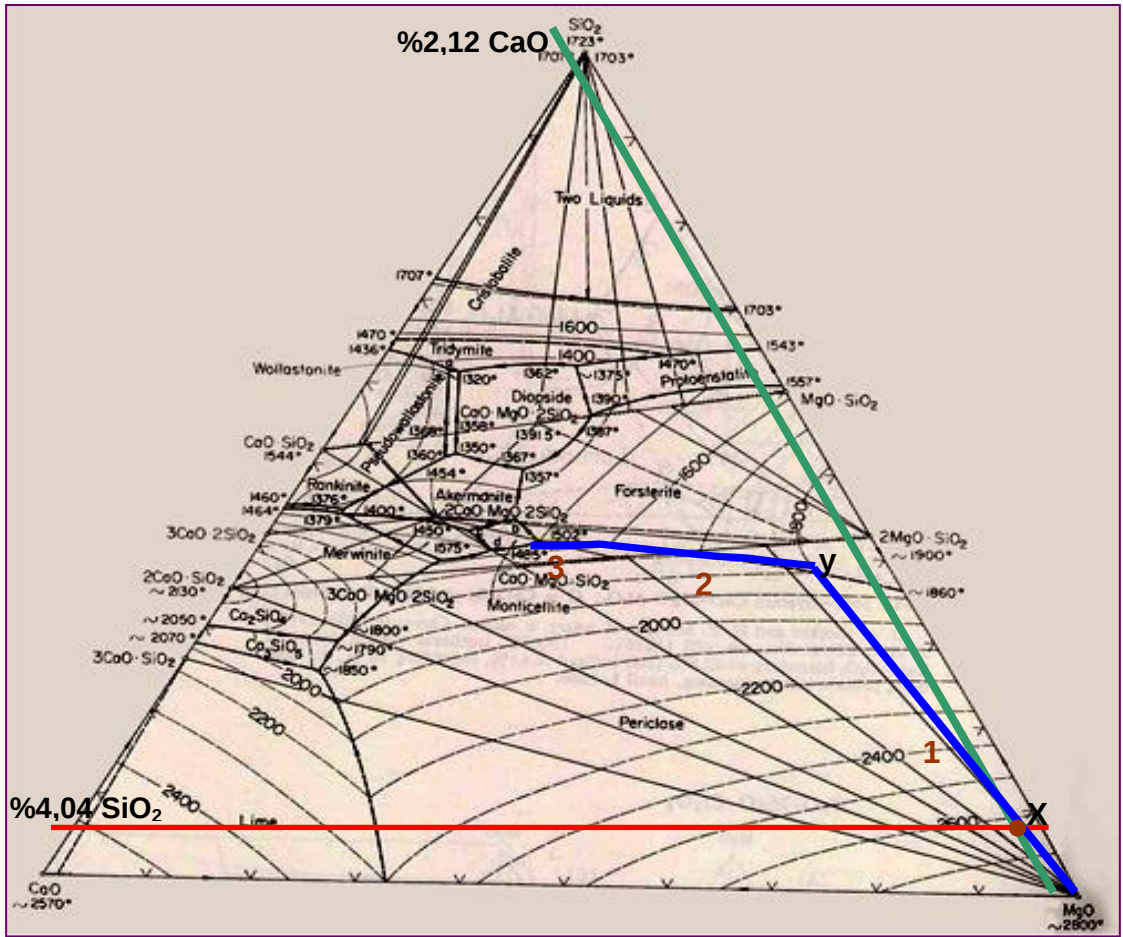
4.5.3. Fiziksel ve Kimyasal Analizler

Hammadde 2' nin ergitme deneyi sonucunda elde edilen Şekil 4.19' da görülen ingot üzerinde rakamlarla belirtilmiş bölgelerin, yaş analiz yöntemiyle kimyasal bileşimi, mazot absorpsiyon yöntemiyle de bulk yoğunluk değerleri saptanmıştır. Tablo 4.6' da bu bölgelerin ve fırına şarj edilen düşük kalitedeki sinter magnezyanın fiziksel ve kimyasal analizleri verilmiştir.

Tablo 4.6. Fırından çıkarılan ergimiş magnezya ingotun bölgelere göre fiziksel ve kimyasal analizleri

Numune	Kimyasal analizler (Ağ, %)					Fiziksel analizler
Ergimiş magnezya	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Bulk yoğunluk (g/cm ³)
Bölge 1	2,08	1,36	0,91	0,1	95,53	3,4
Bölge 2	2,22	1,79	1,01	0,1	94,8	3,4
Bölge 3	3,84	2	1,06	0,1	92,88	3,4
Bölge 4	3,86	2,18	1,2	0,1	92,62	3,46
Sinter magnezya	4,04	2,12	1,01	0.10	92,73	3,37

Bölgelerin kimyasal analizlerine bakıldığında dördüncü bölgeden birinci bölgeye doğru CaO, SiO₂ ve Fe₂O₃ gibi empüritelere miktarlarında orantılı bir düşüş olduğu görülmektedir. Şarj edilen sinter magnezyanın ve bölge 1' in kimyasal bileşimine bakıldığında SiO₂ miktarındaki düşüş diğer empüritelere göre daha fazla olmuştur. Bölgesel bir rafinasyon meydana gelmiştir. Bölgesel rafinasyonun ve neden SiO₂ miktarının diğer empüritelere göre daha fazla düştüğünün anlaşılabilmesi için Şekil 4.23' de yer alan MgO-CaO-SiO₂ diyagramı üzerinde fırında ergitilen düşük kalitedeki sinter magnezyanın katılaşma haritası çıkarılmıştır. Şekil 4.23' deki faz diyagramında görülen X noktası fırına şarj ettiğimiz sinter magnezyanın bileşiminini ifade etmektedir. Bu nokta MgO (periklaz) - 2MgO.SiO₂ (forsterit) -MgO.CaO.SiO₂ (montisellit) alkamet üçgeni içinde yer almaktadır. Faz diyagramının MgO köşesinden başlayıp mavi ile çizilen soğuma eğrisini takip edecek olursak ilk katılaşma X noktasında meydana gelecektir. Sıvıdan ilk katılaşacak olan MgO kristalleridir.

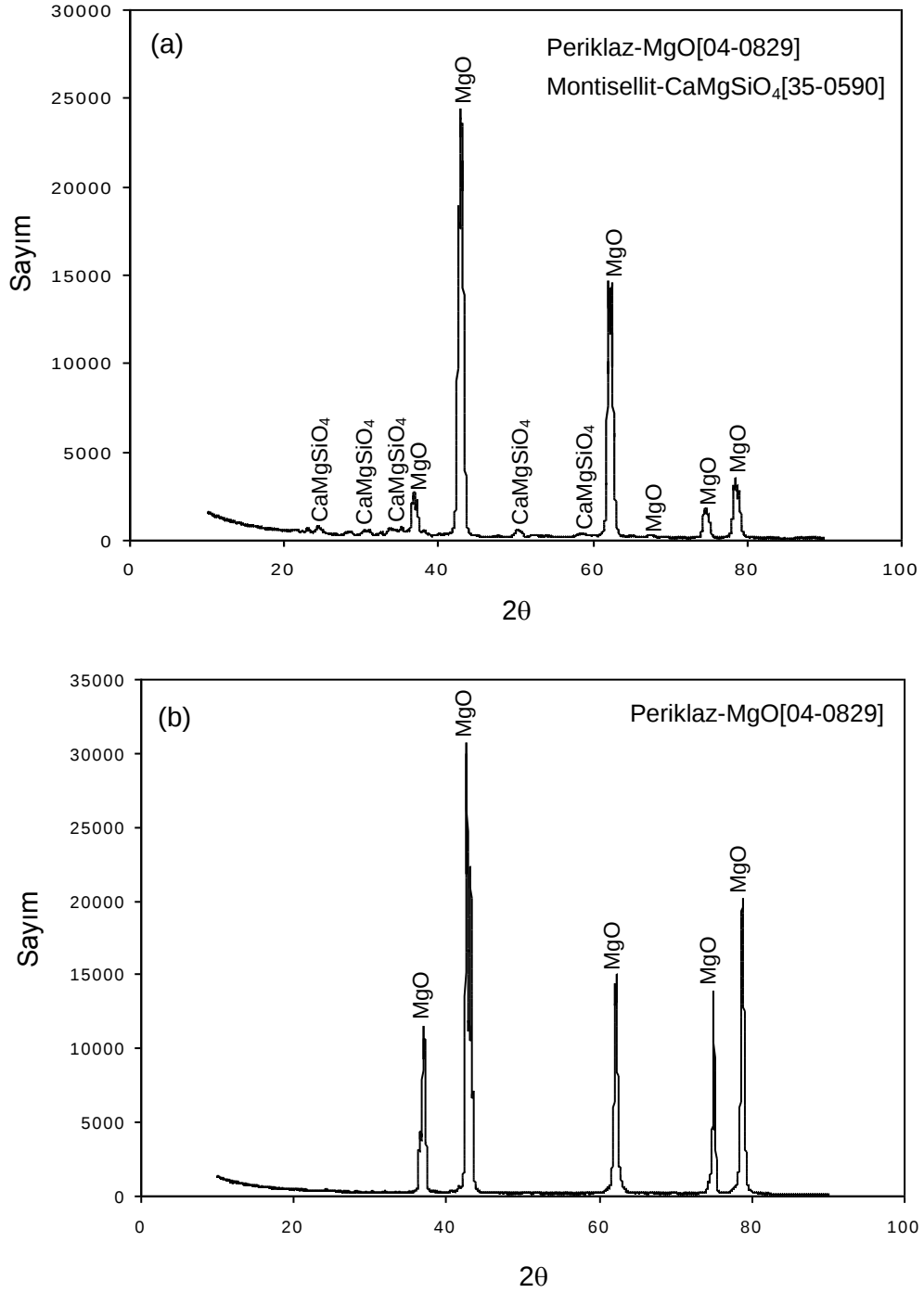


Şekil 4.23. Fırında ergitilen sintir magnezyanın MgO-CaO-SiO_2 faz diyagramı üzerinde gösterilen katılaşma haritası

Daha sonra soğuma 1 rakamıyla gösterilen doğru üzerinden ilerleyecektir. Bu doğru üzerinde sıvıdan devamlı MgO katılaşmakta, katı MgO 'ce zengin hal alırken sıvı MgO 'ce fakir hale gelmektedir. Bu olay y harfiyle gösterilen noktaya kadar sürmektedir. y noktasına gelindiğinde sıvıdan ikinci faz olarak $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ katılaşmaya başlayacaktır. Katılaşma 2 rakamıyla gösterilen soğuma eğrisi üzerinde devam edecektir. 3 rakamıyla gösterilen noktaya gelindiğinde ise kalan sıvıdan üçüncü faz olarak $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ katılaşacak ve katılaşma olayı bu noktada son bulacaktır.

Fırından çıkarılan ingotun birinci bölgesinden dördüncü bölgesine doğru Şekil 4.23' teki faz diyagramında gösterilmiş olan katılaşma olayı meydana gelmektedir. SiO_2 , en son katılaşmanın meydana geleceği fırının dördüncü bölgesine doğru, sırayla $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ ve $\text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ fazları şeklinde sıvı içinde zenginleşerek ilerlemektedir ve sonuç olarak ingotun 4 rakamıyla gösterilmiş göbek bölgesinde toplanarak katılaşmaktadır. CaO 'de soğuma sürecinde SiO_2 gibi hareket etmekte ve $\text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ fazı şeklinde sıvı içinde zenginleşerek ingotun en son katılaşan kısmı olan orta bölgesine doğru ilerlemekte ve burada katılaşmaktadır.

4.5.4. X ışını difraksiyonu analizleri



Şekil 4.24. Fırına şarj edilen sinter magnezya ve fırından çıkarılan ingotun 2 rakamıyla gösterilen kolonsal kristalli bölgesinin X ışınları analizi (a) Sinter magnezya, (b) Kolonsal kristal içeren bölge

Şekil 4.24-a' da fırına şarj edilen düşük kalitedeki sinter magnezyanın X ışını analizleri sonucuna baktığımızda ikincil faz açısından montisellit (CaO.MgO.SiO_2) pikleri yoğunluktadır. Şekil 4.24-b' de verilen yavaş soğuma sonucu, kolonsal şekilde uzamış kristallerin bulunduğu bölgenin X ışınları analizine baktığımızda ise

hiç bir ikincil faz pikine rastlanmamaktadır yapı oldukça saf MgO' tir. İkincil fazlar bölgesel rafinasyon sonucunda MgO bünyesinden uzaklaşmışlardır.

4.6. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Değişik kalitelerde sinter magnezya kullanılarak üretilen ergimiş magnezyanın karakterizasyonundan elde edilen deney sonuçlarına bakılacak olunursa, kullanılan yüksek kalitedeki sinter magnezyanın ortalama periklaz boyutu $100\mu\text{m}$ iken üretilen ergimiş magnezyanın ortalama periklaz boyutu $800\mu\text{m}$ değerini bulmaktadır. Düşük kalitedeki ergimiş magnezyanın ortalama periklaz boyutu $40\mu\text{m}$ iken üretilen ergimiş magnezyanın ortalama periklaz kristal boyutu $700\mu\text{m}$ değerlerini bulmuştur. Kristal boyutundaki bu artışla birlikte malzeme termodinamik açıdan daha kararlı hale gelmiştir. Kullanılan sinter magnezya ile üretilen ergimiş magnezyanın bulk yoğunluklarına bakacak olursak yüksek kalitede $3,40\text{g/cm}^3$ olan bulk yoğunluk değerinin yüksek kaliteden üretilen ergimiş magnezyada $3,47\text{g/cm}^3$ değerini bulduğu görülmektedir. Düşük kalitede ise bu değerin $3,37\text{ g/cm}^3$ değerinde iken $3,40\text{g/cm}^3$ değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bulk yoğunluktaki artış porozite miktarında azalma anlamına gelmektedir. Refrakterler açısından olayı değerlendirirsek porozitesi daha az olan bir malzeme cüruf kaynaklı korozyona karşı daha dirençli olacaktır. Ayrıca ergimiş MgO tanesinin saflığı yanında bünyesinde bulunan ikincil faz empüritelerinin ve bunların oranlarının da büyük önemi vardır. Refrakter kalitedeki ergimiş magnezyadan beklenen CaO/SiO_2 oranı 1,86-2,80 değerleri arasındadır. Yüksek kalitede sinter magnezya kullanılarak üretilen ergimiş magnezyanın CaO/SiO_2 oranı $0,41/ 0,22 = 1,863$ değeri ile istenen değerleri sağlamaktadır. Düşük kalitedeki sinter magnezyadan üretilen ergimiş magnezyaya baktığımızda ise bunun tam tersi bir oran söz konusudur. SiO_2 oranı CaO oranından fazladır. Elektriksel kalite olarak kullanılan ergimiş magnezyadan beklenen özellik SiO_2/CaO oranının 2/1 değeri civarında olmasıdır. Düşük kaliteden üretilen ergimiş magnezyada SiO_2/CaO oranı $2.08/1,36=1.52$ değeri ile bu oran civarındadır. Sonuç olarak yüksek kaliteden üretilen ergimiş magnezya, refrakterlerde kullanılmaya müsait bir ürünken, düşük kalitedeki sinter magnezyadan üretilen ergimiş magnezya ise elektriksel kalitedeki bir ürün olarak kullanılabilir.

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

1. Yüksek kalitedeki sinter magnezyanın ergitilmesi sırasında 7,25 kWh/kg enerji harcanırken, düşük kalitedeki sinter magnezyanın ergitilmesi sırasında 4,85 kWh/kg enerji harcanmaktadır. Düşük kalitede sinter magnezyanın ergitilmesi sırasında harcanan enerji daha azdır. Bunun nedeni düşük kalitedeki sinter magnezyanın bünyesinde, yüksek kalitedeki sinter magnezyaya göre, daha fazla CaO ve SiO₂ gibi ergime sıcaklığını düşüren ikincil faz empüritelerinin bulunmasıdır.
2. Üretilen ergimiş magnezya incelendiğinde, farklı genişliklerde MgO kristal bölgeleri içerdikleri görülmektedir. Kristal bölgelerinin genişlikleri, fırın geometrisine bağlı soğuma hızı farklılıkları nedeniyle değişmektedir. Fırının alt elektroda yakın ve soğumanın en yavaş gerçekleştiği yerlerden alınan ürün geniş kristal bölgeleri içerirken, fırın duvarına yakın, daha hızlı soğumanın gerçekleştiği yerlerden alınan ürün, daha dar kristal bölgeleri içermektedir. Ayrıca MgO kristalleri, fırının en soğuk bölgesinden en sıcak bölgesine doğru kolonsal olarak büyümektedir.
3. Ortalama periklaz kristal boyutu ölçümleri sonucunda, şarj edilen yüksek kalitedeki sinter magnezyanın ortalama periklaz boyutu 100µm iken, fırından çıkarılan ergimiş magnezyanın ortalama periklaz kristal boyutu 800µm' u bulmaktadır. Ortalama periklaz kristal boyutu yaklaşık 8 kat artmıştır. Düşük kalitedeki sinter magnezya için ortalama periklaz kristal boyutu 40µm iken, ergitme sonrası ortalama periklaz kristal boyutu 700µm' u bulmaktadır.
4. Sinter magnezyanın ergitilmesi sonrası, yapılan incelemeler sonucunda, fırın geometrisine bağlı olarak farklı hızlarda soğuyan ergimiş magnezya, farklı katılaşma morfolojileri göstermektedir. Belli bölgelerde eş eksenli taneler meydana gelirken belli bölgelerde ise kolonsal veya anormal tane büyümesi gözlenmektedir. CaO ve SiO₂ gibi ikincil faz empüriteleri kolonsal büyüyen MgO kristallerinin tane sınırlarında ince bir film şeklinde yer almaktadır.
5. Düşük kalitede ergimiş magnezya için yapılan ergitme deneyi sonrası çıkarılan ergimiş magnezya ingot üzerinde yapılan incelemeler, CaO ve SiO₂ gibi empüritelerin ingotun orta kısmına doğru hareket ettiğini, ingotun dış kısmının

empüriteler açısından bölgesel bir rafinasyona uğrayarak saflaştığını göstermektedir.

6. Yüksek kalitedeki sinter magnezya %96,93 MgO içerirken, üretilen ergimiş magnezyada kolonsal kristallerinin bulunduğu bölgelerdeki MgO içeriği % 99,02 gibi yüksek bir değere ulaşmaktadır. Düşük kalitedeki sinter magnezya %92,73 MgO içerirken fırından çıkarılan ingotun kristal bölgelerinin MgO içeriği %95,53 gibi bir değere ulaşmaktadır.

7. Yüksek kalitedeki sinter magnezyanın bulk yoğunluğu $3,40\text{g/cm}^3$ değerinde iken, üretilen ergimiş magnezyada kristallerin bulunduğu bölgelerdeki yoğunluk değeri $3,47\text{g/cm}^3$ değerine ulaşmaktadır. Düşük kalitedeki sinter magnezyanın $3,37\text{g/cm}^3$ olan bulk yoğunluğu, ergitme sonrası $3,40\text{g/cm}^3$ değerine ulaşmaktadır. Düşük kaliteden üretilen ergimiş magnezyanın bulk yoğunluk değerinin, yüksek kaliteden üretilen ergimiş magnezyaya göre, düşük çıkmasının nedeni düşük kaliteden üretilen ergimiş magnezyanın, yüksek kaliteden üretilen ergimiş magnezyaya göre daha fazla empürite içermesidir. CaO ve SiO_2 gibi empüritelerin bulunuşu yoğunluğu düşürmektedir.

8. Her iki sinter magnezya kalitesinin bünyesinde, montisellit (CaMgSiO_4) fazı şeklinde bulunan CaO ve SiO_2 gibi empüriteler, üretilen ergimiş magnezyanın kristal bölgelerinde bulunmamaktadır. Kristalli bölgeler oldukça saf MgO yapısındadır.

5.2. Öneriler

Bu çalışma laboratuvar tipi tek fazlı elektrik ark fırınında gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçların karşılaştırılması açısından çalışmalar öncelikle pilot çaptaki daha sonra da endüstriyel çaptaki elektrik ark fırınlarına taşınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Chiang, Y., Birnie, D. and Kingery, W.D.**, 1997. Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [2] **Alper, A.M., McNally, R.N. and Papa, P.**, 1967. Magnesium Oxide Casting, *United States Patent Office*, No: 3332740 dated 25.7.1967.
- [3] **Alper, A.M.**, 1970. High Temperature Oxides, Academic Press, New York.
- [4] **Huges, W.**, 2001. Prospects for Fused Magnesia Production in New South Wales, Australia, *Mineral Resources*.
- [5] **Lee, W.E. and Rainforth, W.M.**, 1994. Ceramic Microstructures: Property Control by Processing, Chapman & Hall, London.
- [6] **Yılmaz, S.**, 1997. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Çelik Potası Refrakter Astarının İncelenmesi ve Geliştirilmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Erdoğan, N. ve Yıldız, R.**, 1995. Magnezit ve Bazik Refrakter Malzeme Teknolojisi, Lale Ofset, Kütahya.
- [8] **Chesters, J.H.**, 1973. Refractories: Production and Properties, The Iron and Steel Institute, London.
- [9] **Refractories Handbook**, The Technical Association of Refractories, Japan. 1998.
- [10] **Ortiz, U., Aguilar, J. and Guerro, C.**, 1997. Production of MgO in an Electric Arc Furnace: Thermal Analysis, *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.*, **5**, 347-356.
- [11] **Castillo, G.A., Das, T.K. and Leers, K.J.**, 2000. Model for Fusion Optimization of Refractory grade MgO by Electric Arc Furnace, *Veitsch-Radex Rundschau*, **2**, 15-26.
- [12] **Werner, J.**, 2002. Kişisel Görüşme.
- [13] **O'Driscoll, M.**, 1996. Fused Magnesia The Blender's Choice, *Industrial Minerals*, 19-27.
- [14] **Topaç, C.**, 1994. Magnezya-Karbon Refrakterlerde Oksitlenme ve Cüruf Korozyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] **Richerson, D.W.**, 1992. Modern Ceramic Engineering, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [16] **Rosenqvist, T.**, 1974. Principles of Extractive Metallurgy, McGraw-Hill Kogakusha, Tokyo.
- [17] **Özgen, S.** Seramik Malzemelerin Üretimi, İ.T.Ü. Kimya Metalürji Fakültesi Metalürji Bölümü, İstanbul.

- [18] **Fukuyama, H., Donald, J.R. and Toguri, J.M.**, 1997. Wetting Behavior between Fayalite-Type Slags and Solid Magnesia, *J. Am. Ceram. Soc.*, **80** [9], 2229-2236.
- [19] **Takanaga, S.**, 1992. Wear of Magnesia-Carbon Bricks in BOF, *Taikabutsu Overseas*, **13** [4], 211-218.
- [20] **Brezny, B.**, 1993. The Microstructures and Properties of Magnesia-Carbon Refractories, *Key Engineering Materials*, **88**, 21-40.
- [21] **Amavis, R.**, 1990. Refractories for the Steel Industry, Elsevier Applied Science, New York.
- [22] **Fruehan, R.**, 1998. The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume, The Aisesteel Foundation, Pittsburgh, Pennsylvania.

EKLER

Tablo A.1. Ülkelere göre sinter magnezya ve fused magnezya üretim miktarları (x1000 ton) ve üretim tipleri D: Doğal, DS:Deniz Suyu, BR: Brine (Tuzlu su)

ÜLKE	SİNER	FUSED	TİP
Kanada		4	D
Meksika	170	14	BR,DS
ABD	360	30	BR,DS,D
Avusturya	330		D
Fransa		7	DS
Yunanistan	200		D
İran	30		D
İrlanda	90		DS
İsrail	60	13	BR
İtalya	130		DS
Hollanda	130		BR
Polonya	10		D
Rusya	2222		D
Sırbistan	200		D
Slovakya	301		D
İspanya	70		D
Türkiye	259		D
Ukrayna	120		D
İngiltere	80	23	DS
Çin	1765	300	D
Hindistan	249		D
Japonya	350	13	DS
Kuzey Kore	500		D
Güney Kore	50	7	DS
Nepal	50		D
Avustralya	90	30	D
Güney Afrika	80		D
Brezilya	360	4	D
TOPLAM	8256	445	

ÖZGEÇMİŞ

Cüneyt GÜRCAN 1977 yılında Kütahya’da doğdu. İlk öğretimini Atatürk ilkokulunda tamamladıktan sonra 1988 yılında Kütaya Ali Güral Anadolu Lisesinde orta öğrenimine başladı. 1996 yılında İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne girmeye hak kazandı. 2000 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi ünvanını aldı ve aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Üretim Metalurjisi Anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2001 yılında İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Üretim Metalurjisi Anabilim Dalında Araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir.