

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ALUMİNA ESASLI DÜŞÜK ÇİMENTOLU KENDİ
KENDİNE AKABİLEN DÖKÜLEBİLİR
REFRAKTERLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Erdinç KARADENİZ**

Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ÜRETİM METALURJİSİ

OCAK 2004

**ALUMİNA ESASLI DÜŞÜK ÇİMENTOLU KENDİ
KENDİNE AKABİLEN DÖKÜLEBİLİR
REFRAKTERLERİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Met. Müh. Erdinç KARADENİZ
(506011175)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Aralık 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2004**

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Süheyla AYDIN
Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Serdar ÖZGEN
Prof.Dr. Mehmet KOZ (M.Ü.)

OCAK 2004

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez çalışmalarım sırasında verdiği destekten dolayı sayın hocam Prof. Dr. Süheyla AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Serdar ÖZGEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında bana verdikleri destekten dolayı SÜPERATEŞ Ref. Fab. Ailesine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen, gösterdiği sınırsız anlayış ve sabırdan ötürü Araştırma Görevlisi Cüneyt GÜRCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için gerekli malzeme teminindeki yardımlarından dolayı ERAL PPROTEK'ten Yeşim YILDIRIM Hanıma, METAMİN'den Çağatay DURMUŞ Bey'e ve HAZNEDAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde bana verdikleri destekten dolayı aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ARALIK 2003

Erdoğan KARADENİZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. REFRAKTER MALZEMELER	3
2.1. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması	4
2.1.1. Şekli Refrakterler	4
2.1.2. Şekilsiz Refrakterler	5
2.1.3. İzole Refrakterler	6
3. DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLER	7
3.1. Genel Uygulamaları ve Özellikleri	7
3.2. Dökülebilir Refrakterlerin Bileşenleri	10
3.2.1. Tabular Alumina	10
3.2.2. Kalsine ve Reaktif Alumina	12
3.2.3. Ergitilmiş Alumina	14
3.2.4. Kalsine Boksit	15
3.2.5. Mikrosilika	16
3.2.6. Alumina-Magnezya Spinel	17
3.2.7. Kalsiyum Aluminat Çimentosu	18
3.3. Dökülebilir Refrakterlerin Yapısal Özellikleri	20
3.3.1. Porozite ve Hacim Ağırlığı	20
3.3.2. Partikül Paketlenmesi	21
3.3.3. Reolojik Özellikler	23
3.4. Çimento Reaksiyonları ve Kurutma Kademesi	25
3.5. Dökülebilir Refrakterlerin Üretimi	26
3.6. Kendi Kendine Akabilen Dökülebilir Refrakterler	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
4.1. Kullanılan Hammaddeler ve Özellikleri	32
4.1.1. Tabular Alumina	32
4.1.2. Kahverengi Korund	33
4.1.3. Beyaz Korund	34
4.1.4. Kalsine Boksit	35
4.1.5. Kalsine Alumina	36
4.1.6. Reaktif Alumina	37

4.1.7. Mikrosilika	37
4.1.8. Çimento	38
4.1.9. Dispersan	39
4.1.10. Geciktirici	39
4.2. Numunelerin Hazırlanması	40
4.2.1. Numunelerin Üretimi	40
4.2.2. Numunelerin Sınıflandırılması	41
4.2.2.1. 1. Grup Numuneler	41
4.2.2.2. 2. Grup Numuneler	43
4.2.2.3. 3. Grup Numuneler	43
4.2.2.4. 4. Grup Numuneler	44
4.2.2.5. 5. Grup Numuneler	45
4.2.2.6. 6. Grup Numuneler	46
4.3. Numunelere Yapılan Testler	47
4.3.1 Akış Testi	47
4.3.2. Porozite ve Yığın Yoğunluğu	49
4.3.3. Soğukta Basma Mukavemeti	50
5. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ	51
5.1. 1. Grup Numunelerin Sonuçları ve Tane Boyut Dağılımının Etkisi	51
5.1.1. Tane boyut dağılım modülünün kullanılan su oranına etkisi	52
5.1.2. Tane boyut dağılım modülünün akış özelliklerine etkisi	52
5.1.3. Tane boyut dağılım modülünün görünür poroziteye etkisi	53
5.1.4. Pişirme sıcaklığının soğukta basma mukavemetine etkisi	54
5.1.5. Pişirme sıcaklığının görünür poroziteye etkisi	57
5.1.6. Suyun refrakter malzemedeki etkisi	57
5.2. 2. Grup Numunelerin Sonuçları, Reaktif ve Kalsine Alüminanın karşılaştırılması	58
5.3. 3. Grup Numunelerin Sonuçları ve Alümina Hammaddelerinin karşılaştırılması	59
5.3.1 Alümina hammaddelerinin akış özellikleri yönünden	60
5.3.2 Alümina hammaddelerinin görünür porozite yönünden	61
5.4. 4. Grup Numunelerin Sonuçları ve Mikrosilikanın Etkisi	61
5.4.1 Mikrosilikanın akış özelliklerine etkisi	62
5.4.2. Mikrosilikanın görünür poroziteye etkisi	63
5.5. 5. Grup Numunelerin Sonuçları ve Kalsine Alüminanın Etkisi	64
5.6. 6. Grup Numunelerin Sonuçları ve Sitrik Asitin Etkisi	65
6. GENEL SONUÇLAR	66
7. ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	68

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Dökülebilir refrakterlerin genel uygulamaları	10
Tablo 3.2	Bazı ticari alüminaların fiziksel ve kimyasal özellikleri	12
Tablo 3.3	Kalsine alümina tiplerinin kimyasal bileşimleri	13
Tablo 3.4	Kahverengi ergitilmiş alüminaların kimyasal bileşimleri	14
Tablo 3.5	Beyaz fused alüminanın kimyasal ve fiziksel özellikleri	15
Tablo 3.6	Boksit minerallerinin kimyasal bileşimleri	16
Tablo 3.7	Mikrosilikaların kimyasal bileşimleri	17
Tablo 3.8	Alümina-Magnezya Spinel Bileşimleri	18
Tablo 3.9	Ticari Kalsiyum Alüminat Çimentoları	19
Tablo 3.10	Kalsiyum Alüminat çimentolarında oluşan fazlar ve hidrasyon hızları	20
Tablo 4.1	Deneyler sırasında kullanılan tabular alüminanın kimyasal ve fiziksel özellikleri	32
Tablo 4.2	Deneylerde kullanılan tabular alüminanın tane boyutu aralıkları	32
Tablo 4.3	Deneylerde kullanılan kahverengi korundun kimyasal bileşimi	33
Tablo 4.4	Deneylerde kullanılan beyaz korundun kimyasal bileşimi	34
Tablo 4.5	Deneylerde kullanılan rotary boksitin kimyasal bileşimi	35
Tablo 4.6	Deneylerde kullanılan kalsine alüminanın kimyasal bileşimi	36
Tablo 4.7	Deneylerde kullanılan reaktif alüminanın kimyasal bileşimi	37
Tablo 4.8	Deneylerde kullanılan mikrosilika kimyasal bileşimi	38
Tablo 4.9	Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi	39
Tablo 4.10	Andreasen Denklemine göre kullanılan hammaddelerin yüzdeleri	40
Tablo 4.11	1. grup numunelerin bileşimleri	42
Tablo 4.12	2. grup numunelerin bileşimleri	43
Tablo 4.13	3. grup numunelerin bileşimleri	44
Tablo 4.14	4. grup numunelerin bileşimleri	45
Tablo 4.15	5. grup numunelerin bileşimleri	46
Tablo 4.16	6. grup numunelerin bileşimleri	47
Tablo 5.1	1. grup numunelerin sonuçları	51
Tablo 5.2	1B grubu numunelerin sonuçları	58
Tablo 5.3	2. grup numunelerin sonuçları	59
Tablo 5.4	3. grup numunelerin sonuçları	60
Tablo 5.5	4. grup numunelerin sonuçları	62
Tablo 5.6	5. grup numunelerin sonuçları	64
Tablo 5.7	6. grup numunelerin sonuçları	65

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1	Potada dökülebilir refrakter uygulaması	9
Şekil 3.2	Korundun kristal yapısı	11
Şekil 3.3	Yüksek alüminalı dökülebilir refrakterde alümina tanelerinin SEM görüntüsü	12
Şekil 3.4	Ergitilmiş alüminanın SEM görüntüsü	14
Şekil 3.5	Yüksek alüminalı dökülebilir refrakterde mikrosilika tanelerinin görüntüsü	17
Şekil 3.6	Refrakterlerde görülen por şekilleri	21
Şekil 3.7	Elektrisel çift tabaka ve potansiyel düşüşü	24
Şekil 3.8	Dökülebilir Refrakterlerin Üretim Akış Şeması	27
Şekil 3.9	Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterleri etkileyen faktörler	29
Şekil 3.10	Dökülmüş malzeme yüzeylerinin hemen ve 45 dakika sonraki görüntüleri	29
Şekil 3.11	Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter bileşenleri	30
Şekil 3.12	Tandışlerin monolitik örümü	31
Şekil 4.1	Kullanılan tabular alüminanın X-Işınları analizi	33
Şekil 4.2	Deneylerde kullanılan kahverengi korundun X-Işınları analizi	34
Şekil 4.3	Kullanılan beyaz korundun X-Işınları analizi	34
Şekil 4.4	Deneylerde kullanılan kalsine boksitin X-Işınları analizi	35
Şekil 4.5	Kalsine alüminanın X-Işınları analizi	36
Şekil 4.6	Deneylerde kullanılan reaktif alüminanın X-Işınları analizi	37
Şekil 4.7	Deneylerde kullanılan mikrosilikanın X-Işınları analizi	38
Şekil 4.8	Kullanılan çimentonun X-Işınları analizi	39
Şekil 4.9	1. grup numuneler	42
Şekil 4.10	Akış tablası	48
Şekil 4.11	Konik saç	48
Şekil 4.12	Akış düzeneği	49
Şekil 4.13	Örnek bir akış	49
Şekil 5.1	Tane boyut dağılımının kullanılan su oranına etkisi	52
Şekil 5.2	Tane boyut dağılımının akış özelliklerine etkisi	52
Şekil 5.3	1300°C'de 5 saat pişirilmiş numunelerde boyut dağılım modülünün poroziteye ve yoğunluğa etkisi	53
Şekil 5.4	n = 0,23 durumunda pişirme sıcaklığının mukavemete etkisi	54
Şekil 5.5	n=0,23 durumunda değişik sıcaklıklarda pişirilmiş numunelerin X-Işınları analizi	56
Şekil 5.6	n = 0,23 durumunda pişirme sıcaklığının poroziteye etkisi	57
Şekil 5.7	Mikrosilikanın akış özelliklerine etkisi	57
Şekil 5.8	n = 0,23 durumunda 1300°C'de pişirilmiş numunelerde mikrosilikanın görünür poroziteye etkisi	62
Şekil 5.9	n = 0,23 durumunda kalsine alüminanın akış çapına etkisi	63

SEMBOL LİSTESİ

CPFT	: D' den daha ince olan tanelerin kümülatif yüzdesi
D	: Tane boyutu
D_s	: Karışımdaki minimum tane boyutu
D_L	: Karışımdaki maksimum tane boyutu
n	: Tane boyut dağılım modülü
r	: Bir elekteki tanelerin hacminin bir sonraki elekteki tanelerin hacmine oranı
V	: Potansiyel
n	: Tane boyut dağılım modülü
σ_{sbm}	: Soğukta basma mukavemeti (kg/cm ²)
P_{max}	: Kırılma anındaki pres basıncı (kg)
F₀	: Numunenin basınç uygulanan yüzey kesit alanı (cm ²)
X	: α -Al ₂ O ₃
C	: CaO
A	: Al ₂ O ₃
S	: SiO ₂
1	: CaO.Al ₂ O ₃
2	: CaO.2Al ₂ O ₃
F	: Fe ₂ O ₃
H	: H ₂ O
T	: TiO ₂
a	: CaO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂
M	: 3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂
H	: CaO.6Al ₂ O ₃

ALUMİNA ESASLI DÜŞÜK ÇİMENTOLU KENDİ KENDİNE AKABİLEN DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLERİN İNCELENMESİ

ÖZET

Son 30 yıldır demir çelik endüstrisinde görülen teknolojik gelişmeler sonucu kullanılan refrakter sektörü de değişim göstermiştir. Son senelere kadar tuğla refrakter kullanımının yaygın olmasına karşın birçok avantajı nedeniyle dökülebilir refrakterler tuğla refrakterlerin yerini almaya başlamıştır. Özellikle dökülebilir refrakter sınıfına giren ve mekanik etki uygulanmaksızın kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter kullanımı endüstride önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada ilk planda, kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde tane boyut dağılımının etkisi incelenmiştir. Bu bölümde Andreassen denklemindeki tane boyut dağılımı modülüne (n) 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24 ve 0.25 değerleri verilerek tane boyut dağılımının, tabular alumina esaslı kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter malzemelerde akış, yığın yoğunluğu ve porozite özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun yanında değişik pişirme sıcaklıklarının refrakterlerin özelliklerine etkileri incelenmiştir. Daha sonra, kahverengi korund, beyaz korund ve kalsine boksit kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde alümina hammaddesi olarak denenmiştir ve kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter malzemelerde bu hammaddelerin uygun olup olamayacağı belirlenmiştir. Bu temel alümina hammaddelerin yanında malzemenin reolojik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla ilave edilen kalsine alumina (%6-15 arası), mikrosilika (%3-12 arası), ve sitrik asit (%0,02-0,08 arası) refrakter malzemeye değişik oranlarda ilave edilip malzemedeki etkileri incelenmiştir.

Deneyler sonucunda tane boyut dağılımı modülü 0,23 olduğu zaman en yüksek akış değeri 238 mm olarak elde edilmiştir. Bunun yanında tabular alumina, kahverengi korund ve beyaz korundun kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde kullanılabileceği tesbit edilmiştir. Kalsine boksit ise refrakter örümü sırasında mekanik etkiye ihtiyaç duyacaktır. Refrakter malzemelerde kalsine alüminanın reaktif alüminaya oranla akış özelliklerini geliştirmekte daha etkili olduğu belli olmuştur.. Kalsine alümina refrakter bileşiminde %6'dan %12'ye kadar arttırıldığında, akış özelliğinin geliştiği ancak %12'nin üstündeki kalsine alüminanın akışı fazla etkilemediği görülmüştür. Mikrosilika %3 ile %9 arasında kullanıldığında, mikrosilika oranının artmasının poroziteyi azalttığı fark edilmiştir. Malzemeye priz alma süresini geciktirmek için ilave edilen sitrik asit %0,02 ile %0,08 arasında ilave edildiğinde malzemenin priz alma süresini arttırdığı görülmüştür ancak bu deneyler sonucunda malzemeye ilave edilen su miktarının da malzemenin priz alma süresini etkilediği görülmüştür.

THE INVESTIGATION OF ALUMINA BASED LOW-CEMENT SELF FLOWING CASTABLE REFRACTORIES

SUMMARY

In the last 30 years, development in iron and steel industry effected the refractory industry. In the previous years brick refractories were mostly used but in the last years castable refractories started to replace brick refractories because of having a lot of advantages. Especially self flowing castable refractories which don't need any mechanical effect to settle down, have important role in industry.

In this thesis firstly, particle size distribution of low-cement alumina based self-flowing castables are investigated. In this part, for "n" (particle size distribution module) in Andreassen Equation, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24 and 0.25 were taken by this, the effects of particle size distribution on tabular alumina based self-flowing castables are determined. The measured properties on this part are; flow distance, bulk density, porosity and cold crushing strength changed by firing temperature. In the following experiments, alternative alumina types are used except tabular alumina. These alumina types are brown fused alumina, white fused alumina and calcine bauxite. Their appropriateness are discussed. Addition to these experiments, some components of self flowing castables which are used for improving the rheological and physical properties are examined. These components are microsilica (used 3% to 12% in refractory) and calcine alumina (used 6% to 15% in refractory). At the last effects of the retarder are examined. Citric acid (used 0,02% to 0,08 in refractory) was chosen as the retarder which delays the hydration of refractory.

Consequently when the "n" value was 0,23, the best flow (238 mm) had been seen. In addition to this brown fused alumina and white fused alumina can be used as alternative alumina refractory for tabular alumina. But calcine bauxite needs vibration for settle down. In the experiments properties of self flowing castables are improved when calcine alumina, reactive alumina and microsilica was used. But their excess usage effected them badly. Citric acid delayed hydration of refractory and it is understood that water is also effective in hydration time.

1. GİRİŞ

Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklıklarda her türlü ergimiş metal, curuf, asit vb. korozyon maddelere dayanıklı, mekanik darbe ve sürtünme etkilerine karşı fiziksel ve kimyasal özelliğini kaybetmeyen, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerdir. Refrakter malzemelerin tüketiminin en fazla olduğu sektör demir-çelik sektörüdür. Demir-çelik endüstrisinin son senelerde gelişmesi, bu endüstrinin ihtiyacı olan refrakterlerin kalite olarak gelişmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu nedenle günümüzde dökülebilir refrakter kullanımı artmaya başlamıştır.

Dökülebilir refrakterler, iri ve ince refrakter agregası karışımının, bağlayıcı nitelikte olan daha ince vizkoz bir faz sayesinde bağ yaptığı ve genellikle çimentonun hidrasyon reaksiyonları sonucu sertleşmesiyle taneler arasındaki bağ kuvvetinin olduğu yapı olarak tanımlanabilir. Dökülebilir refrakterler yapılarında refrakter agregası, hidrolik bağlayıcı görevindeki yüksek alüminalı çimento, dispersan, su, reaktif alümina, kalsine alümina, mikrosilika, silika v.b. malzemeler bulundurmaktadır.

Dökülebilir refrakterler, refrakter endüstrisine ilk olarak 1928 yılında girdi. Ticari anlamda ilk kullanımı 1930'da gerçekleşti. Bu refrakterlerin üretiminde hammadde olarak refrakter artıkları kullanılması, bu tarihlerde kullanılan refrakterlerin performanslarını kötü yönde etkiliyordu. Bu malzemelerin geliştirilmesi 60'lı yılların sonlarında gerçekleştirilmiştir. 70'li senelerde dökülebilir refrakterlerin kalitesi kullanılan çimentonun saflığı ve yüksek oranda kullanımı üzerine kurulmuştu. Bu şekilde malzemelerin soğukta dayanımları artıyor; ancak yüksek sıcaklıktaki refrakterlik özellikleri azalıyor. Yüksek miktarda çimento kullanımı ile sistemde bulunan CaO bulabildiği SiO₂ ve Al₂O₃ ile anortit ve/veya gehlenit fazlarını oluşturmaktadır. Bu fazların ergime sıcaklığı düşük olduğundan, yüksek sıcaklıkta bağ mukavemetini, korozyon ve erozyon direncini düşürür. 1970 öncesinin test yöntemleri ancak numunenin belli bir sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra soğukta kırılma modülü değerlerinin ölçümüne imkan tanıyordu. Sıcaklık altındaki performansları

nadiren gündeme geliyordu. Bu durum dökülebilir refrakterlerin 70’li yılların ortalarına kadar tam anlamıyla verimli olarak kullanılamamasına sebep oldu[16].

Dökülebilir refrakterler vibrasyon ile kalıplar içerisinde şekil alan tiksotropik kolloidal sistemlerdir. Kolloidal sistemlerde mekanik davranışlar, o sistemin reolojik özelliklerini belirler. Çelik potalarının monolitik olarak örümünün önem kazanmasıyla, dökülebilir refrakterlerin reolojik özellikleri incelenmeye başlanmıştır. Bu incelemeler sonucunda, refrakter malzemeye vibrasyon uygulamadan refrakter malzemenin yerçekimin etkisi ile kalıp şeklini alması, araştırma konusu olarak ön plana çıkmıştır. Bu tür malzemelere “kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterler” adı verilmiştir.

Bu çalışmada birinci planda kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde tane boyut dağılımının etkisi incelenmiştir. Bunun sonucunda optimum tane boyut dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır. Tane boyut dağılımı incelenirken tabular alumina temel alumina hammaddesi olarak kullanılmıştır. Tabular aluminaya alternatif olabilecek diğer bazı alumina hammaddelerinin de özellikleri deneyler aşamasında incelenmiştir. Bu çalışmada ilave olarak, kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlere, refrakterin özelliklerini geliştirmek için ilave edilen bazı bileşenlerin bu yapı içerisindeki etkileri incelenmiştir. Bu malzemeleri kalsine alumina, reaktif alumina, mikrosilika ve sitrik asit olarak sayabiliriz.

2. REFRAKTER MALZEMELER

Kelime olarak inatçı anlamına gelen refrakter, yüksek sıcaklıklarda her türlü ergimis metal, curuf, asit vb. korozyon maddelere dayanıklı, mekanik darbe ve sirtunme etkilerine karsi fiziksel ve kimyasal özelligini kaybetmeyen, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerdir. Refrakter malzemelerde bünye; saç kaplı tuğlalarda olduğu gibi metalik bir bileşene sahip olabilir, ama tamamen metal veya alayim olamaz. Bu yüzden bu malzemeler ISO tarafından şöyle tanımlanmaktadır [10, 24, 28].

“Bünyelerinin tamamı metal veya alayim olmayan, fakat metalik bir bileşime sahip olabilen ve refrakterliği en az 1500°C olan malzeme ve mamullerdir.” [28]

Bu özellikleri nedeniyle, endüstride yüksek sıcaklığın gerekli olduğu tüm proseslerde, konstrüksiyonu koruma ve izole etme amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışma şartları bu kadar degışken olabilen bir başka malzeme türü yoktur. Bu nedenle, her türlü çalışma şartlarına uyabilen bir refrakter yapımı da mümkün değildir [24, 28].

Tarihsel gelişimi, teknolojinin gelişimine paralel olarak yeni çalışma ortamlarının ortaya çıkması ve bu yeni şartlara uygun malzeme arayışları ile olmuştur [24].

M.Ö. 3000 yılında güneşte kurutulmuş kilden tuğlalar kullanılarak yapılan piramitler, Mısırlıların tuğla üretimine başlamış olduklarının göstergesidir. Kilin ilk defa pisirilmesi ise Asurlular ve Babillilerce gerçekleştirilmiştir. İlk pismis silika tuğla kullanımı, M.Ö. 500 yılında, Darius'un sarayının yapımında görölmektedir. Bu tarihten sonra tuğla yapım ve kullanımı, tarihsel olayların gelişimi ile batıya doğru açılmış ve ilk samot tuğlanın yapımı onsekizinci yüzyılın ortalarına doğru İngiltere’de gerçekleşmiştir. Refrakter malzemelerin günümüze kadar gelen gelişimi için bu tarih başlangıç olarak alınabilir. Teknolojinin gelişim düzeyine uygun olarak gelişen refrakterlerin kalite ve üretimleri, özellikle 2. Dünya Savaşı yıllarında büyük

bir atılım yapmıştır. Günümüzde de; daha iyi performanslara ve daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı refrakter üretmek için, araştırma ve geliştirmeler kesintisiz devam etmektedir[24].

2.1. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması

Refrakterlerin sınıflandırılmasında, üzerinde tam olarak anlaşmaya varılmış tek bir yöntem yoktur. Değişik esaslara göre değişik sınıflandırmalar yapılmaktadır. Sıcaklık, refrakter malzemenin cinsi, kimyasal özellikleri, hammadde kaynakları, üretim türü, fiziksel şekli vb. hususlar esas alınarak yapılan sınıflandırmalar vardır. Günümüzde çok çeşitli refrakterler kullanıldığı için, yapılacak her türlü sınıflandırmada, gruplar arasında birbiri içine geçmeler önlenemez durumdadır. Daha önceleri kimyasal özellikler gözönüne alınarak yapılan sınıflandırmalar tercih edilmekteyken, günümüzde en çok kullanılan sınıflandırma, fiziksel şekil esas alınarak yapılandır [24].

Kimyasal özellikler esas alınarak yapılan refrakter sınıflandırması şöyledir [24]:

a) Asidik Refrakterler

Silika, semi silika, şamot gibi malzemeler bu grup içine girer. Bu malzemelerden yapılan her türlü refrakteri kapsar.

b) Bazik Refrakterler

Dolomit, magnezya, krom gibi malzemelerden yapılan her türlü refrakteri kapsar.

c) Nötr Refrakterler

Karbon, grafit vb. refrakterler bu grup içine girer.

Fiziksel şekil esas alınarak yapılan refrakter sınıflandırması ise şöyledir [24]:

2.1.1. Şekilli Refrakterler

a) Silika tuğlalar

Ergitilerek dökülmüş türleri de vardır

b) Semi silika tuğlalar

c) Şamot tuğlalar

Al_2O_3 - SiO_2 ihtiva eden, maksimum %45 Al_2O_3 'lı refrakterlerdir.

d) Yüksek Al_2O_3 tuğlalar

Al_2O_3 oranları %50-99 arasındadır. Al_2O_3 miktarına göre alt gruplara ayrılırlar. Yüksek sıcaklıklarda pişirilmiş, katran veya reçine bağlı, kromit ilaveli, ergitilerek dökülmüş vb. çeşitleri varılır

e) Dolomit tuğlalar

Katran bağlı, dolomit-magnezya, dolomit-grafit vb. türleri vardır.

f) Magnezya tuğlalar

Kimyasal bağlı, pişmiş, katran veya reçine bağlı, katran emdirilmiş, magnezya-karbon, magnezya-krom, metal kaplı vb. türleri vardır

g) Krom tuğlalar

Kimyasal bağlı, pişmiş, krom-magnezya (kimyasal bağlı veya pişmiş) vb. türleri vardır.

h) Karbon tuğlalar

i) Grafit tuğlalar

j) Semi-grafit tuğlalar

k) Silisyum-karbür tuğlalar

l) Forsterit tuğlalar

m) Zirkon tuğlalar

Özel şekilli refrakterler; silika, yüksek Al_2O_3 , magnezya, karbon vb. malzemelerden yapılmış olabilirler. Ayrı grup altında toplanmış olmalarının nedeni, belli bir işte kullanılmak üzere ve belli şekillerde üretimlerinin yapılmasındandır. Döküm deliği blokları, çeşitli nozullar, tıkaçlar, üfleme kafaları, sürgülü sistem plakaları, yüksek fırın çekerleri vb. bu tür refrakterlere örnek olarak verilebilir [24].

2.1.2. Şekilsiz Refrakterler

a) Dökme refrakterler (Al_2O_3 - SiO_2 , yüksek Al_2O_3 , magnezya ve karbon)

b) İzole dökme refrakterler

c) Dövme refrakler malzemeler

d) Plastik refrakterler

e) Püskürtme refrakterler

f) Örgü harçları

g) Kaplama ve yapıştırma malzemeleri ile mastikler [24]

2.1.3. İzole Refrakterler

Bu grup altında toplanan refrakterlerin bir kısmını şekilli refrakterler (izole tuğla, izole plaka vb.), bir kısmını da şekilsiz refrakterler (izole betonlar) başlığı altında toplamak mümkündür. İzole refrakterler başlığı altında toplanmalarının nedeni, işlevlerinin farklı olmasındandır. Başlıca türleri şunlardır [24]:

- İzole tuğlalar
- İzole plakalar
- İzole sıva ve kaplama malzemeleri
- İzole betonlar
- Mastik, yapıştırıcı ve harçlar
- Seramik fiber malzemeler

Teknolojik olarak geçmiş dönemlerde çoğunlukla tuğla refrakterler kullanılmıştır. Ancak demir-çelik sanayisinin gelişmesi ve bu sanayinin değişik refrakter malzeme gereksinimi, teknolojiyi dökülebilir refrakterlerin üretimine sevketmiştir. Özellikle dökülebilir refrakterler ile örüm ve onarım işlemlerinin tuğla refrakterlere göre daha kolay olması ve daha kısa sürede gerçekleşmesi bu sektörde dökülebilir refrakterlerin yaygınlaşmasını sağlamıştır. Tuğla refrakterlerdeki işçilik masrafının yerini dökülebilir refrakterlerde titreşim için gerekli teçhizatı almıştır. Ancak halen dökülebilir refrakterlerin titreşim için gerekli teçhizat masrafını yok etmek için araştırmalar sürmektedir. Bu araştırmalarda en çok ön plana “kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterler” çıkmaktadır. Bu malzeme dökülebilir refrakterler sınıfına girmektedir ve bu malzemeyi dökülebilir refrakterler içinde sivrilten özelliği tane boyut dağılımının ve içindeki akışı arttırıcı bileşenlerinin farklılığıdır. Bu sayede akış özellikleri gelişmektedir.

3. DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLER

3.1. Genel Özellikleri ve Uygulamaları

Dökülebilir refrakterler; iri ve ince refrakter agregaların karışımının, bağlayıcı nitelikte olan daha ince vizkoz bir faz sayesinde bağ yaptığı ve genellikle çimentonun hidrasyon reaksiyonları sonucu sertleşmesiyle taneler arasındaki bağ kuvvetinin olduğu yapı olarak tanımlanabilir[16, 23].

Dökülebilir refrakterlerin ana bileşenleri; refrakter agregası, hidrolik bağlayıcı görevindeki yüksek alüminalı çimento, dispersan ve su şeklinde sayılabilir. Ayrıca dökülebilir refrakterlere, reaktif alümina, mikrosilika ve kalsine alümina gibi süperinceler ilave edilmektedir. Bu süperinceler, taneler arasında paketlenme ve reolojik özelliklerini arttırmakla beraber üretilen malzemenin servis sıcaklığında performansını da arttırmaktadır. Bunların yanında malzemenin reolojik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli rol oynayan dispersan, yağ karışımının homojen olarak kalıp içerisinde yayılmasını sağlamaktadır. Dispersan kalitesi doğrudan kullanılan su miktarını etkilediğinden son ürün kalitesi açısından bu sistemlerin en önemli bileşenlerindendir.

Dökülebilir refrakterler çimento içeriğine göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır;

- Geleneksel Dökülebilirler ($\%CaO > 2,5$)
- Düşük çimentolu dökülebilirler ($1 < \%CaO < 2,5$)
- Çok düşük çimentolu dökülebilirler ($0,2 < \%CaO < 1,0$)
- Çimentosuz dökülebilirler ($\%CaO < 0,2$) [9, 29]

Dökülebilir refrakterler mekanik etki altında (vibrasyon) tanelerin hareketi ile kalıplar içerisinde şekil alan tiksotropik koloidal sistemlerdir. Bu sistemlerde optimum tane boyut dağılımları ile çalışılarak maksimum paketlenme ve düşük

poroziteli yoğun yapı hedeflenmektedir. Son dönemlerde bu refrakter türlerinin reolojik özellikleri önem kazanmış olup, titreşim uygulanmadan yerçekiminin etkisiyle kalıp içerisinde yayılıp şekil alabilen kendi kendine akan dökülebilir refrakterler araştırma konusu olmuştur.

Tuğla refrakterler ile hidrolik bağlı dökülebilir refrakter arasında proses açısından iki temel farklılık bulunmaktadır. Biri şekillendirme sırasında kullanılan su miktarı diğeri ise bağlayıcının rolüdür. Tuğla üretiminde, refrakter karışımı %0,5-3 oranında su ilavesi ile plastik hale getirilir ve sonra bağlayıcı ilavesi ile yüksek basınç altında kalıplarda preslenerek şekillendirilir. Sonraki pişirme kademesinde seramik bağ oluşur. Hidrolik bağlı geleneksel dökülebilir refrakterler %8-15 oranında su bulundurur ve bu şekilde yeterli akış özellikleri elde edilerek kalıpta yerleşir. Çimento ile reaksiyona giren su hidrolik bağın oluşmasını sağlar ve böylece oda sıcaklığında istenen mekanik dayanım elde edilir. Seramik bağ, dökülebilir refrakter 1000°C'nin üzerinde pişirildiğinde oluşur. Dökülebilir refrakterlerin şekillendirmesi sırasında ilave edilen suyun %0-5 arası refrakterlerin yapısındaki boşluklara dolar ve hidrolik bağa bir katkısı yoktur. %6-10 arası su çimento ile reaksiyona girer ve hidrolik bağ oluşturur. Kalan %2-6 su oranı şekillenme ve yoğunlaşmayı kolaylaştırır[18].

Dökülebilir refrakterlerin, pişmiş tuğla refrakterlere oranla birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar;

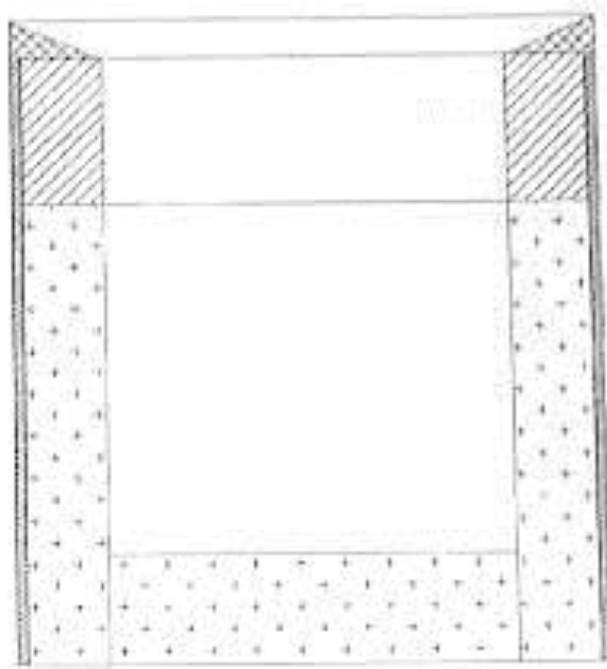
- Termal şok dayanımının yüksek olması,
- Şekillendirme ve ısıtma masrafının olmaması,
- Örüm kolaylığı ve örümün ucuz olması,
- Değişik şekillerde kullanılabilmesi,
- Tuğlaları birleştirmek için harç kullanılmaması
- Kolayca onarılabılır olması
- Yüksek sürünme Direnci
- Yüksek aşınma Direnci
- İşçi masraflarının azalması[33, 20, 34, 30, 31, 4]

Dökülebilir refrakterlerin birçok avantajı olmasına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- Yüksek görünür porozitesi
- Mukavemetinin tuğlaya oranla az olması
- Örüm sırasında fazla gürültü çıkması

Dökülebilir refrakterler genel olarak çelik endüstrisinde ve diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır. Aşağıda dökülebilir refrakterlerin kullanıldığı yerler, tablo 3.1’de dökülebilir refrakterin genel uygulamaları, şekil 3.1’de dökülebilir refrakterin pota uygulaması gösterilmiştir.

- Sürekli döküm tandişleri,
- Isıtma fırınları,
- Kok fırınları,
- Yüksek fırın döküm yerleri,
- Elektrik ark fırınları,
- Oksijen lansları, şnokeller ve pota astarları,
- Alüminyum ergitme fırınları
- Petrokimya endüstrisi [2, 35, 11]



[+] Alümina-Spinel dökülebilir refrakter

Şekil 3.1. Potada dökülebilir refrakter uygulaması [21]

Tablo 3.1. Dökülebilir refrakterlerin genel uygulama alanları [5]

Refrakter Matriks	Kimyasal Bileşim (%)				1500°C için elde edilen test değerleri			Uygulama alanları
	Al ₂ O ₃	MgO	SiC	H ₂ O	Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	Görünür porozite (%)	Soğukta basma dayanımı (N/mm ²)	
Korund	98	-	-	5,5-6,5	3,03	19,8	110	Çelik endüstrisi
Korund Spinel	95	3	-	6,3-6,9	2,95	20,5	150	Çelik endüstrisi
Korund Spinel	92	6	-	5,7-6,5	3,00	20,1	170	Monolitik pota örümü
Korund SiC/C	82	-	15	5,5-6,5	3,10	15,5	120	Yüksek fırın yollukları
Boksit	90	-	-	6,3-6,8	3,03	16,5	110	E.A.F
Andalusit	67	-	10	6,2-6,7	2,77	15,7	100	Tandış astarları
Boksit/SiC	80	-	15	6,0-7,0	2,93	16,7	100	Bakır endüstrisi
Korund/SiC	48	-	50	6,2-6,8	2,85	16,2	100	Demir dışı metal endüstrisi

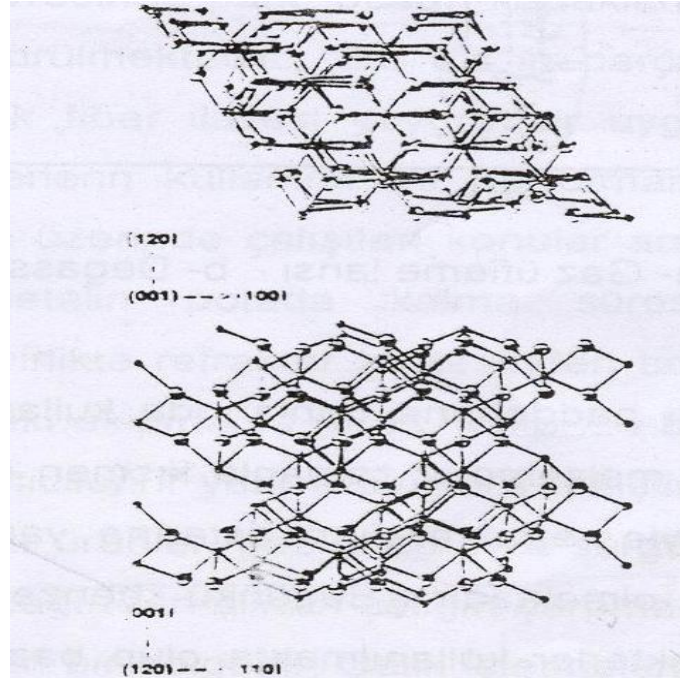
3.2. Dökülebilir Refrakterlerin Bileşenleri

3.2.1. Tabular Alumina

Tabular alumina, Bayer Prosesi'ndeki boksitten gelen alüminyum hidroksitten elde edilmektedir. Alüminyum hidroksit, yaklaşık 2,5 cm çapında peletler haline getirilip kurutulduktan sonra, bu peletler bir şaft fırınına beslenmektedir. Bu peletlerin fırının alt kısımlarına düşerken yavaşça ısınması sağlanmaktadır. Alüminyum hidroksit, alüminanın ergime sıcaklığının hemen altında, yaklaşık 2035°C'de tutulmaktadır. Altıgen, tablet şekilli alümina kristalleri oluşmakta ve bu alümina kristalleri, 40 mikrondan 500 mikrona kadar büyümektedir. Bu yüksek sıcaklıktaki sinterleme işlemi, büyük kristallerin porları doldurmasını ve teorik yoğunluğa yakın bir yoğunluğa ulaşmasını sağlamaktadır[36, 14].

Tabular alüminanın üretiminde sinterleşmeyi ve yoğunlaşmayı teşvik edici kontrollü bir yüzey alanına sahip kalsine alümina da kullanılır. Kalsine alümina peletleme işlemi ile “yeşil top” denilen 25-30 mm çapında tabular alümina kürelerine dönüştürülür. Daha sonra kurutulan küreler 2000⁰C civarında şaft fırında sinterleşme işlemine tabi tutulur. Sinterlenen tabular küreleri kırma, manyetik ayırma ve klasifikasyon işlemleri ile çeşitli tane boyutlarında paketlenir[8].

Burada adından bahsedilen alümina kristalleri, $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$ (Korund) dur. Tabular alümina ismini tipik olarak 50 mikrondan başlayıp 400 mikronun üzerine kadar çıkabilen, tablet şeklinde iri korundum kristallerinden almaktadır. Korund, alüminyum oksitler arasında termodinamik olarak en kararlı formdur. Korund, elmas ve sentetik olarak elde edilen elmas formundaki birkaç bileşikten sonra en sert yapıdır ve MOH skalasında 10 sertlik derecesindeki elmastan sonra, 9 sertlik derecesindedir. Korund, hegzagonal-rombohedral yapıda kristallenmektedir ve bu son derece sıkı paketlenmiş latis yapısı, alüminanın yüksek sertlikte olmasını sağlamaktadır[8, 13]. Şekil 3.2’de korundun kristal yapısı ve şekil 3.3’te alümina tanelerinin yüksek alüminalı dökülebilir refrakterde SEM görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.2. Korundun kristal yapısı [13]



Şekil 3.3 Yüksek alüminalı dökülebilir refrakterde alümina tanelerinin SEM görüntüsü [29]

Tabular alümina, yüksek yoğunluk, düşük porozite, düşük geçirgenlik, yüksek refrakterlik özellikleri ve iyi kimyasal özellik gösteren bir hammaddedir. Çok iyi termal şok direnci göstermektedir. Bu nedenle alümina hammaddeleri arasında ticari olarak en fazla kullanılan hammaddelerden biridir. Tablo 3.2 de bazı ticari alüminaların fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Bazı ticari alüminaların fiziksel ve kimyasal özellikleri [14]

Kimyasal Analiz	Alcoa T-60	C-E Minerals T-1061
Al ₂ O ₃	99,4	99,8
SiO ₂	0,02	0,04
Fe ₂ O ₃	0,001	0,04
Na ₂ O	Yok	0,04
Fiziksel Özellikler		
Spesifik Yoğunluk(g/cm ³)	3,56	3,53
Porozite(%)	2,93	3-10
Su absorpsiyonu(%)	0,83	1-4

3.2.2. Kalsine ve Reaktif Alümina

Kalsine ve reaktif alümina, dökülebilir refrakterlerde, refrakterlerin fiziksel ve reolojik özelliklerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu malzemelerinde tane büyüklükleri, refrakter bünyenin akışkanlık ve yerleşim özellikleri ile kimyasal reaksiyonların gerçekleşebilmesi konularında önemli bir faktördür.

Bayer prosesi sırasında elde edilen hidratlar bünyelerinde yüksek oranda soda içerirler ve kalsine alümina üretimi için 1400°C civarında döner fırınlarda kalsinasyon işlemine tabi tutulurlar. Burada kalsinasyon işlemi hidrat fazının korund fazına dönüşmesini sağlamaktır[8]. Bayer prosesi sırasında meydana gelen hidratlarda yüksek oranda soda bulunur ve bu nedenle kalsine alüminanın sınıflandırılmasında soda içeriği göz önüne alınır. Kalsine alümina tiplerinin kimyasal bileşimleri tablo 3.3 de verilmiştir.

Tablo 3.3. Kalsine alümina tiplerinin kimyasal bileşimleri [19]

% - Bileşim	Standart tip	Düşük Soda
SiO ₂	0,03	0,11
TiO ₂	Yok	Yok
Al ₂ O ₃	99,28	99,62
Fe ₂ O ₃	0,01	0,02
CaO	0,03	0,01
MgO	0,05	Yok
Na ₂ O	0,36	0,03
K ₂ O	Yok	Yok

Reaktif alümina çok ince taneli ve düşük soda kalsine alümina sınıfında yer almaktadır. Çok ince taneli reaktif alümina kalsine alüminaya oranla daha büyük yüzey alanına sahiptir. Yüzey alanı büyüdükçe α – Al₂O₃ miktarı azalmaktadır. Reaktif alümina ince kristalli yapısı ile sinterleşme sırasında yoğunlaşmayı teşvik eder ve sinterleşmeyi hızlandırır[27].

Kalsine ve reaktif alümina ince taneli olmalarından dolayı matriste bulunan ince taneli silika ile reaksiyona girerek yüksek refrakterlik özelliklerine ve kuvvetli bağlarla sağlanan yüksek mekanik dayanımına sahip müllit fazının oluşumunu gerçekleştirirler. Ayrıca dökülebilir refrakterlerde akışkanlık ve kendi kendine akabilme özelliklerinde gelişme sağlarlar. Kendi kendine akabilen refrakterlerin akıcılığının gelişmesinde en önemli rolü, kalsine alümina oynamaktadır. Genelde partikül boyutları 0,1 ile 0,2 mikron arasında değişmektedir. Bu yönüyle de, dökülebilir refrakter yapılarında boşlukları doldurabilmekte ve bünyenin su ihtiyacını azaltmaktadır[2].

3.2.3. Ergitilmiş (Fused) Alümina

Ergitilmiş alümina, alüminalı hammaddelerin elektrik ertitmesiyle elde edilmektedir. Bu ertitme işleml genel olarak elektrik ark fırınlarında gerçekleştirilmektedir. Ergitilmiş ürün ocaktan alındıktan sonra ingot haline dökülür, kırılır ve uygun tane boyutlarına öğütüldükten sonra pazara sunulur. Ergitilmiş alüminanın SEM’de görüntüsü şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Ergitilmiş alüminanın SEM görüntüsü[1]

Ergitilerek elde edilen alüminalar, beyaz ertitilmiş alümina ve kahverengi ertitilmiş alümina olarak ikiye ayrılmaktadır. İkisinin arasındaki temel fark, kahverengi ertitilmiş alümina üretiminde başlangıç malzemesi olarak boksit kullanılması, beyaz ertitilmiş alümina üretiminde ise Bayer prosesinden gelen alüminanın kullanılmasıdır[19].

Kahverengi ertitilmiş alümina 1650⁰C sıcaklığına kadar kullanılabilirler. Bu sıcaklığın üstünde alüminyum titanat varlığına bağlı olarak taneler şişmeye başlarlar. Porozitesi çok düşüktür ve yüksek yoğunluğa sahiptir(3,94-3,97). Tablo 3.4 de kahverengi ertitilmiş alümina kimyasal bileşimleri görülmektedir.

Tablo 3.4. Kahverengi ertitilmiş alüminaların kimyasal bileşimleri [2]

% - Bileşim	1	2	3	4
Al ₂ O ₃	94,3	96,3	97,8	97,2
SiO ₂	1,1	0,56	0,49	0,54
TiO ₂	2,45	2,66	1,22	1,63
Fe ₂ O ₃	1,5	0,1	0,23	0,29

Beyaz ergitilmiş alümina, kahverengi ergitilmiş alüminaya oranla daha yüksek saflık derecesine ve daha düşük emprüteye sahiptir. Yüksek refrakterlik özelliği, yüksek aşınma dayanımı, yüksek kimyasal özellik gösterirler. Tablo 3.5’de beyaz ergitilmiş alümina kimyasal ve fiziksel özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 3.5. Beyaz ergitilmiş alüminanın kimyasal ve fiziksel özellikleri [2]

Kimyasal Analiz	%
Al ₂ O ₃	99,64
SiO ₂	0,06
TiO ₂	Yok
Fe ₂ O ₃	0,03
CaO	0,03
MgO	0,07
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,02
Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	3,58
Görünür porozite (%)	7,8

3.2.4. Kalsine Boksit

Dökülebilir refrakterlerde yaygın olarak kullanılan alümina hammaddesidir. Diğer alümina hammaddeleri ile karşılaştırıldığında en yaygın olarak kullanılmasının sebebi fiyat olarak diğerlerine göre daha ucuz olmasıdır.

Bayer prosesi ile kalsine alümina veya metalik alüminyum eldesinde kullanılan boksit cevheri, demir bakımından zengindir ve refrakter olarak kullanılmazlar. Refrakter uygulamalarında kullanılan boksit, alüminaca zengindir ve az emprüte içerir. Yapısında ana bileşen olarak boksit bulunan düşük çimentolu dökülebilir refrakterler 1500^oC nin üzerinde pişirildikleri zaman genellikle büzülme gösterirler[2]. Boksit minerallerinin kimyasal bileşimleri tablo 3.6 da gösterilmektedir.

Tablo 3.6. Boksit minerallerinin kimyasal bileşimleri [2]

% - Bileşim	Böhmit	Gibsit	Diaspor
Al ₂ O ₃	58,1	60,1	72,3
SiO ₂	2,1	4,1	7,15
Fe ₂ O ₃	25,0	2,82	2,60
TiO ₂	2,67	2,65	3,22
CaO	0,1	0,10	0,20
MgO	0,1	0,20	0,20
Diğer emprüteler	11,8	29,9	14,3

3.2.5. Mikrosilika

Mikrosilika, ferrosilisyum ve metalik silisyum üretimleri sırasında elde edilen bir yan üründür. Silisyum ve ferrosilisyum üretimi, büyük elektrik ark fırınlarında, 2000°C'nin üzerinde silikanın redüksiyonu ile gerçekleşmektedir. Kullanılan hammaddeler, kuvars ile kok veya odun kömürüdür. Ferrosilisyum üretiminde de ayrıca demir kaynağı ilave edilir. Bu hammaddeler kaynağında birtakım redüksiyon reaksiyonları oluşmaktadır ve SiO gazı açığa çıkmaktadır. Bu gaz hava tarafından oksitlenerek SiO₂'yi oluşturur. Bu silika mikrosilika olarak bilinir. Makroskopik olarak bakıldığında, mikrosilika, rengi beyazdan koyu gri'ye kadar değişen ince bir tozdur. Bu renk değişimi direk malzemenin içerdiği karbon miktarına bağlıdır [2, 17].

Mikrosilika taneleri küresel şekillidir ve 0,02 mikrondan 0,4 mikrona kadar çaplarda elde edilebilir. 1 ile 25 m²/g arasında spesifik yüzey alanına sahip olabilirler. Standart mikrosilikanın yoğunluğu 10-20 kg/m³ civarındayken, yoğunlaştırılmış formda bu yoğunluk değeri 500-700 kg/m³ civarına kadar artabilmektedir. Bazı mikrosilika türlerine ait kimyasal bileşim oranları tablo 3.7'de ve mikrosilikanın yüksek alüminalı dökülebilir refrakterdeki görüntüsü şekil 3.5'te gösterilmiştir.

Mikrosilika dökülebilir refrakterin reolojik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesinde çok önemli rol oynamaktadır. Gerek müllit oluşumunda gerekse malzemenin içerisindeki porları doldurmakta etkili bir malzemedir.

Tablo 3.7. Mikrosilikaların kimyasal bileşimleri [2]

Bileşen	Metalik silisyum üretiminden elde edilen mikrosilika	%75 Ferrosilisyum üretiminden elde edilen mikrosilika
SiO ₂	94-98	85-95
C	0,2-1,5	0,8-2,5
K	0,2-0,7	0,5-3,5
Na	0,1-0,3	0,2-1,5
Mg	0,1-0,4	0,5-2,5
Ca	0,05-0,3	0,1-0,5
Al	0,05-0,2	0,1-1,0
Fe	0,01-0,3	0,1-2,5
Ti	0-0,01	0,01-0,03
P	0,01	0,02-0,1
S	0,1-0,2	0,05-0,5



Şekil 3.5. Yüksek alüminalı dökülebilir refrakterde mikrosilika tanelerinin görüntüsü[29]

3.2.6. Alümina – Magnezya Spinel

Son senelerde, özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen malzemelerden biri de alümina-magnezya spinel olmuştur. Alümina-magnezya spinel malzemesinin en önemli avantajları şunlardır;

- Termomekaniksel işlemlere yüksek direnç göstermesi
- Düşük termal genleşme
- Çevresel değişimlere yüksek direnç göstermesi
- İkincil oksit fazlarının düşük olması nedeniyle iyi refrakterlik özelliği göstermesi
- Yüksek saflık [2]

Alümina-Magnezya spinel, Bayer prosesi alüminası ve magnezyanın sinterlenmesi veya ikisinin beraber bir ark ocağında ergitilmesi ile üretilmektedir. Spinelin bileşimi mineralin içerdiği silika miktarına bağlıdır. Tablo 3.8 de Alümina-Magnezya Spinel kompozisyonları verilmiştir.

Tablo 3.8. Alümina-Magnezya Spinel Bileşimleri [2]

	1	2	3	4	5
Kimyasal Bileşim					
Al ₂ O ₃	66,0	70,4	74,3	20	90,0
MgO	33,0	28,5	25	76	9
Fe ₂ O ₃	<0,01	0,23	<0,01	<0,01	<0,01
CaO	0,4	0,1	0,28	0,3	0,25
SiO ₂	0,09	0,22	0,2	0,06	0,05
Fiziksel Özellikler					
Yoğunluk (g/cm ³)	3,27	3,4	3,3	3,25	3,3
Görünür porozite(%)	2,0	3,9	7,5	2,0	2,5
Mevcut Fazlar					
Baskın Faz	Spinel	Spinel	Spinel	Spinel	Spinel
İkincil Faz	Periklas	Periklas	Korund	Yok	Korund

3.2.7. Kalsiyum Alüminat Çimentosu

Kalsiyum alüminat çimentosunda ana bileşen kireç ve alümina bileşikleridir. Bu tip çimentolar, dökülebilir refrakterlerde hidrolik bağlar oluşmasında en önemli bağlayıcı maddelerdir. Dökülme işleminden 6 ile 24 saat arasında yüksek mekanik dayanım özelliklerine sahip olurlar[2].

Kalsiyum alüminat çimentosunun üretimi sinterleme işlemi ile veya klinker prosesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Kireç kaynağı olarak nispeten daha saf olan kireç taşları tercih edilmektedir. Yüksek saflıkta kalsiyum alüminat çimentosu için alümina kaynağı olarak kalsine alümina kullanılmaktadır. Orta ve düşük saflıkta çimento eldesi içinde düşük emprüte içeren boksit kullanılmaktadır. Ticari kalsiyum alüminat çimentoları bileşim aralıkları tablo 3.9 da verilmiştir.

Tablo 3.9. Ticari Kalsiyum Alüminat Çimentoları [2]

% - Bileşim	Düşük Saflık	Orta Saflık	Yüksek saflık
Al_2O_3	39-50	55-66	70-90
Fe_2O_3	7-16	1-3	0-0,4
CaO	35-42	26-36	9-28
SiO_2	4,5-9	3,5-6	0-0,3

Çimentonun katılaşmasını kontrol eden faktör, çimentodaki fazların su ile reaksiyona girmesi ve meydana gelen hidrasyon reaksiyonları sonucunda bağların oluşmasıdır. Monokalsiyum alüminat, kalsiyum alüminat çimentolarında bulunan en önemli fazdır. Bu fazda hidrasyon reaksiyonları oldukça hızlı bir şekilde meydana gelebilmektedir ve bunun sonucunda hızlı bir katılaşma sağlanabilmektedir. Bu da endüstriyel kullanımlarda çok önemli bir avantajdır. CA dışında $CA_{12}A_7$ ve CA_2 de katılaşma sırasında alümina çimentosunun mekanik özelliklerini geliştirici etki yapmaktadır. Özellikle $CA_{12}A_7$ 'nin varlığı, düşük çimento lu dökülebilir refrakterlerin hızlı katılaşabilme özelliklerini belirgin bir şekilde etkilemektedir. Tablo 2.10 da kalsiyum alüminat çimentolarında meydana gelen fazlar ve hidrasyon oranları görülmektedir.

Çimento bağlayıcılı alümina refrakterlerin yerleşimi sırasında malzeme, ekipman, su içeriği ve sıcaklığı, karışımın sağlanması, ortam sıcaklığı ve nemi, ısıtma rejimi dikkat edilmesi gereken faktörlerdir. Özellikle sıcaklık, bu tip refrakterlerde en önemli parametredir ve oluşacak fazlar dahil, prosesin her aşamasında etkilidir. Genel olarak ortam sıcaklığının 21 ile 35°C arasında tutulması gerekmektedir.

Her ne kadar dökülebilir refrakterlerde çimento hidrolik bağlayıcı olarak kullanılsa da, çimentonun içerisindeki CaO, refrakterin yüksek sıcaklıktaki özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle dökülebilir refrakterlerde çimento oranı

azaltılmaya çalışılmaktadır. Modern refrakter bileşimlerinde az oranlarda kalsiyum alüminat çimentosu kullanılmaktadır.[30, 38].

Tablo 3.10. Kalsiyum Alüminat çimentolarında oluşan fazlar ve hidrasyon hızları[2]

Rölatif hidrasyon hızı	Düşük saflıkta	Orta saflıkta	Yüksek saflıkta
Hızlı	CA C ₁₂ A ₇ CA ₂ C	CA C ₁₂ A ₇ CA ₂ C	CA C ₁₂ A ₇ CA ₂
Yavaş	C ₂ S C ₄ AF C ₂ AS	C ₂ S C ₄ AF C ₂ AS	
Hidratlaşmayan	CT A	CT A	A

3.3. Dökülebilir Refrakterlerin Bileşenleri

3.3.1. Porozite ve Hacim Ağırlığı

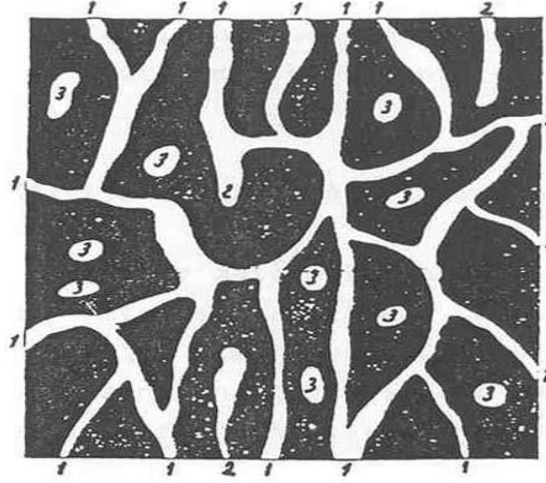
Genel olarak refrakter malzemeler katı taneler ve bunlar arasındaki porlar olarak düşünülebilir. Refrakter yapısında bulunan porlar, şekillerine göre üçe ayrılmaktadır.

- 1- Açık porlar (kanallar)
- 2- Tek taraflı açık porlar (keseler)
- 3- Kapalı porlar (kabarcıklar)

Açık porlar hava ve birbirleriyle bağlantılı porlardır. Kapalı porlar ise birbirlerinden bağımsız olarak yapı içerisinde dağılmışlardır. Şekil 3.6’da refrakterlerde görülen por şekilleri gösterilmektedir.

Yoğun refrakter üretiminde düşük poroziteli ürünler hedeflenmektedir. Porların şekli, tipi ve miktarı ürünün refrakterlik özelliğini doğrudan etkilemektedir. Refrakterlerde genellikle görünür porozite ölçülür ve porozite özelliği buna göre belirlenir. Sıvının yapı içerisinde nüfuz edebildiği boşluklar açık porozite miktarının belirlenmesine

yardımcı olur. Açık porozite özellikle refrakterin korozyona karşı dayanım özellikleri açısından önem kazanmaktadır. Kapalı porozite ise bazı refrakter özellikleri açısından yararları olan bünyede bulunması istenen bir özelliktir[22].



Şekil 3.6. Refrakterlerde görülen por şekilleri [22]
1) Kanallar 2) Keseler 3) Kabarcıklar

3.3.2. Partikül Paketlenmesi

Dökülebilir refrakterlerin ana yapısı iri taneli agrega içeriğinden etkilenmektedir. İri taneler arasındaki boşluklar ince, çok ince ve çimento tanelerinden oluşan viskoz bir sıvı ile dolmaktadır. Burada çimento bağlayıcı görevini taşır ve sertleşme sonrası dökülebilir ürünlerin katı faza geçmesini sağlar. Aynı zamanda ince taneli yapısı ile de paketlenme açısından önem taşımaktadır[16].

Maksimum partikül paketlenmesi durumunda viskozite minimuma düşecektir. Maksimum paketlenme geniş tane boyut dağılımları ile sağlanabilir. Öte yandan paketlenmenin maksimum olması durumunda tanelerarası temas artacağından yeterli akış özelliklerine ulaşmak için sistem dıştan mekanik bir etkiye ihtiyaç duyabilir. Bunun nedeni ince tanelerin irilerin arasını doldurarak yoğun bir yapıya ulaşması ve tanelerin birbiri üzerindeki hareketinin sınırlanmasıdır. İri tanelerin miktarı böyle bir sistemdeki akış özelliklerini belirleyen önemli parametrelerden biridir. İri tane oranının azalmasıyla akış özellikleri gelişecektir[25].

Tane paketlenmesi üzerine yapılmış iki temel çalışma, Furnas ve Andreasen'in çalışmalarıdır. Her iki bilim adamının çalışmaları da 1920'lerin sonlarında ve

1930'ların başlarında yayınlanmıştır. Furnas ABD'de, Andreasen ise Danimarka'da çalışmıştır. Andreasen'in çalışması, dağılımda bütün tane boyutlarının gösterildiği sürekli tane boyut dağılımlarının paketlenmesine temel oluşturmaktadır. Furnas'ın çalışması ise, farklı boyutlu tanelerin paketlenmesine temel oluşturmaktadır [6].

Furnas'ın çalışması, tane paketlenmesine farklı bir yaklaşım getirmiştir. Furnas'ın yaklaşımı daha çok ince tanelerin paketlenme üzerine etkisi ile ilgilenmektedir. Furnas'a göre en iyi paketlenme, incelerin irilerin arasına girerek boşlukları doldurması yoluyla gerçekleşebilir. Bu nedenle ince tanelerin sistemdeki varlığı, Furnas denkleminin temelini oluşturmaktadır. Eğer üç farklı boyut varsa; orta boyutlu taneler iri taneler arasındaki boşlukları tamamen doldurmalıdır. İnce taneler ise, orta ve iri boyutlu taneler arasındaki boşlukları tamamen doldurmalıdır. Paketlenmeyi optimize etmek için iri tanelerin çaplarının ince tanelerinkine oranı ideal olarak çok büyük olmalıdır. Furnas Denklemi aşağıda belirtilmiştir [6, 7]

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{r^{\log D} - r^{\log D_s}}{r^{\log D_L} - r^{\log D_s}} \quad (3.1)$$

D = Tane boyutu

D_s = Karışımındaki en küçük tane boyutu

D_L = Karışımındaki en büyük tane boyutu

CPFT = D'den daha ince olan tanelerin kümülatif yüzdesi

r = Bir elekteki tanelerin hacminin bir sonraki elekteki tanelerin hacmine oranı

Andreasen, tanelerin en sıkı şekilde paketlenmesi için var olan yöntemleri değerlendirirken hem Furnas'ın, hem de Fuller ve Thompson'ın çalışmalarından bahsetmiştir. Fuller ve Thompson, beton sistemlerindeki en yoğun paketlenmeyi bulmaya çalışırken, Furnas'ın çalışması belirli bir sisteme yönelik değildir [6].

Andreasen, Furnas'ın tersine, iri tanelerin paketlenme üzerine etkisini incelemiştir. Furnas denklemi, Andreasen'e göre daha karmaşık olup tamamen teorik temeller üzerine kurulmuştur. Andreasen'in yayını ise yarı deneysel bir çalışma olup, tane boyut dağılımlarını reel olarak ele almaktadır. Andreasen denkleminin bu özelliği pratik olarak daha kullanılabilir gibi gözükmesine neden olmuştur. Çalışmasının bu noktaya kadar olan kısmı, teorik bir çalışma olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte,

yayınında birçok deneysel çalışma da bulunmaktadır. Andreasen'in paketlenme teorisine ait olan denklemi şöyledir [6, 7, 8] :

$$\frac{CPFT}{100} = \left(\frac{D}{D_L} \right)^n \quad (3.2)$$

n = Maksimum yığın yoğunluğunun bir sistemi için bileşen boyutlarının sayısı (Tane boyut dağılım modulu)

Furnas'a göre, bir eleğin üzerindeki malzeme miktarının, altındaki eleğin üzerindeki malzeme miktarına oranı sabittir. Dağılımını oluşturmak için önce iri tanelerle başlamış, sonra gittikçe daha ince taneler ilave etmiştir. Andreasen ise, dağılımını oluşturmak için önce ince tanelerle başlamış, sonra gittikçe daha iri taneler ilave etmiştir [6].

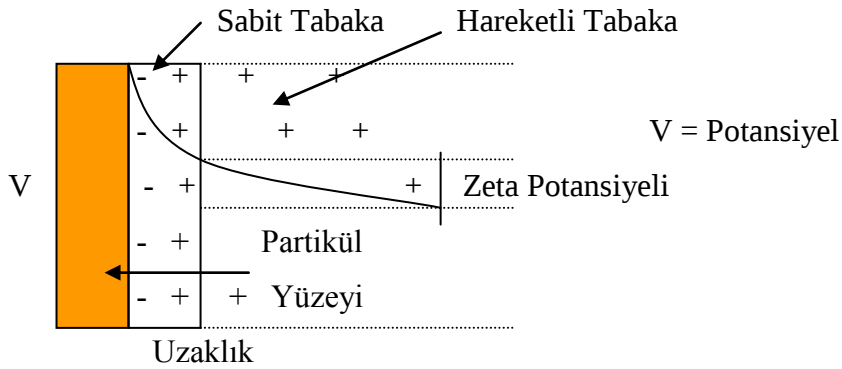
Andreasen denklemi, en küçük tane boyutunu (D_s) içermemektedir. Bu yüzden Andreasen denklemi, en küçük boyut tarafında sonsuzluk ifade etmektedir. Deneysel dağılımlarını oluşturmadaki problemin nedeni budur. Çünkü gerçek bir tane boyut dağılımının sonu vardır. Andreasen, dağılımının ilk boyut aralığından daha küçük taneler içermesi gerektiği gerçeğini gözardı etmiştir. Bu problemin çözümüne yönelik olarak Andreasen denklemi ile Furnas denklemi birleştirilerek yeni bir bağıntı bulunmuş ve buna da “Değiştirilmiş Andreasen Denklemi” veya “Dinger&Funk Denklemi” adı verilmiştir. Bu denklem, en küçük tane boyutu (D_s) ilave edilerek Andreasen'in çalışmasının değiştirilmesi ve Furnas denkleminin matematiksel olarak yeniden gözden geçirilmesiyle elde edilmiştir [6, 7] :

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{D^n - D_s^n}{D_L^n - D_s^n} \quad (3.3)$$

3.3.3. Reolojik Özellikler

Kolloidal sistemlerde dağılmış partiküller üzerindeki yüzey yükü, çözeltideki kendine yakın iyonların dağılımını etkiler. Zıt yüklü iyonlar, parçacık yüzeyine doğru çekilir, aynı yüklü iyonlar ise yüzeyden itilir.. Sonuç olarak katı partikül ile

sıvı ara yüzeyinde “Elektriksel çift tabaka” meydana gelmektedir. Elektriksel çift tabaka başlıca iki kısımdan oluşmaktadır. Çift tabakadaki zıt yüklü iyonlar ara yüzeye elektrostatik olarak çekilir. Bu çekme, bir konsantrasyon farkı oluşturur. Bunun sonucu, iyonlar parçacık yüzeyinden konsantrasyonun daha düşük olduğu bölgeye yayılır. Bu iki zıt olay (yayınma- elektrostatik çekme) geçiş tabakasını oluşturur. Zıt yüklü iyonların konsantrasyonu, partikül yüzeyinde çok yüksek olup, katı-sıvı arayüzeyinden itibaren azalır. Potansiyeldeki bu azalmaya “Zeta potansiyeli” adı verilir. Şekil 3.7’de elektriksel çift tabaka ve bu tabakadaki potansiyel düşüşü gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Elektrisel çift tabaka ve potansiyel düşüşü [12]

Elektriksel çift tabaka kalınlığı çözeltideki iyon konsantrasyonuna bağlıdır. İyon konsantrasyonunun artması ile kolloidi nötralize etmek için gerekli pozitif iyon miktarı artar. Pozitif iyon miktarının artması ile zıt iyon konsantrasyonu artmakta, pozitif iyonlar kolloid tarafından yüzeye doğru çekilmektedir. Böylece daha dar bir çift tabaka oluşmaktadır. İyon konsantrasyonunun azalması; örneğin süspansiyonun sulandırılması ile pozitif iyon miktarı azalacağından çift tabaka genişleyecektir. Pozitif iyonların valans değerleri de diğer önemli bir parametredir. Yüksek valanslı Al^{3+} iyonu düşük valanslı Na^{1+} iyonundan koloidal yükü nötralize etmede daha etkilidir. Bu şekilde ince bir elektriksel çift tabaka meydana gelir[15].

Potansiyel eğrisi itme kuvvetlerinin gücünü göstermek ve hangi mesafede etkili olduklarını anlamak açısından faydalı bir eğridir. Zeta potansiyeli kolloidler arasındaki itme kuvvetini gösterir. Geniş elektriksel çift tabak durumunda zeta potansiyel yüksektir. Çift tabaka daraldıkça zeta potansiyel düşer[15].

Dökülebilir refrakterlerin akış özelliklerini geliştirmek ve kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerin reolojik özelliklerine ulaşmak için, hazırlanan yaş karışımının vizkozitesi düşürülmelidir. Bu özellik ise malzemenin iyi akışı ile sağlanır.. Metal oksit süspansiyonun kararlılığı elektriksel çift tabakanın modifikasyonu ile sağlanabilir. Bu sistemlerde potansiyel belirleyici iyonlar H^+ ve OH^- iyonlarıdır. Çözelti içerisindeki Me-OH yüzey grupları pH değerine bağlı olarak negatif veya pozitif yüklü olabilir. Sistemin sıfır yük noktasındaki pH değerlerinde süspansiyonun akışı kolaylaşır[15].

3.4. Çimento Reaksiyonları ve Kurutma Kademesi

Alumina hammadde esaslı dökülebilir refrakterlerde çimentonun etkisi ile bağlayıcı fazı üzerinde meydana gelen reaksiyonlar sonucu malzemenin dayanımında farklılıklar gözlenmektedir. Çimento çözeltiye girdiğinde çeşitli hidratlar oluşur. Yüksek refrakterliğe sahip karışımlarda genellikle %70 veya %80 Al_2O_3 'lı çimentolar kullanılmaktadır. Bu tür çimentoların emprüte içeriği %1-2'nin altındadır. Düşük ve çok düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerde CaO oranının düşmesiyle birlikte düşük sıcaklıkta ergiyen fazların miktarı azalır ve böylece malzemenin yüksek sıcaklıktaki performansı artar.

En fazla karşılaşılan çimento fazları CA, CA_2 , $C_{12}A_7$, CA_6 ve reaksiyona girmemiş alumina fazları olarak saptanmıştır. Bunlardan aktif olanlar CA, CA_2 , $C_{12}A_7$ fazlarıdır.. Kalsiyum aluminat fazlarının hidrasyon hızları birbirinden farklılık göstermektedir. $C_{12}A_7$ fazı en hızlı sertleşen dolayısıyla en reaktif faz olmakla birlikte, CA ve CA_2 fazları nispeten daha yavaş reaksiyona girerler. Çimento ile su reaksiyona girdiğinde hidrat fazları oluşarak harcın yerleşmesini ve sertleşmesini sağlarlar.

Yüksek çimento içeriği yerleşme için daha fazla su ihtiyacı doğuracağından pişirildiğinde malzeme içerisinde yüksek oranda porozite ortaya çıkacaktır. Bu durum curuf sızmalarına karşın malzemenin direncinin düşmesiyle sonuçlanabilir. Öte yandan silika bazlı hammaddeler kullanıldığında çimentodan gelen CaO ile oluşan reaksiyon sonucu $1200^{\circ}C$ 'den itibaren düşük sıcaklıkta ergiyen fazlar oluştuğu gözlenmektedir. Çimentonun diğer bir etkisi ise hidrat fazlarının seramik

bağ oluşumundan önce parçalanması sonucu 800-1000°C arasında malzemenin dayanımını düşürmektedir[16].

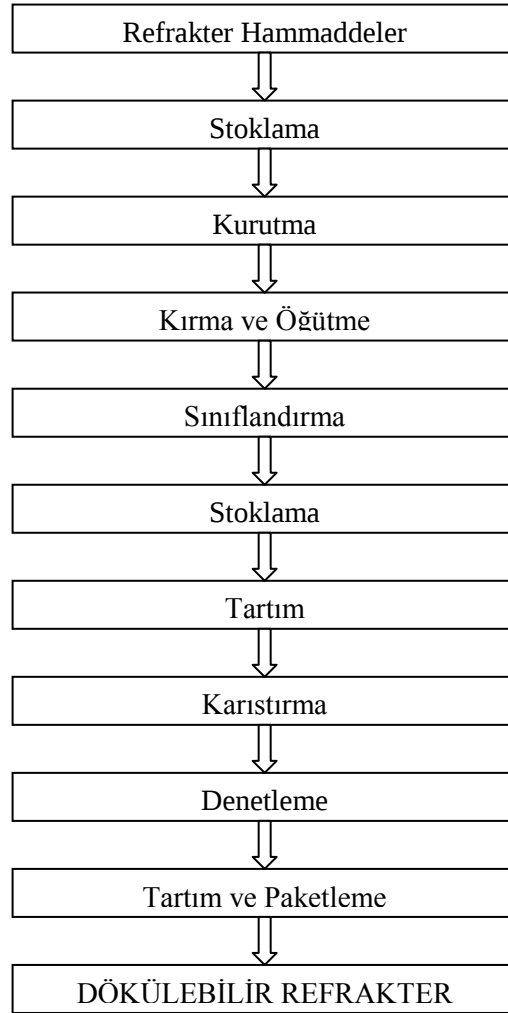
Gelişmiş özellikleri, örüm ve tamir kolaylıkları sayesinde genel refrakter tüketiminde sağladıkları düşüğe rağmen bu tür malzemelerin üretimi sırasında yaşanan en büyük zorluklar biri de kurutma kademesidir. Kurutma ile bünyedeki fiziksel anlamda bağlı suyun tamamı buharlaştırılarak sistemden uzaklaştırılır. Bu tür malzemelerin düşük sıcaklıklarda geçirgenliklerinin oldukça düşük olması malzemede çatlak oluşumuna neden olmaktadır. İç yapıda sıkışan su buharı etkisiyle büyük hacimli parçalarda zaman zaman patlamalarla da karşılaşmaktadır. Bu tür problemleri en aza indirmek için uygulanan bazı yöntemler vardır. Bunlar;

- Isıtma hızı iç bünyedeki buhar oluşumu ile yüzeyden buharlaşma aynı hızda olacak şekilde ayarlanmalıdır. Buhar basıncı refrakter dayanımını aşmamalıdır. Bu durum üretim hızını yavaşlattığından pek istenmeyen bir proses şeklidir.
- Karışıma ilave edilen metalik Al tozu su ile reaksiyona girer ve H₂ gazı açığa çıkar. H₂ gazı iç yapıda buharın dışarı çıkabileceği kanallar oluşturur. H₂ gazı astar yüzeyinde mavi alevler şeklinde kendini gösterir. Eğer H₂ gazı sistemi terkedemezse belli bir H₂/O₂ oranında şiddetli patlamaya yol açabilir.
- Kurutma hızını arttırmak için sisteme ilave edilen organik fiberler erimeden önce çekerler ve buharın çıkabileceği kanallar oluştururlar[3].

3.5. Dökülebilir Refrakterlerin Üretimi

Dökülebilir refrakterlerin üretimi, temel olarak çok geniş bir partikül boyutu dağılımında bulunan agrega ve matris bileşenlerinin karışımını kapsamaktadır. Agregaların ortalama partikül boyutları 75 µm'den 8 mm'ye kadar değişirken, matris bileşenlerinin ortalama partikül boyutları 0,1 µm'e kadar düşebilir. Dökülebilir refrakterden servis şartlarında istenen özelliklerin elde edilmesi için bütün bileşenlerin üniform bir şekilde karışmış olması çok önemlidir. Her seferinde iyi performans elde edebilmek için karışımdaki her partikül boyutunun oranları iyi bir şekilde belirlenerek kaydedilmelidir. Karışımdaki tane boyutu dağılımı ve karışımın homojenliği, dökülebilir refrakterlerin kalitesi üzerinde etkili faktörlerdir[2].

Dökülebilir refrakter üretiminde temelde ilk yapılan işlem kırma ve öğütme işlemleridir. Bu işlemlerle malzeme istenen boyutlara getirilir. Dökülebilir refrakterlerde tane boyutunun ayarlanması çok önemlidir. Kırma ve öğütme işlemlerinden sonra malzeme değişik tane boyutlarına ayrılır. Malzemeyi tane boyutuna ayırmak, üretilcek refrakterin yoğunluk, porozite ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde etkilidir. Tane boyutu ayarlanmasından sonra refrakter agregaları, çimento, su ve gerekli ilaveler karıştırılır. Karıştırma işlemi bittikten sonra, malzeme paketlenip stoklanır. Şekil 3.8’de dökülebilir refrakterlerin üretim akış şeması görülmektedir.



Şekil 3.8. Dökülebilir Refrakterlerin Üretim Akış Şeması[32].

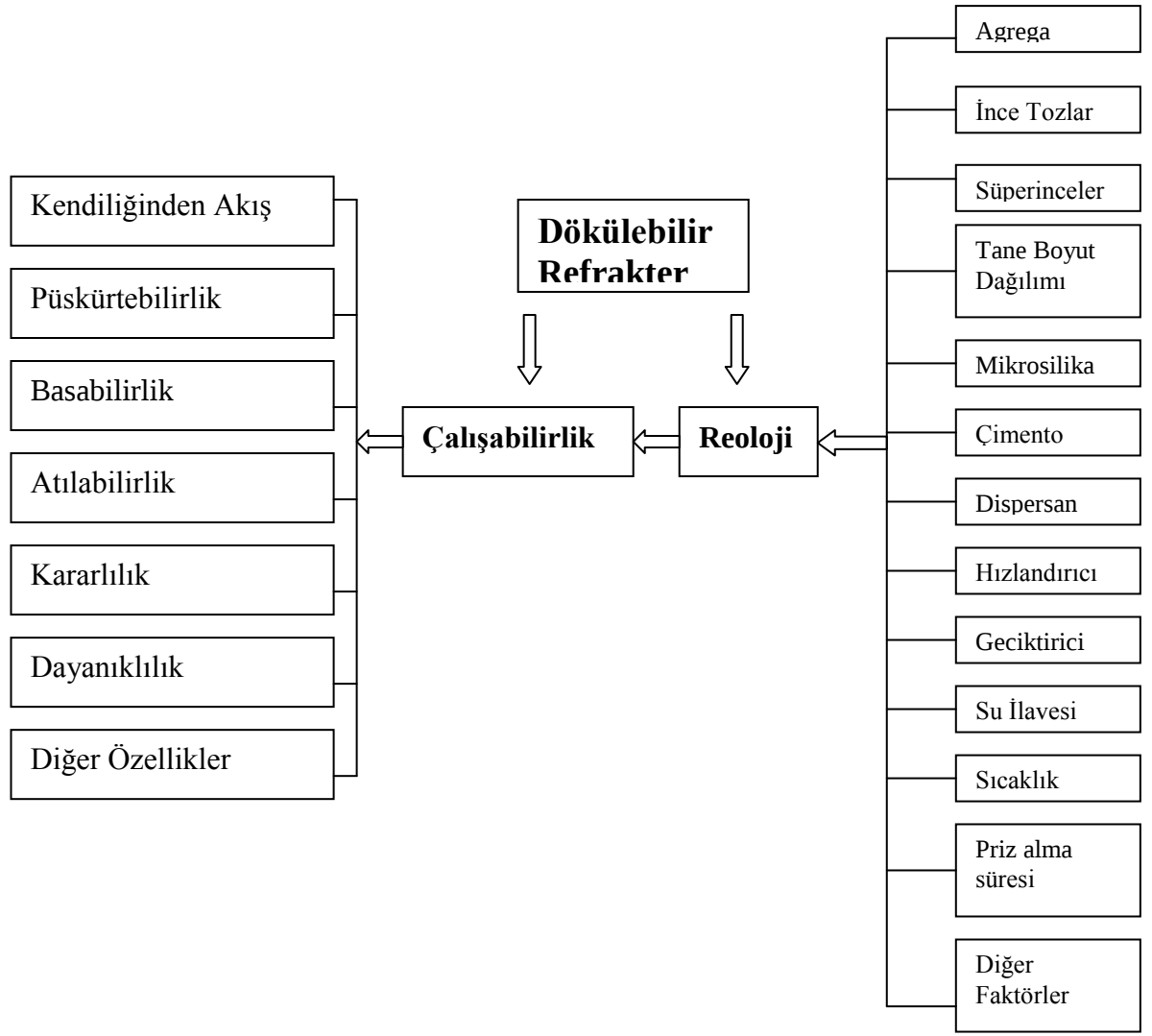
3.6. Kendi Kendine Akabilen Dökülebilir Refrakterler

Genel olarak dökülebilir refrakterler herhangi bir dış kaynaklı mekanik etkiye ihtiyaç duymaktadır. Kendi kendine akan dökülebilir refrakterler ise herhangi bir dış kaynaklı mekanik etkiye ihtiyaç duymaksızın yer çekiminin etkisi ile bulunduğu kalıbın şeklini alan dökülebilir refrakterlerdir. Kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerde taneler arası etkileşim en aza indirgenerek, taneler arasındaki sürtünme azaltılıp malzemenin akış özellikleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde önemli olan malzeme içerisinde kullanılan tanelerin büyüklüğü ve tipi, dispersan tipi, süperincelerin etkisi ve serbest akışı etkileyecek sıvı miktarıdır.

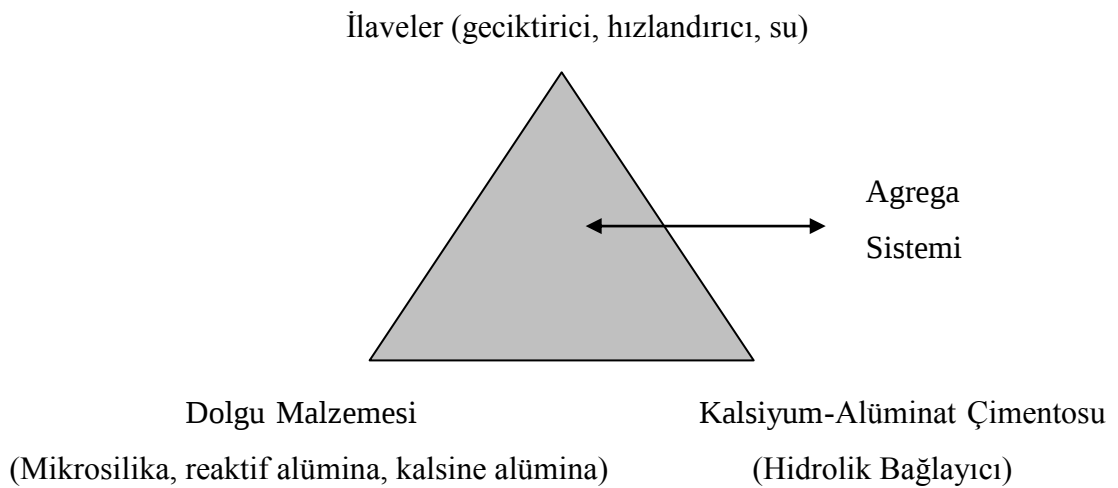
Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerin en önemli özellikleri reolojik özelliklerdir. Refrakter malzemenin reolojik özelliklerini etkileyen parametereler şekil 3.9’da gösterilmiştir.

Reolojik özellikleri iyi seviyeye çekmek için üzerinde durulması gereken en önemli konu taneler arasında sıkı paketlenmenin sağlanmasıdır[32]. İri ve ince tanelerin en iyi oranda karıştırılması gerekmektedir. Malzemenin reolojik özelliklerini geliştirmek için bir takım ilaveler ve dolgu malzemeleri de refrakterde bulundurulmaktadır. Bunlardan, dispersan ilavesi malzemelerin akış özelliklerini arttırmaktadır. Mikrosilika, reaktif alümina ve kalsina alümina gibi süperincelerin ilavesi, malzemenin bünyesindeki boşluklar doldurularak malzemenin akışı için gerekli su ihtiyacını azaltabilmektedir. Ayrıca süperinceler malzemenin porozitesini düşürmekte ve akıcılığını arttırmakta etkilidir. Bu faktörlerin yanında ortam sıcaklığı da malzemenin akışında ve priz alma süresinde etkilidir. Priz alma süresini geciktirmek veya çabuklaştırmak için bazı kimyasal malzemeler ilave edilmektedir. Priz almayı geciktirmek için genelde sitrik asit, malzemenin priz almasını hızlandırmak için ise genelde lityum karbonat kullanılmaktadır. Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter bileşimleri, üçlü bileşen sistemi şeklinde şekil 3.10’da gösterilmiştir.

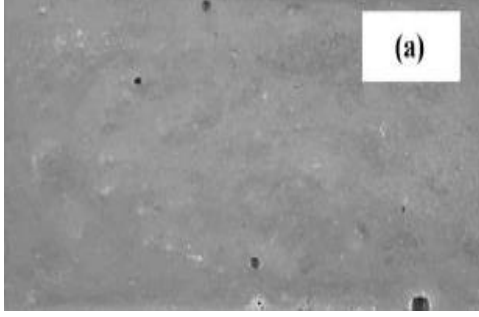
Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterler yüzeylerinde döküm yapıldıktan sonra bazı değişiklikler görülür. Bu değişikliklere bazı örnekler şekil 3.11’de gösterilmiştir.



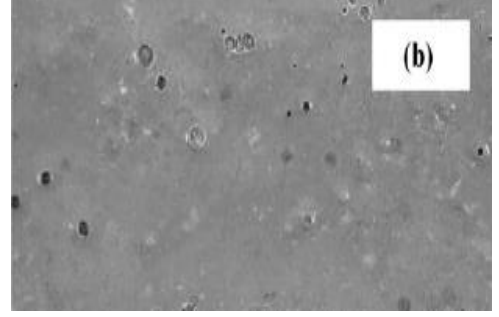
Şekil 3.9. Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterleri etkileyen faktörler [39]



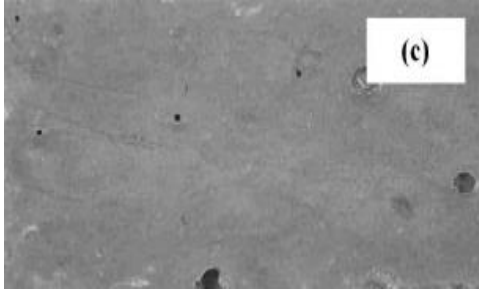
Şekil 3.10. Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter bileşenleri [26]



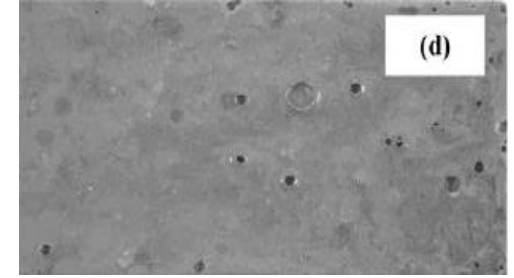
Normal dökümden hemen sonraki yüzey



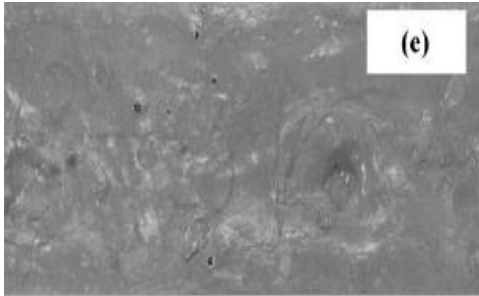
Normal dökümden 45 dakika sonraki yüzey



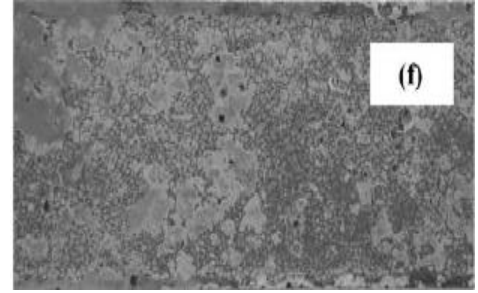
Başkabir karışımın dökümden sonraki yüzey



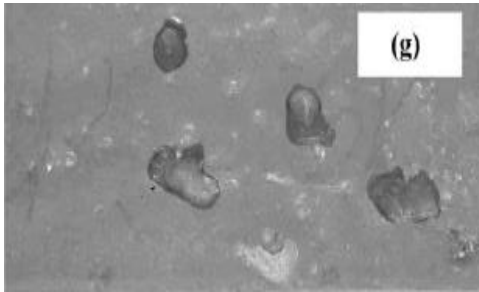
45 dakika sonraki yüzey görüntüsü (c'deki)



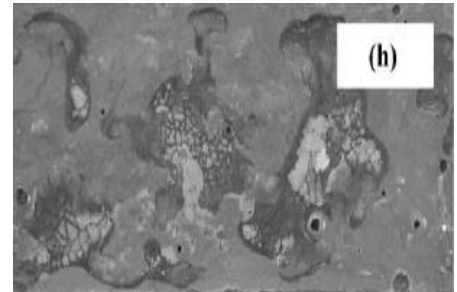
Hafif segregasyona uğramış yüzey



45 dakika sonraki yüzey (e)



Fazla su ilave edilmiş malzeme yüzeyi



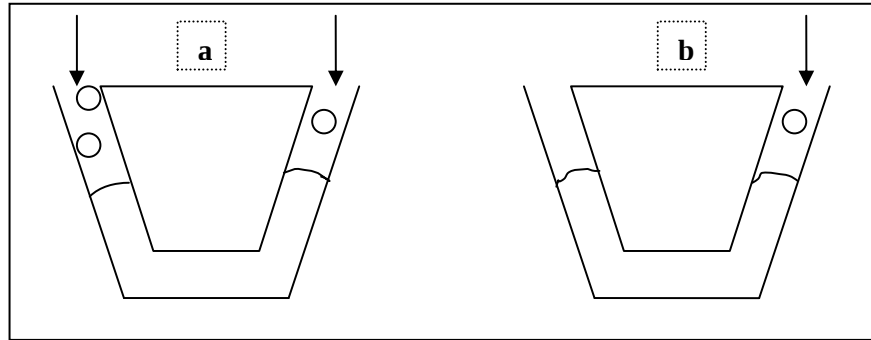
45 dakika sonraki görüntü (g)

Şekil 3.11. Dökülmüş malzeme yüzeylerinin hemen ve 45 dakika sonraki görüntüleri [39]

Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterler döküm şekline ve yapısındaki bileşime göre döküldükten sonra şekil 3.11'deki gibi süreyle değişik yüzey yapısı görüntüye çıkarırlar. Malzeme döküldükten sonra yüzeyde zamanla kabarıklık ortaya çıkar. Malzeme hızlı dökülürse segregasyon başlar. Eğer su oranı fazla ise belirgin bir şekilde mikrosilika taneleri yüzeye çıkar. Buradan malzemede fazla su kullanıldığı çok rahat bir şekilde anlaşılır.

Kendi kendine akabile dökülebilir refrakterlerde herhangi bir mekanik etkiye ihtiyaç olmadığından, mekanik etki yapan vibratörler kullanılmamaktadır. Bundan dolayı bunların yarattığı gürültüden de kurtulunur. Ayrıca ekipman ve tesisat masrafları azalmakta olup, işçilik ve zamandan da tasarruf sağlanmaktadır.

Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterler genel olarak çelik endüstrisinde kullanılmaktadır. Temelde onarım ve refrakter örülmesinin zor olduğu yerlerde kullanım amaçlıdır. Çelik endüstrisinde temelde pota örümü ve tandişlerin emniyet ve aşınma astarlarının örümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.12'de tandişlerde monolitik örüm gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Tandişlerin monolitik örümü

- a) titreşim altında dökülebilir refrakter ile örüm
- b) kendi kendine akan dökülebilir refrakter ile örüm [37]

Şekil 3.12'de görüleceği gibi titreşim uygulanarak yapılan örümlerde potanın her iki tarafından refrakter döküm işlemi yapılmaktadır. Bu ekipman ve tesisat gerektirmektedir. Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter ile örüm yapılmak istendiğinde döküm tek taraftan yapılır ve refrakter malzeme o kalıbın şeklini alır bu da ekipman ve tesisat gereksinimi en aza indirilmiş olur.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Hammaddeler ve Özellikleri

4.1.1. Tabular Alumina

Bu çalışmada ALCOA firmasından temin edilen tabular alumina, alumina refrakter temel hammaddesi olarak kullanılmıştır. Tabular alüminanın kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 4.1’de verilmektedir.

Tablo 4.1. Deneyler sırasında kullanılan tabular alüminanın kimyasal ve fiziksel özellikleri

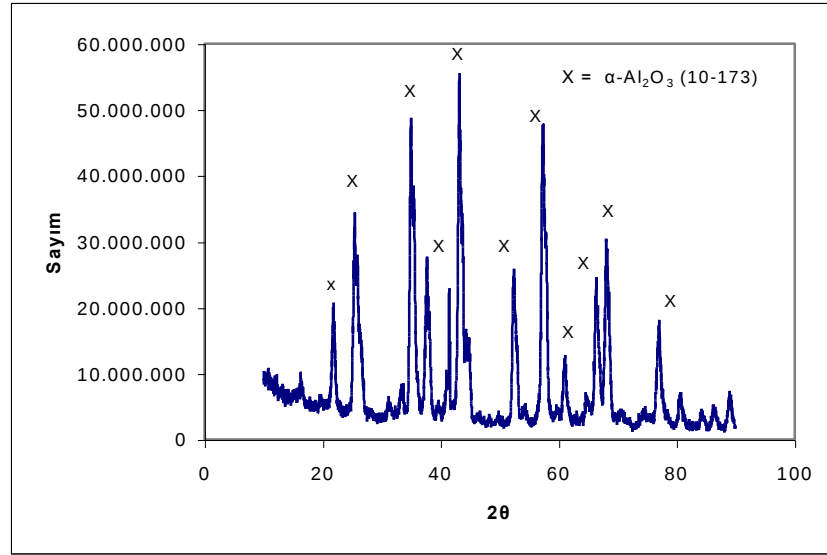
Kimyasal Bileşim		%
Al ₂ O ₃		>99,4
Na ₂ O		<0,6
Fe ₂ O ₃		<0,03
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (g/cm ³)		>3,50
Görünür Porozite (%)		<5,00
Su emme		<1,43

Çalışma sırasında kullanılan tabular alümina, 0-6,3 mm arasında çeşitli tane boyutlarına ayrılmıştır. Tabular alüminanın ayrılmış tane boyut aralıkları, tablo 4.2’de gösterilmiştir. Ayrıca bu tane aralıkları dışında “pan” ya da “pudra (0,1-0,063 mm)” adı verilen çok ince taneli tabular alumina malzemesi de kullanılmıştır.

Tablo 4.2. Deneylerde kullanılan tabular alüminanın tane boyutu aralıkları

TANE ARALIKLARI	
-6,3 + 5,0 mm	-2,0 + 1,0 mm
-5,0 + 4,0 mm	-1,0 + 0,5 mm
-4,0 + 3,15 mm	-0,5 + 0,4 mm
-3,15 + 2 mm	-0,4 + 0,1 mm

Şekil 4.1’de deneylerde kullanılan tabular alüminanın X-Işınları analizi verilmiştir.



Şekil 4.1. Kullanılan tabular alüminanın X-Işınları analizi

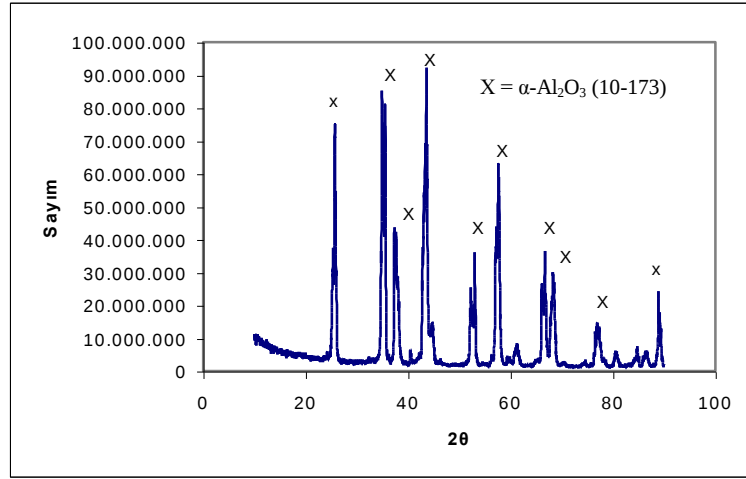
4.1.2. Kahverengi Korund

Deneylerde kullanılan kahverengi korund Alcoa firmasından temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan kahverengi korundun kimyasal bileşimi tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3. Deneylerde kullanılan kahverengi korundun kimyasal bileşimi

Bileşen	%
Al ₂ O ₃	95
TiO ₂	3
SiO ₂	1,5
Fe ₂ O ₃ ve alkali oksitler	Geri kalan

Deneylerde kullanılan kahverengi korundun X-Işınları analizi şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan kahverengi korundun X-Işınları analizi

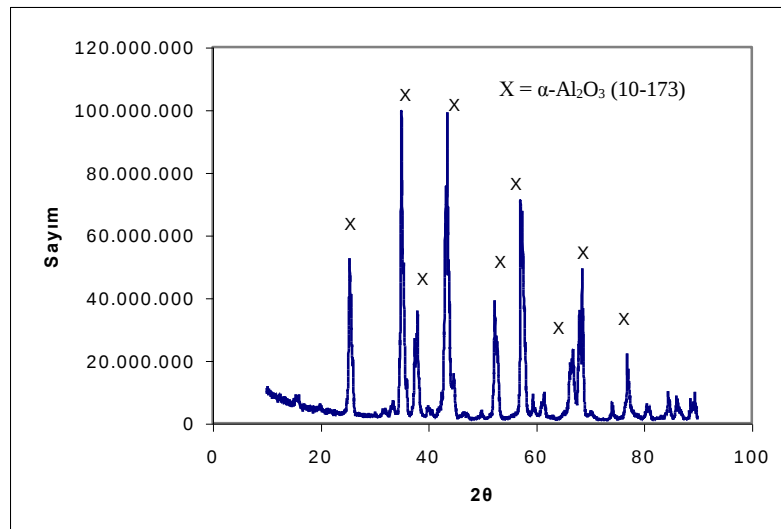
4.1.3. Beyaz Korund

Deneylerde kullanılan beyaz korund Alcoa firmasından temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan beyaz korundun kimyasal bileşimi tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4. Deneylerde kullanılan beyaz korundun kimyasal bileşimi

Bileşen	%
Al_2O_3	99,7
SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 ve alkali oksitler	0,3

Deneylerde kullanılan beyaz korundun X-Işınları analiz sonucu şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Kullanılan beyaz korundun X-Işınları analizi

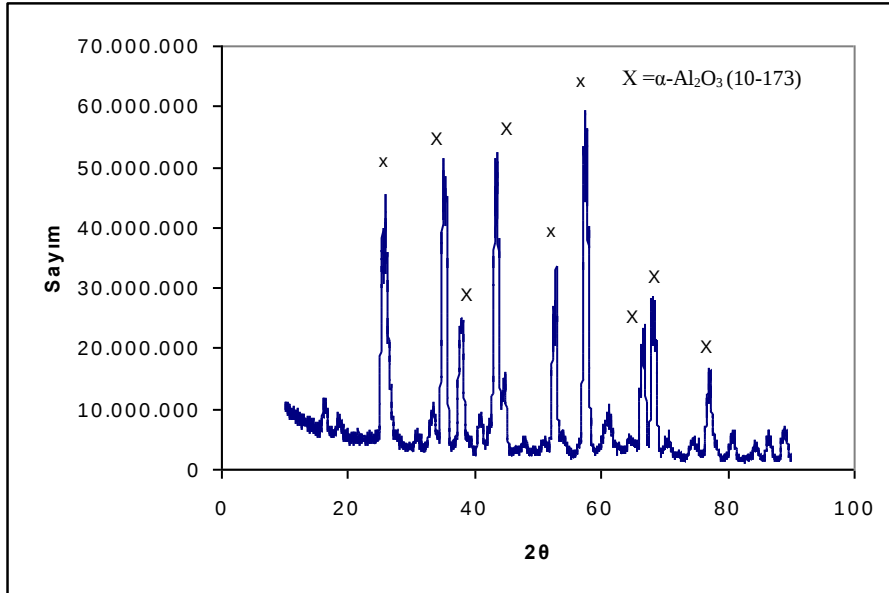
4.1.4. Kalsine Boksit

Deneylerde kullanılan kalsine boksit Alcoa firmasından temin edilmiştir. Kullanılan kalsine boksitin kimyasal bileşimi tablo 4.5’te verilmiştir.

Tablo 4.5. Kalsine boksitin kimyasal bileşimi

Bileşen	%
Al_2O_3	86
TiO_2	4
SiO_2	7
Fe_2O_3	2
Alkali oksitler	Geri kalan

Deneyler sırasında kullanılan kalsine boksitin X-Işınları sonucu şekil 4.4’te gösterilmiştir. Şekil 4.4’te görüldüğü gibi yapıda korund dışında küçük pikler görülmektedir. Bu yapıda emprüte olduğunu göstermektedir. Yapıda olan bu emprüte oksitler tablo 4.5’te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Deneylerde kullanılan kalsine boksitin X-Işınları analizi

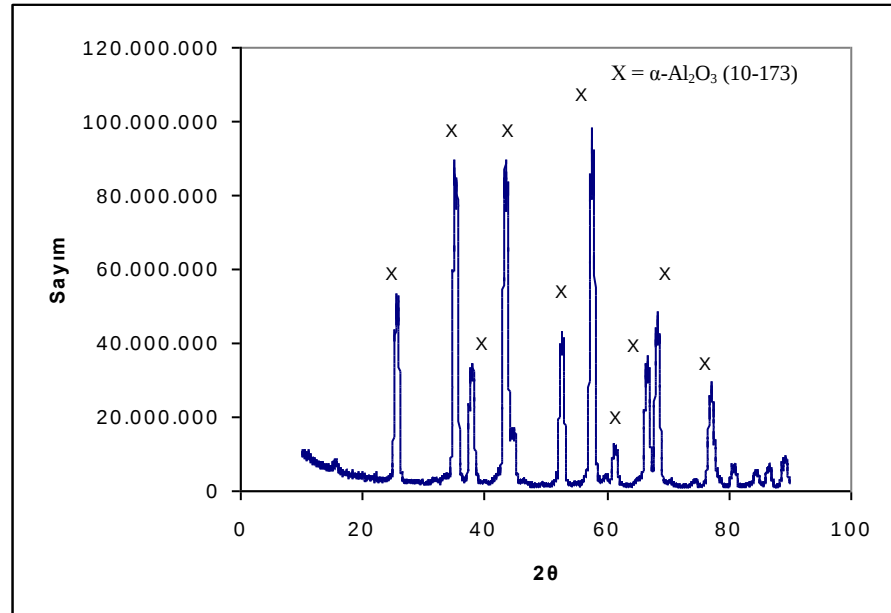
4.1.5. Kalsine Alumina

Bu çalışmada Alcoa firmasından temin edilen CT9FG kalite kalsine alumina kullanılmıştır. Kullanılan kalsine alüminanın kimyasal bileşimi tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Kalsine Alüminanın kimyasal bileşimi

Bileşen	%
Al_2O_3	99,5
Fe_2O_3	003
CaO	0,01
MgO	0,002
Na_2O	0,15

Kalsine alumina malzemeye pudra halinde ilave edilmektedir ve kalsine alüminanın X-Işınları analiz sonucu şekil 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kalsine alüminanın X-Işınları analizi

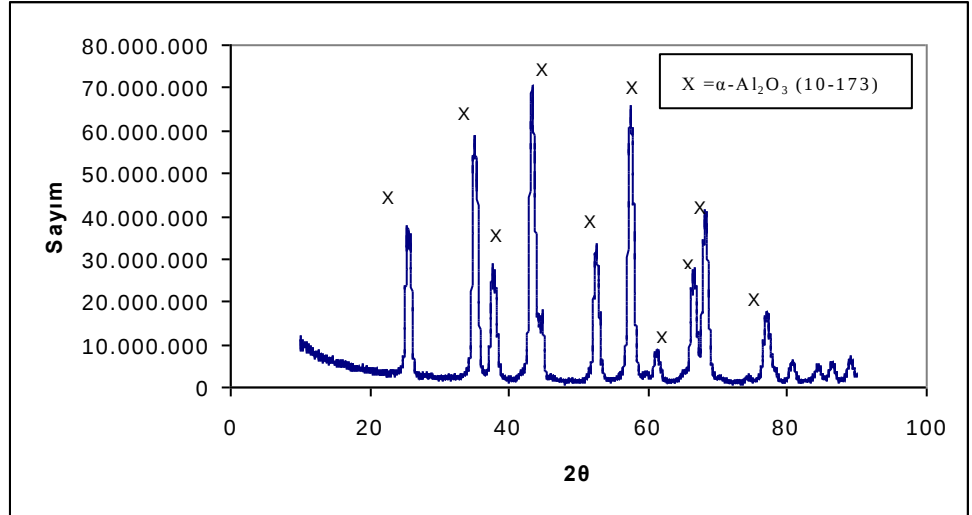
4.1.6. Reaktif Alumina

Deneyler sırasında kullanılan reaktif alümina, Alcoa firmasında üretilen CT 3000 SG kalite adında bir malzemedir. Reaktif alüminanın kimyasal bileşimi tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. Deneylerde kullanılan reaktif alüminanın kimyasal bileşimi

Bileşen	%
Al_2O_3	99,78
Na_2O	0,08
Fe_2O_3	0,02
MgO	0,07
SiO_2	0,03
CaO	0,02

Reaktif alumina refraktere pudra şeklinde ilave edilmektedir. Deneylerde kullanılan reaktif alüminanın X-Işınları analiz sonucu şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Deneylerde kullanılan reaktif alüminanın X-Işınları analizi

4.1.7. Mikrosilika (Serbest silika)

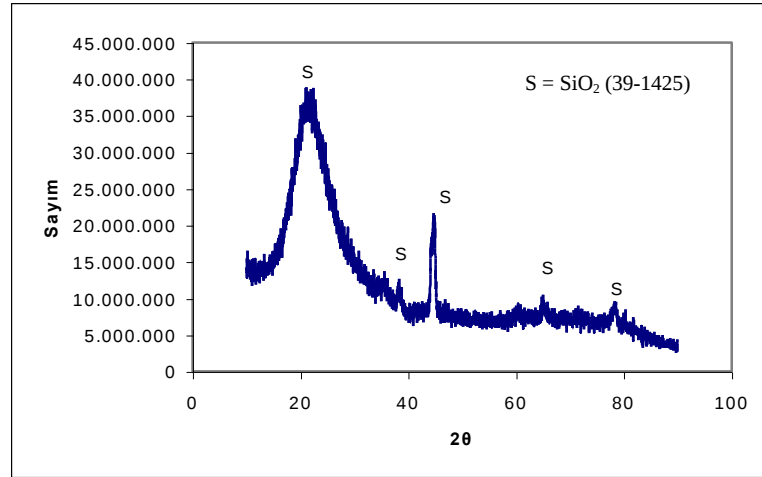
Deneyler sırasında 971U kalite mikrosilika kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan mikrosilikanın kimyasal bileşimi tablo 4.8’te verilmiştir.

Tablo 4.8. Mikrosilika kimyasal bileşimi

Bileşen	%
SiO ₂	97,5
C	0,8
Fe ₂ O ₃	0,3
Al ₂ O ₃	0,7
Alkali oksitler	Geri kalan

Mikrosilikada refraktere pudra olarak ilave edilmektedir.

Deneylerde kullanılan mikrosilikanın X-Işınları analiz sonuçları şekil 4.7’de verilmiştir.



şekil 4.7. Deneylerde kullanılan mikrosilikanın X-Işınları analizi

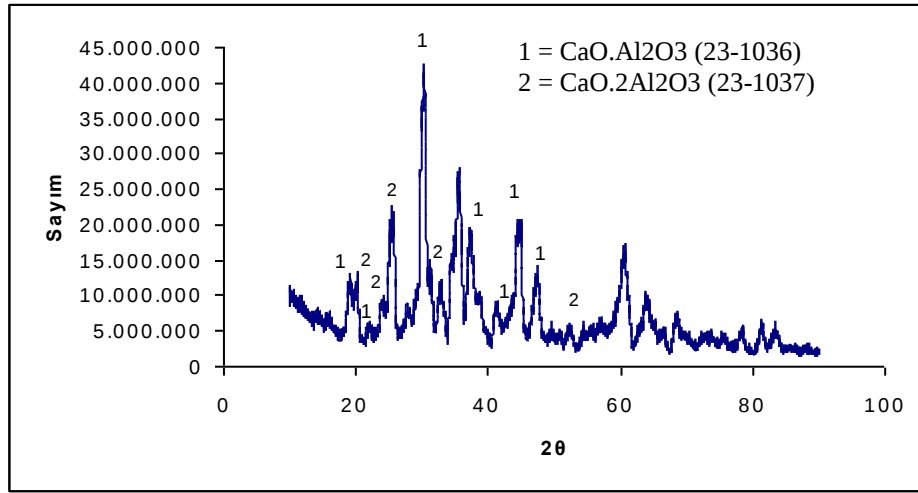
4.1.8. Çimento

Deneyler sırasında bağlayıcı olarak imento kullanılmıştır. Kullanılan imento Lafarge firmasından temin edilmiş olup, ticari adı Secar 71’dir. Çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 4.9’da gösterilmiştir.

Çimento da kalsine alumina ve mikrosilika gibi refraktere pudra olarak ilave edilmektedir. şekil 4.8’te kullanılan imentonun X-Işınları analiz sonucu verilmiştir.

Tablo 4.9. Çimentonun kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	%
Al_2O_3	69,5-71,5
CaO	27-29
MgO	0,3
Fe_2O_3	0,3
SiO_2	0,8
TiO_2	0,1
$\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$	0,5



Şekil 4.8. Kullanılan çimentonun X-Işınları analizi

4.1.9. Dispersan (Dağıtıcı)

Refrakter malzemesi üretilirken malzemenin akış özelliklerini geliştirmek için dispersan kullanılır. Genel olarak firmalarda dispersan malzeme olarak sodyum tripolifosfat, sodyum sitrat, sodyum hexametafosfat tip kimyasal malzemeler kullanılır. Bu çalışmada dağıtıcı olarak Darvan 7S kullanılmıştır. Darvan 7S, Vanderbilt firmasından temin edilmiştir. Darvan 7S ticari bir isimdir. Bu malzemenin kimyasal ismi sodyum polimetakrilit ve sudur.

4.1.10. Geciktirici

Dökülebilir refrakterlerde refrakterlerin priz almasını geciktirmek için geciktiriciler kullanılmaktadır. Genel olarak refrakter malzemelerde borik asit ve sitrik asit kullanılır. Bu çalışmada geciktirici olarak sitrik asit kullanılmıştır.

4.2. Numunelerin Hazırlanması

4.2.1. Numunelerin Üretimi

Numunelerin üretiminde ilk olarak yapılan işlem, kullanılacak hammaddenin belirli tane boyutlarına sınıflandırılmasıdır. Belirlenen bu tane boyutu aralıkları tablo 4.2’de gösterilmiştir. Bu tane boyutlandırma işlemine, kullanılan tabular alumina, kahverengi korund, beyaz korund ve rotary boksit tabi tutulmuştur. Kullanılan diğer hammaddeler sisteme pudra halinde ilave edilmiştir.

Eleme işleminden sonra yapılan işlem kullanılacak olan hammaddelerin belirli oranlarda karıştırılmasıdır. Karıştırma işlemi KSM45 Model bir karıştırıcı ile yapılmıştır. Kullanılan hammaddelerin oranlarının belirlenmesinde bölüm 3.3.2’de belirtilen Andreasen Denklemi’nden yararlanılmıştır. Tablo 4.10’da Andreasen denklemine göre kullanılan temel alumina hammaddelerin tane boyut aralık oranları belirtilmektedir. Buradaki tane boyut dağılım modulu (n) değeri, yapılan sonuçlarda en fazla akışın elde edildiği 0,23 değeridir. Bu nedenle örnek olarak tablo 4.10’da bu karışım oranı gösterilmektedir.

Tablo 4.10. Andreasen Denklemine göre $n=0,23$ iken tabular alumina, kahverengi korund, beyaz korund ve kalsine boksit hammaddelerinin kullanılan tane boyut aralıklarının yüzdeleri

Tane Aralıkları (mm)	CPFT = $100x(d/D)^n$	% Ağırlık
-6,3 + 5,0	CPFT = $100-100x(5,0/6.3)^{0,23}$	5,18
-5,0 + 4,0	CPFT = $94,82-100x(4,0/6.3)^{0,23}$	4,74
-4,0 + 3,15	CPFT = $90,08-100x(3,15/6.3)^{0,23}$	4,82
-3,15 + 2,0	CPFT = $85,26-100x(2,0/6.3)^{0,23}$	8,46
-2,0 + 1,0	CPFT = $76,8-100x(1,0/6.3)^{0,23}$	11,32
-1,0 + 0,5	CPFT = $65,48-100x(0,5/6.3)^{0,23}$	9,65
-0,5 + 0,4	CPFT = $62,69-100x(0,4/6.3)^{0,23}$	2,79
-0,4 + 0,1	CPFT = $48,21-100x(0,1/6.3)^{0,23}$	14,48

Tablo 4.10’da belirtilen yüzdelerin dışında kalan yüzdeyi pudra malzemesi içermektedir. Pudra malzemesi pudra tabular alumina, reaktif alumina, kalsine alumina, mikrosilika, çimento gibi hammaddeler içermektedir. Tablo 4.10’da n

değeri 0,23 alınıp yüzdeler bir örnek olarak gösterilmiştir. Bunların dışında sisteme dağıtıcı, hızlandırıcı, geciktirici ve su gibi ilaveler bu yüzdelerin dışında ilave edilmiştir. Su sisteme yavaş yavaş ilave edilmiştir. Böylece malzeme akmaya başladığı anda su ilavesi kesilmiştir. Karıştırma işleminden sonra malzemenin birazı hemen akış testine tabi tutulmuştur. Diğer kalan kısmı ise 5*5*5 cm'lik kalıplara dökülmüştür. Kalıplara dökülen malzemenin oda sıcaklığında priz alması beklenmiştir ve 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bekletilen bu malzemeler 110°C'de etüvde (HERAUS-300°C'lik) 18 saat bekletilerek kurutmaya tabi tutulmuştur. Daha sonra bu numunelere değişik sıcaklıklarda pişirme işlemi uygulanmıştır. Pişirme işlemleri NABER marka 1600°C'lik fırınında yapılmıştır. Pişirme yapıldıktan sonra numuneler porozite, yoğunluk ve soğukta basma mukavemeti testlerine tabi tutulmuştur. Soğukta basma mukavemet testleri, 80 tonluk M. PERRIER marka cihazda yapılmıştır.

4.2.2. Numunelerin Sınıflandırılması

4.2.2.1. Grup Numunler

Bu grup numuneler üzerinde, kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerin tane boyut dağılımı incelenmiştir. Andreassen Denklemiindeki n ; tane boyut dağılım modülünün etkisi kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerde çok önemli bir faktördür. Tane boyut dağılım modülüne 0,20 ile 0,25 arasında değerler verilerek en iyi n değeri tesbit edilmeye çalışılmıştır. Bu grup numunelerinde kalsine alumina, mikrosilika, çimento, dağıtıcı ve geciktirici miktarları sabit tutulup sisteme ilave edilen tabular alumina n faktörüne bağlı olarak değişik oranlarda ilave edilmiştir. Sisteme ayrıca, sistemin akıcılığını kazanması için gerekli minimum su miktarı eklenmiştir. Böylece sistemin akıcılık kazanacağı minimum su miktarının özellikleri incelenecektir. Numuneler 110°C'de 18 saat kurutulduktan sonra 1100°C, 1300°C ve 1500°C'lerde 5'er saat pişirilmiştirlerdir. Tablo 4.11'de 1. grup numunelerinde kullanılan hammadde yüzdeleri belirtilmiştir.

Tablo 4.11. 1. grup numunelerin bileşimleri

<i>Tabular Alumina Tane Boyut Aralığı (mm)</i>	Karışım yüzdesi n=0,20 (1A)	Karışım yüzdesi n=0,21 (1B)	Karışım yüzdesi n=0,22 (1C)	Karışım yüzdesi n=0,23 (1D)	Karışım yüzdesi n=0,24 (1E)	Karışım yüzdesi n=0,25 (1F)
6,3-5	4,52	4,74	4,96	5,18	5,4	5,61
5-4	4,17	4,36	4,55	4,74	4,93	5,12
4-3,15	4,26	4,45	4,63	4,82	5,00	5,18
3,15-2	7,56	7,87	8,17	8,46	8,75	9,03
2-1	10,29	10,65	10,99	11,32	11,64	11,94
1-0,5	8,96	9,2	9,43	9,6	9,85	10,04
0,5-0,4	2,63	2,69	2,74	2,79	2,84	2,88
0,4-0,1	13,95	14,16	14,33	14,48	14,6	14,7
<i>Pudra</i>	23,66	21,89	20,19	18,56	17,00	15,49
Kalsine Alumina	10	10	10	10	10	10
Çimento	5	5	5	5	5	5
Mikrosilika	5	5	5	5	5	5
Dispersan	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Geciktirici	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Su	5,53	5,32	5,2	5,19	4,73	4,53

1.grup numuneler şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. 1. grup numuneler

4.2.2.2. 2. Grup Numuneler

Bu grup numunelerde kalsine alumina yerine reaktif alumina kullanılmıştır. Reaktif ve kalsine aluminanın kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerde karşılaştırılması yapılacaktır. Numuneler 110°C’de 18 saat kurutulduktan sonra 1300°C’de 5 saat pişirilmiştir. Tane boyutu dağılım modulu 0,23 alınmıştır. Bu gruba ait numunelerin bileşimleri tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.12. 2. grup numunelerin bileşimleri

<i>Tabular Alumina Tane boyut Aralığı</i> (mm)	Karışım Yüzdesi (2A)
6,3-5	5,18
5-4	4,74
4-3,15	4,82
3,15-2	8,46
2-1	11,32
1-0,5	9,6
0,5-0,4	2,79
0,4-0,1	14,48
<i>Pudra</i>	18,56
Reaktif Alumina	10
Çimento	5
Mikrosilika	5
Dispersan	0,05
Geciktirici	0,05
Su	5,26

4.2.2.3. 3. Grup Numuneler

Bu grup numunelerde tabular alumina yerine kahverengi korund, beyaz korund ve rotary boksit ayrı ayrı kullanılmıştır ve aralarındaki farklar incelenmiştir. Bu karışımlarda n değeri 0,23 alınmıştır. Numuneler 110°C’de 18 saat kurutulduktan sonra 1300°C’de 5 saat pişirilmiştir. Bu grup numunelerde hazırlanan karışım oranları Tablo 4.13’de gösterilmiştir.

Tablo 4.13. 3.grup numunelerin bileşimleri

<i>Alumina tane boyutu aralığı(mm)</i>	Karışım Yüzdesi (Kahverengi Korund-3A)	Karışım Yüzdesi (Beyaz Korund-3B)	Karışım Yüzdesi (Rotary Boksit-3C)
6,3-5	5,18	5,18	5,18
5-4	4,74	4,74	4,74
4-3,15	4,82	4,82	4,82
3,15-2	8,46	8,46	8,46
2-1	11,32	11,32	11,32
1-0,5	9,6	9,6	9,6
0,5-0,4	2,79	2,79	2,79
0,4-0,1	14,48	14,48	14,48
<i>Pudra</i>	18,56	18,56	18,56
Kalsine Alumina	10	10	10
Çimento	5	5	5
Mikrosilika	5	5	5
Dispersan	0,05	0,05	0,05
Geciktirici	0,05	0,05	0,05
Su	5,58	5,4	6,01

4.2.2.4. 4. Grup Numuneler

Bu gruptaki numuneler mikrosilikanın kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerdeki etkisini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Sistemdeki mikrosilika oranı artırılıp sistemde bulunan kalsine alumina oranı azaltılmıştır. Bu karışımlar hazırlanırken tane boyut dağılım modulu 0,23 alınmıştır. Numuneler 110⁰C’de 18 saat kurutulduktan sonra 1300⁰C’de 5 saat pişirilmiştir. Bu gruptaki karışımların yüzde bileşimleri tablo 4.14’de verilmiştir

Tablo 4.14. 4. grup numunelerin bileşimleri

Tabular Alumina Tane Boyut Aralıkları (mm)	Karışım Yüzdesi (4A)	Karışım Yüzdesi (4B)	Karışım Yüzdesi (4C)	Karışım Yüzdesi (4D)
6,3-5	5,18	5,18	5,18	5,18
5-4	4,74	4,74	4,74	4,74
4-3,15	4,82	4,82	4,82	4,82
3,15-2	8,46	8,46	8,46	8,46
2-1	11,32	11,32	11,32	11,32
1-0,5	9,6	9,6	9,6	9,6
0,5-0,4	2,79	2,79	2,79	2,79
0,4-0,1	14,48	14,48	14,48	14,48
<i>Pudra</i>	8,56	8,56	8,56	8,56
Kalsine Alumina	12	9	6	3
Reaktif Alumina	10	10	10	10
Mikrosilika	3	6	9	12
Çimento	5	5	5	5
Geciktirici	0,05	0,05	0,05	0,05
Dispersan	0,05	0,05	0,05	0,05
Su	4,78	5	5,32	5,55

4.2.2.5. 5. Grup Numuneler

Bu grup numunelerin hazırlanmasındaki amaç, kalsine alüminanın, alümina esaslı kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerdeki etkisini incelemektir. Numuneler 110°C’de 18 saat kurutulduktan sonra 1300°C’de 5 saat pişirilmiştir. 5. grup numunelerin bileşimleri tablo 4.15’de verilmiştir.

Tablo 4.15. 5.grup numunelerin bileşimleri

Tabular Alumina Tane Boyut Aralıkları (mm)	Karışım Yüzdesi (5A)	Karışım Yüzdesi (5B)	Karışım Yüzdesi (5C)	Karışım Yüzdesi (5D)
6,3-5	5,18	5,18	5,18	5,18
5-4	4,74	4,74	4,74	4,74
4-3,15	4,82	4,82	4,82	4,82
3,15-2	8,46	8,46	8,46	8,46
2-1	11,32	11,32	11,32	11,32
1-0,5	9,6	9,6	9,6	9,6
0,5-0,4	2,79	2,79	2,79	2,79
0,4-0,1	14,48	14,48	14,48	14,48
Pudra	27,66	24,66	21,66	18,66
Kalsine Alumina	6	9	12	15
Mikrosilika	5	5	5	5
Çimento	5	5	5	5
Geciktirici	0,05	0,05	0,05	0,05
Dispersan	0,03	0,03	0,03	0,03
Su	5,3	5	5,45	5,5

4.2.2.6. 6. Grup Numuneler

6. grup numuneler, alumina esaslı kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerde geciktirici etkisini incelemek için hazırlanmıştır. Geciktirici olarak sitrik asit kullanılmıştır. Geciktiriciler malzemenin priz alma süresini uzatmaktadır. Numuneler 110⁰C’de 18 saat kurutulduktan sonra 1300⁰C’de 5 saat pişirilmiştir. 6. grup numunelerin bileşimleri tablo 4.16’da gösterilmiştir.

Tablo 4.16. 6. grup numunelerin bileşimleri

Tabular Alumina Tane Boyut Aralıkları (mm)	Karışım Yüzdesi (6A)	Karışım Yüzdesi (6B)	Karışım Yüzdesi (6C)	Karışım Yüzdesi (6D)
6,3-5	5,18	5,18	5,18	5,18
5-4	4,74	4,74	4,74	4,74
4-3,15	4,82	4,82	4,82	4,82
3,15-2	8,46	8,46	8,46	8,46
2-1	11,32	11,32	11,32	11,32
1-0,5	9,6	9,6	9,6	9,6
0,5-0,4	2,79	2,79	2,79	2,79
0,4-0,1	14,48	14,48	14,48	14,48
Pudra	23,66	23,66	23,66	23,66
Kalsine Alumina	10	10	10	10
Mikrosilika	5	5	5	5
Çimento	5	5	5	5
Geciktirici	0,02	0,04	0,06	0,08
Dispersan	0,03	0,03	0,03	0,03
Su	5,6	5,65	5,1	5,4

4.3. Numunelere Yapılan Testler

4.3.1. Akış Testi

Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde en önemli özelliklerden biri akıştır. Malzemeye vibrasyon uygulanmadan malzemenin yerçekimi etkisi ile akışı istenmektedir. Bu özelliğinin testi için standartlarda (ASTM C230) bir akış testi düzeneği bulunmaktadır. Bu düzenekte akış tablası ve akış kalıbı adında konik bir sac belirtilmektedir. Akış tablası dairesel bir şekildedir ve toplam uzunluğu 350 mm civarındadır. Akış tablasının üzerinde her 100 mm yi gösterecek şekilde dairesel çizikler vardır. Akış tablası şekil 4.10'da gösterilmiştir. Akış düzeneğinin bir diğer

elemanı ise konik saçtır. Konik saçın üst kısmının çapı 70 mm, alt kısmının çapı 100 mm ve yüksekliği ise 70 mm dir. Konik saç şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Akış tablası

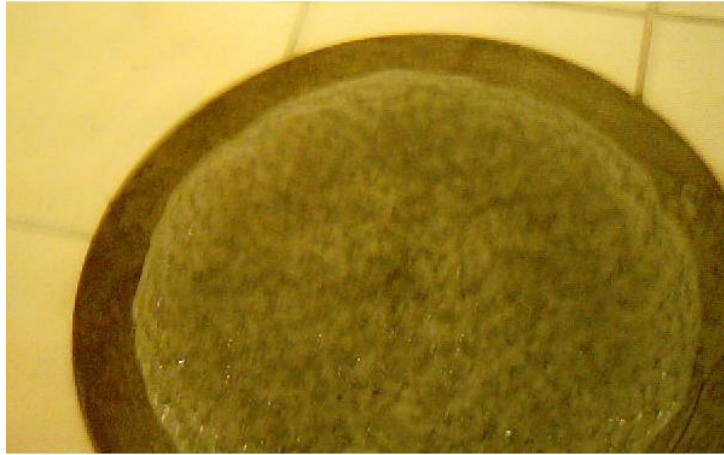


Şekil 4.11. Konik saç

Akış testi yapılması için akış tablası ve konik saç üst üste getirilir. Konik saçın içi tamamen refrakter malzemesi ile doldurulur. Konik saç yukarıya doğru yavaşça çekilir ve refrakter malzemesi akış tablasının üzerinde yayılmaya başlar. 10. dakikada yayılma çapları alınır. Yayılma çapı, refrakterin dairesel olarak kapladığı alanın birbirine dik iki kısmın ortalaması alınarak hesaplanır. Akış düzeneği ve örnek bir akış şekil 4.12 ve şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Akış düzeneği



Şekil 4.13. Örnek bir akış

4.3.2. Porozite ve Yığın Yoğunluğu Belirlenmesi

Porozite miktarı refrakter malzemeler için çok önemli bir parametredir. Genel olarak refrakterlerde porozite miktarının düşük olması istenir. Refrakter malzemelerin porozite miktarının ve yığın yoğunluğunun hesaplanmasında DIN 51056 standardı kullanılır. 5*5*5 cm boyutlarında kalıplara dökülüp hazırlanmış numuneler 110°C’de 18 saat kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları terazide tartılıp kaydedilmiştir. Daha sonra içi su dolu bir kaptan 2 saat süre ile kaynamaya bırakılmışlardır. Numunelerin kabın tabanı ile temasını önlemek amacıyla, tabana tel ızgara yerleştirilmiştir. 2 saat sonunda kabın sıcaklığının oda sıcaklığına düşmesi beklenip numunelerin yaşı ağırlıkları kaydedilmiştir. Bu numuneler daha sonra içi su dolu bir

kabta askıda bırakılarak askıdaki ağırlıkları alınmıştır. Formül 4.1 ve 4.2'den yararlanılarak ta porozite ve yığın yoğunluğu bulunmuştur.

$$\% \text{ Görünür Porozite} = \frac{W_y - W_k}{W_y - W_a} * 100 \quad (4.1)$$

W_k : Kuru ağırlık (g)

W_y : Yaş ağırlık (g)

W_a : Askıdaki ağırlık (g)

$$\rho_R = \frac{W_k}{W_y - W_a} * 100 \quad (4.2)$$

ρ_R = Yığın yoğunluğu (g/cm³)

4.3.3. Soğukta Basma Mukavemeti

Soğukta basma mukavemeti refrakter malzemeler için en önemli özelliklerden biridir. Bu çalışmada üretilen numunelerin soğukta basma mukavemetleri DIN 51067'ye uygun olarak test edilmiştir. Soğukta basma mukavemetini hesaplamak için kullanılan formül, formül 4.3'te gösterilmiştir.

$$\sigma_{sbm} = P_{\max} / F_0 \quad (4.3)$$

σ_{sbm} = Soğukta basma mukavemeti (kg/cm²)

$P_{\max}$ = Kırılma anındaki pres basıncı (kg)

F_0 = Numunenin basınç uygulanan yüzey kesit alanı (cm²)

5. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ

5.1. 1. Grup Numunelerin Sonuçları ve Tane Boyut Dağılımının Etkisi

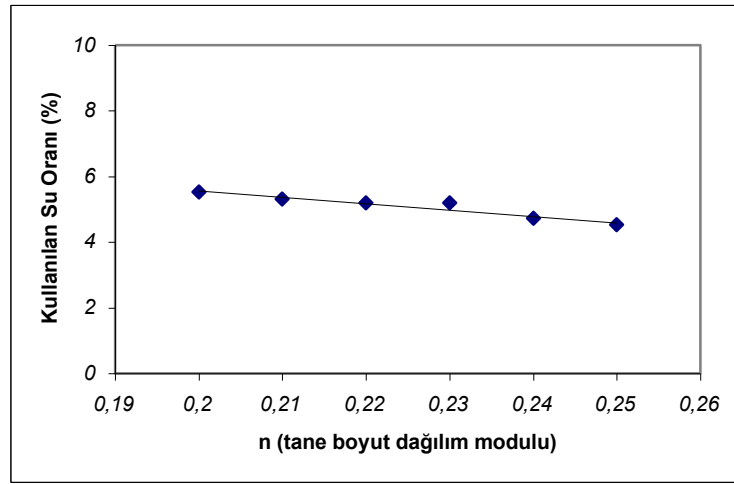
1. Grup numunelerde Andreassen denklemindeki n'in (tane boyut dağılım modulu) alumina esaslı kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerde etkisi incelenmiştir. Burada n yerine 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24 ve 0.25 değerleri verilmiştir. Numuneler 110°C de 18'er saat kurutulduktan sonra 1100, 1300 ve 1500°C sıcaklıklarda 5'er saat ayrı ayrı pişirme işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu numunelerin akış özellikleri, poroziteleri ve soğukta basma mukavemetleri incelenmiştir. Bu grup numunelerin akış, porozite, yoğunluk ve mukavemet testleri sonuçları tablo 5.1'de verilmiştir. Akış testindeki değerler malzemenin döküm yapıldıktan 10 dakika sonraki değerleridir. Akış testlerinin yapıldığı sırada ortam sıcaklığı 25°C'dir.

Tablo 5.1. 1. grup numunelerin sonuçları

		1A (n=0,20)	1B (n=0,21)	1C (n=0,22)	1D (n=0,23)	1E (n=0,24)	1F (n=0,25)
Akış Testi (mm)		210	217,5	233	238	212,5	200
Yığın Yoğunluğu (g/cm³)	110°C	2,98	3	3,03	3	3,02	3,04
	1100°C	2,97	2,99	2,99	2,99	3,01	3,03
	1300°C	2,96	2,98	2,98	2,98	3	3,02
	1500°C	3,05	3,1	3,1	3,07	3,09	3,12
Porozite (%)	110°C	11,9	11,9	11,5	13,7	12,6	11,9
	1100°C	16,5	16,2	16,2	16,4	15,4	14,8
	1300°C	17,3	16,4	16,9	17,1	16,2	15,3
	1500°C	16	15,5	15,5	15,8	15,6	14,7
Mukavemet (kg/cm²)	110°C	634	606	542	615	588	622
	1100°C	1520	2068	700	900	1490	941
	1300°C	1795	2260	1549	1614	1829	1088
	1500°C	1820	2565	1957	1800	1910	1960

5.1.1. Tane boyut dağılım modülünün kullanılan su oranına etkisi

Malzemelerin karşılaştırılmasında ilk olarak kullanılan su oranı dikkate alınmıştır. Şekil 5.1’de değişik tane boyut dağılım modüllerinde refrakter malzemesinin hazırlanmasında kullanılan su oranları gösterilmektedir. Tane boyut dağılım modülünün artması malzeme içerisinde daha fazla iri tanelerin kullanılması anlamına gelmektedir. Tane boyut dağılım modülü 0,2 ile 0,25 arasında değerler aldığı anda malzemenin akışkanlık kazanması için gerekli su miktarının genel olarak, n değeri arttıkça azaldığı görülmektedir. Tane boyutu küçük malzemelerin akış kazanması için daha fazla suya ihtiyaçları olduğu görülmüştür.

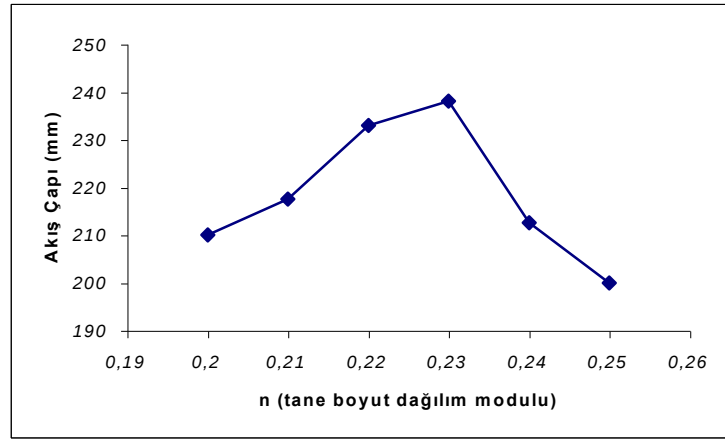


Şekil 5.1. Tane boyut dağılım modülünün kullanılan su oranına etkisi

5.1.2. Tane boyut dağılım modülünün akış özelliklerine etkisi

Tane boyut dağılımının etkisinin akış çapına etkisi şekil 5.2’de gösterilmiştir. n değeri 0,22 ve 0,23 olduğu zaman akış çaplarının çok üstün olduğu görülmektedir. Bu değerlerde malzemenin taneleri arasındaki sürtünmenin ya da taneler arasında geometrik etkileşimin en az seviyede olduğu ve tanelerin birbiri üzerinde akıcılığının iyi seviyede olduğu söylenebilir. Özellikle n değerinin 0,23’ten sonraki değerlerinde akış yönünden keskin bir düşüş görülmektedir. Buradan sonra iri taneler artmaktadır. Bundan dolayı taneler arası sürtünme artar ve akış özellikleri olumsuz etkilenir. 0,22 ve 0,23 değerleri kendi kendine akan dökülebilir refrakterler için, gerek kullanılan su oranları gerekse titreşim kullanılmadığı ele alındığında oldukça yüksek değerlerdir. Genel olarak akış değerleri karşılaştırıldığında hepsi endüstride kullanılmaya uygundur. Ancak n değeri 0,25 olduğu zaman deneylerde görüntü

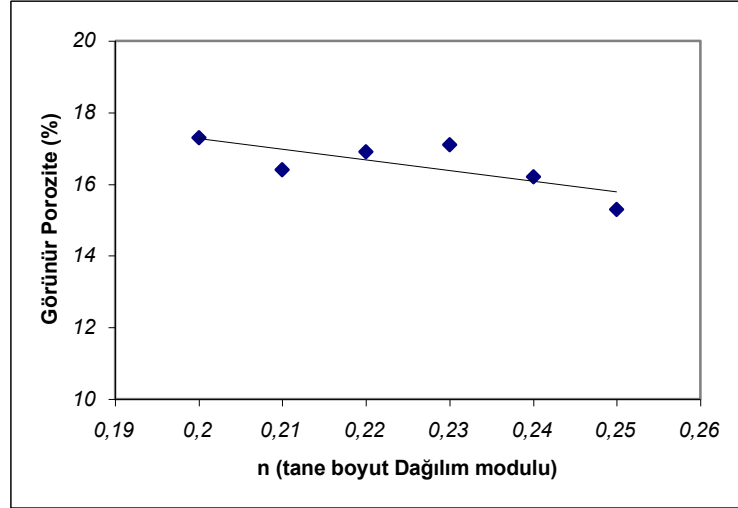
olarak kullanılmaya uygun olsa bile pota ve tandiş uygulamalarında akıcılık değerinin standartlara göre bakıldığında vibrasyon uygulanmadan bazı sorunlar çıkartabilir. Ama yine de şu kesin olarak söylenebilir ki; n değeri 0,20 ile 0,25 değerler alması durumunda akıcılık değerleri optimum seviyelere ulaşmaktadır. Bu değerler aralığı genel olarak refrakter malzemelerin tane boyutunun en küçük oldukları değer aralıklarıdır. Bu da tane boyutu küçük malzemeden üretilen refrakterlerin daha akıcı olduklarını göstermektedir.



şekil 5.2. Tane boyut dağılım modulumun akış özelliklerine etkisi

5.1.3. Tane boyut dağılım modulumun görünür poroziteye etkisi

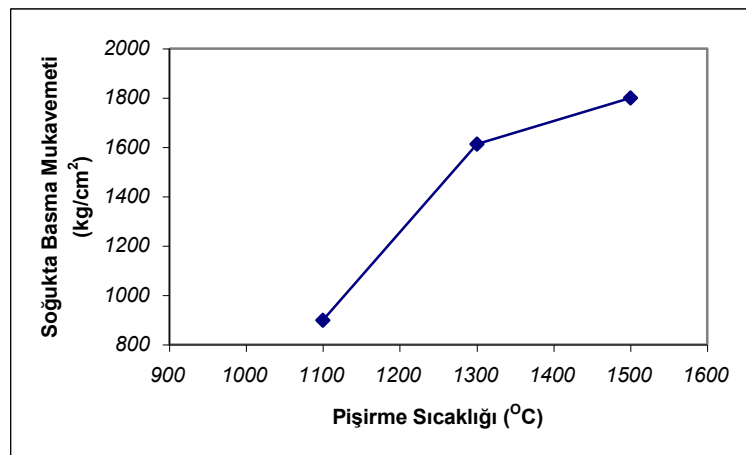
Tane boyut dağılımının nc olarak etkisi görünür porozite üzerinde incelenmiştir. Porozite sonuçlarının karşılaştırılması 1300°C pişirme sıcaklığı için şekil 5.3'te verilmiştir. şekle bakıldığında refrakter malzemelerin görünür porozitelerinin arasında fazla bir fark olmadığı görülmüştür. n değeri arttıkça görünür porozitenin çok az azaldığı görülmektedir. Bu malzemenin içerisindeki su miktarıyla alakalıdır. şekil 5.1'de görüldüğü gibi n değeri arttıkça yapıdaki su miktarı azalmaktadır. Bu pişirme uygulandığında yapıdan daha az su çıkması demektir. Bu da malzemenin içindeki porozitenin düşmesine yol açmaktadır. Porozitedeki düşüşün temel sebebi bünyeden uzaklaşan su miktarı ile yakından alakalıdır.



Şekil 5.3. 1300°C'de 5 saat pişirilmiş numunelerde boyut dağılım modülünün poroziteye etkisi

5.1.4. Pişirme sıcaklığının soğukta basma mukavemetine etkisi

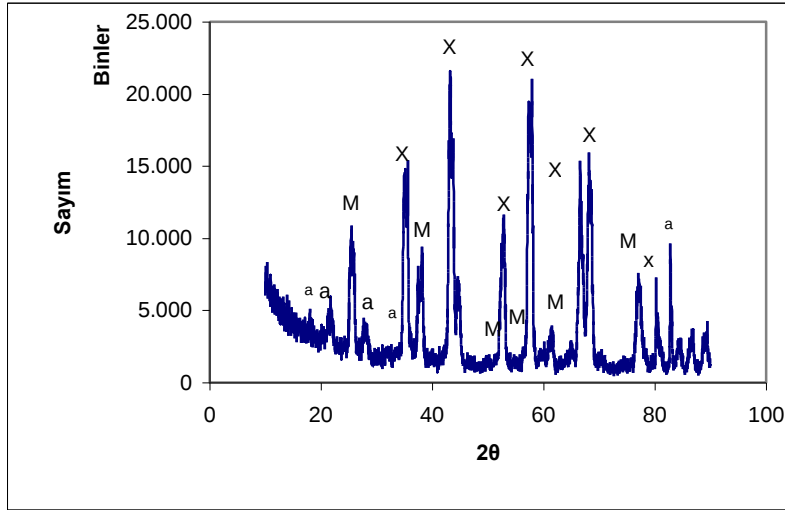
Tane dağılım modülünün 0,23 olduğu durumda pişirme sıcaklıklarının soğukta basma mukavemetine etkisi şekil 5.4'te verilmiştir. Pişirme sıcaklığı arttıkça malzemenin mukavemetinin arttığı görülmektedir. Bu, sıcaklık arttıkça sinterleşme mekanizmasının hızlanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca mukavemet değerlerinin çok yüksek çıkması yapıdaki hidrat bağlarının bu sıcaklıklarda seramik bağlara dönüştüğünü göstermektedir. Bu grup numunelerine ait X-Işınları analizi şekil 5.5'te verilmiştir.



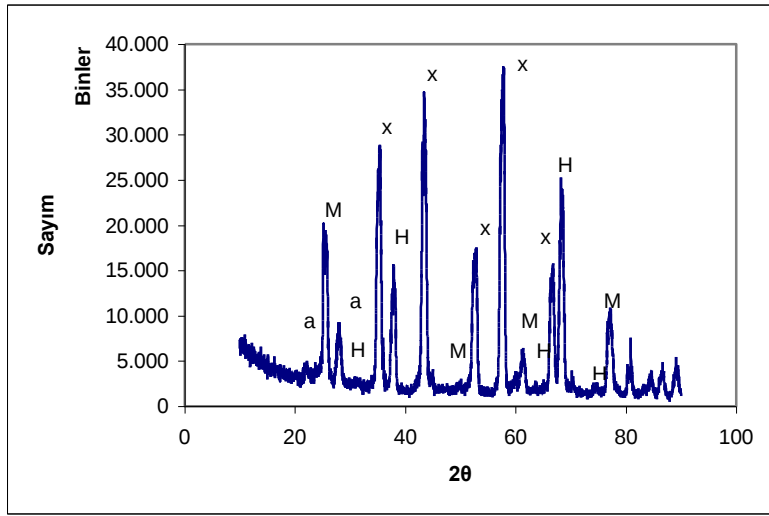
Şekil 5.4. n = 0,23 durumunda pişirme sıcaklığının mukavemete etkisi

Dökülebilir refrakterler, 1100°C’de kurutulduğunda bünyesinde oluşan porozite oluşumuna karıştırma sırasında ilave edilen ve çimento ile reaksiyona girmeyen fiziksel olarak bağlı sudur. Çimento ile reaksiyona giren su hidrat fazları oluşturmaktadır. Genel olarak 800-1000°C sıcaklıklara kadar refrakter malzemenin yapısında olan hidrolik bağ, daha sonraki sıcaklıklarda yerini seramik bağa bırakmaktadır. Hidrolik bağın oluşumu ve yapısı çimento tipi ve miktarına bağlı olarak gelişen bir mekanizmadır. 1000°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda seramik bağ oluşumu ile sinterleme mekanizması etkili olur. Bu bölümde refrakter malzeme içerisinde kullanılan kalsine alumina, reaktif alumina, mikrosilika vb. ilaveler malzemenin yüksek sıcaklıklarda özelliklerini etkilemektedir. Literatürde, 1100°C’de pişirme işlemi uygulandığında, yapıda anortit ve/veya gehlenit fazlarının oluştuğu belirtilmektedir. Bu fazlar malzemenin mukavemetinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Pişirme sıcaklığı 1300°C’ye üzerinde olduğu zaman ise bu fazlar yerine mullit ve/veya hibonit oluştuğu gösterilmektedir. Bu fazlar da malzemenin mukavemetinin daha yüksek olmasını sağlamaktadır.

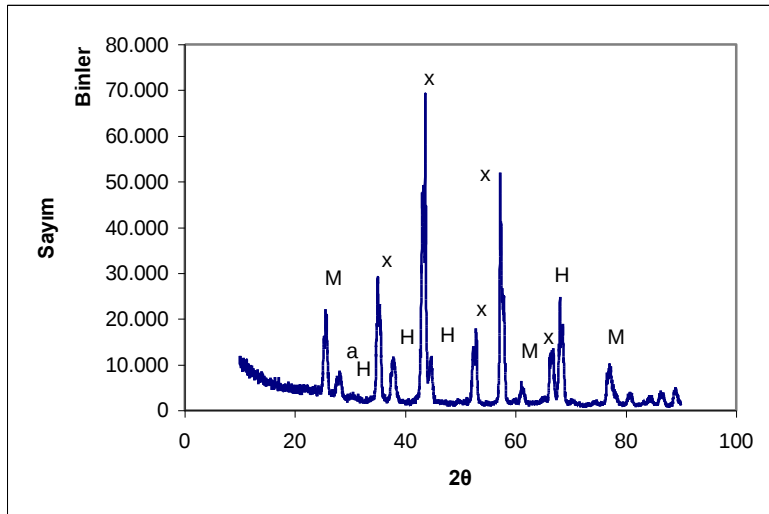
Şekil 5.5’e bakıldığında 1100°C’de pişirilen numunenin yapısında korund, müllit ve anortit fazlarının oluştuğu görülmüştür. Anortit fazının bu yapı içerisinde fazla olması mukavemetin düşük olmasını sağlamaktadır . Bu anortit fazı pişirme sıcaklığı arttıkça yapıda azaldığı görülmektedir. 1300°C’de pişirildiğinde 1100°C’ye göre daha az anortit fazının bulunduğu ve hibonit fazının yapı içerisinde oluştuğu görülmektedir. 1500°C’de ise anortitin iyice azaldığı ve yapıda korund, müllit ve hibonit fazlarının fazla olduğu görülmektedir. Literatürde hibonit ve müllit fazlarının mukavemetin arttırdığından bahsedilmektedir. Deney sonuçlarına bakıldığında da bu fazların oluşmasının mukavemeti arttırdığı görülmektedir. Bu fazlar sebebiyle pişirme sıcaklığı arttıkça mukavemet artmaktadır.



1100°C



1300°C



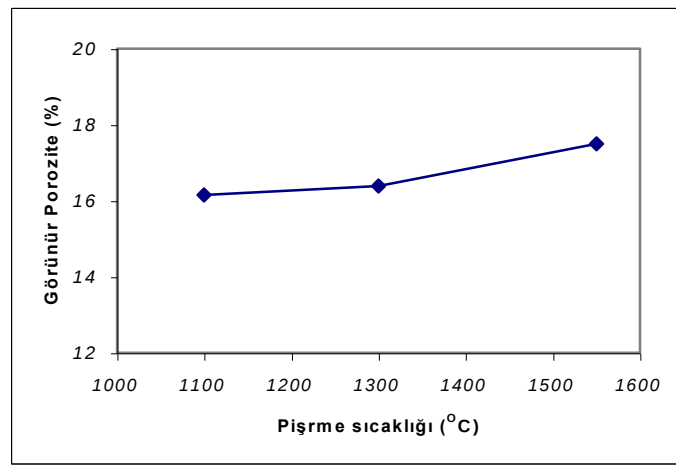
1500°C

X = α -Al₂O₃ (10-173)
a = CaO·Al₂O₃·2SiO₂ (12-301)(Anortit)
M = 3Al₂O₃·SiO₂ (15-776) (Müllit)
H = CaO·6Al₂O₃ (38-470)(Hibonit)

Şekil 5.5. n=0,23 durumunda değişik sıcaklıklarda pişirilmiş numunlerin X-Işınları analizi

5.1.5. Pişirme sıcaklığının görünür poroziteye etkisi

Pişirme sıcaklığının ayrıca malzemenin porozitesi üzerinde büyük etkisi vardır. Tane dağılım modülünün 0,23 olduğu durumda pişirme sıcaklığının malzemenin porozitesi üzerindeki etkisi şekil 5.6’da verilmiştir. Pişirme sıcaklığı arttıkça malzemenin görünür porozite değerleri artmaktadır. Pişirme sıcaklığı arttıkça malzemede bulunan suyun ve hidratların bünyeden uzaklaşma oranı artmaktadır ve bu nedenle malzemenin porozitesi artmaktadır. Ancak 1500°C’de görünür porozite düşmektedir. Bunun sebebi bünyedeki su tamamen gitmektedir ve taneler büyümektedir. Bu nedenle malzemenin porozitesi düşer ve yoğunluğu artar.



Şekil 5.6. $n = 0,23$ durumunda pişirme sıcaklığının poroziteye etkisi

Tüm bu sonuçlar karşılaştırıldığında 0,2 ile 0,25 arasındaki bütün tane boyut dağılımları kendi kendine akan dökülebilir refrakter uygulamalarında, pota vb. sistemlerde kullanılabilir. Özellikle 0,22 ve 0,23 değerlerinde refrakter malzeme endüstriyel uygulamalarda kalıbın şeklini rahatça alabilecektir. Özellikle 0,21 değerinde hazırlanacak malzemeler mukavemet açısından en olumlu sonucu vermiştir. Bu malzemeler gerek “vib-cast(vibrasyon uygulanarak döküm yapma)” gerekse “self-flow(kendi kendine akabilen)” refrakter uygulamalarında çok rahat kullanılabilirler.

5.1.6. Suyun refrakter malzemedeki etkisi

Su refrakter malzemelerde hem bağ oluşumunda hem de akıcılık kazanmasında kullanılır. Ancak su miktarının artması malzemenin özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bunu incelemek için 1A grubu karışımında su miktarı %5,53 yerine

%9.65 kullanılmıştır. Bu grup numuneler 1B olarak belirtilmektedir. Bu grup numuneler 110⁰C’de 18 saat kurutulduktan sonra, 1300⁰C’de 5 saat pişirilmişlerdir. Bu grup numunelere ait sonuçlar tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. 1B Grup numunelerin sonuçları

	1A	1B
Akış Testi (mm)	210	298
Yogunluk (g/cm³)	2,98	2,7
Porozite (%)	17,3	23,9
Mukavemet (kg/mm²)	1795	752

1b grubunda akış 298 iken, 1A grubunda akış 210’dur. Su oranının artması malzemenin akıcılığını oldukça arttırmıştır. Ancak burada önemli olan refrakter malzemenin akmasıdır yani refrakter malzeme üzerinde suyun akmaması gerekir. Su oranı arttıkça refrakter malzeme üzerindeki suyun akmaya başladığı görülmektedir. Su oranının artması refrakter malzemenin tamamen akışını arttıracak anlamına gelmez. Deneyler yapıldığında 1A grubu numunelerde akış sadece refrakterin akması iken 1B grubu numunelerinde akışta sadece refrakter değil, su da akmaktadır. Bu nedenle akış fazla olmaktadır ama bu refrakterin diğer özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Tablo 5.2’deki sonuçlarla karşılaştırıldığında su oranının artmasının mukavemeti ve yoğunluğu düşürdüğü, poroziteyi ise arttırdığı görülmektedir. Bunun sebebi malzeme içerisinde fazla su bulunduğunda kurutma ve pişirme sırasında malzeme içerisinden fazla suyun çıkacak olmasıdır. Fazla su çıktıkça numune içerisinde porlar artacaktır ve bu malzemenin refrakterlik özelliklerini olumsuz etkileyecektir. Özellikle yüksek sıcaklık ve curuf uygulamalarında korozyona ve mekanik dayanıma karşı etkisiz bir ürün ortaya çıkacaktır.

5.2. 2. Grup Numunelerin Sonuçları, Reaktif ve Kalsine Alumina Karşılaştırılması

2.grup numuneler kalsine alumina ile reaktif aluminanın birbirleri ile karşılaştırılması için hazırlanmıştır. Bu grup numunelerde, 1D grup numunelerinde kullanılan kalsine alumina yerine reaktif alumina kullanılmıştır. Bu grup numuneler 2A olarak adlandırılmışlardır. Numuneler 110⁰C’de 18 saat kurutulduktan sonra 1300⁰C’de 5 saat pişirilmişlerdir. Test sonuçlarında yer alan akış çapı döküm yapıldıktan 10

dakika sonraki akış değeridir. Bu grup testlerin sonuçları tablo 5.3’de verilmiştir. Akış testi yapıldığı sırada ortam sıcaklığı 23⁰C’dir.

Tablo 5.3. 2. grup numunelerin sonuçları

	1D (Kalsine Alumina)	2A (Reaktif Alümina)
Akış Testi (mm)	238	213
Yogunluk (g/cm³)	2,98	3,03
Porozite (%)	17,3	15,1

Reaktif alumina ve kalsine alumina dökülebilir refrakter malzemelere malzemenin reolojik ve fiziksel özelliklerini geliştirmesi için ilave edilir. Bu karşılaştırma 1D ve 2A grup numunelerin sonuçları ele alınarak yapılmıştır.

Bu sonuçlar karşılaştırıldığında kalsine aluminanın reaktif aluminaya oranla refrakter malzemeye daha fazla akıcılık verdiği söylenebilir. Bunun sebebi kalsine alumina tanelerinin refrakter malzeme içerisinde taneler arasındaki sürtünmeyi daha az indirmesidir.

Reaktif alumina kullanılan malzemede, kalsine alumina kullanılan malzemeye oranla porozite daha düşüktür. Reaktif alümina tanelerinin çok ince olması bunda etkindir. Bu, çok ince reaktif alumina tanelerinin refrakter malzemede boşlukları kalsine aluminaya oranla daha iyi doldurduğunu belirtmektedir.

Bu deney sonuçları incelendiğinde, akış özelliği ön plana çıkacak kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter üretmek istenildiğinde kalsine alumina kullanmak daha avantajlı olacaktır. Ancak porozitesi düşük, yoğunluğu yüksek bir malzeme üretilmek istendiğinde ise reaktif alümina kullanmak daha faydalı olacaktır.

5.3. 3. Grup Hammaddelerinin Sonuçları ve Alumina Hammaddelerinin Karşılaştırılması

Bu grup numunelerde tabular alumina yerine, kahverengi korund, beyaz korund ve kalsine boksit kullanılmıştır ve aralarındaki farklar incelenmiştir. Numuneler 110⁰C’de 18 saat kurutulduktan sonra 1300⁰C’de 5 saat pişirilmiştir. Numunelere akış, mukavemet, porozite ve yoğunluk testleri yapılmıştır. Test sonuçlarında yer

alan akış çapı döküm yapıldıktan 10 dakika sonraki akış değeridir. Bu grup numelerinin test sonuçları tablo 5.4’de verilmiştir. Akış testinin yapıldığı sırada ortam sıcaklığı 23⁰C’dir.

Tablo 5.4. 3. grup numunlerin sonuçları

	1D (Tabular Alumina)	3A (Kahverengi Korund)	3B (Beyaz Korund)	3C (Kalsine Boksit)
Akış (mm)	238	220	223	127,5
Yogunluk(g/cm³)	2,98	3,12	3,1	2,86
Porozite (%)	17,1	15,8	16,1	16,7
Su Yüzdesi (%)	5,19	5,58	5,4	6,01

5.3.1. Alümina hammaddelerinin akış özellikleri yönünden incelenmesi

İlk olarak bu malzemelerin akış özellikleri incelenmiştir. Bu sonuçlar ışığında tabular alumina, kahverengi ve beyaz korund akış özellikleri açısından kendi kendine akan dökülebilir refrakterler üretiminde kullanmaya uygundur. Bu malzemelerin taneleri arasındaki sürtünme azdır ve taneler arası itme kuvveti fazladır ancak kalsine boksit yapısındaki fazla emprüte itibarı ile akış özellikleri kötüdür. Beyaz korund yapısında daha az emprüte içerdiği için kahverengi korunda oranla daha az su oranında daha fazla akış elde edilmiştir. Kalsine boksit kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde akış yönünden kullanılmaya uygun değildir. Ancak fiyatının öteki hammaddelere oranla ucuz olması kullanımını arttırmaktadır. Bu malzemenin refrakter dökümünde titreşim uygulanması gerekmektedir. Fiyatının ucuz olması nedeniyle dökülebilir refrakter uygulamalarında kullanılmaktadır. Deney sonuçları karşılaştırıldığında en iyi akış tabular alumina ile hazırlanan karışımda elde edilmiştir. Yapısında en az emprüte bu hammaddede bulunduğu ve taneler arası itme kuvveti en fazla olduğundan dolayı yapısında taneler arası sürtünme azdır ve en az su oranında en fazla akış bu karışımlarda elde edilmiştir. Tabular alümina ticari olarak kullanıma en uygun alumina hammaddesi olarak değerlendirilebilir. Bu sonuçlar “n” değeri 0,23 olduğu zaman geçerlidir. Tabular alumina dışında diğer alümina hammaddeleri bir başka “n” değerinde daha iyi akış verebilir.

5.3.2. Alümina hammaddelerinin görünür porozite yönünden incelenmesi

Akış özelliklerinin yanında, refrakterlerin porozitesi refrakter malzemelerin curufa dirençleri açısından çok önemlidir. Bu nedenle ticari olarak refrakterlerin kullanılabilmesi için porozite değerleri önemlidir. Kahverengi korundla ve beyaz korundla hazırlanan karışımlarda görünür porozite diğerlerine oranla daha azdır. Bu malzemeler ergitilerek üretildiklerinden dolayı yapı olarak hem az poroziteye hem de daha çok küresel şekle yakındır. Bu nedenle yapı içerisinde boşlukları ince tanelerin doldurma olasılığı daha yüksektir. Tabular alumina ile hazırlanan karışımda porozitenin diğerlerine oranla daha fazla çıkması tabular aluminanın daha fazla köşeli tanelerden oluşmasıdır. Bu, yapı içerisinde ince tanelerin diğerlerine göre daha az doldurma ihtimalini ortaya atmaktadır. Refrakter malzeme içerisinde köşeli tane olması yerleşim sırasında daha fazla boşluk olmasına sebebiyet verir.

Genel olarak 3. grup karışımların sonuçlarının karşılaştırılması yapıldığında kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter üretiminde tabular alumina, kahverengi korund ve beyaz korund kullanılabilir. Ancak kahverengi korund yüksek sıcaklıklarda yapısında alüminyum titanat oluşumu nedeniyle refrakterlerin özellikleri olumsuz etkilenir. Bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımı uygun değildir. Ticari olarak karşılaştırıldığında tabular alumina kullanıma en uygun alumina hammaddesidir. Endüstride en önemli parametrelerden biri kullanılacak olan hammaddenin en ucuz fiyata temin edilmesidir. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda boksit bu yönüyle kullanım alanı bulmuştur. Ancak deney sonuçları incelendiğinde kendi kendine akan dökülebilir refrakter üretimi için uygun değildir. Bundan dolayı boksit kaynaklı dökülebilir refrakterler titreşim uygulanarak kalıpların şeklini alabilirler. Her ne kadar hammadde ucuza gelmiş olsa da titreşim uygulanması için teçhizat yapımı maliyet açısından firmaya zarar verecektir.

5.4. 4. Grup Numunelerin Sonuçları ve Mikrosilikanın Etkisi

Bu gruptaki numuneler mikrosilikanın kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerdeki etkisini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Sistemdeki mikrosilika oranı artırılıp sistemde bulunan kalsine alumina oranı azaltılmıştır. Bu karışımlar hazırlanırken tane boyut dağılım modulu 0,23 alınmıştır. Numuneler 110°C'de 18 saat kurutulduktan sonra 1300°C'de 5 saat pişirilmiştir. Numunelere akış, mukavemet, porozite testleri yapılmıştır. Test sonuçlarında yer alan akış çapı döküm

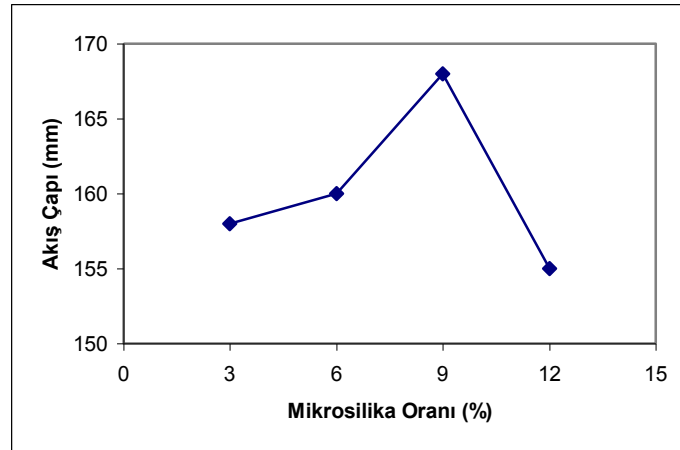
yapıldıktan 10 dakika sonraki akış değeridir. Akış testinin yapıldığı sırada ortam sıcaklığı 23⁰C'dir. Test sonuçları tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5. 4. grup numunelerin sonuçları

<i>Mikrosilika (%)</i>	4A 3	4B 6	4C 9	4D 12
<i>Kalsine Alumina(%)</i>	12	9	6	3
Akış Testi(mm)	158	160	167,5	155
Mukavemet (kg/cm²)	1271	1461	1151	952
Yoğunluk (g/cm³)	2,9	2,98	3,01	3,07
Porozite (%)	15	14	12	9

5.4.1. Mikrosilikanın akış özelliklerine etkisi

Dökülebilir refrakterlerde mikrosilika önemli bir bileşendir. Mikrosilikanın kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlere akış yönünden etkisini gösteren grafik şekil 5.7'de verilmiştir.



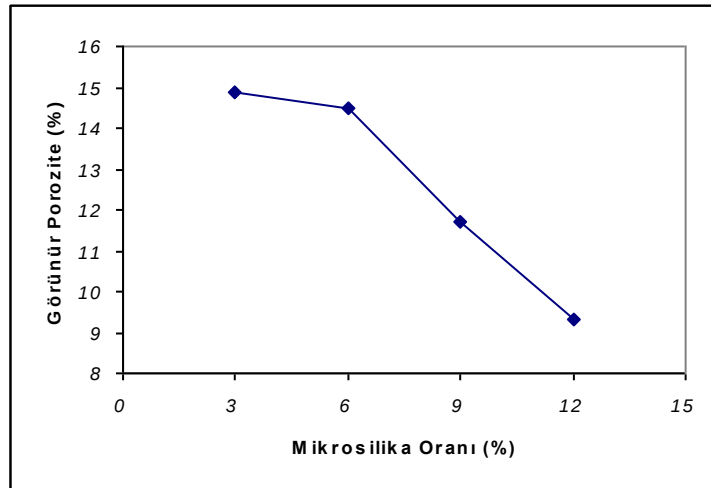
Şekil 5.7. Mikrosilikanın akış özelliklerine etkisi

Şekil 5.7 dikkate alındığında mikrosilika oranı %3 ile %9 arasında refrakterin akış özellikleri gelişmektedir. Bunun sebebi mikrosilikanın çok ince taneli olması refrakter malzeme içerisinde boşlukları doldurması ve refrakter yapı içerisinde tanelerin birbirini itmesinden kaynaklanmaktadır.%9 üzerinde mikrosilika kullanımı ise akışın belirgin bir şekilde düşmesine yol açmaktadır. Bunun sebebi bu tip süperinceler malzemede yüksek oranda kullanıldığında yoğunlaşma ve plastikleşme

artar. Bu da flokülasyon olayını artırır ve böylece akış azalır. %9 mikrosilika yüzdesinin üstü, kendi kendine akabilen refrakter malzemelerde yüksek mikrosilika oranıdır ve kullanımı refrakter malzemeye zarar verecektir.

5.4.2. Mikrosilikanın görünür poroziteye etkisi

Mikrosilikanın en belirgin etkisi refrakter malzemenin porozitesi üzerinde olmuştur. Mikrosilikanın, refrakter malzemenin porozitesine yaptığı etki şekil 5.8’de gösterilmiştir. Mikrosilika oranı arttıkça refrakter malzemenin görünür porozitesi düşmektedir. Mikrosilika çok ince küresel taneli yapıya sahiptir ve bu nedenle refrakter malzeme içerisindeki boşlukları çok rahat doldurabilmektedir. Bu özelliğinden dolayı malzemenin görünür porozitesini düşürmektedir. Malzemenin uzun süreli kullanımı açısından mikrosilika önemli bir bileşendir. Özellikle curufa direnç açısından refrakter yapı için önemli bir bileşendir.



Şekil 5.8. $n = 0,23$ durumunda 1300°C ’de pişirilmiş numunelerde mikrosilikanın görünür poroziteye etkisi

Genel olarak bu grup numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında mikrosilika oranının kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde %5 ile %9 arasında olması refraktere iyi özellik kazandıracaktır. Ancak mikrosilikanın fazla kullanılmaması gerekir çünkü silika oranı alümina refrakter yapısında arttıkça malzemenin mukavemetinde düşüşe sebep olabilecek, anortit ve gehlenit gibi fazlar oluşabilir. Bu nedenle belirtilen yüzde aralığında mikrosilika kullanımı uygun olacaktır.

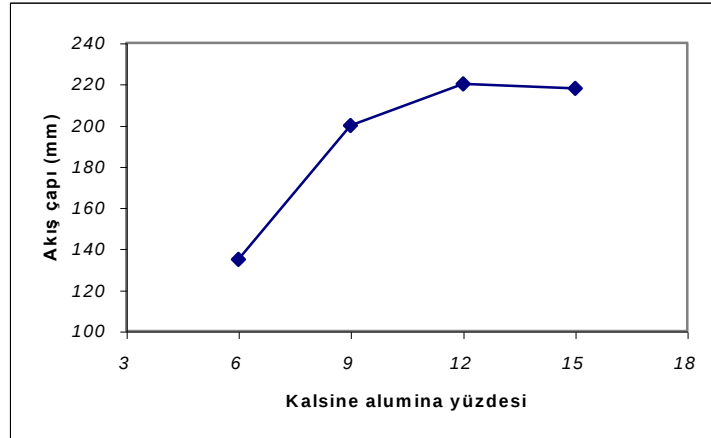
5.5. 5. Grup Numunelerin Sonuçları ve Kalsine Aluminanın Etkisi

Bu grup numunelerin hazırlanmasındaki amaç, kalsine aluminanın alumina esaslı kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerdeki etkisini incelemektir. Numuneler 110°C’de 24 saat kurutulduktan sonra 1300°C’de 5 saat pişirilmişlerdir. Test sonuçlarındaki akış çapı döküm yapıldıktan 10 dakika sonraki akış değeridir. Akış testi yapıldığı sırada ortam sıcaklığı 23°C’dir 5. grup numunelerin test sonuçları tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6. 5. grup numunelerin sonuçları

<i>Kalsine Alumina (%)</i> <i>Pudra Tabular Alumina (%)</i>	5A 6 27,66	5B 9 24,66	5C 12 21,66	5D 15 18,66
Akış Testi(mm)	135	200	220	218
Yoğunluk (g/cm³)	3,01	3,05	3,02	3,03
Porozite (%)	15,1	13,8	15	14,8

Kalsine alumina dökülebilir refrakterlerde malzemenin reolojik özelliklerini geliştirmek açısından önemli bir bileşendir. Kalsine aluminanın kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde en belirgin etkisi malzemenin akış özellikleri üzerinde olmuştur. Kalsine aluminanın akış özellikleri üzerindeki etkisini gösteren grafik, şekil 5.9’de verilmiştir. Kalsine alumina oranı arttıkça malzemenin akışkanlık özellikleri artmaktadır ancak %12’den sonraki kalsine alumina miktarı akış özelliklerinin gelişmesinde fazla etkili olmamaktadır. Kalsine alumina ince taneli yapısı itibarı ile malzeme içerisindeki sürtünmeyi azaltmaktadır bu nedenle de malzemenin akış özellikleri gelişmektedir. Genel olarak sonuçlara bakıldığında %8-12 arası kalsine alumina kullanımı kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerde uygun olacaktır.



Şekil 5.9. $n = 0,23$ durumunda kalsine aluminanın akış çapına etkisi

5.6. 6. GRUP NUMUNELERİN SONUÇLARI VE SİTRİK ASİTİN ETKİSİ

6. grup numuneler, alumina esaslı kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde geciktirici etkisini incelemek için hazırlanmıştır. Geciktirici olarak sitrik asit kullanılmıştır. Geciktiriciler malzemenin priz alma süresini uzatmaktadır. Numuneler 110°C 'de 18 saat kurutulduktan sonra 1300°C 'de 5 saat pişirilmiştir. Test sonuçlarındaki akış değeri döküm yapıldıktan 10 dakika sonraki akış çapıdır. Akış testi yapıldığı sırada ortam sıcaklığı 19°C 'dir. 6. grup numunelerin test sonuçları tablo 5.7'da gösterilmiştir

Tablo 5.7. 6. Grup numunelerin sonuçları

	6A	6B	6C	6D
<i>Sitrik asit (%)</i>	<i>0,02</i>	<i>0,04</i>	<i>0,06</i>	<i>0,08</i>
<i>Su (%)</i>	<i>5,6</i>	<i>5,65</i>	<i>5,1</i>	<i>5,4</i>
Akış Testi(mm)	152,5	167,5	147,5	130
Priz Alma Süresi (dk.)	13	30	25	60
Yoğunluk (g/cm^3)	2,97	3,03	3,01	3
Porozite (%)	17,1	13,9	14,2	15,2

Dökülebilir refrakterlerde priz alma süresi önemli bir parametredir. Malzemenin döküm yapılırken donmaması gerekir, aksi takdirde malzemenin çalışılabilirlik özelliği kalmaz. Dökülebilir refrakterlere priz alma süresini geciktirmek için bazı

ilaveler yapılır. Bu tez çalışmasında geciktirici olarak sitrik asit kullanılmıştır. Geciktiricinin etkisi en belirgin olarak malzemenin priz alma süresi üzerinde farkedilmiştir. Tablo 5.7’de belirtilen sonuçlar incelendiğinde belirgin bir şekilde sitrik asit oranı arttıkça malzemenin priz alma süresinin arttığı görülmektedir. Ancak sitrik asit oranı %0,06 olduğu zaman priz alma süresinde bir düşüş görülmektedir. Bunun sebebi kullanılan su oranından kaynaklanmaktadır. Dikkat edildiğinde bu oranda kullanılan su oranı diğerlerinden düşüktür. Bu değerde su oranının az olması priz alma süresini düşürmüştür. Buradan da şu söylenebilir ki; refrakter malzemede kullanılan su oranı da malzemenin priz alma süresini etkilemektedir. Kullanılan su oranı arttıkça malzemenin priz alma süresi artmaktadır. Sitrik asitin malzemenin priz alma süresini arttırmasının sebebi, refrakter malzemenin içindeki hidratlaşmanın uzun sürmesidir.. Malzemenin içindeki hidratlaşma tamamlanınca malzeme priz almış olur ve bunu geciktirerek malzemenin priz alma süresini etkilemektedir. Malzemenin döküm sırasında donmasını engellemek için sitrik asit kullanımı uygun olacaktır.

6. GENEL SONUÇLAR

- 1) Tane boyut dağılım modulunun 0,21, 0,22 ve 0,23 olduğu durumlarda akıcılığın çok iyi olduğu saptanmıştır.
- 2) Tabular alüminaya alternatif olarak kahverengi korund ve beyaz korundun kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde kullanılabileceği saptanmıştır. Kalsine boksitin ise vibrasyon uygulanarak akışının sağlanması daha uygun olacağı saptanmıştır.
- 3) Kalsine alüminanın %6 ile %12 arasında kendi kendine akabilen dökülebilir refrakterlerde akış özelliklerini arttırdığı saptanmıştır.
- 4) Mikrosilikanın %3 ile %12 arasında kullanıldığı zaman kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter malzemelerin görünür porozitesini düşürdüğü saptanmıştır. Ayrıca mikrosilika %3 ile %9 arası kullanıldığında akıcılığı arttırdığı,%9 ile %12arası kullanıldığında ise akıcılığı düşürdüğü görülmüştür.
- 5) Pişirme sıcaklığı 1100⁰C’den1500⁰C’ye çıkartıldığı zaman mukavemetin arttığı saptanmıştır.

- 6) Sitrik asit sisteme %0,02 ile%0,08 arası ilave edilmiştir ve bu aralıkta kullanıldığında malzemenin priz alma süresini arttırdığı görülmüştür. Su oranının da malzemenin priz alma süresini etkilediği saptanmıştır.

Genel olarak bütün deneyler sonucunda; kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter üretiminde tabular alumina kullanımı uygun olacaktır. Bu hammaddeye alternatif olarak ise kahverengi korund ve beyaz korund bu tür refrakter üretiminde kullanılabilecektir. Tane boyut dağılım modulu 0,23 olması optimum sonuçları verecektir. Buna alternatif olarak tane boyut dağılım modülünün 0,22 ve 0,21 seçilmesi de kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter üretiminde uygundur. Kurutma işleminden sonra yapılan pişirme işlemi sıcaklığının 1300°C ve üzerinde seçilmesi yapıdaki sinterlermeyi en uygun seviyeye çekecektir. Kendi kendine akabilen dökülebilir refrakter malzemede reolojik özellikleri geliştirmesi için kalsine veya reaktif alümina kullanımı % 8-12 arası, mikrosilika kullanımı ise % 6-9 arası uygun olacaktır. Malzemenin akıcılığını arttırmak için çok düşük miktarlarda dispersan, priz alma süresini arttırmak için ise çok düşük miktarlarda sitrik asit kullanımı uygun olacaktır.

7. ÖNERİLER

- 1) Değişik tane boyut dağılım modulleri denenebilir
- 2) Değişik dispersanlar denenebilir. Örn; Vanisperse CB, Darvan C, Darvan 811D
- 3) Değişik geciktiricilerin etkileri denenebilir.
- 4) Hızlandırıcıların etkileri denenebilir.
- 5) Çimento yerine hidrolik bağlayıcı olarak hidratlaşabilir alümina kullanabilir.
- 6) Tabular aluminaya alternatif refrakter malzemeler kullanarak, değişik tane boyut dağılım modullerinde karışım hazırlanabilir ve bunların özellikleri incelenebilir.
- 7) Zeta potansiyeli, viskozite v.b. gibi refrakterin reolojik özelliklerini etkileyecek parametrelerin ölçümleri yapılabilir.
- 8) Dinger & Funk Denklemim kullanılarak değişik tane boyut dağılımlarında özellikler incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Altun, A.**, 2000, Effect of Temperature on the Mechanical Properties of Self Flowing low cement refractory concrete, *Cement and Concrete Research*, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Dokuz Eylül University.
- [2] **Banerjee, S.**, 1998, Monolithic Refractories, World Scientific Publishing.
- [3] **Banerjee, S.**, 1993, Thermal and Corrosion Properties of Monolithic Refractories for Iron and Steel Applications, Key Engineering Materials, Vol. 88, 1-20.
- [4] **Bauer, W., Franke, R.**, Corrosion of monolithic refractory castables for steel production at high temperatures, *Intocast AG*, Duisburg
- [5] **Bugajski, M., Schwaiger, R.**, 1996, Self Flowing Castables, Veitsch-Radex Rundschau.
- [6] **Dinger, D.R. and Funk, J.E.**, 1992, Particle Packing II-Review of Packing of Polydisperse Particle Systems, *Interceram*, 41,n2, 95,96.
- [7] **Dinger, D.R. and Funk, J.E.**, 1992, Particle Packing III-Discrete versus continuous particle sizes, *Interceram*, 41,n5, 332-334.
- [8] **Durmuş, Ç.**, Eylül 1998, Alümina Esaslı Dökülebilir Refrakterlerin Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [9] **Durmuş, C., Sönmezler, Y.**, Synthesis and properties of self flowing castables based on alumina, *Metamin A.S.*
- [10] **Devlet Planlama Teşkilatı**, 2001 Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu(Refrakter), Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara.
- [11] **Fuhrer, M., Hey, A., Lee, W.**, 19 August 1997, Microstructural Evolution in Self-forming Spinel/Calcium Alüminate-Bonded Castable Refractories, Department of Engineering Materials, University of Sheffield, *Journal of the European Ceramic Society*.
- [12] **Geçkinli, E.**, 1991, İleri Teknoloji Malzemeleri, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi.
- [13] **Hart, L.D.**, 1990, Production Processes. Properties and Applications for Tabular Alumina Refractory Aggregates, Alumina Chemicals Science and Technology Handbook.

- [14] **Keegan, N.**, 1998, Raw Materials for the Refractories Industry, *Industrial Minerals Raw Materials Survey*.
- [15] **Mingü, K.**, 2 Ocak 2002, Alümina Esaslı Dökülebilir Refrakterin SiC ve C ilavesi ile Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- [16] **Myhre, B.**, 1994, The Effect of Particle size Distrubition on Flow of Refractory Castables, Elkem Refractories, *International Ceramics*, Norway
- [17] **Myhre, B., Sandberg, B.** April 1994, Microsilica-A Versatile Refractory Raw Material, Elkem Refractories, *Refractories Research and News*
- [18] **Myhre, B., Sunde, K.**, April 1992, Tabular Alumina Based Refractory Castables-Part 1, Elkem Refractories, *International Ceramics*, Norway.
- [19] **Nikishawa, A.**, 1984, Technology of Monolithic Refractories, Plibrico company Japan Ltd. Pub.
- [20] **National Science and Industry Forum Reports**, February 1994, Ceramics in Australia, Australian Academy of Science, *National Science and Industry Forum Reports*.
- [21] **Orisenkova, O.**, Linings of the Secondary Metallurgy Vessels in Focus of SLOVMAG a.s. Lubenik, Slovak Republic
- [22] **Özen, İ.**, Haziran 1998, Magnezit-Karbon Refrakterlerde Granülasyon İncelemesi ve Antioksidan Katkısı, *Yüksek Lisans Tezi*. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- [23] **Oliveir, I., Studart, A., Valenzuela, F., Pandolfelli, V.**, September 2002, Setting behaviour of ultra-low cement refractory castables in the presence of citrate and polymethacrylate salts, Federal University of Sao Carlos, *Ceramics International*.
- [24] **Özgen, S.**, 2002, Seramik Malzemelerin Üretimi II-Yardımcı Ders Notları, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [25] **Petzold, A., Ulbricht, J.**, 1994, Feuerbeton. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [26] **Parr, C., Revais, C., Evangelista, P.**, Control of Formulation and Optimization of Self-Flow Castables Based on Pure Calcium Aluminates.Lafarge Aluminates, *Refractories Application and News*, Volume 7, Number 2.

- [27] **Roy, J.M., Tingley, L.R.**, 1994, High Performance Aluminas for Refractories, *Interceram*, Vol.43, No.4.
- [28] **Sezer, B.**, 1994, Gümrük Birliğine Girerken Türk Refrakter Sektörü, *Seramik ve Refrakter Üreticileri Yayınları*, n1, İstanbul.
- [29] **Silvonen, J.**, 2003, Porous ceramic castable refractories, Powerpoint Presentation, Institute of Material Science
- [30] **Studart, A., Zhong, W., Pileggi, R., Pandolfelli, V.**, Processing of Zero Cement Self-Flow Alumina Castables, *The American Society Bulletin*, Federal University of Sao Carlos.
- [31] **Studart, A., Zhong, W., Pandolfelli, V.**, 1999, Rheological Design of Zero-Cement Self Flow Castables, *The American Society Bulletin*, Federal University of Sao Carlos
- [32] **The Technical Association of Refractories**, 1998, Refractories Handbook, Japan.
- [33] www.ceminerals.com/t1064.html
- [34] www.azom.com/details.asp?ArticleID=1573
- [35] www.ceramicindustry.com
- [36] www.alumina.alcoa.com/products/tabular.html
- [37] **Yamamoto, A., Noda K., Sakamoto, S., Teraushi, T.**, 1996, The Application of Self-Flow Castables for Tundishes. *Taikabutsu Overseas*, Vol.16, No:4, 109.
- [38] **Zawrah, M., Khalil, N.**, 2000, Effect of Mullite Formation on Properties of refractory castables, Ceramic Department, National Research Center, *Ceramics International*.
- [39] **Zhou, X., Sankarayanane, K., Rigaud, M.**, 2003, Design of Bauxite-Based low-cement pumpable castables: a reological approach, Ecole Polytechnique de Montreal, *Ceramics International*

ÖZGEÇMİŞ

1979 Kdz. Ereğli’de doğmuştur. Liseyi Kdz. Ereğli TED Koleji’nde bitirdikten sonra, 1997 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden 2001 yılında mezun olmuştur. Lisans programı gereği ERDEMİR (Çelikhane ve Kok Fabrikası) ile ÖZDEMİR Boru & Profil’de staj yapmıştır.

2001 Bahar Döneminde İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü Üretim Metalurjisi Program’ında Yüksek Lisans eğitime başlamıştır. Şu anda halen SÜPERATEŞ Refrakter Fabrikasında Yüksek Lisans Tez çalışmalarına devam etmektedir.