

75333

**ALUMİNA ESASLI DÖKÜLEBİLİR
REFRAKTERLERİN GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Çağatay DURMUŞ

F0696Y104

75333

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Eylül 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Eylül 1998

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Serdar ÖZGEN

Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Kelami ŞEŞEN

Doç. Dr. Cemalettin YAMAN

İöze
ŞEŞEN
Yaman

İ.İ. T.Ü. ENSTİTÜSÜ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

EYLÜL 1998

ÖNSÖZ

Lisans ve lisans sonrası eğitimim boyunca ve tez çalışmalarım sırasında yol gösterici tavrı ve verdiği destekten ötürü sayın hocam Prof. Dr. Serdar Özgen' e teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimin süresince bana gösterdikleri sınırsız anlayış ve yardımları nedeniyle mesleki anlamda gelişmemde en büyük pay sahibi olan başta Oğuz Velgay ve Yalçın Sönmezler olmak üzere tüm METAMİN A.Ş. ailesine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Yük. Müh. Özgür B. Yılmaz, Yük. Müh. Turan Tambaş, Araş. Gör. Engin Maytalman ve Araş. Gör. Suat Yılmaz' a teşekkür ederim.

Gıda Mühendisliği Bölümü Araş. Gör. Ebru Fıratlıgil' e, o özel insana, başından beri bana gösterdiği sabır, hoşgörü ve anlayıştan ötürü teşekkürü borç bilirim.

Hayatımın her döneminde olduğu gibi bu çalışmam sırasında da yanımda olan aileme, verdikleri manevi destek, gösterdikleri duyarlılık ve anlayış için teşekkürü borç bilirim.

Eylül 1998

Çağatay DURMUŞ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLER	4
2.1 Genel Özellikleri Ve Uygulama Alanları.....	4
2.2 Dökülebilir Refrakterlerin Bileşenleri	9
2.2.1 Tabular alumina	9
2.2.2 Kalsine ve reaktif alumina	12
2.2.3 Mikrosilika	13
2.3 Dökülebilir Refrakterlerin Yapısal Özellikleri	14
2.3.1 Porozite ve hacim ağırlığı.....	14
2.3.2 Partikül paketlenmesi.....	15
2.3.3 Reolojik özellikler	20
2.3.3.1 Elektriksel çift tabaka	20
2.3.3.2 Zeta potansiyel ve pH etkisi	22
2.4 Çimento Reaksiyonları Ve Kurutma Kademesi.....	23
2.5 Kendi Kendine Dökülebilir Refrakterler.....	25
2.5.1 Tanım ve genel özellikler	25
2.5.2 Uygulama alanları	26

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3.1 Kullanılan Hammaddeler	29
3.2 Kullanılan Hammaddelerin Özellikleri	29
3.2.1 Tabular alumina	29
3.2.2 Kalsine alumina	31
3.2.3 Reaktif alumina	33
3.2.4 Çimento	36
3.2.5 Mikrosilika	37
3.3 Numunelerin Hazırlanması	39
3.3.1 Numunelerin sınıflandırılması	39
3.3.1.1 A grubu karışımları	39
3.3.1.2 B grubu karışımları	40
3.3.1.3 C grubu karışımları	41
3.3.1.4 D grubu karışımları	42
3.3.1.5 E grubu karışımları	46
3.3.2 Numunelerin üretimi	47
3.4 Numune Özelliklerinin Ölçümleri	49
3.4.1 Akış testi	49
3.4.2 Hacim ağırlığı ve porozite	50
3.4.3 Soğukta basma mukavemeti	51
3.5 Numune Özelliklerinin Belirlenmesi	53
3.5.1 Akış testi	53
3.5.1.1 Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterin akış testi sonuçları; A grubu numuneleri	53
3.5.1.2 Tane şeklinin akıcılık özelliklerine etkisi; B grubu numuneleri	54
3.5.1.3 Reaktif alumina tipine bağlı olarak akıcılık özelliklerinin değişimi; C grubu numuneleri	55
3.5.1.4 q değerinin akıcılık özelliklerine etkisi; D grubu numuneleri	56
3.5.1.5 Mikrosilikanın akıcılık özelliklerine etkisi; E grubu numuneleri	57

3.5.2 Hacim ağırlığı ve porozite	
3.5.2.1 Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterlerin hacim ağırlığı ve porozite deneyi sonuçları; A grubu numuneleri	58
3.5.2.2 Tane şekline bağlı olarak hacim ağırlığı ve görünür porozite miktarının değişimi; B grubu numuneleri	59
3.5.2.3 Reaktif alumina tipine bağlı olarak hacim ağırlığı ve görünür porozite miktarının değişimi; C grubu numuneleri	60
3.5.2.4 q değerine bağlı olarak hacim ağırlığı ve görünür porozite miktarının değişimi; D grubu numuneleri	62
3.5.2.5 Mikrosilikanın hacim ağırlığı ve görünür porozite değişimine etkisi; E grubu numuneleri	63
3.5.3 Soğukta basma mukavemeti	
3.5.3.1 Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterin soğukta basma mukavemeti değerleri; A grubu numuneleri	64
3.5.3.2 Tane şeklinin soğukta basma mukavemetine etkisi; B grubu numuneleri...	65
3.5.3.3 Reaktif alumina tipinin soğukta basma mukavemeti değerlerine etkisi;C grubu numuneleri	67
3.5.3.4 q değerinin soğukta basma mukavemetine etkisi; D grubu numuneleri.....	68
3.5.3.5 Mikrosilikanın soğukta basma mukavemetine etkisi; E grubu numuneleri ..	68
3.5.4 Mikroyapı incelemeleri.....	70
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	71
4.1. Akıcılık Özellikleri Geliştirilmiş Dökülebilir Refrakterin Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	71
4.2. Tane Şeklinin Etkisi.....	72
4.3. Reaktif Alumina Tipinin Etkisi.....	72
4.4. q Değerinin Etkisi.....	72
4.5. Mikrosilikanın Etkisi.....	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	77

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Dünyada refrakter üretimi	5
Tablo 2.2 Dökülebilir refrakterlerin genel uygulama alanları	7
Tablo 2.3 Değişen koordinasyon sayısına bağlı olarak tek tip tanelerin paketlenmesinde oluşan boşlukların büyüklüğü ($R=bilya$ yarıçapı)	17
Tablo 2.4 $R1/R2 \approx 50$ olan 2 farklı tür bilyadan oluşan karışımlarda en sıkı paketlenmiş yapının karışım oranları ve en düşük poroziteler.....	17
Tablo 2.5 Bazı temel hammaddeler için belirlenmiş sıfır yük noktası pH değerleri	23
Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan tabular alüminanın kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri	29
Tablo 3.2 -45 mikron ebadındaki tabular alümina tanelerinin X-ışınları faz analizi.....	30
Tablo 3.3 Kalsine alüminanın kimyasal bileşimi	31
Tablo 3.4 Kalsine alüminanın X-ışınları faz analizi	32
Tablo 3.5 Deneylerde kullanılan reaktif alüminaların kimyasal analizi	33
Tablo 3.6 Reaktif alümina 1' e ait X-ışınları faz analizi sonuçları	34
Tablo 3.7 Reaktif alümina 2' e ait X-ışınları faz analizi sonuçları	35
Tablo 3.8 Çimentonun kimyasal özellikleri	36
Tablo 3.9 Çimentoya ait X-ışınları faz analizi sonuçları	37
Tablo 3.10 Mikrosilikanın kimyasal bileşimi.....	37
Tablo 3.11 SFC1 karışım oranları (% ağırlıkça)	39
Tablo 3.12 SFC2 karışım oranları (% ağırlıkça)	41
Tablo 3.13 SFC3 karışım oranları (% ağırlıkça)	41

Tablo 3.14	q değerine bağlı olarak belirlenen karışım oranları (% ağırlıkça).....	42
Tablo 3.15	E grubu numuneleri karışım oranları (% ağırlıkça)	47
Tablo 3.16	Kendi kendine akan dökülebilir refrakter harçlarda akış testi sonunda istenen yayılma çapı	49
Tablo 3.17	SFC1 numunelerinin test sonucu elde edilen hacim ağırlığı ve porozite değerleri	58
Tablo 3.18	SFC2 numunelerinin test sonucu elde edilen hacim ağırlığı ve porozite değerleri	59
Tablo 3.19	SFC3 numunelerinin test sonucu elde edilen hacim ağırlığı ve porozite değerleri	61
Tablo 3.20	q değerine bağlı olarak hacim ağırlığının değişimi	62
Tablo 3.21	q değerine bağlı olarak görünür porozite miktarının değişimi.....	63
Tablo 3.22	Mikrosilika oranına bağlı olarak hacim ağırlığının değişimi.....	63
Tablo 3.23	Mikrosilika oranına bağlı olarak görünür porozite miktarının değişimi	63
Tablo 3.24	SFC2 numunelerinin test sonucu elde edilen soğukta basma mukavemeti değerleri	66
Tablo 3.25	SFC3 numunelerinin test sonucu elde edilen soğukta basma mukavemeti değerleri	67
Tablo 3.26	q değerine bağlı olarak soğukta basma mukavemetinin değişimi	68
Tablo 3.27	Mikrosilika ilavesinin soğukta basma mukavemetine etkisi	68

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	Yüksek fırın yolluklarının monolitik örüm uygulamaları	7
Şekil 2.2a	Gaz üfleme lansı	9
Şekil 2.2b	Degasser ünitesi şnorkel bloğu	9
Şekil 2.3	Korundum kristal yapısı	10
Şekil 2.4a	Korundum kristallerinin oda sıcaklığında SEM' deki görüntüleri	11
Şekil 2.4b	Korundum kristallerinin 1000°C' de pişirme sonrası SEM' deki görüntüleri	11
Şekil 2.4c	Korundum kristallerinin 1500°C' de pişirme sonrası SEM' deki görüntüleri	11
Şekil 2.5	Refrakter malzemelerde görülen por şekilleri	14
Şekil 2.6a	Koordinasyon sayısı 6 olan paketlenme durumunda yatay düzlemindeki 4 köşeli kesiti	16
Şekil 2.6b	Koordinasyon sayısı 8 olan paketlenme durumunda yatay düzlemindeki 3 köşeli kesiti	16
Şekil 2.6c	Koordinasyon sayısı 8 olan paketlenme durumunda alansal kesite sahip kanalların uzunluğu	16
Şekil 2.7a	Flokülasyon durumunda kolloid etrafındaki iyon atmosferinin şematik gösterimi	22
Şekil 2.7b	Deflokülasyon durumunda kolloid etrafındaki iyon atmosferinin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.8a	Titreşim altında dökülebilir refrakterler ile monolitik pota örümü	27
Şekil 2.8b	Kendi kendine dökülebilir refrakterler ile monolitik pota örümü	27
Şekil 2.9	Monolitik pota örümü	27

Şekil 2.10a	Tandişlerin titreşim altında dökülebilir refrakterler ile örümü.....	28
Şekil 2.10b	Tandişlerin kendi kendine akan dökülebilir refrakterler ile örümü	28
Şekil 3.1	Tabular alumina –45 ve –20 mikron ebadındaki fraksiyonlarının tane boyut dağılımı	30
Şekil 3.2	Tabular aluminanın SEM’ de çekilmiş mikroyapı fotoğrafları	31
Şekil 3.3	Kalsine aluminanın SEM’ de çekilmiş mikroyapı fotoğrafları.....	32
Şekil 3.4	Reaktif alumina 1 malzemesinin tane boyut dağılımı.....	34
Şekil 3.5	Reaktif alumina 2 malzemesinin tane boyut dağılımı.....	35
Şekil 3.6	Çimentonun tane boyut dağılımı.....	37
Şekil 3.7	Mikrosilikanın tane boyut dağılımı.....	38
Şekil 3.8	SFC1 karışımının +45 mikronluk kısmının tane boyut dağılımı	40
Şekil 3.9	SFC1 karışımının –45 mikronluk kısmının tane boyut dağılımı	40
Şekil 3.10	SFC3 karışımının –45 mikronluk kısmının tane boyut dağılımı	42
Şekil 3.11	q=0.20; tane boyut dağılımı	43
Şekil 3.12	q=0.23; tane boyut dağılımı	43
Şekil 3.13	q=0.24; tane boyut dağılımı	44
Şekil 3.14	q=0.25; tane boyut dağılımı	44
Şekil 3.15	q=0.28; tane boyut dağılımı	45
Şekil 3.16	q=0.33; tane boyut dağılımı	45
Şekil 3.17a	SFC1 numunesinin akış testi sonundaki yayılma çapı	50
Şekil 3.17b	Kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerden beklenen akış testi sonuçları	50
Şekil 3.18	SFC1 karışımının bekleme süresine bağlı olarak yayılma çapının değişimi	53
Şekil 3.19	Tane şeklinin akıcılık özelliklerine etkisinin yayılma çapına bağlı olarak değişimi.....	54

Şekil 3.20	Reaktif alumina tipinin akıcılık özelliklerine etkisinin yayılma çapına bağlı olarak gösterimi.....	55
Şekil 3.21	Yayılma çapının q değerine bağlı olarak değişimi.....	56
Şekil 3.22	Yayılma çapının mikrosilika oranına bağlı olarak değişimi	57
Şekil 3.23	SFC1 karışımı ile hazırlanan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak hacim ağırlığı ve porozite değerlerinin değişimi	58
Şekil 3.24	Tane şeklinin hacim ağırlığı ve porozite değişimine etkisi.....	60
Şekil 3.25	Reaktif alumina tipine bağlı olarak görünür porozitenin değişimi.....	61
Şekil 3.26	Reaktif alumina tipine bağlı olarak hacim ağırlığının değişimi	62
Şekil 3.27	Mikrosilika oranına (% ağırlık) bağlı olarak görünür porozitenin değişimi.....	64
Şekil 3.28	SFC1 numunelerinin test sonucu elde edilen soğukta basma mukavemeti değerleri	65
Şekil 3.29	Tane şeklinin soğukta basma mukavemetine etkisi.....	66
Şekil 3.30	Reaktif alumina tipinin soğukta basma mukavemetine etkisi.....	67
Şekil 3.31	Mikrosilika oranına bağlı olarak soğukta basma mukavemetinin değişimi	69
Şekil 3.32	SFC1 numunesinin SEM' deki kırık yüzey görüntüsü	70
Şekil 3.33	q=0.33 numunesinin SEM' deki kırık yüzey görüntüsü	70

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
q	: Tane boyut dağılım modülü
r	: Bir elekteki tanelerin hacminin bir sonraki elekteki tanelerin hacmine oranı
W_k	: Kuru ağırlık
W_a	: Askıda ağırlık
W_y	: Yaş Ağırlık
ρ_w	: Hacim ağırlığı
ρ_s	: Sıvı yoğunluğu
σ_{SBM}	: Soğukta basma mukavmeti
P_{max}	: Kırılma anındaki pres basıncı
F_o	: Numunenin basınç uygulanan yüzey kesit alanı

ÖZET

Son yıllarda demir-çelik endüstrisinin ihtiyaçlarına paralel olarak gelişen refrakter endüstrisinin araştırmaları dökülebilir refrakterler üzerinde yoğunlaşmış ve bu tür kolloidal sistemlerin reolojik özelliklerinin gelişmesiyle birlikte mekanik etki uygulanmaksızın kalıpta yerleşen düşük poroziteli ve performansı en az dökülebilir refrakterler kadar yüksek yeni bir malzeme türü ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler literatürde “kendi kendine akan dökülebilir refrakterler”, “serbest akan dökülebilir refrakterler” gibi ifadelerle tanıtılmaktadır.

Kendi kendine dökülebilir ve reolojik özellikleri geliştirilmiş bu tür refrakter sistemleri günümüzde refrakter tüketiminin en yoğun olduğu demir-çelik endüstrisinde ilgiyle karşılanmış olup özellikle Japonya’ da tandış ve pota astar örümlelerinde pilot uygulamaları mevcuttur.

Bu çalışmada kendi kendine akan refrakterler genel uygulama ve ürün özellikleri açısından incelenmiştir. Çalışma teorik ve deneysel kısımlardan oluşmaktadır. Teorik kısımda dökülebilir refrakterlerin dünyada gelişimi ve genel malzeme karakteristikleri anlatılmıştır. Deneysel kısımda serbest akış özelliğine sahip çeşitli karışımlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Karışımlar tane boyut dağılımının bir ifadesi olan q değerine göre saptanmıştır. Baz olarak alınan karışım $q=0.25$ olarak kabul edilmiş; akış özellikleri farklı hammadde ve katkıları kullanılarak geliştirilmiştir. Temel refrakter ürün özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek maksimum ürün özelliklerine ulaşılacak karışımın saptanması amaçlanmaktadır.

SUMMARY

DEVELOPMENT OF ALUMINA BASED CASTABLE REFRACTORIES

The development of low-cement castables and ultra-low-cement castables reduced the consumption of refractories in steel industries and led to the production of high-quality unshaped refractories. There are four types of alumina according to their cement content;

- Conventional ($\text{CaO} > 2.5\%$)
- Low cement ($1.0\% < \text{CaO} < 1.5\%$)
- Ultra low cement ($0.2\% < \text{CaO} < 1.0\%$)
- Noncement ($\text{CaO} < 0.2\%$)

In recent years the self flowing castables have been developed with high strength, density, improved workability, easier installation. Flowability and reduced viscosity is the main characteristic of SFCs. When refractory aggregates, liquid and other components are mixed, they form a flowable adhesive composite. Improved flowability can be reached by optimum dispersion. Optimal particle packing is important to achieve good flow and high density at low water levels. The pores of the structure are filled by a viscous, liquid phase consisting of the fines, superfines and also cement.

Particle size distribution is one of the most important parameters for self flow character. Several models have been presented in the literature on particle packing to obtain required density.

In the following study the rheological and some physical properties of self flowing castables were studied. Initially the castable composition of self flow castable was designed and tested, then the effect of reactive alumina type, q-value (distribution coefficient), microsilica addition and the use of spherical grains has been

investigated. Particle packing was evaluated by the Dinger&Funk (Modified Andreassen) model according to q-value. The flowability properties are measured by flow test.

1. Experimental procedure

5x5x5 cm samples were prepared for the physical tests (apparent porosity, bulk density, cold crushing strength). All tabular alumina components are mixed dry for 1 minute in the lab. mixer. After water addition wet mixing is continued for several minutes. The castable is then casted into moulds without vibration. After demoulding the samples is cured 24h at room temperature. Cured samples are made ready for tests after drying in 110°C/18h.

To determine the flowability and water demand of self flowing castables, flow test was used. After wet mixing, metal flow cones are filled completely with self flowing castable without vibration. The flow cone is lifted up after 10, 30, 60 min. The spreading of castable on the table is measured as an flow value of the castable. Self flowing castable should reach after 10 min. flow diameter of 200-250 mm and after 30 min flow diameter should be at least 190 mm.

2 Test results

2.1 Physical and reological properties of self flowing castables

The flow test results of self flowing castables are given in Fig. 1. Flow properties of self flowing castables decreases with increasing time. It has seen that the self flowing castable was workable after 90 min. without hardening and available for easy installing of huge blocks, linings etc. The high plasticity of the castable makes the movement of the grains easy. When the flow-cone is lifted up the castable spreads on the flow table about 292 mm after 10 min. at approx. 12°C.

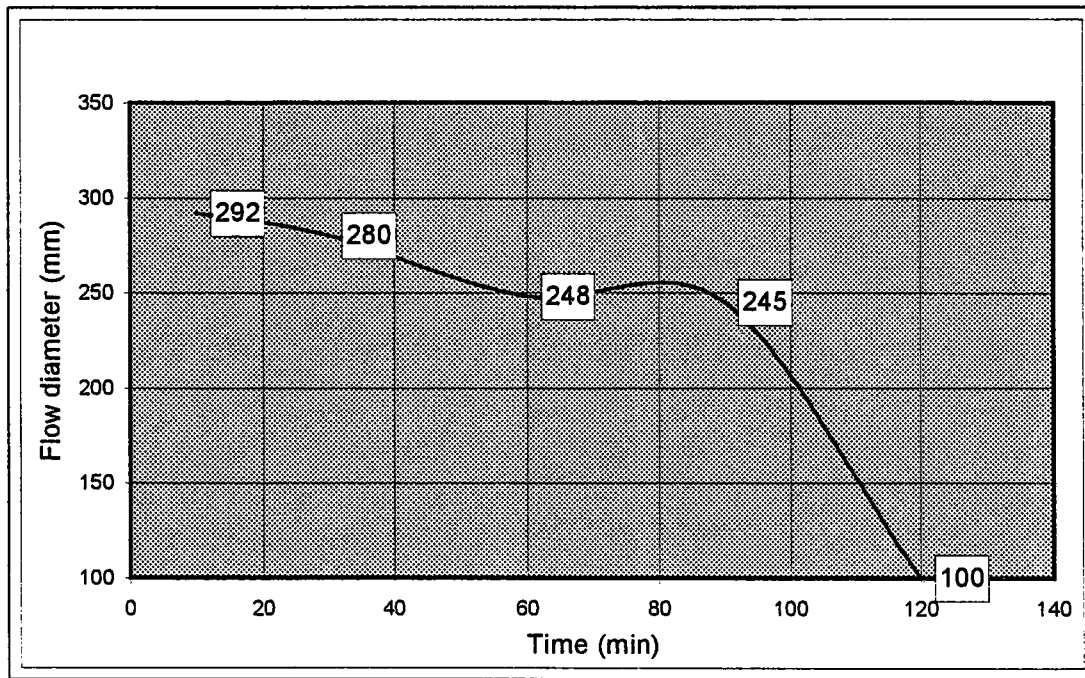


Fig. 1 The flow test results of self flowing castables

The apparent porosity (DIN 51056), bulk density (DIN 51065), cold crushing strenght (DIN 51067) are determined and all results are given in Table 1.

Table 1 The apparent porosity, bulk density, cold crushing strenght values for SFC1 samples.

Temperature (°C)/ Time (h)	Bulk density (g/cm ³)	Apparent porosity (%)	CCS (kg/cm ²)
110°C/18h	3.07	11.6	362
1000°C/5h	3.05	12.6	209
1300°C/5h	3.01	15.0	844
1500°C/5h	2.99	16.4	1170
1650°C/5h	3.09	15.4	2097

The CCS and apparent porosity values increases due to sintering. At 1000°C the strenght of the castable decreased due to breakingdown of the hydrate phases.

2.2 The effect of spherical grains

The effect of spherical grains were investigated by the replacement of –45 micron tabular alumina particles with the spherical calcine alumina grains in same particle size . The ratio in the composition did not change for a meaningful comparison. The flowability increased with the addition of spherical grains. The flow diameter after 10 min. was 290 which was higher than that obtained from the first composition including angular tabular alumina grains. All the results are given in Table 2.

Table 2 The test results with spherical grains in castable

Temperature (°C)/ Time (h)	Bulk density (g/cm ³)	Apparent porosity (%)	CCS (kg/cm ²)
110°C/18h	3.09	11.2	370
1000°C/5h	3.03	16.3	225
1300°C/5h	3.05	14.7	1005
1500°C/5h	3.05	15.1	2097

2.3 The effect of reactive alumina type

To observe the effect of reactive alumina type on flow and other physical properties two mixes with two different reactive aluminas were prepared. The reactive aluminas were classified according to their specific surface area. The flowability was higher in the castable including reactive alumina having high surface area. (Fig.2)

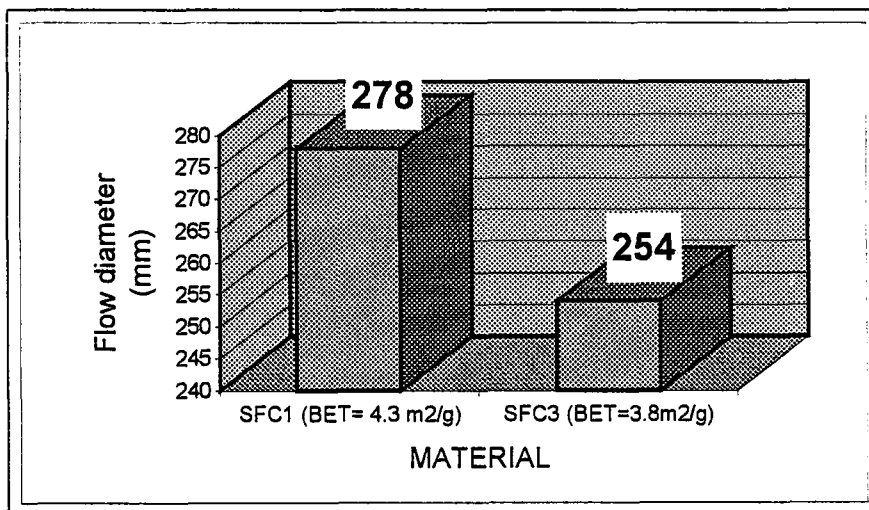


Fig. 2 The effect of reactive alumina type on the flowability

The physical properties obtained by tests are given in Table 3.

Table 3 The effect of reactive alumina type on the physical properties

Temperature (°C)/ Time (h)	Bulk density (g/cm ³)		Apparent porosity (%)		CCS (kg/cm ²)	
	SFC1	SFC3	SFC1	SFC3	SFC1	SFC3
110°C/18h	3.07	3.07	11.6	11.1	362	410
1000°C/5h	3.05	3.06	12.6	15.0	209	273
1500°C/5h	2.99	3.07	16.4	14.6	1889	1543

Reactive alumina is a superfine component and strongly effective in sintering of the castable materials. The CCS values after sintering 1500°C obtained from SFC1 samples including reactive alumina with high specific surface area were the highest results.

2.4 The effect of q-value

The effect of q-value measured according to Dinger&Funk equation was investigated. Higher q-values means higher content of coarser grains. The results of flow test are given in Fig. 3.

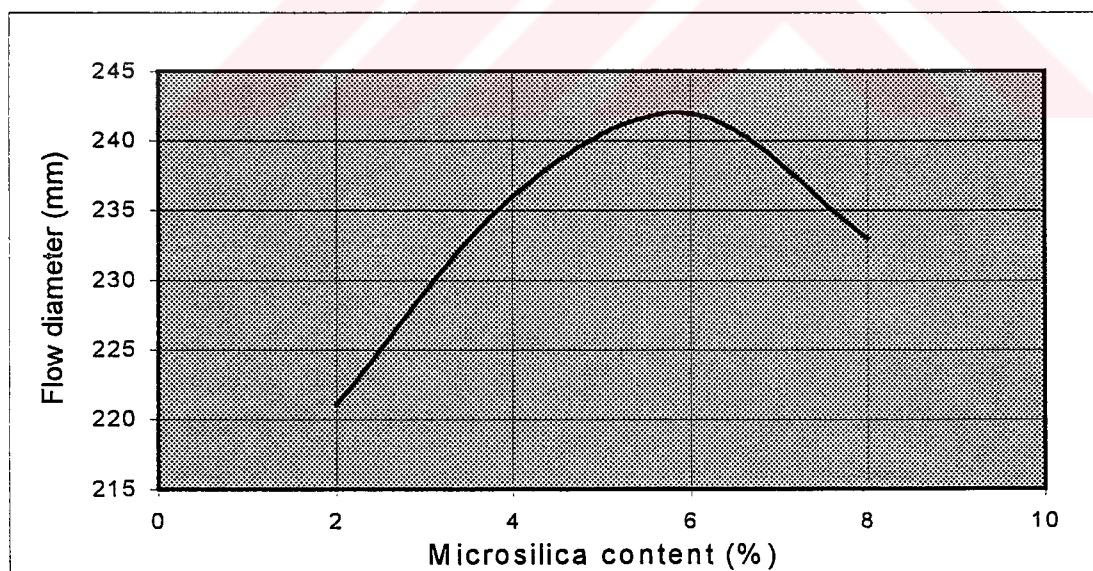


Fig. 3 The effect of q-value on flowability

The flowability decreases in greater q-values due to increase in amount of coarser grains.

Table 4 The effect of q-value on physical properties for the samples sintered at 1500°C

q-value	Bulk density (g/cm ³)	Apparent porosity (%)	CCS (kg/cm ²)
0.20	3.05	14.1	3735
0.23	3.04	14.5	3735
0.24	3.06	14.3	3821
0.25	3.06	15.0	3202
0.28	3.05	14.8	3415
0.33*	3.05	15.1	1793

*: slightly vibrated.

The apparent porosity, bulk density and CCS values for the samples sintered at 1500°C obtained are given in Table 4 above.

2.5 The effect of microsilica

By microsilica addition to the castable mix, the flowability increases generally. But too much addition of microsilica affects the flow properties negatively. (Fig.4)

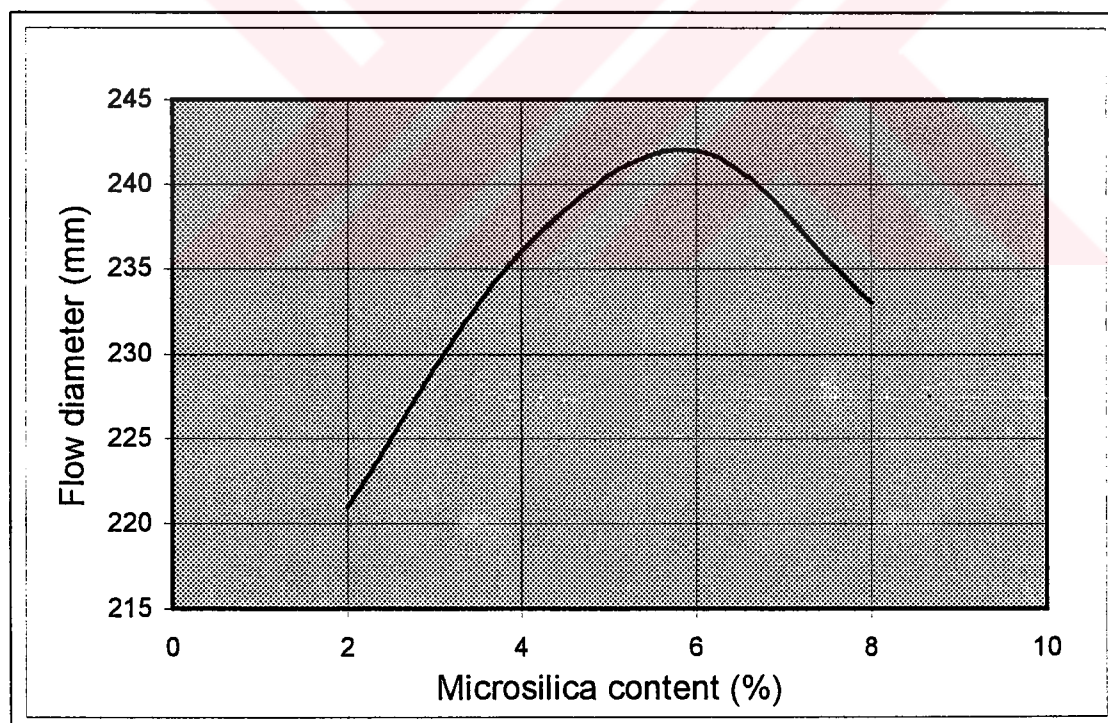


Fig. 4 The effect of microsilica addition on flow properties

The apparent porosity, bulk density and CCS values obtained are given in Table 5.

Table 5 The effect of microsilica addition on physical properties for the samples sintered at 1500°C

Microsilica addition (%)	CCS (kg/cm ²)
2	1447
4	1342
6	2010
8	>2010

CCS values increases with the increasing microsilica addition.

3 Conclusion

The flow properties developed with

- ❖ The use of spherical grains
- ❖ The use of reactive alumina having big specific surface area
- ❖ The low q-values.

The use of superfines makes the mechanical strenght greater after sintering. The use of microsilica has an positive effect on the flow properties of the self flowing castables. After %6 addition the flow properties a significant drop was observed.

When the distribution coefficient (q-value) is between 0.20-0.24, the castables give high free-flow.

BÖLÜM 1

GİRİŞ VE AMAÇ

Demir - çelik endüstrisi refrakter tüketiminin en yoğun olduğu sektör olmakla birlikte refrakter endüstrisinin gelişmesi ile birlikte ağırlıkça birim çelik başına tüketilen refrakter miktarı gittikçe düşmektedir. Refrakter malzemelerin kalite, tasarım ve proses yönünden gelişimi ile bu tür malzemelerin kullanıldığı sektörlerin kapasite ve proses yönünden giderek artan yüksek performanslı refrakter malzeme ihtiyacını karşılamak hedeflenmektedir. Bu anlamda günümüzde giderek artan monolitik refrakter uygulamaları ve bu tür malzemelerin içinde en fazla rağbet gören sınıf olan dökülebilir refrakterler özellikle demir - çelik sektöründe birçok alanda şekilli refrakterlerin yerini almaktadır. [1]

Dökülebilir refrakterler, refrakter endüstrisine ilk olarak 1928' de girdi. Ticari anlamda ilk kullanımı 1930' da gerçekleşti. İlk dökülebilir refrakterler şekilli tuğla artıklarından elde edilen agregalar ile kalsiyum aluminat çimentosunun karışımından oluşuyor, kimyasallara karşı yüksek dirençleri ve hızlı yerleşme özellikleri ile dikkat çekiyordu. Fakat ikinci sınıf hammadde kullanımı nedeniyle servis ömrü ve performans açısından pişmiş şekilli refrakterler düzeyine ulaşamadığından bu malzemelerin gelişmesi ve yaygınlaşması 60' lı yılların sonlarına dek gecikmiştir. [1]

70' li senelerde dökülebilir refrakterlerin kalitesi çimentonun saflığı ve yüksek oranda kullanımı üzerine kurulmuştu. Bu şekilde malzemelerin soğukta dayanımları artıyor; ancak yüksek sıcaklıktaki refrakterlik özellikleri zayıflıyordu. Bu nedenle arzu edilenin tersine sonuçlar elde ediliyordu. 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 cold MOR

değerlerinin ölçümüne imkan tanıyordu. Sıcaklık altındaki performanslar nadiren gündeme geliyordu. Bu durum dökülebilir refrakterlerin 70' li yılların ortalarına kadar tam manasıyla verimli olarak kullanılamamasına sebep oldu. [1]

Demir-çelik endüstrisinde ikincil metalurjinin gelişmesi ve temiz çelik üretim yöntemleri üzerindeki çalışmalar ile birlikte çeliğin pota içerisinde kalma süresi uzamış, artan pota kapasiteleri daha kaliteli ve servis ömrü yüksek refrakter kullanımını gerekli hale getirmiştir. Tuğla örümü ile zaman kaybının yanısıra ortaya çıkan işçilik ve diğer masraflar çelik işletmelerinin ve dolayısıyla refrakter üreticilerinin pota örümü için alternatif malzemeler üzerinde araştırmalarının yoğunlaşmasına neden olmuştur. Son yıllarda gelişen dökülebilir refrakterler prefabrik blokların uygulama yerinde montajı veya yerinde örüm ile çelik işletmelerinde başarı ile kullanılır hale gelmiştir.

Dökülebilir refrakterlerin ana bileşenleri agrega, hidrolik bağlayıcı görevindeki yüksek alüminalı çimento, dispersan ve su şeklinde sayılabilir. Reaktif alümina ve mikrosilika gibi süperince olarak bilinen ilaveler taneler arasında paketlenme ve reolojik özelliklerini geliştirmelerinin yanısıra malzemenin servis sıcaklığındaki performansını da arttırmaktadırlar. Reolojik özelliklerin diğer önemli bir belirleyicisi olan dispersan, suyun, bağlayıcı görevindeki çimento taneleri üzerinde kayarak yağ karışımının kalıp içerisinde homojen olarak yayılmasını sağlamaktadır. Dispersanın kalitesi doğrudan kullanılan su miktarını etkilediğinden son ürün kalitesi açısından bu sistemlerin en önemli bileşenlerinden biridir.

Dökülebilir refrakterler mekanik etki altında (vibrasyon ile) tanelerin hareketi ile kalıplar içerisinde şekil alan tiksotropik kolloidal sistemlerdir. Kolloidal sistemlerin mekanik davranışları reolojik özelliklerini belirler. Optimum tane boyut dağılımları ile çalışılarak maksimum paketlenme ve düşük poroziteli yoğun yapı hedeflenmektedir. Çelik potalarının monolitik olarak örümünün gündeme gelmesiyle birlikte dökülebilir refrakterlerin reolojik özellikleri önem kazanmış ve vibrasyonsuz yerçekiminin etkisiyle kalıp içerisinde yayılıp şekil alabilen kendi kendine dökülebilir refrakterler üreticiler için yeni bir araştırma konusu olmuştur. Türkiye' deki çelik işletmeleri dökülebilir refrakterleri genellikle prefabrik bloklar şeklinde tanımıştır. Çelik potalarının cüruf seviyesinde Mg-C tuğlalar halen başarıyla kullanılmaktadır. Yan duvar ve tabanda dolomit tuğla kullanımı giderek artmakta olup manyezit astarlı potalara oranla pota ömürlerinin yükseldiği gözlenmektedir.

Bu çalışmada alumina dökülebilir refrakterlerin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla tabular alumina hammadde esaslı karışımlar test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda amaç titreşim altında dökülebilir refrakterlerin reolojik özelliklerinin geliştirilmesi ile ortaya çıkan titreşim veya benzeri herhangi bir mekanik etki uygulanmaksızın çalışılabilen kendi kendine dökülebilir refrakterlerin yapısal özelliklerinin incelenmesidir. Çeşitli hammadde sınıfları ve tane boyut dağılım modülüne bağlı olarak tasarlanan karışımların reolojik özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir. Ayrıca farklı hammadde özelliklerine bağlı olarak incelenecek malzemelerin kurutma sonrası yapılacak testler ile performansları karşılaştırılacaktır. Temel ürün özellikleri değerlendirilerek optimum tane boyut dağılımına sahip kendi kendine dökülebilir refrakterin saptanması amaçlanmaktadır.



BÖLÜM 2

DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLER

2.1 GENEL ÖZELLİKLERİ VE UYGULAMALARI

En basit anlamda dökülebilir refrakter; iri agregaların bağlayıcı nitelikteki daha ince viskoz bir faz sayesinde bağ yapması ve genellikle çimentonun hidrasyon reaksiyonları sonucu (priz alma) taneler arasındaki bağ kuvvetinin oluşması sonucu meydana gelen iskelet yapı olarak karakterize edilebilir. Refrakterin niteliğine bağlı olarak matrix ve agrega birbirinden çok farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterebilir. Agreganın cinsi, bağlayıcı tipi ve miktarı, dispersan özelliği ve oranı, tane boyut dağılımı malzemenin akış özelliklerinin yanı sıra nihai ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından da önemlidir. [1]

Son 20 senedir, geleneksel dökülebilir refrakterlerin çalışma sıcaklığındaki performansı açısından sınırlayıcı bir faktör olan yüksek çimento oranının düşmesi sonucu düşük çimentolu veya çok düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerin gelişmesi ile birlikte bu malzemelerin şekilli refrakterlere ciddi bir alternatif olduğunu izlemekteyiz. Özellikle Japonya’da gelişen dökülebilir refrakterlerin dünya refrakter üretimindeki yeri Tablo 2.1’de görülmektedir. Çimento oranının azalması düşük sıcaklıkta ergiyen fazların miktarını ve su ihtiyacını düşürmekte, bunun sonucu olarak da malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri artmaktadır

Pişmiş tuğla refrakter ile hidrolik bağlı dökülebilir refrakterler arasında proses açısından iki temel farklılık bulunmaktadır. Biri şekillendirme sırasında kullanılan su miktarı diğeri ise bağlayıcının rolüdür. Yüksek alüminalı tuğla üretiminde, refrakter karışımı %0.5-3 oranında su ilavesi ile plastik hale getirilir, sonunda bir miktar geçici bağlayıcı ilavesi ile yüksek basınç altında kalıplarda preslenerek şekillendirilir. Sonraki pişirme kademesinde seramik bağ oluşur. Hidrolik bağlı geleneksel dökülebilir refrakter %8-15 oranında su ihtiva eder ve bu şekilde yeterli akış

özelliklerine ulaşarak kalıpta yerleşir. Daha sonra çimento ile reaksiyona giren su hidrolik bağın oluşmasını sağlar ve böylece oda sıcaklığında istenen mekanik

Tablo 2.1 Dünyada refrakter üretimi ($\times 10^6$ ton) [2]

		Şekli	Şekilsiz	Toplam
Avrupa birliği	1988	3.10	1.80	4.90
	1995	3.00	1.90	4.90
Almanya	1988	1.07	0.73	1.80
	1995	1.09	0.55	1.64
Japonya	1988	0.95	0.80	1.75
	1995	0.71	0.86	1.57
USA	1989	1.33	1.18	2.50
	1993	1.27	1.00	2.30
Rusya	1991	3.41	1.71	5.12
	1994	3.11	1.56	4.67

dayanım elde edilir. Ancak seramik bağ dökülebilir refrakter 1000°C ' nin üzerine pişirildiğinde oluşur. Dökülebilir refrakterlerin şekillendirilmesi sırasında ilave edilen suyun fonksiyonları:

- %0-5 su refrakterin yapısındaki boşluklara dolar ve hidrolik bağa bir katkısı yoktur.
- %6-10 su çimento ile reaksiyona girer ve hidrolik bağ oluşturur.
- Kalan %2-6 su oranı şekillenme ve yoğunlaşmayı kolaylaştırır.[3]

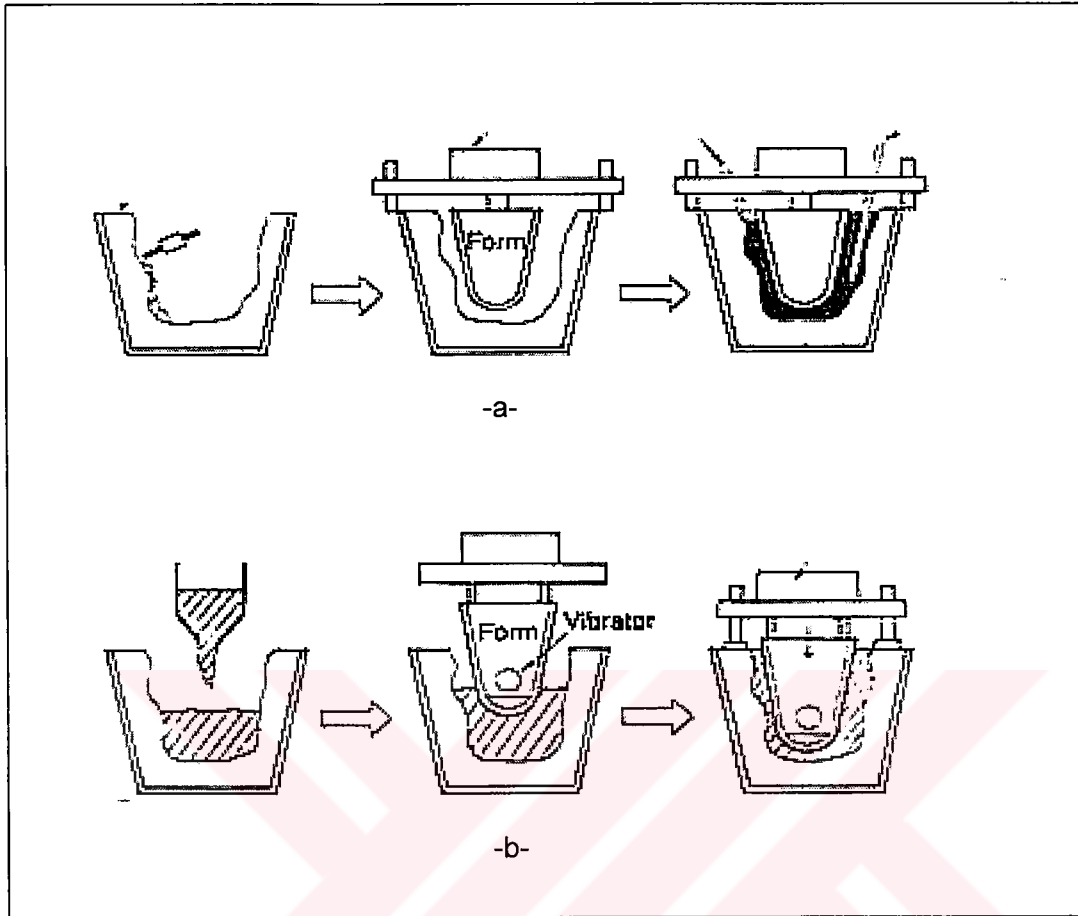
Pişmiş tuğla refrakter ile karşılaştırıldığında yüksek açık porozite miktarı dökülebilir refrakterlerin önemli bir dezavantajı olarak görülmektedir. Bu tür refrakterlerde 110°C ' de kurutma sonrası açık porozite miktarı genel olarak %9-17 arasında değişmektedir. Isıtma sırasında hidrolik bağ kırılır, por boyut dağılımı değişir ve açık porozite %15 seviyelerinde büyür. Bu porozite kimyasal olarak bağlanmış su nedeniyle oluşur ve bu nedenle çimento tipi ve miktarına doğrudan bağlıdır. Kullanım sıcaklığındaki porozite miktarı karıştırma sırasında ilave edilen su ile

ilgilidir. Buna göre porozitenin düşmesi için, çimento miktarı azaltılmalı ve maksimum paketlenme amaçlanmalıdır. [3]

Şekli refrakterlere kıyasla şekilsiz refrakterlerin termal şok dayanımları daha yüksektir. Bunun nedenlerinden biri sinterleşmenin sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru değişmesidir. Sıcak yüzde sinterleşmesini tamamlayan bölge 1-2 cm kalınlığında olup, bu bölgenin arkasından itibaren soğuk yüzeye doğru sinterleşme belli bir gradyan izlemektedir. Şekilsiz refrakterleri şekilli refrakterlerden ayıran bu yapısal farklılık, termal şok nedeniyle oluşabilecek gerilimlerin azalması anlamında sistemi olumlu yönde etkilemektedir. [4]

Dökülebilirlerin diğer bir dezavantajı çimento içeriği olarak karşımıza çıkmaktadır. İlk ısıtma boyunca hidrolik bağ modifiye olur. 250-350°C' ler arasında hidrolik bağ oluşturan hidratlar suyunu kaybeder ve kalsiyum aluminat ile alfa alumina fazları oluşur. Bağ yapısının yenilenmesi dökülebilirlerin mekanik dayanımını düşürür ve bu nedenle bu tür malzemeler 250-700°C arasında minimum dayanıma sahiptirler. Sıcak dayanım 800-1000°C arasında seramik bağ oluşumu sonucu maksimuma ulaşır. Daha yüksek sıcaklıklarda sıvı faz oluşumu nedeniyle silika bazlı dökülebilirlerde mukavemet azalmaktadır. Silikasız; örneğin tabular alumina bazlı sistemlerde sıvı faz oluşumu gözlenmez ve sıcak dayanımlar oldukça yüksektir. 800-1000°C arası hidrat parçalanması nedeniyle mukavemet düşüşü meydana gelir. Korozyon direncini ve sıcak dayanımı düşüren viskoz sıvı faz oluşumu ve miktarı çimento tipi, kalitesi ve miktarına bağlıdır. Geleneksel dökülebilir refrakter üretiminde çoğunlukla kullanılan yüksek saflıkta %70-80 Al_2O_3 lı çimento ile CaO oranı %3-4' ten aşağı düşmemektedir. [4]

Refrakter malzemelerin en yoğun olarak tüketildiği sektör olan Demir-Çelik sektörü dökülebilir refrakterlerin gelişmesine yakından tanık olan bir endüstri koludur. Dökülebilir refrakterlerin demir-çelik sektöründeki kullanım alanları ve malzeme özellikleri Tablo 2.2 ' de özetlenmektedir.[5]Yüksek fırının tüyer bölgesinde kromoksit esaslı monoblok kullanılır. Bu malzemeler %10 Cr_2O_3 %1.1-1.2 kireç içermektedir. Yüksek fırın yolluklarında düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerin yanısıra, prefabrik bloklar ve dövme harçlar kullanılmaktadır. Bu karışımlar %55-80 Al_2O_3 , %10-25 SiC ve %5-10C ihtiva etmektedirler. [4] Ayrıca yüksek fırın yolluklarının monolitik örümü dökülebilir refrakterlerin değişik uygulama alanlarından biridir. (Şekil 2.1)



Şekil 2.1 Yüksek fırın yolluklarının monolitik örüm uygulamaları [5]

Tablo 2.2 Dökülebilir refrakterlerin genel uygulama alanları [6]

Refrakter matris	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 end., prefabrik ürünler
Korund spinel	95	3	-	6.3-6.9	2.95	20.5	150	Çelik end.
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	Çelik end. (E.A.O. delta bölgesi)
Andalusit	67	-	10 (ZrO ₂)	6.2-6.7	2.77	15.7	100	Tandış astarları, prefabrik ürünler
Boksit/SiC	80	-	15	6.0-7.0	2.93	16.7	100	Bakır end.
Korund/SiC	48	-	50	6.2-6.8	2.85	16.2	100	Demir dışı metal end.

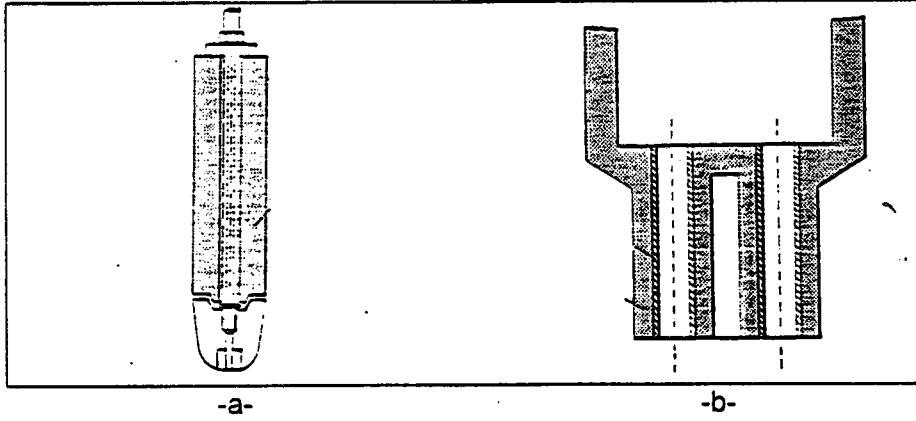
Elektrik fırınlarında yerinde örüm veya prefabrik parça montajı şeklinde astar örümlelerinde kullanılan dökülebilir refrakterler ergimiş magnezya-krom esaslı bazik refrakter grubuna girmektedir. [7]

Pota ocaklarında elektrot çevresinde, ark ocağı kapakları tek ve daha fazla sayıdaki prefabrik bloklar ile örülmektedir. Bu tür iri parçaları kuvvetlendirmek amacıyla sisteme yapılan çelik fiber ilavesi yaygın bir uygulama şeklidir. Çelik potalarında dökülebilir refrakterlerin kullanımı ve performanslarının geliştirilmesi konuları en fazla araştırılan ve üzerinde çalışılan konular arasında yer almaktadır. Çelik işletmelerinde sıvı metalin potada kalma süresinin artması, pota kapasitelerinin yükselmesi ile birlikte refrakter kalitesinden beklentiler de artmıştır. Geleneksel refrakter üretimindeki ekipmanla (pres, kalıp,...v.b) sınırlanan son ürün şekil ve boyutları refrakter üreticilerini yeni arayışlara itmiştir. Çelik potasında ilk göze çarpan dökülebilir refrakter ürünler, gaz üfleme ve sürgü sistemi elemanlarını kapsamaktadır. Tabanda ark ocağından alınan çeliğin çarpma bölgesi ağır mekanik ve kimyasal şartlara maruz kalan bir bölgedir. Çelik işletmelerinde bu bölge yüksek kalitede hammadde ile üretilmiş prefabrik bloklarla örülmektedir.[7]

Günümüzdeki çalışmalar tamamen monolitik pota astar tasarımına yönelik olarak devam etmektedir. Bu konuda çeşitli pilot uygulamaların yanısıra özellikle Japonya'daki birçok çelik işletmesinde monolitik astarlı potalar başarıyla kullanılmaktadır.

Tandişler dökülebilir refrakterlerin diğer bir uygulama alanı olarak göze çarpmaktadır. Emniyet ve çalışma astarları bir şablon vasıtası ile monolitik olarak örülmektedir. Bu bölgede andaluzit esaslı refrakterler kullanılmakta olup, termal şok dirençleri yüksektir. Mullit dönüşümü nedeniyle uygulama sıcaklığında meydana gelen hacimsel genleşmeler oluşabilecek çatlaklar üzerinde söndürücü etki taşımaktadır. Prefabrik olarak örülen tandiş bölgeleri çanak tuğlası ve tandiş çarpma bölgesi şeklinde sayılabilir. Çarpma bölgesinde kullanılan monobloklar kromoksit-korundum esaslı refrakterlerdir. [7]

Oksijen lansları çelik fiber katkılı ve düşük çimentolu dökülebilir refrakterler ile imal edilmektedir. Vakumla gaz giderme prosesi şnorkelleri alumina esaslı prefabrik bloklar ile üretilmektedir. (Şekil 2.2) [7]



Şekil 2.2 a- Gaz üfleme lansı b- Degasser ünitesi şnorkel bloğu [7]

Yürüyen tabanlı haddehane fırınlarında kullanılan dövme harçlarla şekillendirilen prefabrik şekilli malzemeler zamanla kısmen ergimiş haldeki talaşlarla reaksiyona girmesi nedeniyle refrakter fırın astarına yapışmakta ve sonuç olarak mekanik zarara sebep olmaktadır. Bugünkü benzer uygulamalarda düşük çimentolu dökülebilir refrakterler kullanılmakta olup bazı durumlarda yüksek alaşımlı demir çubuk katkısı ile kuvvetlendirilmektedir. [7]

Aluminyum endüstrisinde anot üretimi, elektrolit fırınları, transfer fırınları, ergitme ve tutma fırınlarının astarlar düşük çimentolu ve çok düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerin uygulama alanları arasında sayılabilir. Çimento fırınları, cam fırın rejeneratörleri, petrokimya endüstrisi dökülebilir refrakterlerin uygulama alanı bulduğu diğer sektörlerdir. [7]

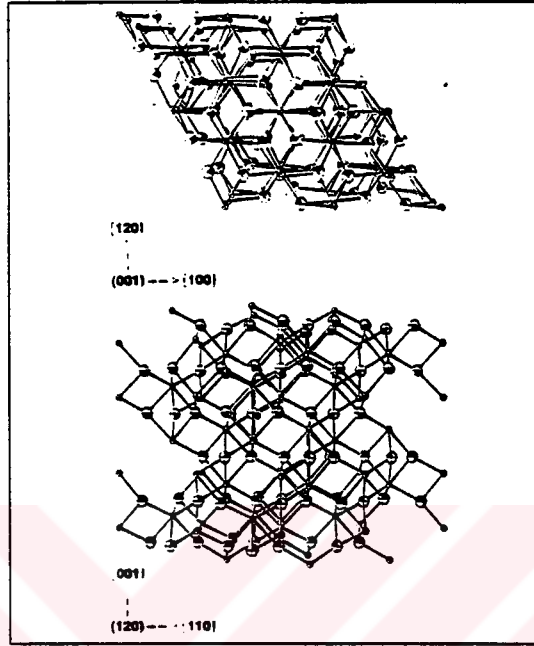
2.2 DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLERİN BİLEŞENLERİ

2.2.1 Tabular alumina

Tabular alumina ismini tipik olarak 50 mikrondan başlayıp 400 mikronun üzerine kadar çıkabilen, tablet şeklinde iri korundum kristallerinden almaktadır. Tabular alumina diğer sinterlenmiş, ince kristalli, yoğun, ark ocağında ergitme yöntemiyle üretilen alumina ürünlerinden farklı özelliklere sahiptir. [8]

Korundum ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), termodinamik olarak kararlı olan tek alüminyum oksit formudur. Elmas ve elmas formundaki sentetik birkaç bileşikten sonra en sert

yapıdır. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ hekzagonal-rombohedral yapıda kristallenir. Bu latis yapısı oksijen iyonlarının hekzagonal sıkı paketlenmesi şeklinde ortaya çıkar. Her Al iyonu, 6 adet oksijen iyonu tarafından oktahedral olarak sarılmıştır. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ yapısı Şekil 2.3' de görülmektedir.



Şekil 2.3 Korundum kristal yapısı [8]

Tabular alumina üretim prosesi, seramik üretiminin tüm ana işlemlerini içermektedir. Hammaddenin öğütülmesi, şekillendirme, kurutma ve sinterleme tabular alumina üretimi için geçerli proses adımlarıdır. Düzgün yüzeyli tabular küreleri düzenli bir alfa alumina mikroyapısına sahiptirler. Proses makro hataları en aza indirmeyi hedefler, böylece ürünün mekanik ve termal şoklara karşı direncinin yükseltilmesi amaçlanmaktadır.

Tabular alumina üretiminde sinterleşmeyi ve yoğunlaşmayı teşvik edici kontrollü bir yüzey alanına sahip kalsine alumina kullanılır. Kalsine alumina peletleme işlemi ile "green ball" denilen 25-30 mm çapında tabular alumina kürelerine dönüşür. Daha sonra kurutulan küreler 2000°C civarında şaft fırnında sinterleşme işlemine tabi tutulur. Sinterlenen tabular küreleri kırma, manyetik ayırma ve klasifikasyon işlemleri ile çeşitli tane boyutlarında paketlenir.



Şekil 2.4 a) Korundum kristallerinin oda sıcaklığında SEM' deki görüntüsü
 b) Korundum kristallerinin 1000°C' de pişirme sonrası SEM görüntüsü
 c) Korundum kristallerinin 1500°C' de pişirme sonrası SEM görüntüsü [5]

Şekil 2.4' de korundum matriksde sinterleşme sonucu meydana gelen değişiklikler görülmektedir. 1500°C' de korund tanelerinin 5-25 mikron boyutuna kadar büyüdüğü görülmektedir.

Tabular alumina taneleri iri alfa alumina kristal yapısı, büyük oranda kapalı porozite ve çok az miktarda görünür porozite ile düşük su emme özelliklerine sahiptir. Ergitme yöntemi ile imal edilen fused alumina olarak tanınan yüksek alüminalı hammaddeler ile toplam porozite bakımından aynı seviyelerde olmasına karşın, kapalı porozitenin daha fazla miktarlarda bulunduğu tabular alumina özellikle üstün termal şok dayanımı ile dikkat çekmektedir. [8]

2.2.2 Kalsine ve Reaktif alumina

Kalsine alumina tipleri soda içeriğine bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Bayer prosesi ile elde edilen hidratlar bünyelerinde yüksek oranda soda içerirler ve kalsine alumina üretimi için kalsinasyon işlemine tabi tutulurlar. Kalsinasyonun amacı hidrat fazını alfa alumina fazına dönüştürmektir. İşlem sırasında proses gereği soda oranları düşmekte ve üretilen kalsine alumina tipine bağlı olarak tane boyutu ve kimyasal bileşim ayarlanmaktadır. [9]

Sıcak kostik soda çözeltisinde yıkanan boksit, filtrasyon sonunda çözünmemiş silikat ve demir oksitten temizlenir. Bu atıklar sodyum aluminat çözeltisinden kırmızı çamur olarak ayrılırlar. Ayrıca yıkama ve filtrasyon sonunda soda oranı da düşmektedir. Kalsinasyon işlemi 1100°C' de döner fırınlarda yapılmaktadır. Kalsine aluminanın kristal boyutu kalsinasyon işlemi sonunda belirlenmektedir. [9]

Düşük kalsinasyon sıcaklıkları kalsinasyon süresini uzatır. 1200°C' de %100 α -Al₂O₃ dönüşümü gerçekleşir. Daha yüksek sıcaklıklarda kalsinasyon, kristal boyutunun büyümesine neden olur. Düşük sıcaklıkta büyük kristal boyutu elde etmek için sisteme mineralleştiriciler ilave edilir. Bu ilaveler aynı zamanda sistemin soda içeriğini de düşürmektedirler. Daha sonunda değirmenlerde kırılarak istenen tane boyut dağılımına getirilirler.

Reaktif alumina çok ince taneli ve düşük sodalı kalsine alumina sınıfına girmektedir. Çok ince taneli reaktif alumina, kalsine aluminaya oranla daha büyük yüzey alanına sahiptir. Yüzey alanı büyüdükçe α -Al₂O₃ miktarı azalmaktadır. Reaktif alumina ince kristalli yapısı ile sinterleşme sırasında yoğunlaşmayı teşvik eder ve sinterleşmeyi hızlandırır. [9]

Kalsine ve reaktif aluminaların ince taneli yapısı, tanelerin paketlenme özelliğini geliştirmektedir. Porozite miktarı düşmekte, hacim ağırlığı artmaktadır. İnce taneler yapı içerisindeki boşlukları doldurmaktadır. Dökülebilir refrakter karışımı içerisindeki reaktif alumina plastikliği arttırmakla birlikte, kontrolsüz ilave edilmesi durumunda kıvamın akıcılığını düşürmekte ve su ihtiyacını arttırmaktadır.

2.2.3 Mikrosilika

Mikrosilika silikon ve ferrosilikon üretiminin bir yan ürünü olarak refrakter sektörüne girmiş olan bir hammadde türüdür. Silikon ve ferrosilikon üretimi büyük elektrikli ergitme fırınlarında yapılmaktadır. Hammadde şarjı bu tip fırınlarda üstten yapılmakta ve fırın içerisinde bir yığın meydana gelmektedir. Fırın tabanında sıcaklık 2000°C' nin üzerindedir ve bu bölgede birtakım ara reaksiyonlar sonucu indirgeyici bir ortam oluşmaktadır. Bu redüksiyon reaksiyonları sonucu SiO (silikon monoksit) gazı açığa çıkmaktadır. Öte yandan 1800°C' de bu bölgede basıncın etkisiyle silikom monoksit gazı yukarı doğru hareket eder. Gazın büyük kısmı fırın içerisindeki yığın içerisinde yoğunlaşarak hapsolür. Ancak gazın bir kısmı kaçarak, yığının üzerindeki hava ile temas eder ve oksitlenir. Bu oksidasyon mikrosilika oluşumunun ilk adımıdır. Sonrasında bacada toplanan gazın içerisindeki uçucu haldeki safsızlıklar fan ve filtre yardımıyla sistemden uzaklaştırılır. [10]

Mikrosilika ortalama 0.15 mikron ebadındaki tane boyutu, 20 m²/g olan yüzey alanı ile özellikle dökülebilir refrakter üretiminde tüketimi son yıllarda giderek artan bir hammadde türüdür. Kimyasal olarak amorf silikadan oluşur. Çok ince taneli yapısı ile sub-mikron sınıfına giren mikrosilikanın yoğunluğu 2.2 g/cm³ seviyesinde olup alumina tanelerine (3.95 g/cm³) kıyasla oldukça hafiftir. Bu nedenle karışım içerisindeki oranı arttıkça, kalıp içerisinde daha az yer kapladığından genel olarak kalıbın aldığı malzeme miktarı artmaktadır.

Mikrosilika negatif yüzey yüküne sahiptir. (sulu sistemlerde 20-30mV). Sıfır yük noktasındaki pH değeri 2-3 seviyelerindedir. Öte yandan çimento pozitif yüklüdür. Dispersan olmayan bir sistemde, taneler arası çekim kuvveti çok yüksektir. Bu durum su ihtiyacını artırır.

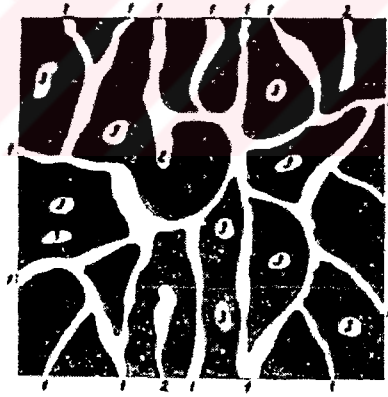
Mikrosilika kullanımı 1000°C' de seviyesinde görünür porozite miktarını %20-30' dan %8-16' a düşürür. 1000°C seviyesinde dökülebilir refrakterlerde meydana gelen mukavemet düşüşü mikrosilika kullanımı ile yerini yükselişe bırakır.[10]

2.3 DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ

2.3.1 Porozite ve hacim ağırlığı

Refrakter malzemeler katı taneler ve bunlar arasındaki porlardan ibaret yapılar olarak düşünülebilir. Refrakter karışımlarda taneler arası boşluk (por) hacimleri şu şekilde sınıflandırılabilir;

- ❖ >1 mm boş hacimler (çatlak, boşluk)
- ❖ Tüm poru çevreleyen kapilar hacimler; buradaki boşluk hacimleri üçe ayrılır:
 - >25 μm çapındaki kaba porlar
 - $25-0.1$ μm çapındaki ince porlar
 - $1-100$ μm çapındaki mikro porlar
- ❖ < 1 μm çapındaki nokta hacimler



Şekil 2.5 Refrakter malzemelerde görülen por şekilleri [11,s.56]

1) Kanallar 2) Keseler 3) Kabarcıklar

Refrakter yapısında bulunan porlar şekillerine göre üçe ayrılmaktadırlar. (Şekil 2.5)

- 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.

Yoğun refrakter üretiminde düşük poroziteli ürünler hedeflenmektedir. Porların şekli, tipi ve miktarı ürünün refrakterlik özelliklerini 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. [11,s.56]

Hacim ağırlığı doğal olarak porozitenin azalması ile artar. Yüksek hacim ağırlığı, düşük poroziteli ve yoğun refrakter yapılarını tarif etmektedir. Bu tür yapıların mekanik özellikleri de daha yüksek olmaktadır.

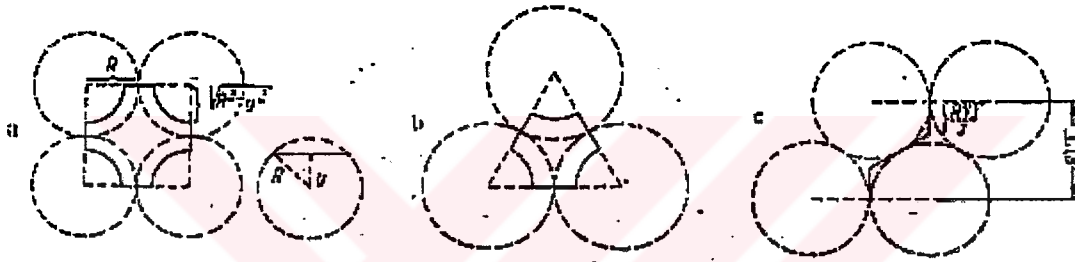
Porozite ve hacim ağırlığı dökülebilir refrakterlerin kalitesini belirleyen en önemli parametrelerden ikisidir. Bu iki özellik tane boyut dağılımı ve sinterlenme şartları ile kontrol edilmeye çalışılmaktadır. Bilhassa tane boyut dağılımı ürün kalitesinin baştan belirlenmesinde yardımcı olan ve yapının paketlenme özelliklerini doğrudan etkileyen en önemli kontrol noktasıdır.

2.3.2 Partikül paketlenmesi

Refrakter malzeme üretiminde daha sıkı paketlenme için genellikle köşeli taneler tercih edilmesine karşın, teorik model denemelerinde ve araştırmalarda bilya şeklindeki tanelerin basitlenmiş paketlenme yoğunluğundan faydalanılır. Eşit boyuttaki bilyaların paketlenmesinde, kaplanan hacim alanı, her bilyanın temas noktalarının sayısına bağlıdır. Maksimum paketlenme için koordinasyon sayısı olarak bilinen bu değer 12' dir. Ancak pratik uygulamalarda bu kadar yüksek

koordinasyon sayısına ve buna bağlı olan yoğunluk değerine genellikle ulaşamaz. Kurşun bilyaların rastgele şekilde bir kaba dökülmesiyle, en sık rastlanan koordinasyon sayısı değeri olarak 7 bulunmaktadır. Vurma ve sarsmalar vasıtası ile bu değer 12' e kaymaktadır. Burada ayrıca küçümsenemeyecek miktarda çok olan 10,11,12 yerel koordinasyon sayıları da oluşmaktadır. [11,s.12]

Erişilen yoğunluk değerinin kap büyüklüğü ile tane boyutu arasındaki orana ve kabın şekline önemli ölçüde bağlı olduğu unutulmamalıdır. Kenarlarda meydana gelebilecek bozukluklar eğer dökülen hacim 1 m^3 ve dökülen tane çapı 1 mm ise ortaya çıkmaz. Meydana gelebilecek bu bozukluklar tane yarıçapı ile kap hacmi arasındaki orana bağlıdır. Nitekim tane boyutu büyüyüp kap hacmi küçüldüğünde bu tür bozuklukların meydana gelme ihtimali artar.



Şekil 2.6 Küresel tanelerin paketlenme modelleri

- Koordinasyon sayısı 6 olan paketlenme durumunda yatay düzlemindeki 4 köşeli kesiti.
- Koordinasyon sayısı 8 olan paketlenme durumunda yatay düzlemindeki 3 köşeli kesiti.
- Koordinasyon sayısı 8 olan paketlenme durumunda alansal kesite sahip kanalların uzunluğu. [11]

Bilyalar arasında oluşan boşluklar ya 4 ya da 3 köşeli kesite sahiptir. Kesitlerin boyutları ise yerel olarak değişmektedir. (Şekil 2.6a ve 2.6b). Tablo 2.3' de farklı şekilde paketlenmiş bilyaların içinde oluşan boşlukların, ortalama kesit büyüklükleri ortalama kesitin yarıçapına eşit ekuvalent yarıçapları (r) ve en küçük kesite sahip dairenin yarıçapı verilmektedir.

Tablo 2.3 Değişen koordinasyon sayısına bağlı olarak tek tip tanelerin paketlenmesinde oluşan boşlukların büyüklüğü (R =Bilya yarıçapı) [11,s.13]

Koordinasyon sayısı	Porozite %	Boşluk şekli kesiti	Ortalama kanal kesiti	Eküvalent yarıçapı r	En küçük dairenin yarıçapı e	Relatif kanal uzunluğu l_e/l
6	47.64	4 köşe	$1.907 R^2$	$0.778 R$	$0.414 R$	1
8	39.54	4 köşe	$1.21 R^2$	$0.620 R$	$0.414 R$	1.333
		3 köşe	$0.684 R^2$	$0.466 R$	$0.1547 R$	1
12 (hekzagonal)	25.95	3 köşe	$0.512 R^2$	$0.403 R$	$0.1547 R$	1
		3 köşe	$0.423 R^2$	$0.368 R$	$0.1547 R$	1.5
12 (kübik)	25.95	3 köşe	$0.479 R^2$	$0.390 R$	$0.1547 R$	1.25

Yukarıdaki mevcut porlardan oluşan kanallar kısmen düz, kısmen de kırıklı bir şekilde paketi katetmektedir. Bundan dolayı kanal uzunluğu (l_e) relatif olarak bilya paketinin kalınlığına (l) bağlı olarak alınmıştır. (Tablo 2.3)

Oluşan porozite, bilyaların çapından relatif büyüklük olarak bağımsızdır. Fakat bilya yarıçapı (R), ortalama kesitlere ve boşlukların yarıçaplarına belirleyici olarak girmektedir. Burada bilya yarıçapı ne kadar küçükse kanallar da o kadar daralır.

Tablo 2.4 $R_1/R_2 \cong 50$ olan 2 farklı tür bilyadan oluşan karışımlarda en sıkı şekilde paketlenmiş yapının karışım oranları ve en düşük poroziteler [11,s.14]

Koordinasyon sayısı	En düşük porozite P_{min} (%)	P_{min} için karışım oranı	
		Büyük bilya (%)	Küçük bilya (%)
6	22.7	67.7	32.3
8	15.6	71.6	28.4
12	6.73	79.4	20.6

Bu modellemekten bir takım pratik sonuçlar çıkarılabilir. İnce tanelerden oluşmuş refrakter malzemeler, iri tanelerden oluşmuş malzemeler kadar poroziteye sahiptirler fakat yapıdaki ince tane oranı arttıkça porlardan oluşan kanallar daha daralmaktadır.

Modelde de görüldüğü gibi 2 farklı bilya boyutu kullanıldığı zaman -burada ince taneler iri tanelerin arasını doldurmaktadır- paketlenmiş yapının porozite değeri önemli ölçüde küçülür. Pratik açıdan önemli ve uygun olan durum 2 farklı bilyanın yarıçapları oranının 1:50 olduğu durumdur. Bu şartlar altında yapılan hesaplamalara

göre farklı koordinasyonlara sahip sıkı paketlenmiş yapılar için, Tablo 1.4' de porozitenin mümkün olan minimum değerleri görülmektedir.

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. [1]

Maksimum partikül paketlenmesi durumunda viskozite minimuma düşecektir. Maksimum paketlenme durumunda azalan porozite ilave edilen sıvının çok küçük bir miktarı ile dolar, sıvının geri kalan kısmı partiküllerin birbiri üzerinde rahatça hareket etmesini sağlar, böylelikle viskozite düşer ve akışkanlık artar. 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 (vibrasyon gibi). Bunun nedeni ince tanelerin irilerin arasını doldurarak yoğun bir yapıya ulaşması ve tanelerin birbiri üzerindeki hareketinin sınırlandırılmasıdır. İri tanelerin miktarı böyle bir sistemdeki akış özelliklerini belirleyen önemli parametrelerden biridir. İri tane oranının azalmasıyla akış özellikleri gelişecektir. [5]

Literatürde partiküllerin paketlenmesi ile ilgili olarak birçok model mevcuttur. Bu konuda genellikle başvuru olan iki yaygın model Furnas-Anderegg ve Andreassen modelleridir.

Furnas:

$$\frac{CPFT}{100} = \frac{r^{\log D} - r^{\log D_s}}{r^{\log D_L} - r^{\log D_s}} \quad (2.1)$$

Andreassen:

$$CPFT = \left(\frac{d}{D_L}\right)^q \times 100 \quad (2.2)$$

Modifiye edilmiş Andreassen (Dinger and Funk):

$$CPFT = \frac{(D^q - D_s^q)}{(D_L^q - D_s^q)} \times 100 \quad (2.3)$$

CPFT = D' den daha ince olan tanelerin kümülatif yüzdesi

D = tane boyutu

D_s = Karışımdaki minimum tane boyutu

D_L = Karışımdaki maksimum tane boyutu

q = Tane boyut dağılım modülü

r = Bir elekteki tanelerin hacminin bir sonraki elekteki tanelerin hacmine oranı. [1]

Furnas iki farklı tane boyut dağılım şekline göre matematiksel bir bağıntı geliştirmiştir. Bu sistemlerden biri aralıklarla devam eden yani süreksiz iki, üç veya dört ebattan oluşan karışımlar diğeri ise sürekli tane boyut dağılım sistemidir. MacZura' ya göre süreksiz dağılım gösteren karışımların çalışma özellikleri sürekli tane boyut dağılımı gösteren karışımlara kıyasla zayıf kalmaktadır. Sürekli boyut dağılımı gösteren karışımlar düşük su ihtiyacı ve yüksek paketlenme özellikleri ile birlikte yüksek mukavemet ve düşük çekme gibi gelişmiş nitelikler taşımaktadırlar. Öte yandan süreksiz dağılımlar sürekli dağılımlara oranla daha termal şok direncine sahiptirler.[1]

Furnasın yaklaşımı daha çok ince tanelerin paketlenme üzerindeki etkisi ile ilgilenmektedir. Furnas' a göre en iyi paketlenme incelerin irilerin arasına girerek

boşlukları doldurması suretiyle gerçekleşebilir. Bu nedenle ince tanelerin sistemdeki varlığı Furnas denkleminin temelini oluşturmaktadır. Andreassen ise bunun tam tersini gözönüne almış ve tüm tane boyutlarının gerçek tane boyut dağılımlarında ele alınması gerektiği üzerinde durmuştur. Andreassen Furnasın tersine paketlenme üzerinde iri tanelerin etkisini de incelemiştir. Furnas denklemi Andreassen' e göre daha karmaşık olup tamamen teorik temeller üzerine kurulmuştur. Andreassen denklemi ise yarı ampirik bir bağıntı olup tane boyut dağılımlarını reel olarak ele almaktadır. Formülün bu özelliği pratik olarak daha kullanılabilir gibi gözükmesine neden olmuştur. Fakat minimum boyut tarafında sonsuzluk ifade eden haliyle umulduğu kadar pratik olmamıştır. Çünkü gerçek bir tane boyut dağılımının sonu vardır. Bu problemin çözümüne yönelik olarak Andreassen denklemi ile Furnas denklemi birleştirilerek yeni bir bağıntı bulunmuş ve buna da modifiye edilmiş Andreassen denklemi veya Dinger&Funk denklemi adı verilmiştir. Bu çalışmada da karışımların dağılım katsayıları Dinger&Funk denkleminde yararlanılarak belirlenmiştir. [1]

2.3.3 Reolojik özellikler

2.3.3.1 Elektriksel çift tabaka

Kolloidal sistemlerde pıhtılaşma ve flokülasyon olayları kolloidlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini anlamada anahtar kavramlardır. Kolloidlerin sudaki davranışları büyük oranda elektrokinetik hareketlerinden etkilenmektedir. Her kolloid negatif bir yük taşımaktadır. Benzer yüklü komşu kolloidler birbirlerini iterek flokülasyonu ve topaklanmayı (aglomerasyon) engellerler. Sonuç olarak yüklü kolloidler süspansiyon içerisinde disperse halde kalmak isterler.[12]

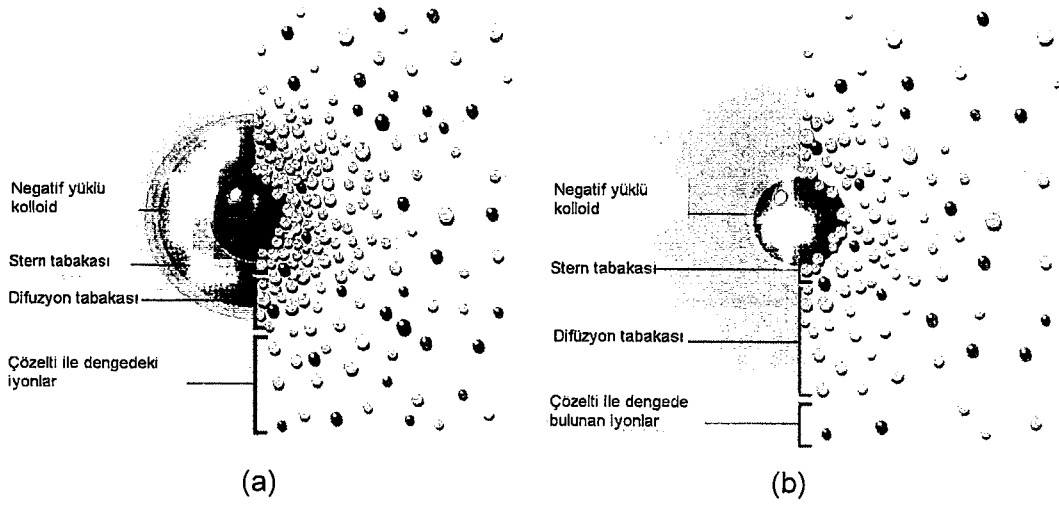
Çift tabaka yüklü kolloidin içinde bulunduğu iyonik ortamı göstermek ve elektriksel itme kuvvetlerinin nasıl oluştuğunu açıklamak için oluşturulmuş bir ifadedir.

Öncelikle kolloidin (negatif yüklü) pozitif iyonlar üzerindeki etkisi incelenecek olursa; ilk olarak kolloidin pozitif iyonları çektiği ve kolloid yüzeyine çok yakın bir mesafede pozitif iyonlardan oluşan bir tabaka oluştuğu gözlenir. Bu tabaka *Stern tabakası* olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda pozitif iyonlar halen negatif kolloid tarafından çekilmekle birlikte Stern tabakasının oluşmasıyla birlikte aynı zamanda itme kuvvetlerine maruz kalmaktadırlar. Böylece dinamik bir denge oluşmaktadır. Stern tabakasının hemen arkasında bir *difüzyon tabakası* meydana gelmektedir. Yayınan

pozitif iyon tabakası kolloid yakınında yüksek konsantrasyona sahip olup, kolloidden uzaklaştıkça konsantrasyonu düşer. Diğer taraftan kolloid yüzeyi yakınında negatif iyon kaybı vardır çünkü negatif iyonlar kolloid tarafından itilmektedir. Negatif iyon konsantrasyonu, oluşan pozitif stern tabakasının etkisi ile itme kuvvetlerinin engellenmesi sonucu artar. [12]

Difüzyon tabakası kolloid etrafındaki yüklü atmosfer olarak ifade edilebilir. Yüzeyden herhangi bir mesafede difüzyon tabakasının yük yoğunluğu bu noktadaki pozitif ve negatif iyon konsantrasyonu arasındaki farka eşittir. Yük yoğunluğu kolloid yakınında en fazla olup, pozitif ve negatif iyon konsantrasyonu birbirine yaklaştıkça düşer ve sifıra yaklaşır. Stern tabakasının pozitif iyonları ile difüzyon tabakasının yüklü atmosferi *elektriksel çift tabaka* olarak tanımlanmaktadır.

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 kolloidal yükü nötralize etmede daha etkilidir. Bu şekilde ince bir elektriksel çift tabaka meydana gelir. (Şekil 2.7a ve Şekil 2.7b) [12]



Şekil 2.7 (a) Flokülasyon durumunda kolloid etrafındaki iyon atmosferinin şematik gösterimi
(b) Deflokülasyon durumunda kolloid etrafındaki iyon atmosferinin şematik gösterimi [12]

2.3.3.2 Zeta potansiyel ve pH etkisi

Negatif yüklü kolloid ve etrafındaki yüklü atmosfer difüzyon tabakasından geçen bir elektriksel potansiyel oluşturur. Bu potansiyel yüzeyde en yüksek olup, mesafeye bağlı olarak düşer ve difüzyon tabakasının dışına çıkıldığında sıfır olur.

Potansiyel eğrisi itme kuvvetlerinin gücünü göstermek ve hangi mesafelerde etkili olduklarını anlamak açısından faydalı bir eğridir. Potansiyel eğrisinin stern tabakası ile difüzyon tabakası sınırında kestiği nokta *Zeta potansiyel* olarak bilinir. Zeta potansiyel kolloidler arasındaki itme kuvvetlerini gösterir. Geniş elektriksel çift tabaka durumunda Zeta potansiyel yüksektir. Çift tabaka daraldıkça Zeta potansiyel düşer. [12]

Dökülebilir refrakterlerin akış özelliklerini geliştirmek ve kendi kendine akan refrakterlerin reolojik özelliklerine ulaşmak için, hazırlanan yağ karışımının viskozitesi düşürülmelidir. Bu özelliğe ise ancak optimum dispersiyon ile ulaşılabilir. Metal oksit süspansiyonunun kararlılığı elektriksel çift tabakanın modifikasyonu ile sağlanabilir. Bu tür sistemlerde potansiyel belirleyici iyonlar H^+ ve OH^- iyonlarıdır. Çözelti içerisindeki $MeO-OH$ yüzey grupları pH değerine bağlı olarak negatif veya pozitif yüklü olabilir. Eğer aynı sayıda $MeO-OH^{2+}$ ve $Me-OH^-$ grupları mevcut ise sistem elektriksel olarak nötrdür. Bu durum sıfır yük noktası olarak tanımlanmaktadır. [13]

Farklı asidik ve bazik karakterdeki oksitlerin yüzey atomlarının taşıdıkları yüzey gruplarının miktarı çözeltinin pH değerine bağlı olarak değişir. Aynı oksit için üretim yöntemine (sinterleme sıcaklığı, öğütme prosesi, gibi) bağlı olarak farklı pH (sıfır yük noktası) değerleri bulunabilir. Sistemin sıfır yük noktasındaki pH değerlerinde süspansiyonun dispersiyonu kolaylaşır.

Bazı hammaddeler için belirlenmiş sıfır yük noktası (pH) değerleri Tablo 2.5' de verilmiştir.

Tablo 2.5 Bazı temel hammaddeler için belirlenmiş sıfır yük noktası (pH) değerleri. [13]

Hammadde	Sıfır yük noktası (pH)
Kuartz, SiO_2	2 - 4
Korundum, Al_2O_3	9
Magnezya, MgO	12

2.4 ÇİMENTO REAKSİYONLARI VE KURUTMA KADEMESİ

Tabular 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 empürite içeriği %1-2' nin altındadır. Düşük ve çok düşük çimentolu dökülebilir refrakterlerde CaO oranının düşmesiyle birlikte düşük sıcaklıkta ergiyen fazların miktarı azalmış ve böylece malzemenin yüksek sıcaklıktaki performansı artmıştır. [1]

En fazla karşılaşılan çimento fazları CA, CA_2 , C_{12}A_7 , CA_6 ve reaksiyona girmemiş alumina fazları olarak saptanmıştır. Bunlardan aktif olanları CA, CA_2 ve 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 cüruf sızmalarına karşın malzemenin direncinin düşmesiyle sonuçlanabilir. Öte yandan silika bazlı hammaddeler kullanıldığında çimentodan gelen CaO ile oluşan reaksiyon sonucu 1200°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 düşürmesidir. [1]

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 indirebilmek için uygulanan yöntemler:

- 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 şeklindedir.
- 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 yolaçabilir.
- Kurutma hızını arttırmak için sisteme ilave edilen organik fiberler erimeden önce çekerler ve buharın çıkabileceği kanallar oluştururlar. [14]

Kurutma fırını rejimi ve ilave edilen kurumayı hızlandırıcı katkıların yanısıra karışımın özelliklerine de bağlıdır. Örneğin dispersan suyun bağlayıcı fazın üzerindeki hareketini ve taneler arasındaki viskoz sıvının dağılımını kontrol ederek kullanılan su miktarına doğrudan tesir etmektedir.

2.5 KENDİ KENDİNE DÖKÜLEBİLİR REFRAKTERLER

2.5.1 Tanım ve genel özellikler

Dökülebilir refrakterlerin herhangi bir dış kaynaklı mekanik etkiye ihtiyaç duymaksızın sadece yerçekiminin etkisiyle kalıpta homojen olarak yerleşmesi kendi kendi akan refrakterlerin (self flowing castables) akış özelliklerini tarif etmektedir. İri taneli dökülebilir refrakterlerin akış özelliklerini konsantre alumina esaslı süspansiyon içerisindeki 60 mikronun altındaki taneler belirlemektedir. Bu tür konsantre çözeltilerde elektriksel çift tabakanın daralması ve dispersiyonun zayıflaması sebebiyle partiküller arası etkileşimin serbest akışı engelleyeceği açıktır; taneler arası etkileşim en aza indirilerek dökülebilir refrakterlerin akış özellikleri geliştirilebilir. Alumina zengin çimentonun varlığında Ca^{+2} iyonları nedeniyle çok ince tanelerin aglomerasyonunu indirgeyerek sistemi disperse edecek katkı elemanlarının seçilmesi gerekmektedir. İri taneler süspansiyon içerisinde homojen dağılmadıkça taneler arasındaki sürtünme nedeniyle serbest akış sağlanamayacaktır. Sistem öncelikle iyi disperse edilmeli ayrıca taneler arası etkileşim en aza indirilmelidir. Burada dispersanın tipi ve niteliğinin yanısıra, sistem içerisinde kolaylıkla disperse edilebilen süperincelerin varlığı önemli bir faktördür. Diğer önemli bir serbest akış özelliği porları dolduran viskoz sıvı miktarının bu sınırı aşması ile birlikte iri tanelerin süspansiyon içerisinde birbirinden bağımsız hareket edebilir duruma gelmesidir. Tane şekli küresele yaklaştıkça kendi kendine akış özellikleri gelişmektedir. Öte yandan tane iriliği arttıkça sistemin viskozitesi artmaktadır. [15]

Mikrosilika, reaktif alumina gibi süper inceler bünyedeki boşlukları doldurarak su ihtiyacını azaltmakta ve porozite yüzdesini aşağı çekmektedir.

Serbest akış gösteren dökülebilir refrakterlerin en önemli nitelikleri reolojik özellikleridir. Refrakter agregalar, sıvı ve katkılar ile karıştırıldığında akışkanlığı ve taneler arasında plastikliğin yüksek olduğu harç elde edilir. Yaş karışım kalıba döküldükten sonra dış etki uygulanmamasına rağmen iç yapıdaki boşlukların hava kabarcıkları şeklinde kendiliğinden yüzeye çıktığı görülür. [15]

Ortam sıcaklığı malzemenin yerleşmesi ve priz alma sürecinde önemli bir faktördür. 30°C' nin üzerindeki sıcaklıklar kendi kendine akan malzemelerin çalışma özelliklerin ters yönde etkilemektedir. Ortam sıcaklığının artması priz alma süresini kısalttığından, sıvının hızlı buharlaşması nedeniyle döküm sonrası malzeme gaz çıkışı tam anlamıyla sona ermeden sertleşir. Aynı zamanda uzun çalışma süreleri gerektiren uygulamalarda yüksek sıcaklık döküm sonrasında erken priz alma gibi problemleri beraberinde getirir. Bu nedenle karışıma donmayı geciktirici katkıları ilave edilebilir.[15]

Bilindiği gibi tiksotropik dökülebilir refrakterlere vibrasyon altında döküm yöntemiyle şekil verilmektedir. Vibratörlerin yarattığı gürültü kirliliğinin yanı sıra, vibrasyon altında karışımın kalıpta etkili yayılmasını sağlamak için ilave edilen su miktarının artması ile porozite miktarı artmakta ve bu durum malzemenin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Kendi kendine dökülebilir refrakterlerin uygulama kolaylığı paketlenme için vibratör ihtiyacını ortadan kaldırır. Kaliteli hammadde kullanımı ile uzun servis ömrü ve en az tiksotropik dökülebilir refrakterler düzeyinde ürün kalitesi sağlanabilir.

2.5.2 Uygulama alanları

Demir - çelik endüstrisinde yerinde örüm ile astarlanan pota ve tandişlerde akış ve yerleşme özellikleri geliştirilmiş kendi kendine dökülebilir refrakterlerin kullanımı ile ekipman ve tesisat masrafları azalmakta, uygulama kolaylığı sayesinde işçilik ve zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Astarlama için gerekli makina ve ekipmanın tasarımı dökülebilir refrakterlerin uygulama türüne göre farklılıklar taşımaktadır. Şekil 2.8' de monolitik örüm amaçlı kurulan tesisat ve ekipmanlar şematik olarak gösterilmektedir.



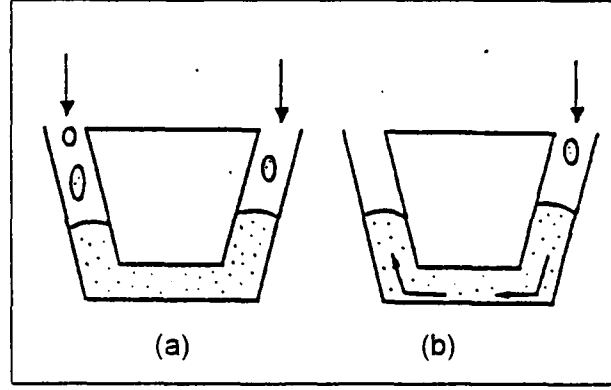
Şekil 2.8 (a) Titreşim altında dökülebilir refrakterler ile monolitik pota örümü
(b) Kendi kendine dökülebilir refrakterler ile monolitik pota örümü [16]

Çelik pota astarlarının monolitik örümü, Japonya' da gelişim sürecini tamamlayan, Avrupa' da da son senelerde uygulamaları giderek artan bir proses şeklindedir. Pota yan duvar ve tabanında dökülebilir refrakterler ile yapılan uygulamalar başarılı sonuçlar vermekte, makina-ekipman, kurutma işlemi, döküm sonrası astarın temizlenmesi ve tamiri gibi hususlar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Monolitik örüm için kaliteli ve uygun hammadde tek başına yeterli değildir. Kurulacak ekipmanın astarın homojen biçimde örümü ve kurutma kademelerini gerçekleştirecek yeterlilikte olması gerekmektedir. (Şekil 2.9)



Şekil 2.9 Monolitik pota örümü [5]

Tandişlerin emniyet ve aşınma astarlarının örümünde kullanılan kendi kendine dökülebilir refrakterlerin uygulamaları artmıştır. Mikrosilika ilavesi ile akış özellikleri ve performansı artırılmış boksit esaslı malzemeler ile örülen tandişlerin servis ömürlerinin arttığı yapılan çeşitli literatür çalışmalarıyla saptanmıştır. (Şekil 2.10a,b) [17]



Şekil 2.10 Tandişlerin monolitik örümü

- a- titreşim altında dökülebilir refrakterler ile örüm
- b- kendi kendine akan dökülebilir refrakterler ile örüm [17]

Döner çimento fırınlarının ön ısıtma, fırın giriş ve çıkış ağızlarında ve soğutucu gibi bölümlerinde kullanılan kendi kendine dökülebilir refrakterler fused alumina, boksit ve SiC bazlı hammaddeler ile hazırlanmaktadır. [7]

Bu çalışmada bu tür uygulamalarda kullanılan tabular alumina esaslı dökülebilir refrakterlerin reolojik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik olarak hazırlanacak karışımların özellikleri incelenecektir. Öncelikle kendi ağırlığı ile titreşim uygulanmaksızın dökülebilen refrakterlerin yapısına uygun karışım oranları tespit edilerek akış özellikleriyle birlikte bazı fiziksel özellikleri tespit edilecek, daha sonra farklı hammaddelere ve çeşitli hammadde niteliklerine bağlı olarak bu özelliklerin nasıl değiştiği izlenecektir.

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 KULLANILAN HAMMADDELER

- ✓ Tabular alumina
- ✓ Reaktif alumina
- ✓ Mikrosilika
- ✓ Kalsine alumina
- ✓ Çimento

3.2 KULLANILAN HAMMADDELERİN ÖZELLİKLERİ

3.2.1 Tabular alumina

Bu çalışmada ALCOA firmasından temin edilen T60 kalite tabular alumina malzemesi kullanılmıştır. Tabular aluminanın kimyasal analizi ve tipik fiziksel özellikleri Tablo 3.1' de verilmektedir

Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan tabular aluminanın kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri

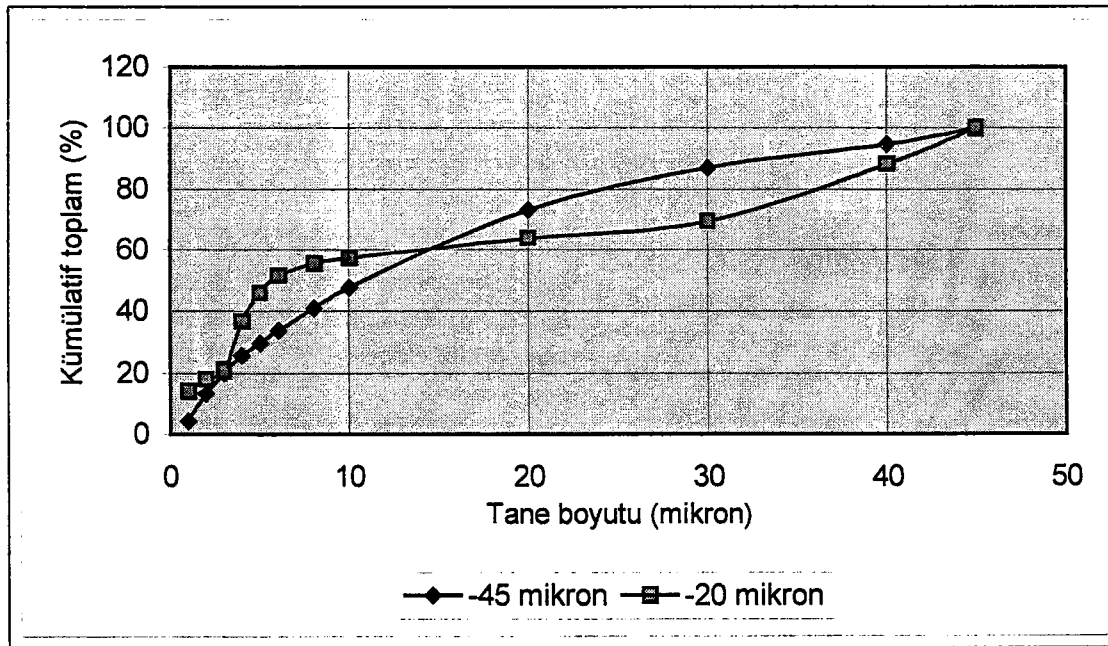
Kimyasal Bileşim (%)	
Al ₂ O ₃	>99.4
Na ₂ O	<0.40
CaO	<0.08
SiO ₂	<0.06
Fe ₂ O ₃	<0.03
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	>3.50
Görünür Porozite (%)	<5.00
Su emme (%)	<1.43

Tabular alumina üretimi sonunda çeşitli fraksiyonlarda kırılarak boyutlarına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Tablo 3.2' den görüldüğü gibi Philips marka PW3710 BASED cihazı ile belirlenen 45 mikron ebadındaki tabular alumina tanelerinin X-ışınları analizinde ana faz $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3.2 -45 mikron ebadındaki tabular alumina tanelerinin X-ışınları analiz sonuçları

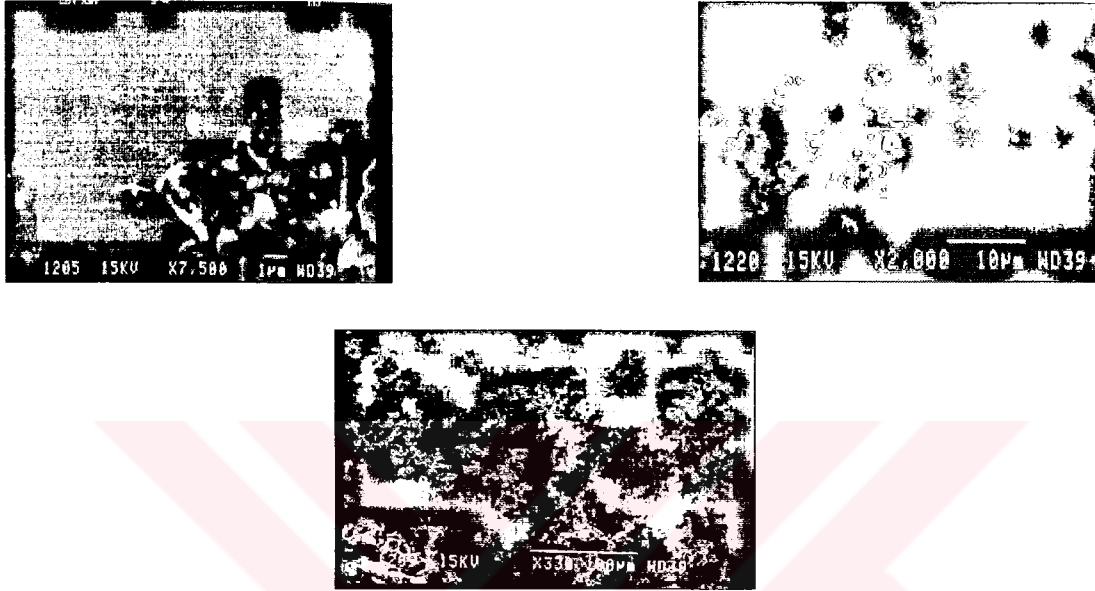
D (Å)	2 θ	I/I ₀	Faz
3.461	29.8	46.61	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
2.535	41.1	100.00	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
2.366	44.2	29.48	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
2.071	50.9	98.80	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
1.731	61.9	49.80	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
1.592	68.0	99.60	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
1.503	72.6	7.57	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
1.398	79.1	25.50	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$
1.366	81.3	43.82	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

En ince tabular alumina fraksiyonları -45 mikron ve -20 mikron olarak üretilmektedir. Bu fraksiyonların kendi içindeki tane boyut dağılımı Shimadzu Sedigraph yardımıyla belirlenmiş olup, Şekil 3.1' de verilmektedir.



Şekil 3.1 Tabular alumina –45 ve –20 mikron ebadındaki fraksiyonların tane boyut dağılımı

Voyager model SEM-EDS elektron mikroskopunda yapılan mikroyapı incelemesinde köşeli taneli tabular alumina tanelerinin görüntüleri Şekil 3.2' de verilmektedir.



Şekil 3.2 Tabular aluminanın SEM' de çekilmiş mikroyapı fotoğrafları

3.2.2 Kalsine alumina

Bu çalışmada ALCAN firmasının RMA325 kalite kalsine aluminası kullanılmıştır. Kalsine aluminanın kimyasal analizi Tablo 3.3' de verilmiştir.

Tablo 3.3 Kalsine aluminanın kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim (%)	
Na ₂ O	0.02
SiO ₂	0.05
Fe ₂ O ₃	0.02
CaO	0.01

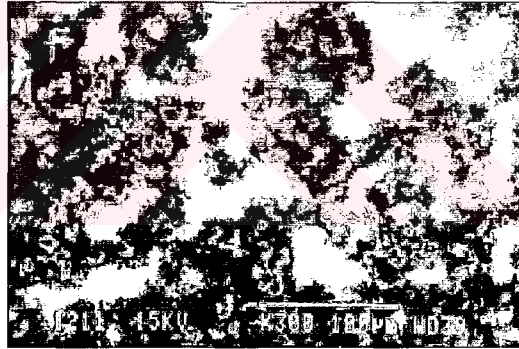
Yukarıdaki tabloda kalsine alumina içerisindeki safsızlıkların % oranları verilmektedir. Bileşimin geri kalan kısmı Al₂O₃' dir.

Tablo 3.4' de kalsine alumina' ya ait X-ışınları faz analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.4 Kalsine aluminanın X-ışınları faz analizi

d (Å)	2θ	I/I ₀	Faz
3.461	29.8	74.20	α -Al ₂ O ₃
2.535	41.1	100.00	α -Al ₂ O ₃
2.366	44.2	52.75	α -Al ₂ O ₃
2.071	50.9	91.30	α -Al ₂ O ₃
1.731	61.9	67.25	α -Al ₂ O ₃
1.592	68.0	93.04	α -Al ₂ O ₃
1.503	72.6	18.55	α -Al ₂ O ₃
1.398	79.1	42.90	α -Al ₂ O ₃
1.366	81.3	56.81	α -Al ₂ O ₃

Tablo 3.4' de görüldüğü gibi X-ışınları analizi ile elde edilen tüm pikler α -Al₂O₃ olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.3 Kalsine aluminanın SEM' de çekilmiş mikroyapı fotoğrafları

Tabular aluminaya kıyasla küresel şekilli tanelerden oluşan kalsine aluminaya ait mikroyapı görüntüsü Şekil 3.3' te görülmektedir. Tane boyut dağılımı tabular alumina hammaddelerden –45 mikron fraksiyonu ile benzerdir. Özellikle X1500 ve X1300 olan resimlerde, 10-50 mikron ebadındaki tanelerin küreselliği kolaylıkla ayırt edilebilmektedir.

3.2.3 Reaktif alumina

Deneylerde incelenen karışımlarda reaktif alumina olarak ALCOA firmasının CTC50; reaktif alumina 1 ve CTC30; reaktif alumina 2 kalite malzemeleri kullanılmıştır. Bu reaktif aluminalara ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.5' de verilmiştir.

Tablo 3.5 Deneylerde kullanılan reaktif aluminaların kimyasal analizi

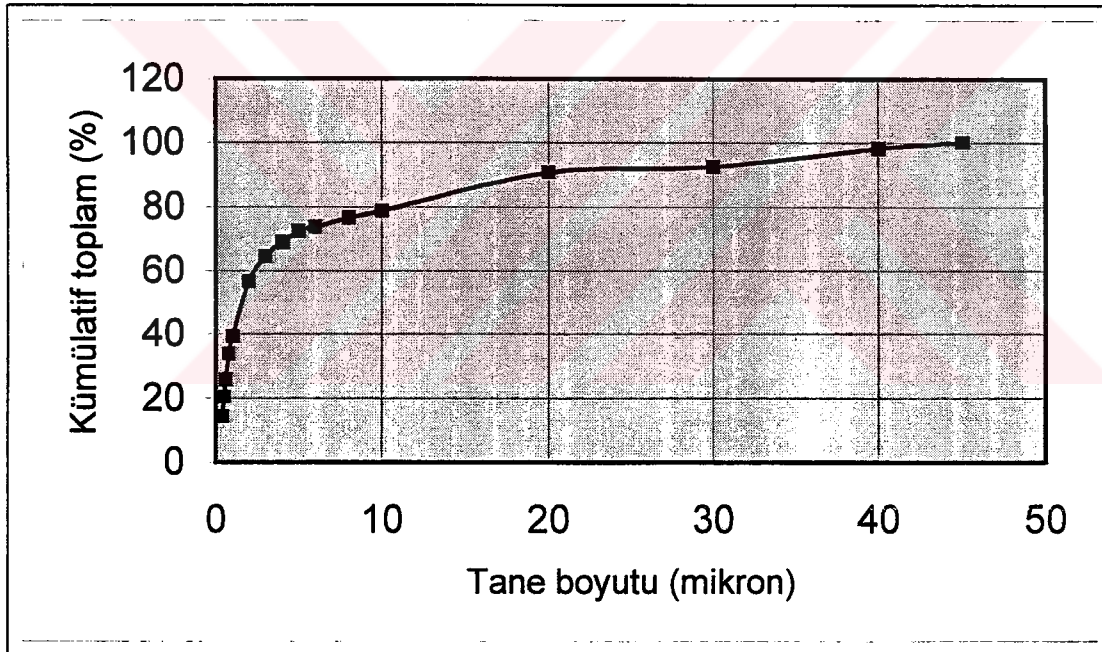
Kimyasal analiz (%)	Reaktif alumina 1	Reaktif alumina 2
Al_2O_3	99.60	99.80
Na_2O	0.16	0.09
Fe_2O_3	0.03	0.02
SiO_2	0.05	0.03
CaO	0.03	0.02
BET; özgül yüzey alanı (m^2/g)	4.3	3.8

Karışımlarda genel olarak reaktif alumina 1 kullanılmıştır. Reaktif alumina 2, karşılaştırma amacıyla incelenmiştir. Reaktif alumina 1' e ait X-ışınları analizi sonucunda Tablo 3.6' da görüldüğü gibi birincil faz $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ olarak tespit edilmiştir. –45 mikron ebadındaki tabular alumina tanelerinin X-ışınları analizi Tablo 3.2' de verilmişti. Bu iki tablo karşılaştırıldığında genel olarak –45 mikron ebadındaki tabular alumina taneleri ile elde edilen piklerin daha kararlı olduğu söylenebilir. Tane boyutu incelidikçe $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ fazının kararlılığı düşmektedir.

Tablo 3.6 Reaktif alumina 1' e ait X-ışınları faz analizi sonuçları

d (Å)	2 θ	I/I ₀	Faz
3.461	29.8	92.00	α -Al ₂ O ₃
2.535	41.1	100.00	α -Al ₂ O ₃
2.366	44.2	34.30	α -Al ₂ O ₃
2.071	50.9	89.40	α -Al ₂ O ₃
1.731	61.9	34.80	α -Al ₂ O ₃
1.592	68.0	75.80	α -Al ₂ O ₃
1.503	72.6	11.10	α -Al ₂ O ₃
1.398	79.1	25.30	α -Al ₂ O ₃
1.366	81.3	35.90	α -Al ₂ O ₃

Reaktif alumina 1' in Shimadzu Sedigraph ile belirlenen tane boyut dağılımı grafiği Şekil 3.4' de gösterilmiştir.

**Şekil 3.4** Reaktif alumina 1' in tane boyut dağılımı

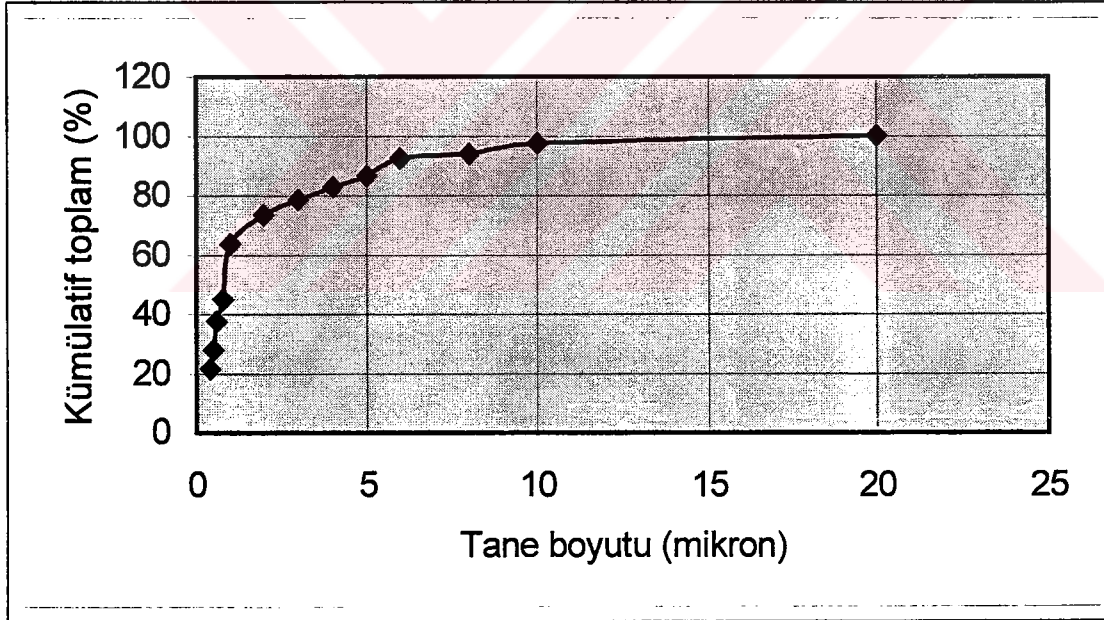
Şekil 3.4' deki tane boyut dağılımı eğrisine bağlı olarak yapılan değerlendirmede tanelerin %50' nin 3 mikron altında olduğu görülmüştür. Elde edilen eğri taneler arasında homojen bir dağılım olduğunu göstermektedir.

Reaktif alumina 2' nin X-ışınları analizi Tablo 3.7' de verilmektedir. Tane boyut dağılımı Şekil 3.5' de verilmiş olan Reaktif alumina 2, boyutça Reaktif alumina 1' den

daha iridir. X-ışınları incelendiğinde reaktif alumina 2 malzemesinin piklerinin daha kararlı olduğu görülmektedir.

Tablo 3.7 Reaktif alumina 2' e ait X-ışınları faz analizi sonuçları

d (Å)	2θ	I/I ₀	Faz
3.461	29.8	60.90	α -Al ₂ O ₃
2.535	41.1	100.00	α -Al ₂ O ₃
2.366	44.2	51.60	α -Al ₂ O ₃
2.071	50.9	96.79	α -Al ₂ O ₃
1.731	61.9	58.30	α -Al ₂ O ₃
1.592	68.0	87.76	α -Al ₂ O ₃
1.503	72.6	17.20	α -Al ₂ O ₃
1.398	79.1	42.27	α -Al ₂ O ₃
1.366	81.3	58.31	α -Al ₂ O ₃



Şekil 3.5 Reaktif alumina 2' nin tane boyut dağılımı

Yapılan incelemede reaktif alumina 2 malzemesinin tanelerinin %50' nin takriben 4 mikron altında kaldığı saptanmıştır.

3.2.4 Çimento

Bu çalışmada ALCOA' nın CA270 kalite çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.8' de verilmiştir.

Tablo 3.8 Çimentonun kimyasal özellikleri

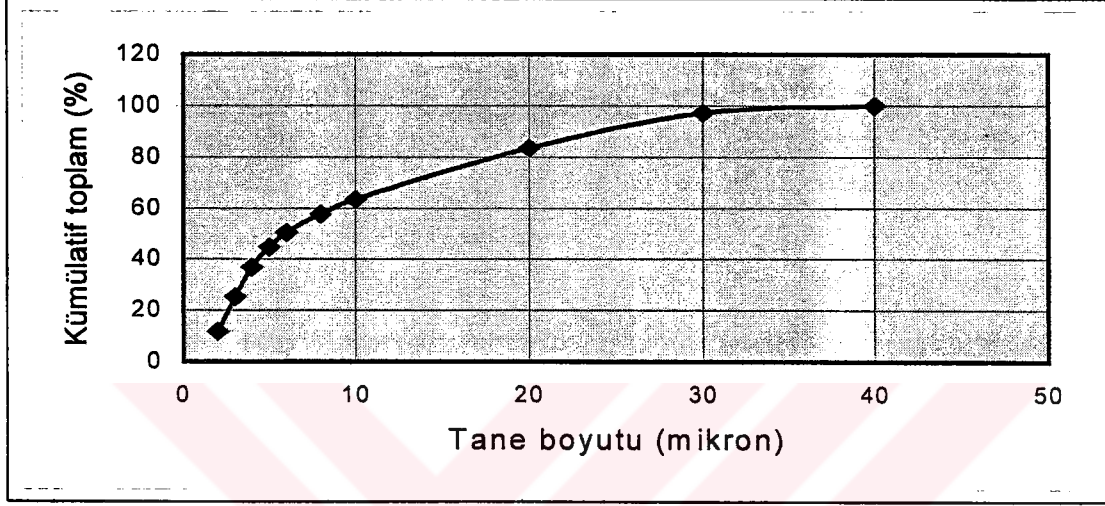
Kimyasal bileşim (%)	
CaO	26-28
Al ₂ O ₃	71-73
Na ₂ O	0.25
SiO ₂	0.30
Fe ₂ O ₃	0.15
MgO	0.20

Tablo 3.9 Çimentoya ait X-ışınları faz analizi sonuçları

d (Å)	2θ	I/I ₀	Faz
4.496	22.9	56.76	CA2
4.085	25.3	10.91	CA
3.724	27.8	43.24	CA2
3.502	29.6	100.00	CA2
2.979	34.9	100.00	CA
2.884	36.1	59.46	CA2
2.603	40.2	81.08	CA2
2.525	41.5	32.12	CA
2.403	43.7	18.18	CA
2.085	50.8	22.42	CA
1.928	55.3	7.88	CA
1.423	77.9	67.57	CA2
2.199	48.0	10.91	CA
2.134	49.5	9.09	CA
2.022	52.5	9.09	CA
2.342	44.9	7.88	CA
2.385	44.1	9.09	CA
2.438	43.1	7.27	CA
2.560	40.9	13.33	CA

Çimento grubu içinde yüksek alüminalı çimento grubuna giren malzemenin X-ışınları faz analizi verileri Tablo 3.9' da görülmektedir. Aşağıdaki tabloya göre %70 Al_2O_3 ' lı çimento, CA ($\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ve CA_2 ($\text{CaO}.2\text{Al}_2\text{O}_3$) fazlarını ihtiva etmektedir.

Tanelerinin %50' si 4-7 mikron arasında değişen çimentonun tane boyut dağılımı Şekil 3.6' de gösterilmektedir. Çimento ortalama 5 mikron ebadındaki tane ebadı ile dökülebilir refrakterlerde çok ince taneli bileşenler arasına girmektedir.



Şekil 3.6 Çimentonun tane boyut dağılımı

3.2.5 Mikrosilika

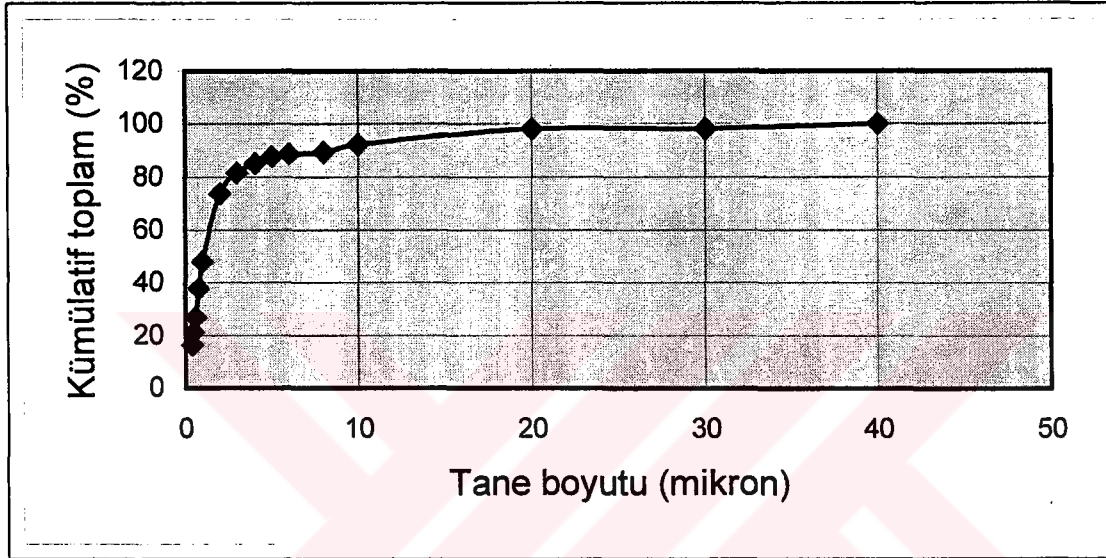
Mikrosilika'nın kimyasal bileşimi Tablo 3.10' da verilmektedir.

Tablo 3.10 Mikrosilikanın kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim	%
SiO_2	95
K_2O	1.2
SiC	0.7
MgO	0.4
Al_2O_3	0.3
CaO	0.25
Na_2O	0.15
Fe_2O_3	0.1

Deneylerde kullanılan mikrosilika tasarlanan karışımlara ilave edilen en ince taneli katkı malzemesidir. Mikrosilikanın tane boyut dağılımı Şekil 3.7' de verilmiştir.

Mikrosilikanın ortalama tane boyutu 0.1-0.5 mikron mertebesinde dir. Dökülebilir refrakter karışımlarında çok ince tane sınıfına giren mikrosilika taneler arası boşlukları doldurarak paketlenme özelliklerini geliştirmektedir. %100' e yakın SiO_2 içeren mikrosilika, çimentodan gelen CaO ile reaksiyona girerek, düşük sıcaklıkta ergiyen fazların oluşmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.7 Mikrosilikanın tane boyut dağılımı

3.3 NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

3.3.1 Numunelerin sınıflandırılması

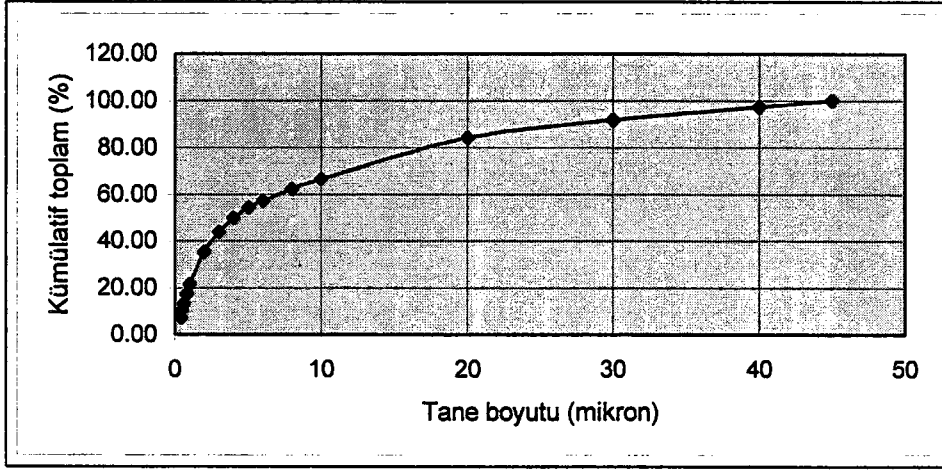
3.3.1.1 A grubu karışımları

Bu aşamada öncelikle kendi kendine akan refrakterlerin karakterine uygun reolojik özelliklere baz teşkil edebilecek tane boyut dağılımı üzerinde çalışılmış, Tablo 3.11’deki karışım oranları ile Bölüm 3.2.2’de anlatılan şekilde hazırlanan SFC1 numunelerinin özellikleri incelenmiştir. SFC1 numunesine ait veriler gerektiğinde çeşitli parametrelerin akış özelliklerine etkisini görebilmek amacıyla diğer numunelerden elde edilecek sonuçlarla kıyaslanacaktır.

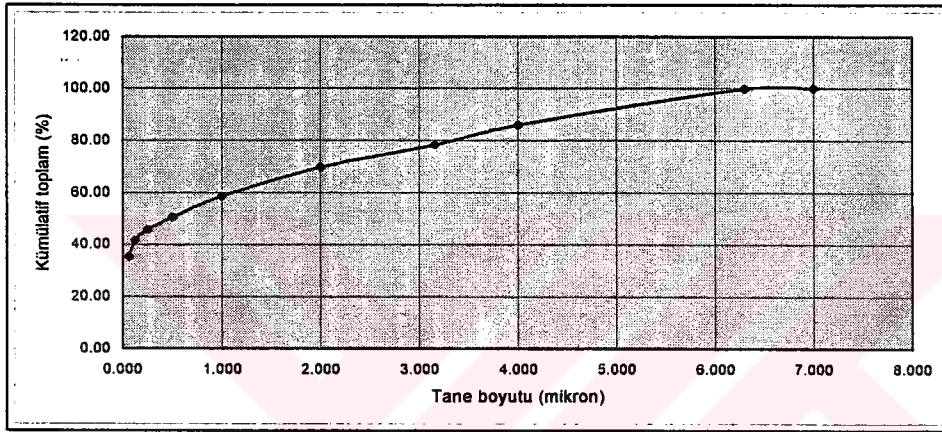
Tablo 3.11 SFC1; karışım oranları (% ağırlıkça)

MALZEME	ORAN (Ağırlıkça %)
Tabular alumina +6.3-0.045mm	71
Tabular alumina –0.045mm	9
Reaktif alumina 1	15
Çimento	5
Dispersan	1
Su	5.5

A grubu numunelerinin 45 mikron altındaki ve 45 mikron üstündeki tane boyut dağılımı sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi +45 mikron boyutundaki tanelerin kümülatif dağılım eğrisi aynı şekilde –45 mikron için de bozulmadan devam etmektedir.



Şekil 3.8 SFC1 karışımının -45 mikronluk kısmının tane boyut dağılımı



Şekil 3.9 SFC1 karışımının +45 mikronluk kısmının tane boyut dağılımı

3.3.1.2 B grubu karışımları

Tane şeklinin akıcılık özelliklerine etkisini görmek amacıyla tasarlanmış karışım oranları Tablo 3.12' de verilmiştir. SFC2 karışımında küresel şekilli tanelerden oluşan ve -45 mikron mertebesinde olan, Bölüm 3.1.2' de anlatılan RMA325 kalite hammadde kullanılmıştır. RMA325 kalite kalsine alumina, SFC1 karışımındaki köşeli taneli tabular alumina -45 mikron bileşeni ile, karışım içindeki oranı sabit bırakılarak değiştirilmiştir. Bu şekilde tane şeklinin, dökülebilir refrakterlerin akıcılık ve diğer ürün özelliklerine etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 3.12 SFC2; karışım oranları (% ağırlıkça)

MALZEME	ORAN (Ağırlıkça %)
Tabular alumina +6.3-0.045mm	71
Kalsine alumina –45mikron	9
Reaktif alumina 1	15
Çimento	5
Dispersan	1
Su	5.5

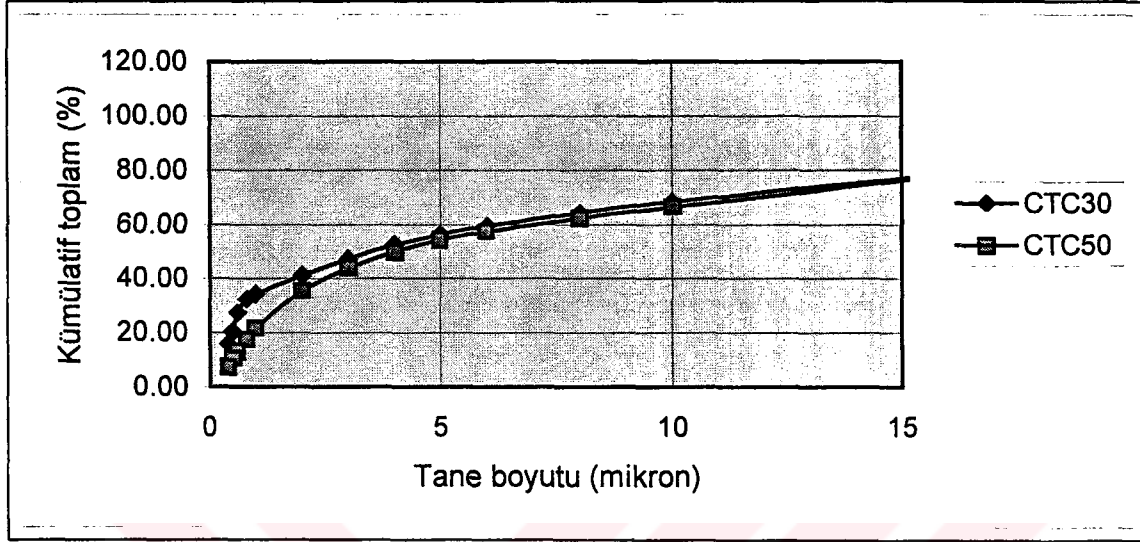
3.3.1.3 C grubu karışımları

C grubu numuneleri reaktif alumina tipinin dökülebilir refrakterlerin reolojik ve diğer ürün özelliklerine etkisini görmek amacıyla tasarlanmış SFC3 karışımı ile hazırlanmıştır. Bu deneme karışımında kullanılan reaktif alumina Bölüm 3.1.3' de de üzerinde durulduğu gibi SFC1 karışımında bulunan reaktif aluminadan daha iri tanelidir. SFC3 ' ün karışım oranları Tablo 3.13' de kaydedilmiştir.

Tablo 3.13 SFC3; karışım oranları (% ağırlıkça)

MALZEME	ORAN (Ağırlıkça %)
Tabular alumina +6.3-0.045mm	71
Tabular alumina –45mikron	9
Reaktif alumina 2	15
Çimento	5
Dispersan	1
Su	5.3

SFC1 karışımındaki reaktif alumina 1 malzemesi, SFC3 karışımında reaktif alumina 2 malzemesi ile yer değiştirmiştir. Reaktif alumina 1 ve 2 malzemeleri ile hazırlanan SFC3 karışımının 15 mikron altı tane boyut dağılımları Şekil 3.10' da ayrı ayrı verilmiştir.



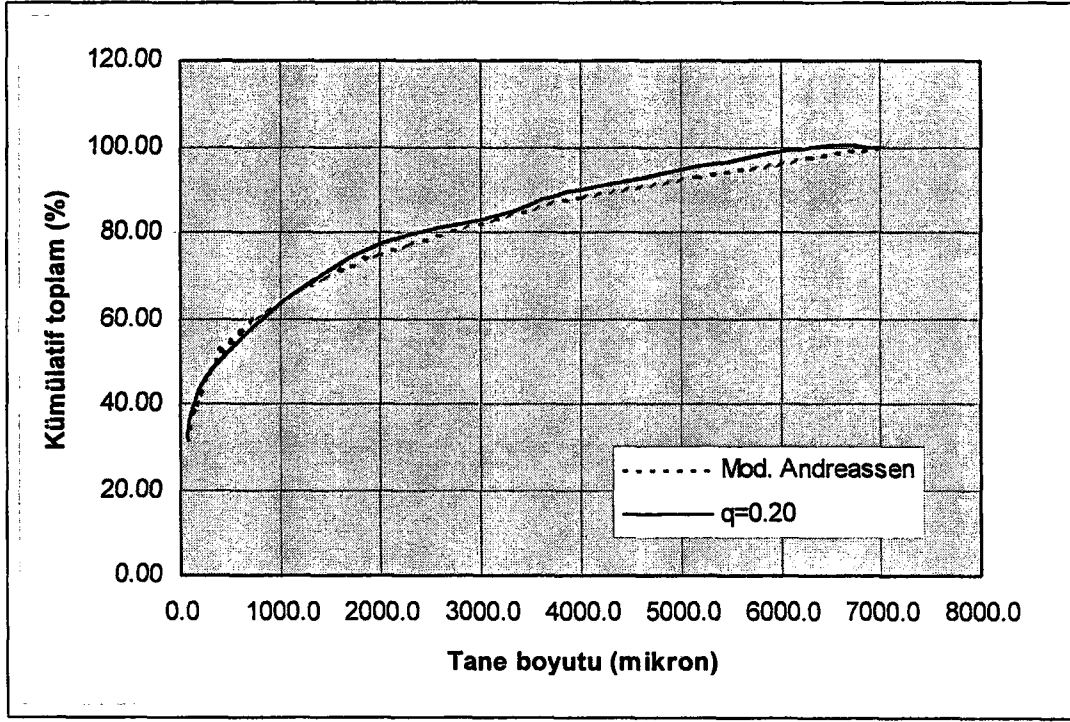
Şekil 3.10 SFC3 karışımının 15 mikron altı tane boyut dağılımı

3.3.1.4 D grubu karışımları

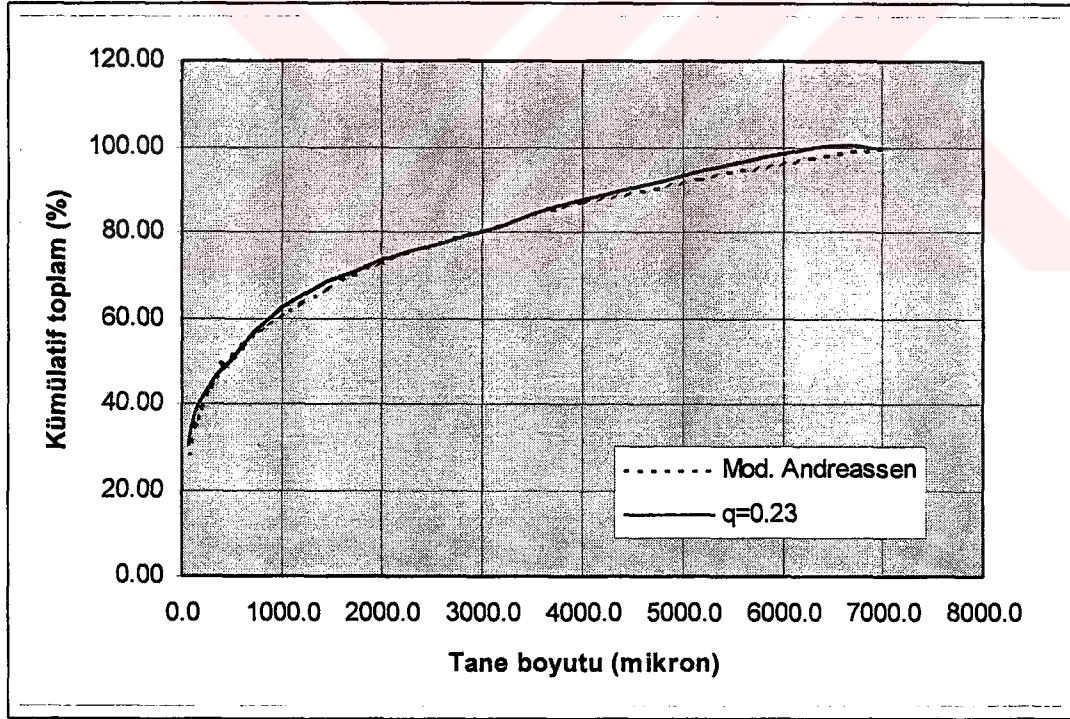
q değeri baz alınarak tasarlanan karışımların tane boyut dağılımları sırasıyla Şekil 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 no.' lu resimlerde görülmektedir. Her q değeri için belirlenen karışım oranları Tablo 3.14' de kaydedilmiştir. Su oranları döküm işlemi sırasında belirlenen optimum değerlerdir.

Tablo 3.14 q değerine bağlı olarak belirlenen karışım oranları (% ağırlıkça)

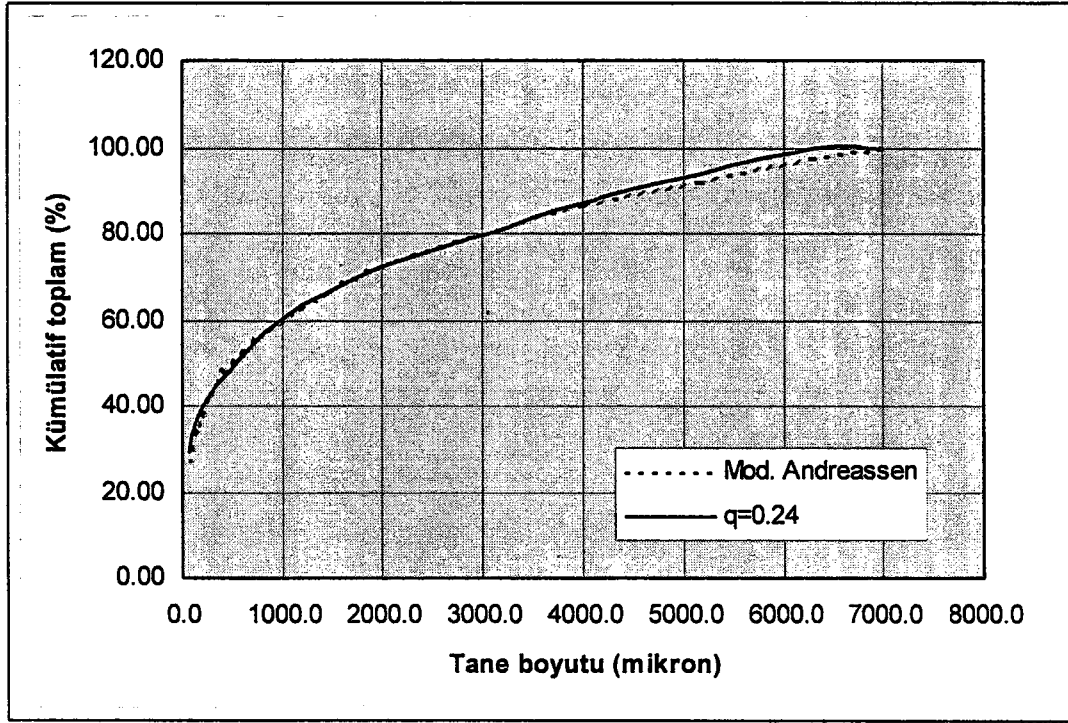
Malzeme	q=0.20	q=0.23	q=0.24	q=0.25	q=0.28	q=0.33
Tabular alumina -6,3+1.0	34	35	37	39	43	47
Tabular alumina -1.0+0.045	36	36	35	35	31	32
Kalsine alumina -45mikron	15	14	13	12	12	8
Reaktif alumina 1	10	10	10	9	9	8
Çimento	5	5	5	5	5	5
Dispersan	1	1	1	1	1	1
Su	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3



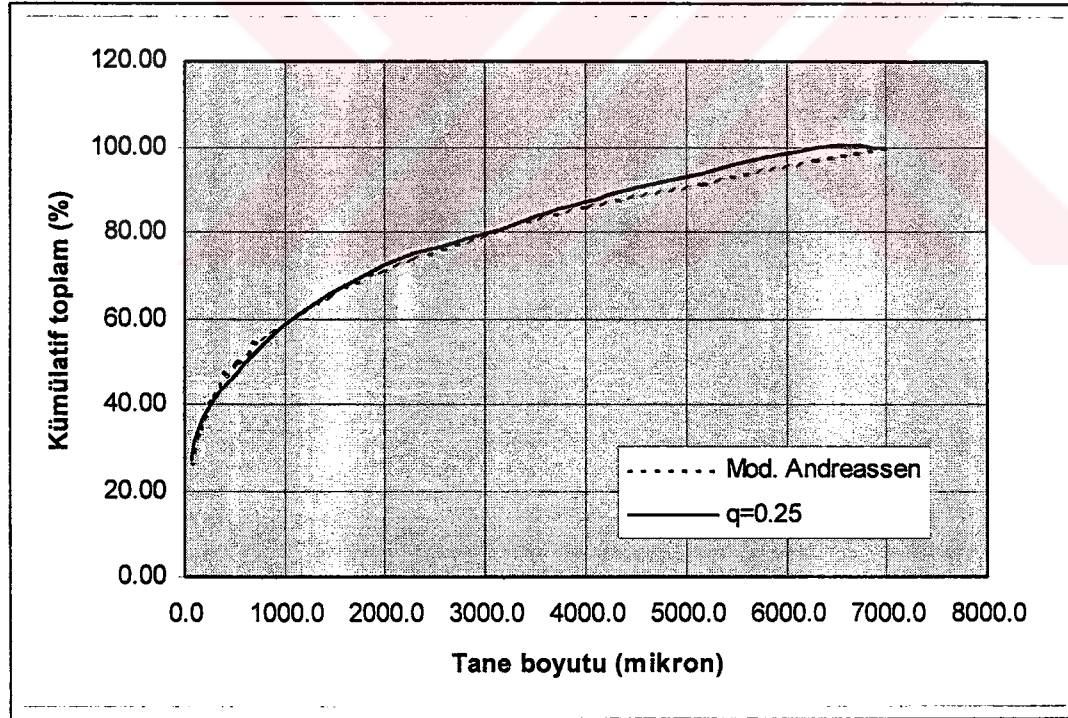
Şekil 3.11 $q=0.20$; tane boyut dağılımı



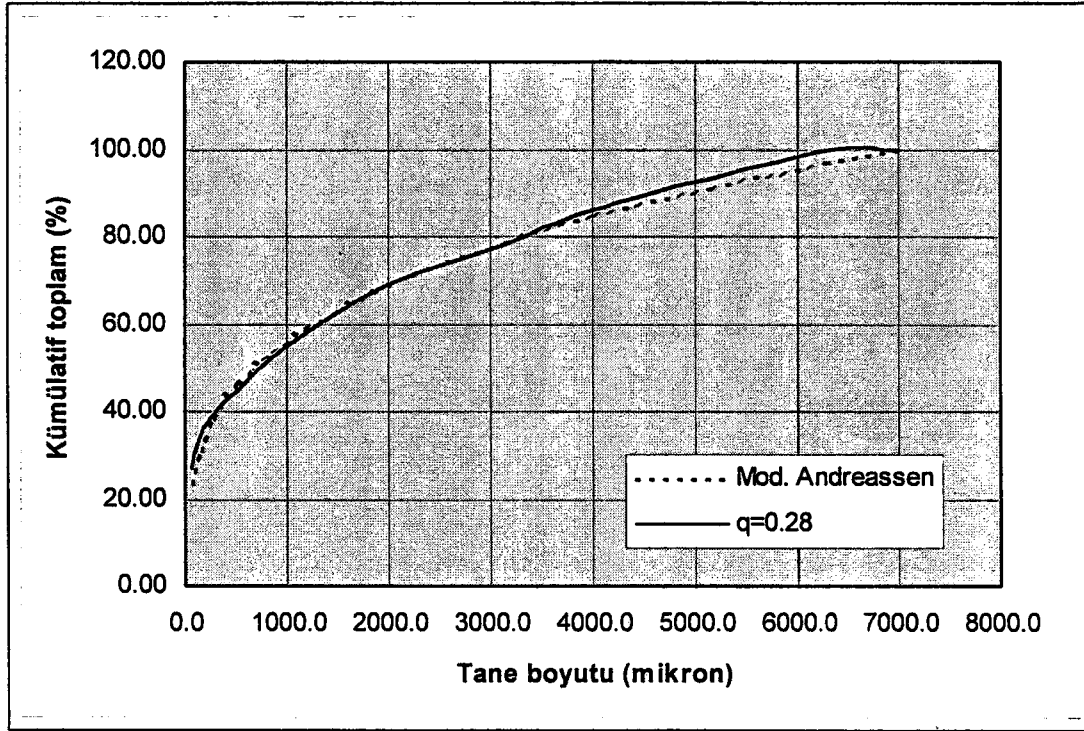
Şekil 3.12 $q=0.23$; tane boyut dağılımı



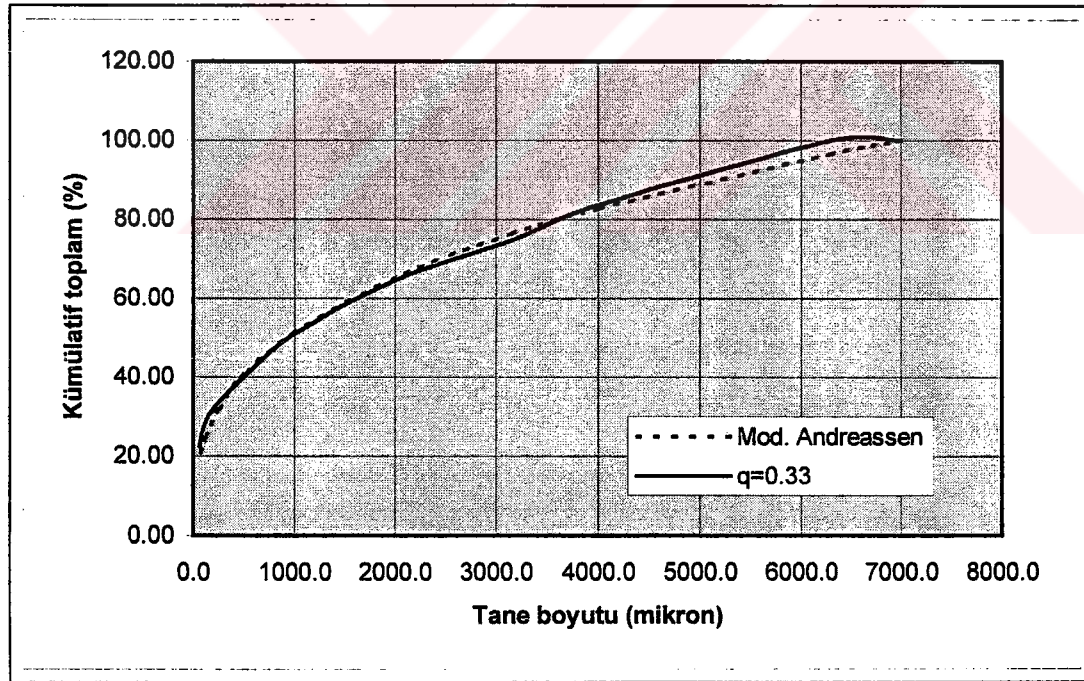
Şekil 3.13 $q=0.24$; tane boyut dağılımı



Şekil 3.14 $q=0.25$; tane boyut dağılımı



Şekil 3.15 $q=0.28$; tane boyut dağılımı



Şekil 3.16 $q=0.33$; tane boyut dağılımı

q değeri Bölüm 2.3.2' de anlatıldığı gibi Dinger&Funk bağıntısı ile hesaplanabilen tane boyu dağılımı modülüdür. q değerine bağlı olarak tasarlanan partikül tane boyut dağılımları aşağıdaki şekillerde grafik yöntemle gösterilmiştir. Bu çalışmada seçilen q değerleri Modifiye edilmiş Andreassen veya Dinger&Funk bağıntısı adı verilen matematiksel yöntemler ile hesaplanmıştır. Aşağıdaki şekillerde q değerine bağlı olarak belirlenen teorik tane boyut dağılım eğrisi ile her q değeri için tasarlanan karışımların ölçülen tane boyut dağılımları verilmektedir.

q değerine göre isim alan numuneler akıcılık özelliklerinin yanısıra diğer ürün özellikleri de karşılaştırmalı değerlendirilmek suretiyle incelenmiştir. q değerinin artması veya azalması ile sözkonusu özelliklerin ne yönde değişeceği irdelenmiştir. Sonuç olarak serbest akan dökülebilir yapısına uygun optimum özelliklerin elde edilebileceği q değeri aralığının saptanması amaçlanmıştır.

3.3.1.5 E grubu karışımları

Mikrosilikanın dökülebilir refrakterlerin reolojik özelliklerine etkisini ve nihai ürün niteliklerini ne yönde değiştirdiğini incelemek amacıyla 4 ayrı karışım tasarlanmıştır. Karışımların tasarımında gözönüne alınan parametre mikrosilika oranıdır. Mikrosilika Bölüm 3.1.5' de anlatıldığı gibi tanelerinin sadece %30' nun 1 mikronun üzerinde olduğu karışım içindeki en ince bileşendir. Tablo 3.15' de E grubu numunelerin karışım oranları verilmiştir.

Yoğunluğu takriben 2.2 g/cm^3 olan mikrosilika tanelerinin yoğunluğu 3.96 g/cm^3 yoğunluğundaki Al_2O_3 tanelerinden daha düşüktür. Tablo 3.15' deki karışımlar artan mikrosilika oranına bağlı olarak incelenmiştir. Ancak yoğunluk farkı nedeniyle karışımlar hacimce % mikrosilika/reaktif alumina oranları ile adlandırılmıştır.

Mikrosilika oranına bağlı olarak akıcılık özellikleri ve numunelerin diğer fiziksel özelliklerinin belirlenerek, optimum mikrosilika oranının saptanması amaçlanmıştır.

Tablo 3.15 E grubu numuneleri karışım oranları (% ağırlıkça)

MALZEME	Mikrosilika/Reaktif alumina (% hacimce)			
	17/83	28/72	37/63	44/56
Tabular alumina –6,3+1.0	44	44	44	44
Tabular alumina –1.0+0.045	25	25	24	24
Kalsine alumina –45mikron	14	12	11	9
Reaktif alumina 1	10	10	10	10
Mikrosilika	2	4	6	8
Çimento	5	5	5	5
Dispersan 1	0.03	0.03	0.03	0.03
Dispersan 2	0.03	0.03	0.03	0.03
Geciktirici	0.008	0.008	0.008	0.008
Hızlandırıcı	0.008	0.008	0.008	0.008
Su	5.6	5.6	5.6	5.6

3.3.2 Numunelerin üretimi

Numuneler, Bölüm 3.1' de anlatılan hammaddeler ile inceleme türüne bağlı olarak tasarlanan karışım oranlarına göre hazırlanmıştır. Tüm numuneler 3.2.1 no.' lu bölümde verilmiş olan karışım oranları esas alınarak hazırlanmıştır. Tüm dökümler titreşim uygulanmaksızın yapılmıştır.

Bölüm 3.2.1' de kaydedilmiş olan numune gruplarına ait, ağırlıkça yüzde karışım oranlarını gösteren reçetelere göre belli tane boyut aralıklarındaki fraksiyonlar öncelikle tartılarak hazırlanmıştır. Dispersan ve ilave edilecek su hassas terazide tartılarak karışımlara ilave edilmiştir.

Tartım sonrası, su ilave edilmeden önce 1-2 dakika kuru karıştırılan harç, daha sonra kontrollü bir şekilde su ilave edilmek suretiyle uygun kıvama gelinceye kadar takriben 3-4 dakika yaş karıştırılmıştır. Yaş karıştırmanın ardından 50x50x50 mm ebatlarında küpler halinde şekillendirmek amacıyla kalıplara dökülmüştür.

Kalıplar vibrasyon masalarına sabitlenmiş olup, kendi kendine akış karakterinin sağlanamadığı karışımlarda titreşim uygulanacak şekilde hazırlanmıştır.

Numuneler priz aldıktan sonra kalıptan çıkartılarak, bağlayıcı fazı teşkil eden çimento reaksiyonlarının tamamlanabilmesi için bir süre daha ortam sıcaklığında bekletildikten sonra, 110°C' de 18 saat kurutulmak suretiyle bünyeden çimento ile reaksiyona girmeyen serbest suyun uzaklaşması sağlanmıştır. Kurutma ile birlikte numuneler deneyler için hazır hale gelmiştir.

Kalıplardan çıkan numuneler 50x50x50 mm boyutlarında küp şeklinde olup, porozite, hacim ağırlığı, soğukta basma mukavemeti gibi özelliklerin belirlenmesinde kullanılmıştır.



3.4 NUMUNE ÖZELLİKLERİNİN ÖLÇÜMLERİ

3.4.1 Akış testi

Dökülebilir refrakterlerin akış özelliklerinin ölçümüne yönelik olarak henüz tam anlamıyla kabul görmüş bir standart olmamakla birlikte, çoğunlukla çimento sektöründe aynı amaçlı kullanılan ASTM C230 standardından yararlanılarak hazırlanan deney düzeneği literatürdeki örneklerine uygun olarak düzenlenmiş olup deney sonuçları da buna göre değerlendirilmiştir.

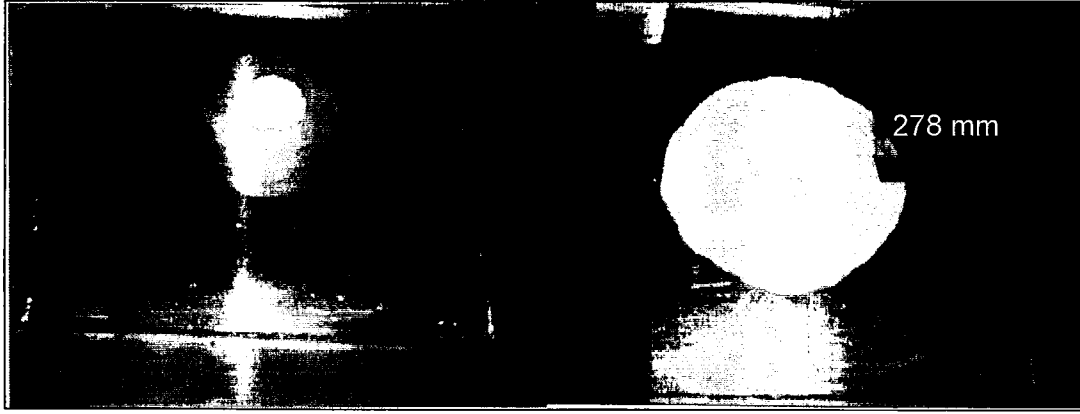
Akış testi düzeneği Şekil 5.0' da görülen ebatlarda hazırlanan konik sac ve 500x500mm kare ebatlarında akış yüzeyi ölçeklendirilmiş bir tabladan oluşmaktadır. Bölüm 3.2.2' de anlatıldığı gibi hazırlanan yaş haldeki harç malzemesi ile Şekil 5.0' da görüldüğü gibi iki tarafı açık konik sacın içeri tamamen doldurulur. Belli bir süre konik sacın içersinde bekleyen harç, konik sacın yukarıya doğru kaldırılmasıyla tabla yüzeyi üzerinde yayılmaya başlar. Yayılmanın durduğu anda harcın dairesel olarak kapladığı alanın birbirine dik iki çapı mm olarak ölçülerek kaydedilir. Daha sonra bu iki çapın ortalaması hesaplanarak, elde edilen değer karışımın yayılma çapı olarak kaydedilir.

Bu deneyin sonunda titreşim uygulanmadan harcın tabal üzerinde kendi ağırlığı ile yayılması beklenerek bu şekilde serbest akış özelliklerinin ne yönde geliştiği

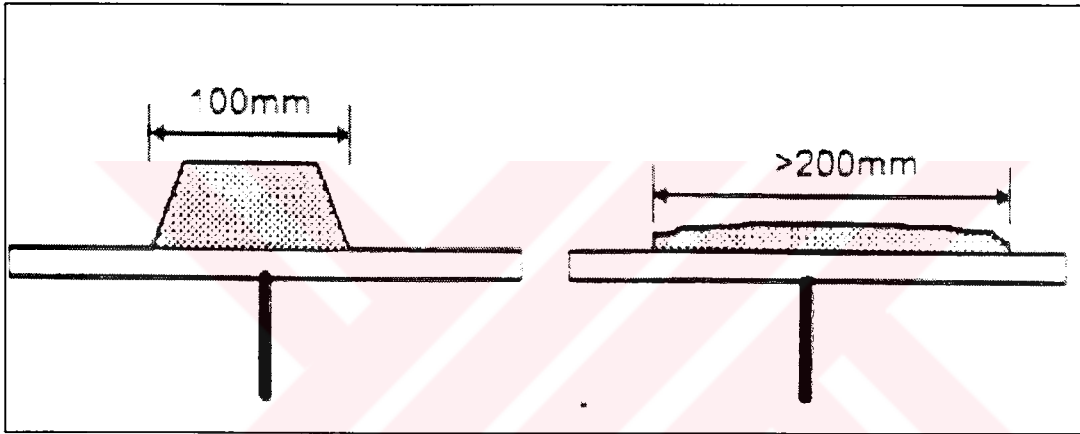
incelenmiştir. Ayrıca harcın ne kadar süre çalışabilir kıvamda kaldığı gözlenmiştir. Buna göre serbest akış özelliklerine sahip bir harcın bekleme süresine bağlı olarak yayılma çapı (mm) Tablo 3.16 aşağıdaki değerlere ulaşmalıdır.

Tablo 3.16 Kendi kendine akan dökülebilir refrakter harçlarda akış testi sonunda istenen yayılma çapı

Bekleme süresi (dak.)	Yayılma çapı (mm)
10	200-250
30	min. 190



(a)



(b)

Şekil 3.17 (a) SFC1 numunesinin akış testi sonundaki yayılma çapı
(b) Kendi kendine akan refrakterlerden beklenen akış testi sonuçları.

3.4.2 Hacim ağırlığı ve görünür porozite

Porozite miktarı refrakter malzemeni kalitesini doğrudan etkileyen parametrelerden biridir. Kimyasal aşınma, mukavemet, ısı etkileşim ve termal şok gibi özellikler üzerinde etkili olan porozitenin tayini bu çalışmada DIN 51056' ya uygun olarak yapılmıştır. 5x5x5cm ebatlarındaki titreşimsiz döküm yöntemiyle hazırlanmış numuneler, 110°C' de 18s kurutulduktan sonra kuru ağırlıkları 0.1g hassasiyetindeki terazi ile tespit edilerek kaydedilmiştir. Daha sonra kaynamakta olan içi su dolu kaba yerleştirilen numuneler 2 saat süre ile suda kaynamaya bırakılmışlardır. Numunelerin kabın tabanı ile temasını önlemek amacıyla, taban tel ızgara yerleştirilmiştir. 2 saat sonunda su sıcaklığı oda sıcaklığına düşürülmüştür. Askıda

yaş ağırlıkları su içinde tespit edilen numuneler, son olarak sudan çıkarıldıktan sonra yüzeylerindeki su filmi tabakası nemli bir bez yardımıyla alınmış ve yaş ağırlıkları kaydedilmiştir.

Elde edilen tartım sonuçları aşağıdaki formüllerde kullanılarak, hacim ağırlığı ve porozite değerleri hesaplanmıştır.

$$\% \text{görünür porozite} = \frac{W_y - W_k}{W_y - W_a} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\rho_w (g / cm^3) = \frac{W_k}{W_y - W_a} \times \rho_s \quad (3.2)$$

Wk: Kuru ağırlık

Wa: Askıda ağırlık

Wy: Yaş ağırlık

ρ_w : Hacim ağırlığı

ρ_s : Sıvı yoğunluğu

3.4.3 Soğukta basma mukavemeti

Numunelerin soğukta basma mukavemetleri (SBM) DIN 51067' e uygun olarak test edilmiştir. Basma mukavemeti 20 tonluk bir pres yardımıyla belirlenmiştir. 5x5x5cm ebatlarındaki numuneler istenen deney sıcaklıklarında sinterlendikten sonra, oda sıcaklığında test presinde 200 kg/sn presleme hızı ile basınca maruz bırakılmıştır. Kırılma anındaki kadran değerleri aşağıdaki bağıntı yardımıyla soğukta basma mukavemeti olarak kg/cm² cinsinden kaydedilmiştir.

$$\sigma_{SBM} = \frac{P_{\max}}{F_o} \quad (3.3)$$

σ_{SBM} : Soğukta basma mukavemeti (kg/cm²)

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

F_o : Numunenin basınç uygulanan yüzey kesit alanı (cm²)

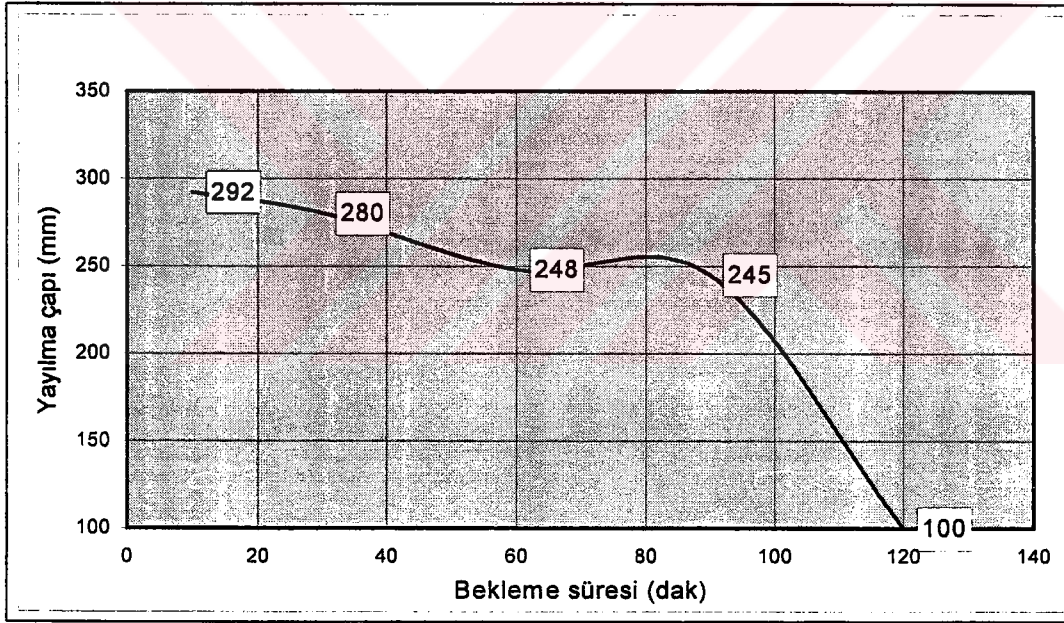


3.5 NUMUNELERİN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

3.5.1 Akış testi

3.5.1.1 Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterin akış testi sonuçları; A grubu numuneleri

Kendi kendine dökülebilir refrakterlerin tipik özelliklerine sahip olan harcın akıcılık özellikleri zamana bağlı olarak test edilmiş olup, elde edilen sonuçlar Şekil 3.18' deki grafik ile yayılma çapının zamana bağlı değişimi şeklinde gösterilmiştir. Takriben 10-15°C sıcaklıkta dökülerek sırasıyla 10d, 30d, 60d, 90d, 120d bekleme sonunda belirlenen yayılma çapları kaydedilerek harcın ne kadar süre boyunca çalışılabilir kıvamda kaldığı test edilmiştir.



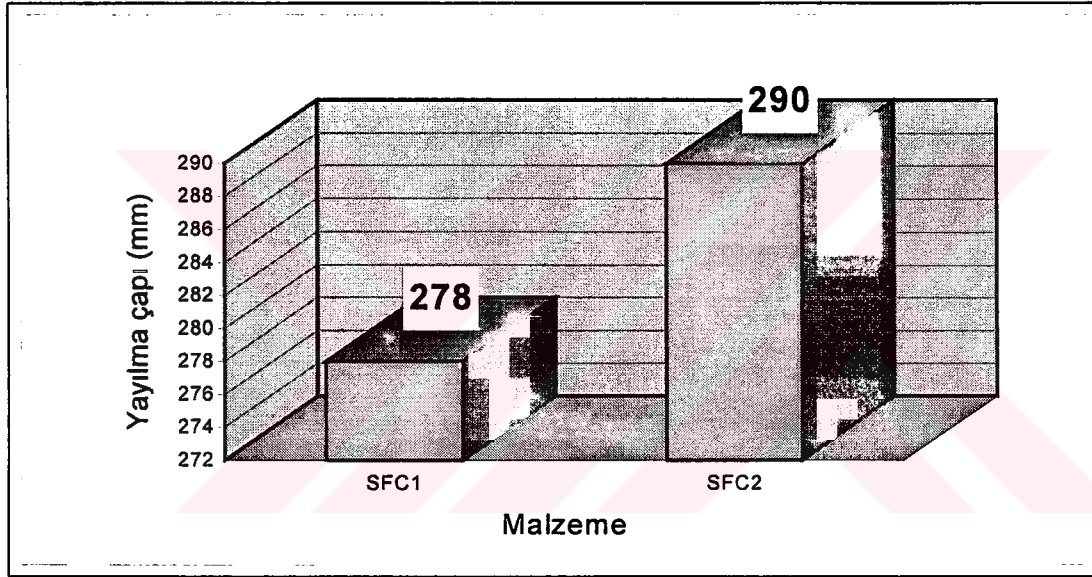
Şekil 3.18 SFC1 karışımının bekleme süresine bağlı olarak yayılma çapının değişimi.

Şekil 3.18' den de görüldüğü gibi bekleme süresine bağlı olarak yayılma çapı düşmektedir. Çimento zamanla reaksiyona girerek hidratları oluşturmak suretiyle, malzemenin priz almasını sağlamaktadır. Harcın priz almaya başladığı ilk ana kadar olan süre malzemenin çalışılabilirlik süresi olarak ifade edilebilir. Harç priz almaya başladıktan sonra harcın kalıp içerisinde yayılım özelliği zayıflayacak ve serbest akış özelliğini giderek kaybedecektir. Bu durum döküm sırasında harcın çalışma

şeklini olumsuz yönde etkileyecektir. Yukarıda görüldüğü gibi, SFC1 karışımı kendi kendine dökülebilir refrakterlerin Tablo 3.16' da verilen akış özellikleri ile uyumludur. Bu durum, SFC1 tipindeki karışımların, akıcılık özellikleri bakımından değerlendirildiklerinde büyük hacimli parçaların, çelik potalarının, tandişlerin...vb., astar dökümünde uygun olabileceğini göstermektedir.

3.5.1.2 Tane şeklinin akıcılık özelliklerine etkisi; B grubu numuneleri

-45 mikron ebatlarında ve küresel şekilli tanelerin akıcılık özelliklerine etkisi SFC1 karışımının aynı özellikleri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar Şekil 3.19' da verilmiştir. Akış testi ile 10d bekleme sonunda yayılma çapı her iki karışım içinde takriben $>20^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta döküm sonrasında tespit edilmiştir.



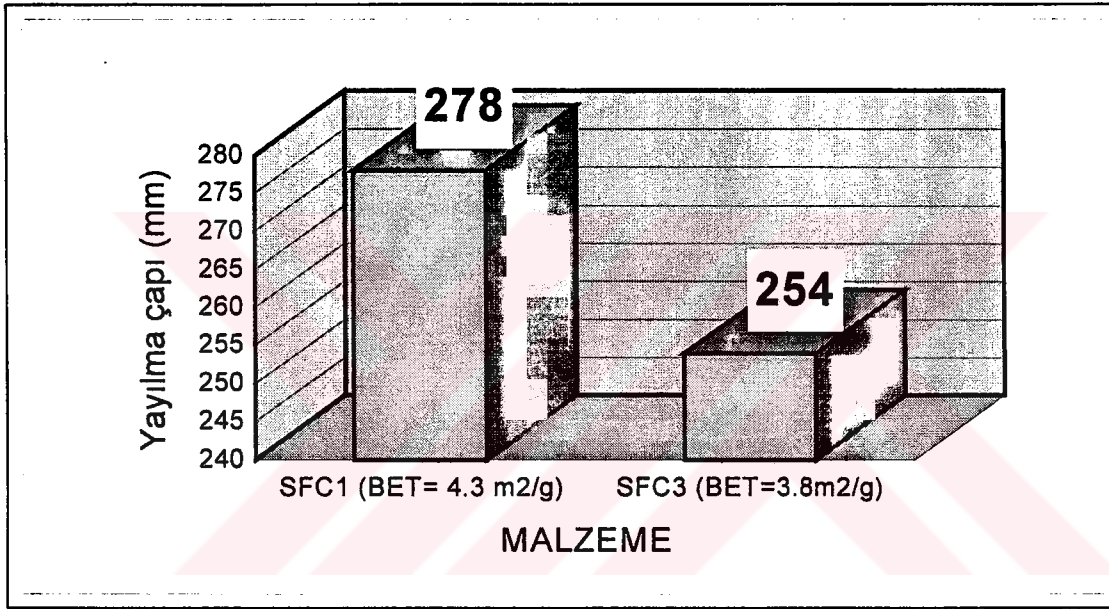
Şekil 3.19 Tane şeklinin akıcılık özelliklerine etkisinin yayılma çapına bağlı olarak gösterimi.

SFC1 karışımının -45 mikron seviyesindeki köşeli taneleri, aynı boyuttaki küresel taneli kalsine alumina ile değiştirilmiştir. Küresel şekilli taneler içeren SFC2 karışımının 10d bekleme sonunda SFC1 karışımına oranla daha fazla yayıldığı görülmüştür.

Tanelerin küresel şekilli morfolojisi, tanelerin birbiri üzerinde hareketini kolaylaştırmaktadır. Küresel tanelerin temas yüzeyleri küçük olduğu için, diğer taneler arasında kolaylıkla hareket ederek akıcılığı olumlu yönde etkilerler.

3.5.1.3 *Reaktif alumina tipine bağı olarak akıcılık özelliklerinin değişimi; C grubu numuneleri*

Spesifik yüzey alanına (B.E.T m^2/g) göre sınıflandırılan reaktif alumina tipi SFC3 karışımında değiştirilerek, buna göre akıcılık özelliklerinin değişimi incelenmiştir. SFC1 karışımındaki reaktif alumina 1 malzemesi SFC3 karışımında reaktif alumina 2 malzemesi ile karışım içindeki oranları sabit tutulmak kaydıyla değiştirilmiştir. İki karışım ile aynı ortam sıcaklığında yapılan akış testi sonunda 10d bekleme süresi sonunda kaydedilen yayılma çapları kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler Şekil 3.20' de görülmektedir.

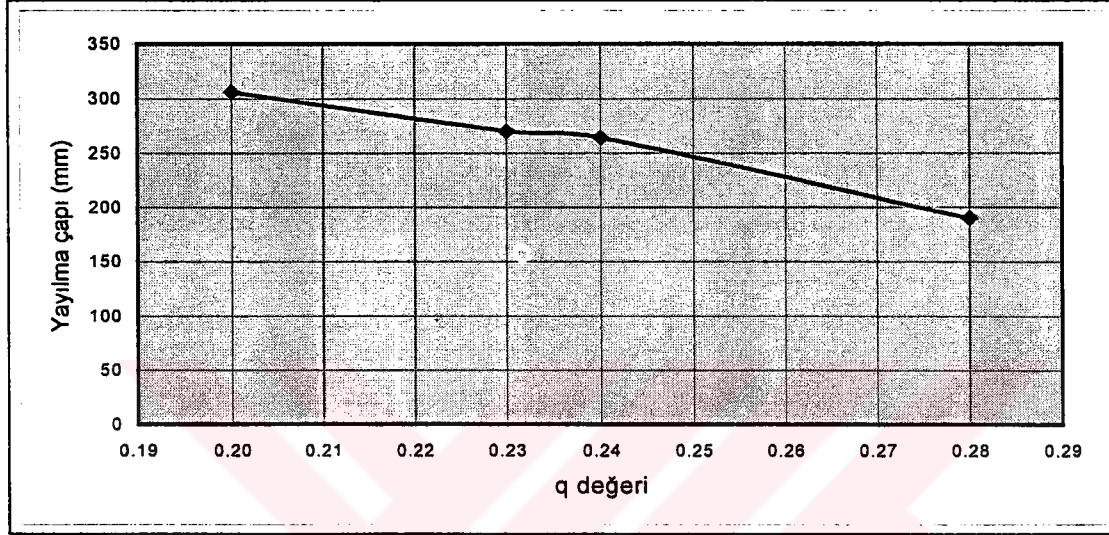


Şekil 3.20 Reaktif alumina tipinin akıcılık özelliklerine etkisinin yayılma çapına bağı olarak gösterimi.

Reaktif aluminanın yüzey alanı büyüdükçe dökülebilir refrakterlerin akıcılığı artmaktadır. Yüzey alanının büyümesi ile tanelerin temas yüzeyi büyümekte ve taneler birbirleri üzerinde daha rahat hareket etmektedirler. Akıcılık özelliklerinin gelişmesi ile döküm sırasında harcın kalıp içerisinde daha rahat ve çabuk yerleştiği görülmüştür.

3.5.1.4 *q* değerinin akıcılık özelliklerine etkisi; D grubu numuneleri

Bu bölümde *q* değerinin akıcılık özelliklerini ne yönde değiştirdiği çalışılmıştır. Bölüm 3.1.4' de belirlenen karışım oranları esas alınarak hazırlanan harçlar $>20^{\circ}\text{C}$ ortam sıcaklığında koni içerisine dökülmüş, sonrasında 10d bekleme sonunda yayılma çapları kaydedilmiştir. Sonuçlar yayılmanın *q* değerine bağlı olarak değişimi şeklinde grafiksel olarak Şekil 3.21' de ifade edilmiştir.

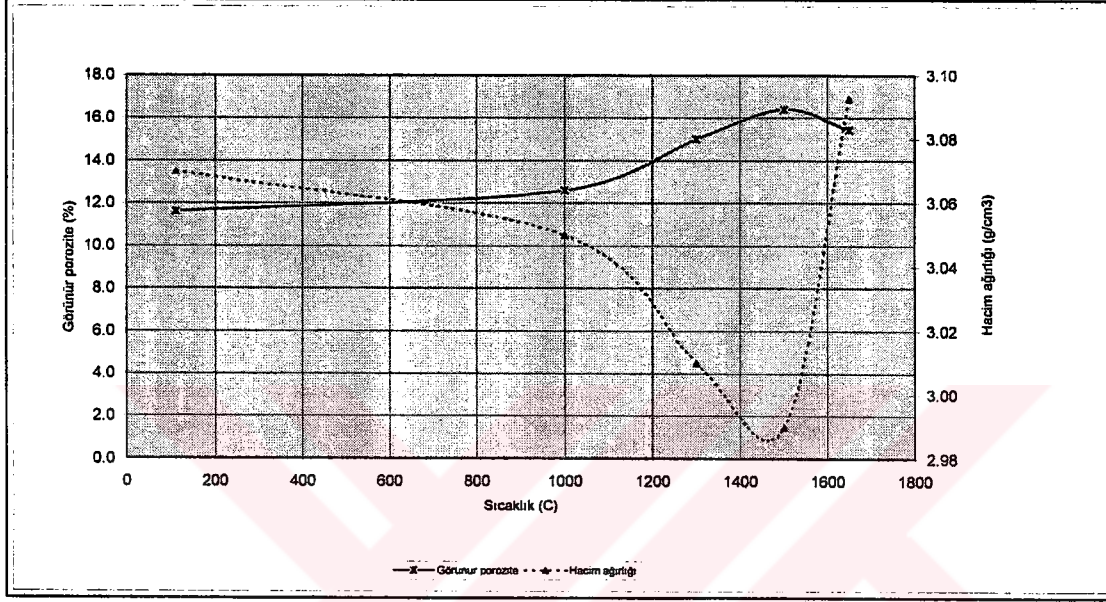


Şekil 3.21 Yayılma çapının *q* değerine bağlı olarak değişimi.

Şekil 3.21' de görüldüğü gibi artan *q*-değerine bağlı olarak harcın 10d bekleme süresi sonunda akıcılığının düştüğü görülmüştür. *q*-değeri kavramı Bölüm 2.3.1' de anlatılmıştır. *q*-değeri arttıkça karışımın iri tane oranı artmaktadır. *q*-değerinin azalması ile birlikte ince tane oranının artması harcın akıcılık özelliklerinin gelişmesini sağlamaktadır. Harcın ince tane oranı arttıkça, taneler arası çekme potansiyeli artmaktadır. Plastikliği artan harç döküm sırasında kalıba şarj edilen harç, kendi ağırlığı ile kalıp içerisinde yayılarak herhangi bir dış kaynaklı mekanik etkiye gerek duymadan rahatlıkla kalıbın tüm şeklini alır. $q < 0.27$ olan karışımlar, kendi kendine akış olarak tarif edilen bu akış özelliklerini göstermekle birlikte, *q* değeri arttıkça ($q > 0.27$) iri tane oranı arttığından, tanelerin birbiri üzerindeki hareketleri sınırlanmakta, taneler arasındaki sürtünme arttığından viskozite yükselmektedir.

3.5.1.5 Mikrosilikanın akıcılık özelliklerine etkisi; E grubu numuneleri

Mikrosilikanın akıcılık özelliklerine etkisini görebilmek amacıyla, SFC1' in karışım oranları tekrar düzenlenerek, artan mikrosilika (% ağırlıkça) oranının akıcılık üzerindeki etkisi incelenmek istenmiştir. Akıcılık özellikleri yayılma çapı ile ifade edilmiş olup, 10d bekleme sonunda yayılma miktarları Şekil 3.22' de verilmiş olan grafiğe dökülmüştür.



Şekil 3.22 Yayılma çapının mikrosilika oranına bağlı olarak değişimi

Mikrosilikanın karışım içerisinde ağırlıkça yüzde oranının artmasıyla birlikte harç daha büyük çaplı yüzeylere yayılmıştır. %6' nın üzerinde mikrosilika ilavesi akıcılık özelliklerini ters yönde etkilemiştir. Ortalama 0.1-0.3 mikron (sub-mikron) mertebesinde olan tane iriliği ile malzemesi içerisinde daha iri taneler arasını doldurmakta ve paketlenmeyi geliştirmektedir. %8 oranında mikrosilika ilavesi durumunda harcın yayılma çapı daralmaktadır. Mikrosilika gibi sub-mikron taneli elemanların çok fazla miktarlarda ilavesi ile harcın yoğunlaşması ve plastikleşmesi sistemin flokülasyon özelliği arttırdığından serbest akış özellikleri zayıflamakta ve ancak titreşim gibi mekanik etkiler ile harç uygun kıvama ulaşmaktadır.

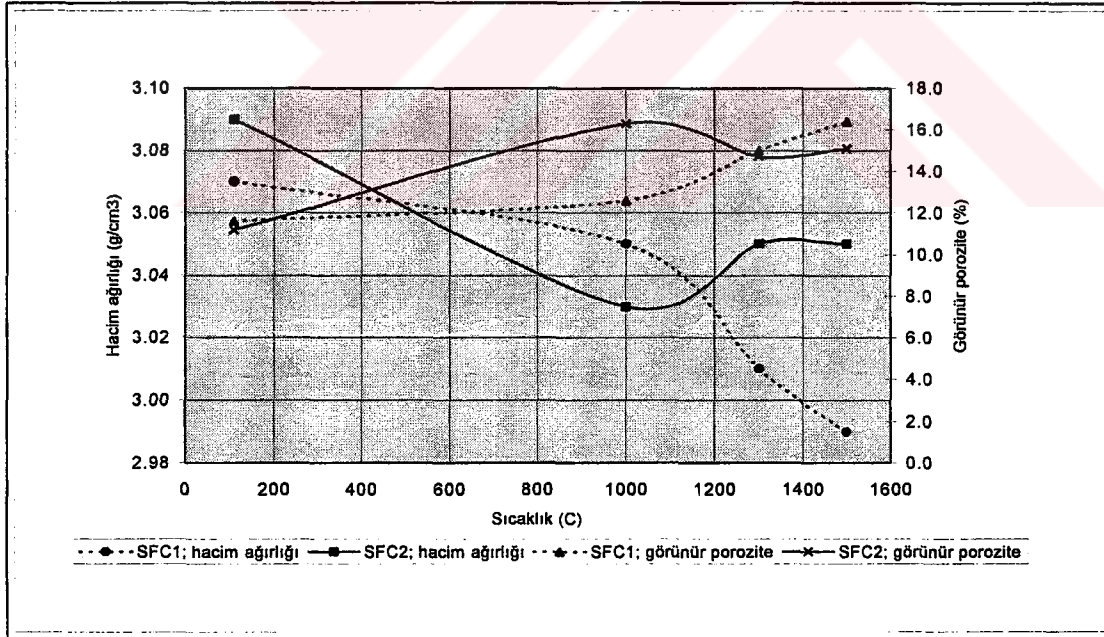
3.5.2 Hacim ağırlığı ve porozite

3.5.2.1 Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterin hacim ağırlığı ve porozite deneyi sonuçları; A grubu numuneleri

SFC1 karışımı ile hazırlanmış numuneler 110°C' de kurutma sonrası, 1000°C, 1300°C, 1500°C' lerde pişirildikten sonra hacim ağırlığı ve porozite ölçümü yapılmıştır. Alınan sonuçlar Tablo 3.17' de verilmiştir.

Tablo 3.17 SFC1 numunelerinin test sonucu elde edilen hacim ağırlığı ve porozite değerleri

Sıcaklık (°C)/ Bekleme süresi (s)	Hacim ağırlığı (g/cm ³)	Görünür porozite (%)
110°C/18s	3.07	11.6
1000°C/5s	3.05	12.6
1300°C/5s	3.01	15.0
1500°C/5s	2.99	16.4
1650°C/5s	3.09	15.4



Şekil 3.23 SFC1 karışımı ile hazırlanan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak hacim ağırlığı ve porozite değerlerinin değişimi

Hacim ağırlığı ve porozite değerleri Şekil 3.23' de grafik yöntemle gösterilmiştir. Dökülebilir refrakterler, 110°C' de kurutulduğunda bünyesinde oluşan porozitenin nedeni olarak karıştırma sırasında ilave edilen ve çimento ile reaksiyona girmeyen

fiziksel olarak bağlı olan sudur. 1000°C' de pişirilmiş numunenin porozitesi artmakta ve buna paralel olarak hacim ağırlığı düşmektedir. Çimento ile reaksiyona giren su, hidrat fazlarını oluşturmaktadır. Su bu bölümde kimyasal olarak bağlıdır. 1000°C civarında hidratlar parçalanarak kalsiyum aluminat fazlarına dönüşmekte, öte yandan kimyasal olarak bağlanmış olan sistemi terketmektedir. Bunun sonucu olarak porozite miktarı artmış, hacim ağırlığı azalmıştır. 1500°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda porozite sinterleşmenin etkisi ile azalma eğilimine girmektedir. Bu safhada bünye içerisindeki serbest suyun tümü sistemden uzaklaşmakta, tane büyümesi ile birlikte görünür porozite miktarı azalmaktadır.

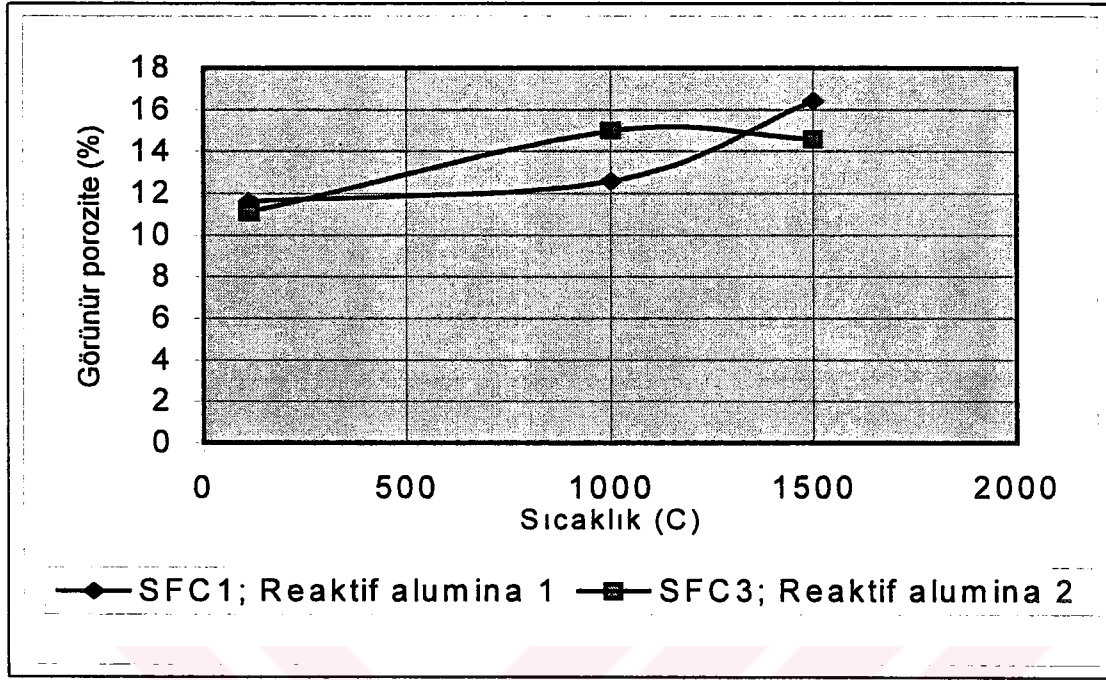
800-1000°C sıcaklıklara kadar mevcut olan hidrolik bağ, sonraki sıcaklıklarda yerini seramik bağa bırakmaktadır. Hidrolik bağın oluşumu ve yapısı çimento tipi ve miktarına bağlı olarak gelişen bir mekanizmadır. 1000°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda seramik bağ oluşumu ile sinterlenme mekanizması etkili olur. Bu safhada reaktif alumina tipi ve miktarı bu tür malzemelerin yüksek sıcaklıktaki performanslarını doğrudan etkilemektedir.

3.5.2.2 Tane şekline bağlı olarak hacim ağırlığı ve görünür porozite miktarının değişimi; B grubu numuneleri

Bu bölümde SFC1 karışımında köşeli morfolojiye sahip –45 mikron ebadındaki tabular alumina tanelerinin yerine SFC2 karışımında küresel taneli kalsine alumina kullanımının hacim ağırlığı ve porozite miktarı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler Tablo 3.18' de verilmiştir.

Tablo 3.18 SFC2 numunelerinin test sonucu elde edilen hacim ağırlığı ve porozite değerleri

Sıcaklık (°C)/ Bekleme süresi (s)	Hacim ağırlığı (g/cm³)	Görünür porozite (%)
110°C/18s	3.09	11.2
1000°C/5s	3.03	16.3
1300°C/5s	3.05	14.7
1500°C/5s	3.05	15.1



Şekil 3.24 Tane şeklinin hacim ağırlığı ve porozite değişimine etkisi

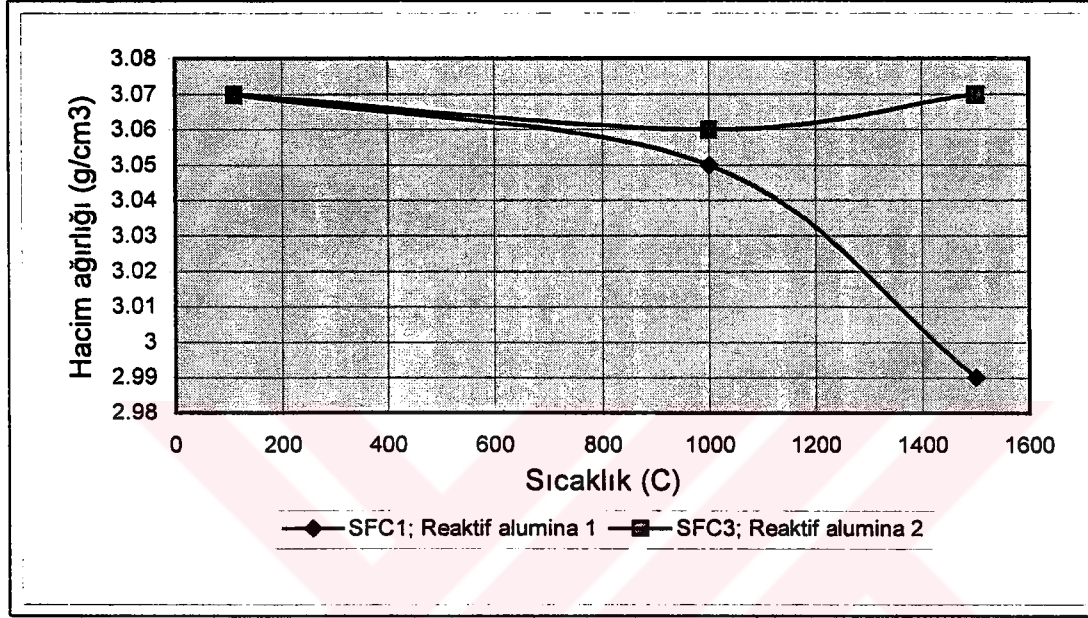
Şekil 3.24' de görüldüğü üzere küresel bir tane morfolojisine sahip ve mikron boyutunda olan taneler ile hazırlanmış olan SFC2 numunesi ile 1500°C' de elde edilen görünür porozite değerleri daha düşüktür. Şekil 5.6' da 1500°C' den sonra SFC1 numunesinin porozitesinin yükseldiği görülmüş ve sinterleşme mekanizmasının bir sonucu olarak açıklanmıştı. SFC2 numunesi için sinterleşme ve bunu izleyen tane büyümesi sonucu görünür porozitenin azalması 1300°C' den izlenmektedir. Küresel şekilli tanelerden oluşan kalsine alumina ihtiva eden SFC2 karışımında paketlenmenin artması ile yüksek sıcaklıklarda sinterlenmiş malzemelerin poroziteleri düşmektedir.

3.5.2.3 *Reaktif alumina tipine bağlı olarak hacim ağırlığı ve görünür porozite miktarının değişimi; C grubu numuneleri*

Hacim ağırlığı ve porozitenin reaktif alumina tipine bağlı olarak değişimi, iki farklı reaktif aluminanın karışım içindeki oranları aynı kalmak şartıyla birebir değiştirilmesi suretiyle karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Tablo 3.19' da kaydedilen SFC3 numunesine ait sonuçlar ayrıca Şekil 3.23 ve Tablo 3.17' de SFC1 numunelerine ait hacim ağırlığı ve porozite değerleriyle karşılaştırmalı olarak grafik yöntemle gösterilmiştir.

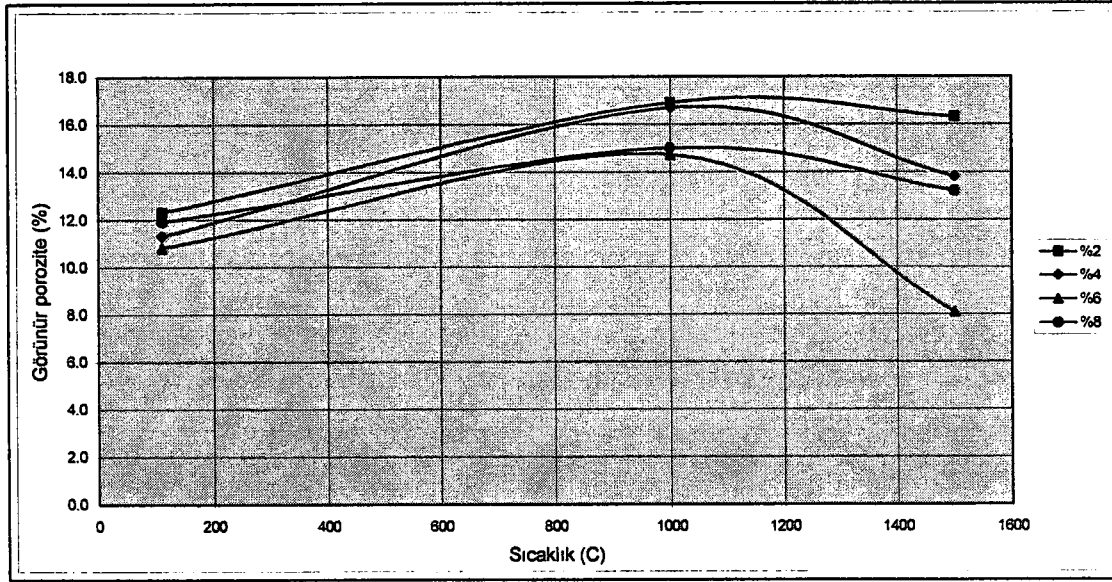
Tablo 3.19 SFC3 numunesinin test sonucu elde edilen hacim ağırlığı ve görünür porozite değerleri

Sıcaklık (°C)/ Bekleme süresi (s)	Hacim ağırlığı (g/cm ³)	Görünür porozite (%)
110°C/18s	3.07	11.1
1000°C/5s	3.06	15.0
1500°C/5s	3.07	14.6



Şekil 3.25 Reaktif alumina tipine bağlı olarak görünür porozitenin (%) değişimi

Reaktif alumina 1' in spesifik yüzey alanı reaktif alumina 4' den yüksektir. Bu durum reaktif alumina 1' in daha ince taneli bir reaktif alumina olduğunu tanımlamaktadır. Reaktif alumina 1' in ince taneli yapısının tanelerarası boşlukları doldurarak, paketlenme yönünde daha etkili olması beklenebilir. Fakat SFC1 numuneleri %5.5 (ağırlıkça) su ile dökülmüşken, SFC3 numuneleri %5.3 su ile hazırlanmıştır. Görünür porozite miktarı su oranına bağlı olarak doğrudan değiştiğinden, bünyesinde daha fazla serbest su içeren SFC1 numunesinin 1500°C' deki görünür porozite değerleri düşüktür.



Şekil 3.26 Reaktif alumina tipine bağlı olarak hacim ağırlığının değişimi

1500°C' de SFC3' ün düşen görünür porozite değerlerine paralel olarak Şekil 3.26' da görüldüğü gibi hacim ağırlığı değerleri düşmektedir.

3.5.2.4 *q değerine bağlı olarak hacim ağırlığı ve görünür porozitenin değişimi; D grubu numuneleri*

q değerine bağlı olarak hacim ağırlığı ve görünür porozitenin değişimi çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara Tablo 3.20 ve 3.21' de verilmiştir.

Tablo 3.20 q değerine bağlı olarak hacim ağırlığının değişimi

q değeri	Sıcaklık (°C) / Bekleme süresi (s)		
	110°C/18s	1000°C/5s	1500°C/5s
0.20	3.08	3.04	3.05
0.23	3.06	3.03	3.04
0.24	3.09	3.06	3.06
0.25	3.07	3.05	3.06
0.28	3.09	3.05	3.05
0.33	3.07	3.06	3.05

Tablo 3.21 q değerine bağlı olarak görünür porozite miktarının değişimi

q değeri	Sıcaklık (°C) / Bekleme süresi (s)		
	110°C/18s	1000°C/5s	1500°C/5s
0.20	12.1	16.0	14.1
0.23	11.6	16.0	14.5
0.24	10.8	15.2	14.3
0.25	12.3	17.5	15.0
0.28	12.5	17.1	14.8
0.33	12.1	18.2	15.1

Numunelerin birbirine çok yakın karışım oranlarıyla hazırlanmış olmaları ve eşit su oranlarıyla dökülmüş olmaları nedeniyle q değerine bağlı olarak hacim ağırlığının ve görünür porozitenin değişimi net olarak izlenemedi. Ancak görünür porozite değerleri incelendiğinde 110°C/18s kurutma sonrası q=0.24 karışımı ile en düşük porozite değerleri elde edilmiştir. Öte yandan 1500°C/5s pişirme sonrası görünür porozite değerleri artan q değerine bağlı olarak genel bir artış eğiliminde görülmektedirler. Bu sonuçlara bağlı olarak q=0.20 ile 0.24 arasında karışımların daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

3.5.2.5 Mikrosilikanın hacim ağırlığı ve görünür porozite değişimine etkisi; E grubu numuneleri

Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterlere mikrosilika ilavesinin hacim ağırlığı ve görünür porozite değerlerini ne yönde değiştirdiği test edilmiştir. Artan mikrosilika oranına bağlı olarak tespit edilen görünür porozite ve hacim ağırlığı değerleri Tablo 3.22 ve 3.23' de verilmektedir.

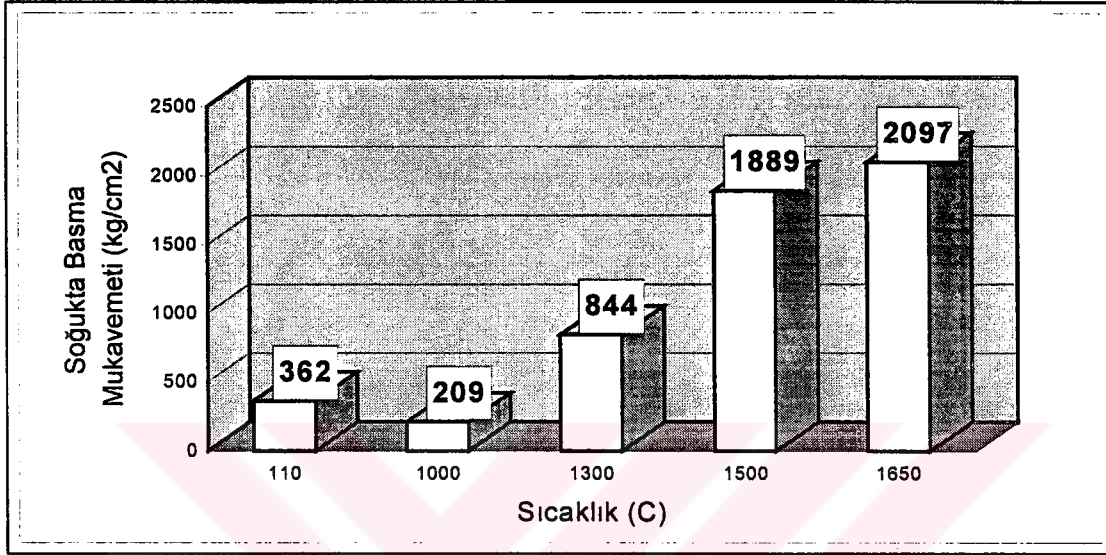
Tablo 3.22 Mikrosilika oranına bağlı olarak hacim ağırlığının değişimi

Sıcaklık (°C)/ Bekleme süresi (s)	Mikrosilika oranı (% ağırlıkça)			
	%2	%4	%6	%8
110°C/18s	3.04	3.03	3.03	2.99
1000°C/5s	2.98	3.00	2.99	2.97
1500°C/5s	3.09	3.13	3.14	2.93

Tablo 3.23 Mikrosilika oranına bağlı olarak görünür porozite miktarının değişimi

Sıcaklık (°C)/ Bekleme süresi (s)	Mikrosilika oranı (% ağırlıkça)			
	%2	%4	%6	%8
110°C/18s	12.3	11.3	10.8	11.9
1000°C/5s	16.9	16.7	14.7	15.0
1500°C/5s	16.3	13.8	8.1	13.2

Tablo 3.22 ve 3.23' de görüldüğü gibi mikrosilika oranı arttıkça görünür porozite değerleri genel olarak düşmektedir. Bu durum mikrosilikanın tanelerarasındaki boşlukları doldurması ve paketlenmeyi artırmasının bir sonucu olarak açıklanabilir. Görünür porozite değerlerine paralel olarak gelişen hacim ağırlığı artan mikrosilika oranına bağlı olarak artmaktadır. Şekil 3.27' de artan mikrosilika oranına bağlı olarak görünür porozitenin değişimi görülmektedir.

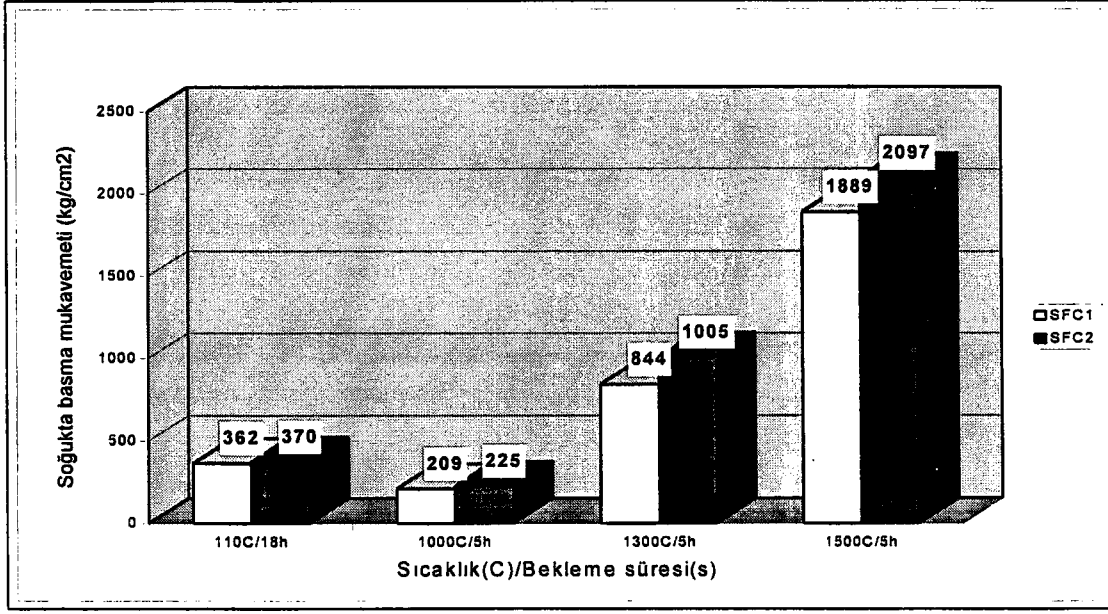


Şekil 3.27 Mikrosilika oranına (%Ağırlık) bağlı olarak görünür porozitenin değişimi

3.5.3 SOĞUKTA BASMA MUKAVEMETİ

3.5.3.1 Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterin soğukta basma mukavemeti değerleri; A grubu numuneleri

Kendi kendine dökülebilir refrakterin reolojik özelliklerine baz teşkil eden SFC1 karışımı ile hazırlanan numuneler 110°C' de 18s süreyle kurutulduktan sonra sırasıyla 1000,1300,1500,1650°C' lerde 5s pişirilerek soğukta basma mukavemeti değerlerinin tespiti için test presinde oda sıcaklığında kırılmışlardır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.28' de verilmiştir.



Şekil 3.28 SFC1 numunelerinin soğukta basma mukavemeti değerleri

Şekil 3.28' de görüldüğü gibi artan sıcaklıkla birlikte soğukta basma mukavemeti değerleri de artmaktadır. 1000°C' de meydana gelen düşüş bu sıcaklıkta hidratların parçalanması nedeniyle meydana gelen faz dönüşümleridir. 800-1000°C' ye kadar hidrolik bağın etkin olduğu sistemde, bu sıcaklıklardan sonra hidrolik bağ yerini seramik bağa bırakmaktadır. Sinterlenme reaksiyonları ile birlikte, sinterleşmeyi kuvvetlendiren en önemli parametre olan pişirme sıcaklığı arttıkça, malzemenin basma gerilmelerine karşı dayanımı da artmaktadır.

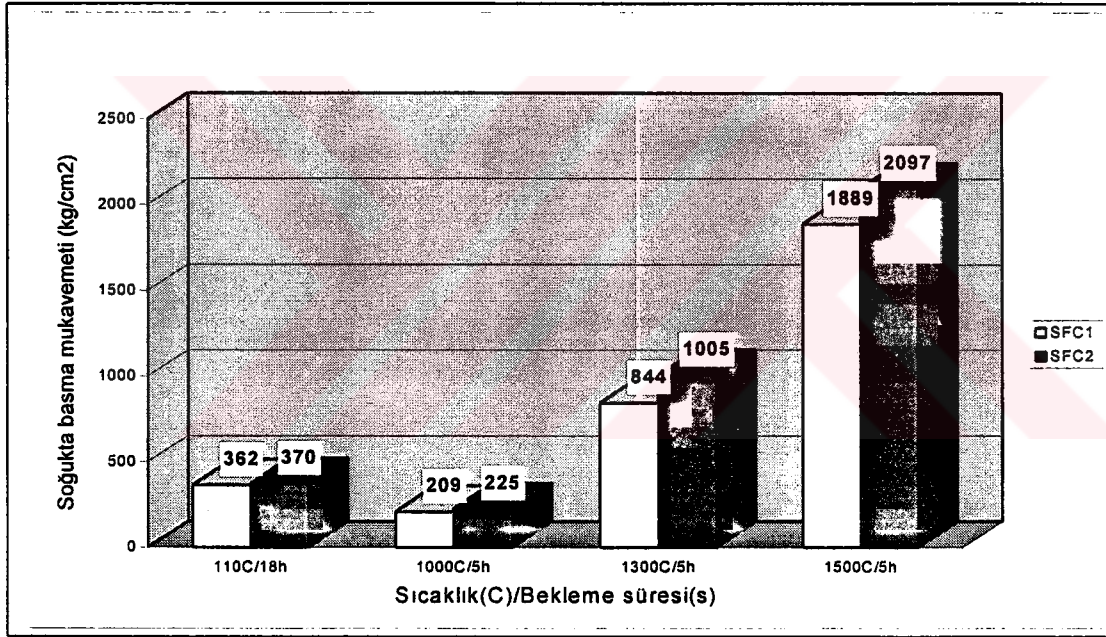
3.5.3.2 *Tane şeklinin soğukta basma mukavemetine etkisi; B grubu numuneleri*

Tane şeklinin soğukta basma mukavemetine etkisini incelemek amacıyla SFC2 karışımı ile hazırlanan numuneler 110°C' de 18s saat kurutulduktan sonra sırasıyla 1000, 1300, 1500°C' de 5s pişirilmiştir. Pişirme sonrası oda sıcaklığında kırılarak elde edilen soğukta basma mukavemeti değerleri Tablo 3.24' de görülmektedir.

Tablo 3.24 SFC2 numunelerinin test sonucu elde edilen soğukta basma mukavemeti değerleri

Sıcaklık (°C) / Bekleme süresi (s)	Soğukta basma mukavemeti (kg/cm ²)
110°C/18s	370
1000°C/5s	225
1300°C/5s	1005
1500°C/5s	2097

Soğukta basma mukavemeti değerleri artan sıcaklıkla artmaktadır. SFC2 ile elde edilen değerler, kendi kendine dökülebilir refrakterlere baz teşkil eden SFC1' in soğukta basma mukavemeti değerleriyle kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Böylece tane şeklinin akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterin mukavemet değerlerini ne yönde etkilediği üzerinde çalışılmıştır. Karşılaştırmalı değerlendirme Şekil 3.29' de görülmektedir.



Şekil 3.29 Tane şeklinin soğukta basma mukavemetine etkisi

Küresel morfolojiye sahip –45 mikron mertebesindeki tanelerin kullanımı ile hazırlanan numuneler ile elde edilen soğukta basma mukavemeti değerlerinin, köşeli taneli –45 mikron ebadındaki tabular alumina ile hazırlanan numuneler ile tespit edilen değerlere oranla daha yüksek olduğu Şekil 6.2' de görülmektedir.

Küresel şekilli kalsine alumina kullanımı ile karışımın artan akıcılığı ve tanelerin kalıp içerisinde homojen yerleşimi sayesinde porozite düşmekte, soğukta basma mukavemeti değerleri artmaktadır.

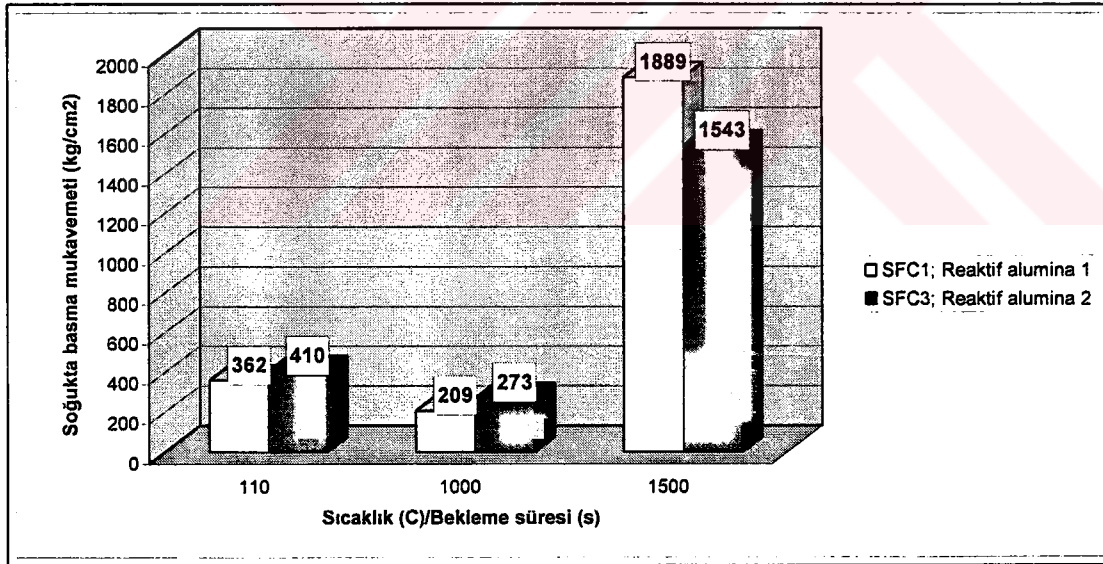
3.5.3.3 *Reaktif alumina tipinin soğukta basma mukavemeti değerlerine etkisi; C grubu numuneleri*

Reaktif alumina 1 ve reaktif alumina 2 malzemeleri karışım oranları aynı kalmak suretiyle birebir değiştirilerek hazırlanan SFC3 numunesinin soğukta basma mukavemeti değerleri Tablo 3.25' de verilmiştir.

Tablo 3.25 SFC3 numunesinin test sonucu elde edilen soğukta basma mukavemeti değerleri

Sıcaklık (°C) / Bekleme süresi (s)	Soğukta basma mukavemeti (kg/cm ²)
110°C/18s	410
1000°C/5s	273
1500°C/5s	1543

Artan sıcaklığa bağlı olarak soğukta basma mukavemeti değerleri de artmaktadır. Reaktif alumina tipinin soğukta basma mukavemetine olan etkisini görebilmek amacıyla, spesifik yüzey alanı daha büyük ve daha ince taneli olan reaktif alumina 1 ile hazırlanan SFC1 numunesinin mukavemet değerleri ile kıyaslama yapılmıştır. Değerlendirme sonucu Şekil 3.30' da grafik yöntemle anlatılmıştır.



Şekil 3.30 Reaktif alumina tipinin soğukta basma mukavemetine etkisi

SFC1 numuneleri ile elde edilen soğukta basma mukavemeti değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Daha geniş spesifik yüzey alanına sahip olan reaktif alumina 1 ile hazırlanmış numunelerin sinterlenme sonrasının basma gerilmelerine karşı dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

3.5.3.4 *q değerinin soğukta basma mukavemetine etkisi; D grubu numuneleri*

q değerine bağlı olarak soğukta basma mukavemetinin değişimi çalışılmıştır. Buna göre elde edilen veriler Tablo 3.26' da verilmektedir.

Tablo 3.26 q değerine bağlı olarak soğukta basma mukavemetinin değişimi

	q=0.20	q=0.23	q=0.24	q=0.25	q=0.28	q=0.33*
110°C/18s	514	257	362	245	305	402
1000°C/5s	281	250	249	306	273	281
1500°C/5h	3735	3735	3821	3202	3415	1793

*: kısa süreli titreşim uygulanmıştır.

Tablodan görüldüğü gibi 1500°C' de en yüksek değer q=0.24 numuneleri ile elde edilmiştir. q=0.24 değerine kadar yüksek seyreden mukavemet değerleri, daha sonraki karışımlarda genel olarak bir düşüş göstermiştir. 110 ve 1000°C' deki değerler düşük kalmaktadır.

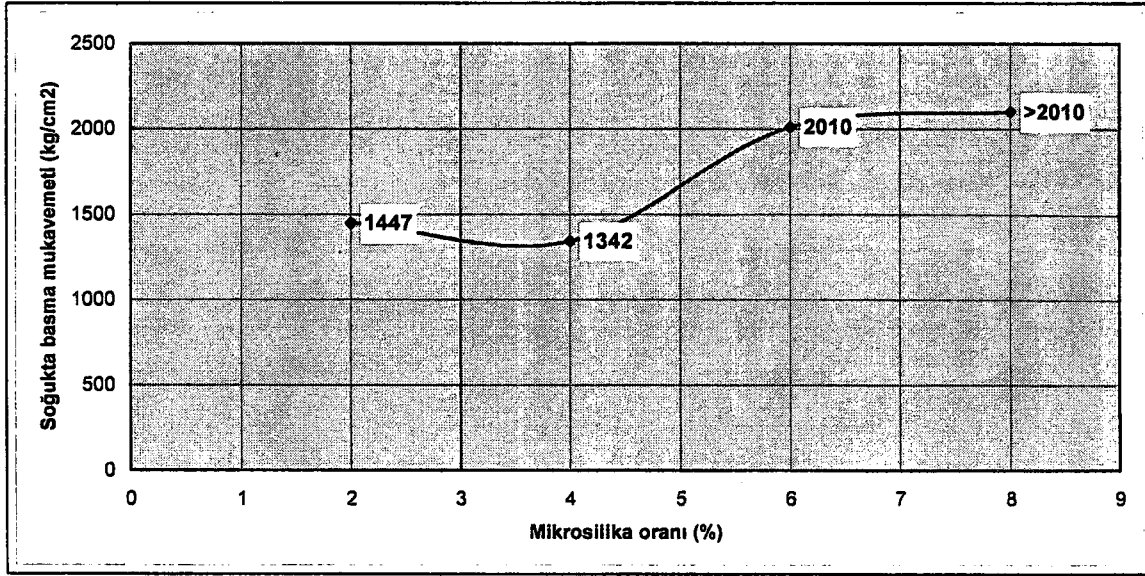
3.5.3.5 *Mikrosilikanın soğukta basma mukavemetine etkisi; E grubu numuneleri*

Mikrosilika ilavesinin soğukta basma mukavemetine etkisini incelemek amacıyla, çeşitli oranlarda karışıma mikrosilika ilave edilerek numuneler dökülmüştür. Daha sonra 110°C' de 18s kurutulan numuneler çeşitli sıcaklıklarda pişirilerek, soğukta basma mukavemeti testi yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 3.27' de görülmektedir.

Tablo 3.27 Mikrosilika ilavesinin soğukta basma mukavemetine etkisi

	Mikrosilika oranı (% ağırlıkça)			
	%2	%4	%6	%8
110°C/18s	410	434	1013	989
1000°C/5h	1109	1407	1624	1527
1500°C/5h	1447	1342	2010	>2010

Mikrosilika oranı arttıkça tüm mukavemetlerde genel olarak bir artış gözlenmektedir. Mikrosilika çok ince taneli yapısı sayesinde taneler arası boşlukları doldurarak poroziteyi azalttığı gibi, ortaya çıkan yoğun yapının basma gerilmelerine karşı dayanımı da yüksek olmaktadır. Şekil 3.31' de 1500°C sıcaklıkta sinterlenmiş numunelerin mikrosilika oranına bağlı olarak saptanmış soğukta basma mukavemeti değerleri verilmiştir.



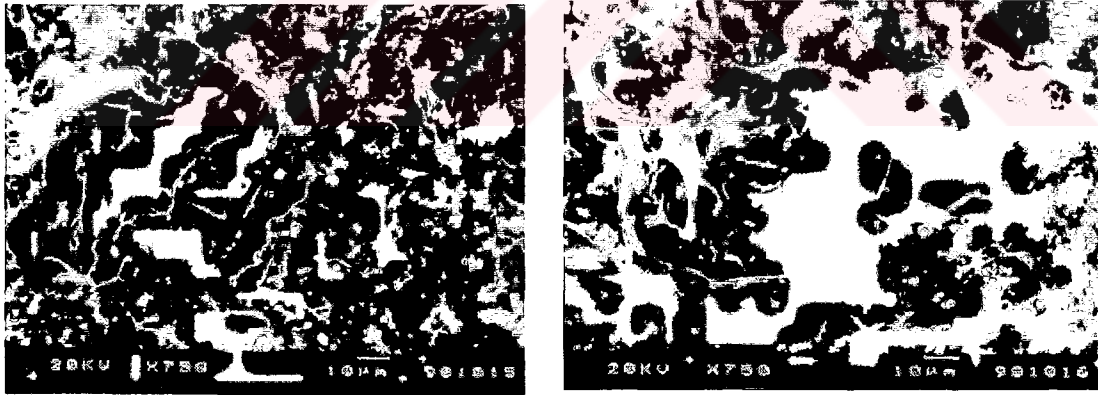
Şekil 3.31 Mikrosilika oranına bağlı olarak 1500°C' de soğukta basma mukavemetinin değişimi

3.5.4 Mikroyapı incelemeleri

SFC1 ve $q=0.33$ karışımları ile hazırlanan numelerin kırılma yüzeyleri SEM' de incelenmiştir. Bunun için iki karışımdan alınan kırık parçalar vakum altında karbonla kaplanmıştır. SEM ile elde edilen görüntüler Şekil 3.32 ve Şekil 3.33' de görülmektedir.



Şekil 3.32 SFC1 numunesinin SEM' deki kırık yüzey görüntüsü



Şekil 3.33 $q=0.33$ numunesinin SEM' deki kırık yüzey görüntüsü

Şekiller incelendiğinde malzemelerin intergranüler yani tane sınırlarından kırılma gösterdiği görülmüştür. Ayrıca $q=0.33$ numunesine kıyasla ince tane oranı daha yüksek olan SFC1 numunesinde sinterlenme mekanizmasının daha etkin olarak gerçekleştiği görülmektedir. Tane büyümesi ile birlikte tane sınırları rahatlıkla Şekil 3.32' de ayırt edilebilmektedir. Öte yandan yapı içerisinde $20\mu\text{m}$ ' e kadar kapalı gözenekler görülmektedir.

BÖLÜM 4

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Akıcılık özellikleri geliştirilmiş dökülebilir refrakterin test sonuçlarının değerlendirilmesi

SFC1 numunesi ile yapılan testler sonucu kendi kendine akan refrakterlerin (self flowing castables) reolojik özelliklerinin yanısıra bazı termal ve fiziksel nitelikleri araştırılmıştır.

Bu tür dökülebilir refrakterlerin akıcılık özelliklerinin titreşim altında dökülebilir refrakterlere kıyasla daha gelişmiş olduğu görülmüştür. Hazırlanan harçların kendi ağırlığı ile kalıp içinde yayılmasının, taneler arasındaki etkileşimler sayesinde ortaya çıkan plastik kıvamın bir sonucu olduğu görülmüştür. Bu tür harçların –63 mikron ebadındaki tanelerinin kendi içindeki dağılımı ve miktarı en önemli parametrelerden birisi olarak gözükmektedir. Titreşim altında dökülebilir refrakterlerde aynı boyuttaki tane oranının neredeyse 1.5-2 katı olan mikron mertebesindeki taneler harcın viskozitesi ve kalıp içerisindeki hareketi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Titreşim altında dökülebilir refrakterlere oranla daha yüksek su oranlarıyla istenen kıvama ulaşabilmelerine rağmen, test edilen porozite ve hacim ağırlığı değerleri titreşim uygulanmış malzeme ile genelde aynı seviyededir. Malzemenin ince tane oranının yüksekliği tanelerin birbiri üzerindeki hareketini kolaylaştırmakta, taneler arası sürtünmeyi azalttığı tahmin edilmektedir. Böylece artan paketlenme ile porozite ve hacim ağırlığı değerleri istenen seviyelerde elde edilmektedir.

İnce tane oranının büyük bir bölümünü oluşturan reaktif alumina işlem sıcaklıklarında soğukta basma mukavemetini oldukça üst seviyelere çıkartmaktadır. Reaktif aluminanın büyük spesifik yüzey alanı sayesinde sinterleşmeyi arttırması soğukta basma mukavemetini doğrudan etkilemektedir. Yüksek sıcaklıklarda

sinterlenen numunelerin yapılan soğukta basma mukavemeti testlerinde titreşim altında dökülen refrakterlere kıyasla çok daha yüksek değerlere ulaşılmaktadır.

Yapılan mikroyapı incelemesinde sinterlenme sırasında meydana gelen tane büyümesi açıkça görülmüştür.

4.2 Tane şeklinin etkisi

Yapılan testlerde küresel morfolojiye sahip taneler ile incelenen reolojik ve fiziksel özelliklerin olumlu yönde değiştiği görülmüştür.

Küresel morfoloji sayesinde harcın akıcılığını arttırmakta, bu sayede porozite düşmekte ve hacim ağırlığı artmaktadır. Bu durum soğukta basma mukavemeti değerlerinin de yükselmesine sebep olmaktadır.

4.3 Reaktif alumina tipinin etkisi

Kullanılan reaktif aluminanın spesifik yüzey alanı arttıkça akıcılık özellikleri de gelişmektedir. Ayrıca reaktif alumina tanelerinin temas yüzeyi arttıkça sinterleşme daha etkin bir şekilde gerçekleşmektedir. Artan yüzey alanına bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda seramik bağ yapısının gelişimi hızlandığından soğukta basma mukavemeti değerleri de artmaktadır.

4.4 q değerinin etkisi

Akıcılık özellikleri yönünden irdelendiğinde q değeri arttıkça akıcılık düşmektedir. Artan q değeri iri tane oranının artması ince tane oranının azalmasını tanımlamaktadır. İri taneli bir yapıda tanelerarası sürtünme arttığından viskozite artmaktadır. Böyle bir harcın su oranını arttırmanın da akıcılık üzerinde etkili olmayacağı görülmüştür; çünkü iri taneli yapıda su oranının artması ile plastiklik düşmekte taneler arası etkileşim düşmektedir. Bu durumda suyun içerisinde birbirinden bağımsız hareket eden tane kümeleri oluşmaktadır. Öte yandan su oranının yükselmesi ile diğer ürün özellikleri de olumsuz etkilenmektedir.

Yapılan testler sonucunda $q=0.20$ ile 0.24 arasında kendi kendine dökülebilir refrakter özelliklerinin optimum seviyede olduğu görülmüştür.

4.5 Mikrosilikanın etkisi

Mikrosilika ilavesi ile tasarlanan E grubu numunelerinin dispersan sistemi farklıdır. Diğer dispersan sistemi ile mikrosilika ilavesinin akıcılık özelliklerini bozduğu görülmüştür. Bu nedenle dispersan sistemi modifiye edilmiştir.

Mikrosilika tanelerarası boşlukları doldurarak dökülebilir refrakterin yoğunluğunu arttırmaktadır. Diğer numune gruplarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında porozite değerlerinin düştüğü saptanmıştır. Aynı zamanda dökülebilir refrakterlerde faz dönüşümleri nedeniyle 1000°C seviyesinde meydana gelen mukavemet düşüşü, mikrosilika ilavesi ile giderilmektedir. Mikrosilika ilavesi ile su ihtiyacı da azalmaktadır.

Artan mikrosilika oranına bağlı olarak genelde akıcılık artmaktadır. Yüksek sıcaklıkta sinterlenmiş numunelerin soğukta basma mukavemeti değerleri artan mikrosilika oranına bağlı olarak yükselmektedir.

Yapılan çalışmaların ışığı altında kendi kendine akan dökülebilir refrakterlerin akıcılığı,

- küresel şekilli tanelerin kullanımı ile
- daha büyük spesifik yüzey alanına sahip reaktif alumina kullanımı ile
- azalan q değerine bağlı olarak

artmaktadır. Yapıda mikron mertebesindeki ince tane oranının artması ile sinterleşme mekanizmasının daha etkin bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. q değerine bağlı olarak yapılan değerlendirmede $q=0.24$ karışımının test edilen karışımlar içerisinde optimum sonuçlar verdiği saptanmıştır. Karışım içerisindeki mikrosilika oranı arttıkça yüksek sıcaklıkta sinterlenme sonrası elde edilen soğukta basma mukavemeti değerleri artmaktadır. Mikrosilika içermeyen karışımlara kıyasla porozite düşmektedir.

Tandış ve çelik potalarının monolitik örümü gibi uygulamalarda kendi kendine dökülebilir refrakter harçların işlem kolaylığı getireceği düşünülmektedir. Performans

bakımından titreşim altında dökülebilir refrakterlerden daha alt seviyede olmadıkları görülmüştür. Tane boyut dağılımları hassasiyetle incelenmeli, çok ince tanelerin kendi içindeki tane boyut dağılımları da homojen olmalıdır.



- [1] MYHRE, B. The Effect of Particle Size Distribution on Flow of Refractory Castables, Elkem Refractories, (1994)
- [2] ROUTSCHKA, G. Refractory Materials-Pocket Manual, Vulkan-Verlag Essen, 1997
- [3] MYHRE, B., SUNDE, K. Tabular Alumina Based Refractory Castables-Part 1, The fine art of Elkem Refractories, April (1992)
- [4] KRÖNER, W., SCHUMACHER, U. New Developments on Low- and Ultra-Low-Cement Castables, Aachen Proceedings, s12-18, (1988)
- [5] PETZOLD, A., ULBRICHT, J., Feuerbeton, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, p.275., 1994
- [6] BUGAJSKI, M., SCHWAIGER, R. Self Flowing Castables – A New Type of Unshaped Refractory Products, Veitsch-Radex Rundschau, p.44-52, 1/1996
- [7] KRÖNERT, W., SCHUMACHER, U., New Developments on Low and Ultra-low Cement Castables, Aachen Proceedings, p12-18, (1988)
- [8] HART, L.D., Production Processes, Properties, and Applications for Tabular Alumina Refractory Aggregates, Alumina Chemicals Science and Technology Handbookp., 109-170, (1990)
- [9] ROY, J.M., TINGLEY, L.R., High Performance Aluminas for Refractories, Interceram, Vol.43, No.4, p.236-239, (1994)
- [10] MYHRE, B., SANDBERG, B. Microsilica-A Versatile Refractory Raw Material, The fine art of Elkem Refractories, April (1994)
- [11] ÖZEN, İ., Magnezit-Karbon Refrakterlerde Granülasyon İncelemesi ve Antioksidan Katkısı, Y. Lisans Tezi, (Haziran 1998)
- [12] ZETA METER, Coagulation and Flocculation, p.1-36, (April 1993)
- [13] HUNTER, R. J., Introduction to Modern Colloid Science, (1993)
- [14] BANERJEE, S., Thermal and Corrosion Properties of Monolithic Refractories for Iron and Steel Applications, Key Engineering Materials, Vol.88, p.1-20, (1993)
- [15] SEN, Y., Self Flowing Castables, The American Ceramic Society Bulletin, Vol.74, No.9, p.117-118, (September 1995)

- [16] HEY, A., GREGORY, S.J., HUTCHESSON, G.S., PICKARD, D.M., TAYLOR, D.S., TOMLINSON, S.B., Applications of engineered castable systems to refractory linings in the steel industry, 39. International Colloquium on Refractories, p.104-107, (October 1996)
- [17] YAMAMOTO, A., NODA, K., SAKAMOTO, S., TERAUSHI, T., The Application of Self-Flow Castables for Tundishes, Taikabutsu Overseas, Vol.16, No.4, p.109., (Dec.1996).



ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Kocaeli' de doğmuştur. Liseyi İstanbul Kadıköy Anadolu Lisesi' nde bitirdikten sonra, 1992 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü' nden 1996 yılında mezun olmuştur. Lisans programı gereği yurtiçinde çeşitli fabrikalarda stajlara katılmıştır.

1997 Kış Döneminde İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü Üretim Programı' nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.

Halen İstanbul' da bulunan özel bir firmada Metalurji Mühendisi olarak çalışmaktadır.



Y. A. TUNALI
İSTANBUL
T. A. TUNALI
İSTANBUL