

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO KLİNKER FAZLARININ MİKRO
YAPISI VE ÖĞÜTME PARAMETRELERİ
ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ARAŞTIRILMASI**

Dişal GÜLLÜ

Şubat, 2006
İZMİR

ÇİMENTO KLİNKER FAZLARININ MİKRO YAPISI VE ÖĞÜTME PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ARAŞTIRILMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Anabilim Dalı

Dişal GÜLLÜ

Şubat, 2006

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

DİİYAL GÜLLÜ, tarafından **Yrd.Doç.Dr. UFUK MALAYOĞLU** ve **Doç.Dr. İ.AKIN ALTUN** yönetiminde hazırlanan “**ÇİMENTO KLİNKER FAZLARININ MİKRO YAPISI VE ÖĞÜTME PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ARAŞTIRILMASI**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Yrd.Doç.Dr. Ufuk MALAYOĞLU

Yönetici

.....
Doç.Dr. İ.Akın ALTUN

Jüri Üyesi

.....
Doç.Dr. Erol KAYA

Jüri Üyesi

.....
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmalarımda yaptığım araştırmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve görüşlerinden yararlandığım danışmanlarım, Sayın Yrd.Doç.Dr. Ufuk MALAYOĞLU ve Sayın Doç.Dr. İ. Akın ALTUN'a, projeyi şekillendirmemde bana yardımcı olan Sayın Doç.Dr. Erol KAYA ve Sayın Arş.Gör. Burak FELEKOĞLU'na, bu projede maddi olarak destek sağlayan Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'ne, numune temininde göstermiş oldukları kolaylıktan dolayı İzmir Çimentaş Çimento Fabrikası ve İzmir Batıçim Çimento Fabrikası'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bütün eğitim hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve yardımlarıyla birlikte maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Diyal GÜLLÜ

ÇİMENTO KLİNKER FAZLARININ MİKRO YAPISI VE ÖĞÜTME PARAMETRELERİ ARASINDAKİ İLİŞKİLERİN ARAŞTIRILMASI

ÖZ

Farklı üretim koşullarında üretilen endüstriyel klinkerlerin öğütülebilirlikleri (Bond İş Endeksleri) ve polarizan mikroskop ile belirlenen iç yapıları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu malzemelerin öğütülebilirlik endeksleri Bond Metodu ile belirlenmiştir. Porozite miktarı, dağılımı, silikat faz kristallerinin tane yapısı ve eş değer kristal çaplarının değişimi araştırılmıştır. Alit ve belit kristallerinin (silikat fazlarının) miktarından daha ziyade boyutlarının öğütmede önemli rol oynadığı saptanmıştır.

Anahtar sözcükler: Çimento klinkeri, iç yapı, öğütülebilirlik.

INVESTIGATING THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE MICROSTRUCTURES OF CEMENT CLINKER PHASES AND THEIR GRINDABILITIES

ABSTRACT

The relationship between microstructures of cement clinker phases and their grindability at different production conditions were investigated by polarized microscope. The grindability indexes of these cement clinker materials were determined by Bond Grindability Method. The change in total porosity and their distribution, granular structure of silicate phase crystals and their equivalent diameters were investigated. The result of this investigation showed that the size of crystals are more important than the alite and belite amount.

Keywords: Cement clinker, microstructure, grindability.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
--------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ – ÇİMENTONUN TANIMI.....	3
---	----------

2.1 Genel Bilgiler	3
--------------------------	---

2.2 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler.....	4
--	---

2.3 Bazı Çimento Türleri	5
--------------------------------	---

2.3.1 Portland Çimentosu Ve Katkılı Portland Çimentosu	5
--	---

2.3.1.1 Portland Çimento Klinkerinin Temel Yapısı	7
---	---

2.3.1.2 Hammadde Karışımının Hazırlanması.....	7
--	---

2.3.1.3 Farin Değirmeni	8
-------------------------------	---

2.3.1.4 Pişirme (Kalsinasyon)	8
-------------------------------------	---

2.3.1.4.1 Kil Minerallerinin Suyunun Uzaklaşması Ve Karbonatın	
--	--

Ayrışması	9
-----------------	---

2.3.1.4.2 Katı Hal Reaksiyonları	13
--	----

2.3.1.4.3 Klinker Eriyiğinin Oluşumu	14
--	----

2.3.1.5 Döner Fırın Kimyası.....	15
----------------------------------	----

2.3.1.6 Klinkerin Soğutulması.....	15
------------------------------------	----

2.3.1.7 Klinkerin Bileşimi	17
----------------------------------	----

2.3.1.8 Klinkerin Çimentoya Geçiş Aşaması.....	21
2.3.2 Yüksek Belit Çimentoları.....	22
2.3.2.1 Genel.....	22
2.3.2.2 Belit Çimentoları.....	23
2.3.2.3 Ybç/Abç Özellikleri.....	24
BÖLÜM ÜÇ – BOND ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK TESTİ.....	25
3.1 Bond İş Endeksinin Belirleme Yöntemleri	27
3.2 Bond İş Endeksinin Bilyalı Değirmen İle Belirlenmesi.....	28
3.3 Yöntemin Tanımlanması Ve Test Araçları	28
3.3.1 Test Uygulaması.....	29
3.3.2 Deneysel Çalışmalar	29
BÖLÜM DÖRT – KLİNKER FAZLARININ OPTİK MİKROSKOP VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANARAK İNCELENMESİ.....	30
4.1 Deneysel Çalışma, Yöntem ve Bulgular	37
4.1.1 Klinker Özellikleri	37
4.1.2 Klinker Parlak Kesitinin Hazırlanması İşlemi Ve Optik Mikroskop İnceleme Yöntemi	38
4.2 Optik Mikroskop İncelemelerinde Kullanılan Görüntü İşleme Yöntemi.....	42
4.2.1 Fazların Ve Porozitenin Renk Dağılımının Belirlenmesi.....	42
4.2.2 Porozite Dağılımı İle İlgili İncelemeler.....	43
4.2.3 Klinkerlerdeki Porozite Ve Fazların Eşdeğer Tane Boyutları.....	48
BÖLÜM BEŞ – SONUÇLAR	54
KAYNAKLAR	56
EKLER.....	59

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Çimento üretimi, enerji kullanımının yoğun olduğu bir proses olup, bir ton çimentoyu üretmek için gerekli olan enerjinin yaklaşık üçte biri klinker ve katkı maddelerinin öğütülmesinde kullanılır.... Hammadde hazırlama amacıyla yapılan boyut küçültme işlemlerinde harcanan enerji de hesaba katıldığında, boyut küçültme işlemlerinde harcanan enerji, üretimde harcanan toplam enerjinin yarısından daha fazla seviyelerindedir (Ergin ve Gür, 2001, s. 146).

Çimento endüstrisi, dünya enerjisinin yaklaşık % 3,5'unu kullanan en büyük endüstrilerden birisidir. Çimento endüstrilerinde, üretim prosesinde harcanan toplam enerjinin % 40'ı öğütmede harcanmaktadır (Deniz, Erkan ve Alyıldız, 2001, s.272).

Çimento üretiminde öğütülebilirlik iki önemli faktörden dolayı önemlidir. Birincisi; çimentonun özellikleri kimyasal ve mineralojik bileşiminden başka çimentonun inceliğine ve tane boyutu dağılımına bağlıdır. İkincisi; çimentonun maliyetinde enerji harcamasının 1/3'ü öğütmede sarf edilmektedir. Sert klinkerin öğütülmesinde yumuşak klinkere göre % 80 daha fazla enerji harcanabilir. Dünyada üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık % 2'sinin öğütme proseslerinde gerçekleşmesi ve klinkerin öğütülebilirliği üzerine çeşitli araştırmaların son yıllarda devamlı artması öğütmenin önemini göstermektedir (Altun ve Ölmez, 2001).

Klinkerin öğütülmesi yalnız mekanik bir olay olarak irdelenemez, aynı zamanda klinkerin yüzeyinde önemli rol oynayan kompleks fiziko-kimyasal bir davranış söz konusudur. Genel olarak klinkerin öğütülebilirliği Silikat Modülü (SM) arttıkça düşer, Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarıyla doğru orantılıdır, alit miktarıyla lineer artar. Ayrıca öğütmeye yardımcı maddelerinde öğütmeye önemli derecede etkileri vardır (Altun ve Ölmez, 2001).

Klinkerin öğütülebilirliğinde kimyasal ve mineralojik bileşim önemli rol oynar. SM arttıkça öğütülebilirliğin azaldığı, Al_2O_3 ve serbest CaO miktarının

yükselmesiyle yine öğütülebilirliğin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum aynı hammaddeler ve aynı proses koşullarında geçerlidir. Metalik parçacıklar ve Fe_2O_3 mikro çatlakların oluşumunu ve büyümesini sağlayarak öğütülebilirliği artırır. Duda'ya göre yüksek miktardaki C_3S (Alit) öğütülebilirliği artırır, yüksek miktardaki C_2S (Belit) ise azaltır. Ayrıca $(\text{C}_3\text{S} / \text{C}_2\text{S})$ oranı veya silikatların ara fazlara oranı, $(\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}) / (\text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF})$, azaldığında öğünme zorlaşır ve enerji harcaması artar. Öğütülebilirliğe kimyasal ve mineralojik bileşenlerin yanında mikro yapının da etkisi vardır. Mikro yapının oluşumunda ısıtma ve soğutma hızları ve fırın tipide etkilidir (Altun, 1999, 1998). İnce kristalli yapı, özellikle küçük kalsiyum silikat kristalleri öğütmeyi iyileştirir. İri kristaller yalnız parçalanmayı zorlaştırmaz, aynı zamanda kırılma alanlarının sayısını artırır. Böylece yüzey alanı aktivitesi artarak aglomerat oluşur ve enerji kayıpları artar (Altun ve Ölmez, 2001).

Bu çalışma da farklı çimento fabrikalarında üretilen endüstriyel çimento klinkerinin öğütülebilirlikleri ve polarizan mikroskop ile belirlenen iç yapıları arasındaki ilişkileri araştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

ÇİMENTONUN TANIMI

2.1 Genel Bilgiler

Su ile tepkimesinde sertleşerek etrafındaki maddeleri birbirine yapıştırma özelliğine sahip malzemelere "Hidrolik Bağlayıcı" adı verilmektedir. Çimento; hava ile suda sertleşen ve sertleştikten sonra da çözünmeyen hidrolik bağlayıcı bir maddedir.

Çimento uluslararası standart sanayi tasnifinde 309 grup ve 3692 kod numarası ile sanayide kullanılan esas kimyasal maddeler grubunda yer almaktadır.

Çimento sektörü; başlıca Silisyum oksit (SiO_2), Alüminyum oksit (Al_2O_3), Kalsiyum oksit (CaO) ve Demir oksitleri (Fe_2O_3) içeren hammaddelerin, teknolojik yöntemlerle sertleşmesi derecesine kadar pışırılması ile elde edilen yarı mamul madde klinkerin tek veya daha fazla katkı maddesi ile öğütülmesi yoluyla üretilen ve öğütülen hidrolik bağlayıcıları içeren bir maddedir. (S. Altun, 1999).

Bilindiği gibi; çimento agrega ve suyun karıştırılmasıyla beton elde edilmektedir. Beton erimez bir kütle olarak düşünülebilir. Çimento harcı su ile karıştırıldığında agregalar arasındaki boşluklar doldurulmakta ve agregalar bir zarf içine konup kapatılmış gibi olduklarından, bütün parçalar birbirine kenetlenmektedir.

Taş ocaklarından elde edilen hammaddelerin teknolojik metodlardan geçirildikten sonra belirli oranlarda karıştırılarak kırılıp, öğütülüp sinterleşme sıcaklığına kadar pışırıldığında klinker, elde edilen malzemeye "Farin" adı verilir. Farin CaCO_3 oranı düşük fakat silisyum, alüminyum ve demir oksit miktarı yüksek kil mineralleri ile belli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir.

Daha sonra klinkerin, betonun “Priz Süresi’ni” ayarlayıcı bir etken olan % 2-5 oranındaki alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile karıştırılıp öğütülmesiyle çimento elde edilir. Normal bir çimentonun bileşimi şöyledir (Kuduğ, 2003).

$\text{CaO} + \text{SiO}_2$	% 84
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	% 12
$\text{SO}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{NaO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$	% 4
Toplam	% 100

2.2 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler jeolojide sedimenter kayalar olarak bilinen kireçtaşı, kil ve marndır. Klinker üretiminin ana komponentleri olan CaO için kalker (kireçtaşı); SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 için de kil mineralleri temel kaynaklardır. Marn gibi bu dört oksiti bünyesinde bulunduran diğer malzemeler de çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır. (Kuduğ, 2003).

Çimento üretiminde kullanılacak hammaddelerin uygunluk dereceleri onların kimyasal bileşimleri ile orantılıdır. Kireçtaşı bileşeni için kireç standardı bir kriter olarak kullanılmaktadır. Bu değer SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi bileşenler hakkında bilgi verir ve aynı zamanda CaO içeriği konusunda da aydınlatıcıdır. Kil minerali olarak kullanılacak kayalarda silikat ve alumina oranı dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Çimento sanayide kullanılan ve Kuhl tarafından CaCO_3 oranına göre yapılan sınıflandırma Tablo 2.1’de verilmiştir. (Kuduğ, 2003).

Tablo 2.1 Çimento ana hammaddelerinin CaCO_3 oranına göre sınıflandırılması

Hammadde Adı	% CaCO_3
Mermer	99-100
Kireçtaşı (Kalker)	90-98
Kalkerli Marn	75-90
Marn	40-75
Killi Marn	10-40
Marnlı Kil	2-10
Kil	0-2

Ana hammaddeler dışında, klinker üretimi için gerekli katkı maddeleri ise, ham karışımı kimyasal bileşimini düzeltici yönde etkiye sahip; Fe, SiO_2 yada Al_2O_3 içerikli materyallerdir. Bunlara örnek olarak fırınlanmış pirit, düşük tenörlü demir cevheri, laterit, kuvarslı kum yada metamorfik kayaların bozunmasıyla oluşan kuvarslı materyaller ve boksitler verilebilir. Ülkemizde beyaz çimento üretimi için büyük miktarlarda kaolin kullanılmaktadır. Sert kaolinler de bu amaçlarla kullanılabildiği gibi önemli ölçüde çimento kaolini de ihraç etmektedir. Ayrıca klinkerin öğütülmesi esnasında alçıtaşı, yapay ve son yıllarda belirli oranlarda kalker de değişik tip çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır (Kuduğ, 2003).

2.3 Bazı Çimento Türleri

2.3.1 Portland Çimentosu ve Katkılı Portland Çimentosu

Portland çimentosu klinkerinin alçıtaşı ile % 10'a kadar herhangi bir doğal yada yapay puzolanik madde ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır. Karışım iyice öğütülüp sinterleşme sıcaklığına kadar pişirilmekte elde edilen klinker tekrar ince toz haline getirilene kadar öğütülmektedir. Çimento deyince ilk akla gelen çimento türüdür. Portland çimentosu CaO Al_2O_3 su ile karıştırıldığında hidrolizlenir. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve $\text{Al}(\text{OH})_3$ teşekkül eder. Bu maddelerde

kalsiyum silikatlara kuvvetle etki ederek kristaller arası kalsiyum alumina silikat kristalleri yaparlar (Bayram, 1998). Ülkemizde üretilen genel portland çimento klinkerinin bileşimleri Tablo 2.2’de verilmiştir (Avşar, 1996).

Tablo 2.2 Klinkerlerin genel kompozisyonu

Mineral Bileşimleri	Kimyasal Formülleri	% Miktarları
Kireç	CaO	60-67
Silis	SiO ₂	17-25
Alümin	Al ₂ O ₃	3-8
Demiroksit	Fe ₂ O ₃	0,5-6
Kükürttrioksit	SO ₃	1-3
Magnezit	MgO	0,1-4
Diğerleri	Na ₂ O + K ₂ O	0,2-1,3

Tablo 2.3 Portland çimento klinkerinde ortalama olarak klinker fazları (Altun, 2004).

Klinker Fazları	CaO	Al	Si	Fe
Trikalsiyum silikat (C ₃ S)	73,7	-	26,3	-
Dikalsiyum silikat (C ₂ S)	55,1	-	43,9	-
Trikalsiyum aluminat (C ₃ A)	52,3	37,7	-	-
Tetrakalsiyum aluminaferrit (C ₄ AF)	45,1	21,0	-	32,9
Dikalsiyum ferit (C ₂ F)	41,3	-	-	58,7

2.3.1.1 Portland Çimento Klinkerinin Temel Yapısı

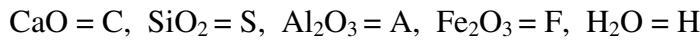
Ham karışımın kısmi ergime derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen klinker başlıca dört kristal yapıda kalsiyum bileşiği karışımından oluşur. Bunların ikisi silis, biri alümin diğeri de alümin ve ferrit oksitlerin birlikte yer aldığı kalsiyum bileşikleridir (Bayram, 1998).

2.3.1.2 Hammadde Karışımının Hazırlanması

Ocaklardan elde edilen ham maddeler kırıcılardan genellikle iki aşamada geçilerek tane boyları küçültülür.

Çimento ham maddelerinin dikkatle orantılanmış bir karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silistir. Bunları alümin ve demir oksit takip eder. Daha az miktarlarda magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddeler de bulunur (Yeğinoğlu, 2003).

Kireç (CaO) daha ziyade kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girer. Silis (SiO_2) için ise başlıca kaynak kildir. Alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) de genellikle kilden elde edilirler veya ilaveten katılırlar. Portland çimentosunun oluşumu ve su ile hidratasyonu karmaşık kimyasal reaksiyonlar içerdiğinden ifadeleri kısaltmak için aşağıda belirtilen ve çimento kimyasına özgü semboller kullanılır:



Farin fırında pişerken bu oksitler önce serbest hale gelirler ve sonra, sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluştururlar. Burada kireç miktarının yeterli olması ve ham maddelerin gereken oranlarda birleştirilmesi önem kazanır. Bu amaçla farin bileşimi bazı formüllerle kontrol edilir, ayrıca laboratuarda sürekli denetim altında bulundurulur. Örneğin; “kireç standardı”nı hesaplamak için kullanılan bir bağıntı şöyledir:

$$100 C / (2,8 S + 1,18 A + 0,65 F)$$

Burada C, S, A ve F oksitlerin bileşimdeki yüzdelerini gösterir. Klinkerin hızlı soğuması halinde fırında oluşan kimyasal denge oda sıcaklığında devam eder ve normal dayanımlı bir çimento için kireç standardının 90-93 arasında olması istenir. Daha yüksek değerler ile çimento dayanımı artar. Ancak, 100'ün üzerindeki değerler dengenin bozulduğunu ve tüm kirecin bağlanamayacağını gösterir. Serbest kalan kireç pişirmede ve çimentonun hacim sabitliği ile dayanımı üzerlerinde olumsuz etki yapar. Ham maddeler kendi bileşimleri esas alınarak yapılan bu tür hassas ayarlama ve kontrollerden sonra orantılı olarak birleştirilip öğütülürler ve uygun bileşimde öğütülmüş farin ön ısıtmaya sevk edilir (Yeğinobalı, 2003).

2.3.1.3 Farin Değirmeni

Ham madde karışımı farin, etkin bir şekilde ısıtılıp kalsine edilebilmesi için önce öğütülür. Öğütme işlemi düşey değirmenlerde veya yatay bilyalı değirmenlerde gerçekleştirilir (Yeğinobalı, 2003).

2.3.1.4 Pişirme (Kalsinasyon)

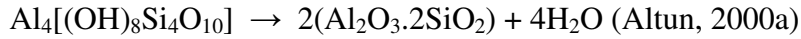
Çimento üretiminin en önemli aşaması farinin pişirilmesidir. Çimento fabrikalarına karakteristik görünümü veren kuleler ve döner fırın bu aşamada kullanılırlar.

- Modern çimento fabrikalarında farin enerji tasarrufu amacı ile fırına girmeden önce bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Yükseklikleri 60 metreyi geçen ön ısıtma kulelerinde seri halindeki siklonlarda farin taneleri fırından gelen sıcak egzoz gazları içinde savrulur ve ısınırlar ve kısmen kalsine olurlar.
- Bazı ön ısıtıcılarda kulenin altında ve döner fırından hemen önce bir ön kalsinasyon ünitesi bulunur. Son siklon aşamasından buraya sıcak hava ve yakıtla

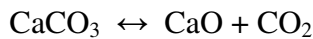
birlikte giren farin tanelerinde kalsinasyon, ham maddelerden CO₂'in ayrıştırılması, % 95'e varan ölçüde tamamlanabilir.

- Döner fırın dünyada endüstri tesislerinde bulunan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Çapı 3-7 m, uzunluğu 50-75 m kadar olup 50mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış, refrakter tuğla astarlı dev bir borudur. Yaklaşık % 3-4 eğimli olarak monte edilen fırın dakikada 1,5-4 devir yaparak döner. Ön ısıtıcıdan gelen malzeme fırına yukarı uçtan girer ve fırınla beraber dönerek, yuvarlanarak, kayarak daha sıcak bölgelere, alt uçtaki aleve doğru ilerler. Bu arada geri kalan CO₂'de malzemeden ayrılır (Yeğinoğlu, 2003).

2.3.1.4.1 Kil Minerallerinin Suyunun Uzaklaşması Ve Karbonatın Ayrışması. 100-400⁰C arasında kil minerallerine bağlanan su uzaklaşır. Ara tabaka suyu da bu sıcaklıklarda çıkabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda çıkabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 400-750⁰C'de) hidroksit formda kimyasal bağlı bulunan suyun uzaklaşmasına dehidratasyon denir. Örnek reaksiyon olarak kaolinitin dehidratasyonu şöyledir:

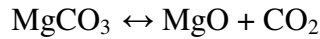


Killerdeki suyun çıkışı kil mineralinin tipine, safsızlıkların tip ve miktarına, tane boyutuna, kilin kristalizasyon gradına, gaz atmosferine v.d. bağlıdır. Ham karışımda yaklaşık ağırlıkça % 75-80 oranında bulunan CaCO₃ teorik olarak $\geq 896^0\text{C}$ 'de



Denklemiyle ayrışır. Verilen sıcaklık saf kalsit için geçerlidir ve safsızlıkların oranı arttıkça, ham karışımda olduğu gibi, termik ayrışma (disosiasyon) daha düşük sıcaklıklara kayar. Ayrışma pratikte 550-600⁰C'de başlar. Çünkü CaO ile SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ kimyasal reaksiyona girerek katı hal reaksiyonlarıyla CaO.Al₂O₃(CA), C₁₂A₇, CS ve C₂S fazları oluşur (Altun, 2000a).

Pratik olarak 900⁰C de 425 kcal/kg CaCO₃ ısııl enerji gerektirmektedir. Kalkerin saflık derecesi, sıcaklık, kristal yapısı gibi hususlar reaksiyonun entalpisini az veya çok etkilemektedir. Klinker üretim prosesinde çok daha az önemli olan magnezyum karbonat ise,



Denklemine göre yine endotermik ve tersinir olarak ayrışır. Reaksiyon için gerekli ısııl enerji ise 298⁰C de 333 kcal/kg MgCO₃ mertebesindedir (Okbaş, bt).

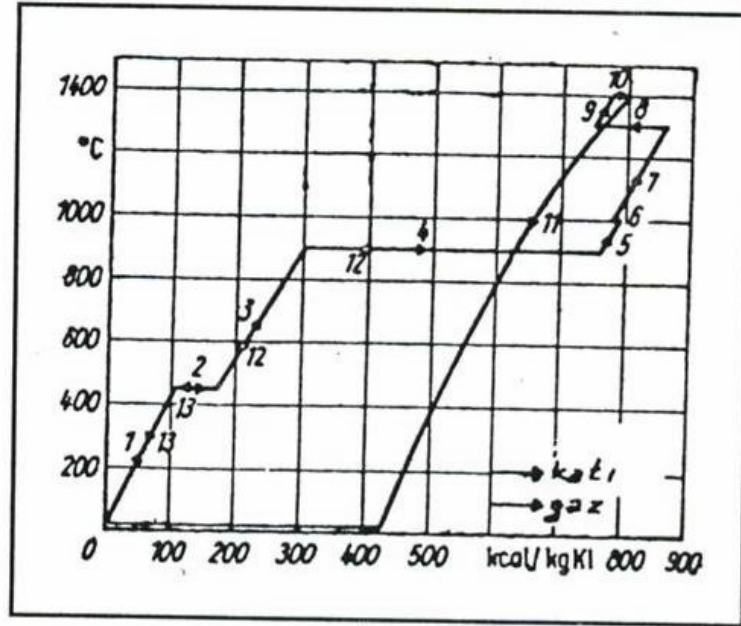
Bu reaksiyonlar yukarıdaki termodinamik özellikleri yanında kinetik olarak da beş etapta gerçekleşir.

1. Ortam ısıısının tanecik yüzeyine genellikle konveksiyon yoluyla aktarılması,
2. Ayrışmış olan yüzeyden reaksiyonun oluştuğu iç kesime doğru ısıının kondüksiyon yoluyla iletilmesi,
3. Reaksiyon bölgesinde kimyasal reaksiyonun oluşumu (iletilen ısı kullanılmak suretiyle CO₂ intışarı ile yeni oluşan CaO yeniden kristalleşmesi),
4. Oluşan CaO tabakasını geçerek tanecik yüzeyine doğru CO₂ difüzyonu,
5. Tanecik yüzeyinden ortama geçiş (Okbaş, bt).

Reaksiyonun toplam hızı bu beş etabın teker teker hızlarının bir fonksiyonu olmaktadır. Etapların hızları ise taneciğin yoğunluğuna, tane büyüklüğüne, ayrışma entalpisine, termik iletkenliğine, ortam ve yüzey sıcaklık farklarına, ortamdaki CO₂ kısmi basıncına (yakıttan kaynaklanan CO₂ kısmi basıncı da dikkate alınarak), tanecik biçimine bağlı olarak değişimler gösterebilmektedir.

Buharlaşıma ve CO₂ ayrışmasını takiben katılar arasındaki kimyasal reaksiyonlar başlamaktadır. Fırın içerisinde son derece girift reaksiyonlar yer almakta ve zamana bağlı olarak klinkeri oluşturan elemanlar teşekkül etmektedir. Klinkerin oluşumu sırasında gereken teorik ısı sarfiyatı üzerinde kısa bir açıklamanın ısı bilançolarının hesaplanmasında yararı olacaktır (Okbaş, bt).

Hammaddenin klinkere dönüştürülmesinde bir miktar ısıya ihtiyaç olduğu ve bu ısının hammaddenin bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir. Termodinamik olarak entalpiler 25°C ve 1 kg klinker bazına indirgenmiştir. Şekil 2.1’de Entalpi Δh – Sıcaklık t diyagramında pişme prosesi ideal olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.1 Entalpi Δh – sıcaklık t diyagramı

Buradaki 1, 3, 5, 7, 9 bölümleri pişme malzemesinin ısınmasını, 2 kil minerallerinin dehidratasyonu için ısı sarfını, 4 karbonatların ayrışması için olan ısı sarfını, 6 metakaolenlerin egzotermik dönüşümünü, 8 klinker minerallerinin egzotermik oluşumunu, 10 klinkerin ergimesini, 11, 12, 13 klinker, CO_2 ve H_2O nun 20°C soğumasını göstermektedir (Okbaş, bt).

Diyagramda prosesin değişik bölümlerinde gerekli ısı sarfiyatları açık olarak görülebilmektedir. En önemli ısı sarfı, görüldüğü gibi karbonatların ayrışması için olmaktadır. Teorik olarak geri kalan reaksiyonlar için fazla bir ısıya ihtiyaç

duyulmamakta klinkerin teşekkülündeki egzotermik reaksiyonlardan yararlanılmaktadır (Okbaş, bt).

Aşağıda teşekkül veya ayrışma ısıları verilmektedir.

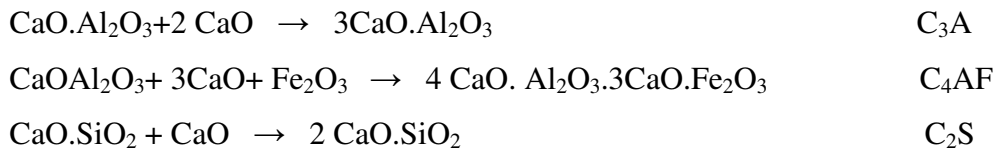
Kaolinit	$\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2.2\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3. 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+ 186 kcal/kg
Montmorilonit	Dehidratasyon	+ 58,5 kcal/kg
İllit	Dehidratasyon	+ 43,2 kcal/kg
MgCO_3	$\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2$	+ 333 kcal/kg
CaCO_3	$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	+ 425 kcal/kg
Metakaolen	$\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2$	- 187 kcal/kg
CS α	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaO.SiO}_2 \alpha$	- 173 kcal/kg
CS β	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaO.SiO}_2$	- 183 kcal/kg
C_3S_2	$3\text{CaO} + 3\text{SiO}_2 = 3\text{CaO}.2\text{SiO}_2$	- 164 kcal/kg
$\text{C}_2\text{S} \beta$	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 = 2\text{CaO.SiO}_2 \beta$	- 175 kcal/kg
C_3S	$3\text{CaO} + \text{SiO}_2 = 3\text{CaO.SiO}_2$	- 118 kcal/kg
C_3S	$2\text{CaO.SiO}_2 + \text{CaO} = 3\text{CaO.SiO}_2$	+ 8 kcal/kg
CA	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \alpha = \text{CaO.Al}_2\text{O}_3$	- 24 kcal/kg
C_{12}A_7	$12\text{CaO} + 7\text{Al}_2\text{O}_3 \alpha = 12\text{CaO}.7\text{Al}_2\text{O}_3$	- 10 kcal/kg
C_3A	$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \alpha = 3\text{CaO.Al}_2\text{O}_3$	+ 18 kcal/kg
CA_2	$\text{CaO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 \alpha = \text{CaO}.2\text{Al}_2\text{O}_3$	- 16 kcal/kg
C_2F	$2\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \alpha = 2\text{CaO.Fe}_2\text{O}_3$	- 27 kcal/kg
C_4AF	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \alpha + \text{Fe}_2\text{O}_3 \alpha = 4\text{CaO.Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	- 16 kcal/kg
Erimiş	% 54,8 CaO + % 22,7 Al_2O_3 +	
Klinker	% 16,5 Fe_2O_3 + % 6 SiO_2	+ 97 kcal/kg
$\text{CaSO}_4 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4. \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	+ 118 kcal/kg
$\text{CaSO}_4. \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4. \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	+ 49 kcal/kg
CaSO_4	$\text{CaSO}_4 = \text{CaO} + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	+ 862 kcal/kg

Diğer taraftan klinkerin teşekkül ısını teorik olarak hesaplamak üzere, bilinen klinkerin analizinden hareketle denklemler geliştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi ZUR STRASSEN tarafından ileri sürülmüş olup,

$Q = 4,11 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 6,48 \text{ MgO} + 7,646 \text{ CaO} - 5,116 \text{ SiO}_2 - 0,59 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ kcal/kg}$
klinker şeklindedir (Okbaş, bt).

2.3.1.4.2 Katı Hal Reaksiyonlar. Yaklaşık 550-600°C de klinker oluşumunda katı hal reaksiyonları başlar. CaCO_3 ayrışma ürünleri klinker ile reaksiyona girerek düşük kireçli bileşikler (C_3A , C_2S) oluşturur. C_3A ve $\text{C}_2(\text{A},\text{F})$ formasyonu yaklaşık 800°C’de başlar (Altun, 2000a)

Reaksiyonlar aşağıdaki şekilde gerçekleşir.



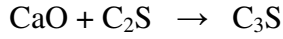
Katı maddeler olan CaO ve SiO_2 arasındaki reaksiyonlar R. Jagitsch tarafından araştırılmıştır. Bu araştırmada iki reaksiyon fazı saptanmıştır:

1. Yüzey alanı reaksiyonları: Yüksek enerjili Ca - partikülleri CaO - kafesinden koparak SiO_2 yüzeyine gelirler ve orada reaksiyon tabakası oluşturarak Ca - partikülleri geçirmez hale gelir.
2. Difüzyon reaksiyonları: Burada reaksiyon hızları değil difüzyon hızları önemlidir (Altun, 2000a).

R. Lindner de aynı görüşleri belirtmektedir. Ca ve SiO_2 temas ettiğinde bir reaksiyon zonu oluşmaktadır ve CaO , SiO_2 ’ ye doğru yayılmaktadır (difüzyon). W.L. de Keyser ise zıt olarak, aynı reaksiyonda SiO_2 ’in CaO taneleri içine doğru difüzyonunu savunur ve önemli iki sonuca ulaşır:

1. 1200°C’ ye kadar yalnız oksitlerin difüzyonuyla reaksiyonlar gerçekleşir.
2. Reaksiyonun yönü ve sırası oksitlerin konsantrasyonundan bağımsızdır (Altun, 2000a).

2.3.1.4.3 Klinker Eriyiğinin Oluşumu. İlk eriyik fazı yaklaşık 1260-1310⁰C’de oluşur. Klinker eriğin oranı sıcaklık arttıkça yükselir ve 1450⁰C’ de kimyasal bileşime bağlı olarak yaklaşık ağırlıkça %20-30’ a ulaşır. Silikat Modülü (SM) arttıkça eriyik fazın oranı düşer. Portland çimentonun esas içeriği olan C₃S oluşumunu bu sıcaklıklar sağlar. Sinterleşmenin başladığı anda C₂S yanında yüksek miktarda bağlı olmayan CaO ortaya çıkar. Eriyik faz ile CaO ve C₂S katı çözeltiye geçer. Eriyik faz reaksiyon partnerlerinin difüzyonunu kolaylaştırır ve sonunda C₃S kristalleşir. Burada aşağıdaki reaksiyon geçerlidir:



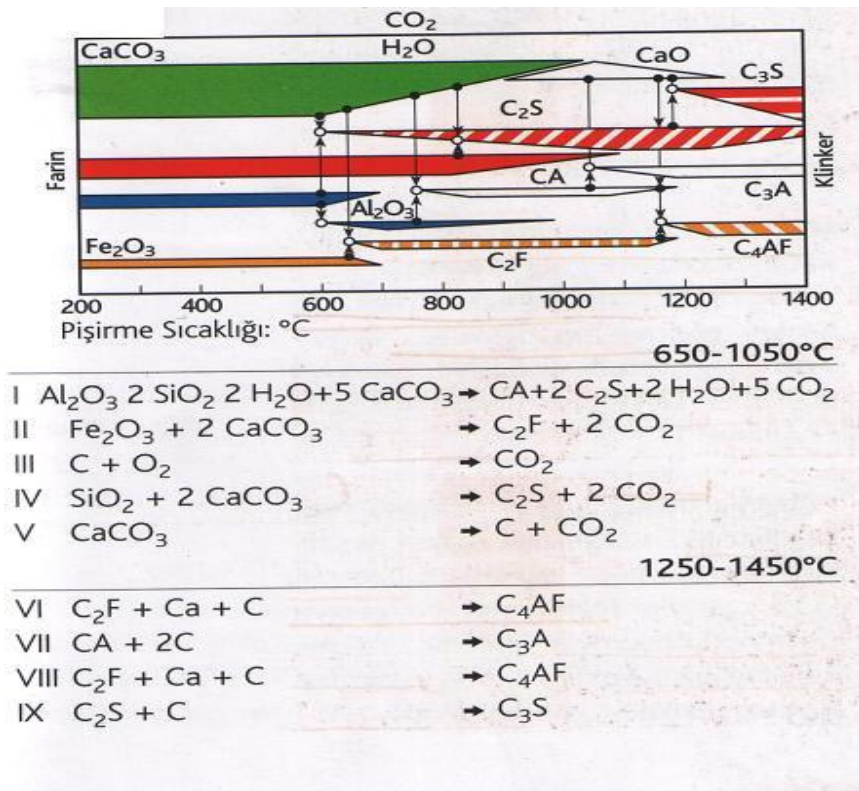
Klinker eriyiğinin oluşumu endoterm bir reaksiyondur ve klinker soğurken eriyik ısının büyük bir bölümü tekrar açığa çıkar. Kolay sinterleme için yalnız eriyiğin mümkün olduğu kadar düşük sıcaklıkta oluşması değil, aynı zamanda oranının da yeterli büyüklükte olması gerekir (Altun, 2000a).

- Döner fırının alt ucunda toz kömür, doğal gaz, fuel oil gibi yakıtların yakılması ile oluşturulan alevin çıktığı boru bulunur. Alev borusundan çıkan beyaz kor halindeki alevin sıcaklığı 1870⁰C değerine (yani güneş yüzeyindeki sıcaklığın üçte birine) ulaşır. Bu en sıcak bölgede sıcaklığı 1480⁰C’ye varan kalsine malzeme, kısmen ergiyip sıvılaşmaya başlar, ince taneler birbirlerine yapışıp daha büyük boydaki klinker tanelerini oluştururlar. Fırının alt ucundan çıkan klinker üzerinde soğutma işlemi uygulanır (Yeğınobalı, 2003).

Klinker oluşum reaksiyonları Tablo 2.5’deki sıcaklık basamaklarında gerçekleşir (Altun, 2000a).

2.3.1.5 Döner Fırın Kimyası

Döner fırında çimento ham maddeleri içindeki kireç, silis ve alumin arttıkça önce serbest hale gelirler, sonra da kendi aralarında birleşip yeni bileşikler meydana getirirler. Ön ısıtmada ve fırının en üst bölgesinde malzemedeki serbest ve kristal sular buharlaşır, kil ayrışır ve CO₂ kalkerden ayrılmaya başlar. Aşağıya doğru, daha sıcak bölgelerde kalsinasyon tamamlanır, serbest kalan CaO kilden ayrılan SiO₂ ve Al₂O₃ ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminatları meydana getirir. Farinden klinkere geçişte çimento ham maddelerinde mineral faz değişimleri şekilde gösterilmiştir (Yeğinobalı, 2003).



Şekil 2.2 Klinkerdeki faz değişimleri (Yeğinobalı, 2003)

2.3.1.6 Klinkerin Soğutulması

Klinkerler döner fırından yaklaşık 1300°C de çıkarlar. Bu aşamada klinkerin soğutulması ve ortamdaki ısının kazanılması işlemleri ele alınır.

Üretimin diğer aşamalarına geçmeden önce klinkerin soğutulması gerekir. Burada en sık kullanılan yöntem ızgara plakalar üzerinde yavaşça ilerleyen klinker tanelerine basınçlı dış hava verilmesidir. Klinker iç yapısını etkileyeceği için soğutma hızının kontrollü olması istenir (Yeğinobalı, 2003).

Çimento klinkeri sinterleşme sıcaklığından öyle hızlı soğutulmalıdır ki C_3S miktarı mümkün olduğu kadar korunabilsin. Yavaş soğutmada klinker eriyiğinin C_3S ' in belirli oranıyla reaksiyona girmesi sonucu C_2S ve C_3A oluşur. Ayrıca $1250^{\circ}C$ ' nin altında C_3S kararlı olmayıp C_2S ve serbest CaO ' ya ayrışma eğilimi vardır. C_3S kristal kafesinin içindeki iki değerlikli demir bu ayrışmayı destekler. Dolayısıyla klinker bu reaksiyonların olamayacağı kadar hızlı soğutulma gerektirir. Ayrıca C_3A ' nın reaksiyon kabiliyetini (çimentonun katılaşma hızını) uygun şekilde etkileyebilmek için de hızlı soğutulmalıdır. MgO miktarı % ağırlıkça 2,5 'dan büyük olduğu zaman hızlı soğutma da avantajlıdır. Çünkü böylece küçük periklaslar oluşur.

Yüksek soğutma hızının (>40 K/dak.) etkileri şunlardır.

- Klinkerdeki gerilme çatlaklarından dolayı öğütme iyileşir.
- Alit çözülmesi yoktur ve bu fazın miktarı yüksektir.
- Klinkerin şok soğutulması ile oluşan ince kristalli alüminat ve ferrit fazlarının çimento katılaşması yavaşlar.
- Daha küçük genleşme MgO miktarı % ağırlıkça 2,5'dan büyük ise hacimsel kararlılık daha iyidir, çünkü serbest MgO periklas olarak ince kristallidir (Altun, 2000a).

“Klinkerin yavaş soğuması esnasında alitler kısmen belit ve CaO 'ya çözünür. Bu aşamada alüminatlar, ferritler ve çok küçük belitler kristalleşir” (Altun, 2000b, s.36).

A.Stahel v.d. ise araştırmalarında üç farklı duruma dikkat çekmişlerdir:

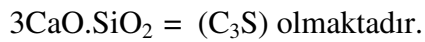
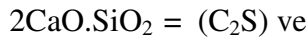
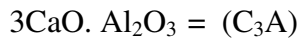
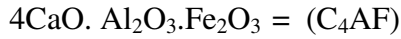
1. Orta-yavaş soğutmada ($10-20$ K/dak.) yeterli süre olduğu için periklaslar tamamen kristalleşir.

2. Orta hızlı soğutmada periklasın idiomorf kristallerinin oluşumunu sağlayacak kadar zamanı yoktur, daha çok dendritik veya küçük kristaller meydana gelir.
3. Çok hızlı soğuyan klinkerde periklaslar eriyikte hemen hemen kristalleşemezler, en fazla tek tek ve çok küçük boyutta dendritler şeklinde oluşurlar (Altun, 2000a).

Ortamdan kazanılan ısı enerjisi klinker üretimi için gerekli olan miktarın üçte birine yakındır. Klinker soğutucusundan gelen sıcak hava tekrar fırının ısıtılmasında ve ön kalsinasyonda kullanılır. Artan sıcak havadan ham maddelerin kurutulması, sıcak su temini ve binaların ısıtılması gibi amaçlar için de yararlanılır (Yeğınobalı, 2003).

2.3.1.7 Klinkerin Bileşimi

Tipik bir portland çimentosu klinkerinde bileşimin % 90'ından fazlasını karma oksit formundaki dört ana bileşen oluşturur. Döner fırındaki reaksiyon ifadelerinden de görüleceği gibi bunlar:



Bu dört ana bileşen gerek su ile reaksiyon hızları ve çıkardıkları ısı miktarları, gerekse çimentonun bağlayıcılık değerine katkıları yönlerinden birbirlerinden farklı karakterler gösterirler (Yeğınobalı, 2003).

Klinker fazları silikat ve katı eriyik fazları olarak iki gruba ayrılabilir. Bu çalışmada özellikle silikat fazlarının oluşturan alit ve belit kristalleri incelenmiştir. Aşağıda faz yapılarıyla ilgili temel bilgiler sunulmuştur.

Alit (trikalsiyum silikat, C_3S) klinker kütlesinin % 40-70'i arasında olabilir. Kristal boyutu $150\text{ }\mu\text{m}$ 'ye kadar çıkabilir. Kesiti hegzogonal yapılıdır. % 3-4 oranında minör oksit içerir. Su ile hızlı reaksiyona girer ve çimento dayanımı ile hidrasyon ısısını kontrol eden fazdır. 1250^0C 'nin altında soğutma hızı çok yavaş değilse, normal sıcaklıklara kadar stabilitesini korur. Çok yavaş soğutma hızlarında ise alitin bir kısmı çözünür ve belit oluşur (Felekoğlu ve Güllü, 2006). C_3S klinkerin en önemli mineralidir. Renksiz kristaller halindeki hidrasyon kabiliyeti yüksek ve klinkerde ilk yüksek mukavemet veren komponenttir. Çimentonun kalitesi Alit konsantrasyonu ile ölçülür. Mukavemet ve hidrasyonla ilgili olmayıp Alit'in kristal yapısına (büyüklüğüne ve küçüklüğüne) bağlıdır. Bu da hammadde karışımının kimyasal bileşiminde kireç doygunluğu derecesine, pişme şartlarına ve pişirilmiş klinkerin soğutulma şartlarına bağlıdır (Kavas, 2002).

- Yüksek kireç doygunluğu küçük kristal teşekkül etmesini sağlar.
- Yüksek ısı (mesela 1600^0C) düşük likit faz viskozitesi meydana getireceğinden iyonların reaksiyona girme kabiliyeti artar ve büyük kristaller teşekkül eder.
- Klinker soğutma usulünün klinkerin mineralojik bileşimi üzerine büyük bir tesiri vardır. Lea ve Parker'in çalışmalarına göre çeşitli soğutma derecelerine göre; yavaş soğutmada C_3S yüzdesi % 59,8 , hızlı soğutmada % 65,2 , süratli soğutmada % 70 değerine ulaşmıştır.
- $1300-1450^0\text{C}$ arasında azami kirecin bağlanması bu 10 saniye içinde meydana gelir. Sinter reaksiyonunun bitişi 2-3 dakika sonra biter. Daha sonraki araştırmalar 1500^0C 'de 10 dakikalık pişirme zamanı 10-15 mikron büyüklüğünde alit kristali meydana getirmesine yeterlidir. Daha uzun zaman, büyük boyutta kristal meydana gelmesine sebep olacağından pişirme bölgesinin kısaltılması gereklidir. Küçük kristaller yalnız öğütmede kolaylık göstermez aynı zamanda hidrasyon kolay olur. Mukavemet artar (Kavas, 2002).

Belit (dikalsiyum silikat, C_2S) klinker kütlesinin %15-45'i arasında olabilir. Dairesel kesitli kristal yapısına sahiptir. Kristal boyutu $5-40\text{ }\mu\text{m}$ arasındadır. Belit alite kıyasla daha az reaktif olup ileriki yaşlarda dayanıma katkı yapar. C_2S 'in üç polimorfu vardır. Yüksek sıcaklıklarda $\alpha\text{-}C_2S$ oluşur. 1450^0C 'de β -formuna ve 670^0C 'de $\gamma\text{-}C_2S$ 'e dönüşür. Ancak geleneksel çimento üretiminde kullanılan

soğutma hızlarında belitin büyük kısmı β -C₂S formunda kalır (Felekoğlu, Tosun ve Altun, 2005). α -C₂S, 1425⁰C’den yüksek sıcaklık koşullarından oluşmaktadır, oysa β -C₂S, 690⁰C’den düşük sıcaklıkta ortaya çıkmaktadır. Bazı durumlarda α -C₂S ve β -C₂S bir arada bulunabilirler. Bir arada var olmasının nedeni ise, soğutma prosesinin erken aşamasında sıcaklıktaki çok hızlı ve ani bir düşüşten dolayı α -C₂S tamamen β -C₂S’ye dönüşemez, bunların bir kısmı klinker içerisinde tutulabilir (Hong, Fu ve Min, 2001). β -C₂S genellikle ikizlenme gösterir. Belit kristalleri bir araya gelerek kümelenir ve belit rozetlerini oluşturabilirler (Felekoğlu, 2005). Eğer büyük belit kristalleri oluşmuş ise; “Bu formasyonunun sebebi, alit formasyon sıcaklığı altında toplanan kristalizasyon olabilir” (A. Altun, 1999a, s. 600). Belitin β modifikasyonu klinkerde daha çok bulunur ve hidrolik olmayan α modifikasyonuna dönüşür ve bu esnada % 10 kadar hacimsel büyüme gerçekleşir. Bu olaya “ufalanma” denir. Bu dönüşüm yabancı iyonların girmesi ve hızlı soğutma ile engellenebilir (Altun, 2004). C₂S (CaOSiO₂) yavaş ve tedrici donar. Düşük hidratasyon ısıdır. Kirli sarımsak renkli olan belit sinter bölgesinde katı fazda meydana gelir. Bu bileşik çimentonun zamanla sertleşmesini temin eder. α β γ varyantları mevcuttur. Ayrıca C₂S yavaş sertleşen hidrolik bağlayıcıdır. Portland çimentosunda C₂S genel olarak α ve β varyantı halinde bulunur (Kavas, 2002).

Tablo 2.4 Belit modifikasyonları (Altun, 2004)

	γ	β (Larnit)	$\acute{\alpha}$ (Bredijit)	α
Dönüşüm Sıcaklığı	670 ⁰ C		1420 ⁰ C	
Kristal Sistemi	Monoklik	Rombik	Monoklik	Trigonal
Yoğunluk (gr / cm ³)	2,97	3,26	3,31	3,035
Hidrolik	Yok	İyi	Az	Hemen hemen yok

Tablo 2.5 Klinker fazlarının oluşumu (Altun, 2000a)

200 ⁰ C'ye kadar	Ham karışımdaki bağlanmamış nem yada granülasyon için verilen suyun uzaklaşması
700 ⁰ C'ye kadar	Kil minerallerindeki suyun ayrışması, böylece kafes değişimleri ve yüzey aktivitesinin azalması
700-900 ⁰ C	CaCO ₃ 'ün kalsinasyonu, ayrıışan CaO ile alümina ve demir oksitin kalsiyum alüminat ferrit C ₂ (A,F), C ₁₂ A ₇ ve CaO ile SiO ₂ 'nin aktif kısmıyla belit oluşumu
900-1200 ⁰ C	SiO ₂ 'in geri kalan kısmıyla CaO'e bağlanması ve kalsiyum alüminat ferritin C ₃ A ve C ₄ AF dönüşümü
1250-1350 ⁰ C	Kalsiyum alüminat ferritlerin eriyik faz durumuna geçişi, belit ve serbest CaO'ın reaksiyonla alit oluşumunun başlaması
>1350 ⁰ C	Belitin hemen hemen tüm serbest CaO ile reaksiyonu sonucu alitin oluşması
Klinker soğutulurken eriyik kristalleşir ve silikat fazları meta kararlıdır.	

Tri kalsiyum alüminat (C₃A) ve ferrit (C₄AF- tetrakalsiyum alüminaferrit) ara faz veya matris fazı olarak adlandırılır. Silikat fazlarının etrafını sarar ve bu fazları bağlarlar. C₃A fazı kübik veya ortorombik formdadır. Klinker kütlesinin % 1-15'i arasında olabilir. Kristal boyutu 1-60 µm arasında değişir. Su ile reaksiyonu çok hızlıdır ve amorf yapıdır (Felekoğlu, 2005). “Betonun ilk 24 saat içerisinde sertleşmesini temin eden siyahımsı partiküllerdir. Hidratasyon ısısı çok yüksektir. Su ile hemen sertleşir” (Kavas, 2002). “Etkisini yavaşlatmak için klinker alçıtaşı ile öğütülür” (Yeğınobalı, 2003). “Nitrik asit dağlamasında koyu gri renk verir. C₄AF, klinker kütlesinin % 0-18'i arasında olabilir. Kristal yapısı dendritik ve prizmatiktir. Parlak kesitte kılıç formunda ince uzun görüntü verir. Nitrik asit dağlamasında ferrit parlak refleksiyonu nedeniyle açık gri renk verir” (Felekoğlu, 2005).

Kalker ve kil gibi ham maddeleri orantılayıp farini oluştururken bu dört ana bileşenin göreceli miktarlarını değiştirmek ve yeni bir ham madde veya katkı kullanmadan elde edilecek çimentoya bazı özellikler kazandırmak mümkün olmaktadır. Örneğin

C_3S miktarını yükselterek erken dayanımı yüksek çimento, C_3A miktarını azaltarak sülfatlara dayanıklı çimento, C_2S miktarını arttırıp C_3S ve C_3A 'yı azaltarak düşük ısıli çimento üretmek mümkün olur (Yeğınobalı, 2003).

Klinker bileşiminin geri kalan küçük (%10 civarındaki) bölümü serbest CaO , MgO ile alkali oksitler ve SO_3 bulunur. İleride çimento ürünlerinde hacim genleşme ve çatlamalara yol açma olasılıklarından dolayı bu oksitlerin miktarları sınırlandırılır.

Sonuç olarak tipik portland çimentolarının kimyasal bileşimleri % değerler olarak genellikle aşağıdaki Tablo 2.6'deki sınırlar arasında değişir.

Tablo 2.6 Genel portland çimentosunun kimyasal (%) bileşimi (Yeğınobalı, 2003)

Kimyasal Kompozisyon	Miktarı (%)
CaO	% 60-67
SiO_2	% 17-15
Al_2O_3	% 3-8
Fe_2O_3	% 0,5-6
SO_3	% 1-3
MgO	% 0,1-4
Alkaliler	% 0,2-1,3

2.3.1.8 Klinkerin Çimentoğa Geçiş Aşaması

Soğutucudan çıkan klinker çimento üretiminde bir ara ürün sayılır. Çimento, klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütölmesi sonucu elde edilir. Klinker kalsiyum sülfat ile doğrudan fabrikada öğütöllebilir veya bu amaçla başka yerlerdeki öğütme tesislerine gönderilir.

Yaklaşık 2 cm çapındaki klinker tanelerinin çimento tanesi inceliğine kadar öğütölmesi gerekir. Çimento tane boyutları genellikle 40 mikronun altında , ortalama

15-20 mikron (0,0015 - 0,0020 cm) olduğuna göre, bu aşama sonunda klinker tanesinin 1000 kere kadar küçültülmüş olması gerekmektedir.

Klinker ve alçının öğütülmesinde daha çok bilyalı değirmenler kullanılır. Yaklaşık 3 m çapında çelik silindir şeklindeki değirmenlerde hacimlerinin üçte birine kadar çelik ezici bilyalarla doldurulmuş bölmeler bulunur. Silindir dönerken bilyalar klinker tanelerine çarparak onları ufalarlar. Son bölmede istenilen incelik elde edilmiş olur. Klinker doğrudan soğutucudan gelmişse hala 50-100⁰C arası sıcaklıktadır ve öğütme sırasında değirmen içine basınçlı su verilerek sıcaklığın artması önlenmiş olur.

Klinkere öğütme sırasında ağırlıkça % 3-5 arası kalsiyum sülfat katılır. Bu işlem çimentonun su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonların ve katılaşma sürecinin kontrolü bakımından zorunludur. Son yıllarda öğütmeyi kolaylaştırıcı bazı kimyasallar da bu aşamada klinkere katılmaktadır.

Bu şekilde elde edilen portland çimentosuna klinker ile kalsiyum sülfatın öğütülmesi sırasında veya ayrıca öğütülmüş olarak bazı mineraller katkıları katılarak değişik tipli çimentoların üretilmesi de giderek yaygınlaşan bir uygulamadır (Yeğınobalı, 2003).

2.3.2 Yüksek Belit Çimentoları

2.3.2.1 Genel

Çimento klinkeri kuru sistemde yaklaşık 850 kcal / kg klinker enerji sarfiyatı ile üretilmektedir. Bu enerjinin büyük bir kısmı kalkerden gelen kalsiyum karbonatın bozunması ve pişme sıcaklığının 1450⁰C de tutulması için sarf edilmektedir. Farin kalsiyum karbonat miktarını azaltarak yada klinkerizasyon sıcaklığını düşerek enerjisi sarfiyatı azaltılabilir. Yüksek Belit Çimentoları (YBÇ) oluşumu kireç ihtiyacını azalttığı gibi klinkerizasyon sıcaklığını da düşürmektedir. Bunun için klinkerdeki alit miktarının azaltılıp yüksek hidrolik aktivite özelliğine sahip belit

miktarının artırılması gerekmektedir. Klinkerizasyon sıcaklığı hammaddeye katkı eklenerek ve farin kireç standardını 78-85 civarında tutarak düşürülebilir. Bu şekilde enerji sarfiyatı % 10-15 azaltılabilir. Aktif belit klinkerinin PÇ klinkerinden farkı hidrolik aktivitesi yüksek belit fazının dominant olmasıdır.

C_2S 'ın farklı kristal yapılara sahip 5 modifikasyonu vardır. Bunlar: α ($1425^\circ C$), α_H ($1160^\circ C$), α_L ($630-680^\circ C$), β ($<500^\circ C$), γ ($780-860^\circ C$). γ - modifikasyonu hariç hepside oda sıcaklığında metastabil haldedir. Soğutma esnasında β - modifikasyonu hidrolik özelliği pasif γ - modifikasyonuna dönüşür. β - modifikasyonları hammaddelerden gelen Al ve Fe iyonları ile kararlı hale getirilirken, yüksek sıcaklık modifikasyonları (α_H ve α) ancak Al ve Fe iyonlarının yanı sıra diğer yabancı iyonlarla kararlı hale getirilebilmektedir. Klinkerdeki C_2S , C_3S 'dan daha çok (% 4-6) B, K, Na, P, Ba, Sr, Ti ve Cr gibi yabancı iyonları kristal yapısına / katı çözeltiye, alma kapasitesine sahiptir (Gürbüz, 2005).

2.3.2.2 Belit Çimentoları

Genel olarak belit çimentosu PÇ'ye göre erken dayanıma katkısı az olup ileri yaşlarda yüksek mukavemet kazandırmaktadır. Bunun aksine, YBÇ'larında belit fazının reaktivitesi yüksek seviyelerde olup betona erken dayanım özelliği kazandırmaktadır. Bu çimentolar, literatürde Reaktif veya Aktif Belit Çimentoları (ABÇ) olarak adlandırılmaktadır. ABÇ klinkerinin PÇ klinkerinden farkı alit yerine hidrolik aktivitesi yüksek belit fazının (α_H , α ve β modifikasyonları) klinkerde temel faz olmasıdır.

Bor oksit kullanılarak aktif belit çimento yapımı oldukça ümit vericidir. 88 kireç standardına sahip % 2,5 B_2O_3 (% 8 kolemanit eşdeğerinde) kullanılarak oluşturulan modifiye klinker iyi erken dayanım ve mükemmel dayanım gelişimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Son günlerde, laboratuvar ölçeğinde bor oksit modifiye çimento üretimi Türkiye'de yapılmıştır. Bu çalışma ile , α , α_H yüksek sıcaklık modifikasyonları içeren aktif belit oluşumu $1325^\circ C$ sıcaklıkta sentezi başarılı olarak gerçekleştirilmiştir (Gürbüz, 2005).

Kireç standardı yaklaşık 80, alkali içeren PÇ özelliğine sahip çimento üretiminde, alkali-agrega reaksiyonuna dayanıklı çimentolar üretilmiştir. Özellikle % 1.5 Na₂O eklenerek pişirilen ve hızlı soğutma işlemi uygulanarak % 50 belit (β -C₂S) ve % 30 alit içermesi gerektiği belirtilmiştir. Bu çimentoların teknik açıdan kullanışlı olduğu görülmüştür. Erken dayanım özelliği kazandırılması için bu tip çimentoların gerektiği belirtilmiştir.

Diğer geçiş elementlerinin yanında, krom oksit de modifiyer olarak kullanılmıştır. Bu konuda yapılan en son çalışma ile optimum % 5 krom oksit kullanılarak aktif belit klinkeri üretildiği doğrulanmıştır. Bu çimentolar, % 78-80 belit (β -C₂S) ve %0'a yakın alit içermekte olup erken ve ileri yaşlarda hidrolik aktivitelerinin oldukça iyi olduğu gözlenmiştir. Bu değiştirici ile Aktif Belit Çimento (ABÇ) yapım prosesinde düşük kalitede hammadde ve çimento üretim prosesine uygun olmayan krom içeren çeşitli yan ürünler kullanılabilmektedir.

Termodinamik açıdan bakıldığında, yüksek sıcaklık modifikasyonu α -C₂S'in en yüksek reaktivite özelliğine sahip olması beklenirken, pratikte belit çimento konusu çok daha komplekstir. Literatürde, birbirinden tamamen farklı ve çelişkili sonuçlar yayınlanmış olmakla birlikte farklı kimyasallarla kararlı hale getirilen aynı polimorf farklı reaktivite özelliği gösterebilmektedir (Gürbüz, 2005).

2.3.2.3 Ybç / Abç Özellikleri

Özellikleri: Düşük hidrasyon özelliği, sıcaklıkla oluşabilecek çatlakların kontrol edilebilmesi, yüksek dayanıma sahip yüksek akışkanlı beton yapımı, sıcaklık yükselmesinin kontrolü (Gürbüz, 2005).

BÖLÜM ÜÇ

BOND ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK TESTİ

Maden işletme işlemlerinden geçirilmiş cevherlerin işe yarar hale getirilebilmesi için zenginleştirme işlemlerinde önce cevher içerisindeki faydalı minerallerin serbest hale getirilmesi gerekmektedir. Ufalama işlemlerinde enerji maliyeti fazla enerji sarfiyatından dolayı çok yüksek olmaktadır. Maliyeti düşürmek açısından ufalamanın gerektiğinden fazla olmaması, ufalama ekipmanlarının uygun seçilmesi ve ekonomiklik açısından optimum şartlarda çalıştırılması gerekmektedir. Bu nedenle malzemeni öğütülebilirliğinin tespiti önem arz etmektedir (Özkahraman, 1997).

Bu işlem için cevher ufalama (kıрма ve öğütme) ve sınıflandırma işlemlerine tabi tutulur. Ufalama, katı tanelerin daha küçük boyutlara indirilmesi ile yeni yüzeylerin oluşturulması işlemi olup, bilim ve teknolojiye çok fazla uygulama alanı bulunmaktadır. Bu işlem için büyük enerji faydalı işe, yani yeni yüzeylerin oluşmasına harcanır. Özellikle ince ufalama, yani öğütme (-1cm) verimsiz bir işlem olup, toplam enerji girdisinin ancak % 1 kadarı yeni yüzeylerin oluşması için harcanır. Geri kalanı ise ısı, ses, sürtünme gibi enerji türleri olarak kaybolmaktadır. Günümüzde üretilen enerjinin % 5'inin ufalanmakta harcanmakta olduğu düşünülürse kıрма, öğütme makinalarında meydana gelen enerji kayıplarının nedenini aramanın önemi büyüktür. Cevher minerallerinin öğütülebilirliği onların mineralojik karakterlerini değiştirmemesi açısından önemli bir faktördür. Bu ufalama işlemi için verilen enerji ile ufalanmada sarf edilen enerji miktarları arasındaki ilişkileri ortaya çıkarabilmek için bu güne kadar pek çok hipotez ortaya atılmıştır. Bu hipotezler ufalamadan önce ve sonra materyalin doğal ve madensel fonksiyonu, biçim ve boyutu bakımından ufalama için gerekli enerji miktarını belirlemeyi amaçlamıştır. En önemli kanunlar Rittinger, Kick ve Bond tarafından ortaya atılmıştır. Rittinger (1867) ufalama olayını yüzey enerjisi artışı yönünden ele almıştır. “Ufalama için verilen enerji meydana gelen yeni yüzeylerle orantılıdır.” Tezini savunmuştur. Kick (1885) olayı tane hacmi küçülmesi yönünden ele almış ve homojen kayaçların kırılmasında hacim küçülmesi ile orantılı bir enerji sarfı gerektiğini iddia etmiştir (Matziminov, 2001).

Bond (1951) ise 25 yıllık deneyim ve araştırma sırasında şu sonuca varmıştır; belirli bir işlem için gereken (kıırma-öğütme) enerji ortalama olarak Rittinger ve Kick kanunlarının ortasındadır. Harcanan enerji işi meydana getiren çatlak uzunlukları ile orantılıdır. Çatlak uzunlukları ise kırılma sonunda yeniden meydana gelen yüzeylerin karekökü ile ters orantılıdır. (1)

$$W = 10.W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

W_i: Değirmenin çektiği enerji (Kwsa/ton)

P : Kırılmış malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı. (mikron)

F : Kırılacak malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı. (mikron)

W : Bond iş endeksi. (Kwsa/ton)

Tablo 3.1 Hukki tablosu (Matazimov, 2001)

Kw.sa./ton	Primer Kırma 1m-100mm	Sekonder Kırma 100mm-10mm	İri Öğütme 10mm-1mm	İnce Öğütme 1mm-100µm
Rittinger Ka. Hesaplanan Enerji	0,009	0,090	0,900	9,0
Kick Kanunu Hesaplanan Enerji	2,50	2,50	2,50	2,50
Bond Kanunu Hesaplanan Enerji	0,220	0,690	2,18	6,91
Pratikte Harcanan Enerji	0,350	0,600	1,60	10,00

Ufalama için gerekli enerji miktarı ile elde edilen ufalama derecesi arasındaki ilişkileri ifade etmeye çalışan bu teoriler pek çok görüşün çıkmasına neden olmuştur. Genel kanı ince öğütmede Rittinger, kırma işlemlerinde Kick, bunlar arasında ise Bond kanununun doğru olduğu yönündedir (Matazimov, 2001).

Bond'un olaya iş endeksi (Work Index) parametresini katmış olması diğer teoriler arasında gerçeğe yakınlık açısından önem arz etmektedir. İş endeksi, malzemenin kırılma ve öğütmeye karşı gösterdiği direnci ifade etmektedir (Matazimov, 2001). Bu sınırsız büyüklükteki parçalardan meydana gelmiş bir malzemenin birim ağırlığının (1 ton) % 80'inin, 100 mikron altına geçecek şekilde ufalanması için gerek duyulan spesifik iş girdisi (kWh/t) tanımlanır (İpek, Uçbaş ve Hoşten, 2005).

3.1 Bond İş Endeksinin Belirleme Yöntemleri

Son yıllarda Bond İş Endeksinin hesaplanması için pek çok yöntem denenmiştir. Her bir yöntemin kendine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Özel bir değirmen gerektirmesi,
- Oldukça fazla miktarda numune gerektirmesi,
- İş endeksi bilinen standart numuneler gerektirmesi,
- Zaman alıcı ve uğraştırıcı olması.

Buna karşılık, standart laboratuvar tipi bilyalı değirmeni, Bond bilyalı değirmenine göre daha küçük boyutludur (200x300 mm). Bu yüzden daha az miktarda numune gerektirir ve test daha hızlı bir şekilde yapılır. Bu metotla birlikte iş endeksi bilinen diğer bir numuneye ihtiyaç yoktur (Matazimov, 2001).

3.2 Bond İş Endeksinin Bilyalı Değirmen İle Belirlenmesi

Son yıllarda Tahran Üniversitesi araştırmacıları, iş endeksini basitleştirilmiş Anakonda Yöntemini Denver Laboratuvarlarında bilyalı değirmen kullanarak belirlediler.

$$W_i = 5,54 \cdot \left[\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}} \right] \quad (2)$$

Araştırmacılar (2) nolu eşitlik yolu ile 16,12 kg çelik bilyalar içeren (305-127 mm) ebatlarında değirmen kullanarak, iş endeksinin belirlenmesine çalıştılar. Ayrıca standart Bond bilyalı değirmeni işlemine benzer fakat daha küçük ve bunun sonucu olarak taşınabilir bir değirmen kullanarak yeni endeks belirlenmesi girişiminde bulundu (Matazimov, 2001).

3.3 Yöntemin Tanımlanması Ve Test Araçları

Standart Bond öğütülebilirlik testinde olduğu gibi bu yöntemde kararlı duruma ulaşana dek sürdürülen kapalı devre kuru sürtünmeli değirmen esasına dayalı bir yöntemdir. Bu test, Standart Laboratuvar Tipi Bilyalı Değirmen olarak adlandırılan özel bir değirmen ile yürütülür. Değirmen ebatları 200x300 mm olup, oranlar standart Bond Değirmeninden 2/3'e varan oranlarda aşağı boyuta indirgenmiştir. 5,9 kg ağırlığında, 85 parça çelik bilya ile yüklenen değirmenin bilya şarj adeti ve bilya çapları Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Standart laboratuvar tipi bilyalı değirmenin bilya şarj adeti ve bilya çapları (Matazimov, 2001)

Bilya Çapı (mm)	Bilya Adedi
38,10	13
31,75	20
25,40	3
19,05	21
15,87	28
Toplam	85

3.3.1. Test Uygulaması

Cevher Standart Bond Testindeki 700 cm³ yerine 207 cm³'lük bir hacme uyarlanmıştır. Test tıpkı, Standart Bond Testindeki gibi % 250'lik bir geri dönüş yükü ile uygulanır. Birim devir başına öğütülebilirlik sabitlendiğinde, son üç devir için öğütülebilirlik ortalaması (Gi) alınır. İş endeksinin hesaplanması için (3) nolu eşitlik kullanılır.

$$W_i = \left(\frac{11,76}{P_i^{0,23}} \right) \left(\frac{1}{G_i^{0,75}} \right) \left(\frac{1}{\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}} \right) \quad (\text{Kwh/shortton}) \quad (3)$$

P_i : Testin yürütüldüğü elek açıklığı (mikron)

G_i : Öğütülebilirlik ortalaması (gr/dev)

P : Öğütülmüş malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron)

F : Besleme malının % 80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron)

W : W_i * 1,1 (Kwh/ton)

3.3.2 Deneyisel Çalışmalar

Testler Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarında yapılmıştır. Fabrikalardan gelen 10-15 kg'lık klinkerlerin

çapı 1cm ile 3 cm arasında değişmektedir. Bond Testine tabi tutulacak klinkerler önce iki kez çeneli kırıcıdan geçirilmiştir. Klinker çeneli kırıcıdan birinci kez geçirildiğinde çeneli kırıcı çıkış açıklığı 2 cm olarak ikinci kez çeneli kırıcıdan geçirildiğinde ise çeneli kırıcı çıkış açıklığı 1 cm olarak ayarlanmıştır. Daha sonra çeneli kırıcıdan geçirilen klinkerleri, merdaneli kırıcıdan 5 kez, ağız açıklığı kademeli olarak küçültülerek, kırma işlemi, malzeme 3,35 mm'nin altına indirilene kadar devam etti. 3,35 mm'nin altına indirilen klinker örnekleri, her numune poşetinde yaklaşık 300-350 gr olacak şekilde santrüflü ayırıcıdan ayrılarak poşetlere konuldu. Bunun amacı Bond Testinde elek altı kadar malzemeyi (150 μ m'nin altındaki malzeme) çıkarıp, besleme malından doğru ve hassas bir numune alınmasının sağlanmasıdır. Değirmeni besleyeceğimiz malzemenin hacminin 207 cm³ olduğu bilinmektedir. Değirmene beslenecek olan malzemenin ne kadar ağırlığa sahip olacağını tespit etmek için yoğunluğunun (kaba yoğunluğunun) bilinmesi gerekmektedir.

İki fabrikadan gelen dört klinker örnekleri için kaba yoğunlukları hesaplanıp, besleme malı ağırlıkları tespit edilmiştir. Teste başlamadan önce besleme malının (- 3,35 mm'lik malzemenin) elek analizi yapılmıştır. Böylece besleme malının %80'inin geçtiği (F₈₀) tespit edilmiştir. Testte Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nün Bond Testi için hazırlanmış olduğu bir bilgisayar programı yardımıyla devam edilmiştir (Kaya, Fletcher ve Thompson, 2003).

Bu program, bazı istenen veriler girildikten sonra, otomatik olarak değirmenin her öğütme başına kaç devir dönmesi gerektiğini % 250 geri dönüş yükünü sağlayacak şekilde bize verir.

Excel programı yardımıyla hazırlanmış olan bu test programına ilk önce besleme malının elek analizi verileri girilir. Laboratuardaki değirmene kuru olarak, modifiye edilmiş Bond Testinde tespit edilmiş miktar ve çaptaki bilyalarla birlikte besleme miktarı belli olan 3,35 mm'nin altındaki numune şarj edilir.

Değirmenin hızı kritik hızın % 80'i kadar dönecek şekilde ayarlanır. Daha sonra değirmen 150 kez (devir) döndürülür. Hassas bir şekilde değirmen boşaltılarak ve bilyalar elenerek öğütülen numuneler alınmıştır. Çıkan ürün 150 μm 'lik elekten geçirilir. Elek altında kalan malzeme dışarı alınıp kaldırılır ve bu malzeme ağırlığı kadar 3,35 mm'nin altındaki klinker örneğinden hassas bir şekilde numune alma yöntemiyle alınıp elek üstündeki malzeme ile birlikte tekrar değirmene beslenir. Elek üstünde kalan miktar programda yerine yazılır. Bunun devamında program bize bilyalı değirmenin kaç devir dönmesi gerektiğini gösterir. Bu işlem devreden yük 2,5'e (250/100) yaklaşıncaya kadar devam ettirilir. Öğütmelere son verildikten sonra en sonda aldığımız 150 μm 'nin altındaki üründen numune alarak tekrar ürün elek analizi yapılır. Belirlenmiş fraksiyonlardaki miktarları bilgisayara girilir. Böylece ürünün % 80'inin geçtiği aralık (P_{80}) tespit edilir. Gram başına öğütme miktarlarının (G_i) son üçünün ortalaması alınıp bilgisayara girilir. İşlem sonunda program bize İş Endeksini verir.

Bu işlemin güvenilirliğinin tespiti için aynı malzemeye üç kez Bond Testi uygulanmıştır. Bu işlemin güvenilirliğinin tespiti için aynı klinker örneğine 3 kez Bond Testi uygulanmıştır. Tekrarlanan 3 testinde aynı numunelerde yakın sonuçlar vermesi testin güvenilirliğini göstermektedir. İki ayrı fabrikadan alınan 4 farklı klinker örneklerinin Bond İş Endeks tayinleri bu çalışmanın sonundaki Ekler kısmında verilmiştir.

İlerideki aşamalarda klinker mikroskobik incelemelerinde klinker örneklerinin öğütülebilirlikleri hakkında karşılaştırma yapılırken tekrarlanan Bond İş Endeks değerlerinin, ortalaması alınan değerler üzerinden yorum yapılmıştır. Tablo 3.3'de dört klinker örneğinin 3'er kez uygulanışındaki karşılaştırmaları ve ortalamaları verir.

Tablo 3.3 Çimento klinkerlerinin iş endeksleri

Klinker Örnekleri	Wi (İş Endeksi, kwh/ton)		Ortalama İş Endeksi (kwh/ton)
A1 klinkeri	Test 1	17,41	17,47
	Test 2	17,30	
	Test 3	17,70	
A2 klinkeri	Test 1	17,59	17,05
	Test 2	16,13	
	Test 3	17,43	
B1 klinkeri	Test 1	16,09	15,85
	Test 2	15,24	
	Test 3	16,22	
B2 klinkeri	Test 1	15,26	15,61
	Test 2	16,46	
	Test 3	15,11	

Tablo 3.3'deki; A1, A2, B1 ve B2 verileri fabrikalardan alınan klinker örneklerinin kodlarını temsil etmektedir.

Ayrıca testin başında 3,35 mm'nin altına indirilen malzemelerden alınan belirli miktarlardaki ürünler 150 µm'nin altındaki ürünler kullanılarak 4 klinker örneğinin hidroskobik nemleri hesaplanmıştır. Tablo 3.4 de klinkerlerin hidroskobik nem değerleri verilmiştir.

Tablo 3 .4 Klinkerlerin hidroskobik nem oranları

Klinker Örnekleri	Nem Oranı (%)
A1 klinkeri	0,003
A2 klinkeri	0,003
B1 klinkeri	0,002
B2 klinkeri	0,001

Tablo 3.5 Dört farklı klinker örneğinin porozite ve faz oranlarının miktarları

	A1 klinkeri (%)	A2 klinkeri (%)	B1 klinkeri (%)	B2 klinkeri (%)
P	37,77	35,31	26,21	22,701
A	37,47	39,91	42,52	48,088
B	18,61	19,69	25,76	20,964
AF	6,15	5,09	5,50	8,247
Wi	17,47	17,05	15,85	15,61

Tablo 3.5'teki; P : Klinkerdeki poroziteyi (gözenek),

A : Klinkerdeki alit fazını,

B : Klinkerdeki belit fazını,

AF : Klinkerdeki ara fazları,

Wi : Bond İş Endeksini temsil etmektedir.

Kimyasal bileşenler ile R.H. Bogue'ye göre potansiyel faz miktarları hesaplanabilir. Bu hesaplamanın ön koşulu klinker eriyiğinin katı fazlar ile dengede kristalleşmesidir, bu durum pratikte gerçekleşmez. Stoikiometrik fazlar, saf C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF fazlarıdır. Pratikte ise yabancı iyonlar klinker fazlarının içine girerler (Altun, 1998, s. 22). Bu yüzden de Tablo 3.6'da görüldüğü gibi Bogue analizi ve mikroskobik incelemelerdeki % miktarlar farklılık göstermektedir.

Tablo 3.6 Bogue formülü tarafından hesaplanan klinker kristal fazlarının % kompozisyonu ile mikroskopik incelemelerde tespit edilen % miktarlar

Klinker Örnekleri	Bogue Değerlerine Göre Fazların % Kompozisyon				Mikroskopik İncelemelerde Tespit Edilen % Miktarlar		
	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF	C₃S	C₂S	C₃A + C₄AF
A1	58,530	17,995	7,294	10,778	60,212	29,91	9,88
A2	60,234	15,873	6,865	11,031	61,69	30,44	7,87
B1	57,227	19,587	12,313	7,547	57,62	34,91	7,45
B2	66,01	8,345	12,149	7,699	62,21	27,12	10,67

BÖLÜM DÖRT

KLİNKER FAZLARININ OPTİK MİKROSKOP VE GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANARAK İNCELENMESİ

Çimento klinkeri üretiminde klinker porozitesi, karma oksitlerinin kompozisyonu ve yapısı pek çok faktöre bağlıdır. Meydana gelen klinker özellikleri, ham karışımın homojenliğine, tane boyut dağılımına, içerdiği safsızlıklara, üretimde kullanılan ön ısıtma sistemine, döner fırının teknik özelliklerine, ısıtma ve soğutma rejimine bağlı olarak değişir. Bu derece çok faktörün etkili olduğu klinker üretiminde, yüksek performanslı veya kullanım amacına uygun çimento üretebilmek için gerekli klinkerin özellikleri sürekli kontrol altında tutulmalıdır. Hammadde optimizasyonu açısından, silikat ve alüminat modülleri veya kireç doygunluk faktörü uygulamada sıkça kullanılmaktadır. Bu modüller belli sınırlar arasında tutularak hammadde kaynaklı klinker problemleri en aza indirilmekte ve döner fırında hammaddenin refrakterle herhangi bir şekilde reaksiyona girmesi engellenmektedir. Böylece döner fırın refrakter kaplamasının da ekonomik ömrünün uzaması sağlanmaktadır (Felekoğlu, 2005).

Klinkerin özelliklerini ham karışım faktörleri (ham karışımın mineralojik ve kimyasal bileşimi, granülometrisi, akışkanlandırıcı ve mineralizatör gibi katkı maddeleri v.d.) ve fırın koşulları (fırın atmosferi, yakıt tipleri, sinterleme sıcaklığı ve süresi, ısıtma ve soğutma hızı, fırın sistemleri v.d.) etkiler (A. Altun, 1999 b, s. 33).

Fazların klinker kompozisyonundaki oranlarının yanı sıra, kristal yapıları ve boyutları da, farklı üretim koşullarında üretilen klinkerlerin öğütülmesi ile elde edilecek çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkiler. Hazırlanacak parlak kesitlerde polarizan mikroskop incelemeleri ile klinkerin bu özellikleri hakkında bilgi elde edilebilir. Özellikle, görüntü işleme programlarının gelişmesi parlak kesit incelemelerinin hızlı ve güvenilir yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu programların kullanılması ile, kalite kontrol sürecinde klinker özelliklerinde herhangi bir değişiklik olması durumunda ritim sistemine hızlı müdahale etmek mümkün olmaktadır (Felekoğlu, 2005).

Mikroskobik araştırmalarda klinker fazlarının oluşum, boyutu, dağılımı ve miktarı belirlenir. Klinker fazlarının miktarı klinkerin kimyasal bileşenlerine bağlıdır. Klinker fazlarının oluşumu ve dağılımını üretim koşulları (ham karışımın ince öğütölmesi, tane boyu dağılımı, en büyük tane homojenliği, ısıtma hızı, sinterleme sıcaklığı ve süresi, soğutma hızı v.d.) belirler. (Altun, 1998, s. 23).

Klinker silikat kristallerinin tane boyutları eşdeğer çapları hesaplanarak ortaya konulabilir. Eşdeğer ap bir kristal kesitinde kesit alanının ağırlık merkezinden geçen en uzun ve en kısa iki uzunluğun ortalaması alınarak belirlenir. 15-20 μm eşdeğer çaplı alit kristalleri, klinkerin kolay öğütölmesinde ve çimentonun erken mukavemetinde olumlu etki sağlar. Eşdeğer kristal çapı 25-60 μm olan belit kristalleri, ham karışımdaki kuvars tanelerinin yeterli öğütölmemesinin ya da ısıtma-soğutma rejiminin bir sonucu olarak oluşabilir. Özet olarak, silikat kristallerinin tane boyut dağılımlarının polarizan optik mikroskop ve görüntü işleme programları ile incelenmesi, hammadde seçimi ve ısıtma-soğutma rejiminin optimizasyonu için üreticiye yol gösterir (Felekoğlu, 2005).

Pişmiş klinker fırın kafasından soğutmaya dökölür. Bu sırada 1100-1300⁰C arasında değişir. Burada süratle soğutulur. Vantilatörlerin üflediği soğutma havası aynı zamanda ısınır ve fırına sekonder hava olarak verilir. İyi bir klinker pişirmek için yakıt miktarının, hammadde ter kibinin önemli olması kadar en doğru alev şeklinin de seçilmesi de çok önemlidir. İyi bir işletmeci bunun en uygun olanını seçmelidir. Mesela uygun bir alevde sinter bölgesi uzar Alit kristalleri büyür. Klinker alev mıntıkasını terk ettiği an Alit C_2S ve CaO ayrışır kalite bozulmuş olur (Kavas, 2002).

Klinker taneciğinin soğutma şekli incelenirse;

Hızlı Soğutulmuş Klinkerde: Hekzogonal kristal yapısında C_3S kristalleri üzerinde süratli soğutmada termal presleme neticesinde meydana gelmiş çatlaklar mevcuttur. Bu çatlaklar hidrolik aktiviteyi ve öğütme kabiliyetini arttırır. İyi soğutulmuş bir klinkerde kristal uçlar keskindir (Kavas, 2002).

Klinkerin mikroskobik incelemelerinde gözeneklerin (porozite) büyüklüğü ve şekli sinterleşme koşulları hakkında bilgi verir. Yüksek porozite ile büyük, uzun ve birbiriyle birleşen gözenekler klinkerin yeterli sinterleşmediğini gösterebilir. Küçük ve yuvarlak gözenekler ise iyi sinterleşmenin işaretidir (Felekoğlu, 2006).

4.1 Deneysel Çalışma, Yöntem Ve Bulgular

4.1.1 Klinker özellikleri

B1 ve B2 klinkerleri ızgaralı soğutucu döner fırınına aittir. B1 klinkerinin çıktığı fırının kapasitesi B2 klinkerlerinin çıktığı fırının kapasitesinden büyüktür. Ayrıca iki döner fırın arasında bazı teknik farklılıklar vardır. Bu nedenlerden dolayı B2 klinkeri B1 klinkerinden daha kolay öğütülebilmekte, buna karşılık dayanımı daha düşüktür.

A1 klinkeri ızgara tipi soğutuculu kalsinatörlü döner fırından, A2 klinkeri ise planet soğutuculu kalsinatörlü döner fırından alınmıştır. Tablo 4.1 de bu iki fabrikadan alınan 2'şer farklı klinkerlerin kimyasal analiz değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1 Klinker örneklerinin kimyasal analiz değerleri (% ağırlıkça)

Klinker örnekleri	CaO	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O
B1	66,46	21,89	6,23	2,48	1,12	0,55	0,27	0,85
B2	65,58	20,28	6,20	2,53	1,03	0,62	0,29	0,95
A1	64,80	21,678	5,014	3,542	0,955	0,649	0,268	0,862
A2	64,821	21,386	4,905	3,625	0,937	1,046	0,320	0,904

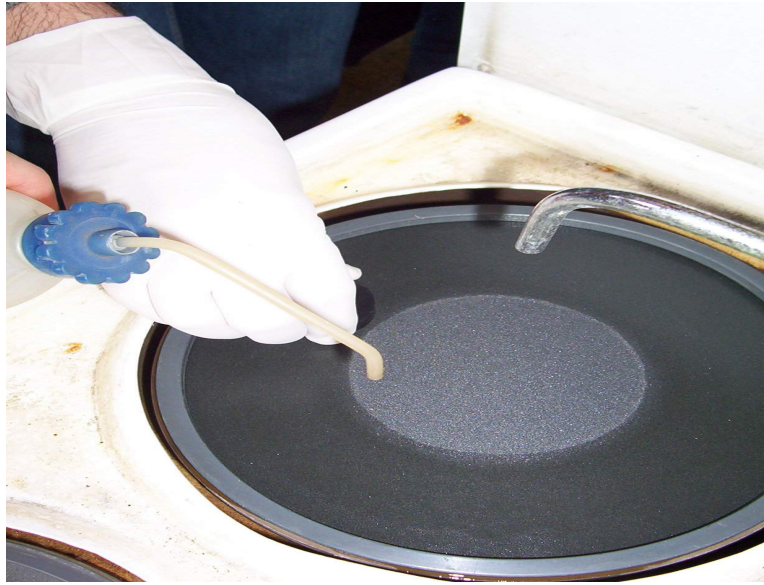
4.1.2 Klinker Parlak Kesitinin Hazırlanması İşlemi Ve Optik Mikroskop İnceleme Yöntemi

Küreye yakın bir hacme sahip klinkerler ortadan ikiye kesildikten sonra etüvde tamamen kurutulmuş ve kesilen yüz açıkta kalacak şekilde bakalit ile kalıplanmıştır. Ardından örnekler yüzeysel zımpara işlemine tabi tutulmuşlardır (Şekil 4.1). Yüzeysel zımpara işleminde, farklı tane boyutlarında silikon karbit kaplı zımpara kağıtları ve etil alkol kullanılmıştır. Kullanılan zımpara kağıdı numaraları sırasıyla 220, 400, 600, 800, 1000 ve 1200'dür. Zımparalama işleminden sonra Şekil 4.2'de elmas pasta ile numunelerin yüzeyleri 15 µm'ye kadar parlatılarak optik mikroskop incelemelerine hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan klinker parlak kesit numuneleri etil alkol içinde % 1 HNO₃ çözeltisi kullanılarak dağlanmıştır. Dağlama işlemiyle alit ve belit fazlarının renk ve geometrilerinin belirginleşmesi sağlanmıştır. Nitrik asit çözeltisinde dağlama yapıldığında alit ve belit fazları belirginleşmekte, ayrıca ara fazlar bir bütün olarak ortaya çıkmaktadır, ancak ara fazların kendi arasındaki dağılımı nitrik asit dağlaması ile net olarak belirlenememektedir. Bu nedenle, C₃A ve C₄AF ara fazlarının birbirinden ayırt edilebilmesi için farklı kimyasallarla dağlama yapılması gerekir (Felekoğlu, 2006).

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi bakalit kalıba alınan A1 klinkerinin kesiti dokuz bölgeye ve A2 klinkerinin kesiti on bölgeye ayrılmıştır. Şekil 4.4'de ise B1 klinkerinin kesiti onaltı bölgeye, B2 klinkerinin kesiti yirmi bölgeye ayrıldığı görülmektedir. Her bölgeden en az üç noktanın mikro-fotoğrafı 50 kat büyümeli optik mikroskoba bağlı fotoğraf makinası kullanılarak çekilmiştir. Her alanda çekilen fotoğraflar o alandaki porozite dağılımı hakkında bilgi vermektedir. Porozite dağılımlarının tespiti için dağlanmamış mikro-fotoğraflar kullanılmıştır. Alit ve Belit kristallerinin geometrik şekli ve çapı ile ilgili incelemeler ise daha yüksek büyütme faktörlü dağlanmış mikro-fotoğraflar kullanılarak yapılmıştır.



(a)

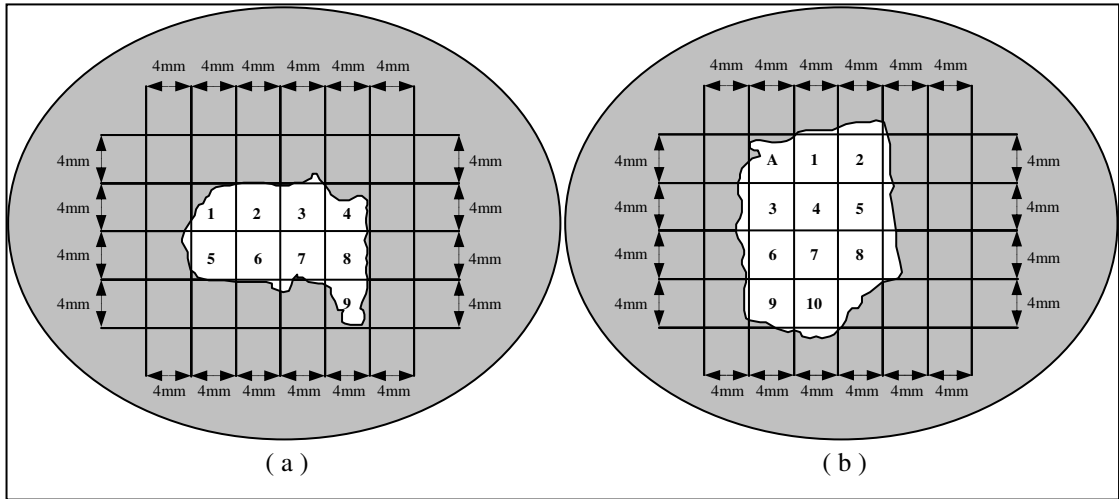


(b)

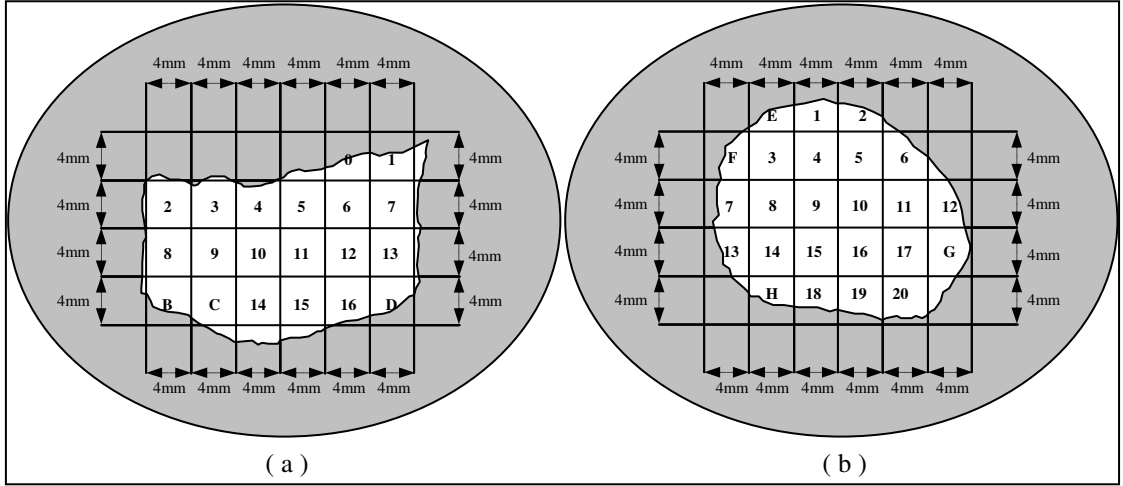
Şekil 4.1 (a, b) Bakalite alınan numunenin zımparalama işlemi



Şekil 4.2 Elmas pasta ile yüzey parlatma işlemi

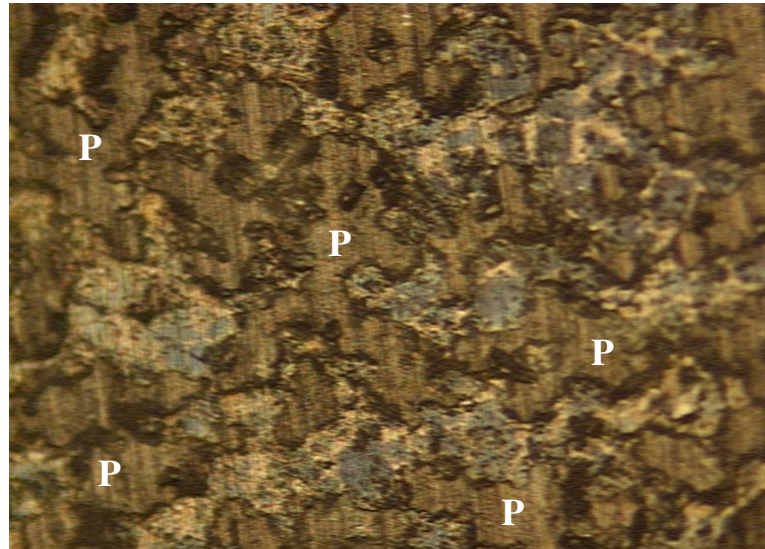


Şekil 4.3 (a) A1 klinkeri için parlak kesit numunesinin fotoğraf çekiminde kullanılan bölgeleme yöntemi ve kodları; (b) A2 klinkeri için parlak kesit numunesinin fotoğraf çekiminde kullanılan bölgeleme yöntemi ve kodları



Şekil 4.4 (a) B1 klinkeri için parlak kesit numunesinin fotoğraf çekiminde kullanılan bölgeleme yöntemi ve kodları; (b) B2 klinkeri için parlak kesit numunesinin fotoğraf çekiminde kullanılan bölgeleme yöntemi ve kodları

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'deki A, B, C, D, E, F, G ve H bölgelerindeki gözeneklerin içine bakalite alma sırasında polyester girdiği için dağlama sonrası rengi orta gri-sarı tonları arasında olduğundan gözenekler, belit ve ara fazlar birbirine karışmaktadır. Bu yüzden; Eşdeğer tane çapları hesaplamalarına dahil edilmemiştir. Şekil 4.5'de gözeneklerin içine giren polyesterin resmi görülmektedir. Şekil 4.5'deki P sembolleri gözeneklerin içine giren polyesterleri göstermektedir.



Şekil 4.5 Gözeneklerin içine giren polyester

4.2 Optik Mikroskop İncelemelerinde Kullanılan Görüntü İşleme Yöntemi

4.2.1 Fazların Ve Porozitenin Renk Dağılımının Belirlenmesi

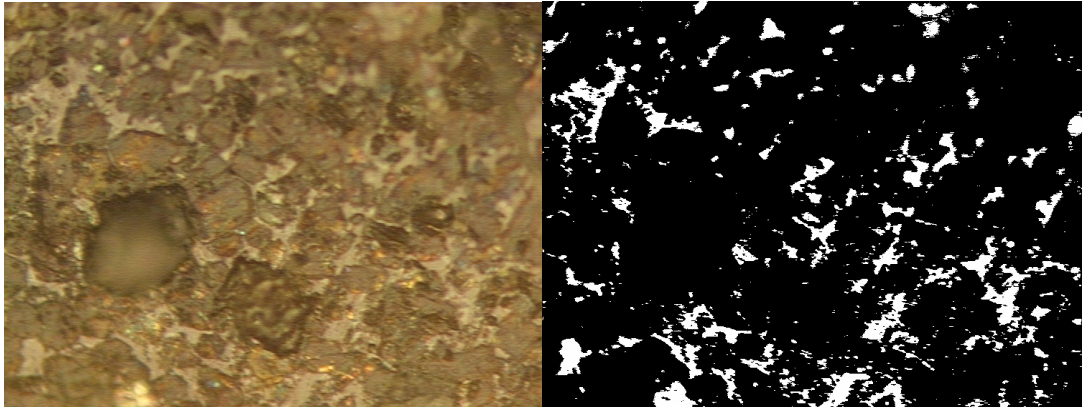
Optik mikroskop incelemelerinde, DEÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Nikon marka Eclipse ME600 model, 1000 kata kadar büyütme yapabilen bir polarizan mikroskop kullanılmıştır. Mikro-fotoğraflar, optik mikroskop üzerine monte edilmiş, JVC marka RGB TK 1070E Model dijital fotoğraf makinası ile çekilmiştir (Şekil 4.6). Numuneden alınan fotoğrafların incelenmesinde Lucy (Version 4.51-Build 028) görüntü işleme programı kullanılmıştır. Bu programda çekilen fotoğraflarda Alit, Belit fazlarının ve arafazların renk grupları ve poroziteyi temsil eden renk grubu belirlenmiştir. Belirlenen renk skala aralıkları Tablo 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.7’de klinkerdeki ara faz için görüntü işleme tekniğinin uygulanışındaki renk taraması görülmektedir. Özellikle 50 kat büyütme mikrofotografı için renk grubu dağılımının belirlenmesinde optik mikroskop çekimlerinde kullanılan ışık şiddetinin sabit kalmasına (0.76 lumen) dikkat edilmiş ve tüm fotoğraflar aynı ışık şiddeti altında çekilmiştir (Felekoğlu, 2005).

Tablo 4.2 Fazların ve porozitenin renk grubu aralıkları (ışık şiddeti = 0.76)

	Alit (C₃S)		Belit (C₂S)		Ara Faz (C₃A, C₄AF)		Porozite (Gözenek)	
Ara Renk	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır	Alt Sınır	Üst Sınır
Kırmızı	60	125	110	255	150	185	0	70
Yeşil	60	125	100	255	150	190	0	70
Mavi	60	125	25	255	110	145	0	70



Şekil 4.6 Optik mikroskop inceleme ve fotoğraf çekiminde kullanılan cihaz

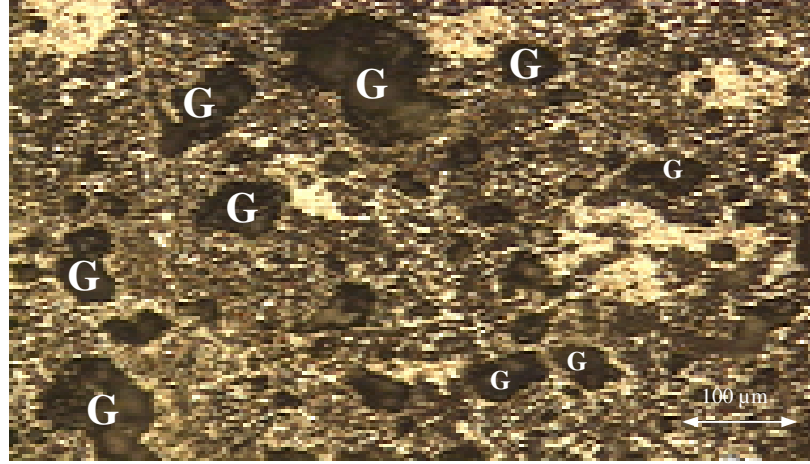


Şekil 4.7 Klinkerdeki ara fazın görüntü işleme tekniği ile renk taramasının fotoğrafı

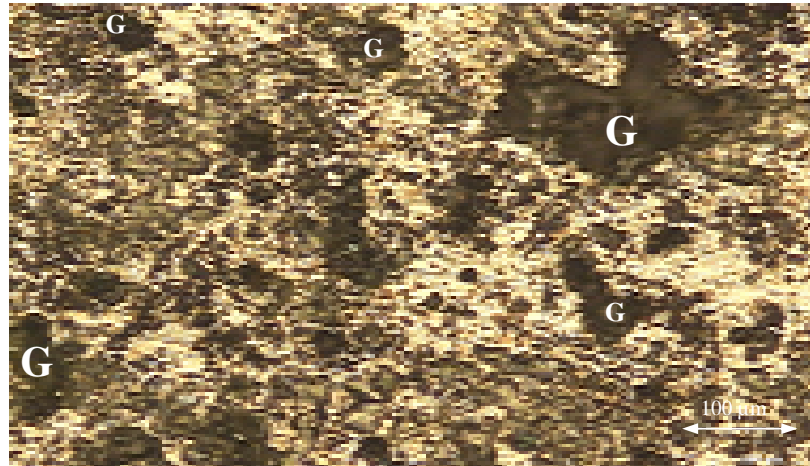
4.2.2 Porozite Dağılımı İle İlgili İncelemeler

Klinkerin porozite incelemeleri amacıyla optik mikroskop kullanılarak 50 kat büyütme mikrofotografı çekilmiştir (Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12). Klinkerdeki gözeneklerin büyüklüğü ve dağılımı tane içinde ve farklı taneler arasında çok önemli değişiklikler gösterir. Klinker tanesinin kenarlarındaki gözenekler daha küçüktür. Tanenin ortasına doğru ilerledikçe gözeneklerin büyüklüğü ve sayısı artar. Çünkü, ısı iletiminden dolayı sinterleşme tanenin kenarlarında daha iyi gerçekleşmektedir (Altun, 1998).

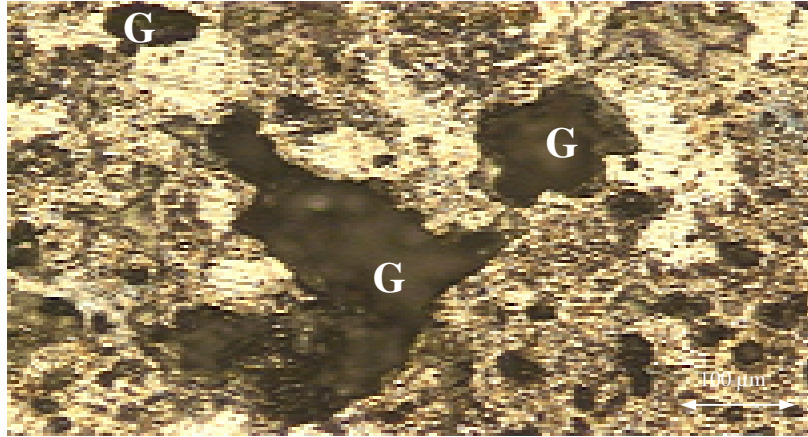
Mikro-fotoğraflarda gözenekler siyah renk olarak görülmektedir. Gözeneklerin büyük, birbiri ile bağlantılı ve uzunca olması, klinkerin yeterli sinterleşmediğini (kısa sinterleşme veya düşük sıcaklık) gösterir. Bazı alanlarda birbiri ile bağlantılı gözeneklerin uzunluğu 400-500 μm 'ye kadar çıkmıştır. Bu gözenekler gözle dahi görülmektedir.



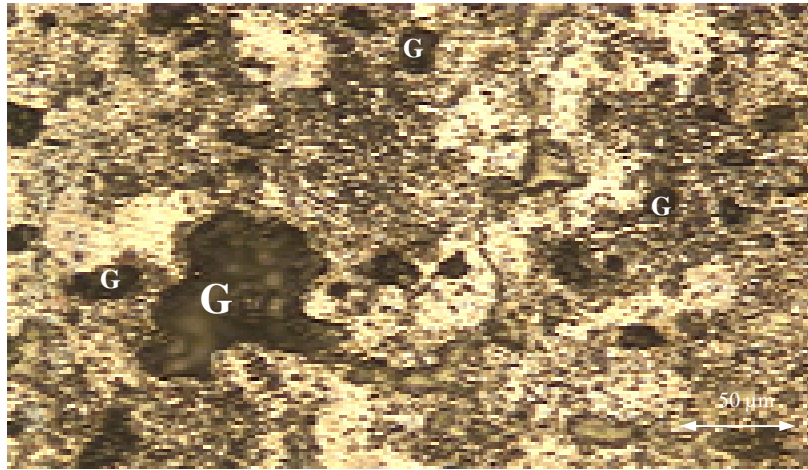
Şekil 4.8 Dağlanmamış A1 klinkerinin 50 kat büyütme optik mikroskop görüntüsü



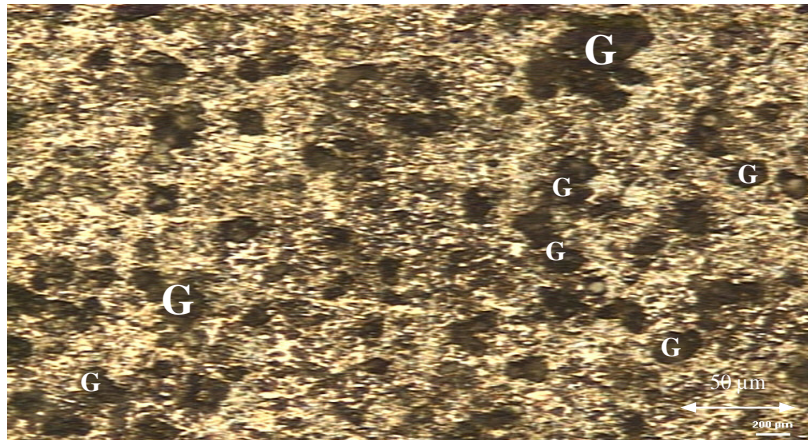
Şekil 4.9 Dağlanmamış A2 klinkerinin 50 kat büyütme optik mikroskop görüntüsü



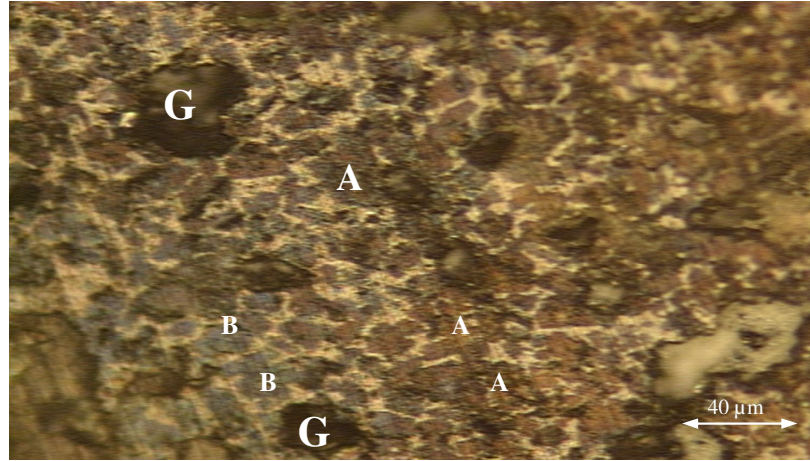
Şekil 4.10 Dağlanmamış B1 klinkerinin 50 kat büyütmeli optik mikroskop görüntüsü



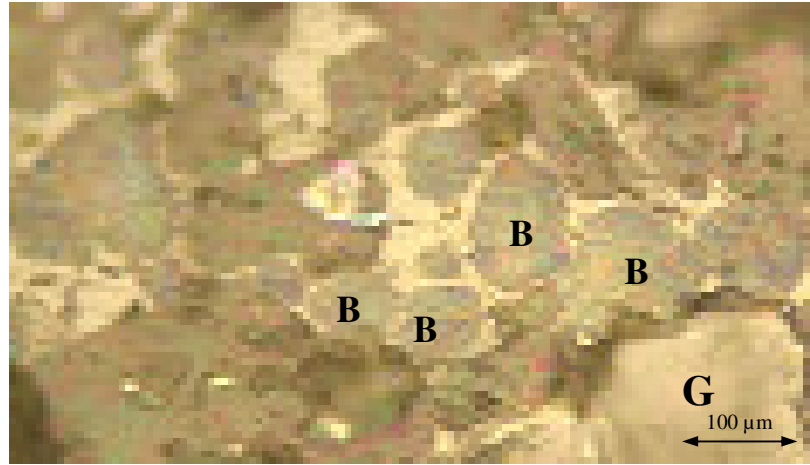
Şekil 4.11 Dağlanmamış B2 klinkerinin 50 kat büyütmeli optik mikroskop görüntüsü



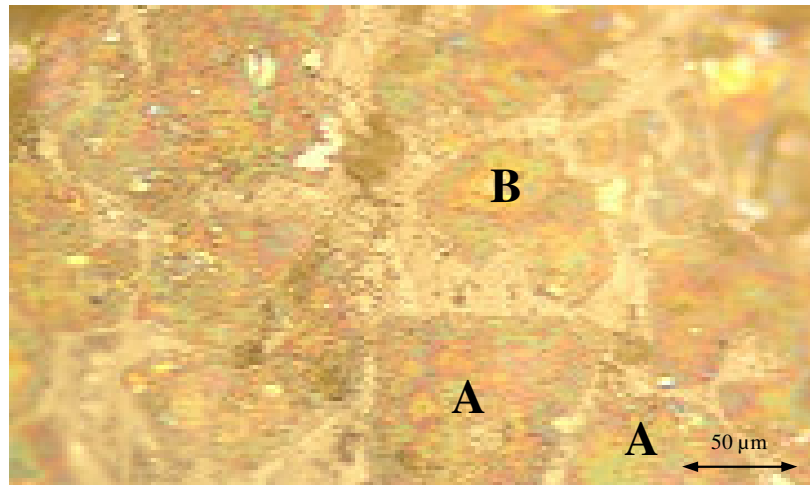
Şekil 4.12 Dağlanmamış A1 klinkerinin 50 kat büyütmeli optik mikroskop görüntüsü



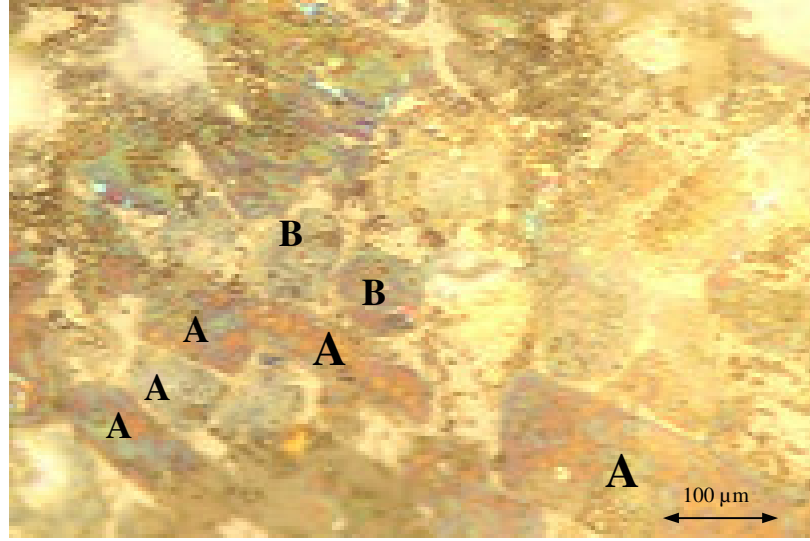
Şekil 4.13 A1 klinkeri için 100 kat büyütme, alit kristal fazının görüntüsü



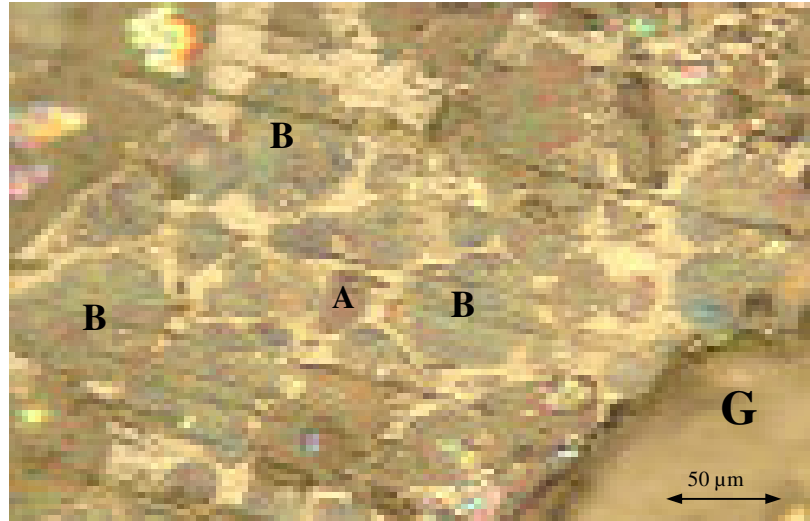
Şekil 4.14 B1 klinkeri için 200 kat büyütme, belit fazının yoğun olduğu bölgeler



Şekil 4.15 B2 klinkeri için 500 kat büyütme, alit kristal fazının görüntüleri



Şekil 4.16 B2 klinkeri için 500 kat büyütmeli, alit fazının görüntüleri



Şekil 4.17 A2 klinkerinin 500 kat büyütmeli, belit fazının görüntüleri

Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'deki;

G : Klinker örneklerindeki gözenekleri,

A : Klinker örneklerindeki alit kristallerini,

B : Klinker örneklerindeki belit kristallerini göstermektedir.

4.2.3 Klinkerlerdeki Porozite Ve Fazların Eşdeğer Tane Boyutları

Tablo 4.3 Klinker numunesindeki fazların kendi içlerinden boyutlarına göre dağılımları

Klinker Örnekleri	Alit	Belit	Porozite	Bond İş Endeksi (kwh/ton)
A1	% 99 (-8 μ m) max: 40 μ m	% 83 (-20 μ m) max: 90 μ m	% 81 (-20 μ m) max: 120 μ m	17,47
A2	% 97 (-8 μ m) max: 80 μ m	% 92 (-20 μ m) max: 115 μ m	% 89 (-20 μ m) max: 200 μ m	17,05
B1	% 95 (-8 μ m) max: 120 μ m	% 90 (-20 μ m) max: 110 μ m	% 85 (-20 μ m) max: 255 μ m	15,85
B2	% 73 (-8 μ m) max: 145 μ m	% 89 (-20 μ m) max: 200 μ m	% 71 (-20 μ m) max: 290 μ m	15,61

Klinker örneklerindeki faz ve gözeneklerin öğütme enerji sarfiyatı (kwh/ton) açısından % miktarlarından çok boyut dağılımlarının önemli olduğu bilinmektedir. Bu boyut dağılımının kolay bir şekilde görülmesi için faz ve gözeneklerin kendi aralarında incelik ve kabalık tayininde kullanılan incelik modülünün hesaplanması gerekmektedir. İncelik modülünün tespiti, yukarıdaki Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verilen toplam kümülatif değerlerin 100'e bölümüyle hesaplanmaktadır. İş Endeks ve incelik modülü karşılaştırmaları Tablo 4.7'de verilmektedir.

Tablo 4.4 Klinker örneklerindeki alit fazlarının incelik durumları

Boyut (mikron)	A1 Klinkeri miktarı		A2 Klinkeri miktarı		B1 Klinkeri miktarı		B2 Klinkeri miktarı	
	%	kümülatif	%	kümülatif	%	kümülatif	%	kümülatif
0-4	95	100	86	100	81	100	40	100
4-8	4	5	11	14	14	19	33	60
8-12	1	1	2	3	3	5	12	27
12-16	0	0	1	1	1	2	4	15
16-20	0	0	0	0	1	1	2	11
20-35	0	0	0	0	0	0	5	9
35-145	0	0	0	0	0	0	4	4
Toplam	100	106	100	118	100	127	100	227

Tablo 4.5 Klinker örneklerindeki belit fazlarının incelik durumları

Boyut (mikron)	A1 Klinkeri miktarı		A2 Klinkeri Miktarı		B1 Klinkeri miktarı		B2 Klinkeri miktarı	
	%	kümülatif	%	kümülatif	%	kümülatif	%	kümülatif
0-4	44	100	53	100	45	100	40	100
4-8	16	56	18	47	23	55	27	60
8-12	8	40	8	29	10	32	12	33
12-16	8	32	7	21	7	22	6	21
16-20	7	24	6	14	5	15	4	15
20-25	7	17	4	8	4	10	3	11
25-200	10	10	4	4	6	6	8	8
Toplam	100	279	100	223	100	240	100	248

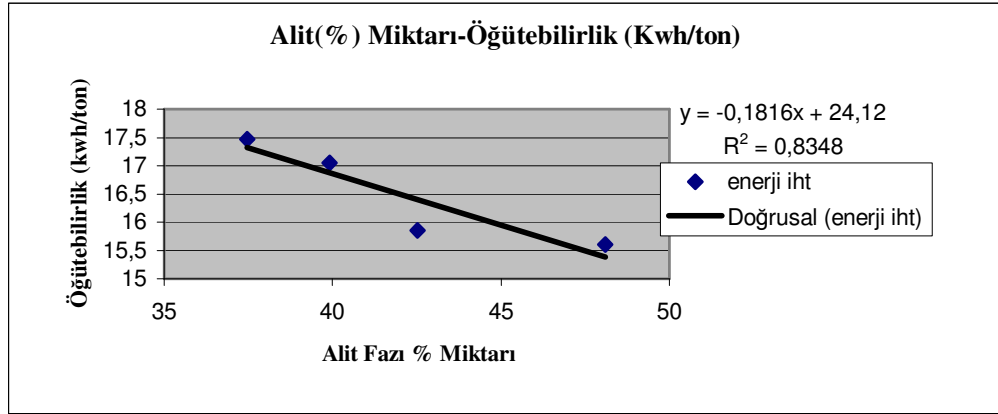
Tablo 4.6 Klinker örneklerindeki porozitenin incelik durumları

Boyut (mikron)	A1 Klinkeri Miktarı		A2 Klinkeri Miktarı		B1 Klinkeri Miktarı		B2 Klinkeri Miktarı	
	%	kümülatif	%	kümülatif	%	kümülatif	%	kümülatif
0-4	42	100	50	100	41	100	27	100
4-8	18	58	19	50	22	59	23	73
8-12	8	40	8	31	10	37	11	50
12-16	7	32	7	23	7	27	6	39
16-20	6	25	5	16	5	20	4	33
20-35	13	19	9	11	10	15	13	29
35-290	6	6	2	2	5	5	16	16
Toplam	100	280	100	233	100	263	100	340

Tablo 4.7 Klinker örneklerindeki silikat fazlarının ve porozitenin incelik modülleri ile iş endekslerinin karşılaştırılması

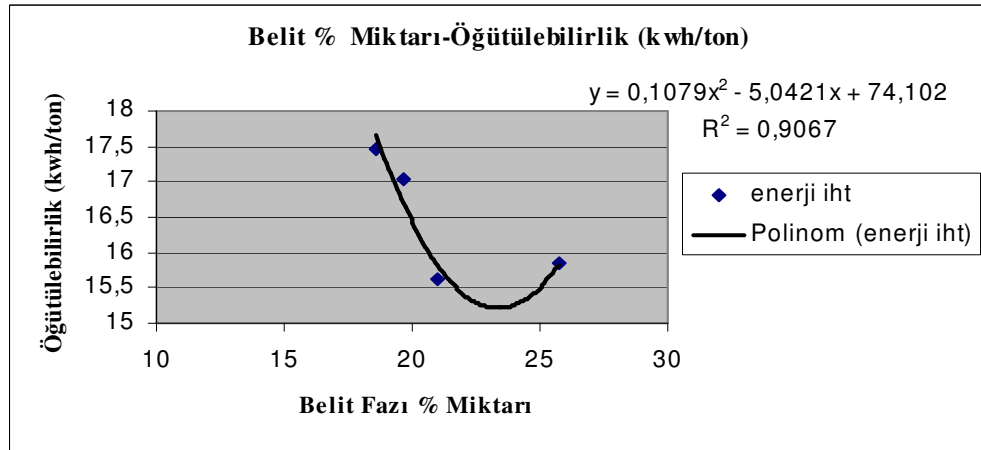
Klinker Örnekleri	Alit Kristalinin İncelik Modülü	Belit Kristalinin İncelik Modülü	Porozitenin İncelik Modülü	Bond İş Endeksi (kwh/ton)
A1	1,06	2,79	2,8	17,47
A2	1,18	2,23	2,33	17,05
B1	1,27	2,40	2,63	15,85
B2	2,27	2,48	3,4	15,61

Klinkerin yüksek C_3S içeriğinin sonucunda öğütülebilirlik kolaylaşır. Oysa; yüksek C_2S içeriği öğütülebilirliği zorlaştırmaktadır. Sıvı fazın fazlalığı, klinkerin öğütülebilirliğini kolaylaştırır.... Ayrıca, klinkerdeki silikatlerin ($C_3S + C_2S$) eriyik faza ($C_3A + C_4AF$, ara faza) oranının artmasıyla İş Endeksi artar (öğütülebilirlik zorlaşır) (Tokuyay, 1999, s. 531-534).



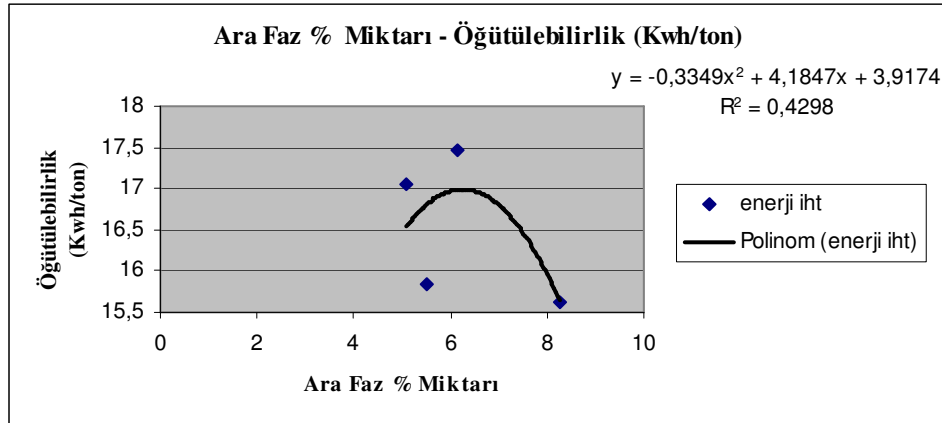
Şekil 4.18 Klinkerdeki alit fazının (C_3S) % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

Şekil 4.18’de de görüldüğü gibi klinkerdeki alit % miktarının artmasıyla İş Endeks değeri (kwh/ton) düşmektedir. Bu da bize, öğütme için gerekli enerji miktarının azaldığını gösterir.



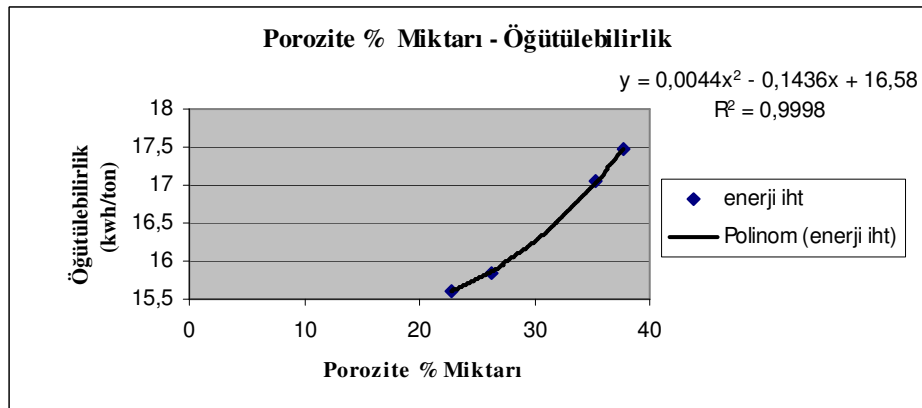
Şekil 4.19 Klinkerdeki belit fazının (C_2S) % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi klinkerdeki belit miktarı % 20’nin altında iken öğütülebilirlik için gerekli enerji ihtiyacı belit %’sinin artışıyla azalmaktadır. Ancak belit miktarının belli bir oranda bulunması durumunda (%22 civarında) öğütme enerjisi ihtiyacı tekrar yükselmektedir.



Şekil 4.20 Klinkerlerdeki ara fazın ($C_3A + C_4AF$) % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

Şekil 4.20’de klinkerlerdeki ara faz miktarı yaklaşık % 6 - 6,5 değerinin üstünde ara faz miktarının artmasıyla öğütülebilirlik için gerekli enerji gereksinimi (kwh/ton) düşmekte olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21 Klinkerlerdeki porozite % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

Şekil 4.21’de literatürlerdekinin tersine klinkerlerdeki porozite miktarının artmasıyla öğütülebilirlik için gerekli enerji ihtiyacı da buna paralel olarak artmıştır. Bunun nedeni porozitenin incelik modülü incelendiğinde görülecektir ki; % miktarı (alansal olarak) düşük olan klinker örneklerinin boyut dağılımı daha kaba (iri) tanelerden oluşmuştur. Bu da öğütmeyi kolaylaştırmıştır. Görülmektedir ki; öğütmede klinkerlerdeki fazların ve porozitenin % miktarlarından çok boyutları önemlidir. Aşağıda dört farklı klinker örneğinin silikat fazları (C_3S ve C_2S) içeriğinin ve porozitenin ayrı ayrı boyut dağılımı görülmektedir. Bu çalışmanın sonundaki Ekler

kısımında klinkerdeki silikat fazlarının eş değer tane çapları ve dağılımları ile gözeneklerin eş değer boşluk çapları ve dağılımları ile ilgili grafikler verilmiştir.

BÖLÜM BEŞ SONUÇLAR

Klinker üretiminde; hammadde bileşenleri, fırın sinterleşme koşulları ve ısıtma soğutma işleminde kullanılan yöntem, klinker porozite yapısını, dağılımını ve klinker fazlarının tane boyut dağılımı ile kristal morfolojisini değiştirebilmektedir. Bu durum kimyasal analiz veya XRD analizi ile belirlenememekte ancak optik mikroskop incelemeleri ile ortaya konulabilmektedir. Özellikle porozite analizi ve silikat fazlarının tane boyut dağılımının belirlenmesi için görüntü işleme programları pratikte kullanılabilir. Bu çalışmada incelenen 4 farklı klinker, porozite ve silikat fazlarının analizi yapılarak birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Porozite % miktarı (alansal olarak) ve yapısı açısından elde edilen sonuçlar daha az porozite miktarı olan B1 ve B2 klinkerlerinin A1 ve A2 klinkerlerine kıyasla daha iyi sinterleştiğini göstermektedir.

Alit miktarlarının ve eşdeğer tane boyutu verilerinden de anlaşıldığı gibi A1 ve A2 klinkerlerinin daha zor öğütüldüğünü görülmüştür. Bond iş endeksleri de bunu göstermektedir. A1 ve A2 klinkerleri B1 ve B2 klinkerlerine kıyasla daha zor öğütülmüştür (A1 ve A2 klinkerlerinin Bond İş Endeksleri B1 ve B2 klinkerlerinden daha yüksek çıkmıştır.).

Klinker kalite kontrol sürecinde optik mikroskop ve görüntü işleme programlarının bir arada kullanımı ile şu avantajlar sağlanabilir:

1. Klinker porozite (boşluk) oranı belirlenerek sinterleşmenin yeteri kadar gerçekleşip gerçekleşmediği belirlenebilir ve yöntem üretim sürecinde sorunun kaynağının bulunmasında kullanılabilir.
2. Görüntü işleme yöntemleri ile fazların % miktarlarının yanında kristal yapısı, boyut dağılımı gibi parametreler de elde edilebilir.

3. Görüntü işleme yöntemleri ile porozite dağılımı belirlenerek fırın sinterleme sıcaklığı ve süresi ile ilgili optimizasyon yapılabilir.

Klinkerin öğütülebilirliği porozite ve fazların oran ve tane boyut dağılımına bağlıdır. Bu yüzden öğütülebilirlik optimizasyonunda görüntü işleme yöntemleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Altun, A. (1998). Klinker kalite kontrolünde mikroskopik kriterler. *Çimento ve Beton Dünyası*, V:2, s.23.
- Altun, A. (1999a). Influence of heating rate on the burning of cement clinker. *Cement and Concrete Research*, s.600.
- Altun, A. (1999b). Fırın sistemlerinin klinkerlerin mikro yapılarına etkileri. *Çimento ve Beton Dünyası*, V:3, s. 33-41.
- Altun, A. (2000a). Çimento klinkerindeki fazların oluşumu ve mikro yapıların incelenmesi. *Fen Bilimleri Dergisi*, V:6, s.31.
- Altun, A. (2000b). Yüksek CaO içeren uçucu küllü çimento hamkarışımının sinterleşmesi, *Çimento ve Beton Dünyası*, V:5, s. 32-38.
- Altun, A. ve Ölmez, N. (2001). Çimento klinkerinin öğütülebilirliği ve iç yapısı üzerine karşılaştırmalı araştırmalar. *Cevher Hazırlama Dergisi*, s.1-5.
- Altun, A. (2004). Yüksek Sıcaklık Çimentoları *Ders Notları (Dokuz Eylül Üniversitesi)*.
- Altun, S. (1999). Çimento üretim teknolojisi. *Bitirme Projesi (Dokuz Eylül Üniversitesi)*, s.2.
- Avşar, Ç. (1996). Determination of the grindability characteristics of cement clinker and trass mixture. *A thesis submitted to the graduate school of natural and applied science of The Middle East Technical University*, S. 21.

- Bayram, S. (1998). 1.400.000 ton klinker / yıl kapasiteli bir çimento fabrikasının kırma öğütme devresinin projelendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Diploma Projesi*, s.5.
- Deniz, V. , Erkan, D. ve Alyıldız, V. (2001). Kalker ve klinker örneğinde kırılma kinetiği üzerine bilya çapının etkisi. *4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*. s.272.
- Ergin, H. ve Gür, O. (2001). Çimento öğütme devrelerinin similasyonla tasarımı ve optimizasyonu. *4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, s.146.
- Felekoğlu, B. , Tosun, K. ve Altun, A. (2005). Farklı klinkerler için porozite yapısı ve silikat fazlarının optik mikroskop ve görüntü işleme teknikleri kullanarak karşılaştırılması. *Çimento ve Beton Dünyası*, s.54-567.
- Felekoğlu, B. ve Güllü, D. (2006). Klinker incelemelerinin optik mikroskop tekniklerinin ve görüntü işleme tekniklerinin kullanılması. *TMMOB İnşaat Mühendisliği Odası Teknik Dergisi*, cilt:17, sayı: 57, s. 3761-3770.
- Gürbüz, G. (2005). Yüksek belit çimentoları. *Çimento ve Beton Dünyası*, s. 40-45.
- Hong, H. ,Fu, Z. ve Min, X. (2001). Effect of cooling performance on the mineralogical chracter of portland cement clinker. *Cement and Concerete Research*, s.288.
- İpek, H. , Üçbaş, Y. ve Hoşten, Ç. (2005). The bond work indeks of mixtures of ceramic raw materials. *Minerals Engineering*, s. 981
- Kavas, T. (2002). Çimento Üretim Teknolojisi. *Ders notları (Afyon Kocatepe Üniversitesi)*.

- Kaya, E. , Fletcher, P. C. ve Thompson, P. (2003). Reproducibility of Bond Grindability Work Index, *Minerals and Metallurgical Processing*, V:20, No:3, s.140-142.
- Kuduğ, S. (2003). Çimento hammaddeleri, çimento türleri ve çimento üretim projesi. *Yıl İçi Projesi (Dokuz Eylül Üniversitesi)*, s.2-20.
- Matazimov, D. (2001). Ovacık altın cevherinin öğütülebilirlik testi.. *Seminer (Dokuz Eylül Üniversitesi)*, s.14-15.
- Okbaş, Y. (bt), Ankara, *Çitosan, Yayınlanmamış Eğitim Notları*.
- Özkahraman, T. ve Şirin, M. (1997). Bond öğütülebilirlik indisi ile ufalanma değeri arasındaki anlamlı ilişki. 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, s.193.
- Tokyay, M. (1999). Effect of chemical composition of clinker on grinding enegy requirment. *Cement and Concrete Research*, s. 531-535.
- Yeğinoğlu, A. (2003). Çimento. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, s. 18-28. Ankara.

EKLER

Dokuz Eylul University
Mineral Processing Laboratory
Modified Bond Work Index Testing (Ref.)

[Closing size = 100 US Mesh]

Date:

28.04.2005

Technician:

Mill: DEU

With Regression

No Regression

Ball charge:

WORK INDEX:

17.41

17.07

Sample: A-1 Klinkeri

Subject: Test1

Ore Charge weight, grams:

354.63

F80 =

2557

2550

Circulating load, grams:

101.32

P80 =

108.4

105

Percent - 100 mesh (150µm):

11.09

Gbp =

0.183

Size, US Std.		Feed				Product			
Feed (µm)	Prdct. (µm)	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.
			Individual	Cum.			Individual	Cum.	
3.350		0.00	0.00	0.00	100.00				
2.000		35.60	32.89	32.89	67.11				
1000		32.60	30.12	63.00	37.00				
850		5.00	4.62	67.62	32.38				
600		5.53	5.11	72.73	27.27				
425		9.72	8.98	81.71	18.29				
300	150	1.90	1.76	83.46	16.54	0.00	0.00	0.00	100.00
212	125	3.60	3.33	86.79	13.21	1.70	9.59	9.59	90.41
150	106	2.30	2.12	88.91	11.09	1.56	8.80	18.39	81.60
Minus 150	75	12.00	11.09	100.00	0.00	3.41	19.23	37.62	62.38
	53		0.00	100.00	0.00	2.06	11.62	49.24	50.76
	45		0.00	100.00	0.00	1.99	11.22	60.46	39.54
	Minus 45		0.00	100.00		7.01	39.54	100.00	
Totals		108.25	100.00			17.73	100.00		

Cir. Load Ratio	New Feed	Undersize in Feed	To be Produced	Mill Turns	Oversize In Product	Undersize In Product	Total Undersized Produced	Grams per Mill Rev.
0.79	354.63	39.31	62.01	150	280.10	74.53	35.22	0.235
3.62	74.53	8.26	93.06	396	269.80	84.83	76.57	0.193
3.09	84.83	9.40	91.92	476	262.20	92.43	83.03	0.174
2.68	92.43	10.25	91.08	522	247.40	107.23	96.98	0.186
2.40	107.23	11.89	89.44	481	257.80	96.83	84.94	0.176
2.50	96.83	10.73	90.59	513	242.50	112.13	101.40	0.198
2.32	112.13	12.43	88.89	450	259.70	94.93	82.50	0.183
2.69	94.93	10.52	90.80	495	255.30	99.33	88.81	0.179
2.51	99.33	11.01	90.31	504	249.60	105.03	94.02	0.187
0.00	105.03	11.64	89.68	480		354.63	342.99	0.714
0.00	354.63	39.31	62.01	87		354.63	315.32	3.630
0.00	354.63	39.31	62.01	17		354.63	315.32	18.458
0.00	354.63	39.31	62.01	3		354.63	315.32	93.857

Fill in the grey boxes only

Gbp is the average of last 3 revolutions.

No regression means P80 and F80 were calculated from the graph by hand.

Do not use 100 mesh (150 μ m) screen for product screen analysis.

FEED SCREEN ANALYSIS

Note:

BOND LAB TEMPERATURE & HUMIDITY

MATERIAL % MOISTURE

Dokuz Eylul University
Mineral Processing Laboratory
Modified Bond Work Index Testing (Ref.)

[Closing size = 100 US Mesh]

Date: 28.04.2005

Technician:

Mill: DEU

With
Regression

No
Regression

Ball charge:

WORK INDEX:

16,13

15,75

Sample: A-2 Klinkeri

Subject: Test2

Ore Charge weight, grams:

355,00

F80 =

2688

2700

Circulating load, grams:

101,43

P80 =

99,7

96

Percent - 100 mesh (150µm):

9,76

Gbp =

0,187

Size, US Std.		Feed				Product			
Feed (µm)	Prdct. (µm)	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.
			Individual	Cum.			Individual	Cum.	
3.350		0,00	0,00	0,00	100,00				
2.000		46,12	42,31	42,31	57,69				
1000		27,56	25,28	67,60	32,40				
850		4,08	3,74	71,34	28,66				
600		4,19	3,84	75,18	24,82				
425		8,27	7,59	82,77	17,23				
300	150	1,89	1,73	84,50	15,50	0,00	0,00	0,00	100,00
212	125	3,56	3,27	87,77	12,23	0,93	3,46	3,46	96,54
150	106	2,69	2,47	90,24	9,76	2,52	9,36	12,82	87,18
Minus 150	75	10,64	9,76	100,00	0,00	4,68	17,39	30,21	69,79
	53		0,00	100,00	0,00	3,96	14,72	44,93	55,07
	45		0,00	100,00	0,00	1,96	7,28	52,21	47,79
	Minus 45		0,00	100,00		12,86	47,79	100,00	
Totals		109,00	100,00			26,91	100,00		

Cir. Load Ratio	New Feed	Undersize in Feed	To be Produced	Mill Turns	Oversize In Product	Undersize In Product	Total Undersized Produced	Grams per Mill Rev.
0,83	355,00	34,65	66,78	150	294,90	60,10	25,45	0,170
3,97	60,10	5,87	95,56	563	238,60	116,40	110,53	0,196
2,19	116,40	11,36	90,07	459	254,40	100,60	89,24	0,194
2,57	100,60	9,82	91,61	471	258,60	96,40	86,58	0,184
2,61	96,40	9,41	92,02	501	251,70	103,30	93,89	0,187
2,44	103,30	10,08	91,34	487	252,00	103,00	92,92	0,191
0,00	103,00	10,05	91,37	479		355,00	344,95	0,720
0,00	355,00	34,65	66,78	93		355,00	320,35	3,454
0,00	355,00	34,65	66,78	19		355,00	320,35	16,569
0,00	355,00	34,65	66,78	4		355,00	320,35	79,489
0,00	355,00	34,65	66,78	1		355,00	320,35	381,340
0,00	355,00	34,65	66,78	0		355,00	320,35	1829,435
0,00	355,00	34,65	66,78	0		355,00	320,35	8776,494

Fill in the grey boxes only

Gbp is the average of last 3 revolutions.

No regression means P80 and F80 were calculated from the graph by hand.

Do not use 100 mesh (150 µm) screen for product screen analysis.

FEED SCREEN ANALYSIS

Note:

BOND LAB TEMPERATURE & HUMIDITY

MATERIAL % MOISTURE

64

65

Dokuz Eylul University
Mineral Processing Laboratory
Modified Bond Work Index Testing (Ref.)

[Closing size = 100 US Mesh]

Date: 28.04.2005

Technician:

Mill: DEU

Ball charge:

Sample: B-2 Klinkeri

Subject: Test1

WORK INDEX:

With
Regression

15,26

No
Regression

14,99

Ore Charge weight, grams:

346,00

F80 =

2671

2700

Circulating load, grams:

98,86

P80 =

104,7

102

Percent - 100 mesh (150µm):

11,58

Gbp =

0,210

Size, US Std.		Feed				Product			
Feed (µm)	Prdct. (µm)	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.
			Individual	Cum.			Individual	Cum.	
3.350		0,00	0,00	0,00	100,00				
2.000		40,39	40,39	40,39	59,61				
1000		26,42	26,42	66,82	33,18				
850		4,40	4,40	71,22	28,78				
600		3,77	3,77	74,99	25,01				
425		5,91	5,91	80,90	19,10				
300	150	1,46	1,46	82,36	17,64	0,00	0,00	0,00	100,00
212	125	3,01	3,01	85,37	14,63	0,31	1,00	1,00	99,00
150	106	3,05	3,05	88,42	11,58	4,99	16,09	17,09	82,91
Minus 150	75	11,58	11,58	100,00	0,00	5,96	19,22	36,31	63,69
	53		0,00	100,00	0,00	5,37	17,32	53,63	46,37
	45		0,00	100,00	0,00	1,52	4,90	58,53	41,47
	Minus 45		0,00	100,00		12,86	41,47	100,00	
Totals		99,99	100,00			31,01	100,00		

Cir. Load Ratio	New Feed	Undersize in Feed	To be Produced	Mill Turns	Undersize In Product	Undersize In Product	Total Undersized Produced	Grams per Mill Rev.
0,75	346,00	40,07	58,79	150	260,14	85,86	45,79	0,305
2,97	85,86	9,94	88,91	291	254,67	91,33	81,39	0,279
2,73	91,33	10,58	88,28	316	249,25	96,75	86,17	0,273
2,70	96,75	11,20	87,65	321	261,63	84,37	73,17	0,228
3,04	84,37	9,77	89,09	391	256,71	89,29	79,52	0,203
2,76	89,29	10,34	88,52	436	246,18	99,82	89,48	0,205
2,45	99,82	11,56	87,30	425	245,00	101,00	89,44	0,210
2,49	101,00	11,70	87,16	414	251,00	95,00	83,30	0,201
2,52	95,00	11,00	87,86	437	238,96	107,04	96,04	0,220
0,00	107,04	12,40	86,46	393		346,00	333,60	0,848
0,00	346,00	40,07	58,79	69		346,00	305,93	4,415
0,00	346,00	40,07	58,79	13		346,00	305,93	22,978
0,00	346,00	40,07	58,79	3		346,00	305,93	119,581

Fill in the grey boxes only

Gbp is the average of last 3 revolutions.

No regression means P80 and F80 were calculated from the graph by hand.

Do not use 100 mesh (150 µm) screen for product screen analysis.

FEED SCREEN ANALYSIS

Note:

BOND LAB TEMPERATURE & HUMIDITY

MATERIAL % MOISTURE

Dokuz Eylul University
Mineral Processing Laboratory
Modified Bond Work Index Testing (Ref.)

[Closing size = 100 US Mesh]

Date:

28.04.2005

Technician:

Mill: DEU

With
Regression

No
Regression

Ball charge:

WORK INDEX:

16,46

15,99

Sample:

B-2 Klinkeri

Subject:

Test2

Ore Charge weight, grams:

346,00

F80 =

2671

2700

Circulating load, grams:

98,86

P80 =

106,6

102

Percent - 100 mesh (150µm):

11,58

Gbp =

0,193

Size, US Std.		Feed				Product 0,19			
Feed (µm)	Prdct. (µm)	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.
			Individual	Cum.			Individual	Cum.	
3.350		0,00	0,00	0,00	100,00				
2.000		40,39	40,39	40,39	59,61				
1000		26,42	26,42	66,82	33,18				
850		4,40	4,40	71,22	28,78				
600		3,77	3,77	74,99	25,01				
425		5,91	5,91	80,90	19,10				
300	150	1,46	1,46	82,36	17,64	0,00	0,00	0,00	100,00
212	125	3,01	3,01	85,37	14,63	2,00	6,50	6,50	93,50
150	106	3,05	3,05	88,42	11,58	3,07	9,98	16,49	83,51
Minus 150	75	11,58	11,58	100,00	0,00	6,05	19,67	36,16	63,84
	53		0,00	100,00	0,00	5,43	17,66	53,82	46,18
	45		0,00	100,00	0,00	1,35	4,39	58,21	41,79
	Minus 45		0,00	100,00		12,85	41,79	100,00	
Totals		99,99	100,00			30,75	100,00		

Cir. Load Ratio	New Feed	Undersize in Feed	To be Produced	Mill Turns	Oversize In Product	Undersize In Product	Total Undersized Produced	Grams per Mill Rev.
0,76	346,00	40,07	58,79	150	262,61	83,39	43,32	0,289
3,01	83,39	9,66	89,20	309	250,99	95,01	85,35	0,276
2,72	95,01	11,00	87,85	318	258,18	87,82	76,82	0,242
2,94	87,82	10,17	88,69	367	258,21	87,79	77,62	0,211
2,80	87,79	10,17	88,69	419	245,61	100,39	90,22	0,215
2,52	100,39	11,63	87,23	405	253,21	92,79	81,16	0,200
2,52	92,79	10,75	88,11	440	233,74	112,26	101,51	0,231
2,48	112,26	13,00	85,86	372	278,06	67,94	54,94	0,148
0,00	67,94	7,87	90,99	617		346,00	338,13	0,548
0,00	346,00	40,07	58,79	107		346,00	305,93	2,854
0,00	346,00	40,07	58,79	21		346,00	305,93	14,852
0,00	346,00	40,07	58,79	4		346,00	305,93	77,289
0,00	346,00	40,07	58,79	1		346,00	305,93	402,220

Fill in the grey boxes only

Gbp is the average of last 3 revolutions.

No regression means P80 and F80 were calculated from the graph by hand.

Do not use 100 mesh (150 µm) screen for product screen analysis.

FEED SCREEN ANALYSIS

Note:

BOND LAB TEMPERATURE & HUMIDITY

MATERIAL % MOISTURE

Dokuz Eylul University
Mineral Processing Laboratory
Modified Bond Work Index Testing (Ref.)

[Closing size = 100 US Mesh]

Date: 28.04.2005

Technician:

Mill: DEU

With
Regression

No
Regression

Ball charge:

WORK INDEX:

15,11

14,87

Sample: B-2 Klinkeri

Subject: Test3

Ore Charge weight, grams:

346,00

F80 =

2671

2700

Circulating load, grams:

98,86

P80 =

112,6

110

Percent - 100 mesh (150µm):

11,58

Gbp =

0,226

Size, US Std.		Feed				Product 0,19			
Feed (µm)	Prdct. (µm)	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.	Weight (grams)	Percent Retained		% Passing Cum.
			Individual	Cum.			Individual	Cum.	
3.350		0,00	0,00	0,00	100,00				
2.000		40,39	40,39	40,39	59,61				
1000		26,42	26,42	66,82	33,18				
850		4,40	4,40	71,22	28,78				
600		3,77	3,77	74,99	25,01				
425		5,91	5,91	80,90	19,10				
300	150	1,46	1,46	82,36	17,64	0,00	0,00	0,00	100,00
212	125	3,01	3,01	85,37	14,63	2,53	7,84	7,84	92,16
150	106	3,05	3,05	88,42	11,58	5,02	15,56	23,40	76,60
Minus 150	75	11,58	11,58	100,00	0,00	6,21	19,24	42,64	57,36
	53		0,00	100,00	0,00	5,78	17,91	60,55	39,45
	45		0,00	100,00	0,00	1,65	5,11	65,66	34,34
	Minus 45		0,00	100,00		11,08	34,34	100,00	
Totals		99,99	100,00			32,27	100,00		

Cir. Load Ratio	New Feed	Undersize in Feed	To be Produced	Mill Turns	Undersize In Product	Undersize In Product	Total Undersized Produced	Grams per Mill Rev.
0,76	346,00	40,07	58,79	150	261,61	84,39	44,32	0,295
2,99	84,39	9,77	89,08	302	252,08	93,92	84,15	0,279
2,73	93,92	10,88	87,98	315	256,00	90,00	79,12	0,251
2,78	90,00	10,42	88,43	352	249,85	96,15	85,73	0,243
2,58	96,15	11,14	87,72	361	248,13	97,87	86,73	0,241
2,54	97,87	11,33	87,52	364	248,12	97,88	86,55	0,238
2,53	97,88	11,34	87,52	368	248,12	97,88	86,54	0,235
2,56	97,88	11,34	87,52	372	251,00	95,00	83,66	0,225
2,59	95,00	11,00	87,86	391	246,01	99,99	88,99	0,228
2,48	99,99	11,58	87,28	383	248,00	98,00	86,42	0,226
0,00	98,00	11,35	87,51	388		346,00	334,65	0,862
0,00	346,00	40,07	58,79	68		346,00	305,93	4,488
0,00	346,00	40,07	58,79	13		346,00	305,93	23,357

Fill in the grey boxes only

Gbp is the average of last 3 revolutions.

No regression means P80 and F80 were calculated from the graph by hand.

Do not use 100 mesh (150 µm) screen for product screen analysis.

FEED SCREEN ANALYSIS

Note:

BOND LAB TEMPERATURE & HUMIDITY

MATERIAL % MOISTURE

