

**BAZI KLİNKER BİLEŞENLERİNİN
ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK VE ÇİMENTO DAYANIMLARI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

ABDUL VAHAP KORKMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
2012**

**CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BAZI KLİNKER BİLEŞENLERİNİN ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK VE
ÇİMENTO DAYANIMLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

ABDUL VAHAP KORKMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
DOÇ.DR. NEVZAT ASLAN**

**SİVAS
2012**

Bu alışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanmış ve jürimiz tarafından Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan Prof. Dr. Meftuni YEKELER _____

ye Doç. Dr. İbrahim ALP _____

ye (Danışman) Doç.Dr. Nevzat ASLAN _____

ONAY

Bu tez çalışması, .././2012 tarihinde ve 09 sayılı Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri yeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa DEğİRMENCİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 24.09.2008 tarihli ve 009 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

Bu Tez çalışması, CÜBAP komisyonunun M-440 no'lu projesi kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

BAZI KLİNKER BİLEŞENLERİNİN ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK VE ÇİMENTO DAYANIMI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ABDUL VAHAP KORKMAZ

Yüksek Lisans Tezi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Nevzat ASLAN

2012, 66 sayfa

Bu çalışmada klinker kimyasal bileşenlerinde bulunan C_3S , C_2S ve serbest kirecin; çimento değirmeni enerji tüketimleri, öğütme ve çimento dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Söz konusu çalışma ile Adoçim çimento fabrikasında üretilen klinkerde yapılan deneyler sonucunda klinker için en uygun C_3S , C_2S ve Serbest kireç değerleri tespit edilerek öğütme enerjisinin düşürülüp, klinker dayanımlarının artırılması hedeflenmiştir.

Çalışmada Adoçim çimento fabrikasında üretilen klinker ve doğal alçıtaşı kullanılmıştır. Klinker, Adoçim 2 nolu çimento değirmeninde öğütülerek kalite kontrol laboratuvarında kimyasal ve fiziksel testlere tabi tutulmuştur. Ayrıca Adoçim Çimento Enerji Müdürlüğü ile koordineli çalışarak her ay 2.çimento değirmeni enerji tüketim değerleri (kwh) kayıt altına alınmıştır. Elde edilen sonuçlar ışığında tablolar ve grafikler oluşturularak değerlendirmeler yapılmıştır.

Yapılan değerlendirmeler ışığında klinkerde bulunan % C_3S miktarının artması ile öğütme enerjisinin düştüğü, saatlik çimento üretiminin, iki günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarının arttığı; Klinkerde bulunan % C_2S miktarının artması ile enerji tüketimini arttığı, saatlik çimento üretiminin, iki günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarının düştüğü sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Klinker, C_3S , C_2S , öğütme, enerji, dayanım

ABSTRACT

CLINKER INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF STRENGTH COMPONENTS AND CEMENT GRINDIBILITY

ABDUL VAHAP KORKMAZ

Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Nevzat ASLAN

2012, 66 pages

In this study, the effects of C_3S , C_2S and free lime which exist in the chemical composition of clinker on cement mill energy consumption, grinding and cement strength were investigated. In result of the experiments carried out in the clinker produced at Adocim Cement Factory, , the most proper C_3S , C_2S and free lime values were determined in order to decrease the grinding energy and increase the clinker strength.

The clinker and natural gypsum produced in Adocim Cement Factory were utilized in the experiments. After being grinded at cement mill no. 2 of Adocim, clinker was tested by chemical and physical methods in the quality control laboratory. Furthermore, every month, the energy consumption values of cement mill no.2 were recorded in collaboration with Adocim Directorate of Cement and Energy. With the help of the recorded data, evaluations were done on the prescribed tables and graphs.

In the light of the evaluations, the results obtained are as follows: as C_3S amount in clinker were increased, grinding energy decreased, on the contrary, the cement production per hour, cement strength both per 2 days and per 28 days increased; as C_2S amount in clinker were increased, energy consumption increased, oppositely, cement production per hour, cement strength both per 2 days and per 28 days decreased.

Key Words: Clinker, C_3S , C_2S , grinding, energy, strength

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Nevzat ASLAN'a (Cumhuriyet Üniversitesi Maden Mühendisliği Böl.), Doç. Dr. İbrahim ALP'e (Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Böl.), tüm bölüm hocalarıma teşekkür ederim.

Adoçim Çimento Fabrikasının tüm teknik imkanlarından yararlanmam için izin veren ve teknik desteklerini esirgemeyen Sn.Ahmet Pekin' e (Adoçim Genel Müdürü), Sn.Aziz Tekiner'e (Adoçim Çimento Tokat Fabrikası Teknik Müdürü), müteşekkirim.

Bu tezi hazırlamamda ayrıca tez çalışmalarım esnasında bana moral verip destek olan aileme teşekkür ederim.

Çalışmanın bir bölümüne maddi destek sağlayan Cumhuriyet Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Müdürlüğüne (CÜBAP Proje No: M-440), teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1.GİRİŞ	1
2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Çimento.....	3
2.1.1 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler	3
2.1.2 Portland Çimentosu	4
2.1.3 Hammadde Karışımının Hazırlanması	5
2.1.4 Çimento Üretim Aşamaları.....	7
2.1.5 Döner Fırın Kimyası.....	12
2.1.6 Klinkerin Soğutulması.....	12
2.1.7 Klinkerin Bileşimi	14
2.1.8 Klinkerin Çimentoya Geçiş Aşaması	18
2.1.9 Yüksek Belit Çimentoları	19
2.1.9.1 Belit Çimentoları	20
2.2. Öğütme.....	21
2.2.1 Boyut Küçültme Teorileri.....	22
2.2.2 Çimento Sanayinde Öğütme	25
2.2.2.1 Kuru öğütme	26
2.2.2.2 Yaş Öğütme	27
2.2.2.3 Kuru ve Yaş Öğütmenin Karşılaştırması	28
2.2.3 Bilyalı Tüp Değirmenler.....	28
2.2.4 Dik Değirmenler	31
2.2.5 Yüksek Basıncılı Merdaneli Presler	32
2.2.6 Horomill	33
2.3 Adoçim Çimento Fabrikası	34
3.MALZEME VE YÖNTEM.....	36
3.1 Malzeme.....	36
3.1.1 Klinker Özellikleri	36
3.1.1.1 Klinker Kimyasal analizi	36
3.1.1.2 Klinker Mikroskopik analizi	37

3.1.2 Alçıtaşı.....	40
3.1.3 Çimento Değirmeni.....	41
3.2 Metot.....	42
3.2.1 X Işınlari Floresans Spektrometresi Çalışma Prensibi.....	42
3.2.2 X Işınlari Spektrometresine Örnek Hazırlanması ve Okuma Yapılması	43
3.2.3 Boge Formülleri.....	43
3.2.4 Çimento Örneklerinin Hazırlanması	44
3.2.4.1 Harç Hazırlama.....	44
3.2.4.2 Harcın Oluşturulması.....	44
3.2.4.3 Beton Kalıp Örneklerinin Hazırlanması	45
3.2.4.4 Şartlandırma.....	45
3.2.5 Priz deneyi.....	46
3.2.5.1 Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri.....	47
3.2.6 Blaine.....	47
3.2.7 Hacim Genleşmesi (Şatölye) Tayini	48
3.2.8 İncelik Tayini.....	48
3.2.9 Kızdırma Kaybı Tayini.....	49
3.2.10 Serbest Kireç (S.CaO) Tayini	49
4.BULGULAR	51
4.1 Klinker Ana Bileşenleri Hesabı.....	51
4.2 Çimento Değirmeni Üretim Miktarları ve Enerji Tüketimleri.....	52
4.3. Çimento Dayanımlarının İncelenmesi	56
4.3.1 Çimento Dayanımları (S.CaO < % 2)	56
4.3.2 S.CaO % 2–5 Çimento Dayanımlarının İncelenmesi.....	59
5.TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	66

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Şekil 2.1 Dik farin değirmeni.....	7
Şekil 2.2	Entalpi (h) – sıcaklık (t) diyagramı.....	9
Şekil 2.3	Klinkerdeki faz değişimleri (Yeginobalı, 2003).....	13
Şekil 2.4	Klinkerin mikroskopik yapısı.....	15
Şekil 2.5	Bazı açık ve kapalı devre öğütme sistemleri.....	28
Şekil 2.6	Kamaralı tüp değirmen.....	29
Şekil 2.7	Bilyalı değirmenin iç görüntüsü.....	30
Şekil 2.8	Bilyalı değirmen dış görüntüsü.....	31
Şekil 2.9	Bir dik değirmene örnek; Pfeiffer MPS valsli değirmeni.....	32
Şekil 2.10	Horomill.....	33
Şekil 2.11	Adoçim Çimento Fabrikası genel görünümü.....	35
Şekil 2.12	Adoçim Çimento Fabrikası üretim akış şeması.....	35
Şekil 3.1	Alit fazınca yoğun bir yapı.....	39
Şekil 3.2	Belit kümeleri.....	39
Şekil 3.3	Serbest kireç kümeleri ve normal boyutlu belit.....	40
Şekil 3.4	Bazı granüllerde görülen iri kristaller ve kristalize sıvı faz.....	40
Şekil 3.5	Adoçim 2.çimento değirmeni şeması.....	41
Şekil 3.6	X-ray analiz yöntemleri.....	43
Şekil 3.7	Harç karıştırma cihazı	44
Şekil 3.8	Kalıpların sarsma tablasına yerleştirilmesi.....	45
Şekil 3.9	Basınç dayanım cihazı.....	46
Şekil 3.10	Blaine cihazı.....	47
Şekil 3.11	Hacim genleşmesi ölçüm çubukları.....	48
Şekil 3.12	Alphin eleği.....	49
Şekil 4.1	C ₃ S - çimento üretimi arasındaki ilişki.....	54
Şekil 4.2	C ₃ S - enerji tüketimi arasındaki ilişki.....	54
Şekil 4.3	C ₂ S - çimento üretimi arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.4	C ₂ S - enerji tüketimi arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.5	C ₃ S - çimento dayanım ilişkisi (S.CaO < % 2).....	57
Şekil 4.6	C ₂ S - çimento dayanım ilişkisi (S.CaO < % 2).....	58
Şekil 4.7	C ₃ S- çimento dayanım ilişkisi (C ₂ S sabit).....	59
Şekil 4.8	C ₃ S - çimento dayanım ilişkisi(S.CaO % 2-5).....	61
Şekil 4.9	C ₂ S-çimento dayanım ilişkisi (S.CaO % 2-5).....	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Çimento ana hammaddelerinin CaCO_3 oranına göre sınıflandırılması.....	4
Çizelge 2.2 Klinkerin genel kompozisyonu.....	5
Çizelge 2.3 Portland çimento klinkerinde ortalama olarak klinker fazları (Altun, 2004).....	5
Çizelge 2.4 Belit modifikasyonları (Altun, 2004).....	17
Çizelge 2.5 Klinker fazlarının oluşumu (Altun, 2000a).....	17
Çizelge 2.6 Genel portland çimentosunun kimyasal bileşimi (Yeginobalı,2003) ...	18
Çizelge 2.7 Adoçim hammaddeleri kimyasal analiz sonuçları.....	34
Çizelge 3.1 Adoçim laboratuvarı klinker kimyasal analiz sonucu.....	37
Çizelge 3.2 Klinkerin mikroskopik analiz sonucu.....	38
Çizelge 3.3 Adoçim alçıtaşı kimyasal analiz sonucu.....	38
Çizelge 3.4 Çimento değirmeni şarj miktarları.....	41
Çizelge 3.5 Klinker kimyasal ana bileşenleri.....	42
Çizelge 4.1 Aylık Klinker C_3S ve C_2S değerleri.....	51
Çizelge 4.2 Aylık Çimento değirmeni çalışma saatleri ve üretim miktarları.....	52
Çizelge 4.4Çimento değirmeni enerji sarfiyatları.....	52
Çizelge 4.5 Çimento üretimi ve enerji sarfiyatı değerleri.....	53
Çizelge 4.6 Çimento dayanım tablosu ($\text{S.CaO} < \% 2$).....	56
Çizelge 4.7 Klinker $\% \text{C}_3\text{S}$ miktarları (C_2S Sabit).....	58
Çizelge 4.8 Çimento dayanım tablosu ($\text{S.CaO} \% 2-5$).....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	Al_2O_3
A	Malzeme dayanımına bağlı bir faktör
ABÇ	Aktif belit çimentoları
C	CaO
CK	Kick sabiti
CR	Rittinger sabiti
dk	dakika
dv	devir
ΔE	Harcanan enerji
E_1	Kırılmış tanedeki enerji
E_2	Kırılacak tanedeki enerji
E	Özgöl öğütme enerjisi tüketimi, kwh/t
F	Beslenen malzeme boyutu, μm
F	Kırılmış malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı, μm
F	Fe_2O_3
H	H_2O
H	saat
P	Ürün parça boyutu, μm
PÇ	Portland Çimento
K	Soğutma performans faktörü
kW	kilowatt
n	Schuhmann eğrisinin düz bölümünün eğimi
n	Charles'a göre sabit
P/F	Ufalama oranı
P	Kırılacak malın % 80'inini geçtiği elek açıklığı, μm
R	Erken dayanımı yüksek
S	SiO_2
T	ton
TS	Türk Standartları
W_i	İş indeksi, kWh/t
YBÇ	Yüksek belit çimentoları

GİRİŞ

Öğütme, çimento endüstrisinin en fazla enerji tüketen birim işlemidir. Günümüzde tüm dünyada üretilen toplam elektrik enerjisinin % 5 kadarı öğütmede harcanmaktadır. Yalnızca çimento endüstrisi göz önüne alındığında bu rakam % 2'dir. Türkiye, 35 milyon ton çimento üretimiyle dünyada 8. ve Avrupa'da 2. sıradadır. Çimento üretim kapasitesi olarak, 55 milyon ton/yıl ile Avrupa'nın en büyük kapasitesine sahiptir. Türkiye'de çimento iç tüketiminin 2020 yılına kadar artış göstereceği, kişi başına 750–800 kg'a çıkacağı ve ülkenin gelişmesinin tamamlanması ile birlikte bu tüketimin 450–500 kg ile sabitlenmesi beklenmektedir. Bu da önümüzdeki 20 yılda çimento endüstrisinin öneminin daha da artacağına işaret etmektedir. Çimento üretiminde kullanılan elektrik enerjisinin yaklaşık % 60'ı öğütmeye harcanmaktadır ve bunun azaltılması konusunda önemli araştırma-geliştirme açılımları bulunmaktadır.

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). 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 vd, 2001)

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 harcanmasının 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.

Yüksek miktardaki C_3S (Alit) öğütülebilirliği artırır, yüksek miktardaki C_2S (Belit) ise azaltır. Ayrıca (C_3S/ C_2S) oranı veya silikatların ara fazlara oranı, $(C_3S+ C_2S) / (C_3A+ C_4AF)$, 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 tipi de etkilidir (Altun, 1999). 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).

Çimento sanayinde öğütme enerjisi büyük önem taşımaktadır. Çimento üreticileri üretilen klinkerin öğütülebilirliği kolay, değirmen enerji tüketimi düşük, klinkerin erken ve son dayanımlarının yüksek olmasını istemektedir. Daha önce yapılan deneysel ve endüstriyel çalışmalardan klinker % C_3S oranının artması öğütme enerjisini düşürüp çimento erken ve son dayanımları arttırdığı, klinker % C_2S oranının artması çimentonun erken ve son dayanımlarını düşürürken öğütme enerjisini arttırdığı bilinmektedir. Yapılan bu çalışmada Adoçim Çimento Fabrikasında üretilen klinkerin değişik % C_3S ve % C_2S miktarlarda klinkerin öğütme enerjisi ve çimento dayanımlarına nasıl etki ettiği araştırılmıştır. 2 nolu çimento değirmeni ton başına harcadığı enerji tüketim değerleri hesap edilmiş ve değişen parametrelerdeki klinker % C_3S ve % C_2S değerleri ile karşılaştırılarak en iyi öğütme sonucu bulunmaya çalışılmıştır. Klinkerde bulunan serbest kireç (S.CaO) değerleri % 2 nin altında ve % 2 -% 5 S.CaO değerleri arasındaki numunelerden çimento harcı hazırlanarak, yapılan beton numuneleri dayanım testlerine tabii tutulmuştur.

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Çimento

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 sanayi de 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 sertleşme derecesine kadar pişirilmesiyle elde edilen yarı mamül madde klinkerin, tek veya daha fazla katkı maddesi ile öğütülmesi yoluyla üretilen hidrolik bağlayıcıları içeren bir maddedir (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 konulup kapatılmış gibi olduklarından, bütün parçalar birbirine kenetlenmektedir.

Taş ocaklarından elde edilen hammaddelerin teknolojik metodlardan geçirildikten sonra belirli oranlarda karıştırılarak kırılıp, öğütülmesiyle elde edilen malzemeye farin, bu malzemenin, sinterleşme sıcaklığına kadar pişirilmesi ile edilen malzemeye “Klinker” adı verilir. Farin, CaCO_3 oranı düşük fakat silisyum, alüminyum ve demir oksit miktarı yüksek kil mineralleri ile belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir.

Daha sonra klinkerin, betonun “Priz Süresini” 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
$\text{SO}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}_2 + \text{TiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5$	% 4
Toplam.....	% 100

2.1.1 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler jeolojide sedimenter kayalar olarak bilinen kireçtaşı, kil ve marndır. Klinker üretiminin ana bileşenleri 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 zaman da CaO içeriği konusunda da aydınlatıcıdır. Kil minerali olarak kullanılacak kayalarda silikat ve alümina oranı dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Çimento sanayinde kullanılan ve Kuhl tarafından CaCO_3 oranına göre yapılan sınıflandırma Çizelge 2.1’de verilmiştir (Kuduğ, 2003)

Çizelge 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	10-44
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 ya da Al_2O_3 içerikli materyallerdir.

Bunlara örnek olarak fırınlanmış pirit, düşük tenörlü demir cevheri, laterit, kuvarslı kum ya da metamorfik kayaların bozunmasıyla oluşan kuvarslı materyaller ve boksitler verilebilir. Ülkemizde beyaz çimento üretimi için büyük miktarda kaolin kullanılmaktadır. Sert kaolinler de bu amaçlarla kullanılabildiği gibi önemli ölçüde çimento kaolini 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).

2.1.2 Portland Çimentosu

Portland çimentosu klinkerin alçıtaşı ile % 10 a kadar herhangi bir doğal ya da 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 ve Al_2O_3 su ile karıştırıldığında filizlenir, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Al}(\text{OH})_3$ teşekkül eder. Bu maddeler de kalsiyum silikatlara kuvvetle etki ederek kristaller arası kalsiyum alümina silikat kristalleri yaparlar (Bayram, 1998) Ülkemizde üretilen genel portland çimento klinkerinin bileşimleri Çizelge 2.2’de verilmiştir (Avşar, 1996). Ham karışımın kısmi ergime derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen klinker başlıca dört kristal yapıda kalsiyum bileşiği karışımından oluşur (Çizelge 2.3). Bunların ikisi silis, biri alümin diğeri de alümin ve ferrit oksitlerin birlikte yer aldığı kalsiyum bileşikleridir (Bayram, 1998).

Çizelge 2.2 Klinkerin genel kompozisyonu

Mineral Bileşimleri	Kimyasal Formülleri	% Miktarları
Kireç	CaO	60-70
Silis	SiO_2	17-25
Alümin	Al_2O_3	3-8
Demiroksit	Fe_2O_3	0,5-6
Kükürttrioksit	SO_3	1-3
Magnezit	MgO	0,1-4
Diğerleri	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,2-1,3

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

Klinker Fazları	CaO	Al	Si	Fe
Trikalsiyum silikat (C_3S)	73,7	-	26,3	-
Dikalsiyum silikat(C_2S)	55,1	-	43,9	-
Trikalsiyum alüminat (C_3A)	52,3	37,7	-	-
Tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF)	45,1	21,0	-	32,9
Dikalsiyum ferrit(C_2F)	41,3	-	-	58,7

2.1.3 Hammadde Karışımının Hazırlanması

Ocaklardan elde edilen hammaddeler kırıcılardan genellikle iki aşamada geçirilerek tane boyları küçültülür. Çimento hammaddelerinin dikkatle orantılanmış bir karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silisdir. Bunları alümin ve demir oksit takip eder. Daha az miktarlarda magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddeler de bulunur (Yeğınobalı, 2003). Kireç (CaO) daha ziyade kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat

içeren kayalardan ortama girer. Silis (SiO_2) için 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 çimento kimyasına özgü semboller kullanılır.

$\text{CaO} = \text{C},$

$\text{SiO}_2 = \text{S},$

$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A},$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F},$

$\text{H}_2\text{O} = \text{H}$

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 bağıntı şöyledir:

$$100 \text{ C} / (2,8 \text{ S} + 1,18 \text{ A} + 0,65 \text{ F}) = \text{Kireç standardı} \quad [2.1]$$

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 (Yeginobalı, 2003).

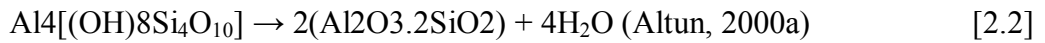


Şekil 2.1 Dik farin değirmeni

2.1.4 Çimento Üretim Aşamaları

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

Döner fırın dünyada endüstri tesislerinde bulunan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Çapı 3–7 m, uzunluğu 50–75 m kadar olup 50 mm 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 (Yeginobalı, 2003). 100–400 °C arasında kil minerallerine bağlanan su uzaklaşır. Ara tabaka suyu da bu sıcaklıklarda çıkabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda çıkabilir. Daha yüksek sıcaklıklar da (yaklaşık 400-750 °C'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 derecesine, gaz atmosferine v.d. bağlıdır. Ham karışımda yaklaşık ağırlıkça % 75–80 oranında bulunan CaCO₃ teorik olarak ≥ 896 °C'de [2.3] 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 550-600 °C'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 900 °C'de 425 kcal/kg CaCO₃ ısı enerjisi

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 [2.4] denklemine göre yine endotermik ve tersinir olarak ayrışır.



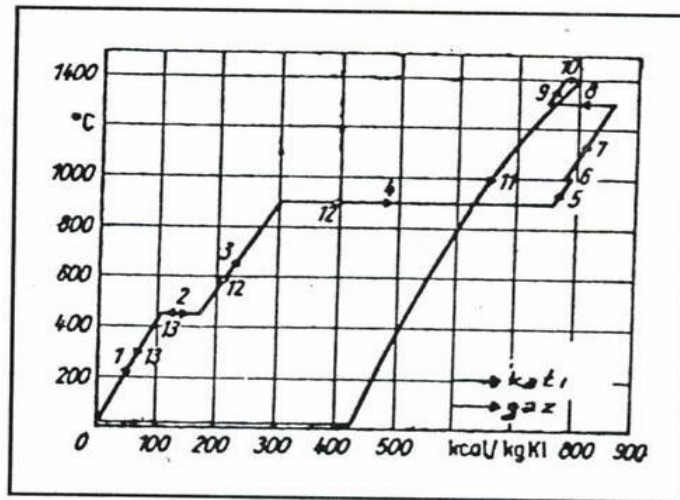
Reaksiyon için gerekli ısı enerjisi ise 298°C’ de 333 kcal/kg MgCO₃ mertebesinde (Okbas,1989). Bu reaksiyonlar yukarıdaki termodinamik özellikleri yanında kinetik olarak da beş etapta gerçekleşir.

1. Ortam ısısının tanecik yüzeyine genellikle konveksiyon yoluyla aktarılması,
2. Ayrışmış olan yüzeyden reaksiyonun olduğu iç kesime doğru ısının kondüksiyon yoluyla iletilmesi,
3. Reaksiyon bölgesinde kimyasal reaksiyonun oluşumu (iletilecek ısı kullanılmak suretiyle CO₂ intisarı ile yeni oluşan CaO yeniden kristalleşmesi),
4. Oluşan CaO tabakasını geçerek tanecik yüzeyine doğru CO₂ difüzyonu,
5. Tanecik yüzeyinden ortama geçiş (Okbas,1989).

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. Buharlaşma 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 sarfıyatı üzerinde kısa bir açıklamanın ısı bilançolarının hesaplanmasında yararı olacaktır (Okbas,1989).

Hammaddenin klinkere dönüştürülmesinde bir miktar ısıya ihtiyaç olduğu ve bu ısının hammaddenin bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir. Termodinamik olarak entalpiler 250 °C ve 1 kg klinker bazına indirgenmiştir. Şekil 2.2’de Entalpi (Δh)–Sıcaklık (t) diyagramında pişme prosesi ideal olarak ifade edilmektedir. 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, CO₂ ve H₂O nun 20 °C soğumasını göstermektedir (Okbas,1989).



Şekil 2.2 Entalpi (h) – sıcaklık(t) diyagramı

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 (Okbas,1989). Aşağıda teşekkül veya ayrışma ısıları verilmektedir.

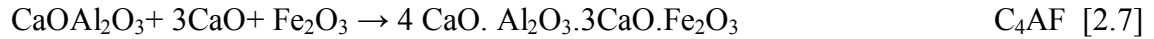
Kaolinit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+ 186 kcal/kg
Montmorilonit	Dehidratasyon	+ 58,5 kcal/kg
Illit	Dehidratasyon	+ 43,2 kcal/kg
MgCO_3	$\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2$	+ 333 kcal/kg
CaCO_3	$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$	+ 425 kcal/kg
Metakaolen	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2$	- 187 kcal/kg
CS α	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	- 173 kcal/kg
CS β	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	- 183 kcal/kg
C_3S_2	$3\text{CaO} + 3\text{SiO}_2 = 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$	- 164 kcal/kg
$\text{C}_2\text{S} \beta$	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	- 175 kcal/kg

C ₃ S	$3\text{CaO} + \text{SiO}_2 = 3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	- 118 kcal/kg
C ₃ S	$2 \text{CaO}.\text{SiO}_2 + \text{CaO} = 3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	+ 8 kcal/kg
CA	$\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \alpha = \text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	- 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 ₃ A	$3\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 \alpha = 3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	+ 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 ₂ F	$2\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \alpha = 2\text{CaO}.\text{Fe}_2\text{O}_3$	- 27 kcal/kg
C ₄ AF	$4\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \alpha = 4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	- 16 kcal/kg
Erimiş Klinker	$\% 54,8 \text{ CaO} + \% 22,7 \text{ Al}_2\text{O}_3 + \% 16,5 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + \% 6 \text{ SiO}_2$	+97 kcal/kg
CaSO ₄ 2H ₂ O	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	+ 118 kcal/kg
CaSO ₄ . ½ H ₂ O	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$	+ 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 ısısını teorik olarak hesaplamak üzere, bilinen klinkerin analizinden hareketle denklemler geliştirilmiştir [2.5] Burada Q; kcal/kg klinker şeklindedir (Okbas, 1989).

$$Q = 4,11 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 6,48 \text{ MgO} + 7,646 \text{ CaO} - 5,116 \text{ SiO}_2 - 0,59 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad [2.5]$$

Yaklaşık 550-600°C’ de klinker oluşumunda katı hal reaksiyonları başlar. CaCO₃ ayrışma ürünleri klinker ile reaksiyona girerek düşük kireçli bileşikler (CA, C₂S) oluşturur. C₃A ve C₂(A,F) formasyonu yaklaşık 800 °C’de başlar (Altun, 2000a). Reaksiyonlar aşağıdaki şekilde gerçekleşir.



Katı maddeler olan CaO ve SiO₂ arasındaki reaksiyonlar R. Jagitsch tarafından araştırılmıştır. Bu araştırmada iki reaksiyon fazı saptanmıştır (Altun, 2000a):

1. Yüzey alanı reaksiyonları: Yüksek enerjili Ca partikülleri CaO kafesinden koparak SiO₂ yüzeyine gelirler ve orada reaksiyon tabakası oluşturarak Ca partikülleri geçirmez hale gelir.

2. Difüzyon reaksiyonları: Burada reaksiyon hızları değil difüzyon hızları önemlidir.

R. Lindner de aynı görüşleri belirtmektedir. Ca ve SiO₂ temas ettiğinde bir reaksiyon zonu oluşmaktadır ve CaO, SiO₂' ye doğru yayılmaktadır (difüzyon). W.L. de Keyser ise zıt olarak, aynı reaksiyonda SiO₂'in CaO taneleri içine doğru difüzyonunu savunur ve önemli iki sonuca ulaşır (Altun, 2000a):

1. 1200°C' ye kadar yalnız oksitlerin difüzyonuyla reaksiyonlar gerçekleşir.

2. Reaksiyonun yönü ve sırası oksitlerin konsantrasyonundan bağımsızdır.

İlk eriyik fazı yaklaşık 1260–1310 °C'de oluşur. Klinker eriyiğın oranı sıcaklık arttıkça yükselir ve 1450 °C' de kimyasal bileşime bağılı olarak yaklaşık ağırlıkça %20-30' a ulaşır. Silikat Modülü (SM) arttıkça eriyik fazın oranı düşer. Portland çimentonun esas içeriğı olan C₃S oluşumunu bu sıcaklıklar sağlar. Sinterleşmenin başladığı anda C₂S yanında yüksek miktarda bağılı 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:

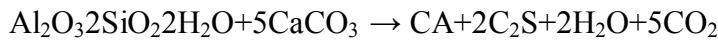


Klinker eriyiğının oluşumu endotermik bir reaksiyondur ve klinker soğurken eriyik ısısının büyük bir bölümü tekrar açığa çıkar. Kolay sinterleşme için yalnız eriyiğın mümkün olduğu kadar düşük sıcaklıkta oluşması değil, aynı zamanda oranının da yeterli büyüklükte olması gerekir (Altun, 2000a). Döner 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 1870 °C değerine (yani güneş yüzeyindeki sıcaklığın üçte birine) ulaşır. Bu en sıcak bölgede sıcaklığı 1480 °C'ye varan kalsine malzeme, kısmen ergiyip sıvılaşmaya baslar, ince taneler birbirlerine yapışıp daha büyük boydaki klinker tanelerini oluştururlar. Fırının alt ucundan çıkan klinker üzerinde soğutma işlemi uygulanır (Yeginobalı, 2003). Klinker oluşum reaksiyonları Şekil 2.3'deki sıcaklık basamaklarında gerçekleşir (Altun, 2000a).

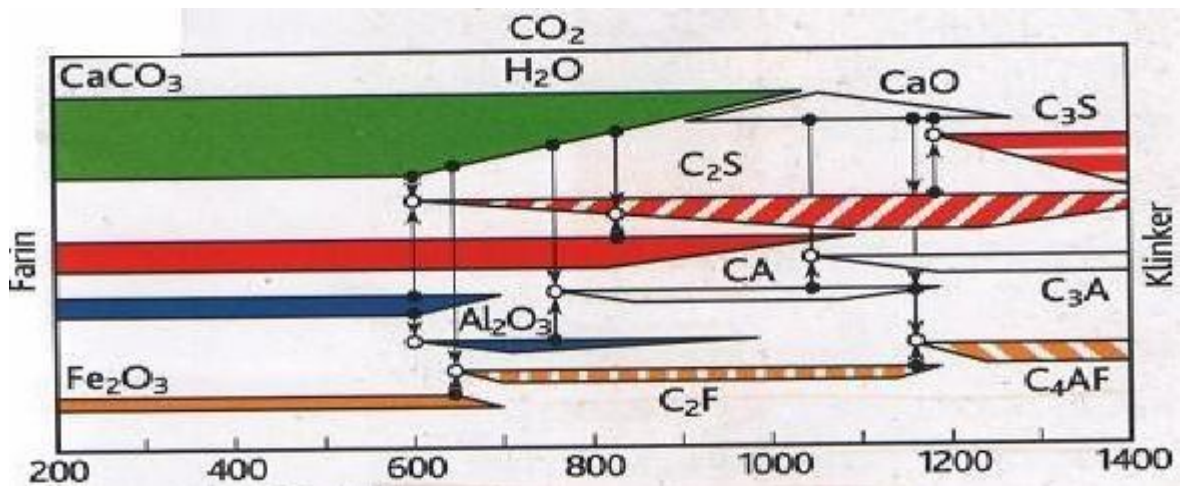
2.1.5 Döner Fırın Kimyası

Döner fırında çimento ham maddeleri içindeki kireç, silis ve alumin 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 (Yeginobalı, 2003). Aşağıya doğru daha sıcak bölgelerde kalsinasyon tamamlanır. Serbest kalan CaO kilden ayrılan SiO₂ ve Al₂O₃ ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminatları oluşturur. Farinden klinkere geçişte ham maddelerde mineral faz değişimleri Şekil 2,3’de gösterilmiştir.

Piştirme Sıcaklığı :°C _____ 650-1050 °C



1250 – 1450 °C



Şekil 2.3 Klinkerlerdeki faz değişimleri (Yeginobalı, 2003)

2.1.6 Klinkerin Soğutulması

Klinkerler, döner fırından yaklaşık 1300 °C’de çıkarlar. Bu aşamada klinkerin soğutulması ve ortamdaki ısıнын 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 içyapısını etkileyeceği için soğutma hızının kontrollü olması istenir (Yeginobalı, 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 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' 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 ' nin reaksiyon kabiliyetini (çimentonun katılma 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 ($>40\text{ K/dak.}$) 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 katılma hızı 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, 2000).

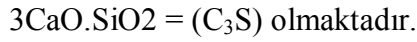
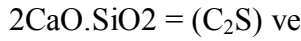
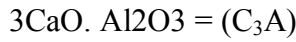
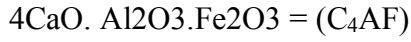
1. Orta-yavaş soğutmada ($10\text{--}20\text{ K/dak.}$) yeterli süre olduğu için periklaslar tamamen kristalleşir.
2. Orta hızlı soğutmada periklasın idiomorf kristallerinin oluşumunu sağlayacak kadar zamanı yoktur, daha çok dendritik veya küçük kristaller meydana gelir.

3. Çok hızlı soğuyan klinkerde periklaslar eriyikte hemen hemen kristalleşemezler, en fazla tek tek ve çok küçük boyutta dendritler şeklinde oluşurlar (Altun,2000).

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 yararlanır. (Yeginobalı, 2003).

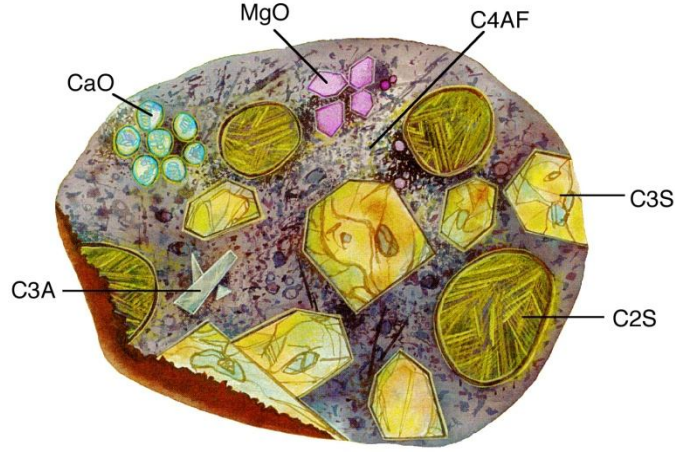
2.1.7 Klinkerin Bileşimi

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 (Yeginobalı, 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 μm 'ye kadar çıkabilir. Kesiti hegzogonal yapılıdır. % 3-4 oranında minör oksit içerir. Su ile hızlı reaksiyona girer ve çimento dayanımı ile hidrasyon ısını kontrol eden fazdır. 1250 °C'nin altında soğutma hızı çok yavaş değilse, normal sıcaklıklara kadar stabilitesini korur. Çok yavaş soğutma hızlarında ise alitin bir kısmı çözünür ve belit oluşur (Felekoglu vd, 2006).



Şekil 2.4 Klinkerin mikroskopik yapısı

C_3S klinkerin en önemli mineralidir. Renksiz kristaller halindeki hidrotasyon 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 °C) düşük likit faz vizkozitesi 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 °C arasında azami kirecin bağlanması 10 saniye içinde meydana gelir. Sinter reaksiyonunun bitişi 2–3 dakika sonra biter. Daha sonraki araştırmalar 1500°C'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 μm arasındadır. Belit alite kıyasla daha az reaktif olup ileriki yaşlarda dayanıma katkı yapar. C_2S 'in üç polimorfu vardır. Yüksek sıcaklıklarda α - C_2S oluşur. 1450°C'de β -formuna ve 670°C'de γ - C_2S 'e dönüşür. Ancak geleneksel çimento üretiminde kullanılan soğutma hızlarında belitin büyük kısmı β - C_2S formunda kalır (Felekoglu,2005). α - C_2S , 1425°C'den yüksek sıcaklık koşullarından oluşmaktadır, oysa β - C_2S , 690 °C'den düşük sıcaklıkta ortaya çıkmaktadır. Bazı durumlarda α - C_2S ve β - C_2S bir arada bulunabilirler. Bir arada var olmasının nedeni ise, soğutma prosesinin erken aşamasında sıcaklıktaki çok hızlı ve ani bir düşüşten dolayı α - C_2S tamamen β - C_2S 'ye dönüşemez, bunların bir kısmı klinker içerisinde tutulabilir (Hong vd, 2001). β - C_2S genellikle ikizlenme gösterir. Belit kristalleri bir araya gelerek kümelenir ve belit rozetlerini oluşturabilirler (Felekoglu vd, 2005). Eğer büyük belit kristalleri oluşmuş ise; “Bu formasyonunun sebebi, alit formasyon sıcaklığı altında toplanan kristalizasyon olabilir” (Altun, 1999a). Belitin modifikasyonu klinkerde daha çok bulunur ve hidrolik olmayan 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).

C_2S ($CaOSiO_2$) yavaş ve tedrici donar. Düşük hidratasyon ısılıdır. Kirli sarımsak renkli olan belit sinter bölgesinde katı fazda meydana gelir. Bu bileşik çimentonun zamanla sertleşmesini temin eder. α , β , γ varyantları mevcuttur. Ayrıca C_2S yavaş sertleşen hidrolik bağlayıcıdır. Portland çimentosunda C_2S genel olarak α ve β varyantı halinde bulunur (Kavas, 2002). Belit modifikasyonları Çizelge 2.4'de ve klinker fazlarının oluşumu Çizelge 2.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 Belit modifikasyonları (Altun, 2004)

	γ	β (Larnit)	α' (Bredijit)	α
Dönüşüm Sıcaklığı		670 °C		1420 °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

Çizelge 2.5 Klinker fazlarının oluşumu (Altun, 2000a)

Sıcaklık	Özellik
200 °C'ye kadar	Ham karışımdaki bağlanmamış nem yâda granülasyon için verilen suyun uzaklaşması
700 °C'ye kadar	Kil minerallerindeki suyun ayrışması, böylece kafes değişimleri ve yüzey aktivitesinin azalması
700-900 °C	CaCO ₃ 'ün kalsinasyonu, ayrışan 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 °C	SiO ₂ 'in geri kalan kısmıyla CaO'e bağlanması ve kalsiyum alüminat ferritin C ₃ A ve C ₄ AF dönüşümü
1250-1350 °C	Kalsiyum alüminat ferritlerin eriyik faz durumuna geçişi, belit ve serbest CaO'ın reaksiyonla alit oluşumunun başlaması
>1350 °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 yapılıdır (Felekoglu vd, 2005). Betonun ilk 24 saat içerisinde sertleşmesini temin eden siyahımsı partiküllerdir. Hidratasyon ısısı çok yüksektir. Su ile hemen sertleşir (Kavas, 2002). Hidratasyon etkisini yavaşlatmak için klinker alçıtaşı ile öğütülür (Yeginobalı, 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 (Felekoglu vd, 2005).

Kalker ve kil gibi ham maddeleri orantılayıp farini oluştururken bu dört ana bileşenin göreceli miktarlarını değiştirmek ve yeni bir hammadde 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 ısılı çimento üretmek mümkün olur (Yeginobalı, 2003).

Klinker bileşiminin geri kalan küçük (%10 civarındaki) bölümünde serbest CaO , MgO ile alkali oksitler ve SO_3 bulunur. Çimento ürünlerinde hacim genleşme ve çatlamalara yol açma olasılıklarından dolayı bu oksitlerin miktarları sınırlandırılır. Sonuç olarak tipik portland çimentolarının kimyasal bileşimleri % değerler olarak genellikle Çizelge 2.6'daki sınırlar arasında değişir.

Çizelge 2.6 Genel portland çimentosunun kimyasal (%) bileşimi (Yeginobalı, 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

2.1.8 Klinkerin Çimentoya Geçiş Aşaması

Soğutucudan çıkan klinker çimento üretiminde bir ara ürün sayılır. Çimento, klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat ile öğütülmesi sonucu elde edilir. Klinker kalsiyum sülfat ile doğrudan fabrikada öğütülebilir veya bu amaçla başka yerlerdeki öğütme tesislerine gönderilir. Yaklaşık 2 cm çapındaki klinker tanelerinin çimento tanesi inceliğine kadar öğütülmesi 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 50–100 °C 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 katılma 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 mineral katkıları katılarak değişik tipli çimentoların üretilmesi de giderek yaygınlaşan bir uygulamadır (Yeginobalı, 2003).

2.1.9 Yüksek Belit Çimentoları

Çimento klinkeri kuru sistemde yaklaşık 850 kcal / kg klinker enerji sarfıyatı ile üretilmektedir. Bu enerjinin büyük bir kısmı kalkerden gelen kalsiyum karbonatın bozunması ve pişme sıcaklığının 1450 °C de tutulması için sarf edilmektedir. Farin kalsiyum karbonat miktarını azaltarak yâda klinkerizasyon sıcaklığını düşerek enerjisi sarfıyatı 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 sarfıyatı % 10–15 azaltılabilir. Aktif belit klinkerinin PÇ klinkerinden farkı hidrolik aktivitesi yüksek belit fazının dominant olmasıdır. C_2S 'in farklı kristal yapıları sahip 5 modifikasyonu vardır. Bunlar: α (1425 °C), α_H (1160°C), α_L (630–680 °C), β (<500 °C), γ (780–860 °C). γ -modifikasyonu hariç hepside oda sıcaklığında metastabil haldedir. Soğutma esnasında β -modifikasyonu hidrolik özelliği pasif γ -modifikasyonuna dönüşür. 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 İyonlarla kararlı hale getirilebilmektedir. Klinkerdeki C_2S , C_3S 'den daha çok (% 4–6) B, K, Na, P, Ba, Sr, Ti ve Cr gibi yabancı iyonları kristal yapısına katı çözeltiliye, alma kapasitesine sahiptir (Gürbüz, 2005).

2.1.9.1 Belit Çimentoları

Genel olarak belit çimentosu PÇ' ye göre erken dayanıma katkısı az olup ileri yaşlarda yüksek mukavemet kazandırmaktadır. Bunun aksine, YBÇ'lerde 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 B₂O₃ (% 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 ve α H yüksek sıcaklık modifikasyonları içeren aktif belit oluşumu 1325 °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 (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 β -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).

2.2. Öğütme

Öğütme, kırma sonrası boyut küçültme prosesinin son aşamasıdır. Cevherin içerdği farklı mineralleri birini diğerinden serbest hale getirmek, prosese uygun boyut ya da yüzey alanı veya kullanım amacına uygun boyut sağlamak amacı ile öğütmede değişik değirmenler kullanılırken, öğütme şekli prosesin akışına bağlı olarak kuru ya da yaş olarak seçilebilir.

Öğütmede uygulanan kuvvetler: darbe, sıkıştırma veya ezme, kesme, sürtme kuvvetleridir. Sürtme ile boyut küçültme aşınma sonucu oluşur. Diğer kuvvetler ile taneler genellikle kırılarak küçültülürler. Malzemenin sert veya yumuşak olması kolay veya zor öğütülebilecekleri anlamına gelmemektedir. Öğütülebilirlik malzemenin kristal yapısı, bu yapının içindeki kristal ve fiziksel yapı bozuklukları ile ilgilidir. Malzemenin fiziksel yapıları ve boyut dağılımlarının homojen olmayışı nedeni ile değirmen içinde pülpün ve bilyanın oluşturduğu her öğütme ortamı ayrı bir özellik gösterir. Öğütücü ortam bilya, çubuk, çakıl, öğütülecek cevherin iri parçaları veya başka bir cevher olabilir. Öğütme işleminde partiküller genel olarak 2,5 cm' den 10 µm' ye kadar olabilmektedir.

Bütün cevherlerin çeşitli faktörlere bağlı, ekonomik bir optimum öğütme derecesi vardır. Bu faktörler arasında en önemlileri olarak kıymetli mineral veya minerallerin serbestleşme tane iriliği ve daha sonraki zenginleştirme işlemleri için uygun boyutlar sayılabilir. Bu optimum öğütme derecesinin sağlanması ve kontrolü, iyi bir cevher hazırlamanın anahtarını oluşturmaktadır. Az öğütme, ekonomik ayırmanın yapılamamasına, konsantrasyon kademesinde randıman ve tenörün düşmesine, aşırı öğütme ise kıymetli minerallerin verimli ayırma boyutlarından fazla öğütülmesine, gang minerallerinin şlam meydana getirerek ayırmayı engellemesine ve lüzumsuz enerji kaybına neden olur (İpekoğlu, Ü. 1989).

Öğütme kaba, ince ve çok ince öğütme olarak üç bölüme ayrılabilir. Günümüzde öğütme genellikle çubuklu, bilyalı, çakıllı ve otojen döner değirmenler ile titreşimli değirmenlerde gerçekleştirilmektedir. Cevher Hazırlama tesislerinde birinci ve ikinci kademe kırmada 0,1 – 2 kWh/t, ince öğütmede 5–20 kWh/t, çok ince öğütmede 20–100 kWh/t, 10 mikrometrenin (µm) altındaki öğütmelerde de 100–1000 kWh/t civarında enerji tüketilmektedir. Boyut küçültmede kullanılan net enerjiyi bulmak için toplam

enerjiden ses ve ısıya dönüşen enerjinin çıkarılması gerekir. Bake 1964'te boyut küçültmeye harcanan enerjinin toplam enerjinin ancak % 0,6' sı, Austin ise % 3' ten daha az olduğunu savunmuşlardır. Bu oranlar kesin olmamakla birlikte, boyut küçültmede harcanan enerjinin, harcanan toplam enerjiye oranının çok küçük olduğu bilinen bir gerçektir (Lynch, 1977).

Bu nedenle boyut küçültmede özellikle öğütme devrelerinin iyi tasarlanmış olmaları çok önemlidir. Öğütme devrelerinde projelendirme aşamasında yapılmış bir hatanın daha sonra düzeltilme maliyeti çok yüksektir. Öğütme devrelerinden daha iyi sonuçlar alabilmek için sürekli bir arayış içinde olunması da mühendisliğin bir gereğidir. En iyi şekilde projelendirilmiş öğütme devrelerinde de işletme sürecinde istenilen öğütmenin sağlanabilmesi ve verimliliğin artırılması için mutlaka değiştirilmesi gerekli parametrelerin olduğu unutulmamalıdır. Besleme, öğütücü boyutu ve miktarı, pülp yoğunluğu (yaş öğütmede) öğütme sürecinde kontrol altında tutulması gerekli en önemli parametrelerdir.

2.2.1 Boyut Küçültme Teorileri

Boyut küçültme ile ilgili üç prensip vardır (Bond, 1961):

I. Prensip: Boyutu küçülecek her tanenin bir enerji seviyesi vardır. Tanenin boyutunu küçültmek için bu enerji seviyesini artırmak gerekir.

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad [2.10]$$

ΔE = Harcanan enerji, E_1 = Kırılmış tanedeki enerji, E_2 = Kırılacak tanedeki enerjidir.

II. Prensip: Boyut küçültmede harcanan faydalı enerji, yeni oluşan parçaların çatlak uzunlukları ile orantılıdır. Kırılma ve öğütmede kırılacak parça kullanılan enerjiyi belirli bir süre absorbe eder. Bu sürenin sonunda parça içindeki en zayıf kısımdan çatlayarak absorbe edilen enerji boyut küçültme işine dönüşür. Bu olay, tanelerin bünyesinde bir reaksiyon zinciri olarak devam ederek, taneler daha ufak boyutlara ayrılır.

III. Prensip: Bu prensip malzemenin kırılması ile malzemedeki yapısal bozukluklar arasındaki ilişkiye dayanır. Yapısal bozukluklar, malzeme içindeki zayıflıklar ile ilgili olup belirli bir kuvvetin, belirli bir süre etkisi ile çatlaklara dönüşebilir. Parça içindeki en zayıf yapısal bozukluk, kırma ve öğütme için gerekli kuvvet seviyesini belirler.

Enerji ile malzeme boyutu arasındaki ilişkilerin ifade edildiği değişik yasalar mevcuttur. Rittinger, boyut küçültmede kullanılan enerjinin, öğütme sonucu oluşan yeni yüzey alanı ile orantılı olduğunu savunmuştur. Bu orantıya karşın oluşan yeni yüzeylerin yüzey enerjisi, kırma ve öğütmede gereken enerjinin 1/100 gibi çok az bir kısmını oluşturmak tadır. Boyut küçültmede gerekli enerjinin tamamına yakın bir kısmı, parça küçüldükten sonra ısı olarak açığa çıkmaktadır. Rittinger yasası aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmiştir.

$$E = CR.(1/P - 1/F) \quad [2.11]$$

Burada; E = Özgöl öğütme enerjisi tüketimi, kWh/t, F = Beslenen malzeme boyutu, μm , P = Ürün parça boyutu, μm , CR = Rittinger sabitidir. Rittinger yasası, deneysel ve matematiksel olarak kanıtlanmamıştır. Deneysel olarak bu yasanın kanıtlanabilmesi için küçülmüş malzemelerin moleküler boyutta ölçümü gerekmektedir. Bu yasada kırma öncesi parçanın deformasyonunun göz önüne alınmaması teorik olarak yasanın en önemli eksikliğidir (Yıldız, 1999).

İkinci boyut küçültme yasası, 1883 yılında Kick tarafından savunulmuştur. Kick olayı tane hacmi küçülmesi yönünden ele almakta ve homojen kayaçların kırılmasında hacim küçültme ile orantılı bir enerji sarfı gerektiğini iddia etmektedir. Kanunun ifadesi “geometrik olarak birbirine benzer iki cisimden aynı derecede ufalama elde etmek için gerekli enerji, bu cisimlerin hacimleri (veya ağırlıkları) ile orantılıdır”. Diğer bir deyişle; belirli hacimsel değişimler için aynı enerji sarfıyatı gereklidir. (İpekoğlu, 1989). Ufalamanın kollektif karakterini de göz önünde bulundurarak Kick kanununu matematiksel olarak;

$$E = CK. \log (P/F) \quad [2.12]$$

şeklinde formüle etmiştir. Burada; P/F = Ufalama oranı, CK = Kick sabitidir. Bu kanun çok sayıda kırma-öğütme deneyi sonuçlarının analizine dayanılarak ortaya atılmıştır. Bond, Rittinger ve Kick teorilerine karşı çıkmış ve “Boyut küçültmede fay dalı iş, meydana getirilen çatlak uzunlukları ile orantılıdır” görüşünü savunmuştur. Çatlak uzunluklarının ise kırılma sonunda yeniden meydana gelen yüzeylerin karekökü ile ters orantılı olduğu bulunmuştur. Boyut küçültmede çatlak teşekkülü tane içindeki yapısal zayıflıklara bağlıdır. Bunlar kuvvet uygulandığı zaman çatlak haline gelebilecek strüktürel zayıflıklardır.

Her malzemenin ufalanma için ihtiyaç göstereceği enerji miktarı farklıdır. Bond “İş Endeksi” (malzemelerin kırılma ve öğütmeye karşı gösterdikleri direnci ifade eden bir parametre) diye bir değer tanımlamış ve bunu “sınırsız büyüklükteki parçalardan meydana gelmiş bir malzemenin birim ağırlığının % 80’i 100 mikron metrenin (μm) altına geçecek şekilde ufalanması için gerekli enerji” olarak ifade etmiştir.

$$E = 10.W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad [2.13]$$

Burada; E= Birim ağırlığı kırmak için gerekli enerji, kWh/t, W_i = İş indeksi, kWh/t, F = Kırılacak malın % 80’ inin geçtiği elek açıklığı (μm), P = Kırılmış malın % 80’inin geçtiği elek açıklığıdır (μm). Homojen cisimlerin ufalama işlemlerinde W_i sabittir. Cevher hazırlamada ise çoğunlukla heterojen cisimler söz konusudur. Bu nedenle W_i her malzeme için değişmektedir. Minerallerin doğal hallerinde bir tane büyüklüğü vardır. Bu büyüklükten daha iri ve daha ince boyutlara ufalama işlemlerinde iş indeksi değişir. Ayrıca kırıcı aletin randımanı da iş indeksini etkiler. Bazı maddelerin iş indeksleri literatürde tablolar halinde verilmektedir. Ancak tam doğru sonuç için her malzemenin iş indeksini laboratuarlarda, uygulamada kırılacak boyuta yakın bir boyutta tayin etmek gerekir (İpekoğlu, 1989).

Charles, (1952) boyut küçültmede gerekli enerjiyi aşağıdaki eşitlik ile ifade etmiştir;

$$E = A.(X)^{-n} \quad [2.14]$$

Burada E = Boyut küçültme için gerekli enerji, kWh/t, n = Schuhmann eğrisinin lineer kısmının eğimi, A = Malzeme dayanımına bağlı bir faktör X = Boyut modülüdür. Eşitlikte n değeri Schuhmann eğrisi kullanılarak belirlenmektedir.

Holmes, boyut küçültmede harcanan enerjiyi aşağıda verilen eşitlik ile ifade etmiştir (Holmes, 1957).

$$E = W_i[(100/P)^r - (100/F)^r] \quad [2.15]$$

Burada; E = Boyut küçültme için gerekli enerji, kWh/t; W_i = İş indeksi, kWh/t; P = Boyutu küçülmüş parçanın çapı, μm .; F = Boyutu küçülecek parçanın çapı, μm ; r = Malzeme inceliğine bağlı olarak artan bir sabittir.

Charles (1957) ise geçerlikte olan bütün ufalama kanunlarını genel bir diferansiyel denklem olarak ifade etmiştir (Kinasevich vd, 1964).

$$dE/dx = -C \cdot 1/X^n \quad [2.16]$$

E = Boyut küçültme için gerekli enerji; x = Tane boyudur. Bu diferansiyel denklemde; n = 2 için Rittinger, n = 1 için Kick n = 1,5 için, Bond kanunları elde edilir.

2.2.2 Çimento Sanayinde Öğütme

Çimento; hava veya suda sertleşen, sertleştikten sonra da suda çözünmeyen ve silisyum, alüminyum, kalsiyum ve demir oksitleri içeren hammaddelerin, sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul madde klinkerin tek veya daha fazla katkı maddesi ile öğütülmesi yoluyla üretilen hidrolik bağlayıcıları içeren bir malzemedir (Taskın, 1984). Çimento üretiminde teorik olarak yalnızca CaCO_3 ve SiO_2 'ye gerek vardır. Ancak prosesin ısı ekonomisi açısından Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi ürünün kalitesini bozmaksızın klinkerin pişirme sıcaklığını düşüren akışkanlaştırıcı maddeler de hammaddeye katılmaktadır.

Çimento hammadde olarak en yaygın kullanılan maddeler, kireçtaşı, kil, şist, marn ve jips'dir. Çimento üretim süreci içerisinde hammadde hazırlanması madencilik işlemleri ile başlamaktadır. Madencilik işlemlerini, ocak çıkışı hammaddelerin kırılması izlemektedir. Kırılan hammaddeler harmanlanarak birincil homojenleşme sağlanmaktadır. Kireçtaşı + kil + demir oksitleri içeren hammaddenin (farin) öğütülmesinde en önemli nokta istenilen incelikte ürün elde etmektir. Böylece, döner fırın beslemesinin harmanlanması ve sinterlenmesi daha kolay olmaktadır. Hammaddenin öğütülerek büyük yüzeye sahip ürün elde edilmesi, döner fırına beslenen bu ürünlerdeki bileşenler arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonların hızlarını arttırmak için gerekmektedir (Hansen, 1983). Farin öğütmede yaş ya da kuru sistem kullanılabilmesine karşın dünyadaki enerji maliyetindeki artışlar nedeniyle son yıllarda yaş öğütme hemen hemen terk edilmiştir (Malzig vd, 1985).

Genellikle hammadde, kuru öğütme devrelerinde öğütülmekte ancak zaman zaman nem içeriği nedeniyle öğütme öncesi kurutma işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Kurutma öğütme prosesine ilave olarak çimento sektöründe kurutma işlemi döner kurutucularda, ani kurutma (flash drier) proseslerinde, darbeli kurutucularda (kurutma

ekipmanlarıyla birlikte darbeli kırıcı), mekanik havalı separatörlerde ve otojen değirmenlerde gerçekleştirilmektedir. Kurutma-öğütme proseslerinin en belirgin özelliği birbirinden farklı iki prosesin öğütme ortamında birleştirilmesidir. Genellikle çimento tesislerinde kurutma amacıyla fırın atık gazlarından ve klinker soğutma prosesinden artakalan gazlardan yararlanılmaktadır. Bunların yetersiz kaldığı durumlarda ise muhtelif yakıtlar ile çalışan sıcak hava ocakları devreye girmektedir.

Çimento üretiminde klinker ile beton oluşumunda geciktirici olarak kullanılan jips belirli bir özgül yüzey alanında çimento elde edilmek için kuru olarak birlikte öğütülmektedirler. Klinkerin öğütülmesi, çimentonun hidratasyonu ve beton dayanımındaki artışın uygun zaman içerisinde olması için gerekmektedir. Klinker, genellikle istenilen dayanımı sağlamak için belirli incelikte öğütülmektedir. Klinker ve jipse, puzolonik madde, tras, uçucu kül vb. katkı maddeleri ilavesi ile katkılı çimento üretilmektedir. Çimento sanayinde çok farklı tiplerde çimento üretimi yapılmaktadır. Çimento sanayinde öğütme hammadde, klinker ve kömür için yapılmaktadır. Öğütmenin en önemli amacı kullanım için istenilen özelliklere uygun ürünün elde edilmesidir (Gouda,1981). Bu malzemelerin öğütülmesinde çeşitli sistem ve ekipmanlar kullanılmaktadır. Çimento öğütme, genellikle kamaralı tüp değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütücü ortam olarak bilya kullanılmakla birlikte son kamarada silpebs de kullanılmaktadır. Tüp değirmenler dışında, düşey değirmenler ve horomill gibi ekipmanların kullanımı da özellikle son yıllarda oldukça artmıştır.

2.2.2.1 Kuru Öğütme

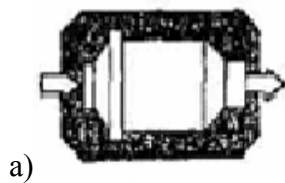
Çimento, bentonit, kömür, fosfat ve bazı mineral konsantreleri ile kuru kullanılması gereken ve üretildiğinde yüksek nem içermeyen mineraller kuru olarak öğütülebilir. Kuru öğütme için, öğütülecek malzemenin öğütme öncesi veya öğütme süresinde sıcak hava ile nem oranının düşürülmesi gerekir. Öğütülmüş malzeme, fan veya basınçlı hava ile çalışan pnömatik pompalarla taşınır. Kuru öğütmede malzemenin değirmen içindeki hareketini sağlamak için değirmenin çıkış tarafına vakum, ya da giriş tarafına basınçlı hava uygulanır. Bazen vakum ve basınçlı hava birlikte de kullanılabilir. Uygulanacak vakum veya basınç, malzemenin değirmen içinde yığılmasını önlemeli, malzemenin değirmen içinde öğütülebilmesi için yeterli süre kalmasını sağlamalıdır.

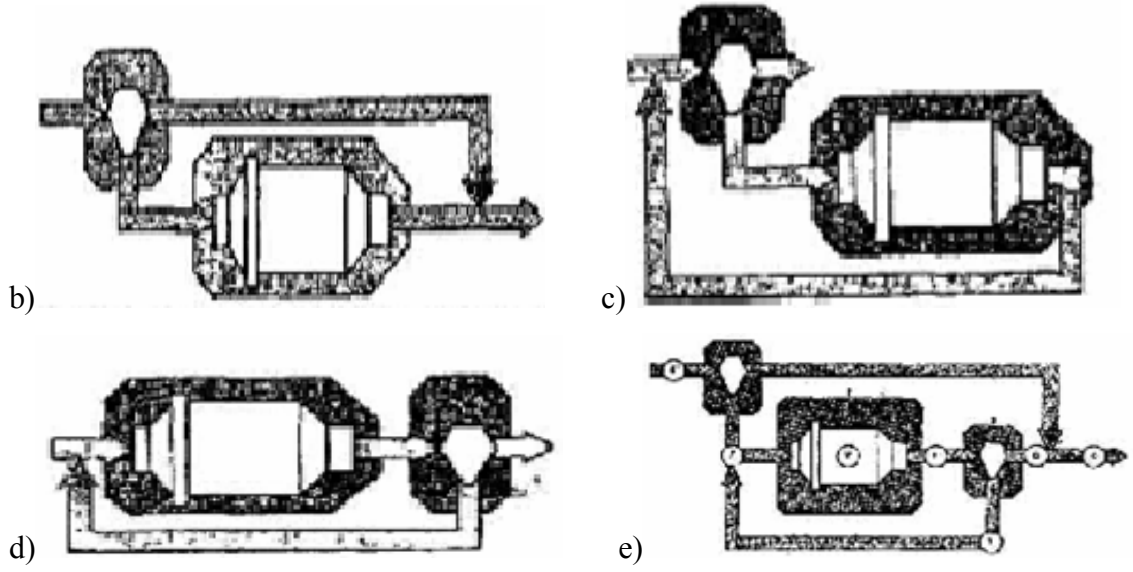
Kuru öğütmede, bilyalı değirmen içindeki hava akımı öğütme esnasında ısınan değirmenin gövdesini de soğutmaktadır. Bazen de değirmen gövdesi için ayrı bir soğutma sistemi kullanılmaktadır. Genellikle kuru öğütmede değirmen durdurulduktan sonra, sıcak gövdenin hasar görmemesi için değirmen gövdesi soğuyuncaya kadar düşük devirde döndürülmelidir. Kuru öğütme devrelerinde valsli, bilyalı, otojen veya yaygın olmasa da çubuklu değirmen kullanılmaktadır.

2.2.2.2 Yaş Öğütme

Cevher hazırlama tesislerinin çoğunda öğütme yaşı olarak yapılmaktadır. Çünkü öğütme sonrası zenginleştirme işlemlerinde genellikle su kullanılır. Proses makinelerinin çoğu sulu ortamda çalışmak üzere dizayn edilmiştir. Yaş olarak öğütmede pülp hazırlanır ve hazırlanan pülpün istenilen basınç ile genellikle doğal kauçuk astarlı lastik borular kullanılarak belirli mesafelere taşınması çok kolaydır. Açık ve kapalı devre şeklinde iki türlü yapılan bu işlem daha sonra klasifikatörler aracılığı ile sınıflandırılır.

Klasik kapalı devrelerde, malzemenin tamamı önce değirmene sonra sınıflandırıcıya gönderilir. Değirmene gönderilen malzemenin belirli bir kısmı istenilen öğütme boyutundadır. Bu malzeme, değirmenden geçerken gereksiz yere daha küçük boyuta öğütülecektir. Bu durum öğütme kapasitesini düşürürken, gereksiz enerji tüketimine de neden olduğundan istenmeyen bir durumdur. Sınıflandırıcı sonrası kapalı devrelerde öğütülecek malzeme öncelikle sınıflandırıcıya gönderilerek, öğütülmesi gerekli malzeme, ince boyutlu malzemedan ayrıldıktan sonra değirmene beslenir. Bu devrelerin kapasiteleri yüksektir; ancak sınıflandırıcıya gönderilen, genellikle kırıcı ya da çubuklu değirmen çıkışı köşeli malzeme siklon, pompa ve akış hattında aşırı aşındırmalara neden olmaktadır. Bazı açık ve kapalı devre öğütme sistemleri Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Cevher hazırlama tesislerindeki en büyük sorunlardan biri de aşınmadır. Klasik ve sınıflandırıcı sonrası kapalı devreleri birlikte kullanmak da mümkündür. Devre seçimi proses mühendislerince belirlenir ve tesislerde zamanla değiştirilebilir.





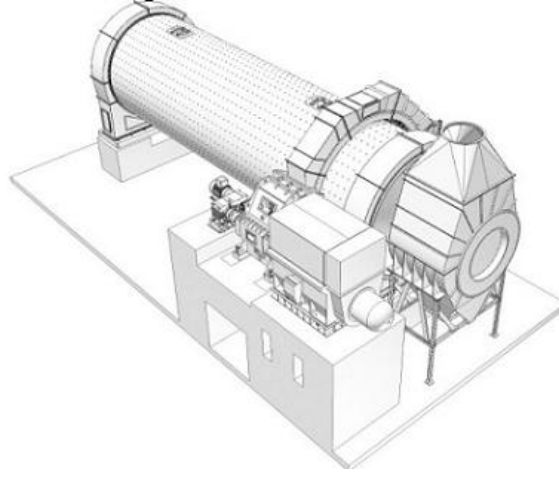
Şekil 2.5 a) Açık devre, b) Değirmen öncesi sınıflandırıcılı açık devre öğütme sistemi, c) Geri dönüşlü kapalı devre öğütme sistemi, d) Klasik kapalı devre öğütme sistemi, e) Öğütme öncesi ve sonrası sınıflandırıcılı devre öğütme sistemi

2.2.2.3 Kuru ve Yaş Öğütmenin Karşılaştırması

Yaş öğütme kuru öğütmeye göre daha az (kuru öğütmenin % 60-90'ı oranında) güç sarfı gerektirir. Yaş öğütmede değirmen hızı %10 daha hızlı, kapasite daha fazladır. Ürün kontrolü daha kolay olup toz problemi yoktur. Kuru öğütmede ise astar ortam sarfıyatı ve klasifikatör eskimesi azdır. Öğütücü ortam hacmi yaş öğütmede % 40-50, kuru öğütmede % 35-45' dir. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda, yaş öğütmenin iri taneler için daha seçimli olduğu görülmüştür (Ersayın ve Aksarı 1991).

2.2.3 Bilyalı Tüp Değirmenler

Çelik bilyaların öğütücü ortam olarak kullanıldığı değirmenler bilyalı değirmen olarak adlandırılmaktadır. Bilyalı değirmenlerin boy-çap oranı 1 ile 1,5 arasında değişmektedir. Boy-çap oranı 3 ile 5 arasında değişen değirmenler tüp değirmen olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.6'da kamaralı bir tüp değirmen görülmektedir.



Şekil 2.6 Kamaralı t p değirmen

Öğütme, prosesin akışına ve cevherin durumuna göre yaş ya da kuru olarak yapılır. Öğütme şekline göre, sistemdeki sınıflandırıcı ve diğer proses makineleri seçilir. Otojen  ğ tme, klasik öğütmeye göre, yaklaşık 1/3 daha ekonomiktir. Kuru  ğ tme, yaş öğütme ile karşılaştırıldığında yaklaşık 1,3 kat daha fazla enerji gerektirir. T p değirmenler çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır (Labahn,1983).

Öğütme kamaralarının sayısına göre;

- Tek kamaralı değirmenler
- Çok kamaralı değirmenler

Ürünün ıkış yöntemine göre;

- Değirmenin döndüğü yataktan çıkışlı (tasmalı)
- Hava akışı ile değirmen yatağından çıkışlı (hava süpürmeli)
- Ortadan evresel çıkışlı,
- Çevresel ıkışlı

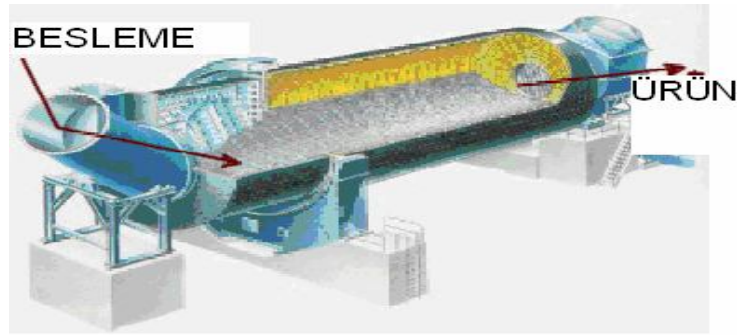
Öğütme işleminin doğasına göre;

- Yaş  ğ tme (hammadde  ğ tme)
 - Kapalı devre
 - Açık devre
- Kuru  ğ tme
 - Kapalı devre

- Açık devre

Tüp değirmenler kullanılış amaçlarına göre çok kamaralı olarak kullanılabilmekte ve her kamarada farklı bilya dağılımı kullanılması mümkün olmaktadır. Bu da farklı öğütme işlemi yapan birkaç bilyalı değirmenin seri olarak bağlanmasına eşdeğer bir işlev görmektedir. Tüp değirmenler özellikle ince öğütmelere ihtiyaç duyulan kuru öğütme işlemlerinde kullanılmaktadır. Değirmenin hareketi ile birlikte malzemenin bilyaların arasındaki boşlukları doldurmasıyla bilyalar ve malzeme bir yatak meydana getirmektedir. Silindirik gövde içerisinde bu yatağın hareketi üç şekilde olmaktadır.

1. Kendi ekseninde dönme
2. Kayarak yuvarlanma
3. Serbest düşme



Şekil 2.7 Bilyalı değirmenin iç görüntüsü

Dönüş hareketi ile birlikte astar tasarımı sayesinde bilyalar belirli bir potansiyel enerji kazanmaktadırlar. Değirmenin hızına göre belirli bir yüksekliğe erişen bilyalar serbest düşmeye maruz kalmaktadır. Serbest düşme sırasında sahip olunan potansiyel enerji değirmen yükünün topuğunda darbe etkisiyle kinetik enerjiye dönüşmekte ve öğütme meydana gelmektedir. Bu hareket katarakt etkisi olarak tanımlanmaktadır. Çok kamaralı değirmenlerin özellikle birinci kamarasında bu etki hâkimdir. Yatak içerisinde sıkışan bilya ve malzeme astar boyunca değirmen cidarında kayma hareketi de meydana getirmektedir. Bu hareket kaskaden etkisi olarak bilinir ve tüp değirmenlerin ikinci kamaralarında hakimdir. Bu tür etki sonucunda aşınma ile öğütme meydana gelmektedir. Özellikle ince öğütme yapan değirmenlerde veya değirmen kamaralarında bu etki hâkimdir. Çimento sanayinde bilyalı değirmen öğütme sistemlerine etki eden

çeşitli faktörler vardır. Bu faktörlerin biri veya birkaçının öğütmeye etkisi hem nicel hem de nitel olarak ortaya çıkmaktadır (Gouda,1981). Bunlar;

- Değirmen boyutları
- Kritik hız
- Bilya çapı ve miktarı
- Astar tasarımı
- Izgara tipi
- Değirmen havalandırma hızı
- Kullanılan separatör tipi v.b.



Şekil 2.8 Bilyalı değirmen dış görüntüsü

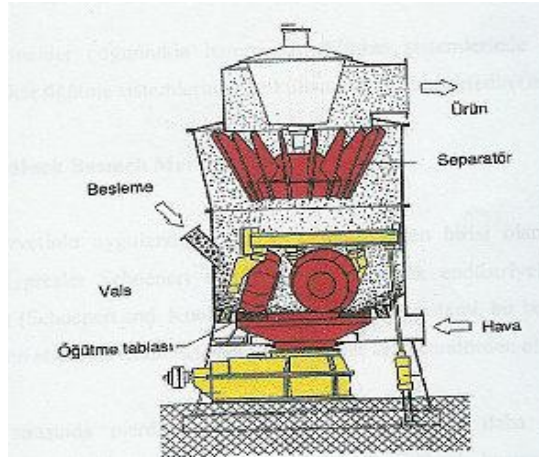
Değirmenler genellikle kritik hızlarının % 68-75'i arasında çalıştırılmaktadırlar ve bu sayede değirmen içerisinde özellikle iri tanelerin kırılması için gerekli darbe etkisi sağlanmış olmaktadır (Rolf, 1993). Yapılan çalışmalar sonucunda küçük bilyaların ince öğütmede büyük bilyaların ise iri öğütmede kullanılmaları gerektiği belirlenmiştir. (Klimpel, 1997). Bilyalı değirmenler için önerilmekte olan en uygun doldurma oranları % 25-45 aralığıdır. % 25'den az bilya doldurma oranında özgül enerji tüketimi daha az olmasına rağmen aşınma miktarındaki artış belirli bir alt limiti zorunlu kılmaktadır.

2.2.4 Dik Değirmenler

Dik değirmenlerin öğütme prensipleri temel olarak iki yüzey arasında malzemenin sıkıştırılarak ezilmesi prensibine dayanmaktadır. Sistemde bir besleyici, öğütme tablası sabit pozisyonlu valsler, hava enjeksiyon halkaları ve separatör besleyici birimleri yer alır (Şekil 2.9). Malzeme, besleyici vasıtasıyla öğütme tablasına beslendikten sonra

merkezkaç kuvveti etkisiyle tabla kenarına doğru hareket etmekte ve valsler ve tabla arasından geçerken valslerin uyguladığı ezme kuvvetinin etkisiyle ezilerek öğütülmektedir. Öğütülen malzeme, tabla etrafında bulunan hava enjeksiyon halkalarından püskürtülmekte olan sıcak gazların etkisiyle yukarı yönde separatöre doğru taşınmaktadır. Separatörde sınıflandırılan malzemenin irisi öğütme ortamına geri dönerken, separatör incesi son ürün olarak alınmaktadır (Brugan, 1992).Günümüzde kullanılan dik değirmenleri, öğütme tablasının ve valslerin geometrik şekillerine, sayılarına, yerleşimlerine ve uygulanan basınç kuvvetlerine bağlı olarak dört ana grupta toplamak mümkündür (Öner, 1996).

- Düz tablalı valsli değirmenler
- Oluk hazneli valsli değirmenler
- Oluk hazneli-toplu değirmenler
- Sarkaç değirmenler



Şekil 2.9 Bir dik değirmene örnek; Pfeiffer MPS valsli değirmeni

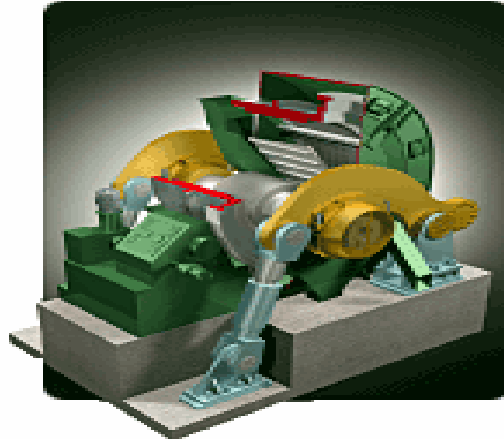
2.2.5 Yüksek Basıncılı Merdaneli Presler

Ezme kuvvetinin uygulandığı öğütme sistemlerinden birisi olan yüksek basınçlı merdaneli presler Schönert tarafından geliştirilerek endüstriyel uygulama alanı bulmuştur (Schoenertand ve Knoblach, 1984). Öğütme sistemi, bir besleyici ile birlikte yatay eksen etrafında dönmekte olan merdaneler ve separatörden oluşmaktadır. Öğütme sırasında merdaneler tarafından 50 MPa'dan daha yüksek basınçlar uygulanarak öğütme sağlanmaktadır. Bu kadar yüksek basınç altında öğütülen malzeme, presi yassı bir kek olarak terk ettiğinden, bunun sınıflandırma ünitesine girmeden önce bir dağıtma ünitesinde dağıtılması gerekmektedir. Yeni geliştirilen bazı sınıflandırıcılara bu kekler

doğrudan beslenebilmekte ve sınıflandırıcı tarafından dağıtılabilmektedir. Sekil 2.10’da modern bir yüksek basınçlı merdaneli pres olan horomill’in şekli verilmektedir.

2.2.6 Horomill

Yüksek basınçlı proseslerde, enerji verimliliği, kaliteli ürün ve mekanik güvenilirlik gibi etmenlerden dolayı elde edilen başarı nedeniyle özellikle aşınma problemlerinin en aza indirgenebileceği teknikler araştırılmaya başlanmıştır. Bunun sonucunda halka ve merdane prensibine dayalı bir değirmen olan Horomill geliştirilmiştir (Cordonnier, 1994). Sistemde kritik hızın üzerinde dönen bir öğütme halkası bulunmaktadır. Dönen halkanın her iki tarafında toz sızdırmaz contalarla donatılmış sabit kapaklar bulunmaktadır. Değirmene beslenen malzeme halka ve basınç yüklü merdane arasında ezilerek öğütülmektedir. Merdanenin halka ile aynı yöndeki dönüşü öğütülen malzemenin oluşturduğu sürtünme kuvvetine bağlıdır. Halkanın kritik hızın üzerinde dönmesinden ötürü taneler merkezkaç kuvvetinin etkisiyle halka iç çeperine yapışmakta ve dönüş hareketinin etkisiyle bu taneler merdane ve çeper arasından geçerek öğütülmektedir. Değirmen içerisinden çepere yapışan malzeme bir sıyırıcı ve taşıma plakası vasıtasıyla öğütme ortamından dışarı alınmaktadır. Dışarı alınan malzeme separatörde sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırıcı irisi değirmene geri dönmektedir.



Şekil 2.10 Horomill

2.3 Adoçim Çimento Fabrikası

Adoçim Çimento Fabrikası Tokat İlinin Artova İlçesinde 2005 yılında kurulum çalışmalarına başlamış, 2006 yılında kırma eleme ve beton hazırlama tesislerini kurmuştur. Tokat Adoçim Çimento Fabrikası 18 Aralık 2007 tarihinde tam olarak faaliyete geçmiştir. Fabrika Tokat merkeze 38 km, Samsun limanına 240 km, Sivas merkez'e 90 km, Kayseri merkeze 266 km uzaklıktadır. Tesisler alanına kurulan demir yolu hattı ile Samsun limanlarına demiryolu bağlantısı sağlanmıştır.

Adoçim Entegre Çimento Fabrikasında, günlük klinker üretim kapasitesi 3.500 ton olup, yıllık 1.200.000 ton klinker üretimi hedeflenmiştir. Üretilcek çimentonun İç Anadolu ve Orta Karadeniz bölgesindeki inşaat sektörünün taleplerini karşılaması ve ihracat yolu ile satışı planlanmıştır. Fabrika üretimi ana hammaddelerini, uhdesinde bulunan kalker, kil ve alçıtaşı ocaklarından temin etmektedir. Demir cevheri ve boksit gibi yardımcı hammaddeleri tedarikçi firma tarafından sağlamaktadır. Yıl içerisinde kalker ocaklarından 1.800.000 ton kalker, yaklaşık olarak 550.000 ton kil üretmektedir. Kullanılan hammaddelerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2.7 de verilmiştir.

Çizelge 2.7 Adoçim hammaddeleri kimyasal analiz sonuçları

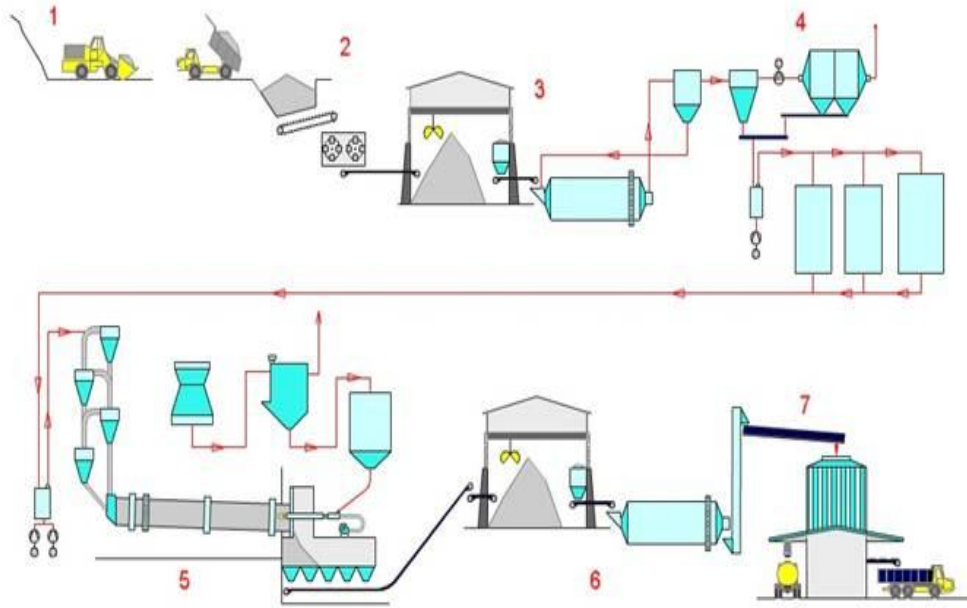
% Kimyasal Bileşen	Kalker	Çimento Kili	Demir Cevheri
KK	42.65	6.55	5.46
SiO ₂	0.18	56.83	16.88
Al ₂ O ₃	0.03	17.10	1.03
Fe ₂ O ₃	0.1	6.80	70.22
CaO	55.73	2.41	0.20
MgO	0.33	1.91	0.32
SO ₃	0.02	0.09	0.62
Na ₂ O	0.04	1.00	0.01
K ₂ O	0.02	3.63	0.50
TiO ₂	-	0.98	0.27
P ₂ O ₅	-	0.16	0.30
Cr ₂ O ₃	-	0.014	0.00

Tesis üretim çalışmaları 7 aşamadan oluşmaktadır (Şekil 2.12). Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler; hammadde ocaklarından genellikle sert oldukları için patlayıcı maddeler yardımıyla çıkarılır ve yükleyici iş makineleri ile nakil

araçlarına yüklenerek kırılmak üzere konkasörlere (Taş Kırıcı) taşınır (1). Hammaddeler, konkasörlerde kırıldıktan sonra stokholde stoklanır (2). Gezer vinçler yardımıyla stokholden alınan hammaddeler belli oranlarda karıştırılarak farin değirmenlerine alınarak öğütülürler (3). Farin adını alan karışım pişirilmek üzere hazır olarak farin stoklarında stoklanır (4). Ön ısıtıcılardan geçirilerek döner fırına sevk edilen farin yaklaşık 1400-1450 derece sıcaklıkta pişirilir (5). Döner fırından klinker olarak çıkan yarımamül ürün soğutucuda soğutulur ve klinker stokholünde stoklanır (6). Alçıtaşı ve üretilecek çimento cinsine uygun katkılarla çimento değirmenlerinde öğütülür (6). Çimento cinslerine göre ayrı ayrı silolarda stoklanan çimento, torbalı ve dökme çimento olarak satışa sunulur (7).



Şekil 2.11 Adoçim Çimento Fabrikası genel görünümü



Şekil 2.12 Adoçim Çimento Fabrikası üretim akış şeması

MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında endüstriyel ve laboratuvar ölçekli çalışmalar yürütülmüştür. Endüstriyel çalışmalar sırasında Adoçim Çimento Fabrikası 2 nolu çimento değirmeni kullanılmıştır. Laboratuvar ölçekli çalışmalarda ise klinker karakterizasyonu ve çimento dayanımlarına yönelik fiziksel ve kimyasal çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmada Tokat Adoçim Çimento fabrikasında üretilen klinker ve Adoçim Çimento Fabrikasına ait alçıtaşı kullanılmıştır. 2 nolu çimento değirmeninde çalışma süresince % 95 klinker, % 5 alçıtaşı reçetesi ile portland çimentosu (Cem I 42,5 R) üretilmiştir. Çalışma sürecinde (6 aylık periyot) üretim hammadde girdilerinde ve proses şartlarında bir değişiklik yapılmamıştır. Kimyasal ve fiziksel analizler, Adoçim Çimento Kalite Kontrol Müdürlüğü laboratuvarında yapılmıştır.

3.1 Malzeme

3.1.1 Klinker Özellikleri

Bu çalışmada Tokat Adoçim Çimento fabrikasında üretilen klinker kullanılmıştır. 2 nolu Çimento değirmeni klinker dozaj bandından (değirmene beslenen) her saat 1 kg klinker numunesi alınarak 24 saat boyunca bir torbada biriktirilmiştir. 24 saat sonunda biriktirilen klinker numuneleri kimyasal ve fiziksel analizler için Adoçim Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Müdürlüğüne götürülmüştür. Kalite Kontrol Laboratuvarına getirilen klinker numunelerinin XRF cihazında okuması yapıldıktan sonra kimyasal analiz sonucu tespit edilen klinkerlerin boge formüllerine göre C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF değerleri hesap edilerek aylık ortalama C_3S , C_2S ve $SCaO$ değerleri bulunmuştur. Boge formülleri metod kısmında verilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında 1 kg klinker numunesi Türkiye Çimento Muhtasilleri Birliği Arge Laboratuvarına (TÇMB) gönderilerek klinkerin kimyasal analizi ve mikroskopik analizi yaptırılmıştır.

3.1.1.1 Klinker Kimyasal analizi

Adoçim 2 nolu çimento değirmenine beslenen klinker numunelerinin kimyasal ve fiziksel analizleri Adoçim Çimento Fabrikası Kalite Kontrol Laboratuvarında yapılmıştır. Çalışma kapsamında analizi yapılan bir klinker numunesinin kimyasal ve fiziksel analiz sonucu Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Kimyasal içeriği verilen klinker numunesinin boge formülüne göre C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1 Adoçim Laboratuvarı klinker kimyasal analiz sonucu

Özellik (%)	Klinker
SiO ₂	21,24
Al ₂ O ₃	5,32
Fe ₂ O ₃	3,67
CaO	65,48
MgO	1,26
Na ₂ O	0,16
K ₂ O	0,72
SO ₃	0,6
Cr	0,0032
TiO ₂	0,04
S.CaO	1,95
Kızdırma Kaybı	0,28
S.CaO	1,95
Dansite	1310
90 Mikron	2,3
Blaine	3087
Öğütme Zamanı (dk)	37

Ayrıca bir miktar klinker numunesi, Adoçim Kalite Kontrol Laboratuvarında yaptığımız kimyasal analiz içeriği sonucu, karşılaştırmak için TÇMB Arge Laboratuvarına gönderilmiştir. TÇMB Arge Laboratuvarında klinker kimyasal analiz yapılmış olup, ayrıca optik mikroskop altında C₃S, C₂S, C₃A ve C₄AF değerleri tespit edilmiştir. TÇMB Arge Laboratuvarında kimyasal analiz sonucu Çizelge 3.2 de gösterilmiştir.

3.1.1.2 Klinker Mikroskopik analizi

Klinker numunesine ait farklı boyut ve görünümdeki granüllerin parlak kesitleri hazırlanmış ve kesitlerin yüzeyi HF asit buharı ile dağlanarak her fazın kendine özgün renkte ((alit kahverenkli, belit mavi, sıvı faz (C₃A + C₄AF) zemindeki koyu gri+ beyaz renkli kısım ortaya çıkması sağlanmıştır)). Polarize mikroskopda, nokta sayma cihazı ile C₃S, C₂S ve sıvı faz (C₃A+C₄AF) miktarı tespit edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 TÇMB Arge Laboratuvarı Adoçim klinkeri kimyasal analiz sonucu

Özellik (%)	Klinker
SiO ₂	20,78
Al ₂ O ₃	5,50
Fe ₂ O ₃	3,36
CaO	66,11
MgO	2,34
Na ₂ O	0,41
K ₂ O	0,39
SO ₃	0,20
Cr	0,0039
TiO ₂	0,04
S.CaO	1,83
Kızdırma Kaybı	0,39
C ₃ S	61,96
C ₂ S	12,88
C ₃ A	8,89
C ₄ AF	10,22

Çizelge 3.3.Klinkerin mikroskopik analiz sonucu

Numune	C ₃ S %	C ₂ S%	(C ₃ A+C ₄ AF) %
Klinker	63,12	11,35	18,74

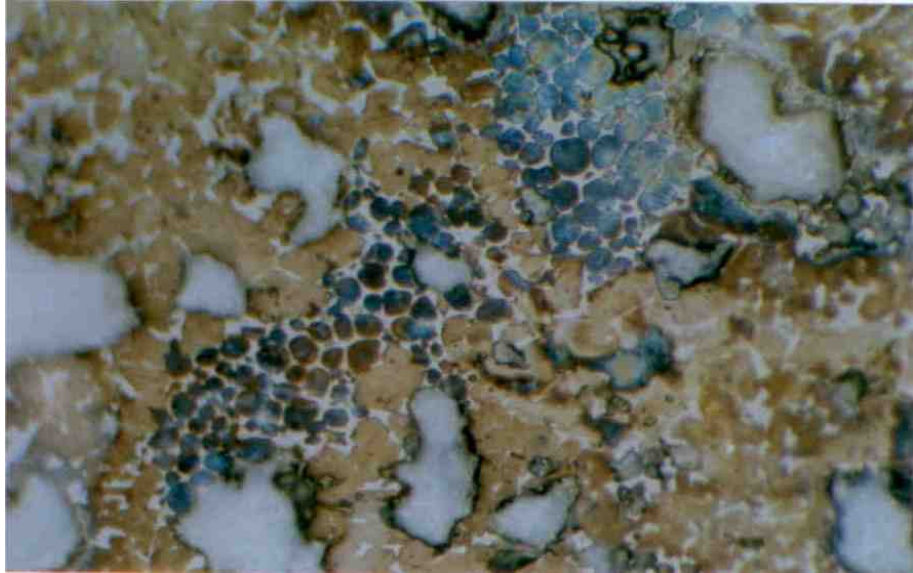
Klinker numunesine ait granüllerin incelenmesi sonucunda, genel olarak alit fazınca yoğun bir yapı görülmüştür (Şekil 3.1, 3.2). Alit fazının yoğun olması ham karışımın kireççe zengin olmasından ileri gelir. Belit fazı ve S.CaO kümeler halinde bulunmaktadır (Şekil 3.1, 3.2). Bu şekilde yapılanma ham karışımda iri taneli mineraller bulunduğunu gösterir. Buna göre hammaddenin daha ince öğütülmesi önerilir.

Klinker granüllerinin kristal boyutları incelendiğinde, genelde alit kristallerinin değişken boyutlu (5-40 mikron); belit kristallerinin normal boyutlu (25-30 mikron) olduğu görülmüştür (Şekil 3.3). Değişken boyutlu alit kristalleri, ham karışımın yeterince homojenize olmamasından ileri gelir. Ancak bazı granüllerde büyük boyutlu

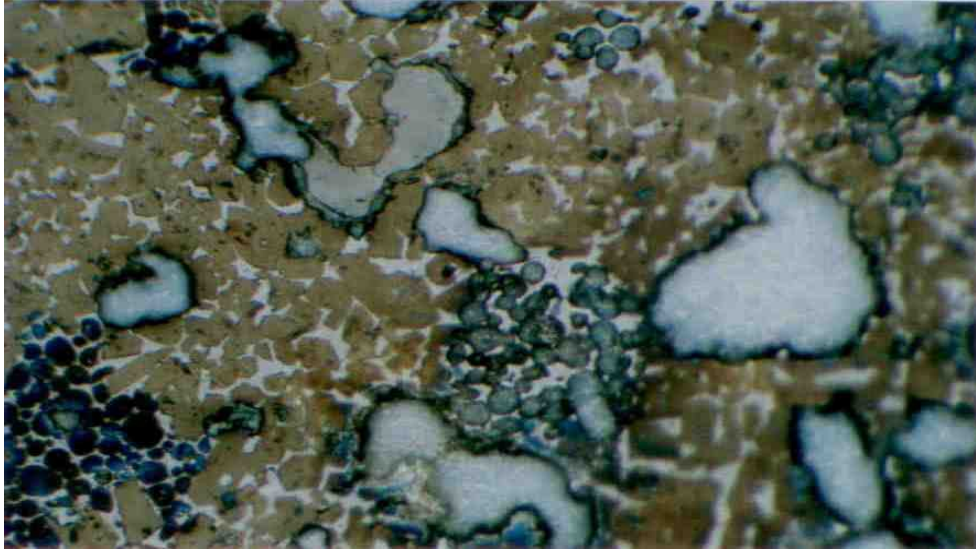
alit ve belit kristalleri de gözlenmiştir (Şekil 3.4). Bu nedenle klinkerin yeterince piştiği sonucuna varılmıştır. Kristal şekli incelendiğinde, genel olarak alit ve belit kristallerinde şekil bozuklukları bulunmadığı ve zemindeki sıvı fazın ($C_3A + C_4AF$) camsı formda olduğu görülmüştür (Şekil 3.3). Bazı granüllerde, alit ve belit kristallerinde kısmi şekil bozukluğu kristalize sıvı faza da rastlanmıştır (Şekil 3.4).



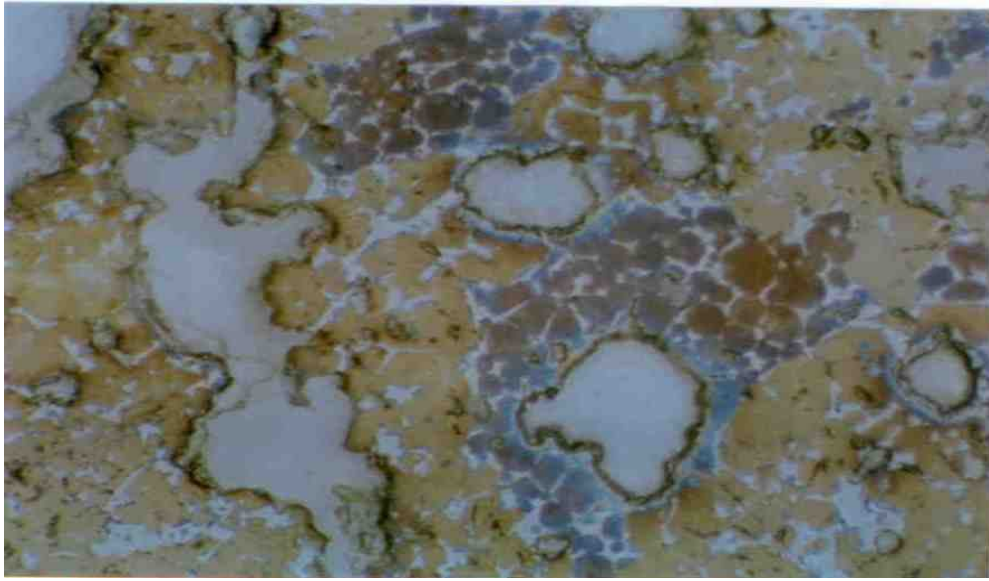
Şekil 3.1 Alit fazınca yoğun bir yapı (Alit; kahverengi)



Şekil 3.2 Belit kümeleri; değişken boyutlu alit (Belit; mavi)



Şekil 3.3. Serbest kireç kümeleri ve normal boyutlu belit ; normal şekil yapısı
(S.CaO: küçük siyah tane; belit: mavi)



Şekil 3.4 Bazı granüllerde görülen iri kristaller ve kristalize sıvı faz
(sıvı faz; zemindeki gri kısım)

3.1.2 Alçıtaşı

Bu çalışmada Adoçim Çimento fabrikasına ait Sivas Bedirli alçıtaşı ocağında üretilen doğal alçıtaşı kullanılmıştır. Alçıtaşı, öğütmede % 5 oranında kullanılmış olup endüstriyel deneme boyunca sabit tutulmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan alçıtaşının kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 Adoçim alçıtaşı kimyasal analiz sonucu

Tarih	06.06.2010	15.07.2010
Bileşenler	Alçıtaşı	Alçıtaşı
Bulunan SO ₃ %	40,04	42,93
Kristal Su %	17,52	18,51
Kızdırma Kaybı %	21,22	21,57
Dihidrat Alçı %	83,71	88,44
Anhidrit Alçı %	1,90	3,07
CaCO ₃ %	8,41	6,95
Toplam	94,01	98,46
Tayin Edilemeyen %	5,99	1,54
Toplam	100	100,0
Dihidrattan SO ₃	38,92	41,12
Rutubet	2	2,5

3.1.3 Çimento Değirmeni

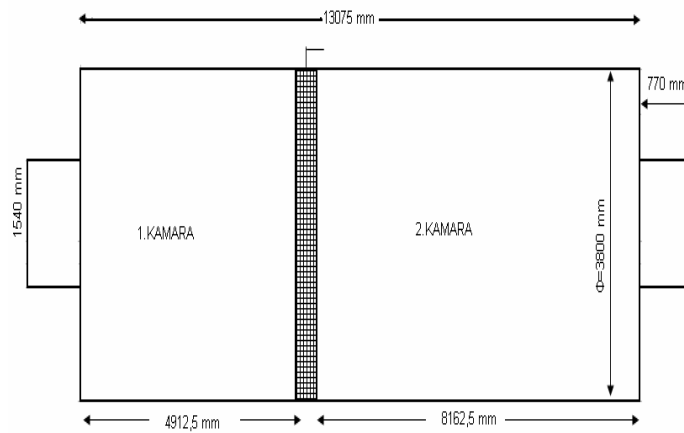
Endüstriyel ölçekli deney çalışmaları Adoçim Çimento fabrikası 2 nolu çimento değirmeninde gerçekleştirilmiştir. 2 nolu çimento değirmeninin özellikleri Şekil 3.5’de verilmiştir. 2.çimento değirmeni özellikleri;

Değirmen devir hızı: 16,6 dv / dk

Değirmen kapasitesi: 75 t / h

Değirmen Ana tahrik motor gücü: 2800 kW

Seperatör cinsi: Dinamik Seperatör



Şekil 3.5 Adoçim 2.çimento değirmeni şeması.

Çizelge 3.5.Çimento değirmeni şarj miktarları

1. KAMARA			2.KAMARA		
Bilya Çapı (mm)	Miktar (Kg)	%	Bilya Çapı (mm)	Miktar (Kg)	%
90	10000	14.29	50	9500	Ağu.64
80	24000	34.29	40	9500	Ağu.64
70	24000	34.29	30	12000	Eki.91
60	12000	17.14	25	15000	13.64
Toplam	70.000	100	20	34000	30.91
			17	30000	27.27
			Toplam	110.000	100

3.2 Metot

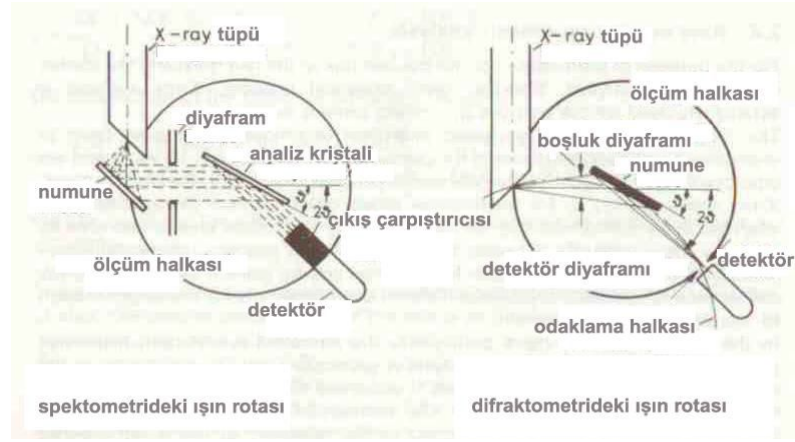
Bu çalışmada standart kum kullanılmıştır. Kimyasal madde olarak dilyum tetraborat (merck), lityum iyodür (merck), etilen glikol(merck), HCl (merck) Ca(OH)_2 ve CaCO_3 kullanılmıştır. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde aşağıdaki cihazlar kullanılmıştır.

- X-Işınları Floresans Spektrometresi,
- Laboratuar çimento değirmeni,
- Alphine elek,
- Le Chatelier kalıbı ve kaynatma kabı,
- Basınç dayanım cihazı kullanılmıştır.

3.2.1 X Işınları Floresans Spektrometresi Çalışma Prensibi

Analizi yapılan çimentoların kimyasal bileşimini belirlemek için X ışınları floresans spektrometresi kullanılmıştır. Bir atomun iç yörüngelerindeki elektron X ışınları bombardımanı ile bir üst enerji seviyesine çıkarılarak uyarılır. Fakat bu uyarılmış halde bulunan elektronlar kararsızdır. Bu kararsız durumda fazla kalamayıp kararlı alt yörüngelere inmek isterler. Bu iniş sırasında her atom elektronu kendisine özgü karakteristik ikincil X ışınları (Floresans) yayar. Bu ışınlar analizör ile ayrılır. Ayrılan

ışınlar ölçülür. Ölçülen bu ışın miktarı aynı zamanda elementin miktarı ile orantılı olduğundan elde edilen sonuç kantitatif analizde kullanılır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 X-ray analiz yöntemleri

3.2.2 X Işınları Spektrometresine Örnek Hazırlanması ve Okuma Yapılması

Klinkerden ve alçıtaşından hazırlanan örneklerin kimyasal analizleri yapılmıştır. Öğütülmüş örneklerden 0,6 gram tartılıp, 4,6 gram dilyum tetraborat ve 0,03 gram lityum iyodür platin krozeye konulmuştur. İnce bir spatül ile karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Kroze ve tablet kalıbı eritiş cihazına yerleştirilmiştir. Eritiş Cihazı çalıştırılarak 4 aşamalı program dâhilinde 10 dk.ısıtma, 5 dk. eritme, 5 dk.soğutma ve boşaltma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Oluşan cam tablet X-Ray floresans spektrometresinde okutulmuş elde edilen sonuçlar kaydedilmiştir (TS EN197-1).

3.2.3 Boge Formülleri

X-Ray cihazında okutulduktan sonra kimyasal içerikleri tespit edilen klinker numunelerinin Boge formülü kullanılarak C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF değerleri hesaplanmıştır;

Tri Kalsiyum Silikat; $C_3S = 4.07(CaO) - 7.62(SiO_2) - 6.72(Al_2O_3) - 1.43(Fe_2O_3) - 2.85(SO_3)$

Di Kalsiyum Silikat; $C_2S = 2.87(SiO_2) - 0.754(C_3S)$

Tri Kalsiyum Silikat; $C_3A = 2.65(Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3)$

Tetra Kalsiyum Alumino Ferrit; $C_4AF = 3.0432(Fe_2O_3)$

3.2.4 Çimento Örneklerinin Hazırlanması

Klinker belli incelikte laboratuvar çimento değirmeninde öğütüldükten sonra klinker, alçıtaşı örneklerinden belli oranlarda karışım hazırlanıp laboratuvar çimento değirmeninde öğütülmüştür ve çimento örnekleri oluşturulmuştur (TS EN 197-1).

3.2.4.1 Harç Hazırlama

Harcı oluştururken oranlar kütlece bir kısım çimento, üç kısım standart kum ve $\frac{1}{2}$ kısım su (su/çimento oranı 0,50) şeklindedir. Çimento harcı oluştururken (450±2)g çimento, (1350±5)g kum ve (225±1)g sudan oluşan karışım hazırlanmıştır (TS EN 196-3).

3.2.4.2 Harcın Oluşturulması

Karıştırıcı çalışır durumda iken:

- Karıştırma kabına su konulup ve çimento eklenmiştir.
- Karıştırıcı düşük hızda çalıştırılmaya başlanmış ve sonra kum, 30 sn içinde sürekli olarak ilave edilmiştir. Karıştırıcı yüksek hıza ayarlanmıştır. Ve karıştırma 30 sn daha devam edilmiştir.
- Karıştırıcı 1dk 30 sn sonra durdurulmuştur. İlk 15 sn lastik sıyrıcı ile kabın çeperlerine ve tabanına yapışan harç sıyrılmıştır ve kabın ortasına toplanmıştır.
- Karıştırmaya yüksek hızda 60 sn devam edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Harç karıştırma cihazı

3.2.4.3 Beton Kalıp Örneklerinin Hazırlanması

Deney numuneleri 40mmx40mmx160mm'lik prizma şeklindedir. Kalıp ve kalıp başlığı sarsma tablasına sıkıca tutturulmuştur (Şekil 3.8). Karıştırma kabından bir veya birkaç defada her biri 300g olmak üzere iki harç tabakasından ilki kalıp bölümünde doldurulmuştur. Harç tabakası, büyük yayıcı ile kenarlarından dik pozisyonda tutularak ve kalıp başlığıyla temas ederek, kalıbın her bölümünde bir kez olmak üzere ileri geri hareket ettirilerek düzgün bir şekilde yayılması sağlanmıştır. Sonra bu birinci tabaka 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır. İkinci tabaka harç kalıba doldurulmuştur ve küçük yayıcı ile bu tabakada düzeltilmiştir ve ikinci 60 sarsma ile sıkıştırılmıştır.

Kalıp sarsma tabakasından kaldırılmıştır ve kalıp başlığı çıkartılmıştır. Harcın fazlası hemen dik tutulan metal bir masterla sıyrılmıştır ve her yöne doğru bir kere testere hareketi ile çekmek suretiyle yavaş yavaş hareket ettirilmiştir. Prizmaların yüzeyi, aynı masterla düz tutularak düzleştirilmiştir. Prizmaları ve sarsma tablasına göre konumlarını tanımlamak amacıyla kalıplar numaralandırılmıştır (TS EN 196-3).



Şekil 3.8 Kalıpların sarsma tablasına yerleştirilmesi

3.2.4.4 Şartlandırma

Sıyırma işleminden sonra kalıp kenarlarında kalan harç silinmiştir. Kalıbın üzeri 210 mm x 185 mm ölçüsünde 6 mm kalınlığında kenarları yuvarlatılmış cam plaka ile örtülmüştür. Üzeri cam plaka ile kapatılmış kalıplar geciktirilmeden yatay olarak rutubet dolabına konulmuştur.

24 saatlik deney için numune, deneyden en fazla 20 dk önce kalıptan çıkartılmıştır. 24 saatten sonra büyük yaşlardaki deney için ise numune kalıba yerleştirildikten sonra 20-24 saat arasında kalıptan çıkarılmıştır. 24 saatlik deney için kalıptan çıkarılan numune deneysel işlemlere tabi tutulana kadar ıslak bezle sarılarak bekletilmiştir. Suda kür uygulanacak numuneler daha sonra tanımlanabilmeleri için, suya dayanıklı mürekkeple veya kalemle uygun şekilde işaretlenmiştir. İşaretlenmiş prizmalar geciktirilmeden ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) deki havuza uygun yatay şekilde olarak daldırılmıştır. Numuneler, plastik ızgaralar üzerine, su prizmanın bütün yüzeylerine temas edecek şekilde ayrı ayrı yerleştirilmiştir (TS EN 196-1).

Numuneler, yarım prizmalar cihazın plakaları arasına $\pm 0,5$ mm den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plakadan veya yardımcı plakalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilmiş basınç uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyinin sonucu 3 prizmalık takımdan 6 adet sonucun aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. (TS EN 196-1)



Şekil 3.9 Basınç dayanım cihazı

3.2.5 Priz deneyi

350 gr çimento tartılmıştır. Bu miktarın 300 g'ı priz başlama ve sona erme sürelerinin tayini için kullanılırken 50 g'ı hacim genişmesi tayini için kullanılmıştır. Çimentonun ortası açılarak çimento kütlesinin % 25-30'u kadar musluk suyu katılmıştır. Kaşıkla karıştırılmıştır. Hamurun yoğrulmasına, çimento ile suyun karıştırıldığı andan itibaren 3 dk devam edilmiştir. Hamur vicat halkası içine yerleştirilmiştir. Sert plastik olan vicat halkası yaklaşık 12 cm x 12 cm'lik pleksiglas üzerine konulmuştur. Çimento hamuru

doldurulmadan önce vicat halkası içi ve levha üstü ince bir yağ ile yağlanmıştır. Vicat halkası içerisine konulan hamurun yüzeyi bir spatula ile düzeltilmiştir.

Daha sonra hamur halkanın üst kenarı seviyesinde bırakılmıştır. Silindir sonda camın üzerine kadar indirilerek, aletin göstergesi sıfırlanmıştır. Sondanın ucu hazırlanmış olan vicat halkasının ortasında hamur üst yüzeyine dokunacak kadar indirilmiş ve serbestçe bırakılmıştır (normal kıvamlı hamur için su yeterliyse, sonda yarım dk. içinde levhaya, 5 mm – 7 mm kalıncaya kadar iner). Böylece istenilen su miktarı tayin edilmiştir. (TS EN 196-3)

3.2.5.1 Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri

Priz süresi tayini 20 °C dereceli ve bağıl nemi % 50–60 olan oda içerisinde yapılmıştır. Hazırlanmış olan çimento hamuru dijital vicat aletine yerleştirilmiştir. Time zaman 5 dk ayarlanmıştır. Kalem ucu önceden takılmış olan grafik kâğıdına degecek şekilde sabit lenmiştir. İğnenin 5 dk aralıklarla vicat halkası içerisindeki hamura girip çıkması sağlanmıştır. Önceden manuel vicat aletiyle grafik kâğıdı üzerinde belirlenen priz başı ve sonu çizgileri üzerinden priz başlama ve priz sone erme süreleri hesaplanmıştır. (TS EN 196-3)

3.2.6 Blaine

Çimentonun cm^2 ye düşen miktarına blaine denir. Ölçümlerde: Dijital Blaine cihazı kullanılmıştır. (Şekil 3.10).Sonuç cm^2/g cinsinden değeri okunmuştur.(TS EN 196-6).



Şekil 3.10 Blaine cihazı



Şekil 3.12 Alphin eleği

3.2.9 Kızdırma Kaybı Tayini

Bu tayinde sırasıyla şu basamaklar izlenmiştir. Sabit tartıma getirilmiş kroze, rutubeti alınmış çimento numunesinden 0,0001 hassasiyetle 1,00 gr (M_1) alınmıştır. $975^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki fırında 15 dakika kızdırılmıştır. Desikatörde oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur ve tartılmıştır. Yeniden 5 dakika kızdırılarak oda sıcaklığına kadar soğutulup tekrar tartılmıştır. Bu işleme sabit tartıma (M_2) ulaşıncaya kadar devam edilmiştir (TS EN 1976-1).

Hesaplama:

$$\text{Kızdırma Kaybı} = [(M_1 - M_2) / M_1] \times 100$$

M_1 : Deney Numunesi Kütlesi (gr)

M_2 : Kızdırılmış deney numunesinin sabit tartıma geldikten sonraki kütlesi (gr)

3.2.10 Serbest Kireç (S.CaO) Tayini

0,0001 gram hassasiyetle 1 gram deney numunesi tartılır. 300 ml' lik erlene alınır üzerine 10 ml gliserin ve 1 - 3 damla Fenolftalein damlatılır ve bir kaç tane kaynama taşı eklenir erlenin ağzına geri soğutucu takarak elektrik ocağında ısıtılır ısınan numune elektrik ocağından yere indirilir ve 25 ml etil alkol ilave edilir ve kaynayıncaya kadar ısıtılır ve elektrik ocağından alınır. Amonyum asetat çözeltisi ile pembe renk kayboluncaya kadar otomatik büretten damla damla alarak ve erlen sürekli karıştırılarak titre edilir. Sarfiyat not edilir ve geri soğutucuları tekrar takılır. Kum banyosunda 15 dakika bekletilir. Pembe renk oluşmaz ise deney sona ermiş demektir (TS EN 197-1).

Aşağıdaki formüle göre % S.CaO miktarı hesaplanır.

$$\%CaO = S \times \left(\frac{F}{M} \right)$$

M: Deney Numunesi Kütlesi

S: Sarf edilen amonyum asetat miktarı

F: Amonyum asetat faktörü

BULGULAR

4.1 Klinker Ana Bileşenleri Hesabı

Adoçim 2.nolu çimento değirmeni dozaj bandından Kalite Kontrol Müdürlüğüne getirilen klinker numunelerine kimyasal analiz testleri yapılmış olup, örnek olarak bir klinker numunesinin kimyasal analiz sonucu gösterilmiştir (Çizelge 3.1). Kimyasal içeriği bilinen klinker numunesinin boge formüllerinden yararlanarak klinker ana bileşenleri hesap edilmiştir. Boge formüllerine göre hesaplanan klinker ana bileşenleri Çizelge 4.1 de gösterilmiştir.

$$C_3S = 4,07*(CaO)-7,62*(SiO_2)-6,72*(Al_2O_3)-1,43*(Fe_2O_3)-2,85*(SO_3)$$

$$C_3S = (4,07*65,48)-(7,62*21,24)-(6,72*5,32)-(1,43*3,67)-(2,85*0,60)$$

$$C_3S = 266,50-161,85-35,75-5,25-1,71$$

$$C_3S = 61,94$$

$$C_2S = 2,87(SiO_2)-0,754(C_3S)$$

$$C_2S = 2,87*21,24-0,754*61,94$$

$$C_2S = 60,96-46,70$$

$$C_2S = 14,26$$

$$C_3A = 2,65(Al_2O_3)-1,69(Fe_2O_3)$$

$$C_3A = 2,65*5,32-1,69*3,67$$

$$C_3A = 14,10-6,20$$

$$C_3A = 7,90$$

$$C_4AF = 3,0432(Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3,0432*3,67$$

$$C_4AF = 11,17$$

Çizelge 4.1 Klinker kimyasal ana bileşenleri

Özellik (%)	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Klinker	61,94	14,26	7,9	11,17

4.2 Çimento Değirmeni Üretim Miktarları ve Enerji Tüketimleri

Adoçim Çimento Fabrikasında iki adet çimento değirmeni bulunmaktadır. Endüstriyel çalışmalar 2 nolu çimento değirmeninde yapılmıştır. Klinker silosundan çıkan malzeme bantlar vasıtası ile çimento değirmenleri ünitesi 2 nolu çimento değirmeni klinker bunkerine beslenmektedir. 2 nolu çimento değirmeninin öğütme esnasında besleme yapan klinker dozaj bandından her saat 1 er kg lık klinker numuneleri alınarak 24 saat boyunca bir çimento torbasında biriktirilmiştir. Biriktirilen klinker numunesi Adoçim Çimento fabrikası kalite kontrol laboratuvarına getirilerek kimyasal ve fiziksel deneylere tabi tutulmuştur. 2 nolu çimento değirmenine beslenen klinkerin günlük kimyasal ve fiziksel analizleri yapıldıktan sonra C_3S , C_2S , $S.CaO$ değerleri tespit edilerek, değirmene beslenen günlük klinker analiz sonuçları kayıt altına alınmıştır. Günlük kimyasal analiz sonuçlarına göre boge formülü yardımıyla klinker C_3S, C_2S değerleri hesaplanarak kayıt altına alınan klinkerlerin ay sonunda C_3S, C_2S ortalamaları hesaplanarak bu değerler de kayıt altına alınmıştır. Bu işlemler 6 ay boyunca devam etmiştir. Aylık ortalama değerleri tespit edilen klinker C_3S , C_2S değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Aylık Klinker C_3S ve C_2S değerleri

Aylık	1.ay	2.ay	3.ay	4.ay	5.ay	6.ay
C_3S (%)	70,79	68,9	68,1	60,48	69,34	65,01
C_2S (%)	6,74	9,07	8,82	15,38	13,66	15,91

Ayrıca, 1.aydan itibaren, aylık olarak (6 aylık dönem) 2 nolu çimento değirmeninde üretilen çimentonun miktarları ve aylık çalışma saatleri kayıt altına alınmıştır. 2.çimento değirmeninin, aylık üretim miktarının aylık çalışma süresine bölünerek ortalama çimento değirmeni saatlik üretim miktarları hesaplanmıştır. Kayıt altına alınan veriler Çizelge 4.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Aylık Çimento değirmeni çalışma saatleri ve üretim miktarları

Aylar	1	2	3	4	5	6
Aylık çalışma saatleri (h/ay)	676	687	659	593	671	607
Üretilen çimento miktarı (ton/ay)	55620	52976	50505	43426	51818	43808
Ortalama saatlik üretim (ton/h)	82,3	77,1	76,6	73,2	77,4	72,2

Endüstriyel deneme çalışması boyunca aylık olarak, Adoçim çimento fabrikası enerji müdürlüğünden 2 nolu çimento değirmeninin tüketmiş olduğu kWh değerleri

alınmıştır. Enerji müdürlüğünden alınan veriler doğrultusunda toplam aylık enerji sarfının, aylık toplam üretilen çimento miktarına bölünmesiyle ton başına harcanan kWh değerleri hesaplanarak Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Çimento değirmeni enerji sarfiyatları

Aylar:	1.ay	2.ay	3.ay	4.ay	5.ay	6.ay
Üretim (ton/ay)	55620	52976	50505	43426	51818	43808
Enerji sarfı (kWh/ay)	2366594	2377522	2246928	1968425	2238290	2047747
Birim enerji (kWh/ton)	42,55	44,88	44,49	45,33	43,19	46,74

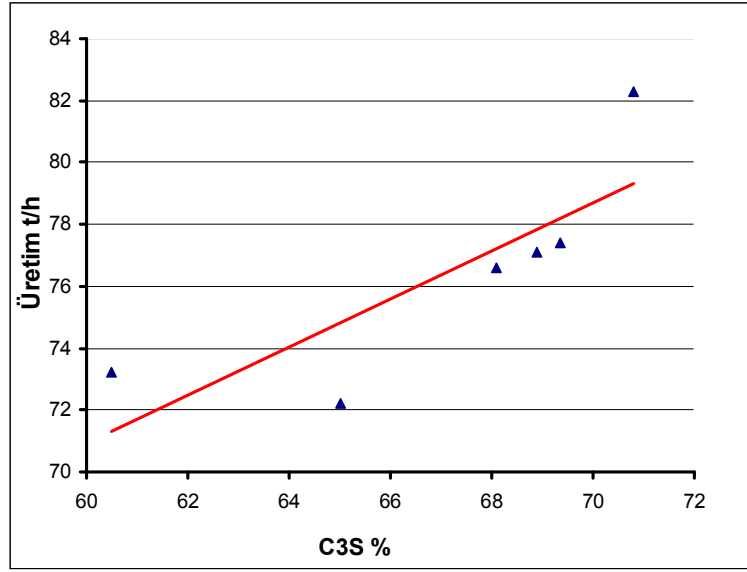
2.Çimento değirmenine beslenen klinkerin C_3S , C_2S ,saatlik çimento üretimleri ve saatlik tükettikleri enerji miktarları artık bilinmektedir. Elde edilen bu değerler Çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Çizelge 4.5’de gösterilen veriler ışığında aşağıdaki grafikler çıkarılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çizelge 4.5 Çimento üretimi ve enerji sarfiyatı değerleri

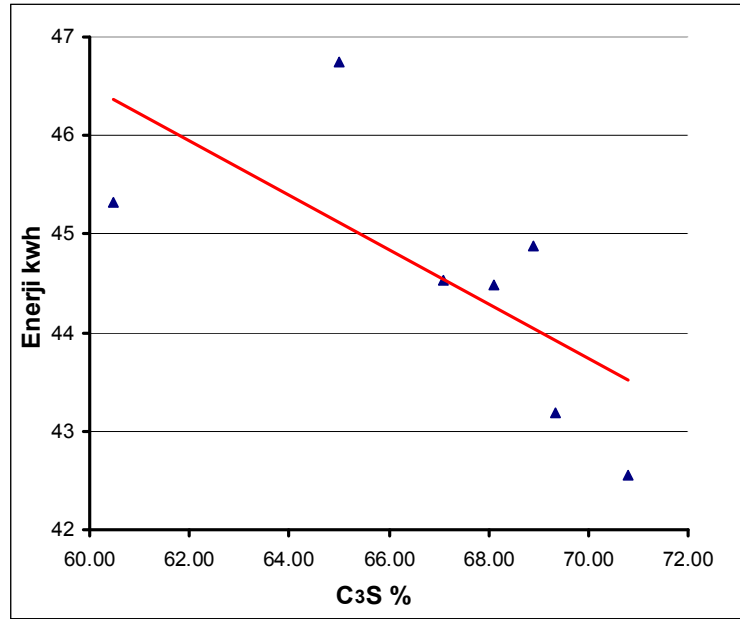
Aylar	1.ay	2.ay	3.ay	4.ay	5.ay	6.ay
C_3S	70,79	68,9	68,1	60,48	69,34	65,01
C_2S	6,74	9,07	8,82	15,38	13,66	15,91
Birim enerji (kwh/ton)	42,55	44,88	44,49	45,33	43,19	46,74
Üretim (ton/h)	82,3	77,1	76,6	73,2	77,4	72,2

Şekil 4.1’deki grafiğe göre klinkerdeki C_3S miktarının artması ile birlikte saatlik çimento üretim miktarlarında artma meydana gelmiştir. Klinkerdeki % C_3S miktarı 60,48 değerinde iken 73,23 t/h çimento üretimi yapılmışken % 70,79 C_3S miktarında 82,3 t/h çimento üretimi gerçekleşmiştir.

Şekil 4.2’de klinkerdeki C_3S miktarının artması ile birlikte çimento değirmeni saatlik enerji tüketim değerlerinde azalmalar tespit edilmiştir. Klinkerde % 60,48 C_3S değerinde çimento değirmeni enerji tüketim değeri 45,33 kwh iken bu değer % 70,79 C_3S değerinde, enerji tüketimi 42,55 kwh’ a kadar düşmüştür.



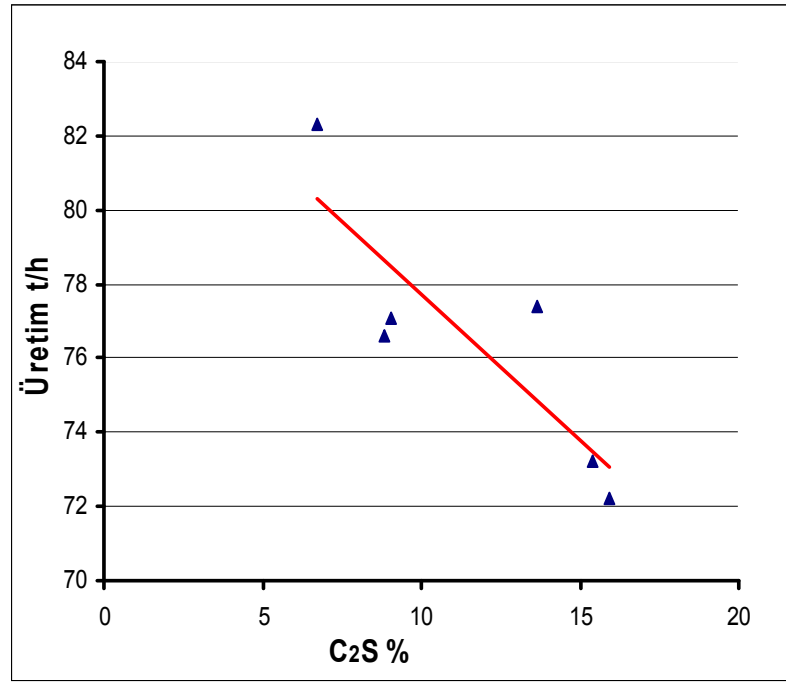
Şekil 4.1 C₃S - çimento üretimi arasındaki ilişki



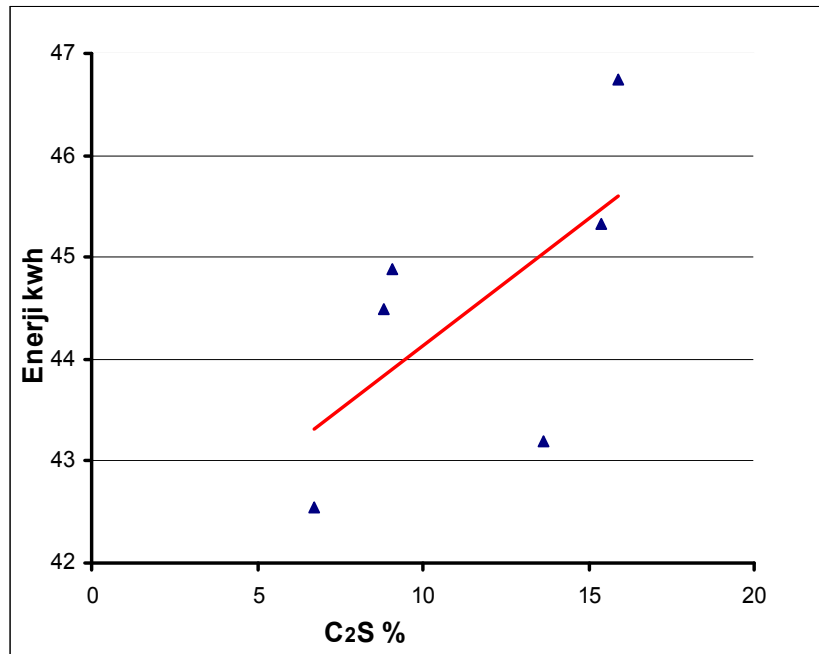
Şekil 4.2 C₃S – enerji tüketimi arasındaki ilişki

Şekil 4.3’de klinkerde bulunan % C₂S değerleri ile çimento değirmeni saatlik üretim miktarları karşılaştırılmıştır. Klinkerdeki % C₂S miktarı en düşük % 6,74 ve en yüksek % 15,91 olarak tespit edilmiştir. Klinkerdeki C₂S miktarı en düşük değerinde % 6,74’ te çimento üretimi 82,3 t/h iken en büyük C₂S değerinde % 15,91’ de 72,2 ton/h e kadar çimento üretiminde düşmeler görülmektedir.

Şekil 4.4’de klinkerde % C₂S miktarı 6,74’ te değirmen enerji tüketimi 42,55 kwh iken % C₂S miktarının yükselmesi ile birlikte % 15,38–15,91 C₂S miktarlarında saatlik enerji tüketiminde 45,33 kwh ve hatta % 46,74 kwh gibi yüksek değerler görülmüştür.



Şekil 4.3 C₂S - çimento üretimi arasındaki ilişki



Şekil 4.4. C₂S-enerji tüketimi arasındaki ilişki

4.3. Çimento Dayanımlarının İncelenmesi

4.3.1 Çimento Dayanımları (S.CaO < % 2)

Adoçim çimento fabrikası 2 nolu çimento değirmeni öğütme sırasında her saat klinker numunesi alınmıştır ve toplanan 24 saatlik klinker numuneleri kalite kontrol laboratuvarına getirilmiştir. Getirilen klinker numunelerine fiziksel analiz, kimyasal analiz yapılarak C₃S, C₂S ve S.CaO değerleri hesap edilmiştir. Ayrıca laboratuvar değirmeninde 6 aylık süreç için klinker S.CaO < % 2 ve S.CaO % 2–5 arasında olan klinkerlerden portland çimentosu üretilerek (% 95 klinker + % 5 alçıtaşı), üretilen çimento örnekleri dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Klinker S.CaO içeriği < % 2 olan çimento numunelerini ile yapılan dayanım testleri sonuçları tablo halinde verilmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 Çimento dayanım tablosu (S.CaO < % 2)

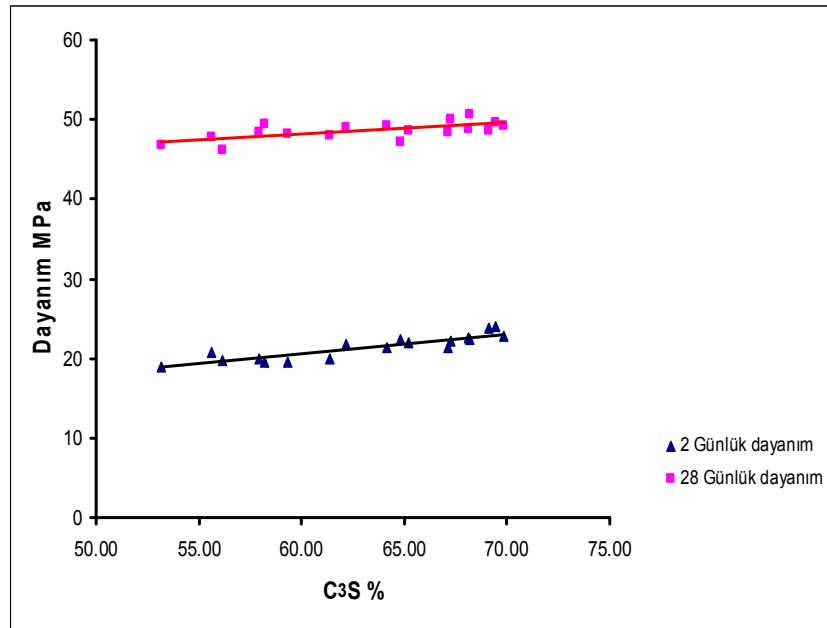
Alınış Tarihi	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	Dayanım (Mpa) 2.Gün	Dayanım (Mpa) 28.Gün
26.03.2010	53,20	20,16	18,9	46,7
04.03.2010	55,62	16,72	20,7	47,7
24.03.2010	56,12	17,32	19,8	46,2
10.05.2010	57,94	13,31	20,0	48,5
16.06.2010	58,17	18,45	19,6	49,4
20.08.2010	59,30	9,91	19,5	48,3
28.07.2010	61,40	15,12	20,0	47,9
28.08.2010	62,16	6,36	21,8	49,1
26.08.2010	64,18	5,52	21,4	49,3
25.08.2010	64,80	3,22	22,3	47,1
01.06.2010	65,19	11,75	21,9	48,7
31.07.2010	67,15	9,09	21,3	48,5
30.08.2010	67,24	4,77	22,2	50,1
26.08.2010	68,14	2,04	22,6	48,9
05.06.2010	68,20	9,77	22,4	50,7
01.09.2010	69,10	5,51	23,8	48,6
24.08.2010	69,47	3,96	23,9	49,7
31.08.2010	69,85	4,87	22,8	49,3

% C₃S -% C₂S miktarları bilinen klinkerlerin ve çimento dayanımları arasındaki ilişkileri incelemek için aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.

Grafikler incelendiğinde (Şekil 4.5) klinkerdeki % C₃S miktarları arttığında 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarının ciddi bir şekilde arttığı görülmüştür. Klinkerdeki en düşük C₃S değerinde % 53,20' de 2 günlük dayanım 18,9 MPa gelmişken, % 69,47 C₃S değerinde 2 günlük dayanım 23,9 MPa gelmiştir. % 16,27 C₃S artışı ile 5 MPa çimento dayanımlarında artış sağlanmıştır.

Ayrıca klinkerdeki en düşük C₃S değerinde % 53,20 de 28 günlük dayanım 46,7 MPa gelirken, % 68,20 C₃S değerinde 28 günlük dayanım 50,7 MPa değerine ulaşmıştır. Klinkerde % 15 C₃S artışı ile 28 günlük çimento dayanımlarında 4 MPa artış görülmüştür.

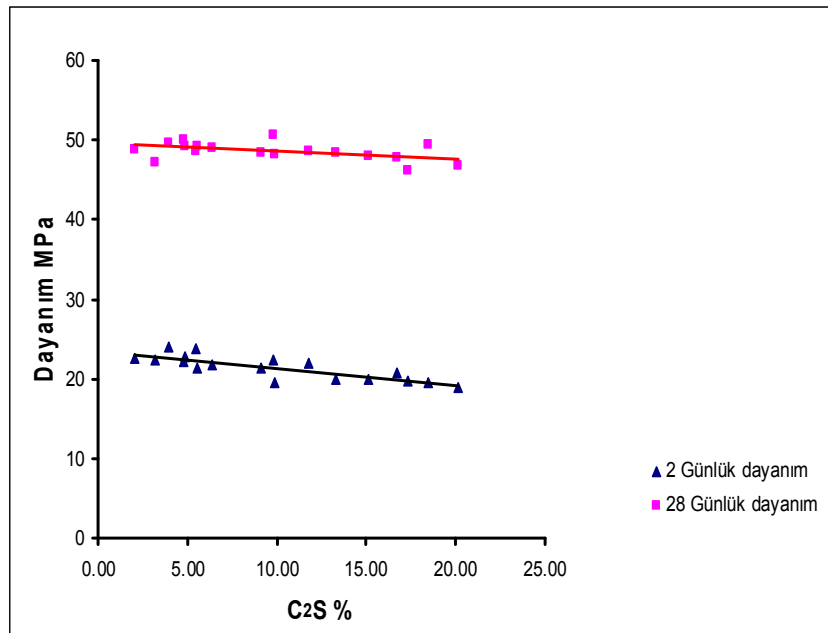
Şekil 4.6'daki grafiğe göre klinkerdeki % C₂S miktarları arttığında 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarının ciddi bir şekilde azaldığı görülmektedir.. Klinkerdeki En düşük C₂S değerinde % 2,04 te 2 günlük dayanım 22,6 MPa gelmişken, En yüksek % C₂S değerinde % 20,16 da 2 günlük dayanım 18,9 MPa gelmiştir. Klinkerde % 18 C₂S miktarının artması ile dayanımlarda 3,70 MPa azalma görülmektedir.



Şekil 4.5 Klinker C₃S-2 günlük ve 28 günlük çimento dayanım ilişkisi

Ayrıca klinkerdeki en düşük C_2S değerinde % 2,04' de 28 günlük dayanım 48,9 MPa gelmişken, en yüksek % C_2S değerinde % 20,16' da 28 günlük dayanım 46,7 MPa gelmiştir. % 18 C_2S miktarının artması ile klinker dayanımında 2,20 MPa azalma görülmektedir. (Şekil 4.6)

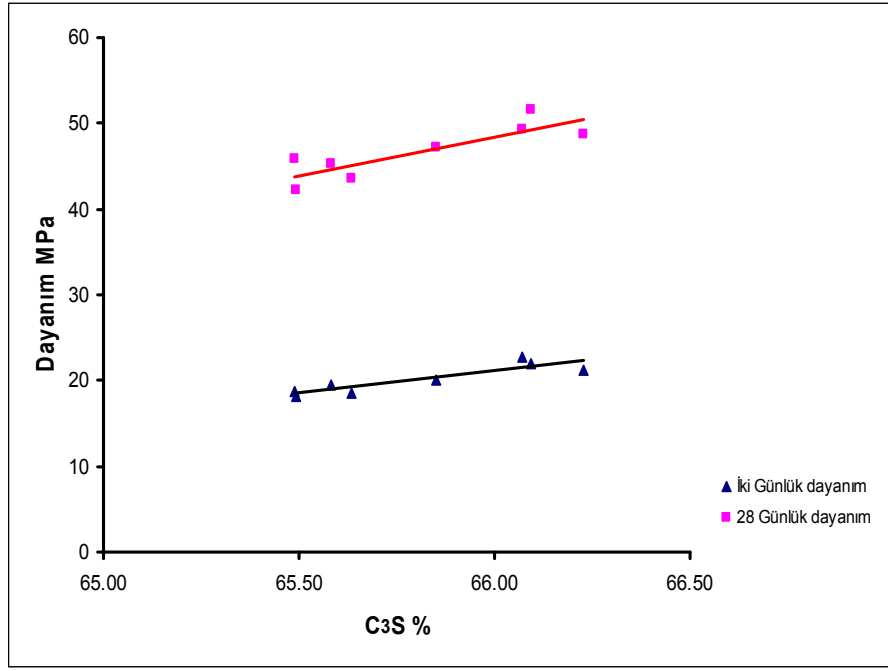
Klinkerlerin % C_2S miktarları sabit tutularak % C_3S miktarlarındaki değişimleri ile çimento dayanımları arasındaki ilişkiler incelemiş ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Klinker % C_2S miktarı sabit tutulduğunda % C_3S miktarının artması ile birlikte 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarındaki artış açıkça görülmektedir.



Şekil 4.6 Klinker C_2S – 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanım ilişkisi

Çizelge 4.7 Klinker % C_3S miktarları (C_2S Sabit % 12)

C_3S	65.49	65.63	66.09	66.07	66.23	65.85	65.58	65.49
2 Günlük dayanım	18.1	18.6	21.9	22.8	21.2	20.0	19.4	18.8
28 Günlük dayanım	42.2	43.5	51.5	49.3	48.8	47.2	45.3	45.8



Şekil 4.7 Klinker C₃S-çimento dayanım ilişkisi (C₂S sabit % 12)

Klinkerde % 65,49 C₃S' te 18,1 MPa erken ve 42,2 MPa son dayanımla başlayan çimento dayanımları, klinker % C₃S oranı arttıkça % 66,07 C₃S' te 22,8 MPa erken ve 49,3 MPa son dayanıma ulaşmıştır (Şekil 4.7).

4.3.2 S.CaO % 2–5 Çimento Dayanımlarının İncelenmesi

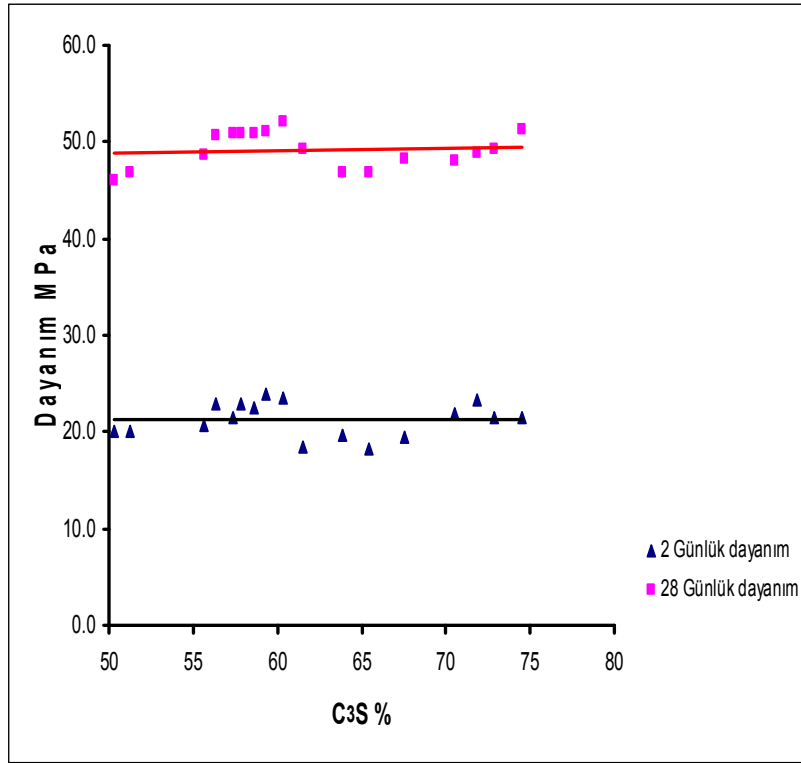
Adoçim çimento fabrikasında klinker üretimi 6 ay boyunca takip edilmiş ve fırından çıkan klinkerden % 2–5 arası S.CaO' lı malzemeden numuneler alınmıştır. Alınan numuneler Adoçim kalite kontrol laboratuvarına götürülerek fiziksel analiz, kimyasal analiz (C₃S, C₂S) ve S.CaO deneyleri yapılmış ayrıca laboratuvar değirmeninde portland çimentosu üretilerek, üretilen çimento örnekleri dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8' de verilmiştir. Yine bu çizelgeden yararlanılarak klinkerde % 2–5 S.CaO varlığında çimento dayanımlarına nasıl tesir edeceğini görmek için aşağıdaki grafikler çıkarılmıştır.

Şekil 4.8' de görüldüğü gibi yapılan çalışma neticesinde yüksek serbest kireçli klinkerlerde % C₃S miktarının artması ile birlikte 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarında olumlu/olumsuz bir gelişme görülmemektedir.

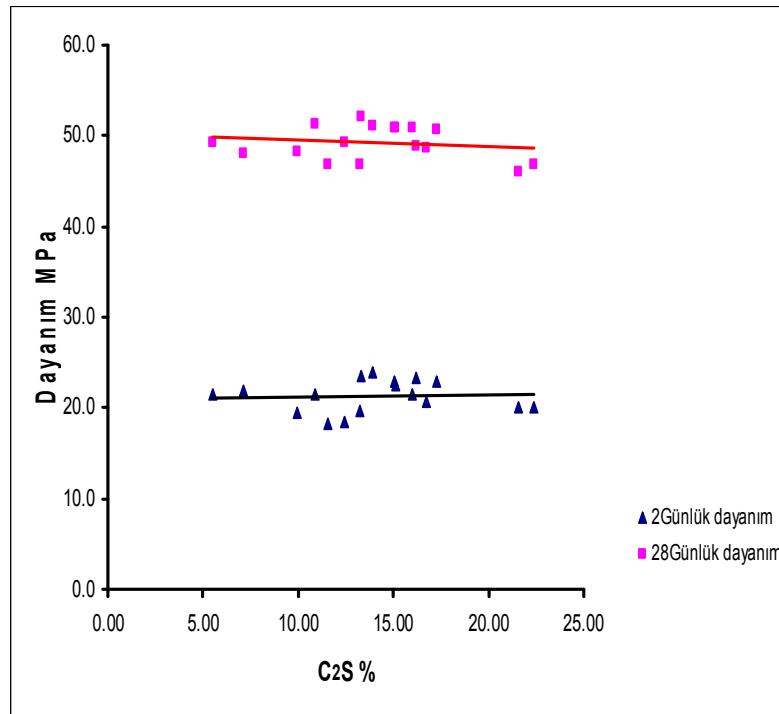
Şekil 4.9' da görüldüğü gibi % 2–5 S.CaO varlığında % C₂S miktarlarında 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarında olumlu/olumsuz bir gelişme görülmemiştir.

Çizelge 4.8 Çimento dayanım tablosu (S.CaO % 2–5 arası)

Tarih	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	S.CaO (%)	Dayanım (Mpa) 2.Gün	Dayanım (Mpa) 28.Gün
22.03.2010	50,29	21,55	3,55	20,0	46
23.03.2010	51,28	22,41	3,05	20,1	46,9
04.03.2010	55,62	16,72	4,9	20,7	48,70
03.03.2010	56,36	17,29	4,04	22,9	50,70
15.03.2010	57,39	15,96	2,79	21,4	50,9
10.03.2010	57,81	15,05	4,08	22,9	50,80
11.03.2010	58,62	15,15	2,92	22,5	50,90
08.03.2010	59,31	13,92	3,79	24,0	51,00
05.03.2010	60,37	13,29	3,58	23,5	52,10
30.03.2010	61,53	12,44	2,65	18,5	49,2
17.06.2010	63,85	13,24	2,1	19,6	46,8
25.07.2010	65,45	11,58	2,15	18,2	46,9
20.08.2010	67,55	9,91	2,01	19,5	48,3
28.08.2010	70,52	7,13	2,41	21,8	48,1
05.09.2010	71,82	16,18	3,36	23,30	48,90
27.08.2010	72,83	5,52	2,11	21,4	49,3
19.09.2010	74,54	10,89	2,21	21,4	49.6



Şekil 4.8 C_3S -2 günlük ve 28 günlük dayanım ilişkisi
(S.CaO % 2-5)



Şekil 4.9 C_2S -2 günlük ve 28 günlük dayanım ilişkisi
(S.CaO % 2-5)

TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada Adoçim çimento fabrikası 2 nolu çimento değirmeninde öğütme girdisi olarak kullanılan klinkerin, bazı kimyasal bileşenleri (C_3S , C_2S) ve Serbest kireç değerleri hesap edilerek çimento değirmeni enerji tüketimi, öğütülebilirlik ve çimento dayanımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma süresince 2 nolu çimento değirmeni portland (CEM I 42,5 R) çimentosu üretmiştir. Ayrıca Adoçim çimento fabrikasında farklı zamanlarda üretilen % 2 nin altında serbest kireç içeren klinkerlerin ve % 2 - 5 serbest kireç içeren klinkerlerin boge formülüne göre C_3S, C_2S değerleri hesap edilmiştir. Klinker numuneleri laboratuvar değirmeninde öğütülerek çimento numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Adoçim çimento fabrikası kalite kontrol laboratuvarında dayanım testlerine tabi tutularak 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanım sonuçlarına bakılmıştır. Daha sonra elde edilen tüm değerler kaydedilerek grafikler oluşturulmuş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Klinker % C_3S miktarı arttığında saatlik çimento üretim kapasitesinde artış görülmüştür. % 60,48 C_3S te 73,23 t/h çimento üretimi gerçekleştirilirken, % 70,79 C_3S te 82,30 t/h çimento üretimi gerçekleştirilmiştir. % 10,31 C_3S artışı ile çimento üretiminde % 12,39 artış görülmüştür. Buradan değirmendeki kapasite artışı sonucu çimento değirmenine öğütülmesi daha kolay malzemenin (yüksek C_3S 'li klinker) girdiği sonucuna varabiliriz. Yüksek C_3S 'li klinker öğütmeyi kolaylaştırmış ve çimento değirmeni üretim kapasitesini arttırmıştır.

Klinker % C_2S miktarı arttığında saatlik çimento üretim kapasitesinde azalmalar görülmüştür. % 6,74 C_2S 'te 82,30 t/h çimento üretimi gerçekleştirilmişken % 15,91 C_2S 'te 72,2 t/h çimento üretimi gerçekleştirilmiştir. % 9,17 C_2S artışı ile % 12,27 çimento üretiminde azalma görülmüştür. Yüksek C_2S 'li klinker öğütmeyi zorlaştırmış ve üretim kapasitesini düşürmüştür.

Klinker % C_3S miktarının artmasıyla öğütme kolaylaşmış ve çimento üretim kapasitesi arttığından dolayı enerji tüketimi azalmıştır. % 60,48 C_3S 'te değirmen enerji tüketimi 45,33 kWh/t iken , % 70,79 C_3S te değirmen enerji tüketimi 42,55 kWh/t'a düşmüştür. % 10,31 lik bir C_3S artışı değirmen enerji tüketim değerini % 6,13 kWh/t düşürmüştür.

Klinkerde % C_2S miktarının artmasıyla öğütme zorlaşmış ve çimento üretim kapasitesi düştüğünden dolayı enerji tüketimi artmıştır. % 6,74 C_2S 'te enerji tüketimi 42,55 kWh/t iken , % 15,91 C_2S ' te değirmen enerji tüketimi 45,33 kWh/t' ye çıkmıştır. % 9,17 C_2S artışı değirmen enerji tüketim değerini % 6,53 kWh/t arttırmıştır.

Çimento dayanım testleri, öncelikle % 2 serbest kirecin altındaki klinker numunelerine uygulanmıştır. Klinkerde % 10 C_3S miktarının artması ile 2 günlük çimento dayanımlarında % 16,26 Mpa artış, 28 günlük dayanımlarda % 5,7 MPa artış; % 10 C_2S miktarlarının artması ile 2 günlük çimento dayanımlarında % 8,82 Mpa azalma ve 28 günlük dayanımlarda ise % 2,48 MPa azalma görülmüştür.

Ayrıca çimento dayanım testleri % 2–5 serbest kireç içeren klinker numuneleri ile yapılmıştır. Klinkerde % 2-5 serbest kireç aralığında 2 günlük ve 28 günlük çimento dayanımlarında herhangi bir gelişmeye rastlanılmamıştır.

Bir portland çimentosu üretilmek istenildiğinde; klinkerde % 1 C_3S miktarının artması ile % 0,59 kWh/t çimento değirmeni öğütme enerjisinin düştüğü, çimento üretimin % 1,20 arttığı, % 2 serbest kirecin altında 2 günlük çimento dayanımlarında % 1,63 Mpa artış, 28 günlük dayanımlarda % 0,57 MPa artış görüldüğü sonucuna varılmıştır. Ayrıca; % 1 C_2S miktarının artması ile çimento değirmeni öğütme enerjisinin % 0,71 kWh/t arttığı, çimento üretimin % 1,33 azaldığı, % 2 serbest kirecin altında 2 günlük çimento dayanımlarında % 0,88 Mpa ve 28 günlük dayanımlarda % 0,25 MPa azalma görüldüğü sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Altun, S. (1999). Çimento üretim teknolojisi. Bitirme Projesi (Dokuz Eylül Üniversitesi), 2s.
- Altun, A. (2000b). Yüksek CaO içeren uçucu küllü çimento ham karışımının Sinterleşmesi, Çimento ve Beton Dünyası, s. 32-38.
- Altun, A. (2000a). Çimento klinkerindeki fazların oluşumu ve mikro yapıların incelenmesi. Fen Bilimleri Dergisi, 31s.
- Altun, A. ve Ölmez, N. (2001). Çimento klinkerinin öğütülebilirliği ve iç yapısı üzerine karşılaştırmalı araştırmalar. Cevher Hazırlama Dergisi, 31s.
- Altun, A. (2004). Yüksek Sıcaklık Çimentoları Ders Notları (Dokuz Eylül Üniversitesi).
- Avsar, 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,
- Bayram, S. (1998). 1.400.000 ton klinker / yıl kapasiteli bir çimento fabrikasının kırma öğütme devresinin projelendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Diploma Projesi, 5s.
- Bond, F.C., 1961, "Crushing and Grinding Calculation", Allis-Chalmers Industrial Pres Department.
- Brugan J.M., 1992, State of the Art Raw Grinding, ZKG, No.3, 59-62.
- Cordonnier A., 1994, The Horomill-A New Finish Grinding Mill, Deniz, V. , Erkan, D. ve Alyıldız, V. (2001). Kalker ve klinker örneğinde kırılma kinetiği üzerine bilya çapının etkisi. 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu.
- Deniz, V. , Erkan, D. ve Alyıldız, V. (2001). Kalker ve klinker örneğinde kırılma kinetiği üzerine bilya çapının etkisi. 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 272s.
- Ergin, H. ve Gür, O. (2001). Çimento öğütme devrelerinin similasyonla tasarımı ve optimizasyonu. 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 146s.
- Felekoglu, 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.
- Gouda G.R., 1981, Technical Aspects of Comminution in the Cement Industry-Part 1, World Cement Technology, April,
- Gürbüz, G. (2005). Yüksek belit çimentoları. Çimento ve Beton Dünyası, s. 40-45.
- Hansen E.K., 1983, Introduction to Cement Industry : F.L.Smidth Co. Publications.
- Holmes, J.A., 1957, "A Contribution to the Study of Comminution: a Modified Form of Kick's Law", Trans. Ins. Chem. Eng., 35, .
- 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.
- İpekoğlu, Ü., 1989, Cevher Hazırlama, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi MMF/MAD-89 EY 179, İzmir
- Kavas, T. (2002). Çimento Üretim Teknolojisi. Ders notları (Afyon Kocatepe Üniversitesi).

- Klimpel R.R., 1997, Introduction to the Principles of Size Reduction of Particles by Mechanical Means, publ.by NSF Eng.Res.Center, 41p.
- Kinasevich, R.S., Fuerstenau, D.W., 1964, "Research on the mechanism of comminution in tumbling mill", Canadian Metal Q3,1-20.
- Kudug, S. (2003). Çimento hammaddeleri, çimento türleri ve çimento üretim projesi. Yıl içi Projesi (Dokuz Eylül Üniversitesi), s. 2-20.
- Labahn O.1983, Cement Engineer's Handbook : 2nd Ed. Bouverlang, Wiesbaden, Germany,
- Lynch, A.J., 1977, "Mineral Crushing and Grinding Circuit" Elsevier Scientific Publishing Com.
- Malzig G., Their B., 1985, Size Reduction and Homogenizing : Congress Report of The VDZ Congress'85.
- Okbaş, Y. "Klinker Üretim Prosesinde Hava Kaçakları ve Bedeli ", Çimento Sanayinde Enerji Tasarrufu Semineri Tebliği, 1989
- Öner M., 1996, Çimento Endüstrisinde Eski Düşünceler Yeni Öğütme Teknolojilerine dönüşüyor-Bölüm 1, Çimento ve Beton Dünyası, Sayı. 2, Temmuz,
- Rolf L., 1993, Motional and Stressing Phenomena in Ball Mills, Taskın C., 1984, Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları : Rapor, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Schoenert K., Knoblach O.R., 1984, Cement Grinding in the High Pressure Grinding Roll,ZKG, No.2, 563-570.
- Taskın C., 1984, Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları : Rapor, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Yeginobalı, A. (2003). Çimento. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, s. 18-28.
- Yıldız, N., 1999, "Öğütme Teorisi, Uygulaması Değirmen ve Sınıflandırıcılar" Kozan Ofset 1.Baskı, Ankara.
- TS EN 196-1, 2002, Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım,TSE, Ankara.
- TS EN 196-3, 2002, Çimento Deney Metotları- Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 196-6, 2000, Çimento Deney Metotları-Bölüm 6 :İncelik Tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Abdul Vahap KORKMAZ
Doğum Yeri ve Tarihi	Tokat, 1981
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Adoçim Çimento Fabrikası, Artova/TOKAT
E-posta Adresi	av.korkmaz@hotmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise	Tokat Anadolu Öğretmen Lisesi, 1995–1998
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2000–2005

İş Tecrübesi

K.T.Ü.	Laboratuar Çalışması ve Sorumlusu, 2003–2004
Almen Madencilik	Açık Ocak Sorumlusu, 2005–2006
Almen Madencilik	Şantiye Şefi, 2006–2007
Adoçim Çimento	Hammadde Mühendisi, 2007–2008
Adoçim Çimento	Üretim Mühendisi, 2008-

Ödüller, Teşvikler ve Üyelikler

TMMOB/MMO	Asil Üye, 2005
-----------	----------------