

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİPİK BİR ÇİMENTO FABRİKASI İÇİN
ENERJİ VE KULLANILABİLİRLİK ANALİZİ**

NAMIK ÜNLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ ANABİLİMİ DALI

GEBZE

2002

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİPİK BİR ÇİMENTO FABRİKASI İÇİN
ENERJİ VE KULLANILABİLİRLİK ANALİZİ**

NAMIK ÜNLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ ANABİLİMİ DALI

TEZ DANIŞMANI

YAR.DOÇ.DR. ALPER Ş. KONUKMAN

GEBZE

KABUL VE ONAY

Namık ÜNLÜ'nün tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun.....tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Enerji Ana bilim Dalında YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye

(Tez Danışmanı): Yar.Doç.Dr. AlpEr Ş. KONUKMAN (GYTE)

Üye : Prof.Dr. Sibel ÖZDOĞAN (Marmara Üni. Müh. Fak. Öğr. Üyesi)

Üye : Yar.Doç.Dr. Cengiz YATMAZ (GYTE)

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararı

İmza/Mühür

ÖZET

Sanayide enerjinin etkin kullanılabilmesi, ancak zamanında yatırım yaparak teknolojinin güncelleştirilmesi, işletme şartlarının optimizasyonu ve sıkı kontrolü sonucunda yapılabilecek tasarruflar ile mümkündür.

Çimento üretimi enerji yoğun bir sektördür. Son teknolojik iyileştirmelere rağmen, çimento üretiminde yakıt ve elektrik enerjisi giderleri, toplam maliyetin yaklaşık % 45-50'sini oluşturmaktadır. Teknolojik iyileştirmelerin, büyük sermaye yatırımlarını gerektireceği ve yüksek oranlarda enerji tasarrufuna imkan vereceği açıktır.

Çimento sektöründe son 15 yıl içerisinde gerçekleşen teknolojik gelişmeler, ürün kalitesini artırmanın ötesinde, üretimdeki enerji maliyetlerinin düşürülmesi ve çevresel etkilerinin azaltılması konularında yoğunlaşmıştır. Bu amaçla, sektörde kullanılan enerjinin küçük bir bölümünün dahi geri kazanılması için izleme ve değerlendirme çalışmaları yürütülmektedir.

Bu çalışmada, tipik bir çimento fabrikasının mevcut durumu incelenmiştir. Fabrikada yapılan ön-etüt çalışmalarından sonra, ayrıntılı ölçümler yapılmıştır. Ayrıca prosese ait çeşitli bölgelerde gerekli numuneler alınarak fabrikadaki veya TÜBİTAK-MAM'daki laboratuvarlarda analiz edilmiştir. Ölçüm çalışmalarında, döner fırın sisteminde debi, basınç ve sıcaklık ölçümleri ile gaz analizleri yapılmıştır. Elde edilen veriler parametrik analizler ile değerlendirilmiştir. Bu sayede kütle ve enerji denklıkları kurulmuş ve kullanılabilirlik analizi yapılmıştır. Sonuç olarak enerjinin aşırı tüketildiği yerler belirlenerek tasarruf imkanları ortaya konulmuştur.

SUMMARY

The industrial energy efficiency can be increased by the conservation activities likely on improvement of technology, optimization and string monitoring of operational conditions.

Cement manufacturing is an energy intensive sector. Although there are technological developments, the fuel and electricity costs are 45 – 50 % of overall production costs. It is clear that those technological improvements need extensive amount of investments and make possible to achieve more energy conservation.

In the last 15 years, the technological improvements not only focus on increasing the product quality, but also on reducing the energy costs and environmental pollution in cement sector. For that purpose many studies are carried on about monitoring and evaluating the fuel/raw material consumptions in process, to recover every little amount of energy

In this study, the actual process conditions of a typical cement factory are examined. After the pre-audit study, a number of detailed measurements performed and required samples have been collected in the factory. The samples were analyzed in the laboratories of factory and TÜBİTAK – MAM. Flow, pressure and temperature measurements and gas analyses have been carried out during the measurements on site. The collected data have been evaluated by parametric analyses to generate and build mass & energy balances, then to perform availability analyses. The energy losses and availability destruction were defined to carry out applicable energy conservation opportunities during the process.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması sırasında yönlendirmeleri ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli tez danışmanım Yrd.Doç.Dr. AlpEr KONUKMAN'na kıymetli yaklaşımları, problemlerin çözümünde eşsiz yol göstericiliği ve sonuçların yorumlanmasındaki desteğinden dolayı,

Tezimin oluşturulmasında sırasında kıymetli yönlendirmeleri, literatür desteği ve çeşitli yardımları ile her zaman yanımda olan başta kıymetli iş arkadaşım ve ESÇAE müdür yardımcısı Doç.Dr. Fehmi AKGÜN'e,

Her zaman güler yüzü ile en sıkışık konular da fikirleri ile yollar açan ve en ümitsiz durumlarda desteği ile yeni ufuklar yaratan Prof.Dr. Sibel ÖZDOĞAN'a,

Yüksek lisans programımın başından bu yana her türlü desteği ile cesaret veren ve bu konuda çalışmalarımnda beni yüreklendiren ESÇAE müdürü Doç.Dr. Mustafa TIRIS'a,

Yüksek lisansım boyunca yardımlarını ve değerli bilgilerini paylaşan Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünün çok değerli öğretim üyeleri ve çalışanlarına,

Tez çalışmam sırasında ölçümlerin gerçekleştirilmesi esnasında ve hesaplamalardaki desteklerinden dolayı başta Doç.Dr. Hayati OLGUN, Dr. Turhan ÇOBAN, Davut UZUN ve Cem Kaypmaz olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma,

Çimento prosesi ve sektörü konusunda her türlü desteği ve müsaadeleri sağlayan başta Türk Çimento Müstahsilleri Birliği çalışanları olmak üzere tüm çimento sektörü çalışanlarına,

Bütün yaşamı boyunca olduğu gibi tez çalışmalarım sırasında da bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen gerektirdiğinde yüreklendiren başta değerli eşim Aysun ÜNLÜ olmak üzere tüm aileme,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

SAYFA

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR, ÇİMENTO TARİHÇESİ ve KİMYASI.....	3
2.1. Tarihçe.....	6
2.2. Çimento Kimyası	8
2.3. ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELER	11
2.3.1 Ana Hammaddeler	12
2.3.2 Çimento Hammaddelerinin Sınıflandırılması	16
2.3.3 Çimento Sanayinde Kullanılan Katkı Maddeleri	16
2.3.4 Çimento Hammaddeleri Rezervleri.....	18
2.4. Türk Standartlarına Göre Çimento Tipleri.....	18
3. ÇİMENTO PROSESİ	22

3.1.	Ana Prosesler, Alt Prosesler Ve Sistem Sınırları	22
3.2.	Klinker Oluşumu	24
3.3.	Çimento Prosesinde Temel Yanma Karakteristikleri.....	27
3.4.	Klinker Prosesindeki Ana Ekipmanlar.....	29
3.4.1	Döner Fırınlr:.....	30
3.4.2	Klinker Soğutucuları	32
4.	ÖLÇME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ	34
4.1.	Basınç Ölçüm Aletleri Ve Teknikleri	34
4.2.	Sıcaklık Ölçüm Aletleri Ve Teknikleri	34
4.3.	Akış Ve Hız Ölçüm Aletleri Ve Teknikleri	35
4.4.	Gaz ve Toz Bileşimlerinin Mobil Cihazlar İle Belirlenmesi	39
4.4.1	Gaz Konsantrasyonlarının Belirlenmesi	39
4.4.2	Toz Konsantrasyonlarının Belirlenmesi.....	40
4.4.3	Bu Çalışmada Kullanılan Cihazlar.....	42
4.5.	Malzeme, Nem, Isıl Değer Ve Bileşim Tayin Yöntemleri.....	43
5.	ÇİMENTO DÖNER FIRIN SİSTEMİNDE I. KANUN ANALİZİ	46
5.1.	Döner Fırın Sistemi Kütle Dengesi	47
5.2.	Ön Isıtıcı Siklonlarda Sızıntı Ve Kalsinasyon Gazları.....	51
5.3.	Yanma Ve Yanma Gazı Hesapları	54
5.4.	Yakma Havalrı	59

5.5.	Soğutucu Gaz Dengesi Ve İşletme Şartları.....	60
5.6.	Soğutucu Enerji Dengesi.....	63
5.7.	Fırın Sistemi Enerji Dengesi	66
5.8.	Döner Fırın Sistemi I. Kanun Verimi.....	79
6.	ÇİMENTO DÖNER FIRIN SİSTEMİNDE II. KANUN ANALİZİ ...	80
6.1.	Kullanılabilirlik Analizi	80
6.2.	Döner Fırın Sistemi	82
6.3.	Döner Fırın Sisteminin II. Kanun Verimi	89
7.	ENERJİ TASARRUF İMKANLARI.....	90
7.1.	Bulgular.....	90
7.1.1	Temel Isı Kayıpları	91
7.1.2	Ön Isıtıcı Siklonlar	92
7.1.3	Klinker Soğutucusu.....	94
7.1.4	Fırında ve Prekada Yanma	95
7.2.	Döner Fırın Sisteminin İşletilmesinden Kaynaklanan Tasarruflar	95
7.3.	Döner Fırın Sisteminde Geliştirmeye Açık Tasarruf İmkanları.....	97
7.3.1	Klinker Soğutucularda Isıl Veriminin İrdelenmesi.....	98
7.3.2	Döner Fırın Mantosundan Isı Geri Kazanımı.....	100
7.3.3	Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi Uygulaması.....	105
8.	SONUÇ	108

KAYNAKLAR	110
ÖZGEÇMİŞ	112
EKLER	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Ölçme Topluluğu
B	: Kullanılabilirlik, kcal/kg
BPC	: Beyaz Portland Çimento
C ₂ S	: Belit
C ₃ A	: Alüminat
C ₃ S	: Alit
C ₄ AF	: Ferrit
C _p	: Spesifik ısı katsayısı, kcal/kg kli °C
db	: Kuru Baz
EDTA	: disodium tuzu
EYÇ	: Erken Dayanımı Yüksek Çimento
Farin	: Hammaddelerin karıştırıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edile ara ürün
g	: Yer Çekimi İvmesi, 9.81 m/s ²
GÖS	: Geri Ödeme Süresi, Ay
h	: Seviye, metre
h ₁	: Isı taşınım katsayısı, W/m ² K
h _{çıkış}	: Sistemi terkeden birim entalpi, kcal/kg kli.
h _{giriş}	: Sisteme giren birim entalpi, kcal/kg kli.

h_o	: Birim hacim başına taşınan ısı miktarı, kcal/Nm ³
HÇ	: Harç Çimentosu
I	: Akım, Amper
K_0	: Kayıp katsayısı
KÇ	: Katkılı Çimento
KK	: Kızdırma Kaybı
kli.	: Klinker
KZÇ	: Kompoze Çimento
m	: kütle, kg
MÖ.	: Milattan Önce
Midair	: Soğutmanın orta kısmından alınarak farinin kurutulmasında kullanılan sıcak gaz
NdiR	: Tahribatsız Kırmızı Ötesi
NdiV	: Tahribatsız Mor Ötesi
ob	: Orijinal Baz
P	: Basınç, mmSS
PCÇ	: Portland Cürufu Çimento
PÇ	: Portland Çimentosu
PKÇ	: Portland Kompoze Çimento
PLÇ	: Portland Kalkerli Çimento
ppm	: Bir milyon partikül içerisindeki partikül adeti

Preka	: Ön kalsinatör
PSFÇ	: Portland Silika Füme Çimento
PZÇ	: Puzolanik Çimento
Q	: Isı, kcal/kg kli
R	: Direnç, Ohm
R1	: Döner fırına ait 1 nolu mesnet yatağı
R2	: Döner fırına ait 2 nolu mesnet yatağı
R3	: Döner fırına ait 3 nolu mesnet yatağı
s	: Spesifik entropi, kcal/kg K
SDÇ	: Sulfatlara Dayanıklı Çimento
SET	: Spesifik Enerji Tüketimi (kcal/kg kli.)
SN1 – 8	: Siklon numaraları
SSÇ	: Süper Sülfat Çimentosu
Stok.	: Stokiyometrik
T	: Sıcaklık, °C
TÇ	: Traslı Çimento
TÇMB	: Türk Çimento Müstahsilleri Birliği
TS	: Türk Standartları
U	: Akışkan hızı, m/s
UKÇ	: Uçucu Küllü Çimento

V	: Hacimsel Debi, Nm^3/s
V_{gaz}	: Yanma gazlarının debisi, Nm^3/h
V_{kal}	: Kalsinasyon gaz debisi, Nm^3/h
$V_{\text{sız}}$	: Sızıntı Gazlarının Debisi, Nm^3/h
V_{top}	: Toplam Gaz Debisi, Nm^3/h
W	: İş Kcal/kg kli.
X_{rD}	: X Işınımı Geçirimi
X_{rF}	: X Işımı Floresans
ΔT	: Sıcaklık farkı, $^{\circ}\text{C}$
ΔH	: Entalpi değişimi, kcal/kg kli
ΔH_{r}	: Reaksiyon Isısı, kcal/kg
ε	: Işınım yayma katsayısı
$\Sigma E_{\text{giriş}}$	: Sisteme giren enerji toplamı, kcal/kg kli
$\Sigma E_{\text{çıkış}}$	: Sistemden çıkan enerji toplamı, kcal/kg kli
σ	: Stefan-Boltzman sabiti, $\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$

ŞEKİLLER DİZİNİ

SAYFA

Şekil 2.1. Klinker içeriklerine göre çimento tipleri (Türk beton üreticileri birliği)...	10
Şekil 3.1. Proses/ Alt proses tanımları ve sistem sınırları.....	23
Şekil 3.2. Kuru proses akış şeması.....	24
Şekil 3.3. Ana yakıcı kesiti.	28
Şekil 3.4. Fırın sistemi boyunca gaz ve malzeme sıcaklıkları.	29
Şekil 4.1. Pitot-statik tüp hız ölçüm sistemi.....	36
Şekil 4.2. Kısıtlandırılmış boru ölçüm sistemleri.	37
Şekil 4.3. Elektromanyetik debi ölçerlerin çalışma prensibi.....	38
Şekil 5.1. Fırın sisteminde giren ve çıkan kütle akıları.....	46
Şekil 5.2. Proses akış şeması.....	50
Şekil 5.3. Soğutucu giren ve çıkan gaz debileri.	61
Şekil 5.4. Soğutucu fanlarının işletme şartları.	61
Şekil 5.5. Soğutucu giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.....	64
Şekil 5.6. Soğutucu enerji çıkışlarının dağılımı.	66
Şekil 5.7. Fırın mantosu sıcaklık dağılımı.	68
Şekil 5.8 Döner fırın sistemi giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.....	70
Şekil 5.9. Döner fırın ile klinker soğutucu birlikte ele alındığında sistem giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.	71

Şekil 5.10. Ön-Isıtıcı siklon sistemi giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.....	73
Şekil 5.11. Döner fırın ile ön-ısıtıcı siklonlar birlikte ele alındığında sistem giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.	75
Şekil 5.12. Tüm döner fırın sisteminde giriş ve çıkışlar ile ölçülen parametreler	77
Şekil 7.1. Sızıntı havanın ısıtılması için gerekli enerji miktarlarının hava debisi ve sıcaklığı ile değişimi	93
Şekil 7.2. Sızıntı havanın neden olduğu ısı kaybının preka siklon kulesi çıkışındaki oksijen değerine bağlı olarak değişimi.....	96
Şekil 7.3. Sızıntı havanın neden olduğu ısı kaybının Fırın kule çıkışındaki oksijen değerine bağlı olarak değişimi	97
Şekil 7.4. Fırın soğutucusu ısı verimi ve ısı kazancının sekonder hava sıcaklığı ile değişimi.....	100
Şekil 7.5. Absorpsiyonlu soğutma sistemi ile kazanılan soğutma yükü.	107
Şekil 7.6. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin geri ödeme süresi.....	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

SAYFA

Çizelge 2.1. 1915 ile 1999 yılları arasında Türk çimento sektörünü durumu.....	7
Çizelge 2.2. Klinkeri oluşturan ana fazlar.....	9
Çizelge 2.3. Klinkerin kimyasal bileşimi.....	9
Çizelge 2.4. CaCO_3 oranına göre hammaddelerin sınıflandırılması.	16
Çizelge 3.1. Çimento döner fırınında yanma şartları.	28
Çizelge 3.2. Tiplerine göre çeşitli uzun fırınların karakteristik özellikleri.	30
Çizelge 3.3. Lepollü döner fırınların karakteristik özellikleri.....	30
Çizelge 3.4. Ön ısıtıcılı döner fırınların karakteristik özellikleri.	31
Çizelge 3.5. Dört kademeli ön ısıtıcılı siklonlu döner fırınların karakteristik özellikleri.....	31
Çizelge 3.6. Dört ila Altı kademeli kalsinatörlü döner fırınların karakteristik özellikleri.....	32
Çizelge 4.1. Gaz bileşenleri ve ölçüm aralığı.	42
Çizelge 5.1. Kütle dengesi hesap çizelgesi.	49
Çizelge 5.2. ESKİ Kuledeki kalsinasyon gazlarının ve her bir siklondaki sızıntı havanın hesaplanan değerleri.	52
Çizelge 5.3. YENİ Kuledeki kalsinasyon gazlarının ve her bir siklondaki sızıntı havanın hesaplanan değerleri	52
Çizelge 5.4. Fırın sisteminin çeşitli noktalarındaki basınç, sıcaklık, KK ve O_2 değerleri.....	53

Çizelge 5.5. Fırın grubundaki elemanlarda oluşan kalsinasyonun yüzde değerleri...	53
Çizelge 5.6. Fırın çıkışındaki baca gazının hesaplanan değerleri.	55
Çizelge 5.7. Preka çıkışındaki baca gazının hesaplanan değerleri.....	56
Çizelge 5.8. ESKİ Ön-Isıtıcı siklonlarda gaz debileri ve oranları.....	57
Çizelge 5.9. YENİ Ön-Isıtıcı siklonlarda gaz debileri ve oranları.....	58
Çizelge 5.10. Fırında kullanılan yakma havasının debileri ve oranları.....	62
Çizelge 5.11. Prekada kullanılan yakma havasının debileri ve oranları	62
Çizelge 5.12. Soğutucu gaz dengesi.....	63
Çizelge 5.13. Soğutucu enerji dengesi.	65
Çizelge 5.14. Fırın yüzeyi ısı kaybı hesap çizelgesi.	69
Çizelge 5.15. Döner fırın sistemi için enerji dengesi.	70
Çizelge 5.16. Döner fırın ve soğutma sistemi için enerji dengesi.....	72
Çizelge 5.17. Ön-Isıtıcı siklon sistemi (ESKİ ve YENİ kuleler) için enerji dengesi.	73
Çizelge 5.18. Fırın ve Ön-Isıtıcı siklon sistemi için enerji dengesi.	76
Çizelge 5.19. Fırın sistemi toplam enerji dengesi.	77
Çizelge 5.20. Döner fırın sisteminin toplam verimi.....	79
Çizelge 5.21. Döner fırın sistemini terk eden midair ve egzoz gazları değerlendirildiğinde verim.....	79
Çizelge 6.1. Soğutma sistemi kullanılabilirlik analizi.	83
Çizelge 6.2. Döner fırın sistemi kullanılabilirlik analizi.....	84
Çizelge 6.3. Döner fırın ve soğutma sistemi kullanılabilirlik analizi	85

Çizelge 6.4. Ön ısıtıcı siklon sistemi kullanılabilirlik analizi.	86
Çizelge 6.5. Ön ısıtıcı siklon ve döner fırın sistemi kullanılabilirlik analizi	87
Çizelge 6.6. Ön ısıtıcı siklon ve döner fırın sistemi kullanılabilirlik analizi.	88
Çizelge 6.7. Döner fırın sisteminde kullanılabilirlik ve II. kanun verimliliği.....	89
Çizelge 6.8. Döner fırın sisteminde genişletilmiş kullanılabilirlik ve II. kanun verimi	89
Çizelge 7.1. Fırın Ön-Isıtıcı (Eski siklon Grubu) siklonlardaki gaz ve sızıntı hava debileri.....	92
Çizelge 7.2. Fırın Preka Ön-Isıtıcı (O Grubu) siklonlardaki gaz ve sızıntı hava debileri.....	93
Çizelge 7.3. Fırın (Eski) siklonlarda gaz ve malzeme sıcaklıkları.....	94
Çizelge 7.4. Preka (Yeni) siklonlarda gaz ve malzeme sıcaklıkları.....	94
Çizelge 7.5. Isıtıcı faydalı ısıları.	103
Çizelge 7.6. Toplayıcıların geri ödeme sürelerine göre değerlendirilmesi.	104
Çizelge 7.7. Fırın soğutma gazı özellikleri.	106
Çizelge 7.8. Absorpsiyonlu soğutma sistemleri ile klasik sistemlerin mukayesesi.	106

1. GİRİŞ

Çimento üretimi enerji yoğun bir sektördür. Son teknolojik iyileştirmelere rağmen, çimento üretiminde yakıt ve elektrik enerjisi giderleri, toplam maliyetin yaklaşık % 45-50'sini oluşturmaktadır. Teknolojik iyileştirmelerin, büyük sermaye yatırımlarını gerektireceği ve yüksek oranlarda enerji tasarrufuna imkan vereceği açıktır. Ancak, büyük teknolojik iyileştirme olsun veya olmasın, çok küçük bir sermaye yatırımı ile yapılabilecek küçük iyileştirmeler bile ekonomik açıdan büyük değer ifade etmektedir. Bu tür küçük iyileştirmeleri; atık ısının en aza indirilmesi, önlenemeyen ısı kayıplarının geri kazanılması ve proseste kullanılan sistemlerin (değirmenler, fanlar, fırın, soğutucu, siklonlar v.b.) optimum işletme şartlarında çalıştırılması şeklinde özetlemek mümkündür.

Bu çalışmada tipik bir çimento fabrikasında yürütülen ölçme ve analiz çalışmalarını takiben enerjinin kullanım alanlarının ve miktarının belirlenmesi amacı ile değerlendirme çalışmaları yapılmıştır. Hesaplamalar sırasında elde edilen tüm veriler Excel tablo programına girilmiştir. Program içerisinde gerekli eşitlikler tanımlanarak çıktıları yorumlanmıştır. Bu çalışmalarda sırası ile kütle ve enerji denklilikleri oluşturulmuştur. Daha sonra sistemdeki enerjinin kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacı ile kullanılabilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Son olarak elde edilen bulgular ışığında incelenen çimento fabrikası için enerji tasarruf imkanları ortaya konmuştur.

Tipik bir çimento fabrikasında enerji ve ekserji analizi başlıklı bu çalışma sekiz ayrı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümdeki girişi takiben ikinci bölümde son yıllarda konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar, çimentonun tarihçesi, kimyası ve çimento üretiminde kullanılan hammaddeler anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde çimento üretim prosesi ve ana ekipmanlar hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca bu bölüm klinker üretim prosesinde kullanılan çeşitli teknolojiler hakkında açıklanmalar bulunmaktadır.

Dördüncü bölümde çimento prosesine ait parametrelerin belirlenmesi için uygulanan ölçme analiz yöntemlerine değinilmiştir. Ayrıca bu bölümde bu çalışma sırasında kullanılan ölçme cihazları ve kullanımları hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde enerji analizine ait tüm ölçüm ve hesap sonuçları verilmiştir. Sistemlerin enerji ve kütle dengeleri kurulmuş ve konu çeşitli yönleriyle değerlendirilerek irdelenmiştir.

Altıncı bölümde kullanılabilirlik analizine ait hesaplamalar ve sonuçlar verilmiştir. Ayrıca bu bölümde konu çeşitli yönleri ile değerlendirilerek irdelenmiştir.

Yedinci bölümde elde edilen tüm veriler değerlendirilerek enerji tasarrufu imkanları belirlenmiş olup, konulara göre yapılan ayrıntılı hesapların sonuçları ile inceleme ve değerlendirmeler sunulmuştur.

Sekizinci bölümde yapılan bu çalışmanın sonucunda ortaya çıkarılan tasarruf imkanları irdelenerek ekonomik ve çevresel etkileri değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR, ÇİMENTO TARİHÇESİ ve KİMYASI

Bu bölümde öncelikle son yıllarda konu ile ilgili yürütülen çalışmalardan örnekler verilmiştir, daha sonra tarih boyunca çimentonun gelişimi ve ülkemizde Cumhuriyetin ilanından başlanmak üzere günümüze dek sektörün durumu anlatılmıştır. Ayrıca çimento kimyası ve çimentoya ait Türk Standartlarının takip eden bölümde verilmiştir.

Endüstri tarafından kullanılan enerji ülkemizin toplam tüketimi içerisindeki oranın gittikçe artmaktadır. Dünyada bilhassa enerji yoğun sektörlerde yoğun ve düzenli enerji tasarrufu çalışmaları yürütülmektedir. Enerji yoğun sektörlerin başında gelen demir – çelik, çimento ve cam sektöründe çeşitli çalışmalar yayımlanmaktadır. Çimento sektörünün konu alındığı birkaç çalışma içeriği bu bölümde derlenmiştir.

Özdoğan and Arıkol (1994) tarafından yapılan çalışmada bu oranın % 31 dolayında olduğu ve izlenen trende göre bu oranın 2010 yılı itibari ile % 40 seviyesinde gerçekleşeceği belirtilmektedir. Bu durumda enerjinin rasyonel ve verimli kullanımının gittikçe önem kazanacağı belirtilmektedir. Bu amaçla yapılan ve Türk çimento sanayisini de içeren çalışmada sektör tarafından kullanılan proses özellikleri dolayısı ile yüksek sıcaklıklarda ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) atık ısıların olduğu anlatılmaktadır. Bu tür atık ısıların değerlendirilmesi yolu ile prosese ait birinci ve ikinci kanun verimsizlikleri azaltılacaktır.

Liu *et.al.* (1995) dünya çimento üretiminin beşte birini gerçekleştiren Çin'in çimento sektöründe proses yenilemeleri ile enerji yoğunluğunun % 10 ila 30 arasında iyileştirilebileceğini belirtmektedir. Bu durumda global kaynakların tasarruf yanında atmosfere atılan karbon dioksit ve azot oksit gibi kirleticiler azaltılacaktır. Bu amaçla 1981 ve 1990 arasında yürütülen sistematik enerji tasarrufu çalışmaları ile belli başlı tesislerde ısı kullanımında % 10.6 mertebesinde düşüş sağlanmıştır.

Meksika çimento endüstrisi enerji kullanım seviyelerinin ve karbon dioksit emisyonlarının incelendiği Sheinbaum and Ozawa (1997) çalışması 1982 ile 1994

arasında sektörde yürütülen çalışmaları açıklamaktadır. Elde edilen verilere göre enerji yoğunluğunda % 28 ve sektör kaynaklı Karbon Dioksit emisyonlarında ise % 17 mertebesinde azalma görülmektedir. Bu azalma tamamı ile yapılan atık ısı değerlendirme ve proses iyileştirme çalışmalarına dayanmaktadır. Meksika ekonomisinde büyük öneme sahip sektör ihracat ve rekabetçilik gücünü sürdürebilmesi için bu çalışmaların belli bir düzende genişleyerek devam etmesi gereklidir.

Worrell *et.al.* (1999) çalışmalarında Amerika Birleşik Devletler’inde bulunan çimento endüstrisinin enerji verimliliği potansiyelini ve maliyet etkin ölçütlerini belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmaya göre 1970 ile 1997 yılları arasında Amerikan çimento sektörünün enerji yoğunluğu 1670 kcal/kg kli. den 1200 kcal/kg kli.’e gerileyerek % 30 mertebesinde azalmıştır. Bu arada sektör kaynaklı karbon dioksit emisyonları % 17 kadar azalmıştır. Bu azalmada klinker prosesinde anahtar rol oynayan bazı enerji tasarrufu teknolojileri aşağıdaki gibi verilmiştir:

- Fırın yanma sisteminde iyileştirmeler
- Fırın cidarından kaçak ısının azaltılması
- Atıkların yakıt olarak kullanılması
- Modern plakalı soğutucu uygulamaları
- Güç üretimi için ısı geri kazanımı
- Düşük basınç düşümüne sahip siklonların kullanımı
- Uzun döner fırınları çok katlı multi-siklon kuleler ile değiştirmek
- Soğutucularda optimizasyon çalışmaları
- Ön kalsinasyon kulesine preka ilave etmek

Boateng and Barr (1995) yaptıkları çalışma ile döner fırın termal modelini, malzeme tarafından oluşturulan yatak içerisinde oluşan ısı transferini dahil edecek şekilde incelemişlerdir. Burada amaç yanma gazları tarafından taşınan ısının yatağa iletilerek reaksiyonların gerçekleşme sürecini ve bu esnada fırın çeperindeki refrakter malzemeye iletilen ısının termal modeli elde edilerek refrakter malzeme seçimi, fırın içerisinde sıcaklık dağılımı ve benzer parametrelerin belirlenmesini sağlamaktır. Genellikle enerji tüketiminin rasyonelliği tartışılırken proses analizi uygulanmaktadır. Ancak bu tür bir analiz yöntemi ile, değişik ısıl proseslerin

birbirleriyle etkileşim seviyesini dikkate alınmaz. Bu durumun genel yaklaşım kuralları içerisinde düşünülerek enerji yönetimi için uygun olduğu söylenebilir. Bir tesisin enerji yönetimi yaklaşımı termal prosesler arasında etkileri dikkate almadan girdiler çıktılar analiz edilerek yapılır. Ancak ekserji ve kullanılabilirlik analizi ile daha doğru sonuçlar üretmek kabil olmaktadır.

Carvalho and Nogueira (1997) cam fırınları, çimento fırınları ve pişirme fırınlarındaki enerji verimliliği iyileştirmeleri konu alan çalışmalarında düşük, orta ve yüksek sıcaklıkta çalışan ısı ekipmanlarda enerji verimliliğini iyileştirme yolunda modeller öne sürmektedirler. Bu tür yüksek sıcaklık fırınları endüstride şu başlıklar altında önem kazanmaktadır:

- Yüksek miktarda enerji kullanımı,
- Son ürün kalitesi üzerinde etki,
- Üretimin prosesi önemli bir zaman boyunca bu ekipmanlarda devam etmekte,
- Tesisin yaydığı kirliliği önemli bir parçası bu ekipmanlar tarafından üretilmekte,
- Isıl ve fiziksel olarak yürüyen prosesler karmaşık yapıya sahip
- Bu tür cihazlar içerisinde olup biteni izlemek ve ölçmek çok zordur.

Fırınlar ile ilgili çalışmalar uzun süredir devam etmekle birlikte sonuçta ortaya çıkarılan kestirim ile ilgili araçlar şu noktalarda dizayn, işletme ve kontrol açısından yeterlilikten uzak kalmaktadırlar.

- Genel kestirim yöntemleri oldukça karmaşık olup endüstri tarafından uygulanması yüksek maliyet getirir,
- Direkt olarak gerçek boyuttaki modelleri tanımlamazlar,
- Yüksek miktarda bilgisayar zamanına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu durumda Carvalho and Nogueira (1997) sonuç kısmında çalışmanın gerçek boyutlu bir model üzerinde alınan verilerin bir yazılım kodu kullanılarak işlenmesi ve sonuçların monitör edilmesi gerekliliğini önermektedir.

Bir çimento tesisinde enerji dengesi oluşturarak elde edilen bulgular ışığında kojenerasyon sisteminin kurulmasına yönelik çalışma Khurana *et.al.* (2001)

tarafından sunulmuştur. Bu çalışma sırasında öncelikle kütle dengesi ardından enerji dengesi kurulmuştur. Bulgular değerlendirilerek 280°C sıcaklıkta abgaz ve 400°C sıcaklıkta soğutma bacası kullanılarak elektrik eldesi düşünülmüştür. Geri kazanılan ısıнын 4.4 MW gücünde bir tesis tarafından elektriğe dönüşüm ile yıllık 3.4 Milyon ABD doları değerinde enerji tasarrufu mümkün görülmektedir. Bu yatırımın geri ödeme süresi iki yıl mertebesinde dir.

2.1. Tarihçe

"Çimento", Latince'deki "COEMETUM"dan Fransız'caya "CEMENT", Almanca ya "ZEMENT" olarak geçmiş, Türkçe'ye de İtalyanca'daki "Çimento"dan girmiştir.

Çimentonun kullanımı milattan önce ikibinli yıllara kadar uzanmaktadır. Eski Mısırlıların kalsine edilmiş killi jipsten oluşan bir tür çimento kullandıkları, Anadolu'daki Hattuş ve Boğazkale gibi antik Hitit kentlerinde de kireç ile doğal puzzolanik toprakların karıştırılarak harç yapıldığı bilinmektedir. Avrupa'da ise ilk kez İtalya'da, (MÖ 12-14 yy.) Caligula Wharf yapılarında çimentoyu kullanmıştır. 1756 yılında John Smeaton, İngiltere'nin Cornwall sahilindeki Eddystone deniz fenerinin yeniden yapımında yumuşak kalker ve kilden üretilen bir çimento kullanmıştır. 1802 yılı Fransa çimento sanayiinin başlangıcıdır. İlk olarak 1824 yılında İngiltere'de üretilen çimento bu tür yapı malzemeleri arasında en önemli yeri tutmaktadır. Amerika'daki ilk portland çimentosu üretimi ise 1871 yılında David O. Saylor tarafından gerçekleştirilmiştir.

Türkiye'de ilk çimento fabrikası 20.000 ton/yıl kapasite ile 1911 yılında Darıca'da kurulmuştur. Daha sonra bu fabrika 1923 yılında genişletilerek kapasitesi 40.000 ton/yıl'a yükseltilmiştir. Cumhuriyetle birlikte ülkemizde yeni fabrikalar devreye girmiş, bir taraftan üretim artarken, diğer taraftan artan çimento talebini karşılamak üzere ithalat devam etmiştir. Darıca'daki fabrikayı 1926'da Ankara, 1930'da Kartal ve Zeytinburnu'nda kurulan fabrikalar izlemiştir. Devlet ilk çimento fabrikasını 1943 yılında Sivas'ta açmıştır. Bu yıllarda toplam kapasite yılda 370.000 ton/yıl'a ulaşmıştır.

Devlet tarafından kurulan çimento fabrikalarının sayısı özelleştirme uygulamalarının başlamasından önce 22'ye ulaşmıştır. Ülkemiz çimento sektöründe 1926 yılına kadar olan dönem hariç, daima resmi ve özel sektör bir arada üretim yapmış ve 1960 yılından sonra da hemen yarı yarıya oran ile mevcut kapasiteyi paylaşmıştır. 1960'da Türkiye bir miktar çimento ihraç edebilir duruma gelmişse de 1963-70 yılları arasında tekrar ithalata devam etmek zorunda kalmıştır. 80'lerden günümüze değin ise düzenli şekilde artan ihracatımız 2000 yılı itibari ile 6.5 milyon tona ulaşmıştır. 2001 yılı içerisinde meydana gelen ekonomik kriz nedeni ile iç tüketimin 25 milyon ton civarında gerçekleşmesi ve 8 milyon tona yakın ihracat ile üretimin dengelenmesi beklenmektedir. Türkiye 2001 yılı itibari kapasite açısından dünyada yedinci en büyük üreticidir. Çizelge 2.1.'de ilk çimento fabrikasının kuruluşundan 1999 yılına dek sektörün yıllık üretim, ihracat, ithalat ve iç tüketimleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. 1915 ile 1999 yılları arasında Türk çimento sektörünü durumu.

Yıl	Üretim (bin Ton)	İhracat (bin Ton)	İthal (bin Ton)	İç Tüketim (bin Ton)
1915	12			
1920	26			
1926	42		55	94
1930	104		60	142
1940	268		267	535
1945	288		271	559
1950	517	20	299	796
1955	811		319	1130
1960	2038	4	69	1973
1965	3244	42		3286
1980	12976	755		12087
1985	17544	1761		15796
1990	24416	1719		22647
1995	33140	3024		30085
1999	34817	3414		31530

Türkiye'nin gerçek anlamda ihracatçı olması 1970 yılından sonradır. 1978-1983 yılları arasında bütün dünyada ve Türkiye'de ortaya çıkan inşaat sektöründeki kriz, Türkiye'de büyük ölçüde kapasite fazlası ortaya çıkarmış ve Türkiye bu yıllarda

önemli miktarlarda ihracat yapar hale gelmiştir. 1987 yılında başlatılan özelleştirme çalışmaları ile birlikte Çitosan'a ait çimento fabrikaları satılmış, böylece çimento sektöründe özel sektörün payı 1994 yılı sonu itibariyle % 83.3 olmuştur. 1989 Eylül ayında 22 adet olan kamu sektörü fabrika sayısı 1995 yılı itibariyle 7'ye düşmüş bu geçen süre içinde 15 kamu fabrikası özelleştirilmiştir. Daha sonra beş karma sektör fabrikasındaki kamu payları özel sektöre satılarak bu fabrikalar da özel sektör statüsüne geçmiştir.

Bugün Türkiye’de 39 adet komple çimento fabrikası, 5’i bağımsız 12’si çimento üreticilerine ait 17 öğütme tesisi ve 7 Satış terminali vardır. 39 fabrikanın 31 tanesi 9 çimento (Sabancı Holding, OYAK, Rumeli Holding, SET Çimento, Batı Anadolu Çimento, Yibitaş + Lafarge, Vicat, Lafarge, Çimentaş) grubuna aittir.

Sektör genellikle modern teknolojileri kullanmaktadır. Batıda yerleşmiş ön kalsinatörler, kömür kurutma sistemleri, kömür ve hammadde homojenizasyonu gibi sistemler Türkiye’de yaygınlık kazanmaktadır. Otomasyon konusunda yatırımlar mevcuttur. 1980 yılından sonra fuel-oil kullanan sistemler kömüre dönüştürülmüştür. Halen fabrikaların tamamı kömürle çalışmaktadır. Türk Çimento Müstahsilleri Birliği’nden (TÇMB) alınan veriler incelendiğinde Türkiye genelinde çimento tüketiminin 1992-98 yılları arasında yılda % 5 büyüdüğü görülmektedir

2.2. Çimento Kimyası

Çimento; başlıca silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitleri ihtiva eden hammaddelerin teknolojik metotlarla sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamul madde klinkerin, tek veya daha fazla cins katkı maddesi ile öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

Klinkeri oluşturan ana fazlar ve oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir. Klinkerin kimyasal kompozisyonu içerisinde bulunan bileşenler ve ağırlıkça oranları Çizelge 2.3’de gösterilmiştir

Çizelge 2.2. Klinkeri oluşturan ana fazlar.

Faz	Gösterim	Simge	İsim	Klinker %
Tri –Kalsiyum	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	Alit	51.5 – 85.2
Di-Kalsiyum silikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	Bellit	0.2 – 27.1
Kalsiyum aluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Aluminat	6.8 – 15.6
Kalsiyum ferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{x}$	C_4AF	Ferrit	4.0 – 16.2

Çeşitli çimento tiplerine ait klinker ve katkı maddesi içerikleri Şekil 2.1.’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Klinkerin kimyasal bileşimi.

Bileşen	Ağırlıkça (%)
SiO_2	19.75-24.25
Al_2O_3	3.76-6.78
TiO_2	0.21-0.52
P_2O_3	0.02-0.27
Fe_2O_3	1.29-4.64
Mn_2O_3	0.03-0.68
CaO	63.76-70.14
MgO	0.00-4.51
SO_3	0.20-2.07
K_2O	0.31-1.76
Na_2O	0.03-0.33
Eşdeğer Na_2O	0.31-1.34
Kızdırma kaybı	0.09-1.56
CO_2	0.03-0.83
H_2O	0.04-1.11

Genel Çimento Grubundan 27 Ürün													
Ana Tipler	Ürünlerden 27 sinin İşareti (Genel Çimento Tipleri)		Klinker	Yüksek Fırın Cürufu	Silis Dumanlı	Puzolan		Uçucu Kül		Pişmiş Şist	Kalker		Minör İlave Bileşen
						Doğal	Doğal Kalsine Edilmiş	Silissi	Kalkersi				
			K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Cürufu Çimento	CEM II / A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portland Silis Dumanlı Çimento	CEM II / B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II / A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Puzolanlı Çimento	CEM II / A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II / B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II / A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II / B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portland Uçucu Küllü Çimento	CEM II / A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II / B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II / A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II / B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portland Pişmiş Şistli Çimento	CEM II / A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II / B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portland Kalkerli Çimento	CEM II / A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II / B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II / A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II / B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portland Kompoze Çimento	CEM II / A-M	80-94	←				6-20				→	0-5
		CEM II / B-M	65-79	←				21-35				→	0-5
CEM III	Yüksek Fırın Cürufu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65-89	-	←		11-35		→	-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	←		36-55		→	-	-	-	0-5
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	-	←	18-30	→	-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←	31-50	→	-	-	-	-	0-5

Şekil 2.1. Klinker içeriklerine göre çimento tipleri (Türk beton üreticileri birliği).

2.3. ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELER

Jeolojik araştırmaların konusunu oluşturan ve çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler kireçtaşı, kil ve marndır. Bunlar jeolojide sedimanter kayaçlar olarak bilinirler ve herhangi bir jeolojik yaşta olabilirler. Kireçtaşları yaygın olarak sedimanter kayaç şeklinde oluşur ve büyük formasyonlar oluştururlar. Avrupa’da Devoniyen yaşlı kireçtaşları, Jura ve Triyas yaşlı kireçtaşları ile Kretase yaşlı kireçtaşları önem kazanmıştır. Kretase yaşlı kireçtaşları fosil içerikli olabilir ve metamorfizma etkisinde kalabilirler (mermer ve silisli kireçtaşları gibi). Bazıları da hem fosilli ve hem de kil-kalker karışımı şeklinde olabilir. Bunlar da kireçtaşı-kil oranına göre kireçli marn, killi marn yada marn adını alırlar. Bu kireçtaşları içerdikleri CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 miktarlarıyla doğal çimento olarak yorumlanabilmektedir.

Daha genç olan kireçtaşları mercan içerikli olabilir ve bunlar pekişmemiş kayaçlarla, pekişmiş kayaçlar arasındaki bir pozisyonda değerlendirilebilirler. Çimento klinkeri üretiminde kullanılabilen shell depozitleri bu gruba girmektedir.

Çimento üretimi için kullanılan kil mineralleri genellikle yumuşak ve gevşek yapılı materyallerdir. Bu materyaller tane boylarına göre sınıflandırılmaktadır (kil, şilt, kum gibi). Kayaç tipindeki killi materyaller killi şist, şeyl ve kristalin şistler şeklinde oluşabilirler. Granit, gnays bazalt ve bazaltik tüflerle puzzolanlar kil minerallerinin oluşumunda etkili olabilirler.

Klinker üretimi için gerekli katkı maddeleri ise ham karışımın kimyasal bileşimini düzeltici yönde etkiye sahip, Fe, SiO_2 yada Al_2O_3 içerikli materyallerdir. Bunlara örnek olarak, fırınlanmış pirit, düşük yüzdeli demir cevheri, laterit, kuvarşlı kum ya da metamorfik kayaçların bozunmasıyla oluşan kuvarşlı materyaller ve boksitler verilebilir.

Çimento üretiminde kullanılacak olan hammaddelerin uygunluk dereceleri onların kimyasal bileşimleriyle orantılıdır. Kireçtaşı bileşeni için kireç standardı bir kriter olarak kullanılmaktadır. Bu değer SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi bileşenler hakkında bilgi vermekle birlikte CaO içeriği konusunda da aydınlatıcıdır.

Kil minerali olarak kullanılacak kayalarda silikat ve alümina oranı dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Ham karışımda bulunan MgO, kloritler, sülfatlar ve alkalilerin oranı da çimento üretimi için önemli birer etkiye sahiptir.

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler, yardımcı maddeler ve puzzolanik maddeler aşağıda genel olarak açıklanmıştır.

2.3.1 Ana Hammaddeler

Çimento prosesinde kullanılan bir çok ana hammaddelerin sınıflandırılması ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.3.1.1 Kireçtaşı

Kimyasal bileşiminde en az % 90 CaCO_3 (kalsiyum karbonat) içeren kayalara kalker yada kireçtaşı adı verilmektedir. Ayrıca mineralojik bileşiminde en az % 90 kalsit minerali bulunan kayalara da kalker adı verilmektedir.

Kalker saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluşur. Kalsit ve aragonit kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak % 56 CaO ve % 44 CO_2 içerir. Ancak doğada hiçbir zaman saf olarak bulunmaz. İkincil derecede değişik madde ve bileşiklerin içinde yer alması nedeniyle orijinal halde sarı, kahverengi ve siyah renklerde de görülebilmektedir.

Kalkerin sertlik derecesi 3. özgül ağırlığı $2.5\text{--}2.7 \text{ gr/cm}^3$ arasındadır.

Yeraltı sularında travertenler şeklinde, deniz yada tatlı sularda ise kimyasal organik veya mekanik çökelme sonucu kalker yatakları oluşur. Oluşum süreçlerinden de anlaşılacağı üzere kalker üç ana grup altında toplanabilmektedir.

Yaygın olarak oluşan kireçtaşlarının çoğu belli oranda organik maddeler içermektedir.

Kalsit (hegzagonal ve CaCO_3) ve aragonit (ortorombik CaCO_3) kristallerinin her ikisi de modern kireçtaşı oluşumlarında yer alabilmektedir. Fakat Aragonit kristallerinin kalsit kristaline daha kolay dönüşebilmesi nedeniyle eski kireçtaşı oluşumlarında aragonit kristali bulmak çok güçtür.

2.3.1.2 Organik Kireçtaşları

Pek çok bitki ve hayvanın içerdikleri CaCO_3 ; organizmalar öldükten sonra kireçtaşını oluşturmak üzere çökebilmektedir. Bu organik kireçtaşlarının en önemlileri; resifal kireçtaşları, Konkoidal (Kabuk) Kireçtaşları, Mercan Kireçtaşları Biostromal Kireçtaşları, Algli Kireçtaşları ve Krinoidal Kireçtaşlarıdır.

Pelajik kireçtaşları ile az çok eşanamlı olan tebeşir şist, kretase'nin beyaz renkli ve ince taneli kireçtaşlarını temsil etmektedir. Tebeşire diğer jeolojik yaşlarda da (tersiyer) rastlanabilmektedir.

2.3.1.3 Kimyasal Kireçtaşları

Uygun ortam şartlarında oluşan ve genellikle diğer kireçtaşı türleri katmanlar şeklinde bulunan kimyasal kireçtaşlarının üç ana tipi vardır. Bu kireç taşları sırası ile; Kalk tüfleri, evaporit ardalaşmasına bağlı kireçtaşları (genelde Dolomitler), Oolitlik ve pisolitlik kireçtaşlarıdır.

2.3.1.4 Klastik Kireçtaşları

Mekanik olarak çökelen karbonat kayaçları daha önce oluşan kireçtaşları yada organik kireçtaşlarının parçalarının oluşturduğu depolanmalardır. Bazı araştırmacılar oolitlik kireçtaşlarını da bu gruba almaktadırlar. Bunların sınıflandırılması sedimenter kayaçlar için kullanılan tane boyu ölçeğine bağlıdır. Bunlar sırası ile Kalsirudit (2 mm ve yukarısı), Kalkarenit (1/16 mm - 2 mm), Kalsilit (1/16 mm den küçük) olarak adlandırılmaktadır.

Çimento üretiminde kullanılan kalker yataklarının kimyasal özelliklerinin yanı sıra fabrikaya yakınlığı, sökülebilirliği, kırılabilirliği, öğütülebilirliği ve pişebilir niteliklerde olması, düşük nem içermeleri ve homojen olmaları üretim maliyetini etkileyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle bu faktörlerin saptanması üretim açısından çok önemlidir.

2.3.1.5 Kil

Kil teriminin geniş bir anlamı vardır. Hem bir kayaç terimi olarak, hem de tane boyu terimi olarak kullanılmaktadır. Kayaç olarak bozunma ürünleri yada

hidrotermal olaylarla oluşmuş çökeller için kullanılan bir terimdir. Killerin kimyasal analizleri; silisyum, alüminyum ve sudan oluştuklarını göstermektedir. Ayrıca bünyelerinde, demir ve alkaliler değişik miktarlarda bulunmaktadır.

Kil terimi; kayaç olarak doğal, topraklı, ince taneli ve su ile karışıklarında plastik özellikleri gelişen materyalleri içine almaktadır.

Kayaç oluşturan kil mineralleri değişik oranlarda bir kayaç içerisinde bulunabilirler. Ve bunlar killi kayaçların temel bileşenleridirler. Genellikle kristalin formda ve küçük partiküller halinde oluşmaktadırlar. Yukarıda da sözü edildiği gibi sulu alüminyum silikatlardır. Mineralojik bileşiminde % 90'a kadar kil minerali bulunduran kayaçlara kil denilmektedir.

Killerin özellikleri en azından 5 temel faktör tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar; kil minerallerinin ve kil minerali olmayan bileşenlerin bileşimi, organik materyaller, eriyebilir tuzlar ve değişebilen iyonlar ile yapı-doku'dur. Bunlar içerisinde en önemlisi, kil minerallerinin bileşimidir. Bir kil mineralinin ekonomik olarak kullanımı kil mineral bileşimi ile ortaya çıkarılmaktadır. Örneğin; seramik endüstrisinde yüksek sıcaklıklara dayanıklı olan bileşimler, petrol endüstrisinde sondaj çamurlarının hazırlanması için bentonit tipi bileşimliler istenmektedir.

Kil minerallerinin kesin bir sınıflandırılması yapılmamakla beraber aşağıda yapılan sınıflama, uygulamalarda geçerli olan bir sınıflamadır.

I- Amorf

Allofan grubu

II- Kristalin

A- İki tabakalı

A.1- Kaolinit grubu (Kaolinit, nakrit, dikit)

A.2- Halloysit grubu

B- Üç Tabakalı

B.1.a- Montmorillonit grubu

Montmorillonit, sausonit ve vermikülit

B.1.b- Nontronit, saponit, hektorit

B.2- İllit grubu

C- Düzenli karışık tabakalı

Klorit grubu

D- Zincir yapılı

Atapuljit

Sepiyolit

Paligorskit

Kil minerallerinin çoğu laboratuvar koşullarında sentez edilmiştir. Bu deneylerden, minerallerin oluşum ortamları ve çevresel koşullarla ilgili pek çok sonuç ortaya çıkarılmıştır. Düşük sıcaklıklarda asidik ortamlarda kaolinit, alkali ortamda montmorillonit oluşabilmektedir.

Pek çok kil minerali hidrotermal kökenlidir. Bazı hidrotermal kökenli yataklar monomineralli olmasına karşın çoğu kil minerallerinin karışımından oluşmaktadır. Farklı tipteki kayaçların bozunması da kil minerallerinin oluşumunda etkilidir. Kil minerallerinin oluşum şekilleri bir kaç tane faktör etkisindedir. Bunlar, ana kayaç tipi, iklim, topografya, bitki örtüsü ve zamandır. Çimento sektöründe hammadde olarak kullanılan killer ise alterasyon ürünü metal oksitlerin taşınıp depolanma havzasında yığılmasından veya yerinde alterasyon örtüsü halinde Neojen, Pliyo-Kuvaterner yaşlı alüvyonlarda, Neojen havzalarının üst düzeylerindeki karasal koşullarda oluşmuş çoğu killi ve kireçli topraklardır. Kaolinin çimento sektöründe düşük demiroksit içeren türleri kullanılmaktadır.

2.3.1.6 Marn

Kalker ve kilin doğada % 50-70 oranında kalker ve % 30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayaca marn denilmektedir. Oluşum bakımından tamamı ile sedimenter olup, diyajenez geçirmiş genellikle düzenli tabakalı olarak bulunur. Marn oluşumu için, daha çok tektonik ve orojenik hareketlerin durulduğu, sakin ortamlar daha uygundur. Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay işlenebilmekte, kırma-öğütme sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır.

2.3.2 Çimento Hammaddelerinin Sınıflandırılması

Çimento Sanayinde kullanılan ve CaCO_3 oranına göre yapılan hammadde sınıflandırma Çizelge 2.4. verilmektedir.

Çizelge 2.4. CaCO_3 oranına göre hammaddelerin sınıflandırılması.

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

2.3.3 Çimento Sanayinde Kullanılan Katkı Maddeleri

Mekanik ve kimyasal dayanım özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile çimento içerisine çeşitli katkı maddeleri ilave edilmektedir. Bu katkı maddeleri klinker üretimi sonrasında çimento öğütme süreci esnasında ilave edilir.

2.3.3.1 Puzzolanik Maddeler

Kendi başlarına hidrolik bağlayıcı olmayan ancak ince olarak öğütüldüklerinde nemli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan doğal veya yapay maddelerdir. Çoğu puzzolanik maddeler volkanik kökenli olup, en çok bilineni tüflerdir. Puzzolan terimi, Napoli Körfezindeki Vezüv Dağı yakınındaki Pozzuoli'den kaynaklanmaktadır.

Almanya'da Rhenish trası ve Bavarian trası olarak bilinen benzer türdeki materyal çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Fırınlanmış yağlı arduvaz, daha az olarak kullanılan diğer bir puzzolanik materyaldir. Diğer ülkelerde volkanik kayalar yanında, değişik silisli sedimenter yataklar, özellikle kizelgur içeren oluşumlar bu materyaller kapsamındadır. Puzzolanik maddelerin özelliği yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 içermeleridir. Bu nedenle Ca(OH)_2 ile tepkimeleri kolaydır. Bu yüzden bağlayıcı özellik gösterirler. Ülkemizde çimento sanayinde doğal puzzolanik katkı maddesi olarak, tras ve bazik nitelikli volkanik işlevlerin bir ürünü olarak oluşan doğal cüruflar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yapay olarak elde edilen yüksek fırın cürufu ve uçucu küller de katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Çimento maliyetlerinin düşürülmesi açısından katkı maddelerinin yüksek oranda katılabilir kalitede olmaları önemlidir. Puzzolanik aktivite değerleri ile çözülmüş kalıntı oranları, katılabilirlik oranını belirleyen faktörler olup, katılım oranı genelde % 10-30 arasında değişmektedir.

2.3.3.2 Uçucu Küller

Uçucu küller ya da pulverize yakıt külleri, özellikle elektrik üretim tesislerinin pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden sağlanan materyallerdir. Küresel biçimde olup, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içerirler. Puzzolanik maddeler gibi Ca(OH)_2 ile tepkimelerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanırlar. Diğer taraftan yanmış karbon kalıntılarını da içermesi olasıdır. Bu da çimentonun düşük direncine ve betonun dayanıklılığına olumsuz yönde etki yapar. Uçucu küllerin spesifik yüzeyi ne kadar büyükse reaktivitesi de o kadar yüksektir.

Pek çok uçucu kül için bu değer $1000-4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ arasında değişmektedir. Kül partiküllerinin tane boyu ise $0.5-200$ mikron arasındadır. İri taneli uçucu küllerden

istenilen çimentoyu üretmek için jips ve portland çimentosu klinkeri ile öğütme yoluyla inceltilmesi olasıdır. Külün kalitesine ve özelliklerine bağlı olarak çimentonun yapısında bir katkı maddesi olarak % 30 oranında uçucu kül bulunabilmektedir.

2.3.3.3 Sülfatlar

Evaporit mineralleri jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) yada jips-anhidrit (CaSO_4) karışımını içeren değişik oranlardaki sülfat mineralleri son öğütme prosesinde portland çimentosu klinkerine katılabilmektedir. Sülfat üyelerinin eklenmesiyle çimentonun donma süresinin kontrolü daha kolay sağlanabilmektedir. Bu gibi materyaller çimentonun öğütülmesi sırasında % 3-5 oranında katılabilmektedir.

2.3.4 Çimento Hammaddeleri Rezervleri

Çimento hammaddeleri özellikle kalker sahaları ülkemizde yaygın olarak bulunmaktadır. Genelde rezerv yönünden herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Ancak hammadde kullanım miktarlarının çok yüksek olması, nakliye maliyetlerinin düşük olmasını gerektirdiğinden ana hammadde sahalarının fabrikaya yakın olması (en çok 5 km) büyük önem taşımaktadır. Ayrıca hammaddelerin kaliteli, kolay kırılabilir, öğütülebilir ve pişebilir özellikte olması, düşük nem içermesi, sahaların ocak işletmeciliğine uygun olması, dekapaj gerektirmemesi, tarım-orman alanları içinde olmaması hammadde maliyetlerinin düşük olmasını sağladığından hammadde etütlerinde esas alınması gereken kriterler olmaktadır.

2.4. Türk Standartlarına Göre Çimento Tipleri

Ülkemizde üretilen çimentolar Türk standardına göre 16 farklı tipte sınıflandırılmıştır. Türk standartlarında tanımlanan çimentolar ve spesifikasyonları aşağıda verilmiştir:

TS 19 Portland Çimento: Portland çimentoları, klinkerle az miktarda (yaklaşık % 5) alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen katkısız çimentolardır. Bu çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre başlıca üç tiptir. Bunlar ; PÇ 32.5. PÇ 42.5 ve PÇ 52.5'tur.

TS 12139 Portland Cürüflu Çimento: Portland Cürüflu Çimentoları, klinkerle cüruf ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentolardır. Bu çimentolar ihtiva ettikleri katkı (cüruf) miktarına göre iki sınıfa ayrılırlar. Kütlece % 6 - 20 arasında cüruf ihtiva edenler A sınıfı, kütlece % 21 - 35 arasında cüruf ihtiva edenler B sınıfıdır. Portland Cürüflu Çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre PCÇ 32.5, PCÇ 32.5R, PCÇ 42.5, PCÇ 42.5R, PCÇ 52.5, PCÇ 52.5R olmak üzere altı tiptir. Bu çimento Avrupa standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir.

TS 12141 Portland Silika Füme Çimento: Portland Silika Füme Çimento, klinkerle kütlece en fazla % 10 oranında silika füme ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Bu çimentoda Avrupa standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir. Tek bir sınıfı vardır. Portland Silika Füme Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre PSFÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir.

TS 10156 Katkılı Çimento: Katkılı Çimento, klinkerle en fazla % 19 oranında puzolanik maddenin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. Katkılı Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre KÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir.

TS 26 Traslı Çimento: Traslı Çimento, klinkerle % 20-40 arasında trasın ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. Traslı Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre TÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir.

TS 640 Uçucu Küllü Çimento: Uçucu Küllü Çimento, klinkerle kütlece % 10-30 arasında uçucu külün az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. Uçucu Küllü Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre UKÇ 32.5 olmak üzere tek tiptir.

TS 12140 Portland Kalkerli Çimento: Portland Kalkerli Çimento, klinkerle kalkerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri kalker miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece % 6-20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, Kütlece % 21-35 arasında kalker ihtiva edenler B

sınıfıdır. Portland Kalkerli Çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre PLÇ 32.5. PLÇ 32.5R, PLÇ 42.5. PLÇ 42.5R, PLÇ 52.5. PLÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir.

TS 12143 Portland Kompoze Çimento: Portland Kompoze Çimento, klinkerle puzolonik veya hidrolik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece % 6-20 arasında kalker ihtiva edenler A sınıfı, Kütlece % 21-35 arasında kalker ihtiva edenler B sınıfıdır. Portland Kompoze Çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre PKÇ 32.5. PKÇ 32.5R, PKÇ 42.5. PKÇ 42.5R, PKÇ 52.5. PKÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir.

TS 20 Cürüflü Çimento: Cürüflü Çimento, klinkerle kütlece % 20-80 arasında cürufun ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Tek bir sınıfı mevcuttur. Katkılı Çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre CÇ 32.5 ve CÇ 42.5 olmak üzere iki tiptir.

TS 12144 Puzolanik Çimento: Puzolanik Çimento, klinkerle puzolanik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece % 11-35 arasında puzolanik madde ihtiva edenler A sınıfı, Kütlece % 36-55 arasında puzolanik madde ihtiva edenler B sınıfıdır. Puzolanik Çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre PZÇ 32.5. PZÇ 32.5R, PZÇ 42.5. PZÇ 42.5R, PZÇ 52.5. PZÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir.

TS 12142 Kompoze Çimento: Kompoze Çimento, klinkerle cüruf ve puzolonik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İhtiva ettikleri toplam katkı maddesinin miktarına göre 2 sınıfa ayrılırlar. Kütlece toplam katkı miktarı % 36-60 arasında olanlar A sınıfı, Kütlece toplam katkı miktarı % 61-80 arasında olanlar B sınıfıdır. Kompoze Çimento 28 günlük basınç dayanımlarına göre KZÇ 32.5. KZÇ 32.5R, KZÇ 42.5. KZÇ 42.5R, KZÇ 52.5. KZÇ 52.5R olmak üzere 6 tiptir. Bu çimento Avrupa standartlarından yeni alınan bir çimento çeşididir.

TS 21 Beyaz Çimento: Dekoratif amaçlı çimentodur. Renk verici oksitler içermeyen ya da çok az oranda içeren hammaddeler kullanılarak üretilen katkısız çimentodur. Dekoratif amaçlı olmasına rağmen basınç dayanımları, Türk standartlarında Portland Çimentosunun basınç dayanımları ile aynı değerlerle sınırlandırılmıştır. Beyazlık derecesine göre BPÇ 70 ve BPÇ 85 olmak üzere iki sınıftır. Beyaz Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre BPÇ 32.5 ve BPÇ 42.5 olmak üzere iki sınıftır.

TS 3646 Erken Dayanımı Yüksek Çimento: Erken Dayanımı Yüksek Çimento özel olarak üretilmiş klinker ile az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen erken dayanımı yüksek olan bir çimentodur. Erken Dayanımı Yüksek Çimento tek bir sınıftır. Erken Dayanımı Yüksek Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre EYÇ 52.5 olmak üzere tek tiptir.

TS 10157 Sülfatlara Dayanıklı Çimento: Sülfatlara Dayanıklı Çimento C3A miktarı en fazla % 5 olan ve C4AF + 2C3A miktarı en fazla % 25 olan klinkerle az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Sülfatlara Dayanıklı Çimentonun tek bir sınıfı mevcuttur. Sülfatlara Dayanıklı Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre SDC 32.5 olmak üzere tek tiptir.

TS 809 Süper Sülfat Çimentosu: Süper Sülfatlı Çimento, kütlece en az % 65 oranında yüksek fırın cürufu ile kalsiyum sülfat ve az miktarda portland çimento klinkeri veya portland çimentosunun birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. Bu çimento tek bir sınıftır. Bu Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre SSC 32.5 olmak üzere tek tiptir.

TS 22 Harç Çimentosu: Harç Çimentosu en fazla % 60 oranında puzolanik madde içeren çimentodur. Tek bir sınıftır. Bu Çimento 28 günlük basınç dayanımına göre HÇ 16 olmak üzere tek tiptir.

3. ÇİMENTO PROSESİ

Bu bölümde, çimento üretiminde kullanılan prosesler hakkında bilgi verilmektedir. Bu amaçla çimento hammaddelerinin doğadan çıkarılmasından klinkere ve daha sonra çimentoya ulaşan prosesin ana ve yardımcı bileşenleri anlatılmıştır. Son olarak üretim sırasında kullanılan kaynaklar ile prosesin çıktıları hakkında bilgi verilmiştir.

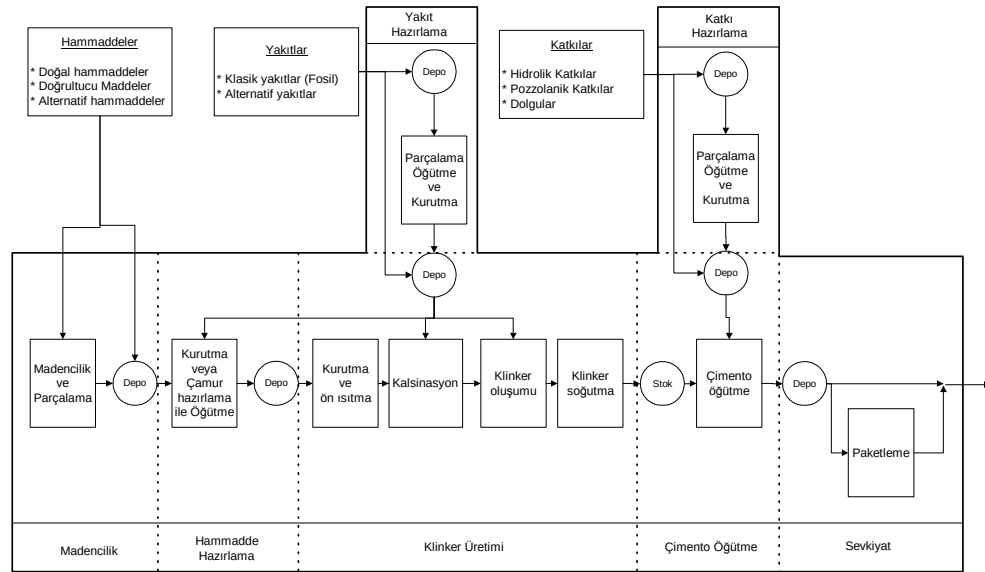
3.1. Ana Prosesler, Alt Prosesler Ve Sistem Sınırları

Çimento üretiminde dört farklı ana üretim prosesi uygulanmaktadır. Sırası ile kuru, yarı kuru, yarı yaş ve yaş sistem olarak adlandırılmaktadır. Bütün bu proseslerin her biri için aynı olan alt prosesleri aşağıda ve Şekil 3.1.'de verilmiştir:

- Maden: Doğal hammaddeler kil, kalker ve başkaları gibi maden sahasında çıkarıldıktan sonra kırılarak çimento fabrikasına gönderilir. Doğrultucu hammaddeler boksit, demir madeni ve kum gibi hammaddeler ve günümüzde sanayi artığı olarak gelen alternatif hammaddeler ile birlikte doğal hammaddeler ile birleştirilerek ön homojenisasyonu sağlanır.
- Hammadde hazırlama: kuru ve yarı kuru sistemlerde ön homojenisasyon sonrasında hammaddeler kurutularak devamlı kontrol edilen bileşimde hammadde değirmenine beslenir ve farin adı verilen ara ürün elde edilir. Yaş ve yarı yaş sistemlerde hammaddelere yeteri kadar su eklenerek çamur haline getirilir. Uygulanan teknolojiye göre yarı kuru proseste çok az su ilavesi ile bilye büyüklüğünde farin pelletleri hazırlanır veya yarı yaş proseste çamurdan daha fazla su ihtiva eden farin kekleri hazırlamak amacı ile pres filtreler kullanılır. Sonuç olarak hazırlanan farin, çamur, yada bunların derişimleri silolar veya depolama tanklarında çeşitli yöntemler ile homojenize edilerek döner fırın sistemine girmeden eş dağılmış bir kimyasal bileşim elde edilir.
- Yakıt hazırlama: Türk ve Avrupa çimento sanayi tarafından ağırlıklı olarak fosil yakıtlar arasında kömür, linyit ve petro kok tercih edilmektedir. Doğal gaz yüksek maliyeti nedeni ile zorunlu haller dışında kullanılmamaktadır.

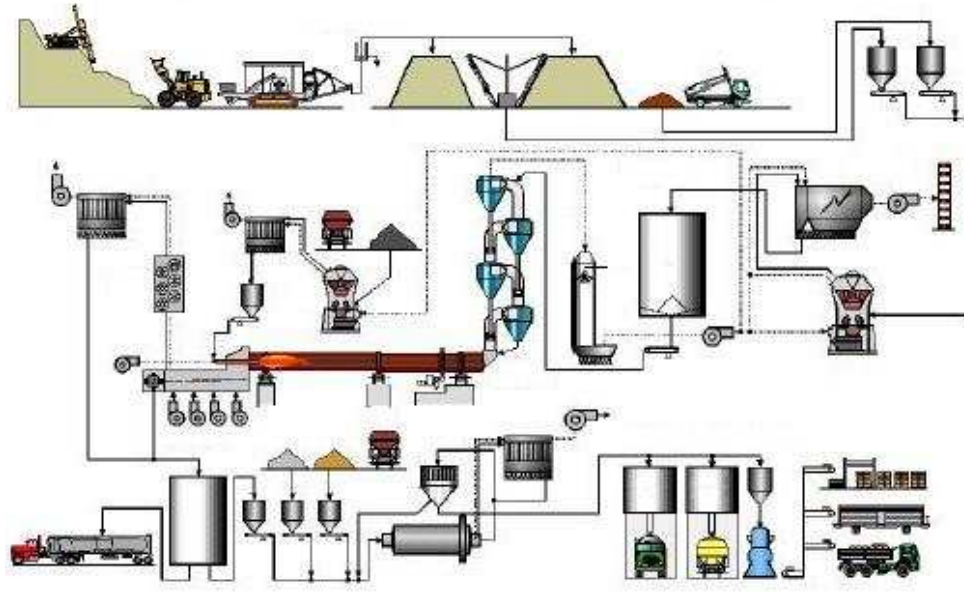
Endüstriyel atıklar; yağ, lastik, boya ve başkaları gibi alternatif yakıtlar olarak değerlendirilmektedir. Kömürün döner fırın için hazırlaması amacı ile kurutma ve öğütme, kömür değirmenlerinde gerçekleştirilmektedir. Tüm yakıtların homojenisasyonu amacı ile çeşitli silolar ve depolar bulunmaktadır.

- Klinker üretimi: hazırlanan farin döner fırın sistemine beslenerek sırası ile ısıtma proseslere adımları; kurutma/ön ısıtma, kalsinasyon (kalsiyum karbonatların karbon dioksit ve serbest kireç oluşumu) ve sinterleşme (klinkerleşme) daha sonrasında hava ile 100 ila 200 °C ye kadar soğutma işlemlerini içerir
- Katkı hazırlama: klinkerin yanında istenen çeşitli özellikler için çimentoya ilave edilecek alçı, döner fırın cürufu gibi katkıların kurutularak ve homojenize edilerek hazırlanmasıdır.
- Çimento öğütme: portland çimentosu, klinker ile alçının birlikte öğütülmesi ile üretilir. Bunun yanında kompozit çimentolar çeşitli yüksek fırın cürufu ve termik santral külü gibi katkılar ile birlikte öğütülerek elde edilir
- Çimento sevkiyatı: elde edilen çimento pazarın ihtiyacına göre paketlenerek yahut kütle halinde kullanım alanlarına sevk edilir.



Şekil 3.1. Proses/ Alt proses tanımları ve sistem sınırları.

Şekil 3.2.'de çimento üretiminde kuru proses kullanılan bir üretim hattı görülmektedir



Şekil 3.2. Kuru proses akış şeması.

3.2. Klinker Oluşumu

Farinden klinkere uzanan proses içerisinde mevcut ön ısıtıcı siklonlar, ön kalsinatörler, döner fırın ve klinker soğutucuları aşağıdaki başlıklarda anlatılmıştır.

Klinkerin en önemli bileşenleri C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF 'in oluşum sıcaklıkları yaklaşık 1300 ve 1550 °C civarındadır. Ancak bu sıcaklığa erişmeden önce suyun buharlaşması, kalsiyum ve magnezyum karbonatlarının ayrışması için ısıya ihtiyaç vardır. Bu reaksiyonlarının oluşum sıcaklıkları sırası ile:

100 °C	Serbest suyun buharlaşması	ısı alan
500 °C ve üstü	Kil içerisindeki mineral suyun açığa çıkması	ısı alan
900 °C ve üstü	Amorf dehidrasyon ürünlerinin kristalleşmesi	ısı veren
900 °C ve üstü	Kalsiyum karbonatlardan karbon dioksit çıkışı	ısı alan
900-1200 °C	Kil ve kireç arasındaki reaksiyon	ısı veren
1250-1280 °C	Sıvı faz oluşumu başlangıcı	ısı alan
1280 °C üstü	Sıvı fazı oluşumu ve klinkerleşme	ısı veren

Klinker üretiminde bu ısıl değişimler mineralin tipine, katkı miktarına, kristal yapı tiplerine, farin tane büyüklüğüne, farin besleme yoğunluğuna, farinin ısıl iletkenliğine birinci derece bağlıdır. Buharlaşmayı takiben en önemli reaksiyon olan kalsinasyon reaksiyonları devreye girer.



Bu reaksiyonlardan toplam içerisinde kütlece fazlalığından dolayı en büyük ağırlığa sahip olan kalsiyum karbonatların parçalanmasıdır. Magnezyum karbonatların parçalanması reaksiyonu ise daha az etkilidir. Yukarıdaki reaksiyonlar kinetik olarak beş etapta gerçekleşir.

1. Ortam ısının konveksiyon yolu ile tanecik yüzeyine aktarılması,
2. Ayırılmış olan yüzeyden reaksiyonun olduğu iç kesime doğru ısının kondüksiyon yolu ile aktarımı,
3. İletilen ısı yardımı ile CO₂ yayılımı ve CaO yeniden kristalleşmesi,
4. CaO tabakasını geçerek tanecik yüzeyine CO₂ difüzyonu,
5. CO₂ 'nin tanecik yüzeyinden ortama geçişidir.

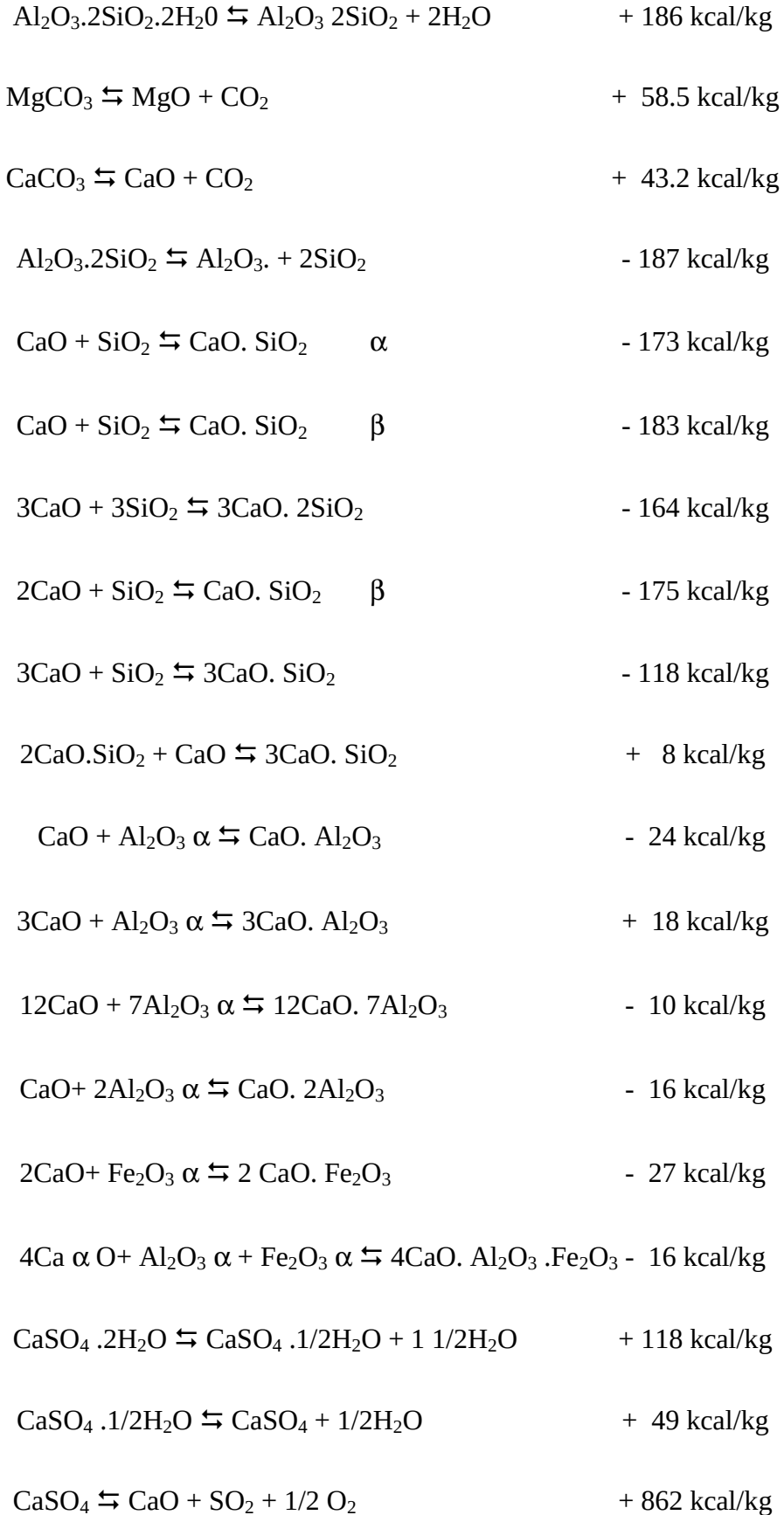
Reaksiyonun toplam hızı etapların toplam hızına bağlı olup, etapların hızları tanecik yoğunluğuna, büyüklüğüne, ayrışma entalpisine, ısıl iletkenliğe, ortam ve yüzey sıcaklık farkına ve CO₂ kısmi basıncına (yakıttan kaynaklanan CO₂ de dikkate alınarak) bağlı olarak değişmektedir.

Buharlaşma ve CO₂ ayrışımı sonrasında fırın içerisinde sıvı faz oluşumu ve katıların reaksiyonları başlamaktadır.

Klinkerin oluşumu için gerekli ısının hesaplanabilmesi için çeşitli bağıntılar geliştirilmiştir. Lea (1971) göre en çok kullanılan Zur Strassen bağıntısı Eşitlik 3.1.'de verilmiştir.

$$Q = 4.11 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 6.48 \text{ MgO} + 7.646 \text{ CaO} - 5.116 \text{ SiO}_2 - 0.59 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad \text{Eşitlik 3-1.}$$

Sırası ile klinker oluşum reaksiyonları ve reaksiyon ısıları:



3.3. Çimento Prosesinde Temel Yanma Karakteristikleri

Klinker oluşumunda sinterleşme reaksiyonlarının gerçekleşmesi için 1450 °C ye varan malzeme sıcaklıklarının elde edilmesi gerekmektedir. Yanma sırasında oluşturulan alev ile 2000 °C seviyelerinde sıcaklık sağlanmaktadır. Fırın boyutuna bağlı olarak yanma gazları 1200 °C nin üzerinde 5 – 10 saniye kalmaktadır.

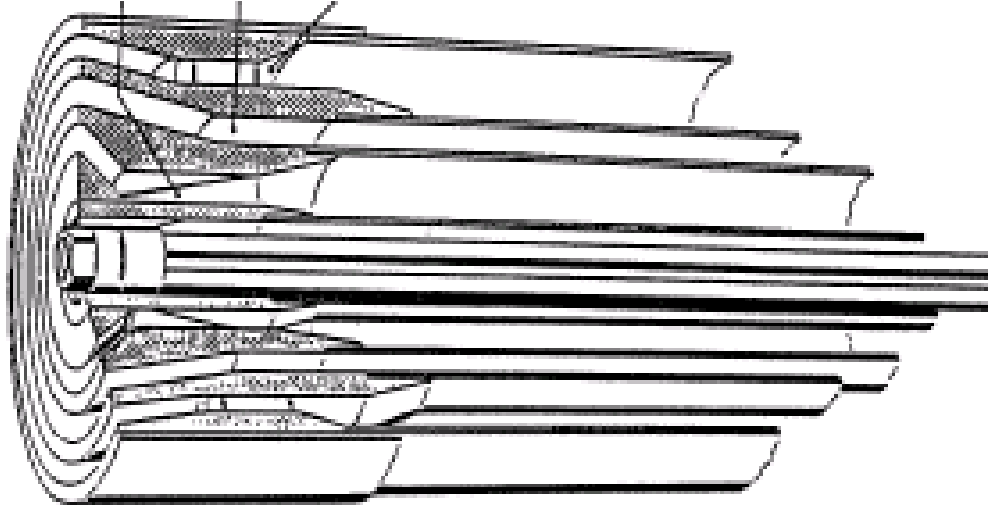
Çimento sektöründe değişik yakıtlar kullanılabilmektedir, bunlar kullanılma oranları cinsinden kömür ve petrokok, fuel oil, doğal gaz ve son olarak alternatif yakıtlar olarak sıralanır.

Tipik yanma havasında oksijen fazlalığı % 2 seviyesindedir. İhtiyaç duyulan fazla oksijen kalsinasyon koşullarının sağlanması için gerekli olup klinker fazlarının oluşmasında ve dolayısı ile klinker kalitesinde etkili olur.

Prosesle yakıtın beslenmesi için uygun noktalar:

1. Ana yakıcı yardımı ile döner fırın çıkışından,
2. Lastik gibi balya halindeki yakıtlar beslenerek intikal bölgesinden,
3. Yakıcılar yardımı ile intikalden,
4. Yakıcılar yardımı ile prekadan,
5. Lastik gibi balya halindeki yakıtlar beslenerek prekadan,
6. Lastik gibi balya halindeki yakıtlar beslenerek döner fırın ortasından şeklinde çeşitli uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır.

Ana yakıcının alevinin, sinter oluşumunu sağlaması ve diğer proses koşullarının optimumda tutulabilmesi için ayarlanması ve limitler dahilinde tutulması gereklidir. Bu nedenle sekonder hava yanında toplam yanma havasının % 10'nu mertebesinde kömürün taşınması için gereken havada dahil olmak üzere primer hava kullanılır. Şekil 3.3.'de örnek bir ana yakıcı kesiti ve Çizelge 3.1.' de fırın içindeki yanma parametreleri görülmektedir.

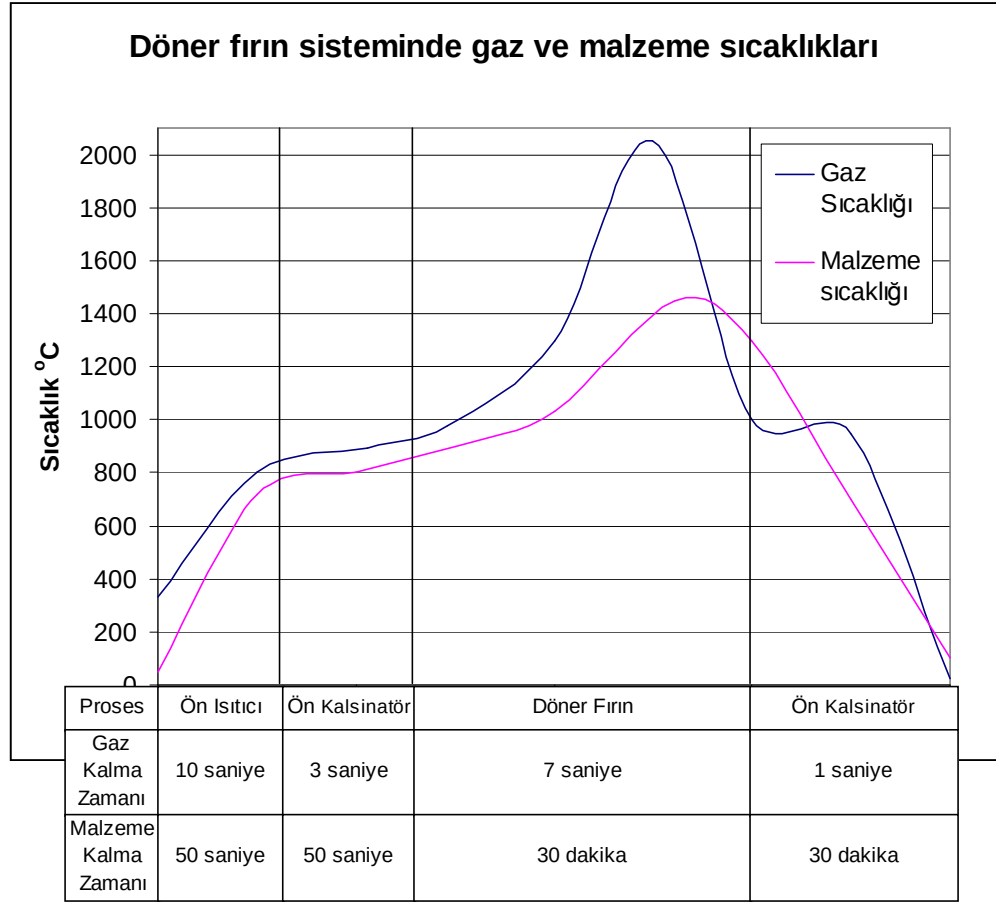


Şekil 3.3. Ana yakıcı kesiti.

Çizelge 3.1. Çimento döner fırınında yanma şartları.

	Çimento döner fırını
Yanma Sıcaklığı	1800 – 2000 °C
Yanma Gazlarının Kalma Süresi	5 – 10 saniye > 1200 °C
Fazla Oksijen	% 2 – 3

Ön kalsinatör yakıcısındaki yanma şartları tamamı ile dizayn koşullarına bağlıdır. Tipik olarak gaz sıcaklıkları 1100 °C civarında olup kalma süresi 3 saniye civarındadır. Döner fırın sistemi içerisinde hareket eden yanma gazları ve malzemelere ait sıcaklık seviyelerinin değişimi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Fırın sistemi boyunca gaz ve malzeme sıcaklıkları.

3.4. Klinker Prosesindeki Ana Ekipmanlar

Klinker oluşum prosesi, öğütülerek hazırlanmış hammadde (farin) silolardan beslenerek başlayan, 3.3 nolu maddede anlatılan kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği ve sonuçta ısısı alınmış olarak silolara beslenen klinkerin eldesi biter. Bu prosesin belli başlı ekipmanları sırası ile ön ısıtıcı ve ön kalsinasyon siklonları, döner fırın ve soğutucudur. Her bir ekipmana ait genel özellikler ve gerçekleşen proses adımları sırası ile aşağıda verilmiştir.

3.4.1 Döner Fırınlr

Döner fırın sistemi olarak da adlandırılan ekipmanlarda kurutma, ön ısıtma, ön kalsinasyon ve sinterleme prosesleri gerçekleşir. Bu ekipmanların gelişimi kısaca aşağıda verilmiştir.

- Uzun döner fırınlar: bu tip fırınlar kuru homojenizasyon imkanlarının olmadığı şartlarda uygulanan sistemlerdir. Farin çeşitli şekillerde (yaş, yarı yaş veya kuru) ve fırına direkt olarak beslenir. Siklon kulesi kullanılmamaktadır. Tüm proses fırın içerisinde gerçekleşir. Sistem yüksek spesifik enerji tüketimi ve işletme zorlukları gösterir. Uzunluk / Çap oranları (U/Ç) 38 civarında olup en büyüğü 7.5 metre çapında ve 230 metre boyundadır. Çeşitli tipleri için değişik performans değerleri Çizelge 3.2. de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Tiplerine göre çeşitli uzun fırınların karakteristik özellikleri.

Fırın tipleri	Enerji tüketimi		Bağıl Maliyetler (%)	
	Isıl kcal/kg kli	Elektrik kWh/t kli	Kuruluş	İşletme
Zincirli yaş proses	1450	8	80	205
Zincirli kuru proses	1150	7	80	160

- Lepollü döner fırınlar: Yarı kuru yada yarı yaş sistemler için kullanılır ve ön ısıtmanın gerçekleştiği hareketli kamaraya sahiptir. Elde edilen kek (yaş sistem) veya farin bilyaları bu kamara içerisine beslenir. Buradan ön ısıtma sonrası döner fırına gönderilir. Bu tip fırınların U/Ç oranı 11 ile 16 arasında değişmektedir. Genel performans değerleri Çizelge 3.3.'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Lepollü döner fırınların karakteristik özellikleri.

Fırın tipleri	Enerji tüketimi		Bağıl Maliyetler (%)	
	Isıl kcal/kg kli	Elektrik kWh/t kli	Kuruluş	İşletme
Lepollü	950	7	100	110

- Ön ısıtıcılı döner fırınlar: Bu sistemde fırın yanma gazlarının ısısından faydalanılarak ($T_0 = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $h_0 = 300\text{ kcal/Nm}^3$) farinin ısıtılması ile birlikte nemin buharlaşması takiben kalsinasyonun bir kısmının gerçekleştirilmesi sağlanır. Teorik olarak ısı transferi fırından çıkan gazlar ile intikal adı verilen hat boyunca yukarı doğru ilerlerken gravitasyonel kuvvet etkisi ile ters akım

oluşturan malzeme arasında gerçekleşmesi avantajlı gözükmetedir. Ancak farin ve gaz dağılımı düzenlemesinin zorluğu, performansı beklenenden uzaklaştırmaktadır. İntikal dizaynının sağladığı konstruksiyon kolaylığı ve çevrim elementlerine en alt seviyede üst limitlerde faydaları vardır. Günümüzdeki modern tesislerde de siklon kulesinin en alt seviyesinde intikal kullanılmaktadır. Akışın daha rahat düzenlenmesi amacı ile ilk olarak iki kademeli siklon sistemi yerleştirilmiştir. Çeşitli tipleri için değişik performans değerleri Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Ön ısıtıcılı döner fırınların karakteristik özellikleri.

Fırın tipleri	Enerji tüketimi		Bağlı Maliyetler (%)	
	Isıl kcal/kg kli	Elektrik kWh/t kli	Kuruluş	İşletme
İntikal hattı ilaveli	920	7	115	125
İki kademeli siklon	900	8	100	135

- Dört kademeli ön ısıtıcılı siklonlu döner fırınlar: bu tür fırınlarda dört kademeli siklon siklon sistemi kullanılmakta olup modern 5 kademeli siklon kulesi ile basınç düşümü değerleri aynıdır. Fırın girişinde malzeme % 30 mertebesinde kalsinasyonu tamamlamış durumdadır. Dolaşım elementleri kloride, Kükürt ve alkalilerin yüksek oranda beslenmesi hat içerisinde tıkanma ve klinker kalitesinin bozulmasına yol açsa da bu durum kısmen malzeme ve enerji kaybına yol açan bypass hattı ile ortadan kaldırılmıştır. Değişik uygulamalarda fırın çapları 3.5 ile 6 metre arasında değişmektedir. U/Ç oranları ise 13 ila 16 arasında uygulanmaktadır. Mekanik olarak basit olmasından dolayı en çok uygulanan sistemlerdir. Genel performans değerleri Çizelge 3.5.'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Dört kademeli ön ısıtıcılı siklonlu döner fırınların karakteristik özellikleri.

Fırın tipleri	Enerji tüketimi		Bağlı Maliyetler (%)	
	Isıl kcal/kg kli	Elektrik kWh/t kli	Kuruluş	İşletme
4 kademe ön ısıtıcı	790	6.5	115	110

- Dört ila altı kademeli ön kalsinatörlü (preka) ve ön ısıtıcı ısıtıcılı siklonlu döner fırınlar: yeni çimento tesislerinde beş siklonlu ve ön kalsinatörlü döner

fırınlr standart olarak uygulanmaktadır. Ön kalsinatör sayesinde malzeme döner fırına % 95 mertebelerinde kalsine olmuş halde girer. Uzunluk çap oranları 13 ile 16 arasındadır. Genel performans değerleri Çizelge 3.6.'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Dört ila Altı kademeli kalsinatörlü döner fırınların karakteristik özellikleri.

Fırın tipleri	Enerji tüketimi		Bağlı Maliyetler (%)	
	Isıl kcal/kg kli	Elektrik kWh/t kli	Kuruluş	İşletme
Ön ısıt. ve Prekalı	730	6	100	100

3.4.2 Klinker Soğutucuları

Klinker soğutucularının proste üç farklı görevi bulunmaktadır:

1. 1450 °C sıcaklıkta fırından dökülen klinkerin ısının geri kazanılması
2. klinkerin kristal yapısının düzenlenmesi
3. Sonraki ekipmanlar için klinkeri uygun sıcaklığa getirmek

Klinker soğutucular bu görevleri içerilerine fanlar yardımı ile gönderilen hava sayesinde gerçekleştirir. Klinker soğutucuların değişik tipleri aşağıda açıklanmaktadır:

- Döner tip klinker Soğutucular: Tüp soğutucular, Döner fırına benzeyen ancak ısı transferini dışa doğru sağlayan bir tüp şeklindedir. Yakıt yanma havası soğutma havası miktarının belirlenmesini sağlar. Planet soğutucular, döner fırının etrafında bağlı 9 ila 11 arasında tüpten oluşmaktadır. Her tüp fırın döndükçe sıra ile klinker ile dolmaktadır. Ancak bu tip soğutucularda preka yanma havası (tersiyer hava) için çıkış almak imkansızdır. İşletilmeleri zor ve sorunludur.
- Izgaralı tip klinker soğutucular: Bu tip soğutucular, bir ızgara üzerinde havanın içine nüfus edebileceği klinker yatağının ızgara altından gönderilen basınçlı hava tarafından oluşturulması dolayısı, ile gravitasyonel kuvvetler ile basınç kuvvetlerinin dengesi ile çalışır. Bu tip soğutucularda, tersiyer hava

eldesi mümkündür, ancak kullanılmayan ve 250 °C civarında soğutma bacası gazları verimi azaltmaktadır. Bu gazlar hammadde kömür kurutma amaçlı olarak çeşitli fabrikalarda kullanılmaya çalışılmaktadır. Üç değişik tip ızgaralı soğutucu mevcuttur.

1. Döner tip ızgaralı soğutucular mekanik problemler ve kötü ısı geri kazanımı özelliklerinden dolayı kullanımı terk edilmiştir.
 2. Konvensiyonel tip ızgaralı soğutucular, plaka şeklindeki ızgaraları sabit öteleme hareketi ile klinkeri nakleder. Birden fazla ızgara üzerinde farklı basınç kamaraları ve iki soğutma alanı oluşturulur. Bunlar sırası ile sekonder ve tersiyer havanın elde edildiği ısı geri kazanım ve son soğutma alanıdır. Bu tür soğutucuların problemleri sırası ile yatağın ayrılması, yatağın dağılımının bozulması, ince taneli klinkerin akışkanlaşması vb.
 3. Modern tip ızgaralı soğutucular, dizaynlarında yapılan değişiklikler ile bir çok problem ortadan kaldırılmıştır bu sayede daha küçük bir alanda optimum ısı transferi ve hava kullanımı sağlanmıştır. Bu kilit dizayn değişiklikleri üreticilere de bağlı olmakla birlikte sırası ile; yüksek basınç düşümü, filtre özelliği, cebri plaka havalandırması, havalandırma seviyesi ayarlanması için bağımsız bölgeler, uygun giriş geometrisi, az fakat geniş ızgaralar, döner kırıcı ve ısı örtüleri olarak sıralanabilir.
- Dikey soğutucular: Düşen klinkerin tüpler içerisinde geçen havayı ısıtması prensibi ile çalışan sistemlerdir. Genellikle kısa ve yetersiz soğutmaya sahip ızgaralı soğutucuları takiben uygulanırlar.

4. ÖLÇME VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Çimento prosesinin performans değerlerinin belirlenmesinde en önemli adımlardan biri doğru ve güvenilir ölçme değerlerine sahip olmaktır. Bu bölümde çimento prosesinde çeşitli parametrelerin tayini için kullanılan ölçme ve analiz yöntemlerinden bahsedilmiştir.

4.1. Basınç Ölçüm Aletleri Ve Teknikleri

Çimento prosesinde bir çok kanalda ve ekipman içerisinde malzeme ve gazlar birlikte taşınmaktadır. Proseste meydana gelen değişimleri değerlendirilmesi amacı ile basınç değişimlerinin ölçülmesi ve kaydedilmesi sürekli yapılmaktadır.

Fabrikada gerçekleştirilen ölçme çalışmaları sırasında endüstriyel tip basınç transdusarları kullanılmıştır. Bu tip cihazlar taşınma kolaylığı, güvenilirliği ve ucuzluğu gibi açılardan birçok avantaj sağlamaktadır.

Gerilim okuyuculu transdusarda içerde bulunan bir diyaframın üzerine meydana gelen basınç değişimi nedeniyle gerildiğinde okuyucular belli bir elektrik akımı oluşturur. Bu akımın voltaj değeri basınçla orantılıdır.

Piezoelektrik kristaller bilhassa dinamik basınçların ölçülmesinde oldukça başarılı sistemlerdir. Bir piezoelektrik kristaline uygulanan basınç değiştiğinde bu değişimle orantılı bir elektrik gerilimi oluşur.

4.2. Sıcaklık Ölçüm Aletleri Ve Teknikleri

Çimento prosesinin özelliği gereği sıcaklıkların ölçülmesi prosesin durumu hakkında bir çok değerlendirmenin yapılması sağlar. Sıcaklık ölçümleri için kullanılan başlıca metotlar şunlardır

1. Cam içinde sıvılı ve gazlı termometreler
2. Bimetalik termometreler

3. Elektrik dirençli termometreler
4. Termal çiftler
5. Radyasyon termometreleri

Bu çalışma boyunca çeşitli avantajlarından dolayı termal çiftlerden faydalanılmıştır. sıcaklık ölçümleri için el tipi veya laboratuvar tipi çeşitli ölçüm ve kontrol cihazları geliştirilmiştir. Bu cihazların çoğunda ya sabit sıcaklık referans noktaları bulunur, ya da termistor tipi bir resistance termometresiyle ortam sıcaklığını ölçüp referans sıcaklığı olarak kullanılır . Ancak önemli bir nokta da bu tip el cihazlarının içine girilen voltaj-sıcaklık eğrileri genelde belli bir sıcaklık bölgesi içindir. Bunun dışında ölçüm yapılacak olursa bu cihazlardan yanlış sonuçlar elde edilebilir.

Bunun yanında yayılan elektromanyetik radyasyon kullanılarak ölçüm yapılan termal kameralar da kullanılmıştır. Eğer belli bir yüzeyden bütün dalga boyu spektrumunda gelen radyasyon enerjisini ölçebilirsek, yüzeyin emisivite değerine göre yüzeyin sıcaklığını hesaplayabiliriz. Yüzeye gelen enerji miktarının ölçülmesi yüzeye gelen fotonlara duyarlı ve gelen fotonların çarpmasıyla elektrik enerjisi üreten yarıiletken hücreler yardımıyla yapılır. Infrared bölgesinde ölçüm yapan hücreler soğutulularak enerji ölçme kapasiteleri artırılır. Bu metodun en büyük avantajı ölçüm yapılacak yüzeye direk temas gerekliliğini ortadan kaldırmasıdır..

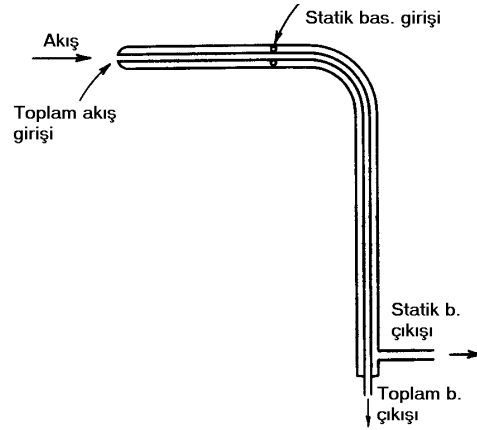
4.3. Akış ve Hız Ölçüm Aletleri ve Teknikleri

Akış ölçümlerinde kullanılan en temel metot akıştaki dinamik ve statik basınçları ölçmektir. Akan bir akışkanın aynı akış hattı üzerindeki iki noktadaki basıncı:

$$P_1 + \frac{\rho U_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho U_2^2}{2} = P_{\text{dinamik}} \quad (\text{Eşitlik 4-1.})$$

olarak gösterilebilir. Bu denklemden de görüleceği gibi akış hattı boyunca statik basınç ve hız değişebilmekte fakat dinamik basınç sabit kalmaktadır. Dinamik basınç pitot tüpü veya kiel probu denilen aygıtlarla ölçülebilir. Burada temel prensip akış yönüne dik olan ve ucu direk olarak bir basınç ölçere bağlanan ince boruların

kullanılmasıdır. Eğer aynı noktada akışa dik olarak basınç ölçülebilirse, bu da bize statik basıncı verir. Bu iki değer hızın direk olarak hesaplanmasını sağlar. Şekil 4.1.'de bir pitot-statik borusu görülmektedir.



Şekil 4.1. Pitot-statik tüp hız ölçüm sistemi

Diğer bir hız ölçüm yöntemi ise ısı (termal) anemometri yöntemidir. Isıl anemometri daha önce sıcaklık ölçümlerinde gördüğümüz bir direnç termometresi (RTD) içerir. Bu tür termometrede sıcaklık direnç ilişkisi Eşitlik 5.2.'de verilmişti. Termal anemometrede direnç termometresinden telin sıcaklığını sabit, fakat akan gaz sıcaklığının üzerinde tutacak bir akım geçirilir. Sistem ısıl dengeye geldiğinde oluşan ısı enerjisi akan gaz tarafından ısı enerjisi olarak alınıyor demektir. Bu durumda ısı transferi ve hız arasında

$$Q = I^2 R = A + B U_n \quad (\text{Eşitlik 4-2})$$

eşitliği mevcuttur. Bu eşitlikte Q ısı transferi, I telden geçen akımı A, B ve U_n telin geometrisine bağlı sabitler olup değerleri kalibrasyon metotlarıyla tespit edilebilir

Yukarda verilen hız ölçüm metotlarıyla belirli bir akıştaki hız değişimlerini belirleyebiliriz. Eğer gayemiz sadece bir borudan akan ortalama hızları veya debileri belirlemekse daha değişik yöntemler de kullanılabilir. Boru içi akışlarda ortalama hızlar için Bernoulli denklemi yazılabilir.

$$P_1 / (rg) + U_1 / (2g) = P_2 / (rg) + U_2 / (2g) + hL_{1-2} \quad (\text{Eşitlik 4-3})$$

Eşitlikteki hL_{1-2} sürtünmelerden doğan basınç kayıplarıdır. İki nokta arasında potansiyel farkı olmadığı kabul edilmiştir. Ayrıca boru içine herhangi bir çap değiştirici sistem koyarsak akış bu sistemi geçerken hala aynı değeri korur fakat hız ve basınç değişir.

$$Q = U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (\text{Eşitlik 4-4})$$

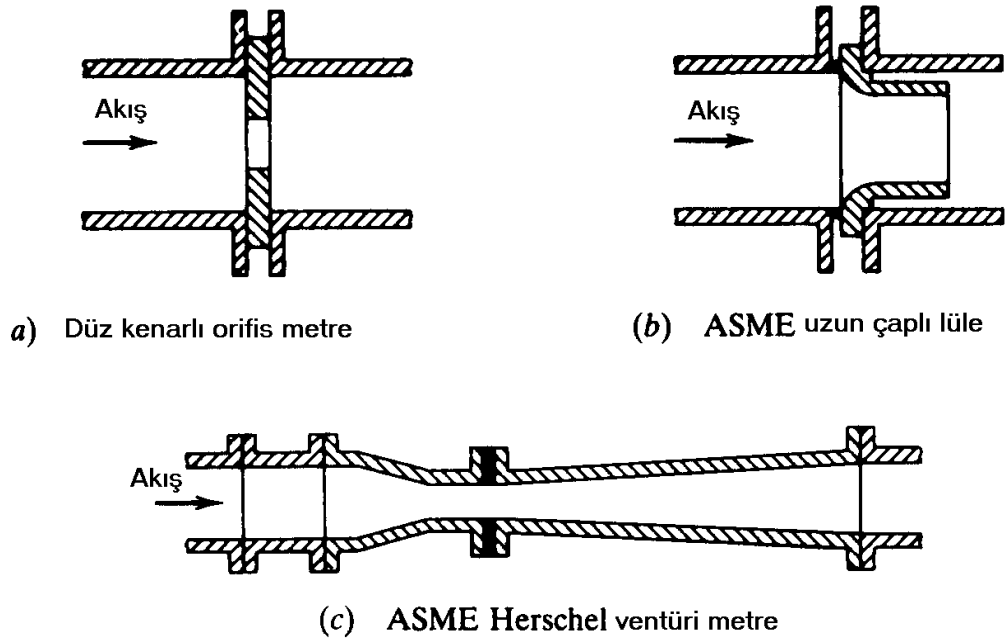
Q hacimsel debi adını alır.

Bu iki denklem bir arada çözülürse

$$Q = K_0 A_1 [2(P_2 - P_1) / r]^{1/2} \quad (\text{Eşitlik 4-5})$$

Buradaki A_1 boru çapı, K_0 kayıp katsayısıdır.

Çap değiştirici sistemlere örnek olarak orifis metreler, venturi metreler ve uzun çaplı lüleler verilebilir. Şekil 4.2’de bu aygıtlar gösterilmiştir.



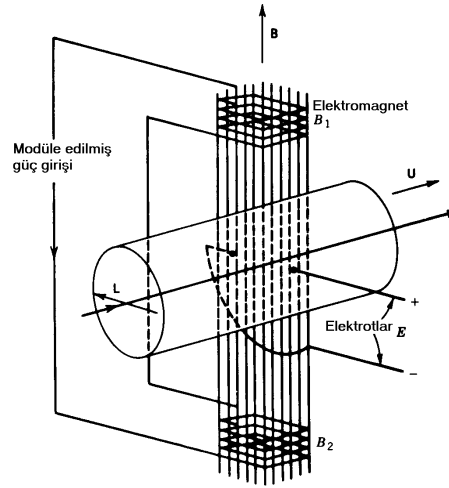
Şekil 4.2. Kısıtlandırılmış boru ölçüm sistemleri.

Çimento prosesinde az da olsa çeşitli kapalı hatlarda sıvıların debileri ölçülmesi ihtiyacı vardır. Bu işlemler için elektromanyetik akış ölçüm sistemleri sayesinde akışa direk olarak ulaşmadan akışın miktarı belirlenmiştir. Ölçümün temel prensibi manyetik alan içinde akan bir akışkanın manyetik alan kuvveti ve hızla orantılı bir akım oluşturmaktır. B manyetik alanından U hızıyla L boyu boyunca akan bir sıvı

$$E=U*B*L \quad (\text{Eşitlik 4-6})$$

voltajını oluşturur. Bu voltaj ölçülerek hız bulunabilir.

Şekil 4.3.'te bu tür bir akış ölçerin çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 4.3. Elektromanyetik debi ölçerlerin çalışma prensibi.

Rotametreler de basit ve ucuz akış ölçüm sistemleridir. Temel olarak konik bir boru içine yerleştirilmiş genelde konik yapıya sahip bir elemandan oluşur. Akışkan sistemin altından girerek yukarıya doğru akar ve içindeki hareketli konik parçayı yukarıya doğru iter. Dış boru çapı değişken olduğundan yüzer parça borunun belli bir noktasında akışın uyguladığı kuvvetle denge haline gelir ve durur. Yüzer parçanın durduğu nokta bize akış oranını verir.

Türbin tipi akış ölçerlerde boru içine döner kanatlı bir türbin yerleştirilir. Türbinin dönme hızı direk olarak akış oranıyla bağıntılıdır. Bu hız çeşitli metotlarla saptanarak akış hızı bulunabilir.

4.4. Gaz ve Toz Bileşimlerinin Mobil Cihazlar İle Belirlenmesi

Çimento prosesinde bulunan bir çok gaz ve toz kanallarında oluşan yanma ve kalsinasyon reaksiyonları sonucu değişim gösteren gaz kompozisyonları ölçülerek yanma ve kalsinasyon reaksiyonları hakkında fikir edilebilir. Ayrıca bu sonuçlar kullanılarak çeşitli kanallarda dış ortamda sızan hava miktarının hesaplanması sağlanır. Bunun yanında kanal içerisindeki taşınan toz konsantrasyonun ölçülmesi ile sistemin içerisinde hareket eden kütle ve enerji miktarları ortaya çıkarılır.

4.4.1 Gaz Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Baca gazı içerisinde bulunan oksijen, karbon monoksit, azot oksitler ve kükürt oksitler gibi kirletici bileşenlerin hatasız bir şekilde ölçümünün yapılabilmesi için en önemli şart iyi bir örnekleme yapabilmektir. İyi bir örneklemenin temel şartı dış ortamdan herhangi bir safsızlığın alınan örneğe karışmamasıdır. Bu sızdırmaz bir örnekleme hattı ile sağlanabilir.

Örnekleme tekniklerini; sürekli örnekleme ve kesikli örnekleme olmak üzere ikiye ayırabilir.

Sürekli örnekleme yönteminde, baca hattının uygun bir noktasından alınan gaz örneği analiz sistemine sürekli olarak verilir. Bu yöntemde baca içerisine yerleştirilen bir gaz alma sondasına ve alınan gazı analiz cihazına uygun analiz koşullarında (basınç, sıcaklık, nem ve toz) verebilecek bir şartlandırma sistemine ihtiyaç vardır. Çimento fabrikalarının bir çoğunda bu tür sistemler prosesin belirli noktalarında sabit olarak çalışmaktadır.

Kesikli örneklemede gaz numunesi, havası önceden boşaltılmış gaz numune alma kaplarına alınarak analizi sonradan yapılır. Alınan gaz örneklerinin güneş ışığı ve sıcaktan uzak tutularak kısa zamanda analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Gaz analizleri için örnek alınırken dikkat edilmesi gereken kurallar:

- Örnekleme sistemine hava girişi veya sistemden dışarıya gaz kaçağı olmamalıdır.
- Bacadan alınan numune ile numune alma sistemi arasında herhangi bir kimyasal reaksiyonun olmaması gerekir. Bu nedenle numune alma sistemi için kullanılan malzemeler dikkatli seçilmelidir.
- Örnekleme hattı mümkün olduğu kadar kısa tutulmalıdır.
- Baca gazlarındaki toz ve kurum gibi partiküller uygun filtreler kullanılarak temizlenmiş bir şekilde analiz cihazlarına verilmelidir.
- Baca gazı soğutması sırasında bazı kirleticilerin yoğunlaşarak gazdan ayrılabilmesi unutulmamalı ve numune alımında sıcaklık kontrol edilmelidir.

Bacadan alınan gaz örneklerinin analizleri için çok çeşitli yöntemler vardır;

- Orsat yöntemi: Her bir bileşen için seçimli olan absorbanlar kullanılarak gaz bileşenlerinin analizine dayanır.
- Elektrokimyasal yöntem: Gaz bileşenlerinin elektro kimyasal reaksiyonlarının sonucu oluşan elektronların oluşturduğu potansiyel farklarının elektronik göstergelere aktarılarak analizi prensibine dayanır.
- Kızılötesi (NDIR) yöntemi: Gaz bileşenlerinin kızıl ötesi radyasyon ortamından belli bir hızla geçirilir. Bileşen konsantrasyonlarına karşılık gelen absorpsiyondan kaynaklanan enerji kaybı referans ortamla karşılaştırılarak analiz edilir.
- Morötesi (NDIV) yöntemi: Kızıl ötesi yönteminden tek farkı morötesi frekansta çalışmasıdır.
- Bazı gazların manyetik özelliklerinden yararlanılarak da analizinin yapılması mümkündür.

4.4.2 Toz Konsantrasyonlarının Belirlenmesi

Toz konsantrasyonlarının belirlenmesi yöntemi filtre üzerine toplanan tozların tartılması esasına dayanır. Tartımı daha önce alınmış filtre ve uygun nozul örnek alma sistemine bağlanarak bacada örnekleme işlemi başlatılır. Örnek alım işlemi sonunda filtre kurutularak tartılır ve tartım farkından toz konsantrasyonu örnekleme sırasında çekilen toplam baca gazı hacmine oranlanarak hesaplanır. Kesit içerisindeki

farklı noktalarda ölçülen gaz hızı ve baca kesit alanı kullanılarak bacadan geçen toplam gaz debisi hesaplanabilir. Bulunan baca gazı debisi ve toz konsantrasyonu kullanılarak toz kütleli debisi hesaplanır.

Baca gazında toz konsantrasyonlarının belirlenmesi sırasında dikkat edilmesi gereken kurallar:

- Bacalarda bulunan dirsek, fan ve benzeri engeller baca gazının akışını bozacağından bu gibi etkilerin minimuma indirilebileceği uzaklıkta ölçüm noktalarının belirlenmesi gerekir.
- Örnek alma probunun ağzı gaz akış yönüne paralel ve ters yönde olmalıdır.
- Örnek alma probu baca gazı akışının rejimini bozmamalıdır.
- Gazların örnek alma borusuna giriş hızı ile bacadaki akış hızı eşdeğer olmalıdır (izokinetik örnekleme).
- Alınan örneğin baca gazını temsil edebilmesi için baca kesiti içinden yeterli sayıda örnekleme yapılmalıdır. Baca alanına göre ölçüm noktası sayısı ve ölçüm noktaları uzaklıkları Environmental Protection Agency (1996) metotlarında verilmiştir.
- Örnek alma borusuna bağlanan partiküllerin tutulduğu filtre kısmında yoğunlaşmanın önlenmesi gerekir.
- Örnekleme sırasındaki toplam çekilen gaz hacmi bilinmelidir.
- Partikül tutucu filtrenin veriminin yüksek olması gerekir.

Örnek alınmadan önce kesit içinde hız profilinin tespit edilmesi gerekir. Bunun için belirlenen örnek alma noktalarında gaz hızları ölçülür. Bu hıza ve örnekleme sisteminin örnek alma kapasitesine bağlı olarak kullanılacak örnek alma nozulunun çapı belirlenir. Toplam örnek alma süresi örnek alma sayısına bölünerek her noktada bekleme süresi belirlenir. Tartımı daha önce alınmış filtre ve uygun nozul örnek alma sistemine bağlanarak bacada örnekleme işlemi başlatılır. Örnek alım işlemi sonunda filtre kurutularak tartılır ve tartım farkından toz konsantrasyonu örnekleme sırasında çekilen toplam baca gazı hacmine oranlanarak hesaplanır. Kesit içerisindeki farklı noktalarda ölçülen gaz hızı ve baca kesit alanı kullanılarak bacadan geçen toplam gaz debisi hesaplanabilir. Bulunan baca gazı debisi ve toz konsantrasyonu kullanılarak toz kütleli debisi hesaplanır.

4.4.3 Bu Çalışmada Kullanılan Cihazlar

Çimento fabrikasında yapılan ölçme çalışmaları esnasında aşağıdaki marka ve model cihazlar kullanılmıştır. Cihazların kalibrasyonları üretici firmaların sağladığı doküman ve metotlar ile yapılmıştır. Bunun yanında bilhassa gaz konsantrasyonu ölçümlerinde kanallardaki toz konsantrasyonunun yüksek olması nedeni ile basınç düşümü az olan özel bir filtre ve ilave vakum pompası kullanılarak örnekleme sağlanmıştır.

4.4.3.1 Gaz Analiz Cihazı

Bacada gaz analizleri için Testo 350 baca gazı analiz cihazı kullanılmıştır. Cihaz elektrokimyasal ölçüm yöntemine dayanarak gaz bileşenlerini analiz etmektedir. Cihaz portatif olup, bir prop vasıtasıyla baca gazı örneğini cihaz içerisindeki bir pompa ile emerek sensörler üzerinden geçirir. Analizini yaptığı gazın konsantrasyonlarını ekrandan izlemek ve analiz sonuçlarını harici bir yazıcıdan yazdırmak mümkündür. Cihazın ölçtüğü gaz bileşenleri ve ölçüm aralığı Çizelge 4.1. verilmiştir.

Çizelge 4.1. Gaz bileşenleri ve ölçüm aralığı.

Gaz bileşeni	Ölçüm aralığı	Birim
Oksijen	0-21	%
Karbon monoksit	0-10000	ppm
Azot oksitler	0-3000	ppm
Kükürt dioksit	0-5000	ppm

Cihaz ölçtüğü gaz konsantrasyonlarını, sıcaklıkları kullanarak yanma verimini, baca gazındaki karbondioksit konsantrasyonunu ve hava fazlalık katsayısını hesaplayabilmektedir.

4.4.3.2 Bacada Gaz Hızı Ölçüm Cihazı

Bacada gaz hızı ölçümleri Testo 400 marka hız ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hız ölçüm düzeneği pitot tüpü, basınç sensörü ve dijital göstergeden oluşmaktadır. Pitot tüpünün iki ucu arasındaki basınç farkı okunarak

elde edilen basınç farkının hıza karşılık gelen değeri dijital göstergeden okunabilmektedir.

4.4.3.3 Bacada Toz Ölçüm Cihazı

İtalyan Zambelli firmasının üretimi olan Zambelli 6000 marka bacada toz örnekleme cihazı bacada toz konsantrasyonunun belirlenmesi için kullanılmıştır. Cihaz bacadaki hızı ölçerek aynı anda izokinetik olarak baca gazından numune almaktadır. Bu sayede bacada meydana gelen anlık hız ve sıcaklık değişimlerinden gelecek hatalar minimize edilmiş olmaktadır. Cihazın probu pitot tüpü, ısı çift ve numune toplama nozulundan oluşmaktadır. Ara bağlantı hortumları kullanılarak ölçülen sıcaklık ve basınç farkı cihaza iletilmektedir. Cihaz, baca gazını, basınç farkına dayanarak hesapladığı hız ile aynı hızda filtre kağıdı bağlanmış toz toplama ünitesinden geçirmektedir. Filtre üzerinde toplanan toz miktarı tartılarak tartım farkından bacadaki toz konsantrasyonu hesaplanmaktadır. Cihaza baca boyutları girilerek baca kesiti üzerindeki toplam debi ve deney süresince toplanan gaz hacmi cihaz tarafından üzerine bağlı yazıcı ile yazdırılabilmektedir.

4.5. Malzeme, Nem, Isıl Değer Ve Bileşim Tayin Yöntemleri

Bir sistemin ısı açıdan incelenmesi esnasında sisteme giren malzemelerin bileşimi, içerdiği nem ve ısı değer gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bilgilerin elde edilmesi amacı ile yürütülen analiz ve belirleme çalışmaları çimento fabrikalarında mevcut laboratuvar imkanları ile elde edilmiştir.

Nem tayini çalışmaları ilgili ASTM D 3302 - 91 (Ek - 1) standartının belirlediği metot ile sırası ile tartım sonrasında etüv içerisinde 2 saat kurutma ve son olarak tartım ile aradaki farkın elde edilmesi yolu ile yapılmıştır. Nem tayini petrokok, linyit ve farin için uygulanmıştır.

Isıl değer tayini, petrokok, linyit ve farin içerisindeki yanıcı maddenin belirlenmesi amacı ile ilgili ASTM D 1989 – 92a (Ek – 2) standartının belirttiği kalori bombası metodu ile yapılmıştır.

Yanma denkleğinin oluşturulması amacı ile gereken kömüre ait elementer analiz ilgili ASTM 5373 - 93 (EK – 3) standartının belirttiği metot ile yapılmıştır.

4.5.1.1 Çimentoda Bileşim Tayin Yöntemleri

Lea'ye (1971) göre   imento için uygulanan bileşim tayin prosedürleri birçok standart ve analitik yöntemin bir araya gelmesinden oluşmuştur. Metotlar ve yöntemler, araştırmalar ve teknolojiler ile yenilenmekte ve basitleşmektedir. Rutin titrimetrik yöntemler kabul görmüş ve temel bileşenlerin belirlenmesi için kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin pek çoğu EDTA (diaminoethane tetra acetate – disodium tuzu) ajanı kullanılması esasına dayanır. Bu ajan birçok metal iyonu ile erimiş oktahedral bileşenler oluşturma özelliğine sahiptir. Seçiciliği pH kontrolü ile sağlanan ajanın uygun analitik ayrıştırma ve ajanlar kullanılarak bozucu safsızlıklar uzak tutulur. Spektrofotometrik metotlar, içerikteki TiO_2 , Mn_2O_3 ve P_2O_5 gibi minör elementlerin, kısa ve hızlı olarak SiO_2 'in sarı silikomolibdat yada molibdenyum maviye indirgenmesi ile belirlenmesinde çokça kullanılmaktadır. Alüminyum ve demir de spektrofotometri ile tayin edilebilir. Alev fotometrisi alkalilerin belirlenmesi için kullanılan bir tahmin metodudur. Ayrıca daha hassas bir alev spektrofotometri ile strontiyum ve magnezyum hatta mangan da tayin edilebilir.

Atomik absorpsiyon spektrofotometre teknikleri ile daha hassas olarak   imento içerisinde mevcut elementleri büyük bir oranda belirlenmesi mümkündür. Bu teknikte bir   imento çözeltisi alev içerisinde atomize edilir ve lamba tarafından absorbe edilen enerji ile her bir element sırası ile belirlenir. Çok az kimyasal ayrıştırma gereklidir. Bu şekilde Si, Al, Fe, Ti, Mn, Ca, Mg, Sr, Na, K, ve Li elementleri belirlenir.

Birçok yeni ve hızlı yöntem ile SO_3 tahmini yapılmakta ve genelde titrimetrik yada türbidimetrik metotlar uygulanmaktadır.

Karbon dioksit için genelde klasik yöntemler uygulanmaktadır. Florin için ya buhar ile distilasyon yada pirohidroliz yöntemleri ile ayrıştırma ve sonrasında titrimetrik veya renk ile tanımlama yöntemleri ile belirlenir.

Spektrografik analizler çimento içerisinde az miktarda bulunan bileşenler içinde uygulanır, ancak bu teknik yüksek orandaki bileşenlerin belirlenmesinde % 4 daha iyi hassasiyet ile sonuç verir.

X-ışınımı flüoresans (XrF) spektroskop yöntemi çimento sektöründe hem hızlı, hem de güvenilirliğinin yüksek olması sebebi ile üretimin yönlendirilmesinde kullanılır. Bu teknikte numune, birincil yüksek enerji X-ışınımı ışını ile radyasyona maruz bırakılır ve çıkan ikincil (flüoresans) X ışınimleri izlenir. Her element kendi karakteristik X ışınımı spektrumuna sahiptir ve bu şekilde istenen her element tayin edilebilir. Birincil ışınım cihazları toplayıcı sensörler ile birleştirilerek prosesin çeşitli noktalarında hammaddenin ve ürünlerin izlenmesinde kullanılan sistemler üretilir.

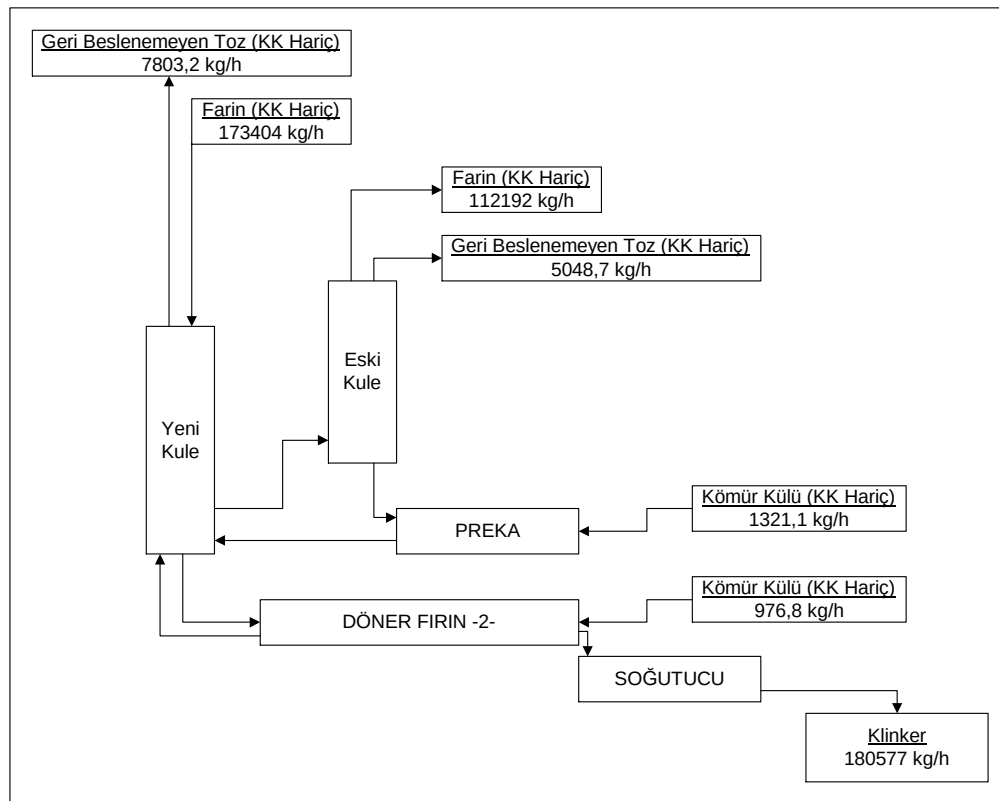
Bunun ötesinde malzemenin kristal ve bağ yapıları hakkında yapılan analiz bulguları ile proseste meydana gelen sorunların nedenleri ortaya çıkarılmaktadır. Bu sayede klinker üretim prosesinin dar alanda optimize edilmiş koşullarda çalıştırılması sağlanmaktadır. Bu amaç için kullanılan teknik X ışınımının difraksiyonu (XrD) metodu olarak bilinmektedir. Tek bir dalga boyuna sahip monokromatik ışınım kullanılır. X ışınımı elektron akımını hedef üzerinde yarattığı etki ile oluşturulur ve karakteristik X ışınımı spektrumu oluşturulur. Spektrum bir çeşit filtre grubu tarafından seçilerek bir tek doğru haline gelir. Belirli tekli bileşenler ile kalibre edilen cihazlar kullanılarak elde edilen karakteristik dalga yorumlanır. Ancak elde edilen sonuçlar bilgisayar ile yorumlansa da verilen program doğrultusunda yorumlanmaktadır. Elde edilen sonuçların hassasiyeti daha yüksek olması isteniyorsa birleşik diye adlandırılan ve bileşim içerisindeki belirleyici oksitlerin kimyasal analizler ile XrD metotlarının birlikte uygulanmasına ihtiyaç duyulabilir.

Bu çalışma sırasında farin klinker ve ara ürünlere ait analiz ve tayin çalışmalarında fabrika laboratuvarlarında bulunan XrF ve XrD cihazları kullanılmıştır.

5. ÇİMENTO DÖNER FIRIN SİSTEMİNDE

I. KANUN ANALİZİ

Tipik bir çimento fabrikasında dört adeti ESKİ (SN1, SN2, SN3 ve SN4) ve dört adeti YENİ (SN5, SN6, SN7 ve SN8) olmak üzere sekiz ön ısıtma ve kalsinasyon siklonunu ve preka yakıcısı bulunan döner fırın sisteminin ısıl enerji analizi hesapları, örnek fabrika tesislerinde 7-10 Mart 2000 tarihlerindeki dört gün süre ile fırın hattında yapılan ölçümlerden elde edilen veriler ve malzeme debileri ve analizleri (farin, klinker, kömür v.b.) ile ilgili olarak çimento fabrikasından temin edilen veriler kullanılarak yapılmıştır. Şekil 5.1.'de proses akış şeması verilmiştir.



Şekil 5.1. Fırın sisteminde giren ve çıkan kütle akıları.

Proses farin beslemeleri her iki siklon kulesinin en üst siklonlarından (SN1 ve SN5) yapılmaktadır. Siklonlardan aşağı doğru akan malzemede, fırın ve prekada oluşan yanma gazlarının taşıdığı ısı sayesinde ön ısıtma ve ön kalsinasyon süreçleri gerçekleşir. Fırına intikal eden malzeme fırının ilk metrelerinde kalsinasyonunu

tamamlayarak sinter bölgesine erişir ve bu noktadan soğutmaya dökülünceye dek içerisinde sıvı faz reaksiyonları ve kristal yapı değişimleri oluşur. Burada prekanın görevi malzemenin fırın öncesi kalsinasyon oranını arttırarak fırın içerisindeki yükleri azaltmak ve klinker üretim tonajının artmasını sağlamaktır. Soğutmaya dökülen klinker gerekli hızda soğutularak istenen yapılar elde edilir. Klinker soğutucusunda bu işlem için fanlar kullanılmaktadır. Fanların ortama gönderdiği havanın bir kısmı klinker tarafından ısıtılarak sekonder hava olarak fırın içerisine, bir kısmı tersiyer hava olarak prekada kullanılmak üzere prekaya, bir miktar ise orta kısımdan alınarak farin değirmenine kurutma amaçlı olarak ve artan kısmı ise elektro filtrede geçirilerek soğutma bacasından atmosfere salınır. Siklonları tepe noktalarından çıkan baca gazları bir miktar toz ihtiva etmekle birlikte farin değirmeninde kurutma amaçlı kullanılmak üzere bu kısma iletilirler.

5.1. Döner Fırın Sistemi Kütle Dengesi

Kütle dengesinin kurulmasında fabrikadan temin edilen farin ve kömür debisi değerlerinin ortalamaları esas alınmıştır. Ön-Isıtıcı siklonların çıkışlarında ESKİ ve YENİ kule gaz debileri ile toz derişimleri sırasıyla 127417 ve 171370 Nm³/h, 40 ve 46 g/Nm³'dür. Kütle dengesi hesaplarında soğutucudan çıkan gazın içerdiği toz miktarı ihmal edilmiştir. Klinker debisi kütle dengesi ile ilgili yapılan hesaplamalar sonucu belirlenmiştir.

$$\text{Kütle dengesi için girişler} = m_{\text{farin}} + m_{\text{yakıt}} + m_{\text{hava}} \quad (\text{Eşitlik 5-1})$$

Burada;

$$\text{Beslenen farin kütlesi: } m_{\text{farin}} = m_{\text{farin yeni kule kuru}} + m_{\text{farin eski kule kuru}} + m_{\text{farin yeni kule nem}} + m_{\text{farin eski kule nem}} \quad (\text{Eşitlik 5-2})$$

$$\text{Beslenen yakıt kütlesi: } m_{\text{yakıt}} = m_{\text{yakıt fırın}} + m_{\text{yakıt preka}} \quad (\text{Eşitlik 5-3})$$

$$\text{Beslenen hava kütlesi: } m_{\text{hava}} = m_{\text{fırın primer hava}} + m_{\text{fırın taşıyıcı hava}} + m_{\text{sızıntı havalar}} + m_{\text{preka primer hava}} + m_{\text{preka taşıyıcı hava}} + m_{\text{fan havaları}} \quad (\text{Eşitlik 5-4})$$

$$\text{Kütle dengesi için çıkışlar} = m_{\text{klinker}} + m_{\text{yakıt külü}} + m_{\text{buharlaşan nem}} + m_{\text{siklon baca gazları}} + m_{\text{soğutma baca gazı}} + m_{\text{geri dönüş toz}} + m_{\text{midair}} \quad (\text{Eşitlik 5-5})$$

Burada;

Klinker kütlesi: m_{klinker}

Yakıtın yanması sonucu yakıt külü: $m_{\text{yakıt külü}}$

Yakıtın ve farinin içerisinde bulunan nem kütlesi: $m_{\text{buharlaşan nem}}$

$$\text{Siklonlardan atılan baca gazı: } m_{\text{siklon baca gazları}} = m_{\text{fırın yanma gazları}} + m_{\text{preka yanma gazları}} + m_{\text{yeni siklon kalsinasyon gazları}} + m_{\text{eski siklon kalsinasyon gazları}} + m_{\text{sızıntı havalar}} \quad (\text{Eşitlik 5-6})$$

Soğutma bacasından atılan gaz: $m_{\text{soğutma baca gazı}}$

SN1 ve SN5 siklonlarından baca gazı ile birlikte atılan farin: $m_{\text{geri dönüş toz}}$

Soğutma orta kamaradan alınan sıcak hava: m_{midair}

Fırın sisteminde kütle dengesi kurulurken, yakıttan gelen kül ve toz şeklindeki kayıplar (geri beslenemeyen toz) dikkate alınmaktadır. Buna göre oluşturulan kütle dengesi Çizelge 5.1. ve Şekil 5.2.'deki şematik diyagramda gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Kütle dengesi hesap çizelgesi.

Klinker debisi (Fabrika verisi): 180577.3 kg/h

KÖMÜR:

Analiz	Kül:	11.3 %(ob [*])	2.9 %(ob) Nem
Debi	Yaş:	20246.5 kg/h	112.1 kg/t kli.
	Kuru:	19662.8 kg/h	108.9 kg/t kli.
	Kül:	2740.0 kg/h	15.2 kg/t kli.

FARİN:

Analiz	Nem:	1.37 % (ob)	0.2 % Kristal su
	CO ₂ Karbonat:	31.78 %	35.8 % KK
Debi	Yaş:	285597.0 kg/h	1581.6 kg/t kli.
	% 0.0 KK için	183692.1 kg/h	1017.2 kg/t kli.
	CO ₂ Karbonat:	55110.4 kg/h	305.2 kg/t kli.

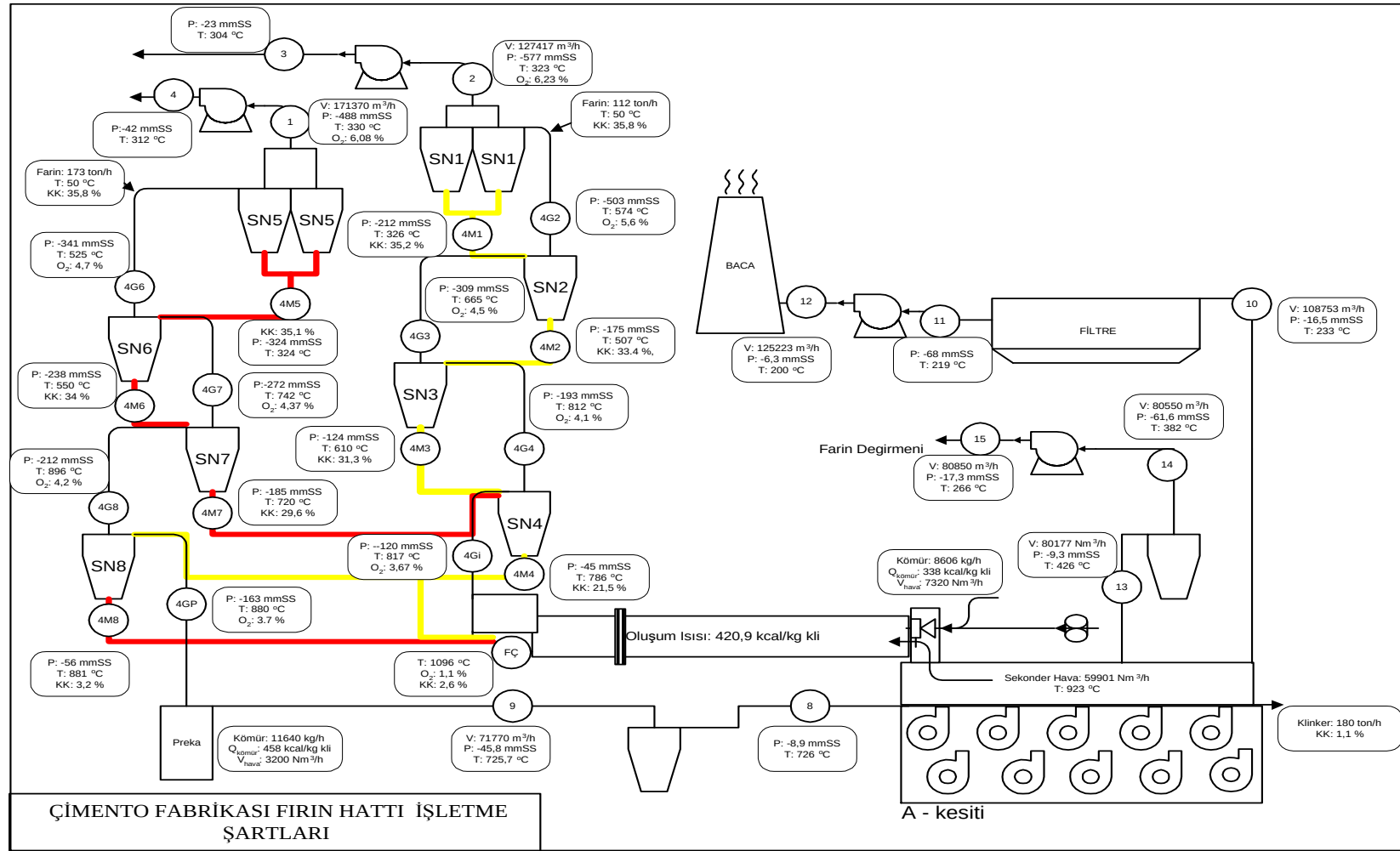
TOZ:

Analiz	Nem:	0.00 % (ob)	0.2 % Kristal su
	CO ₂ Karbonat:	38.0 %	38.1 % KK
Debi	Yaş:	12851.9 kg/h	71.2 kg/t kli.
	% 0.0 KK için:	7967.1 kg/h	44.1 kg/t kli.
	CO ₂ Karbonat:	4880.2 kg/h	27.0 kg/t kli.

Hesaplanan klinker debisi: 178465.0 kg/h

FARK=(Fabrika-Hesap)/Fabrika	% 1.17
-------------------------------------	---------------

* :orijinal baz



Şekil 5.2. Proses akış şeması ve kütle dengesi.

5.2. Ön Isıtıcı Siklonlarda Sızıntı Ve Kalsinasyon Gazları

Siklonlardaki sızıntı hava ve kalsinasyon gazlarının hesaplanmasında; ön ısıtıcı kule çıkış gazı debisi, her bir siklonda, intikalde ve fırın çıkışında ölçülen oksijen konsantrasyonu, farin ve geri beslenemeyen toz debisi, farinin ve siklonları terk eden malzemenin kızdırma kaybı (KK) değerleri esas alınmıştır. Ölçümler ve yapılan hesaplamaların sonuçları Çizelge 5.2. ve Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

Bu çizelgelerde görüleceği üzere, oksijen konsantrasyonu ortalama olarak fırın çıkışında % 1.1 iken ESKİ kule çıkışında % 6.23'dir. ESKİ kule çıkışında ölçülen gaz debisi ise $127417 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Böylece, her bir siklon kademesi için sızıntı hava miktarları ayrı ayrı hesaplanmıştır. ESKİ kulede toplam olarak $32611 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'e eşit olan sızıntı hava, özellikle İNTİKAL ($9881 \text{ Nm}^3/\text{h}$) ve SN2 ($8419 \text{ Nm}^3/\text{h}$) siklonlarında yüksektir.

Benzer şekilde, YENİ kule çıkışında ölçülen gaz debisi $171370 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Ortalama oksijen konsantrasyonu Ön-Kalsinatör (Preka) çıkışında % 3.73 iken, YENİ kule çıkışında % 6.08'dir. Her bir siklon kademesi için hesaplanan sızıntı hava miktarının toplamı $25502 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'e eşittir. YENİ kuledeki toplam sızıntı hava miktarı nispeten düşük olmakla birlikte, özellikle SN5 ($14189 \text{ Nm}^3/\text{h}$) siklonunda belirgin bir fazlalık vardır.

İntikalden fırına girişte ve preka çıkışında numune alınamadığı için buradaki malzemelerin KK değerleri belirlenememiştir. İntikal ve preka için yapılan kütle dengesi hesapları ve Çizelge 5.4.'de verilen sıcaklık seviyeleri dikkate alınarak, malzemenin KK değerlerinin preka çıkışında % 8.5. intikal çıkışında ise % 3.2 olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 5.5.'de üretilen klinker için toplam kalsinasyonun fırın grubundaki elemanlara göre yüzde dağılımları verilmiştir. Bu çizelgede de görüleceği gibi toplam kalsinasyonun % 36.2'si ESKİ kulede, % 25.9'u YENİ kulede, % 33.1'i prekada ve % 1.1'i intikalde olmak üzere, malzeme fırına % 96.4 oranında kalsinasyona uğramış olarak girmektedir. Geriye kalan % 3.6'lük kalsinasyon fırında olmaktadır.

Fırın ve preka çıkışı gaz debileri hesabında kule çıkışı gaz debileri, her bir elemenda kalsinasyon sonucu açığa çıkan gaz miktarı ve sızıntı hava debileri dikkate alınmıştır. Buna göre elde edilen değerler fırın çıkışı için 73980 Nm³/h, preka çıkışı için ise 132040 Nm³/h olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.2. ESKİ Kuledeki kalsinasyon gazlarının ve her bir siklondaki sızıntı havanın hesaplanan değerleri.

Kademe	KK	Kütle (kg/h)	Kütle Kaybı (kg/h)	Mol Küt. (kg/kmol)	V _{kal} (Nm ³ /h)	O ₂ (%)	V _{gaz} (Nm ³ /h)	V _{sız} (Nm ³ /h)
Farin	0.358	112192						
SN1	0.352	106102	1041	18.91	1234	6.23	127417	5118
SN2	0.344	104761	1341	34.68	866	5.67	121066	8419
SN3	0.313	100132	4629	38.84	2670	4.50	111780	3299
SN4	0.216	223282	27930	40.71	15368	4.10	105812	5894
İNTİKAL	0.026	179749	1161	37.73	689	3.67	84550	9881
Fırın	0.001	176227	3522	35.95	2194	1.10	73980	
TOPLAM			39624		23021			32611

Çizelge 5.3. YENİ Kuledeki kalsinasyon gazlarının ve her bir siklondaki sızıntı havanın hesaplanan değerleri

Kademe	KK	Kütle (kg/h)	Küt. Kaybı (kg/h)	Mol Küt. (kg/kmol)	V _{kal} (Nm ³ /h)	O ₂ (%)	V _{gaz} (Nm ³ /h)	V _{sız} (Nm ³ /h)
Farin	0.358	173405						
SN5	0.351	163903	1698	19.64	1936	6.08	171370	14189
SN6	0.340	161170	2734	43.78	1399	4.70	155244	3498
SN7	0.296	151079	10090	43.79	5162	4.37	150347	2826
SN8	0.032	180909	10429	43.82	5331	4.20	142359	4989
PREKA	0.085	191339	31943	43.79	16341	3.73	132040	
TOPLAM			56894		30169			25502

Çizelge 5.4. Fırın sisteminin çeşitli noktalarındaki basınç, sıcaklık, KK ve O₂ değerleri.

ESKİ SİKLONLAR						
	MALZEME ÇIKIŞ			GAZ ÇIKIŞ		
Nokta	Ps(mmSS)	T (°C)	Ort. KK	Ps(mmSS)	T (°C)	O₂ (%)
Farin		50	35.81			-
SN1	-212.47	326	35.18	-577.76	323	6.23
SN2	-178.50	507	34.35	-503.98	574	5.67
SN3	-124.44	610	31.32	-309.77	665	4.50
SN4	-45.70	786	21.59	-193.80	812	4.10
İntikal			2.60	-120.77	817	3.67
Fırın			0.10		1096	1.10
YENİ SİKLONLAR						
	MALZEME ÇIKIŞ			GAZ ÇIKIŞ		
Nokta	Ps(mmSS)	T (°C)	Ort. KK	Ps(mmSS)	T (°C)	O₂ (%)
Farin		50	35.81			
SN5	-324.36	324	35.15	-488.48	330	6.08
SN6	-238.88	550	34.05	-341.19	525	4.70
SN7	-185.64	720	29.64	-272.44	742	4.37
SN8	-56.61	881	3.23	-212.47	896	4.20
Preka			8.50	-163.40	880	3.73

Çizelge 5.5. Fırın grubundaki elemanlarda oluşan kalsinasyonun yüzde değerleri.

	SN1	SN2	SN3	SN4	Toplam
ESKİ Kule (%)	1.1	1.4	4.8	28.9	36.2
	SN5	SN6	SN7	SN8	
YENİ Kule (%)	1.8	2.8	10.5	10.8	25.9
Preka (%)					33.1
İntikal (%)					1.2
Fırın (%)					3.6
Toplam (%)					100.0

5.3. Yanma Ve Yanma Gazı Hesapları

Fırın veya preka çıkışındaki gaz dengesi için fırın veya preka içerisinde yanma ve kalsinasyon sonucu açığa çıkan gaz miktarlarına' soğutucudaki gaz dengesi için ise toplam yakma havası miktarına gerek duyulmaktadır.

Yakma havası miktarının belirlenmesinde yakıtın elementel analizi değerlerinin ve debisinin bilinmesi gerekmektedir. Bu değerler, fırın ve prekada tüketilen kömür debisine bağlı olarak sırasıyla Çizelge 5.6. ve Çizelge 5.7.'de verilmiştir. Bu çizelgelerde ayrıca, temel yanma eşitliklerine göre hesaplanmış olan fırın ve preka çıkışındaki yanma ürünleri de verilmiştir.

Fırın için belirlenen yanma ürünlerine göre gerekli stokiyometrik yakma havasının miktarı $70024 \text{ Nm}^3/\text{h}$, fazla hava oranı ise % 6.06'dır. Buna göre, fırında kullanılan toplam yakma havası $73980 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Aynı şekilde, prekada için gerekli olan stokiyometrik yakma havasının miktarı $108078 \text{ Nm}^3/\text{h}$, fazla hava oranı ise % 27.15'dir. Bu durumda prekadaki toplam yakma havası $132040 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir.

Fırın sistemini terk eden gazın duyulur ısı kaybını belirleyebilmek için, gazın özgül ısısının bilinmesi gerekmektedir. Özgül ısısının doğru bir şekilde tayin edilebilmesi, ancak gazın bileşiminin bilinmesi ile mümkündür. Bu amaçla, siklonlardaki gaz bileşimleri teorik olarak hesaplanmış ve bulunan değerler ESKİ ve YENİ kuleleri için sırasıyla Çizelge 5.8. ve Çizelge 5.9.'da verilmiştir.

ESKİ ve YENİ kule için sırasıyla Çizelge 5.8. ve Çizelge 5.9. kolon 9'da görüleceği üzere, SN1 siklon çıkışları için teorik olarak hesaplanmış olan gaz debileri 127417 ve $171370 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Bu değerler, ölçüm değerleri ortalaması olan 133163 ve $154510 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ile son derece uyumludur. Yine Çizelge 5.8. ve Çizelge 5.9. kolon 6'da verilen oksijen değerlerinin, Çizelge 5.4.'te verilmiş olan ölçüm değerleri ile çakıştığı görülmektedir. Bu değerler, ilerideki bölümlerde verilecek olan fırın sistemi genel enerji dengesi hesaplamalarında kullanılmıştır.

Çizelge 5.6. Fırın çıkışındaki baca gazının hesaplanan değerleri.

Yakıt			Yanma ürünleri (Nm ³ /h)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Yakıt analizi	%(ob)	Stok. O ₂	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	O ₂	CO	CO ₂ (Kalsinasyon.)	CO ₂ (Hava)	Diğer
C	73.20	11759.9	11759.9	0.0	43828.9	522.0	1028.9	0.0	0.0		16.84	5.61
H	3.80	1831.5	0.0	0.0	6825.8	81.3	3823.2	0.0	0.0		2.62	0.87
N	2.02	0.0	0.0	0.0	139.1	0.0	0.0	0.0	0.0		0.00	0.00
S	2.01	121.1	0.0	121.1	451.3	5.4	10.6	0.0	0.0		0.17	0.06
O	4.74	-285.6	0.0	0.0	-1064.3	-12.7	-25.0	0.0	0.0		-0.41	-0.14
Kül	11.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.00	0.00
Nem	2.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	308.8	0.0	0.0		0.00	0.00
TOPLAM	100.00	13426.9	11759.9	121.1	50180.9	596.0	5146.5	0.0	0.0	2194.3	19.23	6.41
Hava Fazlalığından					3032.9	36.1	71.2	813.8			1.17	0.39
Gaz kompozisyonu %(ob):			15.90	0.16	71.93	0.85	7.05	1.10	0.00	2.97	0.03	0.01

Toplam stokiyometrik baca gazı (Nm³/h) (ob): **70024**
 Teorik Yakma Havası(ob): **65265**
 Fazla hava (Nm³/h): **3956**
 Fırın çıkışında gaz debisi (Nm³/h) (ob): **73980**
Hava Fazlalığı: % 6.06

Hava Bileşimi	%(db)	%(ob)
N ₂	78.08	76.67
O ₂	20.95	20.57
CO ₂	0.03	0.03
Ar	0.93	0.91
Nem	0.00	1.8
Diğer	0.01	0.01
	100.00	100.00

Çizelge 5.7. Preka çıkışındaki baca gazının hesaplanan değerleri.

Yakıt Yanma ürünleri (Nm ³ /h)												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Yakıt analizi	%(ob)	Stok. O ₂	CO ₂	SO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	O ₂	CO	CO ₂ (Kal.)	CO ₂ (Hava)	Diğer
C	73.20	15904.9	15904.9	0.0	59277.1	706.0	1391.6	0.0	0.0		22.78	7.59
H	3.80	2477.0	0.0	0.0	9231.7	110.0	5170.7	0.0	0.0		3.55	1.18
N	2.02	0.0	0.0	0.0	188.1	0.0	0.0	0.0	0.0		0.00	0.00
S	2.01	163.8	0.0	163.8	610.4	7.3	14.3	0.0	0.0		0.23	0.08
O	4.74	-386.2	0.0	0.0	-1439.4	-17.1	-33.8	0.0	0.0		-0.55	-0.18
Kül	11.35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.00	0.00
Nem	2.88	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	417.7	0.0	0.0		0.00	0.00
TOPLAM	100.00	18159.5	15904.9	163.8	67867.9	806.1	6960.5	0.0	0.0	16340.6	26.00	8.67
Hava Fazlalığından:					18372.0	218.8	431.3	4929.5			7.06	2.35
Gaz kompozisyonu %(ob):			12.05	0.12	65.31	0.78	5.60	3.73	0.00	12.38	0.03	0.01

Toplam stokiyometrik baca gazı (Nm³/h) (ob): **108078**

Teorik Yakma Havaşı(ob): **88269**

Fazla hava (Nm³/h): **23961**

Preka çıkışında gaz debisi (Nm³/h) (ob): **132040**

Hava Fazlalığı: % 27.15

Çizelge 5.8. ESKİ Ön-Isıtıcı siklonlarda gaz debileri ve oranları.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂	Ar	Diğer	VTop
SN1 (Nm ³ /h)	29942	10646	148	78218	7523	930	10	127417
Oran (%)	23.50	8.36	0.12	61.39	5.90	0.73	0.01	100.00
SN2 (Nm ³ /h)	29898	9364	148	74294	6470	883	9	121066
Oran (%)	24.70	7.73	0.12	61.37	5.34	0.73	0.01	100.00
SN3 (Nm ³ /h)	29339	8901	148	67838	4738	806	9	111780
Oran (%)	26.25	7.96	0.13	60.69	4.24	0.72	0.01	100.00
SN4 (Nm ³ /h)	27246	8291	121	65309	4059	776	8	105812
Oran (%)	25.75	7.84	0.11	61.72	3.84	0.73	0.01	100.00
Intikal	13821.14	6241.19	121.09	60789.91	2846.56	722.40	7.77	84550
Oran (%)	17.97	7.97	0.16	71.93	1.10	0.85	0.01	100.00
Fırın (Nm ³ /h)	13295	5897	121	53214	814	632	7	73980
Oran (%)	17.97	7.97	0.16	71.93	1.10	0.85	0.01	100.00

Çizelge 5.9. YENİ Ön-Isıtıcı siklonlarda gaz debileri ve oranları.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂	O ₂	Ar	Diğer	V _{Top}
SN5 (Nm ³ /h)	44002	9922	206	105793	10176	1258	14	171370
Oran (%)	25.68	5.79	0.12	61.73	5.94	0.73	0.01	100.00
SN6 (Nm ³ /h)	43875	7852	206	94914	7257	1128	12	155244
Oran (%)	28.26	5.06	0.13	61.14	4.67	0.73	0.01	100.00
SN7 (Nm ³ /h)	42561	7745	164	92232	6537	1096	12	150347
Oran (%)	28.31	5.15	0.11	61.35	4.35	0.73	0.01	100.00
SN8 (Nm ³ /h)	37441	7652	164	90065	5956	1071	12	142359
Oran (%)	26.30	5.37	0.12	63.27	4.18	0.75	0.01	100.00
Preka (Nm ³ /h)	32145	7525	164	86240	4929	1025	11	132040
Oran (%)	26.30	5.70	0.12	65.31	3.73	0.78	0.01	100.00

5.4. Yakma Havaları

Fırında kullanılan yakma havası primer hava, taşıyıcı hava, soğutucudan alınan sekonder hava ve fırın kafasındaki sızıntı havanın toplamından oluşmaktadır. Prekada kullanılan yakma havası ise soğutmadan alınan tersiyer hava, taşıyıcı hava, primer hava ve prekadaki sızıntı hava toplamından oluşmaktadır. Prekadaki söz konusu sızıntı hava miktarına tersiyer hava kanalında oluşan sızıntı hava dahildir.

Alev borusu primer hava kanalında ölçülen ortalama hava debisi (alev borusunda eksenel, merkezi ve radyal havaların toplamı) $5400 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir. Soğutmadan alınan tersiyer hava debisi $71770 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 'dir.

Taşıyıcı hava debileri ölçülememiştir. Fabrika verilerinden fırın için $2185 \text{ Nm}^3/\text{h}$, preka için ise $2370 \text{ Nm}^3/\text{h}$ olarak alınmıştır.

Fırın kafasındaki sızıntı hava debisinin belirlenmesi son derece zordur. Bu yüzden $2000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ olarak takdir edilmiştir.

Prekada kullanılan toplam yakma havasından tersiyer hava ve taşıyıcı hava debilerinin toplamı çıkartılarak belirlenen prekadaki (tersiyer hava kanalı dahil) sızıntı hava debisi aşağıda da verildiği gibi $37260 \text{ Nm}^3/\text{h}$ olarak hesaplanmıştır.

Prekada toplam yakma havası : $112230 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Tersiyer hava : $71700 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Taşıyıcı hava : $2700 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Primer hava : $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Preka sızıntı hava : $37260 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Fırında kullanılan toplam yakma havasından primer, taşıyıcı ve fırın kafası sızıntı hava debilerinin çıkartılması sonucu elde edilen sekonder hava debisi aşağıda verilmiştir.

Fırın toplam yakma havası	: 69211 Nm ³ /h
Primer hava	: 5400 Nm ³ /h
Taşıyıcı hava	: 1920 Nm ³ /h
Fırın kafası sızıntı hava	: 2000 Nm ³ /h
Sekonder hava	: 59901 Nm ³ /h

Çizelge 5.10. ve Çizelge 5.11'de sırasıyla ayrıca, fırın ve prekada kullanılan yakma havalarının sıcaklıkları, debileri (Nm³/h ve Nm³/kg klinker olarak) ve oranları verilmiştir. Bu çizelgelerde görüleceği üzere, kg klinker başına kullanılan yakma havası fırında 0.383 Nm³ prekada 0.622 Nm³ olup; toplam olarak 1.005 Nm³'e eşittir. Prekadaki bu değeri, hava fazlalığının % 10 olması ile 0.54 Nm³ değerine düşürmek mümkündür.

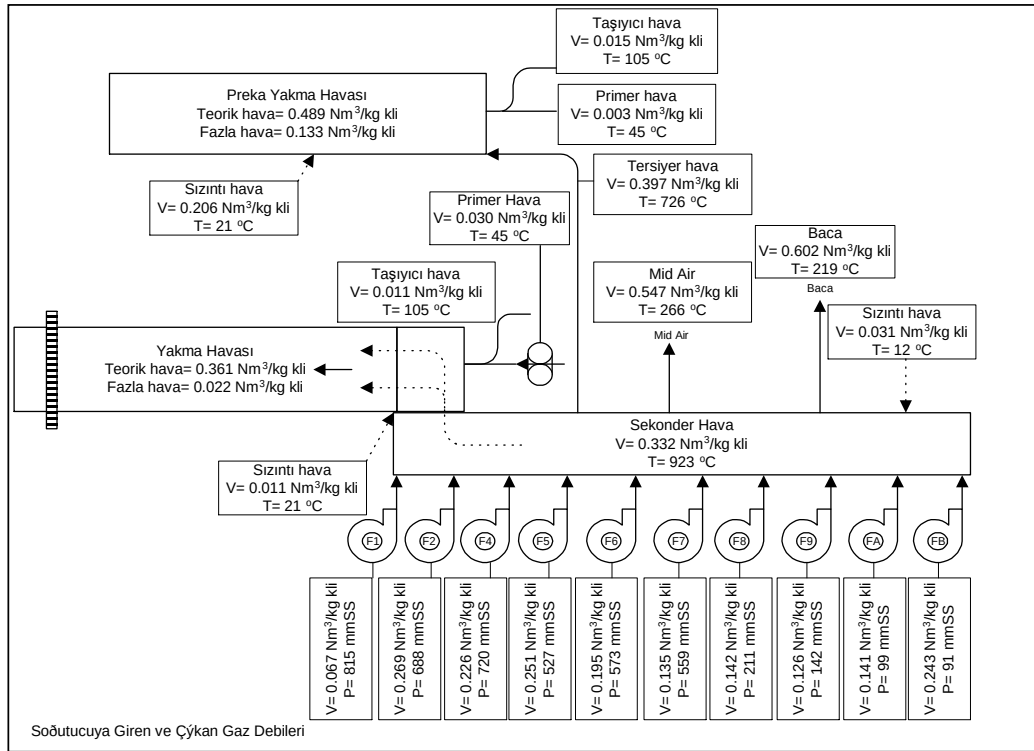
5.5. Soğutucu Gaz Dengesi Ve İşletme Şartları

Soğutucuya giren ve soğutucudan çıkan hava miktarları Şekil 5.3. ve Çizelge 5.12'de verilmiştir. Soğutucu fanlarının (FA, FB, F1. F2. F4-9) sağladığı ortalama hava debisi toplamı 333562 Nm³/h veya 1.85 Nm³/kg kli.'dir.

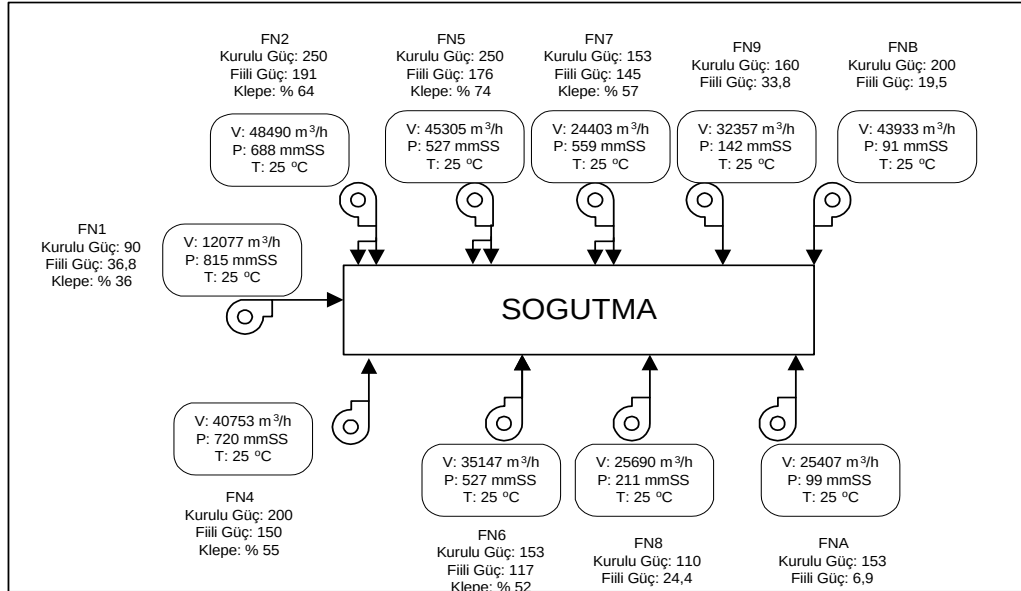
Soğutucudan çıkan hava miktarları, tersiyer hava (71770 Nm³/h), sekonder hava (59901 Nm³/h), kurutma amaçlı olarak kullanılan mid air (98763 Nm³/h) ve bacadan atılan hava (108753 Nm³/h) toplamından oluşmaktadır (toplam olarak 339187 Nm³/h veya 1.878 Nm³/kg kli.). Mid air ile kazanılan ve farin değirmeni ile tromel kurutucuda kullanılan sıcak gaz ile 55.1 kcal/kg kli. soğutucudan geri kazanılmaktadır. Bu sayede soğutucu veriminde % 16'lık bir artış sağlanmaktadır.

Soğutucu için gaz dengesi kurularak 5626 Nm³/h veya 0.031 Nm³/kg kli'lik bir sızıntı hava hesaplanmıştır.

Şekil 5.4.'de soğutucu fanlarının işletme şartları verilmiştir. Bu şekilde ayrıca, fanların kurulu ve fiili güçleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.3. Soğutucuya giren ve çıkan gaz debileri.



Şekil 5.4. Soğutucu fanlarının işletme şartları.

Çizelge 5.10. Fırında kullanılan yakma havasının debileri ve oranları.

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Debi (Nm ³ /t kli.)	%
Primer Hava	45	5400	0.030	6.26
Taşıyıcı Hava	105	1920	0.011	2.22
Sekonder Hava	916	76974	0.426	89.20
Sızıntı Hava Kafa.	25	2000	0.011	2.32
Toplam Giriş		86294	0.478	100.00
ÇIKIŞLAR				
Teorik Yakma Havası		81359	0.451	94.28
Fazla Hava		4935	0.027	5.72
Toplam Yakma Havası		86294	0.478	100.00

¹ fabrikada yapılan ölçümler ile elde edilen değerler.

Çizelge 5.11. Prekada kullanılan yakma havasının debileri ve oranları

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Debi (Nm ³ /t kli.)	%
Tersiyer Hava	726	71770	0.397	84.20
Taşıyıcı Hava	105	2700	0.015	3.17
Primer Hava	45	500	0.003	0.59
Sızıntı Hava Preka	25	10266	0.057	12.04
Toplam Giriş		85236	0.472	100.00
ÇIKIŞLAR				
Teorik Yakma Havası		66379	0.368	77.88
Fazla Hava		18857	0.104	22.12
Toplam Yakma Havası		85236	0.472	100.00

¹ fabrikada yapılan ölçümler ile elde edilen değerler.

Çizelge 5.12. Soğutucu gaz dengesi.

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Debi (Nm ³ /kg kli.)	%
FNA	25	25407	0.141	7.13
FNB	25	43933	0.243	12.33
FN1	25	12077	0.067	3.39
FN2	25	48490	0.269	13.61
FN4	25	40753	0.226	11.44
FN5	25	45305	0.251	12.72
FN6	25	35147	0.195	9.87
FN7	25	24403	0.135	6.85
FN8	25	25690	0.142	7.21
FN9	25	32357	0.179	9.08
Soğutma Sızıntı Hava	25	22699	0.126	6.37
Toplam Giriş		356261	1.973	100.00
ÇIKIŞLAR				
Sekonder hava	916	76974	0.426	21.61
Mid air	266	98763	0.547	27.72
Tersiyer hava	726	71770	0.397	20.15
Soğutucu baca	219	108753	0.602	30.53
Toplam Çıkış		356261	1.973	100.00

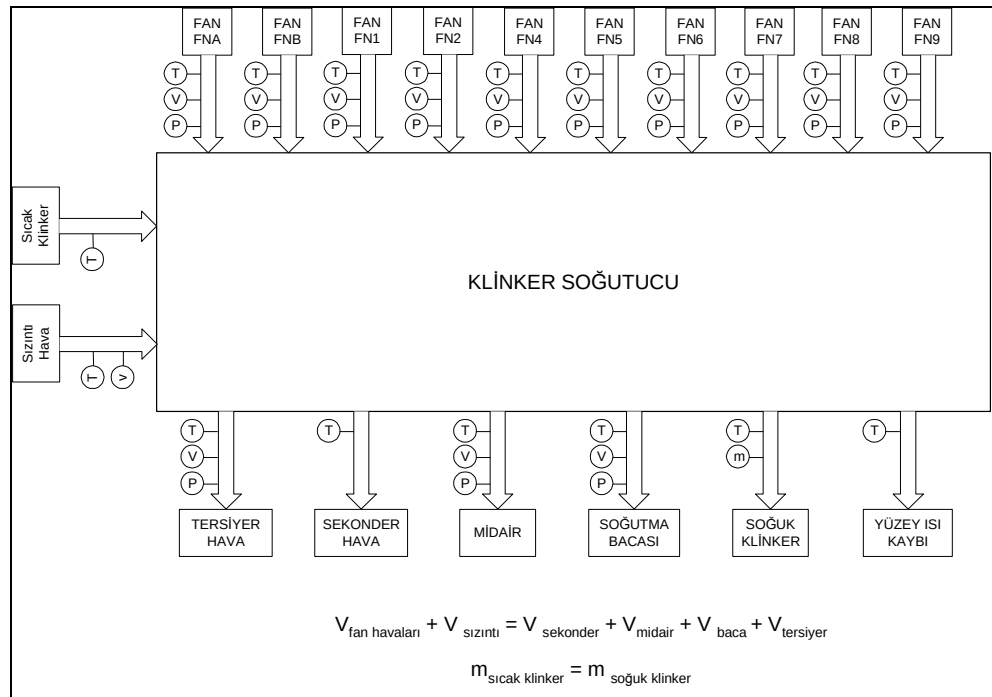
¹ fabrikada yapılan ölçümler ile elde edilen değerler.

5.6. Soğutucu Enerji Dengesi

Şekil 5.5. ile şematik olarak sistemin giriş ve çıkışlarının gösterildiği soğutucu enerji dengesi Çizelge 5.13.'te verilmiştir. Sekonder hava debisi 0.362 Nm³/kg kli'dir. Soğutucuda enerji dengesi kurularak hesaplanan sekonder hava sıcaklığı 923 °C olup; kalsinatörlü sistemler için 1000 °C'lik standart değere göre bir miktar düşüktür. Sekonder hava debisi ve elde edilen bu sıcaklığa göre, sekonder hava ile ısı geri kazanım oranı % 32.81 tersiyer hava ile ısı geri kazanım oranı ise % 31.32 olmaktadır. Toplam olarak % 64.13'ye eşit olan bu değerden geri kalan % 35.87 oranındaki ısı kaybedilmektedir. Baca gazı ile kaybolan ısıнын geri kazanılması konusu, tasarruf tedbirleri bölümünde ayrıntılı olarak irdelenmiştir.

Soğutucu bandından klinkerin çıkış sıcaklığı çok değişmektedir ve zaman zaman 180 °C'a kadar çıkmaktadır. Ani değişimler ihmal edilmiş ve ortalama bir değer olarak 140 °C alınmıştır. İdeal şartlarda, soğutucudan çıkan klinker ile ortam arasındaki sıcaklık farkının 65-70 °C'yi aşmaması tercih edilir. Buna göre, soğutmanın bir miktar daha iyileştirilebilmesi olanağı mevcuttur.

Soğutucudan çıkan ısıların paylara göre dağılımı Şekil 5.6.'da verilmiştir. Soğutucuda enerji dengesi sonucu elde edilen bu dağılıma göre, soğutucuya giren toplam enerjinin % 12.19'u bacadan, % 7.73'ü çıkan klinker ile ve % 0.90'nı yüzey kaybı olarak kaybedilmektedir.

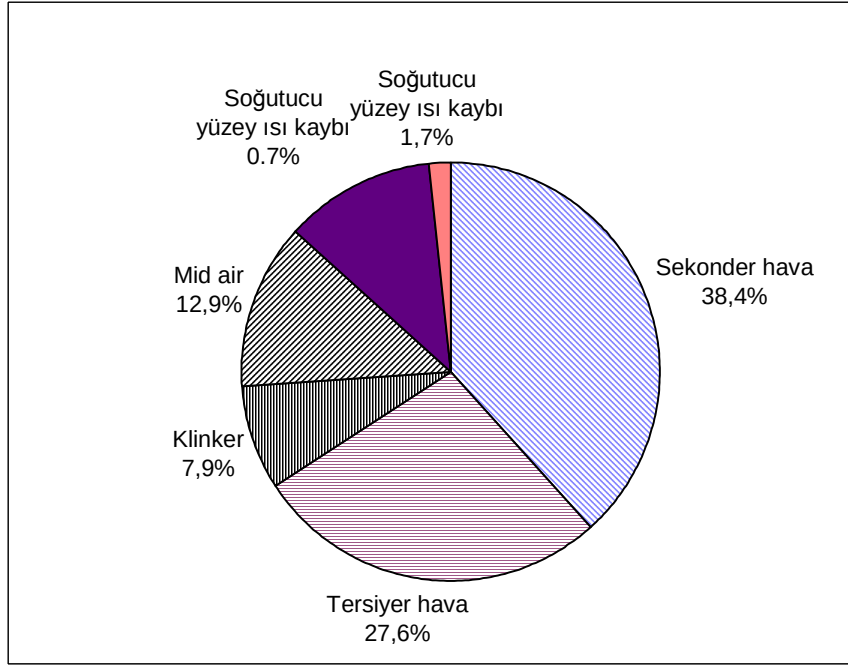


Şekil 5.5. Soğutucu giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.

Çizelge 5.13. Soğutucu enerji dengesi.

Klinker Üretimi:		180577(kg/h)			
Soğutucuya dökülen klinkerin entalpisi:	352.7(kcal/kg kli.)	% 100.00			
Sekonder hava ile ısı geri kazanımı:	141.1(kcal/kg kli.)	% 40.01			
Tersiyer hava ısı geri kazanımı:	101.6(kcal/kg kli.)	% 28.81			
Midair ile geri kazanım:	47.4(kcal/kg kli.)	% 13.44			
Toplam ısı geri kazanımı:	290.1(kcal/kg kli.)	% 82.25			
GİRİŞLER	T (C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
FNA	25	25407	0.309	1.1	0.29
FNB	25	43933	0.309	1.9	0.51
FN1	25	12077	0.309	0.5	0.14
FN2	25	48490	0.309	2.1	0.56
FN4	25	40753	0.309	1.7	0.47
FN5	25	45305	0.309	1.9	0.53
FN6	25	35147	0.309	1.5	0.41
FN7	25	24403	0.309	1.0	0.28
FN8	25	25690	0.309	1.1	0.30
FN9	25	32357	0.309	1.4	0.38
Soğutma Sızıntı Hava	25	22699	0.309	1.0	0.26
Klinker (kg/h)	1350	180577	0.261	352.7	95.86
Toplam Giriş				367.9	100.00
ÇIKIŞLAR					
Sekonder hava	916	76974	0.361	141.1	38.35
Tersiyer hava	726	71770	0.352	101.6	27.62
Klinker	140	180577	0.207	28.9	7.87
Mid air	266	98763	0.326	47.4	12.88
Baca	219	108753	0.323	42.6	11.57
Soğutucu yüzey ısı kaybı				6.3	1.71
Toplam Çıkış				367.9	100.00

¹ fabrikada yapılan ölçümler ile elde edilen değerler.



Şekil 5.6. Soğutucu enerji çıkışlarının dağılımı.

5.7. Fırın Sistemi Enerji Dengesi

Fırın sisteminde ısı performansını artırmanın en etkin yolu, fırının enerji dengesini kurarak çeşitli analizlerin yapılması ve buna göre gerekli önlemlerin alınmasıdır. Fırın sistemindeki çeşitli grupların girdi ve çıktılarına ait şematik gösterim ve bu noktalarda ölçülen parametreler Şekil 5.8.-5.12’de verilmiş olup enerji dengesi verileri Çizelge 5.15.-5.18.’de, sistemin toplam enerji dengesi verileri ise Çizelge 5.19’da verilmiştir. Özet olarak:

Klinker Üretimi : 180577 kg/h

Isı Girdileri

Fırın yakıt yanma özgül ısısı	: 338.7 kcal/kg kli
Preka yakıt yanma özgül ısısı	: 458.0 kcal/kg kli
Özgül ısı tüketimi toplamı	: 796.7 kcal/kg kli
Duyulur ısılar (toplam olarak)	: 34.4 kcal/kg kli
Farindeki yanıcı madde ısısı	: 20.2 kcal/kg kli

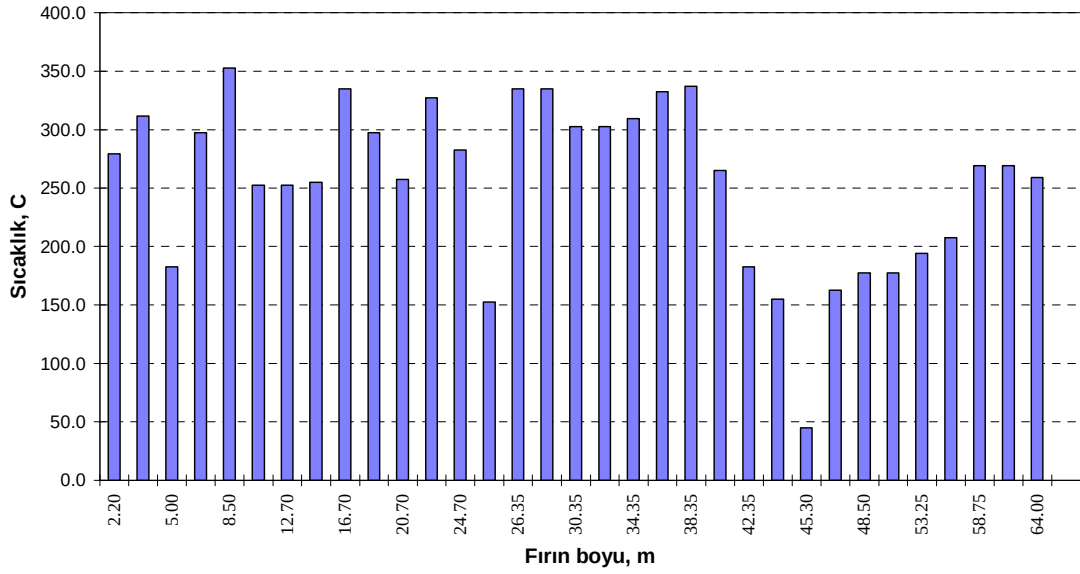
Toplam : 851.3 kcal/kg kli

Temel Isı Tüketimi ve Kayıpları

Klinkerleşme ısısı	: 420.9 kcal/kg kli
ESKİ kule eksoz gazı duyulur ısı kaybı	: 85.4 kcal/kg kli
YENİ kule eksoz gazı duyulur ısı kaybı	: 117.8 kcal/kg kli
Soğutucu eksoz gazı duyulur ısı kaybı	: 41.8 kcal/kg kli
Fırın mantosu ısı kaybı	: 28.0 kcal/kg kli
ESKİ ve YENİ kule yüzey ısı kaybı	: 54.4 kcal/kg kli
Klinker duyulur ısı kaybı	: 26.5 kcal/kg kli
Soğutucu yüzey ısı kaybı	: 3.1 kcal/kg kli
Mid Air ile geri kazanım	: 55.1 kcal/kg kli
Diğer kayıplar	: 18.3 kcal/kg kli
Toplam	: 851.3 kcal/kg kli

Eksoz gazı duyulur ısı kaybı, hesap değeri olarak ESKİ kule için 127417 Nm³/h, YENİ kule için 171370 Nm³/h gaz debileri esas alınmıştır. Ölçüm değerleri ESKİ kulede 133163 Nm³/h, YENİ kulede 155000 Nm³/h'dir. Hesap değerleri, ölçüm ortalama değerler ile uyum içerisinde.

Şekil 5.7.'da fırın yüzey sıcaklığının fırın eksenini boyunca değişimi verilmiştir. Fırın yüzeyinde ölçülen sıcaklıkların ortalamasının fırın boyunca maksimum değeri 352 °C'dir. Bu sıcaklık, fırın boyunun kafadan itibaren 7-9 m'si arasındaki bölgede oluşmaktadır.



Şekil 5.7. Fırın mantosu sıcaklık dağılımı.

Fırın yüzeyinde ölçülen ortalama sıcaklık değerlerine göre hesaplanan fırın yüzeyi ısı kaybı, Çizelge 5.14.'de verilmiştir. Bu Çizelgede görüleceği üzere, yüzey ısı kaybı toplamı 5060.81 Mcal/h veya 28 kcal/kg kli.'dir.

Fırın dış yüzeyinden atmosfere ışınila geçen ısı miktarı:

$$q = \sigma \epsilon (T_1^4 - T_a^4) \quad (\text{Eşitlik 5-7})$$

Fırın dış yüzeyinden atmosfere taşınımla geçen ısı miktarı:

$$q = h_1 (T_1 - T_a) \quad (\text{Eşitlik 5-8})$$

kaybolan toplam enerji:

$$Q = \sigma \epsilon F_1 (T_1^4 - T_a^4) + h_1 F_1 (T_1 - T_a) \quad (\text{Eşitlik 5-9})$$

dir. Işınımla ısı kaybı hesaplamalarında manto yüzeyinin ışınil yayma katsayısı $\epsilon=0.9$ olarak alınmıştır. Isı taşınım katsayısı (h_1), ortamdaki hava hızı, fırın çapı ve atmosfer şartlarına bağlıdır. Ölçülen değerler dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda, $h_1=8.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.14. Fırın yüzeyi ısı kaybı hesap çizelgesi.

Re=570000

Rüzgar hızı=3 m/s

Yüzey Emisivitesi=0.9

 $h_c=7.44 \text{ W/m}^2\text{K}$ $k_{\text{hava}}=0.026 \text{ kcal/m K}$ $T_{\text{ortam}}=15^\circ\text{C}$

	Çap ¹ (m)	L ¹ (m)	Δx (m)	A (m ²)	T _y ¹ (°C)	h _r W/m ² K	h _c W/m ² K	h _{top} W/m ² K	Isı Kaybı (Mcal/h)	Isı Kaybı kcal/kg kli.
	4.60	2.20	2.20	31.79	279.5	14.6	7.3	21.9	179.73	1.00
	4.60	4.20	2.00	28.90	311.5	16.5	7.3	23.8	200.03	1.11
R1	5.67	5.00	0.80	31.51	182.5	9.7	7.3	17.0	86.42	0.48
	4.60	6.50	1.50	21.68	297.5	15.6	7.3	22.9	137.54	0.76
	4.60	8.50	2.00	28.90	352.5	19.3	7.3	26.6	254.84	1.41
	4.60	10.70	2.20	31.79	252.5	13.1	7.3	20.4	149.83	0.83
	4.60	12.70	2.00	28.90	252.5	13.1	7.3	20.4	136.21	0.75
	4.60	14.70	2.00	28.90	255.0	13.2	7.3	20.5	138.59	0.77
	4.60	16.70	2.00	28.90	335.0	18.1	7.3	25.4	230.30	1.28
	4.60	18.70	2.00	28.90	297.5	15.6	7.3	22.9	183.38	1.02
	4.60	20.70	2.00	28.90	257.5	13.3	7.3	20.6	141.00	0.78
	4.60	22.70	2.00	28.90	327.0	17.5	7.3	24.8	219.66	1.22
	4.60	24.70	2.00	28.90	282.5	14.7	7.3	22.0	166.62	0.92
R2	5.67	25.50	0.80	31.51	152.5	8.5	7.3	15.8	65.30	0.36
	4.60	26.35	0.85	12.28	335.0	18.1	7.3	25.4	97.88	0.54
	4.60	28.35	2.00	28.90	335.0	18.1	7.3	25.4	230.30	1.28
	4.60	30.35	2.00	28.90	302.5	15.9	7.3	23.3	189.21	1.05
	4.60	32.35	2.00	28.90	302.5	15.9	7.3	23.3	189.21	1.05
	4.60	34.35	2.00	28.90	309.5	16.4	7.3	23.7	197.59	1.09
	4.60	36.35	2.00	28.90	332.5	17.9	7.3	25.2	226.93	1.26
	4.60	38.35	2.00	28.90	337.0	18.2	7.3	25.5	233.01	1.29
	4.60	40.35	2.00	28.90	265.0	13.7	7.3	21.0	148.40	0.82
	4.60	42.35	2.00	28.90	182.5	9.7	7.3	17.0	79.27	0.44
	4.60	44.35	2.00	28.90	155.0	8.5	7.3	15.9	61.41	0.34
T	6.22	45.30	0.95	46.01	45.0	5.0	7.3	12.3	13.63	0.08
	4.60	46.80	1.50	21.68	162.5	8.8	7.3	16.2	49.55	0.27
	4.60	48.50	1.70	24.57	177.5	9.5	7.3	16.8	64.48	0.36
R3	5.67	50.50	2.00	52.89	177.5	9.5	7.3	16.8	138.80	0.77
	4.60	53.25	2.75	39.74	194.0	10.2	7.3	17.5	120.21	0.67
	4.60	56.00	2.75	39.74	207.5	10.8	7.3	18.1	134.16	0.74
	4.60	58.75	2.75	39.74	269.0	14.0	7.3	21.3	209.60	1.16
	4.60	61.50	2.75	39.74	269.0	14.0	7.3	21.3	209.60	1.16
	4.60	64.00	2.50	36.13	259.0	13.4	7.3	20.7	178.08	0.99
A= 1021.0 m²					Toplam Kayıp			5060.81		28.03

¹ fabrikada yapılan ölçümler ile elde edilen değerler.

Enerji dengesi sırasında kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir

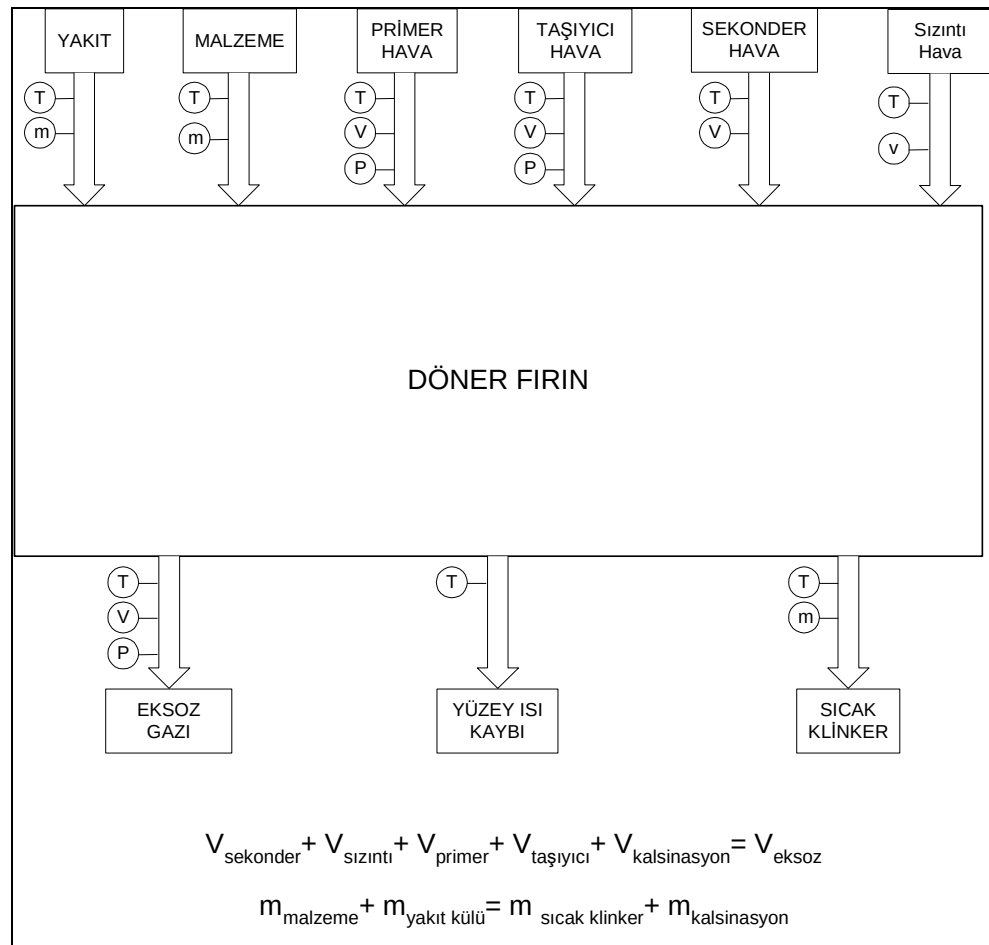
$$\Sigma E_{giriş} - \Sigma E_{çıkış} = \Delta E_{sistem} \quad (\text{Eşitlik 5-10})$$

Yukarıdaki denklemde sistem içerisinde biriken enerji bulunmadığından giren ve çıkan enerjiler eşit olacaktır.

$$W_{giriş} - Q_{çıkış} = \Delta H = m \cdot (h_{çıkış} - h_{giriş}) \quad (\text{Eşitlik 5-11})$$

$$(h_{çıkış} - h_{giriş}) = C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Eşitlik 5-12})$$

$$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + E / T^2 \quad (\text{Eşitlik 5-13})$$

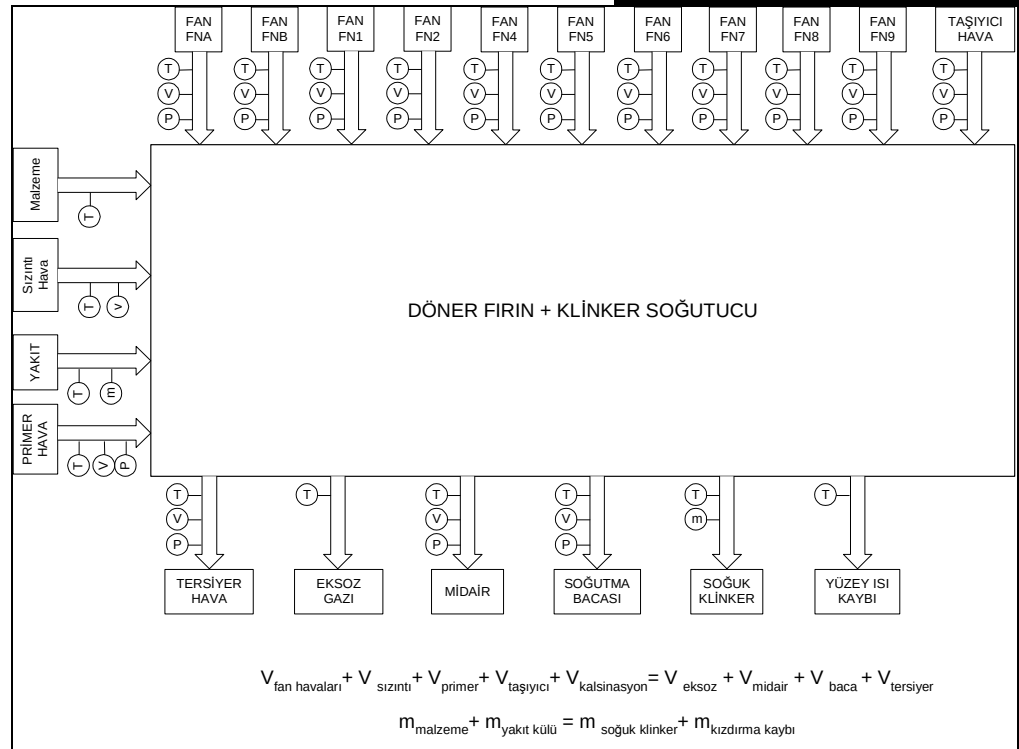


Şekil 5.8 Döner fırın sistemi giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.

Çizelge 5.15. Döner fırın sistemi için enerji dengesi.

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
Fırın Yakıt Yanma Isısı				338.7	48.32
Fırın Yakıt Duyulur Isısı	50	11640	0.242	0.8	0.11
Fırın giriş malzeme duyulur ısısı	881	179749	0.250	219.5	31.32
Primer Hava	45	5400	0.310	0.4	0.06
Taşıyıcı Hava Fırın	105	1920	0.315	0.4	0.05
Sızıntı Hava (Fırın kafası)	25	2000	0.309	0.1	0.01
Sekonder Hava	916	76974	0.361	141.1	20.13
Toplam Giriş				700.9	100.00

ÇIKIŞLAR					
Fırın İçerisindeki Reaksiyon				103.1	14.70
Fırın Çıkış Eksoz Gazı Duyulur Isısı	1096	87368	0.419	222.0	31.67
Klinker Duyulur Isısı	1350	180577	0.261	352.7	50.32
Fırın Yüzey Isı Kaybı				23.1	3.30
Toplam Çıkış				700.9	100.00



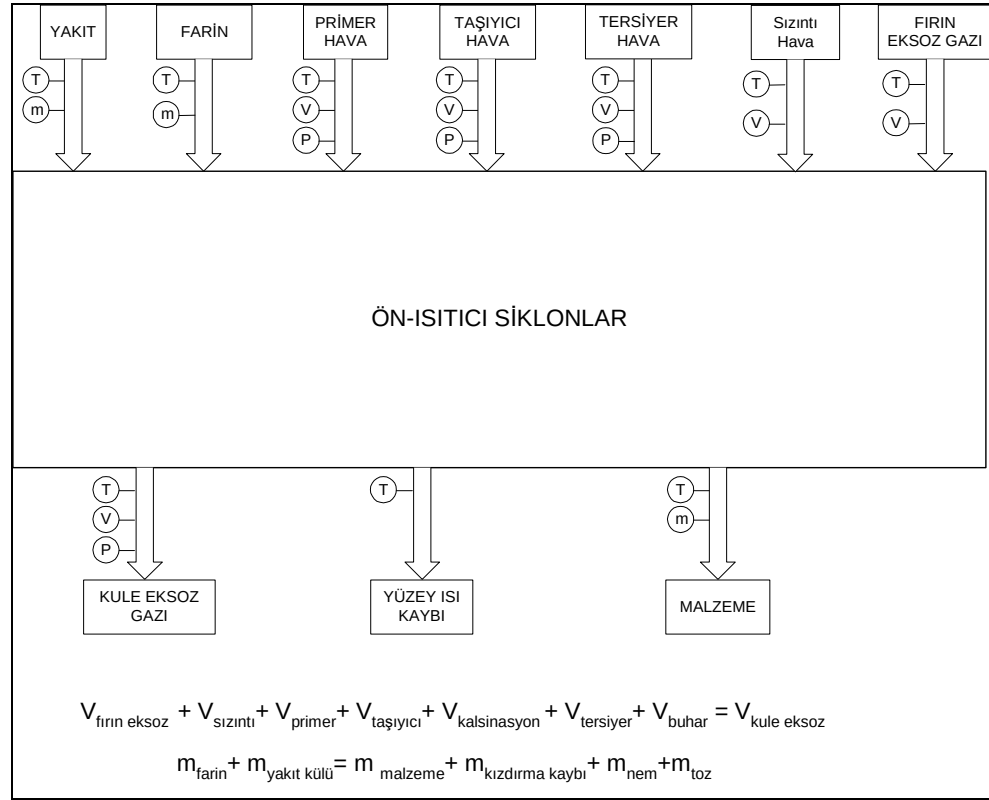
Şekil 5.9. Döner fırın ile klinker soğutucu birlikte ele alındığında sistem giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.

Çizelge 5.16. Döner fırın ve soğutma sistemi için enerji dengesi.

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
Fırın Yakıt Yanma Isısı				338.7	58.80
Fırın Yakıt Duyulur Isısı	50	11640	0.242	0.8	0.14
Fırın giriş malzeme duyulur ısısı	881	179749	0.250	219.5	38.11
Primer Hava	45	5400	0.310	0.4	0.07
Taşıyıcı Hava Fırın	105	1920	0.315	0.4	0.06
Sızıntı Hava (Fırın kafası)	25	2000	0.309	0.1	0.01
FNA	25	25407	0.309	1.1	0.19
FNB	25	43933	0.309	1.9	0.33
FN1	25	12077	0.309	0.5	0.09
FN2	25	48490	0.309	2.1	0.36
FN4	25	40753	0.309	1.7	0.30
FN5	25	45305	0.309	1.9	0.34
FN6	25	35147	0.309	1.5	0.26
FN7	25	24403	0.309	1.0	0.18
FN8	25	25690	0.309	1.1	0.19
FN9	25	32357	0.309	1.4	0.24
Sızıntı hava (Soğutma)	25	45305	0.309	1.9	0.34
Toplam Giriş				576.0	100.00

ÇIKIŞLAR	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
Fırın İçerisindeki Reaksiyon				103.1	17.93
Fırın Çıkış Eksoz Gazı Duyulur Isısı	1096	87368	0.419	222.0	38.62
Tersiyer hava	726	71770	0.352	101.6	17.67
Mid air	266	98763	0.326	47.4	8.24
Baca	219	108753	0.323	42.6	7.40
Klinker (kg/h)	140	180577	0.207	28.9	5.04
Fırın Yüzey Isı Kaybı				23.1	4.02
Soğutucu yüzey ısı kaybı				6.2	1.08
Toplam Çıkış				574.9	100.00

¹ fabrikada yapılan ölçümler ile elde edilen değerler.

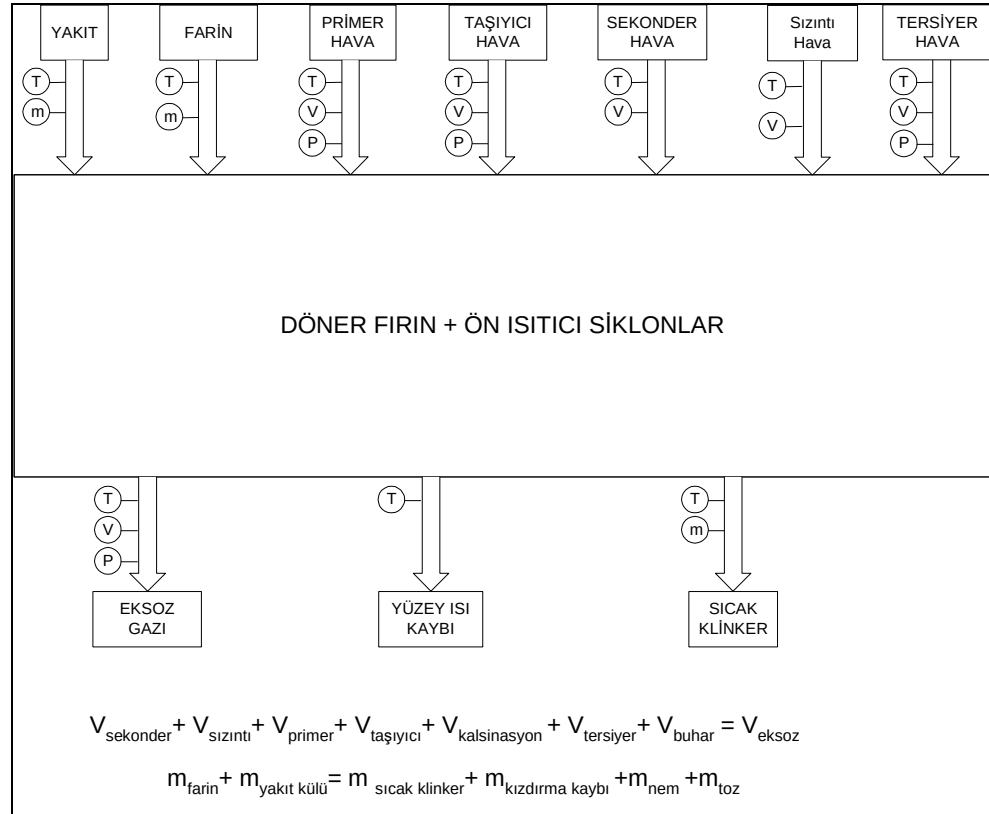


Şekil 5.10. Ön-Isıtıcı siklon sistemi giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.

Çizelge 5.17. Ön-Isıtıcı siklon sistemi (ESKİ ve YENİ kuleler) için enerji dengesi.

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
Preka Yakıt Yanma Isısı				458.0	55.76
Preka Yakıt Duyulur Isısı	50	8607	0.242	0.6	0.07
Yeni Siklon Farin Duyulur Isısı	50	173405	0.195	9.4	1.14
Eski Siklon Farin Duyulur Isısı	50	112192	0.195	6.1	0.74
Farin Yanıcı Madde		285597	12.800	20.2	2.46
Fırın Çıkış Eksoz Gazı Duyulur Isısı	1096	87368	0.419	222.0	27.02
Taşıyıcı Hava Preka	105	2700	0.315	1.1	0.13
Sızıntı Hava	25	59790	0.309	2.6	0.31
Tersiyer Hava	726	71770	0.352	101.6	12.37
Toplam Giriş				821.5	100.00
ÇIKIŞLAR					
Kalsinasyon				317.7	38.71
Yeni Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				7.9	0.96
Eski Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				5.1	0.62
Yeni Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	330	138986	0.381	96.8	11.80
Eski Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	323	151673	0.371	100.5	12.24
Yeni Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	330	7803	0.238	3.4	0.41
Eski Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	323	5049	0.237	2.1	0.26
Fırın giriş malzeme duyulur ısısı	881	179749	0.250	219.5	26.74
Toz Kısmi Kalsinasyon		12852	3.237	0.2	0.03
Ön-Isıtıcı Siklonlar Yüzey Isı Kaybı				67.5	8.23
Toplam Çıkış				820.8	100.00

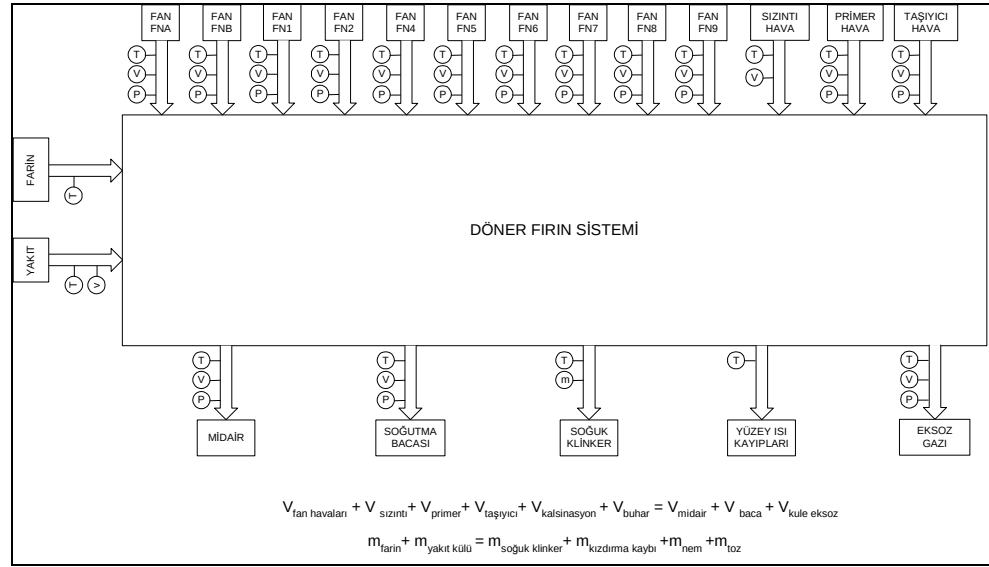
¹ fabrikada yapılan ölçümler ile elde edilen değerler.



Şekil 5.11. Döner fırın ile ön-ısıtıcı siklonlar birlikte ele alındığında sistem giriş ve çıkışları ve ölçülen parametreler.

Çizelge 5.18. Fırın ve Ön-Isıtıcı siklon sistemi için enerji dengesi.

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
Fırın Yakıt Yanma Isısı				338.7	31.32
Preka Yakıt Yanma Isısı				458.0	42.36
Fırın Yakıt Duyulur Isısı	50	11640	0.242	0.8	0.07
Preka Yakıt Duyulur Isısı	50	8607	0.242	0.6	0.05
Yeni Siklon Farin Duyulur Isısı	50	173405	0.195	9.4	0.86
Eski Siklon Farin Duyulur Isısı	50	112192	0.195	6.1	0.56
Farin Yanıcı Madde		285597	12.800	20.2	1.87
Primer Hava	45	5400	0.310	0.4	0.04
Primer Hava Preka	45	500	0.310	0.4	0.03
Taşıyıcı Hava Fırın	105	1920	0.315	0.5	0.05
Taşıyıcı Hava Preka	105	2700	0.315	1.1	0.10
Sızıntı Hava (Fırın kafası)	25	2000	0.309	0.1	0.01
Sızıntı Hava (Siklon)	25	59790	0.309	2.6	0.24
Tersiyer Hava	726	71770	0.352	101.6	9.40
Sekonder Hava	916	76974	0.361	141.1	13.05
Toplam Giriş				1081.4	100.00
ÇIKIŞLAR					
Klinkerleşme Isısı				420.8	38.95
Yeni Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				7.9	0.73
Eski Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				5.1	0.47
Yeni Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	330	138986	0.381	94.3	8.73
Eski Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	323	151673	0.371	103.1	9.55
Yeni Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	330	7803	0.238	3.4	0.31
Eski Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	323	5049	0.237	2.1	0.20
Klinker Duyulur Isısı	1350	180577	0.261	352.7	32.65
Toz Kısmi Kalsinasyon		12852	3.237	0.2	0.02
Fırın Yüzey Kaybı				23.1	2.14
Ön-Isıtıcı Siklonlar Yüzey Isı Kaybı				67.5	6.25
Toplam Çıkış				1080.3	100.00



Şekil 5.12. Tüm döner fırın sisteminde giriş ve çıkışlar ile ölçülen parametreler

Çizelge 5.19. Fırın sistemi toplam enerji dengesi.

GİRİŞLER	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
Fırın Yakıt Yanma Isısı				338.7	39.71
Preka Yakıt Yanma Isısı				458.0	53.71
Fırın Yakıt Duyulur Isısı	50	11640	0.242	0.8	0.09
Preka Yakıt Duyulur Isısı	50	8607	0.242	0.6	0.07
Yeni Siklon Farin Duyulur Isısı	50	173405	0.195	9.4	1.10
Eski Siklon Farin Duyulur Isısı	50	112192	0.195	6.1	0.71
Farin Yanıcı Madde		285597	12.800	20.2	2.37
Primer Hava	45	5400	0.310	0.4	0.05
Taşıyıcı Hava Fırın	105	1920	0.315	0.4	0.04
Taşıyıcı Hava Preka	105	2700	0.315	0.5	0.06
Sızıntı Hava (Soğ.+Fırın kafası)	25	24699	0.309	1.1	0.12
Sızıntı Hava (Siklon)	25	59790	0.309	2.6	0.30
FNA	25	25407	0.309	1.1	0.13
FNB	25	43933	0.309	1.9	0.22
FN1	25	12077	0.309	0.5	0.06
FN2	25	48490	0.309	2.1	0.24
FN4	25	40753	0.309	1.7	0.20
FN5	25	45305	0.309	1.9	0.23
FN6	25	35147	0.309	1.5	0.18
FN7	25	24403	0.309	1.0	0.12
FN8	25	25690	0.309	1.1	0.13
FN9	25	32357	0.309	1.4	0.16
Toplam Giriş				852.8	100.00

ÇIKIŞLAR	T (°C) ¹	Debi (Nm ³ /h) ¹	Cp (kcal/Nm ³ /K)	kcal/kgkli.	%
Klinkerleşme Isısı				420.8	49.34
Yeni Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				7.9	0.92
Eski Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				5.1	0.60
Yeni Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	330	138986	0.371	94.3	11.06
Eski Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	323	151673	0.381	103.1	12.09
Yeni Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	330	7803	0.238	3.4	0.40
Eski Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	323	5049	0.237	2.1	0.25
Mid air	266	98763	0.326	47.4	5.56
Soğutucu Baca	219	108753	0.323	42.6	4.99
Klinker Duyulur Isısı	140	180577	0.207	28.9	3.39
Toz Kısmi Kalsinasyon		12852	3.237	0.2	0.03
Fırın Yüzeyi Isı Kaybı				23.1	2.71
Ön-Isıtıcı Siklonlar Yüzey Isı Kaybı				67.5	7.92
Soğutucu Yüzey Isı Kaybı				6.3	0.74
Toplam Çıkış				852.8	100.00

5.8. Döner Fırın Sistemi I. Kanun Verimi

Döner fırın sisteminde, verilen ısı kaynakları; beslenen kömürün yanma ısısı ve diğer ısı girdileri (farin içerisinde yanıcı maddeler, duyulur ısılar) ve bunun yanında klinkerin elde edilmesi için kullanılan ısılarda sistemden alınan faydalı ısı miktarıdır. Çizelge 5.20.'de Döner fırın sisteminin verimi görülmektedir.

Çizelge 5.20. Döner fırın sisteminin toplam verimi.

Klinker Üretimi: 180577(kg/h)

Fırın Yakıt Yanma Isısı:	338.7(kcal/kg kli.)	% 39.71
Preka Yanma Isısı:	458.0(kcal/kg kli.)	% 53.71
Diğer ısı girdileri:	56.1(kcal/kg kli.)	% 6.58
Toplam ısı girdisi:	852.8(kcal/kg kli.)	
Klinkerleşme ısısı:	420.8(kcal/kg kli.)	% 49.34
Döner Fırın Sistemi 1. Kanun Verimi	420.8(kcal/kg kli.)	% 49.34

Çizelge 5.21.'de ilave olarak döner fırın sistemini terk eden yüksek ısılı midair ve egzoz gazlarının tamamı ile değerlendirilmesi halinde elde edilecek verim gösterilmiştir.

Çizelge 5.21. Döner fırın sistemini terk eden midair ve egzoz gazları değerlendirildiğinde verim

Midair ile geri kazanım:	26.0(kcal/kg kli.)	% 3.05
Eksoz gazı ile geri kazanım:	124.8(kcal/kg kli.)	% 14.64
Tüm proseslerde kullanılan ısılar dahil verimi:	571.6(kcal/kg kli.)	% 67.03

6. ÇİMENTO DÖNER FIRIN SİSTEMİNDE

II. KANUN ANALİZİ

Klasik tasarım ve başarımlı değerlendirme yöntemlerine ait uygulamalar, termodinamiğin II.kanunu ekseninde gerçekleştirilmektedir. Alışıla gelmiş metotlar, enerjinin sakınımı ilkesinin uygulaması niteliğinde olup sistem verimi, verilen enerjinin fayda sağlanan enerji miktarına oranını şeklinde açıklanır. Bunun yanında sistemin ekonomik değerlendirilmesi için temel sağlanmış olur.

Kullanılabilirlik analizi petrol krizinin yaşandığı yıllarda gündemde yerini almış ve azalan kaynakların daha iyi değerlendirilmesinin sağlanması amacı uygulanması gittikçe yaygınlaşmaktadır.

6.1. Kullanılabilirlik Analizi

Kullanılan enerjinin miktarı ve ekonomik karşılığı sadece tüketilen ve elde edilen faydaya bağlı olmayıp aynı zamanda kalitesine de bağlıdır. Enerjinin kalitesi iş yapabilirliği ve dönüşüm miktarına bağlıdır. Örnek olarak 50 °C sıcaklık 100000 Nm³/h debide gaz ile 300 °C 15770 Nm³/h debide gaz eşit enerji miktarına (1552 Mcal) sahiptir. Ancak birinci durum için her hangi bir şekilde ısıtma amaçlı buhar eldesi mümkün değil iken ikinci durum için buhar elde ederek çeşitli ısı makinalarına iş yaptırmak mümkündür.

Bu durumda termodinamiğin birinci yasasına ek olarak ikinci yasa ile bir değerlendirme yapılması ve kullanılabilirlik tanımının yapılması gereklidir. Kullanılabilirlik, enerjinin sıcaklık, basınç ve kimyasal potansiyel koşullarındaki farklılaşmayı yansıtır. Kullanılabilirlik analizi birinci kanun verimine nazaran hem kayıpların nedeninin açıklanması hemde eldeki imkanların belirlenmesi için yapılmaktadır. Kullanılabilirlik analizi zamana bağlı ekonomik analiz ile birleştirildiğinde en anlamlı değerlendirme elde edilmektedir

Kullanılabilirlik (B) akışlı bir sistem için aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$B = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (\text{Eşitlik 6-1})$$

Buradan sisteme katılan her bir bileşen için kullanılabilirlik yolu ile durağan haldeki iş ve ısı transferi ifadelerinin dahil edildiği eşitliğin açılımı

$$0 = \Sigma (1 - T_0/T_1).Q_t - W_s - \Sigma m_g B_g - \Sigma m_{\text{ç}} B_{\text{ç}} - i_s \quad (\text{Eşitlik 6-2})$$

Bağıntı da sırası ile,

T_0 : referans sıcaklık, çevre sıcaklığı (273 K)

T_1 : ısı transferinin gerçekleştiği ortam sıcaklığı (K)

Q_t : transfer edilen ısı (kcal/kg)

W_s : sistemde üretilen iş (kcal/kg)

m_g : sisteme giren kütle miktarı (kg)

B_g = sisteme giren maddelerin kullanılabilirliği (kcal/kg)

$m_{\text{ç}}$ = sistemden çıkanların kütle miktarı (kg)

$B_{\text{ç}}$ = sistemden çıkanların kullanılabilirliği (kcal/kg)

i_s = sistemde deforme edilen kullanılabilirlik (kcal/kg)

daha önce I. Kanun analizinde görüldüğü üzere sistemdeki enerji miktarının değişimi kinetik ve potansiyel terimler ihmal edildiğinde aşağıdaki gibidir:

$$\Delta E = \Delta H \quad (\text{Eşitlik 6-3})$$

Herhangi iki nokta arasındaki kullanılabilirlik ve enerji değişimlerinin birbirine oranı ekserji oranı olarak tanımlanır.

$$\alpha_E = \Sigma \Delta B / \Sigma \Delta H \quad (\text{Eşitlik 6-4})$$

Ekserjitik verim çeşitli kaynaklarda farklı olarak tanımlanmıştır. Bunlardan biri olan ve proses sonucu ürünlere geçirilen kullanılabilirliğin, sisteme verilen kullanılabilirliğe oranı şeklinde tanımlanır (ikinci kanun verimi).

$$\varepsilon = B_{\text{ç}} / B_g = 1 - i_s / B_g \quad (\text{Eşitlik 6-5})$$

6.2. Döner Fırın Sistemi

Tipik bir çimento fabrikasında sekiz (dört adeti eski ve dört adeti yeni) ön ısıtma ve kalsinasyon siklonunu ve preka yakıcısı bulunan döner fırın sisteminin ısı enerjisiye ait kullanılabilirlik analizi ve II. kanun verimi hesapları, 7-10 Mart 2000 tarihlerindeki dört gün süre ile fırın hattında yapılan ölçümlerden elde edilen veriler ve malzeme debileri ve analizleri (farin, klinker, kömür v.b.) ile ilgili olarak çimento fabrikasından temin edilen veriler kullanılarak yapılmıştır.

Döner fırın sistemine ait kütle dengesinin bileşeni olan gaz dengeleri ve malzeme dengeleri bir önceki bölümde kurulmuştur. Ayrıca bir önceki bölümde enerji dengesi kurularak kabuller çerçevesinde I. Kanun verimi tespit edilmiştir.

Bu bölümde sırası ile klinker soğutucusu, döner fırın, soğutucu + döner fırın, ön ısıtıcı siklonlar, ön ısıtıcı siklonlar + döner fırın ve tüm döner fırın sistemi için kullanılabilirlik analizi uygulanmıştır.

Klinker soğutucusuna dökülen 1350 °C sıcaklıktaki klinkerin kullanılabilirliği 230 kcal/kg kli. mertebesindedir. Soğutmada gerçekleşen ısı transferi ve dönüşümler sayesinde çıkanlarda kullanılabilirliğin korunumu 155 kcal/kg kli. mertebesindedir. Ayrıca soğutmaya verilen enerjinin % 63'ü belirlenen koşullara göre kullanılabilirliği bulunmaktadır. Çizelge 6.1.'de soğutma sistemine ait kullanılabilirlik analizi sonuçları görülmektedir.

Çizelge 6.1. Soğutma sistemi kullanılabilirlik analizi.

GİRİŞLER	h (kcal/Nm³)	Debi (Nm³/h)	T_o(S-S_o) (kcal/Nm³)	B (kcal/kg kli.)	%
FNA	8	25407	7.398	0.044	0.02
FNB	8	43933	7.398	0.077	0.03
FN1	8	12077	7.398	0.021	0.01
FN2	8	48490	7.398	0.085	0.04
FN4	8	40753	7.398	0.071	0.03
FN5	8	45305	7.398	0.079	0.03
FN6	8	35147	7.398	0.061	0.03
FN7	8	24403	7.398	0.043	0.02
FN8	8	25690	7.398	0.045	0.02
FN9	8	32357	7.398	0.057	0.02
Soğutma Sızıntı Hava	8	22699	7.398	0.040	0.02
Klinker (kg/h)	353	180577	121.704	231.010	99.73
			Toplam Giriş	231.6	100.00
ÇIKIŞLAR					
Sekonder hava	331	76974	132.528	84.6	49.12
Tersiyer hava	256	71770	115.536	55.7	32.33
Klinker	29	180577	27.772	1.2	0.68
Mid air	87	98763	58.594	15.3	8.91
Baca	71	108753	50.533	12.1	7.04
Soğutucu yüzey ısı kaybı	300			3.3	1.91
			Toplam Çıkış	172.3	100.00

Kullanılabilirlik kaybı	76.0(kcal/kg kli.)	% 32.80
Toplam giren enerjinin kullanılabilirliği	231.6(kcal/kg kli.)	% 62.96

Soğutucuya dökülen klinker	231.0(kcal/kg kli.)	% 100.00
Sekonder hava ile ısı geri kazanımı:	84.6(kcal/kg kli.)	% 36.63
Tersiyer hava ısı geri kazanımı:	55.7(kcal/kg kli.)	% 24.11
Midair ile geri kazanım:	15.3(kcal/kg kli.)	% 6.64
İkinci kanun verimi	155.7(kcal/kg kli.)	% 67.38

Döner fırındaki ana ısı girdileri sırası ile yakıtın yanması, ön ısıtmadan fırına giren malzeme ve soğutmadan alına sekonder havadır. Girdilerin kullanılabilirliği 503.8 kcal/kg kli. mertebesindedir. Döner fırında gerçekleşen ısı transferi ve dönüşümler sayesinde çıkanlarda kullanılabilirliğin korunumu 478.9 kcal/kg kli. mertebesindedir. Ayrıca soğutmaya verilen enerjinin % 71'ü belirlenen koşullara

göre kullanılabilirliği bulunmaktadır. Çizelge 6.2.'de döner fırın sistemine ait kullanılabilirlik analizi görülmektedir.

Çizelge 6.2. Döner fırın sistemi kullanılabilirlik analizi

GİRİŞLER	h (kcal/Nm³)	Debi (Nm³/h)	T_o(S-S_o) (kcal/Nm³)	B (kcal/kgkli.)	%
Fırın Yakıt Yanma Isısı				297.1	58.97
Fırın Yakıt Duyulur Isısı	12	11640	8.190	0.3	0.05
Fırın giriş malzeme duyulur ısısı	221	179749	98.219	121.7	24.16
Primer Hava	14	5400	12.881	0.0	0.01
Taşıyıcı Hava Fırın	33	1920	27.636	0.1	0.01
Sızıntı Hava (Fırın kafası)	8	2000	7.398	0.0	0.00
Sekonder Hava	331	76974	132.528	84.6	16.80
Toplam Giriş				503.8	100.00
ÇIKIŞLAR					
Fırın İçerisindeki Reaksiyon				85.7	17.90
Fırın Çıkış Eksoz Gazı Duyulur Isısı	459	87368	161.231	144.0	30.07
Klinker Duyulur Isısı	353	180577	121.704	231.0	48.24
Fırın Yüzey Isı Kaybı				18.2	3.79
Toplam Çıkış				478.9	100.00

Kullanılabilirlik kaybı	43.0(kcal/kg kli.)	% 8.54
Toplam giren enerjinin kullanılabilirliği	503.8(kcal/kg kli.)	% 71.87

Döner fırındaki ve soğutma sisteminin ana ısı girdileri sırası ile yakıtın yanması ve ön ısıtmadan fırına giren malzemedir. Girdilerin kullanılabilirliği 419 kcal/kg kli. mertebesindedir. Gerçekleşen ısı transferi ve dönüşümler sayesinde çıkanlarda kullanılabilirliğin korunumu 335.5 kcal/kg kli. mertebesindedir. Ayrıca soğutmaya verilen enerjinin % 73'ü belirlenen koşullara göre kullanılabilirliği bulunmaktadır. Çizelge 6.3.'de döner fırın sistemine ait kullanılabilirlik analizi görülmektedir.

Çizelge 6.3. Döner fırın ve soğutma sistemi kullanılabilirlik analizi

GİRİŞLER	h (kcal/Nm ³)	Debi (Nm ³ /h)	T _o (S-S _o) (kcal/Nm ³)	B (kcal/kgkli.)	%
Fırın Yakıt Yanma Isısı				297.1	70.77
Fırın Yakıt Duyulur Isısı	12	11640	8.190	0.3	0.06
Fırın giriş malzeme duyulur ısısı	221	179749	98.219	121.7	29.00
Primer Hava	14	5400	12.881	0.0	0.01
Taşıyıcı Hava Fırın	33	1920	27.636	0.1	0.01
Sızıntı Hava (Fırın kafası)	8	2000	7.398	0.0	0.00
FNA	8	25407	7.398	0.0	0.01
FNB	8	43933	7.398	0.1	0.02
FN1	8	12077	7.398	0.0	0.01
FN2	8	48490	7.398	0.1	0.02
FN4	8	40753	7.398	0.1	0.02
FN5	8	45305	7.398	0.1	0.02
FN6	8	35147	7.398	0.1	0.01
FN7	8	24403	7.398	0.0	0.01
FN8	8	25690	7.398	0.0	0.01
FN9	8	32357	7.398	0.1	0.01
Sızıntı hava (Soğutma)	8	45305	7.398	0.1	0.02
Toplam Giriş				419.8	100.00
ÇIKIŞLAR					
Fırın İçerisindeki Reaksiyon				85.7	25.55
Fırın Çıkış Eksoz Gazı Duyulur Isısı	459	87368	161.231	144.0	42.92
Tersiyer hava	256	71770	115.536	55.7	16.60
Mid air	87	98763	58.594	15.3	4.57
Baca	71	108753	50.533	12.1	3.62
Klinker (kg/h)	29	180577	27.772	1.2	0.35
Fırın Yüzey Isı Kaybı				18.2	5.41
Soğutucu yüzey ısı kaybı				3.3	0.98
Toplam Çıkış				335.5	100.00

Kullanılabilirlik kaybı	119.1(kcal/kg kli.)	% 28.36
Toplam giren enerjinin kullanılabilirliği	419.8(kcal/kg kli.)	% 72.89

Ön ısıtıcı siklon sisteminin ana ısı girdileri sırası ile prekada yakıtın yanması, fırın yanma gazları ve tersiyer havadır. Girdilerin kullanılabilirliği 619.7 kcal/kg kli. mertebesindedir. Gerçekleşen ısı transferi ve dönüşümler sayesinde çıkanlarda kullanılabilirliğin korunumu 487.3 kcal/kg kli. mertebesindedir. Ayrıca soğutmaya

verilen enerjinin % 75'ü belirlenen koşullara göre kullanılabilirliği bulunmaktadır.

Çizelge 6.4.'de döner fırın sistemine ait kullanılabilirlik analizi görülmektedir.

Çizelge 6.4. Ön ısıtıcı siklon sistemi kullanılabilirlik analizi.

GİRİŞLER	h (kcal/Nm³)	Debi (Nm³/h)	T_o(S-S_o) (kcal/Nm³)	B (kcal/kg kli.)	%
Preka Yakıt Yanma Isısı				401.8	64.84
Preka Yakıt Duyulur Isısı	12	8607	8.190	0.2	0.03
Yeni Siklon Farin Duyulur Isısı	12	173405	10.951	1.2	0.19
Eski Siklon Farin Duyulur Isısı	12	112192	10.951	0.8	0.12
Farin Yancı Madde				15.9	2.57
Fırın Çıkış Eksoz Gazı Duyulur Isısı	459	87368	161.231	144.0	23.24
Taşıyıcı Hava Preka	33	2700	27.636	0.1	0.01
Sızıntı Hava	8	59790	7.398	0.1	0.02
Tersiyer Hava	256	71770	115.536	55.7	8.99
Toplam Giriş				619.7	100.00
ÇIKIŞLAR					
Kalsinasyon				240.6	49.38
Yeni Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				2.1	0.43
Eski Siklonu Farindeki Suyun Buharlaşması				1.4	0.28
Yeni Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	126	138986	75.538	38.7	7.94
Eski Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	120	151673	75.288	37.2	7.64
Yeni Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	79	7803	52.229	1.1	0.24
Eski Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	77	5049	51.360	0.7	0.14
Fırın giriş malzeme duyulur ısısı	221	179749	98.219	121.7	24.98
Toz Kısmi Kalsinasyon				0.1	0.03
Ön-Isıtıcı Siklonlar Yüzey Isı Kaybı				43.6	8.94
Toplam Çıkış				487.3	100.00

Kullanılabilirlik kaybı	257.3(kcal/kg kli.)	% 41.53
Toplam giren enerjinin kullanılabilirliği	619.7(kcal/kg kli.)	% 75.43

Ön ısıtıcı siklon ve döner fırın sisteminin ana ısı girdileri sırası ile prekada ve fırında yakıtın yanması yanında sekonder ve tersiyer havadır. Girdilerin kullanılabilirliği 857.7 kcal/kg kli. mertebesindedir. Gerçekleşen ısı transferi ve dönüşümler sayesinde çıkanlarda kullanılabilirliğin korunumu 724 kcal/kg kli. mertebesindedir. Ayrıca verilen enerjinin % 79'ü belirlenen koşullara göre kullanılabilirliği bulunmaktadır. Çizelge 6.5.'de döner fırın sistemine ait kullanılabilirlik analizi görülmektedir.

Çizelge 6.5. Ön ısıtıcı siklon ve döner fırın sistemi kullanılabilirlik analizi

GİRİŞLER	h (kcal/Nm ³)	Debi (Nm ³ /h)	T _o (S-S _o) (kcal/Nm ³)	B (kcal/kg kli.)	%
Fırın Yakıt Yanma Isısı				297.1	34.64
Preka Yakıt Yanma Isısı				401.8	46.84
Fırın Yakıt Duyulur Isı	12	11640	8.190	0.3	0.03
Preka Yakıt Duyulur Isısı	12	8607	8.190	0.2	0.02
Yeni Siklon Farin Duyulur Isısı	12	173405	10.951	1.2	0.14
Eski Siklon Farin Duyulur Isısı	12	112192	10.951	0.8	0.09
Farin Yanıcı Madde				15.9	1.85
Primer Hava	14	5400	12.881	0.0	0.00
Primer Hava Preka	14	500	12.881	0.0	0.00
Taşıyıcı Hava Fırın	33	1920	27.636	0.1	0.01
Taşıyıcı Hava Preka	33	2700	27.636	0.1	0.01
Sızıntı Hava (Fırın kafası)	8	2000	7.398	0.0	0.00
Sızıntı Hava (Siklon)	8	59790	7.398	0.1	0.01
Tersiyer Hava	256	71770	115.536	55.7	6.49
Sekonder Hava	331	76974	132.528	84.6	9.87
Toplam Giriş				857.7	100.00
ÇIKIŞLAR					
Klinkerleşme Isısı				350.1	48.35
Yeni Siklon Farindeki Su Buh.				2.1	0.29
Eski Siklonu Farindeki Su.Buh.				1.4	0.19
Yeni Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	126	138986	75.538	38.7	5.34
Eski Kule Eksoz Gazı Duyulur Isı	120	151673	75.288	37.2	5.14
Yeni Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	79	7803	52.229	1.1	0.16
Eski Eksoz Gazı Toz Duyulur Isı	77	5049	51.360	0.7	0.10
Klinker Duyulur Isısı	353	180577	121.704	231.0	31.90
Toz Kısmi Kalsinasyon				0.1	0.02
Fırın Yüzey Kaybı				18.2	2.51
Ön-Isıtıcı Siklonlar Yüzey Isı Kaybı				43.6	6.01
Toplam Çıkış				724.2	100.00

Kullanılabilirlik kaybı	276.6(kcal/kg kli.)	% 32.24
Toplam giren enerjinin kullanılabilirliği	857.7(kcal/kg kli.)	% 79.32

Döner fırın sisteminin tümünde ana ısı girdileri prekada ve fırında yakıtın yanmasıdır. Girdilerin kullanılabilirliği 718 kcal/kg kli. mertebesindedir. Gerçekleşen ısı transferi ve dönüşümler sayesinde çıkanlarda kullanılabilirliğin

korunumu 523.3 kcal/kg kli. mertebesinde. Ayrıca sisteme verilen enerjinin % 84'ü belirlenen koşullara göre kullanılabilirliği bulunmaktadır. Çizelge 6.6.'da döner fırın sistemine ait kullanılabilirlik analizi görülmektedir.

Çizelge 6.6. Ön ısıtıcı siklon ve döner fırın sistemi kullanılabilirlik analizi.

GİRİŞLER	h (kcal/Nm ³)	Debi (Nm ³ /h)	T _o (S-S _o) (kcal/Nm ³)	B (kcal/kg kli.)	%
Fırın Yanma Isısı				297.1	41.37
Preka Yanma Isısı				401.8	55.96
Fırın Yakıt Duyulur Isısı	12	11640	8.190	0.3	0.03
Preka Yakıt Duyulur Isısı	12	8607	8.190	0.2	0.03
Yeni Siklon Farin Duyulur Isısı	12	173405	10.951	1.2	0.16
Eski Siklon Farin Duyulur Isısı	12	112192	10.951	0.8	0.11
Farin Yanıcı Madde				15.9	2.21
Primer Hava	14	5400	12.881	0.0	0.00
Taşıyıcı Hava Fırın	33	1920	27.636	0.1	0.01
Taşıyıcı Hava Preka	33	2700	27.636	0.1	0.01
Sızıntı Hava (Soğ.+Fırın kafası)	8	24699	7.398	0.0	0.01
Sızıntı Hava (Siklon)	8	59790	7.398	0.1	0.01
FNA	8	25407	7.398	0.0	0.01
FNB	8	43933	7.398	0.1	0.01
FN1	8	12077	7.398	0.0	0.00
FN2	8	48490	7.398	0.1	0.01
FN4	8	40753	7.398	0.1	0.01
FN5	8	45305	7.398	0.1	0.01
FN6	8	35147	7.398	0.1	0.01
FN7	8	24403	7.398	0.0	0.01
FN8	8	25690	7.398	0.0	0.01
FN9	8	32357	7.398	0.1	0.01
Toplam Giriş				718.0	100.00
ÇIKIŞLAR					
Klinkerleşme Isısı				350.1	66.65
Yeni S. Farindeki Su. Buh.				2.1	0.40
Eski S. Farindeki Suyun Buh.				1.4	0.26
Yeni Eksoz Gazı Duyulur Isı	123	138986	75.538	36.2	6.89
Eski Eksoz Gazı Duyulur Isı	123	151673	75.288	39.9	7.59
Yeni Eksoz Gazı Toz Duy Isı	79	7803	52.229	1.1	0.22
Eski Eksoz Gazı Toz Duy. Isı	77	5049	51.360	0.7	0.13
Mid air	87	98763	58.594	15.3	2.92
Soğutucu Baca	71	108753	50.533	12.1	2.31
Klinker Duyulur Isısı	29	180577	27.772	1.2	0.22
Toz Kısmi Kalsinasyon				0.1	0.02
Fırın Yüzeyi Isı Kaybı				18.2	3.46
Ön-Isıtıcı S Yüzey Isı Kaybı				43.6	8.29
Soğutucu Yüzey Isı Kaybı				3.3	0.63
Toplam Çıkış				525.3	100.00

6.3. Döner Fırın Sisteminin II. Kanun Verimi

Döner fırın sisteminde kullanılan enerjinin kalitesinin değerlendirilmesi ve dönüşümler esnasında bu kalitenin bozunumunun incelendiği II. kanun verimi Çizelge 6.7.'de gösterilmiştir. Burada verime esas olarak sistemden istenen klinker oluşumu ele alınarak değerlendirilmiştir. Bunun yanında Çizelge 6.8.'de sistem dahilinde kullanılmayan ancak sistem dışında kullanılan midair ve eksoz gazlarından elde edilen kazanım verime ilave edilmiştir.

Çizelge 6.7. Döner fırın sisteminde kullanılabilirlik ve II. kanun verimliliği.

Klinker Üretimi:	180577(kg/h)	
Fırın Yakıt Yanma Isısı:	297.1(kcal/kg kli.)	% 41.37
Preka Yakıt Yanma Isısı:	401.8(kcal/kg kli.)	% 55.96
Diğer ısı girdileri:	19.2(kcal/kg kli.)	% 2.67
Toplam girişlere ait kullanılabilirlik	718.0(kcal/kg kli.)	
Klinkerleşme ısısı:	350.1(kcal/kg kli.)	% 48.76
Proses kullanımı	350.1(kcal/kg kli.)	% 48.76
Kullanılabilirlik kaybı	367.9(kcal/kg kli.)	% 51.24
Toplam Giren Enerjinin kullanılabilirliği	718.0(kcal/kg kli.)	% 84.19
2. Kanun Verimi	% 41.06	

Çizelge 6.8. Döner fırın sisteminde genişletilmiş kullanılabilirlik ve II. kanun verimi

Midair ile geri kazanım:	15.3(kcal/kg kli.)	% 2.14
Eksoz gazı ile geri kazanım:	76.1(kcal/kg kli.)	% 10.60
Toplam ısı geri kazanımı:	441.6(kcal/kg kli.)	% 61.50
Kullanılabilirlik kaybı:	276.5(kcal/kg kli.)	% 38.50
Toplam Giren Enerjinin kullanılabilirliği:	718.0(kcal/kg kli.)	% 84.19
2. Kanun verimi:	51.78%	

Her iki kanun açısından bakıldığında döner fırın sisteminde geliştirmeye açık noktalar bulunduğu görülmektedir. Bu imkanlar sonuçlar bölümünde tartışılmıştır.

7. ENERJİ TASARRUF İMKANLARI

Tipik bir çimento fabrikasına ait ön ısıtıcı ve kalsinatörlü döner fırın sisteminde kurulan dengeler sonucunda çeşitli ortaya sonuçlar özet olarak sunulmuştur. Burada amaç temel kayıpların ve deformasyonların kaynaklarının ve büyüklüklerinin ortaya konmasıdır. Özet kısmını takiben döner fırın sisteminde elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ile ortaya çıkarılan tasarruf imkanları ele alınacaktır.

7.1. Bulgular

Döner fırın sistemine ait klinker üretimi ve yakıt tüketimine ait değerlerler, temel ısı kayıpları ve kullanılabilirlik deformasyonları aşağıda gösterilmiştir.

Klinker üretimi ve yakıt tüketimi:

Ortalama klinker üretimi : 180577 kg/h

Ortalama kömür tüketimi

Prekadan beslenen : 11640.0 kg/h

Fırın kafasından beslenen : 8606.5 kg/h

Kömürün ortalama ısı değeri

Prekadan beslenen : 7105.7 kcal/kg

Fırın kafasından beslenen : 7105.7 kcal/kg

Özgül ısı tüketimi:

Özgül ısı tüketimi : 796.7 kcal/kg kli.

7.1.1 Temel Isı Kayıpları

Fırın yüzeyindeki ısı kaybı	: 23.1 kcal/kg kli.
Ön ısıtıcı siklonlarda yüzey ısı kaybı	: 70.0 kcal/kg kli.
Abgaz duyulur ısısı	: 195.4 kcal/kg kli.
Ön ısıtıcı siklonlarda sızıntı havadan dolayı kaybı	: 36.3 kcal/kg kli.

Yukarıdaki sonuçlarda görüldüğü üzere sisteme dışardan beslenen ısı miktarı 796 kcal/kg kli. mertebesinde olduğu görülmektedir. Ancak bu tip sistemler ait performans değerleri incelendiğinde benzer tesislerde 730 ila 740 kcal/kg kli.civarında ısı ihtiyacı ile çalıştığı gözlenmişti. Elde edilen verilere göre, özgül ısı tüketiminin yüksek oluşunun başlıca nedenleri şunlardır:

Ön-Isıtıcı siklonlarda yüzey ısı kaybı yüksektir.

Ön-Isıtıcı siklonlarda sızıntı hava miktarı fazladır.

Eksoz gazı duyulur ısısı yüksektir.

Sekonder hava sıcaklığı bir miktar düşüktür.

Sistem, kullanılabilirliğin deformasyonu açısından ise toplam 367.9 kcal/kg kli. mertebesinde olup sırası ile en büyük kullanılabilirlik deformasyonu:

Ön ısıtıcı siklonlarda	: 257.3 kcal/kg kli.
Klinker soğutucusunda	: 76.0 kcal/kg kli.
Döner fırında	: 43.0 kcal/kg kli.

Görüldüğü gibi ön ısıtıcı siklonlardaki kayıplar ve deformasyon yüksek mertebelerdedir. Aşağıda sırası ile ön ısıtıcı siklonlar, soğutma sistemi ve döner

fırında yanma şartları sırası incelenerek sistemin optimum performans değerine ulaşabilmesi için tasarruf edilmesi gerekli imkanlar incelenmiştir.

7.1.2 Ön Isıtıcı Siklonlar

Normal olarak dört kademeli ön-ısıtıcı siklon sistemlerinde, fırın gaz çıkışı ile kule gaz çıkışı oksijen değerleri sırasıyla % 1-2 ile % 4 mertebelerinde olmalıdır. Gaz debisinde sızıntı havadan dolayı % 20'e varan bir artış kabul edilebilir bir değerdir.

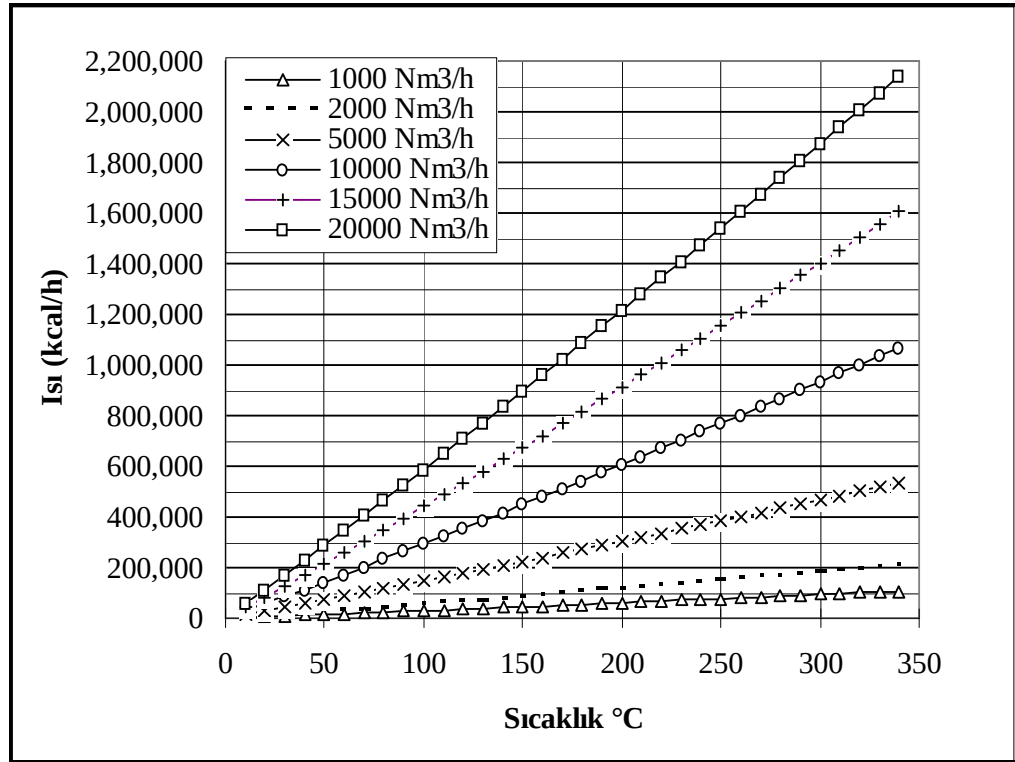
Çizelge 7.1.'de görüleceği üzere, preka ve fırın çıkışı gaz debisinde sızıntılardan dolayı % 30.5'luk bir artış olmaktadır. Siklon grubunda aynı kalsinasyon derecesi için Eski kule çıkışında oksijen değeri % 4.5'e ve Yeni kule çıkışında oksijen değeri % 6.0'e düşürüldüğü zaman toplam sızıntı hava miktarı % 25 mertebesine düşmektedir. Bu durumda elde edilen ısı kazancı 12.4 kcal/kg kli.'e eşdeğer olmaktadır. Çizelge 7.2.'de görüleceği üzere, Yeni siklon grubu kulede toplamda önemli sayılacak bir sızıntı hava yoktur. Yalnızca SN5 siklonunda biraz aşırılık vardır. Şekil 7.1.'de çeşitli debilerdeki sızıntı havaların değişik sıcaklıklara ısıtılması için gereken ısı miktarın gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Fırın Ön-Isıtıcı (Eski siklon Grubu) siklonlardaki gaz ve sızıntı hava debileri.

Eleman adı	Çıkıştaki Gaz debisi (Nm ³ /h)	Çıkıştaki O ₂ (%)	Sızıntı hava (Nm ³ /h)	Fırın çıkışına göre sızıntı	Açıklama
SN1	151673	6.23	6007	6.51	NORMAL
SN2	144433	5.67	10001	10.83	YÜKSEK
SN3	133566	4.50	3815	4.13	NORMAL
SN4	127081	3.67	6426	6.96	NORMAL
İNTİKAL	105288	4.10	12296	13.32	YÜKSEK
Fırın	92303	1.10			-
		Toplam	38544	41.76	YÜKSEK

Çizelge 7.2. Fırın Preka Ön-Isıtıcı (O Grubu) siklonlardaki gaz ve sızıntı hava debileri.

Eleman adı	Çıkıştaki Gaz debisi (Nm ³ /h)	Çıkıştaki O ₂ (%)	Sızıntı hava (Nm ³ /h)	Fırın çıkışına göre sızıntı hava (%)	Açıklama
SN5	138986	6.08	11608	11.2	YÜKSEK
SN6	125442	4.70	2897	2.8	NORMAL
SN7	121146	4.37	2532	2.4	NORMAL
SN8	113453	4.20	4209	4.1	NORMAL
PREKA	103912	3.73	0		-
		Toplam	21246	20.4	NORMAL



Şekil 7.1. Sızıntı havanın ısıtılması için gerekli enerji miktarlarının hava debisi ve sıcaklığı ile değişimi

Tek tek her bir siklonu terk eden malzeme ve gaz sıcaklıkları, Çizelge 7.3. ve 8.4.'de görüleceği üzere haricinde birbirine oldukça yakındır. Bundan dolayı siklonlardaki gaz ile malzeme arası ısı geçişinin iyi olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.3. Fırın (Eski) siklonlarda gaz ve malzeme sıcaklıkları.

	SN1	SN2	SN3	SN4	İntikal
Malzeme Sıcaklığı, °C	50/326	326/507	507/610	610/786	-
Gaz Sıcaklığı, °C (Giriş/Çıkış)	574/323	665/574	812/665	817/812	1096/817

Çizelge 7.4. Preka (Yeni) siklonlarda gaz ve malzeme sıcaklıkları

	SN5	SN6	SN7	SN8	Preka
Malzeme Sıcaklığı, °C	55/344	344/544	544/762	762/875	875/-
Gaz Sıcaklığı, °C (Giriş/Çıkış)	525/330	742/525	896/742	880/896	-/896

7.1.3 Klinker Soğutucusu

Bir kg klinker başına soğutucu fanlarının (F1-F9) sağladığı hava toplamı 1.85 Nm³/kg kli'dir. Soğutucu gaz dengesinden hesaplanan sızıntı hava miktarı ise 0.126 Nm³/kg kli.'dir.

Sekonder havanın debisi 0.426 Nm³/kg kli olup sıcaklığı 916 °C'dir. Soğutucuda sekonder ve tersiyer hava ile geri kazanılan ısı oranı sırasıyla % 40.01 ve % 28.81 değerindedir. Buna göre sıcak klinkerin ısısı toplam olarak % 68.82 oranında geri kazanılmaktadır.

Soğutucudan 108753 Nm³/h debide ve 219 °C sıcaklıkta gaz bacadan dışarı atılmaktadır. Buradaki ısı kaybı 7.5 Gcal/h değerindedir. Bu atık gaz ısısı, sonraki kısımlarda anlatılacak olan kurutma da ve absorpsiyonlu soğutmalarda kullanılması ile geri kazanılabilir.

Klinkerin soğutucu bandından çıkış sıcaklığı ortalama olarak 140 °C ve soğutma havası 1.85 Nm³/kg kli dir. Soğutma havası miktarının yüksek olmasına

rağmen klinkerin soğutucudan çıkış sıcaklığı yüksektir. Bu durum soğutmanın etkinliğinin iyi olmadığını göstermektedir.

7.1.4 Fırında ve Prekada Yanma

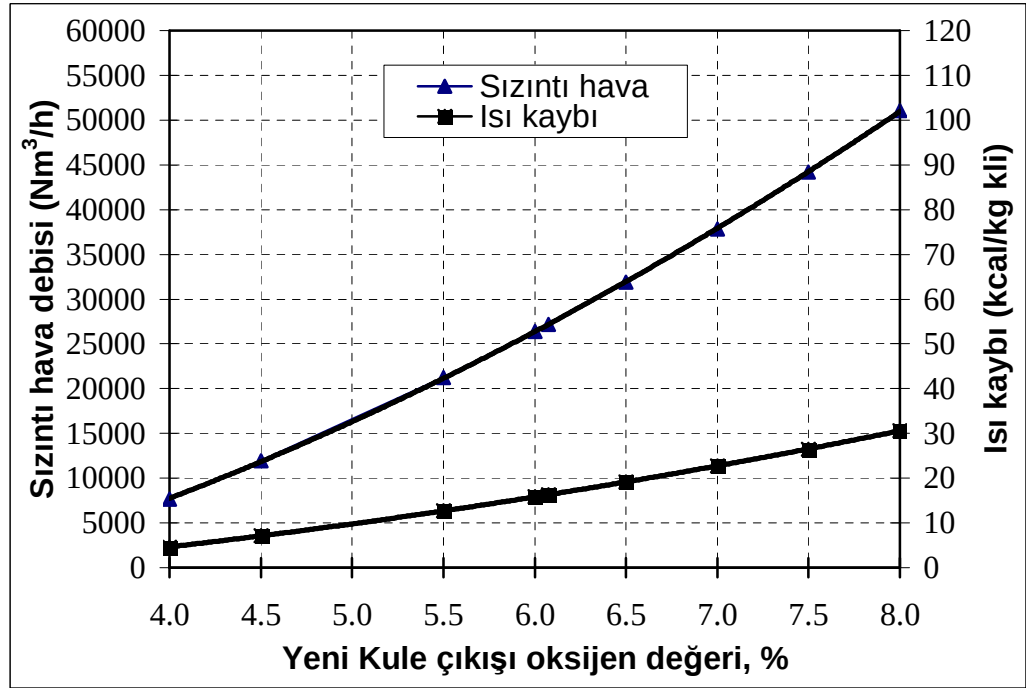
Döner fırının gaz çıkışında yapılan gaz analizleri sonuçları, normal çalışma şartlarında CO konsantrasyonunun % 0.0'a çok yakın, O₂ değerinin ise ortalama olarak % 1.1 olduğunu göstermiştir. Yapılan hesaplar sonucunda hava fazlalığının % 6.07 olduğu belirlenmiştir. Fırında herhangi bir eksik yanma belirtisinin (yüksek karbon monoksit konsantrasyonu) olmaması sebebiyle, fırında iyi bir yanmanın gerçekleştiği söylenebilir.

Preka çıkışında yapılan gaz analizleri sonuçları, normal çalışma şartlarında CO konsantrasyonunun % 0.2'den az, O₂ değerinin ise ortalama olarak % 3.73 olduğunu göstermiştir. Buna göre prekadaki hava fazlalığının % 28.4 olduğu belirlenmiştir.

Prekadaki hava fazlalığı nispeten yüksektir. Bu fazlalık büyük oranda dışardan sızan havadan kaynaklanmaktadır. Fazla havanın, soğutmadan alınan sıcaklığı yüksek (721 °C) tersiyer havadan sağlanması ile sistemin duyulur ısı kazancını arttırmak mümkündür. Ancak, hava fazlalığının yüksek oluşunun eksoz gazı vantilatörünün enerji tüketiminde de olumsuz etkisinin olacağı unutulmamalıdır.

7.2. Döner Fırın Sisteminin İşletilmesinden Kaynaklanan Tasarruflar

Preka ön ısıtıcı kuledeki (Yeni) siklonlardaki toplam sızıntı hava miktarı (farin besleme havası dahil preka çıkış gazının hacimsel olarak % 20.4'u kadardır. Bu sızıntı havanın neden olduğu ısı kaybı 23.4 kcal/kg kli.'dir. Burada yapılacak bir iyileştirmede sistemin hava kaçakları % 50 sinin önlenmesi yolu ile 11.6 kcal/kg kli. bir kazanç elde edilecektir. Şekil 7.2.'de oksijen konsantrasyonunun değişimini sızıntı hava debisine ve ısı kaybına etkisi görülmektedir.

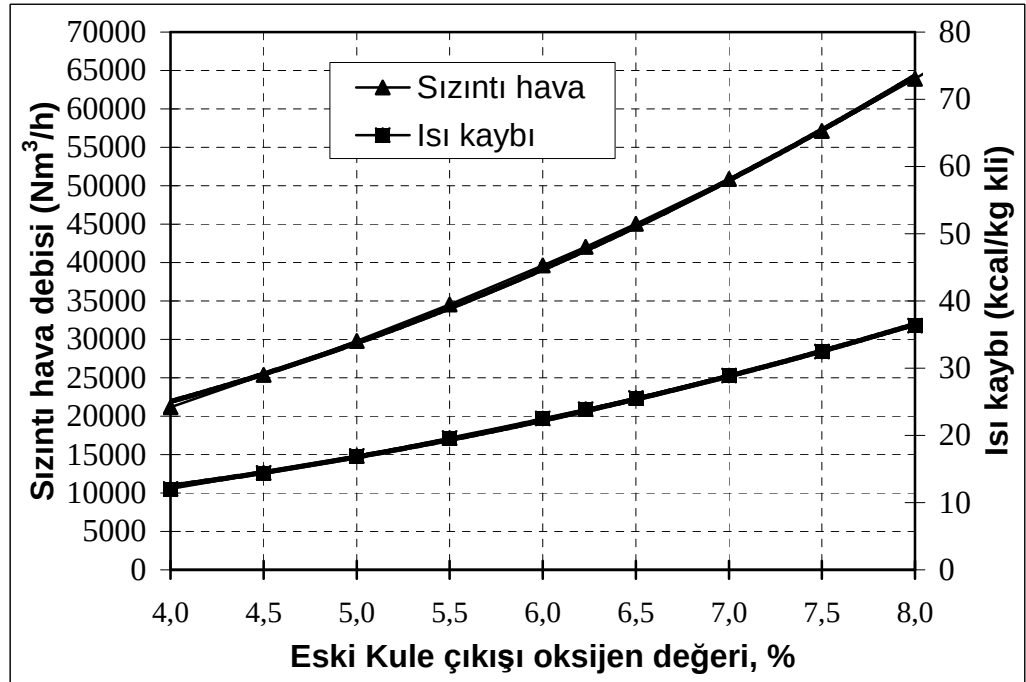


Şekil 7.2. Sızıntı havanın neden olduğu ısı kaybının preka siklon kulesi çıkışındaki oksijen değerine bağlı olarak değişimi

Fırın ön ısıtıcı kuledeki (Eski) siklonlardaki toplam sızıntı hava miktarı (farin besleme havası dahil fırın çıkış gazının hacimsel olarak % 41.7'i kadardır. Bu sızıntı havanın neden olduğu ısı kaybı 13.2 kcal/kg kli.'dır. Sızıntı havanın azaltılması ile 12.4 kcal/kg kli ısı kazancı sağlanacaktır. Bu değer yakıt tüketiminde yaklaşık % 1.6 yakıt tasarrufuna karşılıktır. Şekil 7.3.'de oksijen konsantrasyonunun değişimini sızıntı hava debisine ve ısı kaybına etkisi görülmektedir.

Prekada tersiyer havanın yanında 10246 Nm³/h debide 20 °C sıcaklıkta sızıntı hava alınmaktadır. Sızıntı % 60 oranında azaltılarak daha fazla miktarda tersiyer hava beslenmesi durumunda 8.6 kcal/kg kli 'e varan tasarruf imkanı mevcuttur. . Bu ısı kazancı ile fırının toplam yakıt tüketiminde % 1.08'lik bir tasarruf sağlamak mümkündür.

Sekonder hava sıcaklığı 923 °C olup, nispeten düşüktür. Sekonder hava sıcaklığının klinker soğutucusunun işletme parametreleri geliştirilerek 1000 °C'a çıkartılması durumunda, fırın sisteminde 15 kcal/kg kli.'e varan bir tasarruf sağlanabilir. Bu ısı kazancı ile fırının toplam yakıt tüketiminde % 1.5'lik bir tasarruf sağlamak mümkündür.



Şekil 7.3. Sızıntı havanın neden olduğu ısı kaybının Fırın kule çıkışındaki oksijen değerine bağlı olarak değişimi

Sözü edilen kalemlerdeki toplam ısı kazancı 47.6 kcal/kg kli olup; gerekli önlemlerin alınması halinde sistemin toplam ısı tüketimini 749.1 kcal/kg kli değerine düşürmek mümkündür.

7.3. Döner Fırın Sisteminde Geliştirmeye Açık Tasarruf İmkanları

Döner fırın sisteminde işletim duyarlılığı ile optimum çalışma koşullarının ve parametrelerinin sağlanması ile elde edilebilecek tasarruf imkanları bahsedilmiştir. Bu bölümde sisteminde mevcut kullanımı sistemde değişiklik yada dışarıda kullanıcı gerektiren tasarruf imkanları ele alınmıştır. Ayrıca düşük kullanılabilirliğe sahip ısılarında imkan dahilinde kullanılması böylece sistemin kullanılabilirlik deformasyonunun minimuma indirilmesi öngörülmektedir.

II. Kanun analizinde en yüksek kullanılabilirlik deformasyonuna yol açan ön ısıtıcı siklonlar, önceki bölümde sızıntı havalar açısından irdelenmiştir. Bunun

yanında aynı bölgede ısı transferinden kaynaklanan yüzey kayıplarının yüksek olduğu belirlenmiştir. Yüzey kayıplarının önlenmesi için siklonlar içerisindeki refrakter malzemenin yenilenmesi gerekmektedir. Bu sayede 10 ila 15 kcal/kg kli. arasında enerji tasarrufu mümkündür.

7.3.1 Klinker Soğutucularda Isıl Veriminin İrdelenmesi

Genel olarak soğutucuların kullanılma amacı;

- Klinkerin sıcaklığını belli bir değere düşürerek, yüksek sıcaklığın aktarma organlarına ve çimentonun öğütülmesine olan olumsuz etkisini azaltmak,
- Klinker ısısından faydalanarak sekonder ve tersiyer havayı ısıtmak ve
- Diğer amaçlar için ısı geri kazanmaktır.

Soğutucunun ısıl verimi, sekonder ve tersiyer hava ile sıcak klinker ısısının ne oranda geri kazanılabildiğinin bir göstergesidir. Verimi arttırabilmek için sekonder ve tersiyer havanın ya debisini ya da sıcaklığını arttırmak gereklidir.

Özgül ısı tüketimi, göreceli olarak yüksek olan bir fırın sisteminde, yakma havasının miktarı da yüksektir. Gereğinden fazla yakma havası kullanılması durumunda sistemdeki basınç kayıpları ve eksoz duyulur ısı kaybı artmaktadır. Basınç kaybının yükselmesi daha yüksek fan gücü gerektirir. Diğer yandan, özgül ısı tüketimi düştükçe, gereken yakma havası miktarının da azalacağı açıktır.

Fırının sekonder ve tersiyer hava gereksinimi ne kadar azalırsa soğutucunun etkinliği o kadar düşecektir. Bu nedenle, soğutucunun etkinliğini arttırabilmenin tek yolu bu havaların debisini değiştirmeksizin, yalnızca sıcaklığını yükseltmektir.

İzgaralı soğutuculardan çıkan atık havanın ısısından da yararlanmak yoluyla soğutucunun toplam etkinliği daha da arttırmak mümkündür. Ancak bu amaçla soğutucudan çekilen atık havanın sıcaklığı, gereğinden yüksek olmamalıdır. Aksi halde sekonder havanın sıcaklığı olumsuz yönde etkilenecek ve buda yakıt tüketiminin artmasına neden olacaktır.

Soğutucunun verimini arttırabilmek için soğutucunun reküperasyon bölgesinde daha kalın klinker yatakları ile çalışmak gerekir. Bunun amacı, bu

bölgede klinker ve hava arasında daha uzun bir temas süresi ve daha geniş bir temas alanı sağlayarak, ısı geçişini arttırmaktır. Böylece sekonder hava sıcaklığı ve buna bağlı olarak etkenlik artacaktır. Ancak, kalın yatakla çalışırken ızgara altı basıncının, dolayısı ile fan gücünün de daha yüksek olması gerekmektedir.

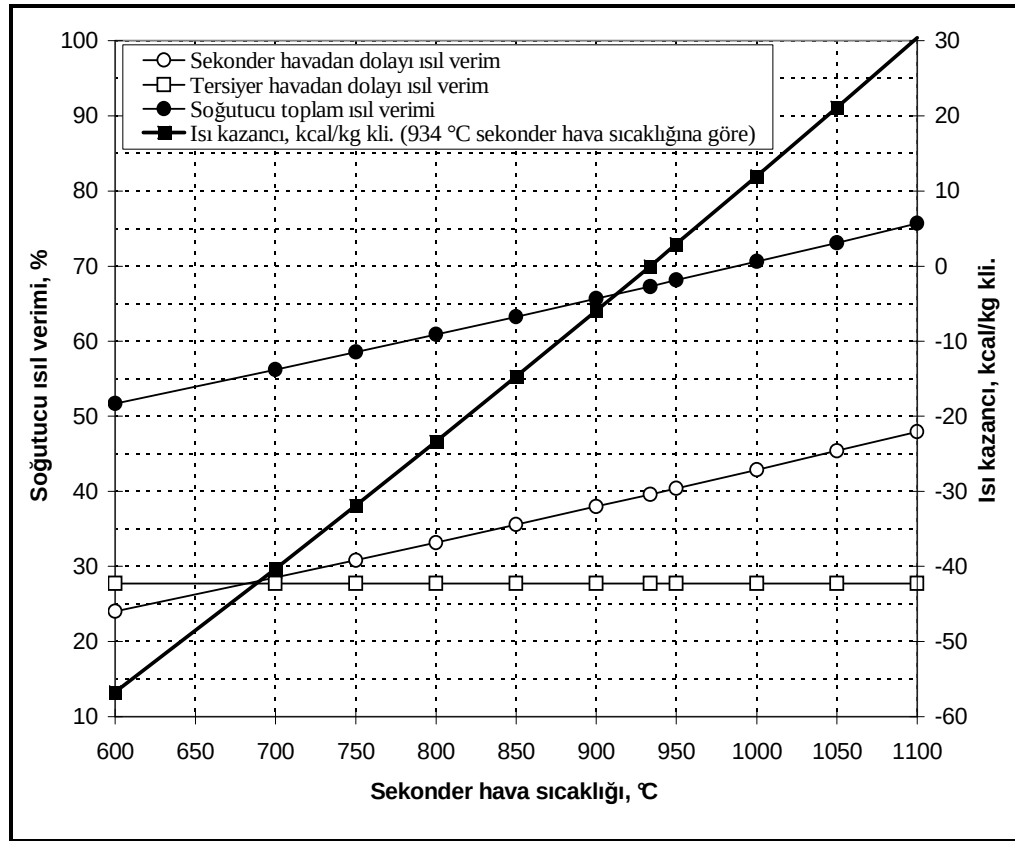
Daha kalın klinker yatağı ile çalışabilmek için köprü plakaların ve boş plakaların kullanılması gerekmektedir. Bu durumda yatağın iki yanında sabit klinker bantları meydana gelecek ve ortada daha dar, fakat kalın bir klinker yatağı ilerleyecektir.

7.3.1.1 Klinker Soğutucularda Isıl Enerji Tasarrufu Potansiyeli

Fırından 1350 °C sıcaklıkta çıkan klinkerin duyulur ısısı 352.7 kcal/kg klinker'dir. Fırın sisteminde yanma için kullanılan sekonder hava miktarı 0.426 Nm³/kg kli., tersiyer hava miktarı ise 0.397 Nm³/kg kli.'dir. Mevcut durumdaki debilere göre 916 °C'daki sekonder havanın ısı değeri 141.1 kcal/kg kli., 726 °C'daki tersiyer havanın ısı değeri ise 101.6 kcal/kg kli.'dir. Buna göre soğutucu verimi % 68 civarındadır.

Ölçülen değerlere göre hesaplanmış olan soğutucu ısı verimi ve ısı kazancının sekonder hava sıcaklığı ile değişimi Şekil 7.4.'de verilmiştir. Bu şekilde, tersiyer hava debisi ve sıcaklığı ile sekonder hava debisi sabit tutulmuştur. Bu şartlardaki mevcut durum referans olarak alınmış ve bu haldeki ısı kazancı sıfır olarak gösterilmiştir.

Normal olarak kalsinatörlü fırın sistemlerindeki soğutucu ısı veriminin % 70'in üzerinde olması gerekmektedir. Mevcut durum minimum değer olarak bu şartı sağlamış durumdadır. Ancak, azda olsa bir iyileştirme imkanı vardır. Örneğin, sekonder hava sıcaklığının 1000 °C'a yükseltilmesi ile elde edilecek kazanç 12 kcal/kg klinker'dir. Bu da yalnızca fırın kafasında % 3.5'lik, toplam sistemde ise % 1.5'lik yakıt tasarrufuna eşdeğerdir.



Şekil 7.4. Fırın soğutucusu ısı verimi ve ısı kazancının sekonder hava sıcaklığı ile değişimi

7.3.2 Döner Fırın Mantosundan Isı Geri Kazanımı

Döner fırınların mantosundan büyük oranda enerji kaybolmaktadır. Bu ısıнын belli oranda geri kazanılması ile önemli miktarda sıcak su üretimi mümkündür.

Döner fırın mantosundan ısı geri kazanılabilmesi için toplayıcılar kullanılabilir. Toplayıcı kullanımı ile ilgili ayrıntılı hesaplamalar, fırın mantosu için örnek uygulama sonuçları aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

Döner fırın mantosundan kaybedilen ısı ile ilgili hesaplamalar daha önce verilmiştir. Burada toplayıcıya gelen ısı, elde edilen ısı ve önerilen toplayıcı tipi verilmiştir.

7.3.2.1 Toplayıcıya Gelen Isı Miktarı

Manto yüzeyinden ancak ısıtım yolu ile ısı geri kazanmak mümkün olabilir. Mevcut durumdaki ısı kaybı, gerek manto yüzeyine ve gerekse fırın içersindeki klinkerleşme işlemine uygun bir sıcaklık dağılımı oluşturduğundan, bu durumu bozmayacak şekilde ısı kayıplarından yararlanmak için ısıtım toplayıcıları kullanılabilir.

Aşağıda toplayıcı için genel bazı eşitlikler verilmiştir.

Toplayıcı için enerji dengesi:

$$Q = \sigma \epsilon_{12} F_1 (T_1^4 - T_2^4) + h_1 F_1 (T_1 - T_a) \quad (\text{Eşitlik 7-1})$$

Toplayıcıya gelen faydalı enerji:

$$Q_t = \sigma \epsilon_{12} F_1 (T_1^4 - T_2^4) - K F_2 (T_2 - T_a) \quad (\text{Eşitlik 7-2})$$

veya

$$Q_t = Q - h_1 F_1 (T_1 - T_a) - K F_2 (T_2 - T_a) \quad (\text{Eşitlik 7-3})$$

şeklindedir.

Burada:

T_1 : manto yüzey sıcaklığı (ölçülen değer)

T_2 : toplayıcı yüzey sıcaklığı

T_a : manto ve toplayıcı arasındaki ortam veya dış ortam sıcaklığı

F_1 : manto dış yüzey alanı ($=\pi D_1 \Delta L$, $D_1=4.2$ veya 4.6 m)

F_2 : toplayıcı yüzey alanı ($=0.6\pi D_2 \Delta L$, $D_2=5$ veya 5.4 m)

K : toplayıcının alt ve üst yüzeylerinden ısı kaybına karşılık gelen toplam ısı geçiş katsayısı ($=8 \text{ W/m}^2\text{K}$)

σ : Stefan-Boltzman sabiti ($=5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$)

ε_1 : manto yüzeyi ışıınım yayma katsayısı ($=0.9$)

ε_2 : toplayıcı yüzeyi ışıınım yayma (yutma) katsayısı ($=0.9$)

ε_{12} : toplam yayma katsayısı (Eşitlik 7.4.)

$$\frac{1}{\varepsilon_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \quad (\text{Eşitlik 7-4})$$

Fırın mantosunda sıcaklık artışıını önlemek için manto ile toplayıcı arasında hava akımı olmalıdır. Bunu gerçekleştirebilmek için fırın çevresinin % 40'ı atmosfere açık bırakılmış ve toplayıcı ile manto arasındaki mesafe 40 cm olarak alınmıştır (toplayıcı çapı 5.4 m'dir). Hesaplamalarda toplayıcı alanı, ve 5.4 m çapındaki silindir alanlarının % 60'ı olarak kabul edilmiştir.

7.3.2.2 Toplayıcı Vasıtasıyla Elde Edilen Faydalı Isı

Toplayıcıda suyun ısıtılacağı sıcaklık kullanım amacına göre değişmektedir. Yüzey sıcaklığının 80°C olması durumunda bu toplayıcı için elde edilecek ısı miktarı 3.22 kW/m^2 'dir.

Toplayıcı faydalı ısısı, kasadaki bir kısım ısı kayıpları ihmal edildiğinde tamamen suya iletilecektir (kasanın arka ve yan yüzeylerinin tamamen yalıtıldığı kabul edilmiştir). Buna göre, toplatıcıdan geçen suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarının biliniyor olması durumunda suyun debisi (m) aşağıdaki eşitlik ile kolayca hesaplanabilir.

$$Q_t = m C_p (T_c - T_g) \quad (\text{Eşitlik 7-5})$$

Burada:

m : Su debisi

C_p : Suyun özgül ısısı

$T_{\text{ç}}$: Suyun toplayıcıdan çıkış sıcaklığı

T_g : Suyun toplayıcıya giriş sıcaklığı

Q : Suyun aldığı enerji

Örnek: 75/60 °C'da çalışan bir ısıtma sisteminin 4 adet toplayıcıya bağlanması durumunda (1629 kW ısı kapasite) ısıtılan su miktarı saatte 93 ton civarında olacaktır. Çizelge 7.5.'de çeşitli sıcaklıklara göre ısıtıcı faydalı ısıları görülmektedir.

Çizelge 7.5. Isıtıcı faydalı ısıları.

				Faydalı ısı, kW/m ²			Faydalı ısı, kW		
Toplayıcı	Fırın boyuna	Uzunluk	Alan	40 °C	60 °C	80 °C	40 °C	60 °C	80 °C
1	0-4.2 m arası	4.20	43	3.85	3.55	3.22	165	152	138
2	5 –24.7 m arası	19.70	201	3.80	3.50	3.18	763	702	637
3	25.5-44.3 m arası	18.85	192	3.76	3.45	3.13	721	663	600
4	50.5-64 m arası	13.50	137	2.47	2.17	1.85	340	298	254

7.3.2.3 Toplayıcı Yatırımının Ekonomik Analizi

Toplayıcı kullanılarak, fırın mantosundan ısı geri kazanmak için yapılacak yatırımın ekonomik analizinde "Geri Ödeme Süresi (GÖS) Yöntemi kullanılmıştır.

Hesaplamalarda kullanılan veriler;

Birim toplayıcı fiyatı :200 US\$/m² toplayıcı

İşletme ve bakım giderleri :İlk yatırımın % 10'u kadar

Yakıt fiyatı (fuel-oil) :150 US\$/ton

Kazanın ısı verimi :% 80

Yıllık faiz oranı :% 8 (US\$ bazında)

Kazanın yıllık çalışma süresi :5040 saat (günde 24 saat, yılda 7 ay)

"Geri Ödeme Süresi Yöntemi"ne göre elde edilen değerler, herbir toplayıcı için sırasıyla, Çizelge 7.6.'da verilmiştir. Buna göre GÖS değerleri, 9 ay mertebesindeir. Buradan, toplayıcılar için yapılacak yatırımın oldukça ekonomik olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.6. Toplayıcıların geri ödeme sürelerine göre değerlendirilmesi.

Toplayıcı	Faydalı Isı, kW	Faydalı yüzey m ²	Fiyatı	Bakım	Q	Yakıt t/ay	Yakıt t/yıl	Yakıt	GÖS	GÖS
1	138	3.222	8550	855	118.6	11.2	79	11799	0.78	9.4
2	637	3.175	40104	4010	548.3	51.9	364	54546	0.79	9.5
3	600	3.129	38374	3837	517.1	49.0	343	51441	0.81	9.7
4	254	1.847	27483	2748	218.6	20.7	145	21741	1.45	17.4

7.3.2.4 Önerilen Toplayıcı Tipi

Manto etrafına, ona paralel ve 40 cm. mesafeye yerleştirilecek olan toplayıcı, siyah yüzeyli alüminyum kollektör profillerinden oluşmuştur. Bu profiller, 5 ile 5.4 m çapında yarım ay şeklinde kıvrılmakta, yanyana dizilmekte, ve alt ve üst uçlara su toplayıcıları bağlanmaktadır. Taşıyıcı kasalar içersine yerleştirilerek dış yüzeyi ısı olarak yalıtılmaktadır. Yalıtım kalınlığı 50 mm'dir. Toplayıcının ısıtım alan yüzü için imalat, montaj, bakım ve çevre şartları nedeniyle taşınım ısı kaybının azaltılması açısından saydam örtü kullanılması uygun olacaktır. Ayrıca, atmosfer şartlarından etkilenmemesi için yalıtımın korunması gerekmektedir. Bu amaçla, galvaniz veya alüminyum levha tipi koruyucu plakalar kullanılmalı ve yalıtım su geçirmez hale getirilmelidir.

Toplayıcı boru profilleri çapı 15 mm ve et kalınlığı 1.5 mm civarındadır. Mantonun gerektiğinde izlenebilmesi amacıyla, toplayıcı fırın eksenine dik olacak şekilde kızaklanmalıdır.

7.3.3 Absorpsiyonlu Soğutma Sistemi Uygulaması

Absorpsiyonlu soğutma sistemleri işletme içerisinde düşük kullanılabilirliğe sahip atık ısıların kazanılmasını sağlamaktadır. Bunun yanında kloro floro karbonları atmosfere çıkışının önlenmesi en önemlisi işletme kolaylıkları ve düşük enerji tüketimleri ile cam ve çimento gibi sanayilerde hatırı sayılır uygulamalar ile gündemdedir. Klasik soğutma sistemlerine nazaran daha düşük soğutma etkenliğine sahip olsa dahi absorpsiyonlu soğutmaların atık ısı kullanmaları nedeni ile cazibesi daha yüksektir.

Soğutma ihtiyacının yılın büyük bir bölümünde sürdüğü bölgelerde geri ödeme süreleri yüke bağlı olarak 1 yıl civarındadır. Çimento fabrikalarında kullanım, yerleri elektrik panolarının bulunduğu odaların iklimlendirilmesi, ofislerin ve yaşam mahallerinin iklimlendirilmesidir. Soğutma yükünün büyük tutulması halinde daha ekonomik olan absorpsiyonlu soğutma sistemleri merkezi soğutma ünitelerinde oluşmaktadır. Bu nedenle soğutma sistemi fiyatı yanında soğutucu akışkanın iletimi ve dağıtımı ilave maliyet yaratmaktadır. Bu ilave maliyet fabrikanın koşullarına ve yerleşimine göre farklılıklar arz etmektedir

Absorpsiyonlu sistemler içerisinde daha düşük sıcaklıklar ile beslenebilmeleri nedeni ile son yıllarda Lityum bromür solüsyonu ile çalışanlar tercih edilmektedir. Sistem prensip olarak kazanılması düşünülen atık ısı ile vakum ortamında buharlaşmanın sağlanması ve soğutma kulesinde gelen akışkan ile buharın soğutularak kondense edilmesi sistemi ile çalışmaktadır. Atık ısının kazanılması için mevcut sistemlerde kızgın su veya 1 bar basınçta doymuş buhara dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu durum çimento fabrikalarında atık gaz hattı üzerine uygulanan eşanjörle sağlanmaktadır.

7.3.3.1 Absorsiyonlu Soğutma Sisteminin Ekonomik Analizi

Absorsiyonlu soğutma sisteminin ekonomik analizi için fırın soğutmasından atmosfere bırakılan gazlar irdelenmiştir aşağıdaki Çizelge 7.7.'de bu gazları debisi ve sıcaklığı görülmektedir.

Çizelge 7.7. Fırın soğutma gazı özellikleri.

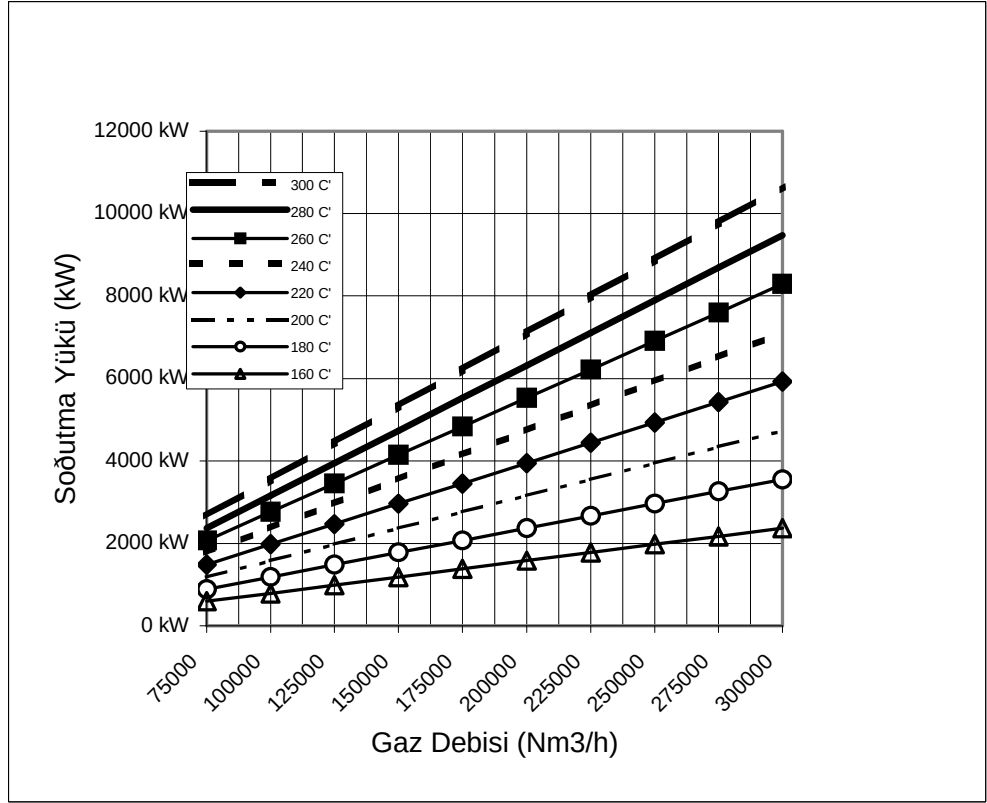
GİRİŞ	Soğutma Baca Gazı
GAZ SICAKLIĞI (°C)	198
GAZ DEBİSİ	125223
GAZ Cp	0.34
ÇIKIŞ SICAKLIĞI	120

Absorpsiyonlu soğutma sisteminin yılın 200 günü kullanıldığı ve elektrik fiyatını 5.5 cent olması durumunda klasik sistemler ile yapılan mukayese Çizelge 7.8.'de verilmiştir.

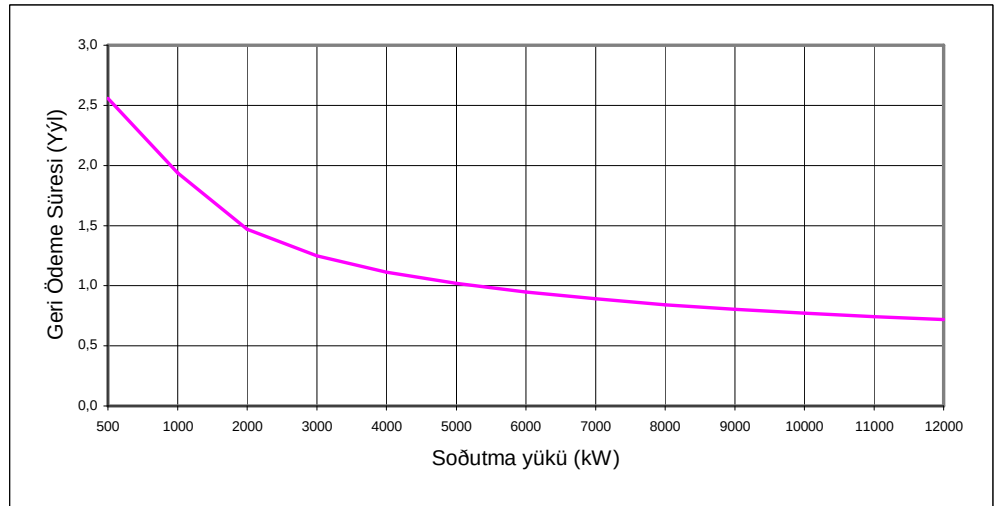
Çizelge 7.8. Absorpsiyonlu soğutma sistemleri ile klasik sistemlerin mukayese.

HESAPLAR	Soğutma Baca Gazı
ATIK ISI	9795 kW
Faydalı Güç	3863 kW
Abs. Soğut. Gücü	1931 kW
Klasik Sğt. Sis.	966 kW
Klasik Sğt. Sis.Tük.	\$ 53.11
YILLIK KAZANÇ	\$ 254.928

Absorpsiyonlu soğutma sistemleri için uygulanan Şekil 7.5. ve 7.6.'da atık gazın sıcaklık ve debisine bağlı olarak elde edilebilecek soğutma yükü ve geri ödeme süreleri verilmiştir. Maliyetler hesaplanırken ünite fiyatları göz önüne alınmış olup soğutucu akışkanın iletimi ve dağıtımı için ortaya çıkan maliyetler hesabın dışında bırakılmıştır



Şekil 7.5. Absorpsiyonlu soğutma sistemi ile kazanılan soğutma yükü.



Şekil 7.6. Absorpsiyonlu soğutma sisteminin geri ödeme süresi.

8. SONUÇ

Tipik bir çimento fabrikasında bulunan; ön ısıtıcı ve kalsinatör siklonlar, preka, döner fırın ve soğutmayı kapsayan klinker üretim prosesi, dikkate alınarak hazırlanan bu çalışma sırasında enerji ve kullanılabilirlik analizleri ile mevcut prosesinde enerji tasarrufu açısından iyileştirme alanları belirlenmiştir. Bu iyileştirme alanlarının her biri için örnek uygulamalar geliştirilmiştir. Düşünülen geliştirmeler öncesinde klinker üretim hattının spesifik enerji tüketimi 797 kcal/kg kli. mertebesinde olup gerçekleştirilen analizler ışığında en önemli ısı kayıpları ve tasarruf potansiyelleri aşağıdaki şekilde ortaya çıkarılmıştır:

- Ön ısıtıcı siklonlarda ve prekada sızıntı havaların azaltılması ile sırası ile 12 kcal/kg kli. ve 12 kcal/kg kli.,
- Preka da gerçekleşen yanma için daha fazla tersiyer hava kullanımı 9 kcal/kg kli.,
- Sekonder Hava sıcaklığının artırılması ile 15 kcal/kg kli. mertebesinde tasarruf imkanı belirlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen işletmenin iyileştirilmesi yanında proses iyileştirmeleri yolu ile bazı önemli tasarruf imkanları mümkün görülmektedir. Proses iyileştirmelerinin belirlenmesi sırasında yatırım maliyetlerinin etkinliğinin irdelenmesi sonucu aşağıdaki imkanlar hem teknik hem de finansman açısından uygun ve yeterli bulunmuştur:

- Siklon iç yüzeylerinde bulunan refrakter malzemelerin iyileştirilmesi ile 10 kcal/kg kli. tasarruf,
- Döner fırın mantosundan ısı geri kazanımı 1300 kW (7 kcal/kg kli.),
- Soğutma bacasına absorpsiyonlu soğutma uygulaması ile 3800 kW mertebesinde atık ısının kullanımı ile 1900 kW soğutma gücü eldesi, mümkündür.

İyileştirme potansiyeli içerisindeki tüm işletme ile ilgili maddeler ve prosese ait ilk madde spesifik ısı enerjisi tüketimini doğrudan etkilemektedir. Bu maddelerin toplamında elde edilecek tasarruf miktarı 58 kcal/kg kli. ve iyileştirilmiş spesifik ısı enerjisi tüketimi 739 kcal/kg kli. olarak ön görülmektedir.

Bu durumda toplam kömür tüketiminde % 8 lik bir düşüş sağlanacaktır. Ayrıca spesifik ısı enerjisi tüketimine doğrudan etkide bulunmayan ancak elektrik tüketimi üzerinde önemli tasarruf imkanları sağlayan proses iyileştirmelerinin son iki maddesi dikkate alındığında 5200 kW mertebesinde atık ısı değerlendirilmiş olacaktır.

Tüm bu imkanlar değerlendirildiğinde yıllık kömür tüketiminde 14000 ton, işletmenin enerji maliyetlerinde 880000 ABD Doları ve atmosfere atılan karbon dioksit miktarı 38000 ton azaltılacaktır.

Bu çalışmada ele alınan fabrika ülkemizde kurulu bulunan üst seviye teknoloji ile dizayn edilmiş üretim hattına sahip bir tesistir. Ancak diğer fabrikalarımızın büyük çoğunluğunun üretim hatları daha eski teknolojiye dayanmaktadır. Bu nedenle bu tesiste bulunan % 10 mertebesindeki enerji tasarrufu imkanı çimento sektörü için alt seviye olarak kabul edilmelidir.

Bu çalışma ışığında elde edilen bilgi ile çimento sektörü için önemli sayılabilecek enerji tasarrufu imkanları açığa çıkarılmıştır. Bu önerilerin hayata geçirilmesi ile Türk çimento sanayinin maliyet etkinliği ve pazarda rekabet gücünün artırılması yolunda adımlar atılmıştır. Bu sayede hem ulusal ekonomimize katkıda bulunulmuş hem de kısıtlı kaynakların kullanımı geliştirilmiştir.

Bu ve benzeri çalışmalar ile dünya uluslarının Kyoto anlayış mutabakatı çerçevesinde geliştirmeye çalıştıkları global kaynakların ve çevrenin korunarak gelecek kuşaklara daha yaşanabilir bir şekilde teslim edilmesi amacı yolunda ilerlenecektir.

Bu amaç doğrultusunda çimento sektörü veya cam, demir çelik gibi diğer enerji yoğun sektörlerde yapılacak benzer başka çalışmalar ile ülkemizin gayri safi milli hasıla başına tükettiği enerji azaltılarak verimlilik arttırılacaktır.

KAYNAKLAR

Büyüktür A.R. (1991). *Termodinamik Cilt 2 Uygulama Esasları*, Uludağ Üniversitesi Basımevi, Bursa.

Boateng A.A. and P.V. Barr (1996). “A Thermal Model for the Rotary Kiln Including Heat Transfer within the Bed”, *International Journal of Heat Mass Transfer*, 39, No. 10, pp. 2131-2147.

Carvalho M. da G. and M. Nogueira (1997). “Improvement of Energy Efficiency in Glass Melting Furnaces, Cement Kilns and Baking Ovens”, *Applied Thermal Engineering*, 17, No. 8-10, pp. 921-933.

Çengel Y.A. and M.A. Boles (1998). *Thermodynamics An Engineering Approach*, 3rd Edition, Mc Graw Hill, Boston.

De O. Madivate C. M. (1999) “Theoretical Energy Requirement for Burning Clinker”, *Cement and Concrete Research*, 29, 695-698.

Dinçer S. (1984). *Kimya Mühendisliğinde Denge Süreçleri Termodinamiği*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Environmental Protection Agency (1996). *Protection of Environment*, The Office of the Federal Register National Archives and Records Administration, Washington.

Khurana S., B. Rangan, U. Gaitonde (2002). “Energy Balance and Cogeneration for a Cement Plant”, *Applied Thermal Engineering*, 22, 485-494.

Lea F.M. (1971). *The Chemistry of Cement and Concrete*, 3rd Edition, Chemical Publishing Co. Inc., Newyork.

Liu F., M. Ross, S. Wang (1995). “Energy Efficiency of China’s Cement Industry”, *Energy*, 20, No. 7, 669-681.

Moran M.J. and H.N. Shapiro (1995). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., Newyork.

Peray K.E. and J.J. Waddell (1972). *The Rotary Cement Kiln*, Chemical Publishing Co. Inc., Newyork.

Reid R.C., J.M. Prausnitz, B.E. Poling (1987). *The Properties of Gases and Liquids*, 4th Edition, Mc Graw Hill, Boston.

Sheinbaum C. and L. Ozawa (1998). “Energy Use and CO₂ Emissions for Mexico’s Cement Industry”, *Energy*, 23, No. 9, pp. 725-732.

Stull D.R., E.F. Westrum, G.C. Sinke (1969). *The Chemical Thermodynamics of Organic Compounds*, John Wiley & Sons Inc., Newyork.

Türk Çimento Müstahsilleri Birliği (2001). *Çimento ve Beton Dünyası*, 1-33 no’lu sayılar.

Türk Beton Üreticileri Birliği WEB sitesi. www.thbb.org.tr

The European Cement Association (1999). *Best Available Techniques for the Cement Industry*, CEMBUREAU, Brüksel.

Özdoğan S. and M. Arıkol (1995). “Energy and Exergy Analyses of Selected Turkish Industries”, *Energy*, 20, No. 1, 73-80.

Weast R.C. (1976). *Handbook of Chemistry and Physics*, 56th Edition, CRC Press, Cleveland.

Worrel E., N. Martin, L. Price (2000). “Potentials for Energy Efficiency Improvement in the US Cement Industry”, *Energy*, 25, 1189-1214.

ÖZGEÇMİŞ

Namık Ünlü, 1 Kasım 1969 tarihinde İzmit – Kocaeli’nde doğmuştur Babasının Almanya’da işçi olarak çalışmasından dolayı 1 yaşından itibaren ilkokulun bir bölümüne değin Almanya’da kalmıştır. Ailesinin kesin dönüşü ile Selimiye İlkokuluna devam ederek buradan mezun olmuştur. Orta ve lise öğrenimini Kadıköy Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. 1990 yılı güz döneminde Yıldız Üniversitesinde Makine Mühendisliği lisans eğitimine başlamıştır. 1994 bahar döneminde bu eğitimi iyi derece ile tamamlamıştır. Aynı yıl Makine Asteğmen olarak askerlik hizmetine başlamıştır. Mart 1996 itibari ile Dz.K.K. Kara Araçları ve İş Makinaları Tamir Fabrikası Komutanlığı Teknik Müdürlüğü emrinde askerliğini tamamlayarak AEG ETİ transformatör fabrikasında işe başlamıştır. Mart 1996 ile Haziran 1998 arasında bu fabrikada devam eden görevinden istifa ederek, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsünde Araştırmacı olarak işe başlamıştır. Halen bu görevine devam etmekte olup bugüne değin çeşitli projelerde görev alarak, bir kısmında proje yürütücülüğü görevlerini başarıyla sürdürmüştür. 1999 yılında Japon hükümetinden kazandığı burs ile enerji tasarrufu konusunda aynı ülkede 2 ay süren eğitime katılmıştır. Namık Ünlü İngilizce ve Almanca bilmektedir. 1996 yılından beri yine Makine Mühendisi olan eşi Aysun Ünlü ile evlidir. Ece İrem ve Ege Sinem isminde iki kız babasıdır.

EKLER

Ek – 1 ASTM D 3302 – 91 Standart test method for total moisture in coal

Ek – 2 ASTM D 1989 – 92 a Standart test method for gross calorific of value
of coal and coke by microprocessor controlled isoperibol calorimeters

Ek – 3 ASTM 5373 - 93 Standart test method for elemanter analyses of coal
and coke