



**ÇİMENTO SANAYİ'NDE
ISI EKONOMİSİ ANALİZİ**

Tansel YILMAZ

**Yüksek Lisans Tezi
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

ISPARTA-1995

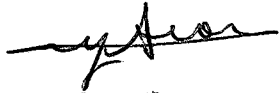
T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİMENTO SANAYİİ'NDE ISI EKONOMİSİ ANALİZİ

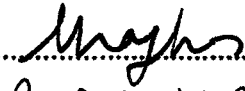
TANSEL YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



Doç. Dr. Mustafa ACAR
(Danışman)



Prof. Dr. Mustafa BAYHAN



Doç. Dr. Mehmet KUNDUZ

ÖZET

Çimento Sanayii, üretim sürecindeki kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel işlemler dolayısıyla yüksek miktarda enerji tüketen bir endüstri dalıdır. Bu sektörde, enerji maliyeti diğer harcamalardan daha fazladır. Dolayısıyla bu sektördeki enerji tüketimini azaltmaya yönelik küçük bir çaba, büyük maddi kazançlar sağlayacaktır.

Çimento fabrikalarında, üretim sürecinde ısı enerjisi tüketimi, toplam üretim maliyetinin %30-40 'ını oluşturmaktadır. Bu tüketimin hemen tamamı döner fırınlarda gerçekleşmektedir.

Bu çalışmada, çimento sanayiinde ısı enerjisinin verimli olarak kullanılması için, üretim sürecinde alınması gereken tedbirler üzerinde durulmuştur. Ayrıca, istenen özellik ve miktarda klinker üretimine uygun, ısı ekonomisi sağlamak amacıyla üzerinde durulması gereken hususlar belirlenmiştir.

Bunun yanısıra enerjinin en çok tüketildiği yer olan döner fırındaki ısı olayları incelenmiş; fırındaki kayıp ısı enerjisinin büyüklüğü bir ısı bilançosu yapılarak gösterilmiştir. Sonuç olarak elde edilen bulgular, atık ısıdan faydalanmaya yönelik ilerideki çalışmalara baz teşkil edecektir.

ABSTRACT

The production of cement is a branch of industry which consumes great amount of energy due to the various chemical reactions and physical processes taking place in the production. In this sector, cost of energy is more than all other expenses. Consequently, even a small effort in order to decrease energy consumption in this sector can result in big saving.

In a cement factory, the cost of heat energy which is consumed in the production period makes up 30-40 % of the total production cost. Almost all of the energy consumed is spend in rotary kiln.

In this study, steps that must be taken in order to use heat energy in the most productive way without changing the properties and amount of produced klinker is determined.

Moreover, chemical reactions, in the rotary kiln where the most of the energy is used, is examined. The greatness of the waste heat energy is shown on a heat balance sheet. As a result, obtained information may serve to the future studies on the use of the waste heat energy.

ÖNSÖZ

Bir endüstrinin güçlü olarak varlığını sürdürebilmesi için, dış pazarlara açılıp rekabet edebilmesi şarttır. Bunun için de ürün kalitesinin yüksek, maliyetinin düşük olması gereklidir. Bu da, üretim maliyetinde en büyük rolü oynayan enerji ve teknolojik ısı maliyetinin düşük olmasıyla mümkündür. Bu amaçla ısı ekonomisine gerekli önem verilmelidir.

Kullanılan ısı enerjisinde ekonomi sağlayabilecek her çareye başvurulması ve bunun için de gerekli masraflardan kaçınılması gereklidir. Enerjinin en çok sarfedildiği sektör çimento sektörü olduğu için, bu çalışmada Göltaş Çimento Fabrikası II. Hat Döner Fırının ısı ekonomisi analizi yapılmış ve ısı bilançosu çıkartılmıştır.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam sayın Doç. Dr. Mustafa ACAR 'a teşekkür ederim.

Bunun yanısıra yazım konusunda büyük yardımları olan Dr. Müh. İbrahim ÜÇGÜL'e, Arş. Gör. Zehra ALKAN'a, Arş. Gör. Ümrhan YİĞİT'e, Arş. Gör. Reşat SELBAŞ'a, Arş. Gör. Salih FİŞEK'e, Göltaş Çimento Fabrikası mühendisleri ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
 1. GİRİŞ	 1
 2. DÖNER FIRINLAR	 3
2.1. Genel Tanıtım	3
2.2. Döner Fırın Tipleri	3
2.3. Döner Fırın Bölgeleri	3
2.3.1. Kalsinasyon bölgesi	4
2.3.2. Emniyet bölgesi	4
2.3.3. Geçiş bölgesi	4
2.3.4. Sinter bölgesi	4
2.3.5. Havuzlama bölgesi	5
2.4. Ön Isıtıcı Kuru Sistem Fırında Siklonlu Ön Isıtıcıların Önemi	6
2.4.1. Enerji tasarrufu	6
2.4.2. İstihsal artışı	7
2.4.3. Döner fırının boyunun ksalması	7
3. ISI TÜKETİMİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER	9
3.1. Hammaddeler ve Isı Tüketimine Etkileri	9
3.1.1. Kalker (kireçtaşı)	9
3.1.2. Mam	9
3.1.3. Kil	10
3.1.4. Klinkerin temel yapısı	11
3.1.4.1. Trikalsiyum silikat, 3CaOSiO_2 -alit	11
3.1.5. Kimyasal parametreler	13
3.1.5.1. Silis modülü	13
3.1.5.2. Alüminyum modülü	15

3.1.5.3. Kireç standardı	16
3.1.5.4. Magnezyum	16
3.1.5.5. Alkali (Na_2O ve K_2O), kükürt ve klorürler	16
3.1.5.6. Sıvı faz	19
3.1.5.7. Serbest silis	20
3.1.6. Fiziksel parametreler	20
3.2. Yakıt Özelliklerinin Isı Sarfıyatına Etkisi	21
3.3. Yakma Teçhizatı ve Alevin Yakıt Tüketimine Etkisi	25
3.4. Yakma Havasının Yakıt Sarfıyatına Etkisi	26
3.4.1. Sekonder hava	27
3.4.2. Primer hava	28
3.4.3. Kaçak hava	29
3.5. Proses Kontrol	29
4. DÖNER FIRINDA ISI TRANSFERİ	32
5. DÖNER FIRIN ISI BALANSI	34
5.1. Fabrikanın Kimya Laboratuvarı ve İşletme Raporlarından Alınan Değerler	34
5.2. Kuru Sistem Çimento Üretiminde Döner Fırın Isı Balansı	35
5.2.1. Isı girdileri	35
5.2.1.1. Döner fırına birim klinker üretimi başına verilen ısı	35
5.2.1.2. Farinin ön ısıtıcıya girmeden önceki ısı kazancı	36
5.2.1.3. Soğutucu çıkışında ön ısıtılmış havanın aldığı ısı	36
5.2.2. Isı çıktıları	38
5.2.2.1. Klinker oluşum ısısı	38
5.2.2.2. Farinden oluşan CO_2 'nin baca gazı içinde götürdüğü ısı değeri	38
5.2.2.3. Farinde bulunan nemin buharlaşarak baca gazı içinde götürdüğü ısı	40
5.2.2.4. Soğutmadan çıkan klinkerin götürdüğü ısı	41
5.2.2.5. Ön ısıtıcı çıkışında gazla atılan ısı	41
5.2.2.6. Soğutucu ünite çıkışında atılan ısı	46
5.2.2.7. Radyasyon, konveksiyon kayıplarıyla, yanma verimi ve diğer kaçaklar	46
5.3. Hava Fazlalık Katsayısına Bağlı Olarak Ön Isıtıcı Çıkışındaki Kuramsal O_2 Oranı	50
6. SONUÇLAR	52
KAYNAKLAR	54
ÖZGEÇMİŞ	55

SİMGELER LİSTESİ

Al_2O_3	Alüminyum oksit
$CaCO_3$	Kalsiyumkarbonat
CaO	Kalsiyum oksit
c_p	Sabit basınçtaki özgül ısı
Fe_2O_3	Demir oksit
H_u	Kömürün alt ısı değeri
h	Özgül entalpi
m	Madde miktarı
m_s	Soğutucudan kg.klinker başına atılan hava miktarı
m_{YH}	Teorik yakma havası miktarı
m_{YSC}	Kg.klinker başına oluşan baca gazı miktarı
M	Mol kütlesi
NO_x	Azot oksitler
q	Özgül ısı tüketimi
P	Basınç
R	Özel gaz sabiti
SiO_2	Silisyum dioksit
T	Sıcaklık($^{\circ}K$)
t	Sıcaklık($^{\circ}C$)
V	Hacim
$\bar{R}$	Genel gaz sabiti
λ	Hava fazlalık katsayısı($\lambda > 1$)
θ	t 'ye bağlı yapılan dönüşüm sıcaklığı($^{\circ}C$)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Döner fırın bölgeleri	6
Şekil 2.2. Yaş ve kuru sistem çimento üretiminde döner fırındaki ısıl prosesler	7
Şekil 2.3. Göltaş çimento fabrikası ön ısıtıcılı kuru sistem döner fırını	8
Şekil 3.1. Silikat modülünün klinker oluşum sıcaklığına etkisi	15
Şekil 3.2. Kireç doygunluk faktörünün klinker oluşum sıcaklığına etkisi	21
Şekil 3.3. Kademeli ön ısıtıcılı bir döner fırında kömür kül oranına bağlı olarak spesifik ısı sarfiyatı	23
Şekil 3.4. Eksik yanma ve fazla hava kaybı	27
Şekil 5.1. Sankey diyagramı	49

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Saf klinker bileşiklerinin basınç dayanımları (kg/cm ²)	11
Çizelge 3.2. Uçucu madde seviyeleri	17
Çizelge 5.1. Yanmada reaksiyona giren ve çıkan elemanların molekül ağırlıkları	43
Çizelge 5.2. Yanma sonu ürünlerinin kütleli miktarları	43
Çizelge 5.3. Kuru sistem döner fırın için ısı bilançosu	48



1. GİRİŞ

Çimento sanayii yüksek miktarda enerji tüketen bir endüstri dalıdır. Bu sanayide enerji tüketim bedeli toplam giderler içerisinde % 50'lik bir pay ile ilk sırada yer almaktadır. Enerji tüketim bedelinin % 65' i elektrik, % 35' i ısı enerjisi tüketimine harcanmaktadır.

Çimento sanayiinde ısı enerjisi ısıtma amacıyla (sosyal-idari tesisler ve fuel-oil tanklarında), kurutma amacıyla (kömür ve hammadde kurutucuları ve değirmenlerinde), klinker elde etmek için gerekli kimyasal tepkimelerin oluşması amacıyla da, döner fırınlarda kullanılır. Kullanılan ısı enerjisinin, çimento üretimi değişken maliyetinin üçte birinden fazlasını oluşturduğu gözönüne alınırsa, enerji tasarrufu amacıyla üzerinde durulması gereken en önemli unsurun, ısı enerjisi olduğu söylenebilir.

Isı enerjisinin büyük bölümü (~ % 85) döner fırında sarfedilir. Döner fırının işlevi, hammaddenin sıcaklığını arttırarak çimento klinkerinin oluşması için gerekli kimyasal reaksiyonlara uygun bir ortam sağlamaktır. Hammadde sıcaklığının arttırılarak kimyasal reaksiyonların meydana gelmesini sağlayan ısı enerjisi, bir yakıtın yakılmasıyla elde edilir.

Üretim maliyetinin düşük tutulması amacıyla yakıt tüketimi, yeterli kaliteye sahip yüksek miktarda klinker üretimine uygun olacak şekilde, mümkün olan en düşük seviyede tutulmalıdır.

Yakıt sarfeden bir sistemin ekonomik olarak çalışması, genel olarak prosesin ısı verimine bağlanabilir. Bu verimin saptanması için, sistem normal çalışma koşullarındayken bir ısı balansı oluşturulmalıdır. Bu dengede sisteme verilen ve sistemden çıkan ısı enerjisi birbirine eşitlenir.

Bir ısı balansı kurulduğu zaman, sistemde ısının kullanıldığı tüm proses ve reaksiyonların ayrıntılı bir dökümü elde edilecektir. Eğer sistemden daha yüksek bir ısı verim elde edilmesi isteniyorsa, ısının harcandığı bölümlerden hangilerinin üzerine eğilmek gerektiği ortaya çıkacaktır. Kuru sistem ön ısıtıcılı bir döner fırın için ısı balansı oluşturulduğunda, ısı girdisini esas olarak şu unsurların tükettiği görülecektir.

Teorik reaksiyon ısısı	(~ % 50)
Atık gazlardaki duyulur ısı	(~ % 20-25)
Mantodan olan ısı kayıpları	(~ % 15-20)

Görüldüğü gibi amaca yönelik olarak kullanılan ısı verilen ısının ancak % 50 'sini oluşturmaktadır.

Göllaş Çimento Fabrikası II. Hat döner fırın için ısı balansı oluşturulurken, fırının istikrarlı bir çalışma anındaki veriler alınmış ve ısı bilançosu fırının bu spesifik çalışma anına göre düzenlenmiştir ve böylece döner fırındaki en fazla ısı kaybının radyasyon ve konveksiyon yoluyla olduğu sonucuna varılmıştır.

Oysa, çeşitli nedenlerle fırının çalışması bu denli stabil olmamaktadır. Mümkün olan en düşük birim ısı enerjisi sarfiyatıyla (kcal / kg. kli.) istenilen nitelik ve nicelikte klinker elde edilebilmesi için aşağıdaki faktörlerin yakıt sarfiyatına direkt ve indirekt etkileri bilinerek kontrol altına alınmalıdır.

- a) Hammadde ile ilgili faktörler,
- b) Yakıt (kömür) ile ilgili faktörler,
- c) Yakma teçhizatı (brülör) ve alev ile ilgili faktörler.
- d) Yakma havası ile ilgili faktörler,
- e) Proses kontrol ve işletme deneyimi.

2. DÖNER FIRINLAR

1. Genel tanıtım
2. Döner fırın tipleri
3. Döner fırın bölgeleri

2.1. Genel Tanıtım

Döner fırın yavaşça dönen silindirik şeklinde bir borudan ibarettir. %2 ila 6 arasında değişebilen bir eğime sahip olan döner fırınların içi ateşe dayanıklı malzeme ile örülüdür. Döner fırınların çevre hızı takriben 15-35 cm/s arasında değişmektedir. En yeni olarak da çevre hızları 38-40 cm/s olarak bildirilmektedir.

Piştirilecek olan madde fırının yukarı kısmından yani besleme ucundan girer, yakma düzeni ise aşağı kısmından yani boşalma ucunda monte edilmiştir. Yakıt olarak toz kömür, fuel-oil veya tabii gaz kullanılmaktadır[1].

2.2. Döner Fırın Tipleri

Fırın mantosunun genişletilmesinin amacı fırının sıcak gazlardan maddeye olan ısı transferini arttırmak için, fırın maddesinin (pişecek malzeme yani farin) ilgili bölgede kalış süresini aynı yerdeki gaz hızını düşürerek uzatmaktadır.

Fakat bunun yanısıra uygulamalar göstermiş ki bu manto çapının farklılığı yüzünden farklı geçiş süreleri meydana gelir, bu da düzensiz malzeme itilmesine yol açar ve fırın işletmesini olumsuz yönde etkiler.

Ayrıca fırın geçme parçalarının imalatı, silindirik fırın parçalarından daha pahalıdır. Geçiş bölgelerinde tuğla örülmesi zordur, örüm fazla çalışmayı gerektirir ve özel şekilli tuğlalar ister. Bu özel geçiş bölgesindeki tuğla ömürleri daha kısa olur. Hem pratik tecrübeler hem de teorik düşünceler en ideal fırın tipinin zamanımızdaki çap farkı olmayan düz boru şeklindeki fırınlar olduğunu tespit etmiştir[1].

2.3. Döner Fırın Bölgeleri

Ön ısıtıcı siklonlu döner fırınlar genel olarak 5 ana bölgeye ayrılırlar:

1. Kalsinasyon bölgesi
2. Emniyet bölgesi
3. Geçiş bölgesi
4. Sinter bölgesi
5. Havuzlama bölgesi

2.3.1. Kalsinasyon bölgesi

Döner fırın girişinden emniyet bölgesine kadar olan bölgeye kalsinasyon bölgesi denir. Kalsinasyon bölgesinde döner fırın mantosu %42-50 Al_2O_3 ihtiva eden şamot tuğlalarla örülür. Kalsinasyon bölgesinde $CaCO_3$ 'ün tamamı CO_2 'ini bırakarak CaO haline geçer. Yani %100 kalsine olur. Kalsinasyon bölgesinde malın ilerleme hızı 45cm/dk civarındadır. Kalsinasyon bölgesinde sıcaklık 1150 °C'a kadar çıkar[1].

2.3.2. Emniyet bölgesi

Emniyet bölgesi, kalsinasyon bölgesinden sonra fırın çıkışına doğru takriben fırın çapının iki katı kadar olan bölgeye denir. Emniyet bölgesinde döner fırın mantosu %50-80 Al_2O_3 ihtiva eden yüksek alüminalı tuğlalarla örülür. Çünkü bu bölgede zaman zaman fırın rejiminden dolayı(yakıt kaçması,fırın soğuması gibi hallerde) sıcaklık 1250 °C nin üzerine kadar çıkabilir[1].

2.3.3 Geçiş bölgesi

Geçiş bölgesi, emniyet bölgesi ile sinter arasında fırın manto çapının takriben iki katı kadar olan bölgeye denir. Bu bölge sinterle iç içe sayılır. Klinkerleşme reaksiyonları ve malın kısmen likitleşmesi bu bölgede başladığı için tuğlaları üzerine anzast bağlar. Fakat likit toz miktarının azlığından dolayı anzast zayıf olduğu için ve ayrıca bu bölgede çok sık sıcaklık farklılıkları olduğundan anzast stabil değildir. Sık sık dökülür. Anzast her dökülüşünde beraberinde bir miktarda tuğladan kopardığından tuğlanın ömrü kısalmır. Krom-Magnezit tuğlanın anzast bağlama kabiliyeti Magnezit-Krom tuğlalara nazaran az olduğu için geçiş bölgesine örülmesi uygun görülmektedir. Krom-Magnezit tuğla yerine %70-80 Al_2O_3 ihtiva eden yüksek alüminalı tuğlalar örülebileceği gibi, son bir kaç yıldır Magnezit-Sipinal tuğla tabir edilen özel tip tuğlalar da kullanılmakta ve çok iyi neticeler alınmaktadır[1].

2.3.4. Sinter bölgesi

Döner fırında kimyasal reaksiyonların meydana geldiği yani klinker bileşiklerinin olduğu bölgedir. Bu bölge geçiş bölgesi bitiminden başlar ve havuzlama bölgesine kadar devam eder. Sinterin boyu genel olarak fırın çapının 4-5 katı kadar uzunlukta olur. Sinter bölgesinde döner fırın mantosu Magnezit-Krom tuğlalar ile örülür. Magnezit-

Krom tuğlaların özelliği gereği çalışma esnasında üzeri bir kabuk bağlar, biz buna anzast tabir ederiz.

Sinter bölgesinde sıcaklık 1450-1500 °C civarındadır. Magnezit-Krom tuğlaların yüzeyinin anzast bağlamasının çeşitli faydaları vardır.

1. Anzast tuğlayı korur ve tuğlanın ömrünü uzatır.
2. Manto vasıtasıyla ısı kaybını azaltır. Çünkü anzastın ısı iletkenliği oldukça düşüktür.
3. Yüzeyindeki girinti ve çıkıntılar maddenin fırın içerisindeki ilerleme hızını düşürerek ısı transferinin maksimum seviyede gerçekleşmesini sağlar. Sinterde malın ilerleme hızı 24 cm/dk civarındadır.

Anzast kalınlığının 30-35 cm civarında olması gerekir. Daha kalın anzast hem fırın yükünü arttıracığından fırın motorunun fazla amper çekmesine sebep olur, hem de fırın faydalı kesitinin azalması nedeniyle bacagazının emiş kapasitesi düşecek ve dolayısıyla fırın tonajı düşecektir. Çok ince olan anzast ise her zaman dökülmeye mahkumdur. Ayrıca anzastın inceliği nedeniyle mantoya gelen ısı fazla olur ve ısı kaybına sebebiyet verir.

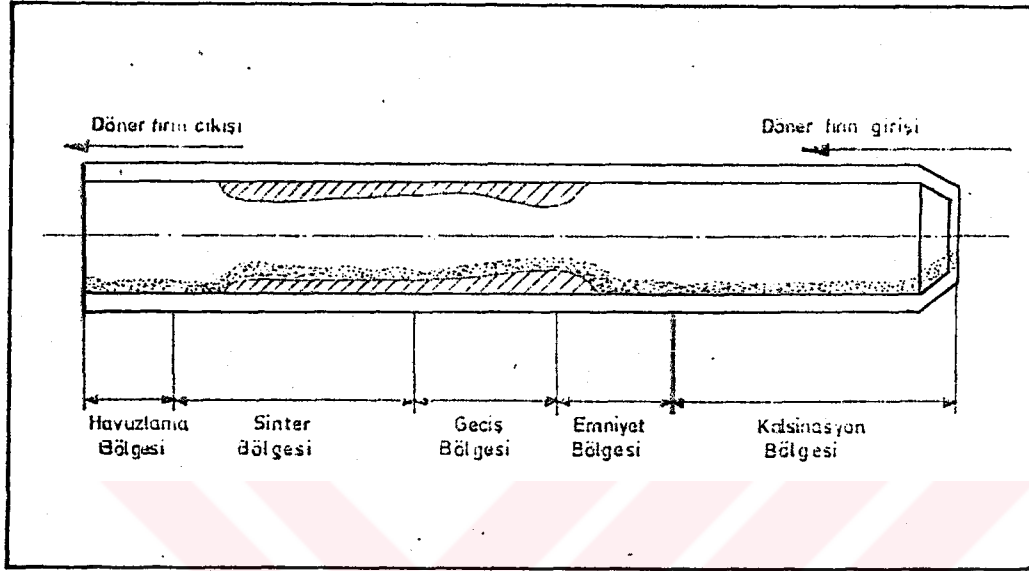
Diğer bir konu; çimento döner fırınlarında sinterin boyu fazla uzun istenmez. Çünkü hem fırın yükü artar, hem de klinker gerilerde pişmeye başlayacağından C₃S kristalleri büyür ve klinker kaynar, böylece klinkerin kalitesi bozulur ve öğütülmesi güçleşir[1].

2.3.5 Havuzlama bölgesi

Sinterin bittiği noktadan döner fırın çıkışına kadar olan bölgeye havuzlama bölgesi denir. Havuzlama bölgesi takribi olarak döner fırın boyunun %8 'i kadardır. Havuzlama bölgesinde alevin tesiri biter ve klinker 1450-1500°C 'den 1300-1250°C 'ye kadar soğuyarak soğutmaya dökülür. Havuzlama bölgesinde klinker soğumaya başladığı için klinkerin içerisindeki likit faz miktarı azalır ve bu yüzden bu bölgedeki anzast tuğla ile iyice kaynaşmaz. Stabil olmayan bu anzast sık sık dökülür ve yenilenir. Dolayısı ile havuzlama bölgesine örülen tuğla sürekli termik şoka maruz kalır. Magnezit tuğlalar termik şoka karşı dayanıklı olmadıkları için döner fırın çıkışından itibaren fırın boyuna göre 2-3 m. 'lik bir kısım % 70-80 Al₂O₃ ihtiva eden yüksek Alüminalı tuğla ile örtülmelidir. Geçiş bölgesinde olduğu gibi Magnezit-Sipinalli tuğla ile de örtülebilir.

Göllaş Çimento Fabrikası'ndaki 2.Hat döner fırın 65 m. uzunluğundadır. Bu fırında kalsinasyon bölgesi 34 m. , geçiş bölgesi 6 m. , sinter bölgesi 22 m. , havuzlama bölgesi 3 m. uzunluğundadır. Fırın et kalınlığı 28 mm. olan çelik saçtan yapılmıştır.

Fırının iç çapı 4.6 m.' dir. Yukarıdaki bölgelerin hepsi de 220 mm. kalınlığındaki tuğlalarla içeriden izole edilmişlerdir[1].



Şekil 2.1. Döner fırın bölgeleri[1]

Götaş Çimento Fabrikası'nda da bu tipte ön ısıtıcı kuru sistem döner fırın kullanılmaktadır. Bu kuru sistem fırında konkasörde kırılmış hammadde farin değirmeninde öğütüldükten sonra homojene edilir. Öğütme sırasında hammadde fırından alınan atık gazlarla kurutulur[2].

2.4. Ön Isıtıcı Kuru Sistem Fırında Siklonlu Ön Isıtıcıların Önemi

Çimento döner fırınlarında siklonlu ön ısıtıcıların önemini üç ana grupta toplayabiliriz.

1. Enerji tasarrufu
2. İstihsal artışı
3. Döner fırın boyunun kısılması

2.4.1. Enerji tasarrufu

Döner fırın sıcak gazları döner fırını dizayn şekline göre 850-1050°C civarında bir sıcaklıkta terkeder. İşte bu sıcaklıkta ki gazlar siklonlu ön ısıtıcılardan ters akım prensibine göre geçirilerek fırına verilen farin ısıtılır ve yaklaşık olarak 800-850°C

sıcaklıkta ve % 40 kalsine olmuş vaziyette fırına intikal ettirilir. Sıcak gazlarda yaklaşık 300-340°C civarındaki bir sıcaklıkta siklonu terkeder. İşte farının 50-70°C civarında bir sıcaklıkta siklonlara girip fırın sıcak gazları vasıtasıyla ısınıp, 800-850°C sıcaklıkta % 40 kalsine olmuş vaziyette fırına intikal etmesi büyük bir enerji tasarrufudur[1].

2.4.2. İstihsal artışı

Farının siklonlarda belirli bir oranda hazırlanıp fırına intikal ettirilmesi fırın yükünü bir hayli azaltmış olmaktadır. İşte bu durumda fırın çapı aynı olmasına rağmen siklonlu fırınlardan daha fazla istihsal almak mümkün olmuştur. Ayrıca şunu da belirtmekte fayda vardır: Siklonlu ön ısıtıcıların çimento döner fırınlarında kullanılması ile beraber, geçmişte hayal bile edilemeyecek büyük kapasiteli döner fırın imalatları gerçekleşmiştir[1].

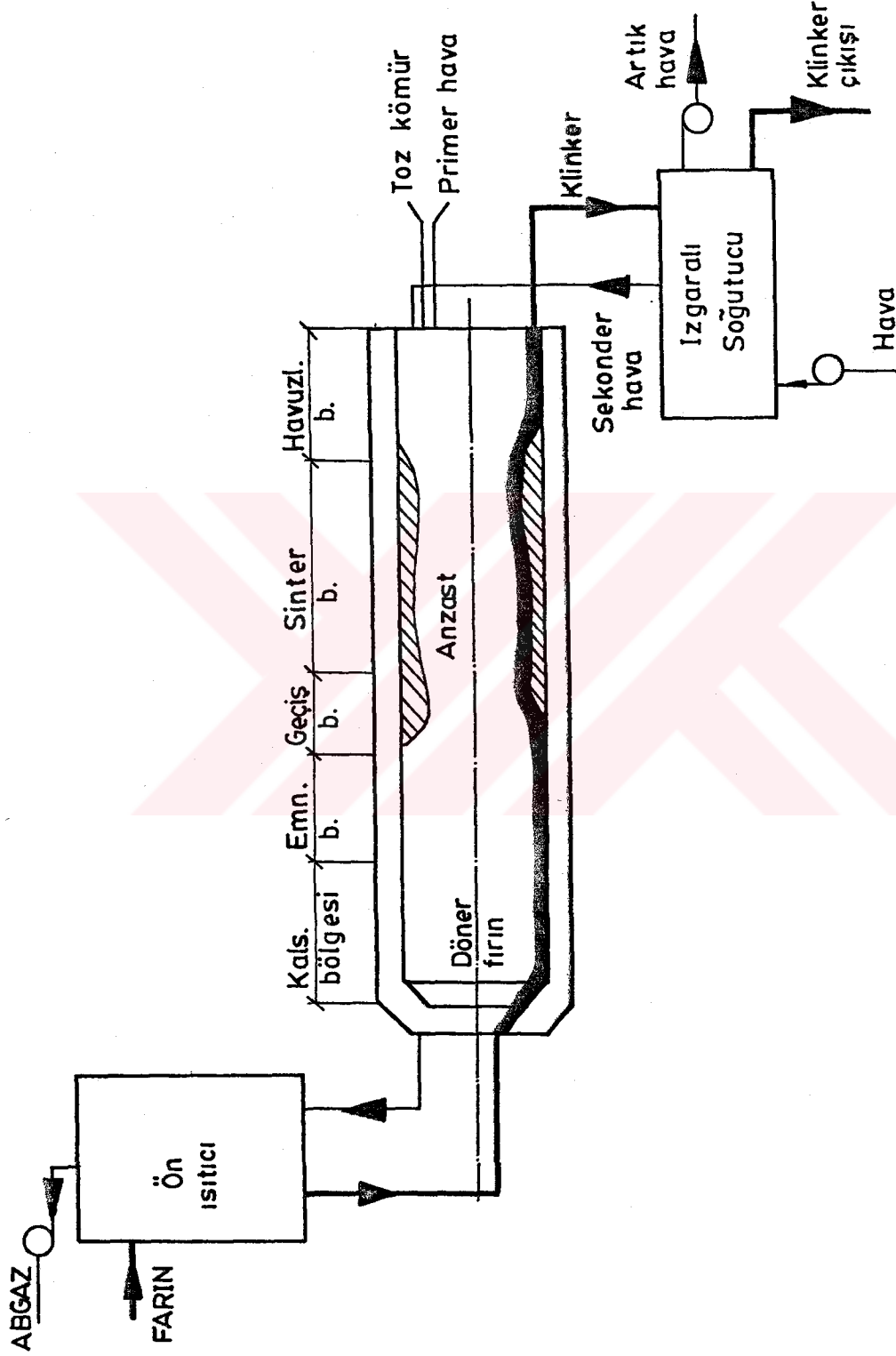
2.4.3. Döner fırının boyunun kısılması

Enerji tasarrufu bahsinde de belirtildiği gibi farin siklonlarda 800-850°C sıcaklığa kadar ısınıp takriben % 40 kalsine olmuş vaziyette fırına girmektedir. Şayet siklon sistemi olmasaydı farının bu seviyeye kadar hazırlanması da fırının içerisinde yapılması gerekirdi ki bu da ancak fırın boyunun uzun olması ile mümkün olurdu. İşte siklonlu ön ısıtıcıların çimento döner fırınlarda kullanılmaya başlanmasından sonra fırın boyları takriben % 50 mertebesinde kısılmıştır. Şekil 2.2 yaş sistem ve kuru sistemdeki ısıl prosesleri karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

Ham madde (farin)	Kurutma 10°C 100°C	Ön ısıtma 100°C 800°C	Kalsinasyon 800°C 1000°C	Sinterleme 1000°C 1450°C	Soğutma 1450°C -60°C
Yaş sistem çimento üretimi	Döner Fırın			1450°C 1000°C	Klinker Soğutucu
Ön ısıtıcı kuru sistem çimento üretimi	Ön ısıtıcı ünite			Döner fırın 1450°C 1150°C	Klinker Soğutucu

Şekil 2.2. Yaş ve kuru sistem çimento üretiminde döner fırındaki ısıl prosesler[2]

Şekil 2.3 'de Göltaş çimento fabrikası için ön ısıtıcı kuru sistem döner fırın ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Göltaş çimento fabrikası ön ısıtıcı kuru sistem döner fırını

3. ISI TÜKETİMİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

3.1. Hammaddeler ve Isı Tüketimine Etkileri

Çimento yapımında kullanılan ana hammaddeler

1. Kalker
2. Marn
3. Kil olmak üzere 3 çeşittir.

3.1.1. Kalker (Kireçtaşı)

% 100 saflıktaki kalker, kalsiyum karbonat (CaCO_3) olarak ifade edilir. CaCO_3 doğada geniş olarak bulunur.

Kalkerlerin menşei hayvanidir. (Kalker hayvan kabuklarının Jeolojik çağlardan beri birikmesi sonucu oluşmuştur). Kalkerin en saf şekli beyazdır. Killi maddeler ve demir bileşikleri kalkerin rengini değiştirir. Kalker bünyesinde az miktarda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 bulundurduğundan rengi tam beyaz olmayıp sarı veya grimsi olabilir.

Kalkerin en saf şekilleri Kalsit ve Aragonittir. Kalsitin özgül ağırlığı 2.7, Aragonitin 2.95 'dir[1].

3.1.2. Marn

İçinde silis(kum), killi maddeler ve demiroksit bulunan kalkerlere Marn denir. Çimentoyu teşkil eden ilkel maddeler; kireç, silis, alüminyumoksit, demiroksit olduğuna göre saf kalkerden ziyade CaCO_3 ve killi maddelerin tabii bir karışımı olan marn hammadde olarak daha elverişlidir. İdeal marn; çimento imalatında istenen oranda oksit ihtiva edenidir. Çünkü tabii karışım suni karışımdan daha homojendir. Bu sebepten dolayı daha kolay pişer ve dolayısıyla döner fırınlarda kalori tasarrufu sağlar. Aynı zamanda böyle bir marnın öğütme öğütme masrafları da azdır. Çünkü öğütme öncesi ve öğütme sonrası homojene yatırım ve masraflarına gerek yoktur.

Marnlar CaCO_3 ve killi maddelerin aynı zamandaki çökelti teşekkülü sonucunda oluşmuş tortu taşlardır. Kalkerden daha yumuşak olan marnın sertliği ihtiva ettiği killi maddelerin miktarı ile orantılıdır. Killi madde miktarı arttıkça marnın sertliği de düşer. Marnın rengi ihtiva ettiği killi maddelere göre sarıdan gri siyaha kadar değişir[1].

3.1.3. Kil

Killer, silisli kayaların bilhassa feldispatların tabii, fiziksel ve kimyasal tesirlerle bozulmasından meydana gelmişlerdir ve toprak görünüşündedirler.

Kilin esas maddesi, feldispatların bozulması neticesinde meydana gelen hidrate alüminyum silikat olan " Kaolin " 'dir. İçinde yabancı madde bulunmayan killer genellikle beyazdır. Bünyesinde ihtiva ettiği yabancı madde cinsi ve miktarına göre killerin rengi sarıdan gri siyaha kadar değişmektedir. Kil genellikle SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ihtiva eder. Çimento hammaddeleri içerdikleri CaCO_3 miktarına göre şu şekilde sıralanırlar[1]:

% CaCO_3

96-100	Yüksek saflıkta kalker (mermer)
90-96	Marnlı kalker
75-90	Kalkerli marn
40-75	Marn
10-45	Killi marn
4-10	Marnlı kil
0-4	Kil

Döner fırına verilen CaCO_3 , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 hammaddeleri, fırında ısıtılmak suretiyle çeşitli reaksiyonlarla çimento klinkerini oluştururlar. Pişme işlemi, karıştırılmış hammaddelerin arasındaki reaksiyon serileri ile başlar ve çimento bileşiklerinin çok çabuk teşekkül ettiği herhangi bir likitin meydana geldiği pişmenin son hali ile biter. Fırında meydana gelen reaksiyonlar özet olarak aşağıdaki tabloda gösterilmiştir[3].

SICAKLIK	REAKSIYON	ISIL DURUM
100°C	Suyun buharlaşması	Endotermik
500°C	Kildeki kristal suyun buharlaşması	Endotermik
900°C	CaCO_3 'ün ayrışması	Endotermik
900-1200°C	CaCO_3 ve CaO ile alümina silikatlar arasındaki reaksiyon	Ekzotermik
1200-1280°C	Likit başlangıcı	Endotermik
1280°C	Nihai likit oluşumu ve çimento bileşiklerinin oluşumu	Endotermik

3.1.4. Klinkerin temel yapısı

Klinkerin temel yapısını teşkil eden bileşikler aşağıda belirtilmiştir:

1. Trikalsiyum silikat- $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ veya C_3S -Alit.
2. Dikalsiyum silikat- $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ veya C_2S -Belit.
3. Trikalsiyum alüminat- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ veya C_3A -Selit.
4. Tetrakalsiyum alüminaferrit- $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ veya C_4AF -kahverengi millerit (Brown Millerit).
5. Yukarıda belirtilen dört ana bileşikten başka az miktarda serbest kireç (CaO), Magnezyumoksit (MgO), kükürtkü bileşikler ve alkaliler bulunur.

Çizelge 3.1. Saf klinker bileşiklerinin basınç dayanımları (kg/cm^2)[1]

Bileşiğin Adı	7 günlük	28 günlük	180 günlük	365 günlük
C_3S	322	466	512	584
BC_2S	24	42	193	325
C_3A	118	124	124	124
C_4AF	300	384	493	595

olarak gösterilmiştir.

3.1.4.1. Trikalsiyum Silikat, 3CaOSiO_2 -Alit

Trikalsiyum silikat olan alit, klinkere hakim olan önemli olan önemli bir klinker mineralidir. Bütününde $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 'den başka az miktarda alüminyumoksit ve magnezyumoksit gibi maddeler vardır.

Çimento kalitesi, yalnız alitin yüzde miktarına değil aynı zamanda alitin kimyasal yapısına da bağlıdır. Mukavemet ve hidrasyon ısısı gibi başlıca temel özelliklerde alitin kristal yapısına bağlıdır. Kalsiyum silikatlar çimentonun mukavemet unsurlarıdır. C_3S bilhassa ilk 28 günlük dayanıma etki ettiğinden kritik bir unsurdur.

Alit kristallerinin büyüklüğü aşağıdaki faktörlere göre değişir.

1. Hammadde karışımının kimyasal bileşimi
2. Kireç doygunluk derecesi (Kireç standardı)
3. Pişmiş klinkerin soğuma durumu
4. Döner fırındaki pişme sıcaklığı ve şartları

Hammadde karışımının kimyasal bileşimi klinkerin arzu edilen bileşimine uygun olmalıdır. Ayrıca farinin özgül yüzeyinin fazla olması (ince öğütülmesi) ve çok iyi bir homojenlik sinter reaksiyonlarının hızını artırır (pişmeyi kolaylaştırır).

Yüksek kireç doygunluk derecesi (titrasyonun yüksek olması) daha küçük alit kristallerinin oluşumuna sebep olur. Yüksek pişme sıcaklığında ise (örneğin 1600°C 'de) sıvı fazın akıcılığı artacağından, reaksiyona giren iyonların hareket kabiliyeti de artar ve daha büyük alit kristalleri oluşur. Pişme süresinin artması da büyük kristaller elde etmeyi sağlar[1].

Fırına verilen hammadde iyice karıştırılmamışsa (homojene edilmemişse) klinker modülünün çeşitli kısımlarında C₃S azalması nedeniyle C₂S ve CaO oluşabilir. Fırına verilen hammaddenin Kireç Doygunluk Faktörü (LSF) ne kadar arttırılırsa oluşacak C₃S miktarı da artacaktır. % 1 'lik bir LSF artışı, serbest kireç oranı aynı kalmak kaydıyla, %2.25 'lik C₃S artışına neden olur. Ancak yüksek oranda C₃S elde edebilmek için, LSF de yapılacak artış pişmeyi zorlaştıracığından, yakıt tüketiminin artmasına neden olacaktır[3].

Klinker soğuma şartlarının, klinkerin minerolojik yapısına büyük tesirleri vardır. Aynı klinker üzerinde yapılan bir araştırmada yavaş bir soğutmada C₃S miktarı % 59.8, orta süratli bir soğutmada C₃S miktarı % 65.2, hızlı soğutmada ise bu miktar % 70 bulunmuştur. Bir klinkerde C₃S miktarı ne kadar fazla ise o klinkerden imal edilen çimentonun basınç dayanımları da o kadar yüksek olur. O halde klinker bünyesindeki C₃S miktarını ayırmadan muhafaza edebilmek için soğutmaya döküldükten sonra hızlı bir şekilde soğutulmalıdır[4].

Mukavemet kazanmada en önemli öge olan C₃S oluşumunu hızlandırmak için klinkerin pişme ısısının 1250°C 'nin üstünde olması gerekir. Genellikle döner fırında pişme ısı 1450°C 'ye kadar çıkmaktadır. 1700°C 'ye kadar varan yüksek ısı dereceleri olumsuz yönde kaliteyi etkilediğinden istenmez. Çünkü klinker 1700°C 'den fazla ısıtılırsa;



verecek şekilde ayrışır. Trikalsiyum silikat 1700-1200°C arasında stabildir. 1200°C 'nin altında çok yavaş soğutulan bir klinkerde de



şeklinde ayrışır. Klinker sinter sıcaklığı ile 1250°C sıcaklığı arasında yani fırının havuzlana bölgesinde orta hızla soğutulmalıdır. 1250°C 'nin altındaki sıcaklıklarda yani klinker soğutmaya döküldükten sonra, soğutma işleminin çok süratli yapılması gerekir. Klinkerin hızlı soğutulmasının bir başka etkisi de C₃S kristalleri üzerine olur.

Hızlı soğutulan bir klinkerde C₃S kristalleri küçük olur. Yavaş soğutulan klinkerde ise C₃S kristalleri büyük olur.

C₃S kristalleri büyüdükçe hem klinkerin öğütülmesi güçleşir ve çimento değirmenlerinin kapasitesinin düşüp enerji sarfiyatının artmasına sebep olur, hem de büyük C₃S kristallerinin su ile reaksiyona girme (hidratasyon) hızları düşer, dolayısıyla çimentonun basınç dayanımları da düşer.

Klinker pişirilmesinde ve istenen klinker minerallerinin elde edilmesinde uygun bir pişirme sıcaklığı, pişirme süresinden daha etkilidir. Gereksiz kristal büyümelerini önlemek için fırının pişirme bölgesinin kısa olması gerekir, ayrıca da uygun bir soğutma işlemi uygulanmalıdır.

Alit ile ilgili bilgileri özetlersek,

1) Klinker bileşikleri içerisinde basınç dayanımı en yüksek olan Alit olduğu için, Alit'in klinkerdeki yüzde oranı ne kadar yüksek olursa o klinkerle yapılan çimento da o kadar sağlam ve kaliteli olur.

2) Klinkerin kireç standardı yükeldikçe Alit oranı da yükselir. Dolayısıyla çimentonun kalitesi de yükselir.

3) Alit kristalleri büyüdükçe hem öğütme güçlüğü ortaya çıkar ve çimento değirmenlerinin enerji sarfını yükseltir, hem de hidratasyon hızları düşeceğinden söz konusu klinkerle yapılan çimentonun basınç dayanımları da düşer. Bu sebepten Alit kristallerinin fazla büyümesine müsaade edilmemelidir. Bunun için;

- Klinker hızlı soğutulmalıdır,
- Sinterleşme sıcaklığı aşırı yüksek tutulmamalıdır,
- Pişirme süresi uzun tutulmamalıdır. Yani döner fırının sinter boyu mümkün mertebe kısa tutulmalıdır,
- Mümkün olan en yüksek kireç standardı ile çalışılmalıdır,
- Likit faz oranı normal seviyede olacak şekilde komponent ayarları yapılmalıdır (Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarları).

Kolay pişen bir farin hazırlayarak tesisin ekonomik çalışmasını sağlamak için aşağıdaki fiziksel ve kimyasal parametreler kullanılmaktadır[1].

3.1.5. Kimyasal parametreler

3.1.5.1. Silis modülü

Silis modülü, farinin fırın içerisindeki durumunu ve klinker kalitesini etkilemesi açısından en önemli parametrelerden biridir.

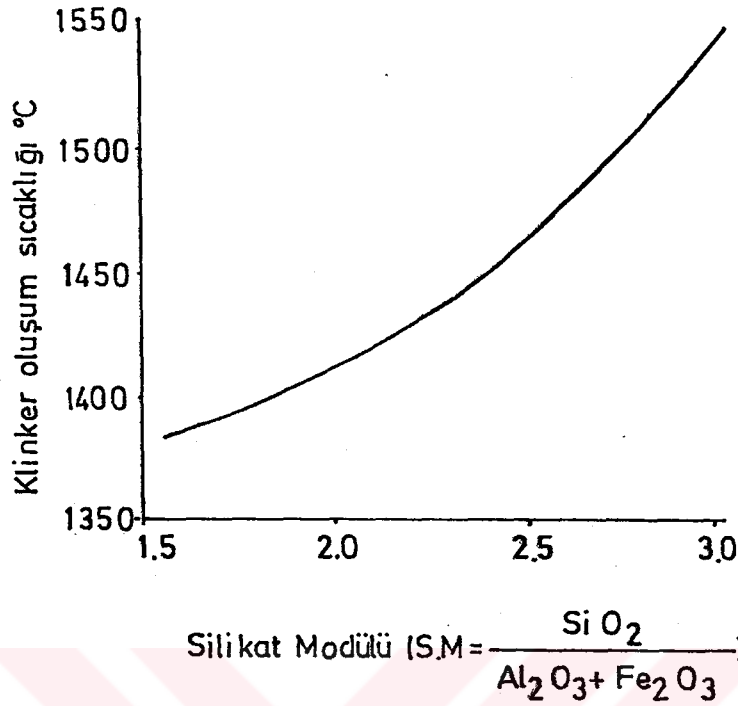
$$S.M. = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Al_2O_3 ve Fe_2O_3 aleyhine SiO_2 miktarının artırılması pişme güçlüğüne, daha fazla yakıt kullanımına, sinterleşmenin güç olması nedeniyle daha yüksek ısılarda pişirmeye neden olur. Yüksek silis modülü, aynı zamanda fırın astarının aşınarak harabiyetine de yol açtığı gibi donma başlangıcını geciktirmesi ve çimentonun dayanım kazanmasını yavaşlatması gibi istenmeyen bir takım etkilerde yapar. Ancak bu tür çimentoların zamanla giderek iyi bir dayanım kazandığı da belirtilmelidir. Diğer taraftan bu tip klinkerler silisleri çok iyi öğütülmedikçe (maliyet yükselten bir diğer faktör) serbest kireç miktarının yüksek olması nedeniyle sakıncalıdır. Bütün bu yukarıda sayılan faktörler üretilen çimentonun pazarlanması açısından birer engel olarak karşımıza çıkmaktadır.

Silis modülü düşük farinler kolay sinterleşir, kolay anzast oluşturur ve erken dayanım değerleri veren çabuk sertleşen çimento üretimine uygundur. Bu tür çimentolarda dayanım değerlerinde zamanla büyük bir artış olmamaktadır. Buna karşılık silis modülü çok düşük olan hammadde karışımları ile çalışıldığında zaman zaman üretimi aksatacak kadar kemer oluşumu nedeniyle fırının bloke olması tehlikesi ortaya çıkmaktadır.

Silis modülü için de ideal bir sayı vermek olanaksızdır. Fakat genellikle bir modülün 2.3-2.7 arasında bulunması gerektiği söylenebilir. Pek çok çimento fabrikası bu değerlerin altında ya da üstündeki sınırlar arasında ekonomik bir üretimi gerçekleştirmektedir, gerek farinin minerolojik bileşimi, gerekse öteki kimyasal parametreler bu değerlerin her fabrikaya göre farklı olmasına neden olmaktadır.

Bundan ötürü, hammadde karışımları için en ekonomik ve optimum pişmeyi sağlayacak oranları, özellikle silis modüllerinde sorunu olan fabrikaların değişik hammadde karışımlarını sinterleştirmek suretiyle ampirik olarak kendilerinin saptamaları en uygun yol olarak önerilmektedir[5]. Şekil 3.1 'de silikat modülünün klinker oluşum sıcaklığına olan etkisi verilmektedir.



Şekil 3.1. Silikat modülünün klinker oluşum sıcaklığına etkisi[3]

3.1.5.2. Alüminyum modülü

$$A.M. = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Alüminyum modülünün düşük olması, çimento bileşiklerinin düşük ısılarda oluşumunu sağlar. Bu modülün yüksek olması halinde pişme güçleşir ve yakıt sarfiyatı fazla olur. Genellikle demir, çimento bileşiklerinin oluşumunu kolaylaştırır, yani demir oranının yüksek olması pişmeyi kolaylaştırarak maliyetin düşmesine yol açar. Az oranda bulunan demir oksit bile silisi yüksek bir hammaddenin kolay ergimesini sağlamaktadır. Demir oranının yüksek olması sert ve yoğunluğu fazla bir klinker oluşturur ve dolayısıyla öğütmede zorluklara neden olarak üretim maliyetini artırır.

Yüksek alüminyum içeren bir farin, çimentonun çabuk donmasına ve ilk dayanımların yüksek olmasına yol açar. Fe_2O_3 miktarı arttırılmak suretiyle C_3A oranı düşürülür ve C_4AF artar. Düşük C_3A içeren çimentolar düşük hidratasyon ısıları nedeniyle deniz suyunun ve benzeri aşındırıcı etki gösteren ortamlara karşı iyi bir dayanım gösterirler.

Alüminyum modülü düşük olan hammadde karışımları klinkerleşme ısını düşürerek daha az yakıt kullanılmasını sağlarlar. Bu tür karışımlar, aynı zamanda sıvı fazın oluşmasını artırarak fırın verimini de olumlu yönde etkiler ve ortamda çok fazla serbest kireç olmamasına karşılık yüksek C_3S içeren çimento elde edilmesini sağlarlar.

Genellikle iyi kalitede bir klinker elde etmek ve en ekonomik sinterleşmeyi sağlamak için A.M. 'nın 1.3 / 1.6 arasında olması istenir. Yapılan deney ve gözlemler en iyi klinkerleşmenin, en düşük ısıda en çok sıvı faz oluşumunun sağlandığı A.M. 1.38 değerinde meydana geldiğini göstermiştir[5].

3.1.5.3. Kireç standardı

$$K.S. = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$$

(Hammadde karışımı ve klinker hesaplamaları için)

Klinkerin kireç standardı 90'ın üzerinde olmalıdır. Genellikle K.S. 'nın 90-97 arasında olması arzulanır. 90'ın altında çimentonun kalitesi düşer, dayanım azalır. Fakat pişme kolaylaşır, sinterde anzast kalınlaşır, fırın kemere gidebilir. 97 'nin üzerinde ise; serbest kireç artabilir ve dolayısıyla kalite düşebilir. Pişme zorlaşır, anzast kaybolur[1].

3.1.5.4. Magnezyum

Genellikle çimento hammadde karışımında değişik miktarlarda bulunan MgO, sinterleşme ısını düşürerek pişmeyi kolaylaştıran bir maddedir. MgO miktarı yüksek olan hammadde karışımları, pişme bölgesinde topaklanarak fırının çalışmasını etkilediği gibi, ızgaralı soğutucularda klinkeri soğutma imkanı yoksa üretilen çimentonun düşük dayanımlı olmasına yol açar. Araştırmalar çimentoda en çok %6 MgO bulunması gerektiğini göstermektedir[5].

3.1.5.5. Alkali (Na_2O ve K_2O), kükürt ve klorürler

Ön ısıtıcı kuru sistem döner fırınlarda, stabil işletme şartlarını bozan en önemli sorunlardan biri de, fırın girişi ve IV. siklondaki birikme problemi. Temizlenmediği takdirde bu maddeler sistemin tıkanmasına neden olabilir. Birikmenin nedeni hammadde ve yakıtta eser miktarda bulunan uçucu maddeler olan alkali oksitler(Na_2O ve K_2O), sülfür bileşikleri, klorür ve bazen de florürdür. Fırın gazları bünyesindeki bu bileşikler fırına giren malla reaksiyona girdiği veya fırının soğuk bölgelerinde ön ısıtıcı v.b. yoğunlaştıkları zaman bir iç sirkülasyon meydana getirirler.

Yapılan gözlemler farin ısıtıldıkça alkalilerin önce ergidiklerini, sonra buharlaşarak fırın gazları arasına karıştıklarını, fırının daha soğuk bölgelerine gelince tekrar yoğunlaşıp bileşikler halinde klinker mineralleri içerisine karıştıklarını göstermiştir. Eğer bir alkali by-pass 'ı yoksa, kuru sistem fırınlarda bu maddelerin çok az bir kısmı sistemi terk eder. Esasen bu maddelerin klinkerdeki oranı, giren-çıkan madde korunumu nedeniyle, hammaddelerdeki (farin, kömür) oranları eşit olmalıdır.

Ancak uçucu maddelerin fırın sistemi içerisindeki resirkülasyonu sonucunda, fırın girişinde bu bileşiklerin çok daha yüksek oranda bulunduğu (örneğin ; $\text{Na}_2\text{O} \times 2$, $\text{SO}_3 \times 4$, $\text{K}_2\text{O} \times 5$, $\text{CL} \times 80$) saptanmıştır.

Çizelge 3.2 'de Humboldt önsütücüsüne sahip tipik bir döner fırındaki uçucu madde seviyeleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Uçucu madde seviyeleri[3]

Madde	Farin	Klinker	IV.Kademe siklon
K_2O	0.66	0.6	3.5
Na_2O	0.26	0.2	0.5
SO_3	1.6	1.3	6.0
CL	0.015	0.01	1.2

Resirkülasyon seviyesinin fırın üzerinde üç ayrı etkisi vardır. Birincisi intikalde ve alt kademe siklonlarda mal birikmesine sebep olmasıdır. Resirkülasyon arttıkça, birikmenin oluşması da hızlanacaktır. Biriken malın periyodik olarak temizlenmesi neticesinde fırının stabilitesini bozacak miktarda mal fırına dökülecektir. İkinci etki; düşük sıcaklıkta eriyen bu bileşikler, hammaddenin pişme bölgesine gelmeden önce hazırlanarak sıcaklığının yükselmesine yardımcı olur. Bu bileşiklerin miktarlarında yapılacak değişiklik, pişme bölgesine gelen hammaddenin özelliklerini değiştirecek, dolayısıyla pişme bölgesinden beklenen fonksiyonlarda bazı değişiklikler meydana gelecektir. Dolayısıyla bu etki de fırının stabilitesini bozucu karakterdedir.

Resirkülasyonun fırın sistemi üzerinde son etkisi ise, kısa sürede gaz fazına geçen ancak fırın girişinde tekrar çökelen uçucu maddelerin fırındaki ısı enerjisini pişme bölgesi civarından alarak daha geriye taşımasıdır. Bu enerjinin büyük bir bölümü hammadde ile transfer olacak ancak bir kısmı da kaybolacaktır. Çizelge 3.2' de verilen tipik bir resirkülasyonu temin etmek için gerekli ısı 100 kcal/kg. kl. mertebesindedir. Birikmelerin temizlenmesinden hemen sonra resirküle eden uçucu madde miktarı oldukça yükselecek (yaklaşık 2 katı) ve taşınan ısı miktarı da artacaktır.

Çimentoda fazla miktarda alkali bulunması istenmez. Az miktarda alkali ve alkali sülfatların bulunması çimentonun 28 günlük dayanımının artmasına neden olmaktadır. Alkalinin esas kaynağı kildir.

Bazı hallerde, hammaddelerde bulunan alkali oranı nedeniyle alkali döngüsünde denge sağlandığında, klinker içerisindeki oran çok yüksek olabilir. Bu nedenle, ürünün (klinker) kimyasal özellikleri ve niteliğinde bazı değişiklikler meydana gelebilir.

Klinker içerisindeki alkali konsantrasyonunun düşürülebilmesi için fırın girişinden gazın bir kısmı alınarak sistemin dışına atılır. Böylece gaz içerisinde bulunan alkali de atılmış olacaktır. IV. kademe siklon öncesi sıcak gazların bir kısmının dışarı atılması sonucunda yakıt tüketimi artacak ve fırının üretimi düşecektir. Hammaddeye ısı transfer eden bu değerli gazların dışarı atılması yerine seçici ocak işletmeciliği, alternatif hammadde ya da yakıt kullanımı veya farin / klinker kimyasında bazı değişiklikler yapılması genelde daha ucuz bir seçenektir.

Bunun yanında, birikmenin en fazla olduğu yerlerin (intikal, IV. kademe siklon girişi, IV. kademe siklon, III. kademe siklona giriş kanalı) periyodik olarak temizlenmesi sık görülen bir uygulamadır. Yumuşak bir malzeme birikimi basınçlı hava jelleriyle temizlenebilir. Ancak daha sert birikimler çelik çubukla veya yüksek basınç su püskürtme yöntemiyle temizlenmelidir.

Fırın stabilizasyonunun mümkün olan en az oranda bozulabilmesi için, biriken uçucu maddelerin sıkça ve sabit periyotta temizlenmesi gerekir. Bu periyodu her fabrika kullandığı yakıt, hammadde ve işletme şartlarına göre tespit etmelidir[3].

Alkali by-pass 'nın esası, fırın gazları ön ısıtıcıya gelmeden önce alkalilerin buhar halinde bulundukları sıcaklıkta gazların bir kısmını sistemden çalarak tozu tuttuktan sonra bacaya by-pass etmektir.

Klinker pişirilirken kükürt, sisteme yakıt ve farin ile girmektedir. Hammaddede kükürt, sülfatlar şeklinde bulunur. Yakıttan gelen kükürt ise daha çok yakıtın karakterine bağlıdır. Yanabilen gazlar, özellikle doğal gazlarda kükürt bulunmaz. Fuel-oil 'da ise kükürt miktarı % 4 dolayında değişir. Kömürde ise kükürt değişik şekillerde hem organik hem de inorganik biçimde bağlanmış olarak bulunur. Kömürde kükürt miktarı çoğu zaman % 4 'ün üzerindedir.

Döner fırına gerek yakıt gerek hammaddeler kanalı ile giren kükürt (sülfürler) fırında okside olarak SO_2 'e dönüşürler. Genel olarak bütün ayrışma ve oksidasyon reaksiyonlarında gaz halde SO_2 meydana gelir. Aynı zamanda fırın atmosferinde kükürtle birleşmeye büyük bir yatkınlık gösteren uçucu alkali buharları da bulunur. Oksidasyon sırasında, alkali oksitlerle SO_2 'in reaksiyonu sonucu alkali sülfatlar oluşur. Gerek alkali gerekse kükürt, klinker ve baca tozlarında genellikle alkali sülfatlar olarak

bulunurlar. SO_2 fazlası, CaO ve CaCO_3 ile reaksiyona girerek CaSO_4 oluşturur, bu nedenle baca gazlarında ancak çok az miktarda SO_2 saptanmaktadır[6].

Az uçucu alkali sülfatların aksine alkali klorürler daha kolay buharlaşmaktadır. Ancak pek az bir kısmı klinkere bağlanır. Klinkerdeki ortalama klorür konsantrasyonu yaklaşık olarak ağırlıkça % 0.01 'dir. Klinkerde sıvı faz miktarı yükseldikçe bu oran %0.03 'e kadar çıkabilir. Alkali klorürler fırın içinde bir iç sirkülasyon yaparlar ve icabında by-pass yaparak ortamdan uzaklaştırılmaları gerekir. Süspansiyon tipi ön ısıtıcılı fırınlarda yapılan deneyler, farinde klorür miktarı % 0.015 'i aşar ve K_2O 20 gr/kg klinkeri geçerse by-pass yapma gereğini ortaya koymuştur[7].

Eğer kükürdün (farin ve yakıttan SO_3 olarak gelen) toplam alkalilere moleküler oranı 1.25 'den daha küçük ise alkali by-pass 'ına gerek kalmaz. Alkali by-pass 'ı genellikle klinkerin Na_2O cinsinden toplam alkalisinin 0.60 'dan büyük olduğu ve klinkerin düşük alkali içermesi istendiği durumlarda önerilmektedir[5].

3.1.5.6. Sıvı faz

Alumina, demir, magnezya ve alkaliler gibi düşük ısıda ergiyen elementler genellikle klinkerde oluşan sıvı fazın miktarını etkilemektedir. Ortamda bunların bulunması ergimeyi kolaylaştırmaktadır. Eğer ortamda bu tür elementler bol miktarda bulunuyorsa klinker bileşenlerinin oluşum reaksiyonu çok daha kolay cereyan eder.

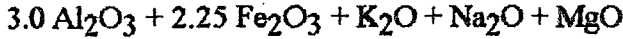
Silis ve alüminyum oranları düşük olan hammadde karışımlarında klinker, klinkerleşme ısısında adeta viskoz bir görünümde olup yapışma ve topraklaşmalara yol açar. Pişmenin kolay olmasından sağlanan yakıt tasarrufu, meydana gelen klinkerin çimento değirmenlerinde güç öğünmesinden kaynaklanan aşırı enerji sarfını karşılamaz. Yani bir başka deyişle, pişme sürecinde sağlanan yakıt tasarrufu klinkeri öğütürken elden çıkmış olur.

Sıvı fazın optimum miktarda olduğu bir farinde yüzey gerilimi yüksek olduğundan mal kolay akar ve sinterleşme ile tanecikler arası reaksiyonlar hızlanır. Böyle bir farinden elde edilen klinker eğer ızgaralı soğutucularda süratle soğutulmuş ise çok iyi bir mikro yapıya sahiptir.

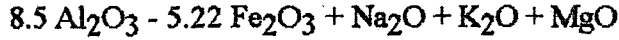
Silis ve alüminyum oranları yüksek olan hammadde karışımlarında sıvı faz miktarı düşüktür, kolay anzast tutmadığından fırın cidarından radyasyonla fazla miktarda ısı kaybı olur, güç sinterleşir, elde edilen klinker oldukça poröz yapıda olup öğütmesi kolaydır.

Genellikle fırında iyi anzast tutturma, yakıttan azami tasarruf sağlama ve en az enerji sarfiyla öğütebilme açısından ideal bir hammadde karışımındaki sıvı faz % 25 dolaylarında olması gerekir.

Sıvı fazın hesabı aşağıda verilen Lea-Parker formülüne göre yapılmaktadır:



Bu formül 1450°C 'da oluşan sıvı faza eşdeğer olup alümina modülünün 1.38 'den düşük olduğu durumlarda kullanılır. Alüminyum modülünün 1.38 'den düşük olduğu durumlarda ise şu formül kullanılmaktadır[5].



3.1.5.7. Serbest silis

Hammadde ve dolayısıyla farinde serbest silis miktarı (kuarz) yüksekse ya da farinde silikat kaynağı olarak kum kullanılıyorsa kırıcıdan başlayarak fırın sistemine kadar pek çok sorunla karşılaşılır.

- a) Kırıcılar çok çabuk aşınır,
- b) Farin değirmeni çok çabuk aşınır ve yıpranır,
- c) Farinin ince öğütülmesi gerektiğinden, değirmen sistemi buna uyacak şekilde dizayn edilmemişse enerji tüketimi çok yüksek olur.

Az miktarda demir oksit katılmasıyla yüksek silisli hammaddenin daha kolay erimesi sağlanarak yakıt tüketimini hatırı sayılır ölçüde azaltmak olasıdır. Fırına verilen malda ne oranda serbest silis bulunması gerektiği konusunda kesin bir değer verilmemektedir; çünkü silis ve alüminyum oranı, alkali ve MgO miktarı, kilin minerolojik yapısı gibi faktörler serbest silisin olumsuz etkisini bir ölçüde gidermektedir.

Yatırım ve üretim maliyetlerini etkilememesi açısından fırına verilen malda serbest silisin % 3 'den olmamasına dikkat edilir. Ancak bu yüzde miktarı da serbest silisin tane büyüklüğüne ve fırına verilen malın inceliğine göre değiştirilebilmektedir[5].

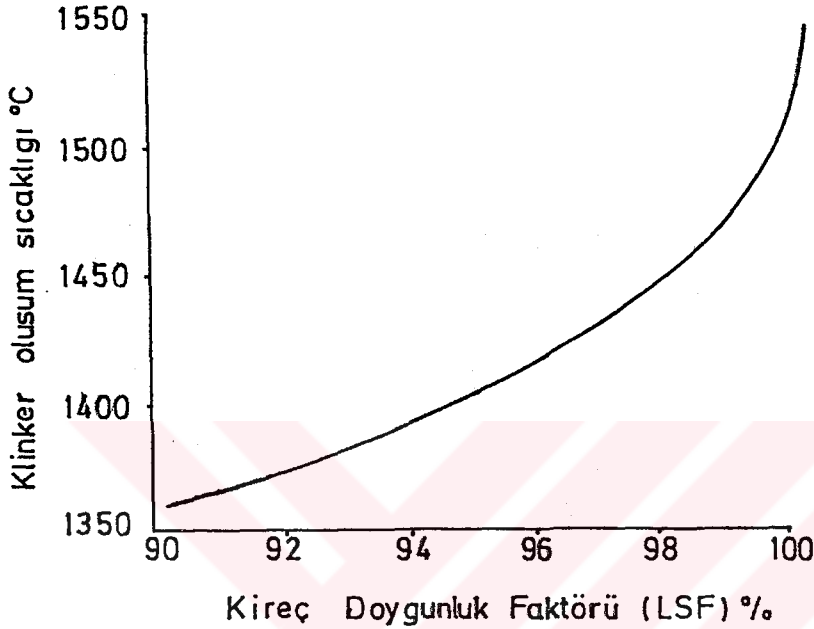
3.1.6. Fiziksel parametreler

Kolay pişen farin elde etmek için, hammaddenin pişirmek için hazırlandığı her ünite de homojenizasyonunun kontrol edilerek mümkün olan en yüksek seviyeye çıkarılması gerekir.

Fırındaki kimyasal reaksiyonun tamamlanamamasının bir nedeni de, C_3S 'ce zengin olarak üretilen klinkerdeki iri kuvarz tanelerinin varlığıyla açıklanabilir. Çare hammaddenin en iyi şekilde öğütülmesidir. Bununla beraber, ince taneli hammaddeler fırın kemerlerinin oluşumunu kolaylaştırırlar. Bundan dolayı pişme(sinter) bölgesinde fazla kalmamaları gerekir.

Diğer taraftan, ince taneler pişme yönünden hammadde kombinasyonunu kolaylaştırırlar. Kireç doygunluk faktörünün 0.95 'e kadar yüksek olduğu hammaddelerde,

0.2 mm 'nin altındaki silis tanelerinden hiç değilse 0.09-0.2 mm. arasındakilerin %1 'den daha fazla olmaması istenir. Genel olarak (LSF) arttıkça klinkerin pişmesi güçleşir. Şekil 3.2 'de kireç doygunluk faktörünün klinker oluşum sıcaklığına olan etkisi verilmektedir.



Şekil 3.2. Kireç doygunluk faktörünün klinker oluşum sıcaklığına etkisi[3]

Ancak düşük LSF' e sahip klinker kullanıldığında, bu miktarların iki misline müsaade edilebilir. Daha büyük taneli silisli kirecin zararlı etkisi olmadan kullanılabildiği hallerde, 0.15 mm ve daha büyük saf kalsit taneleri %5' den fazla olabilir.

Kirece Doyma Faktörü (LSF)

$$LSF = \frac{100 CaO}{2.8 SiO_2 + 1.1 Al_2O_3 + 0.7 Fe_2O_3}$$

3.2. Yakıt Özelliklerinin Isı Sarfıyatına Etkisi

Çimento sanayiinde yakıt olarak kömür, fuel-oil veya doğal gaz kullanılabilir. Yakıt seçimindeki önemli faktörler ucuzluk (TL / kcal), kimyasal kompozisyonun üretim şartlarına uygunluğu (alkali oranı, SO₂ emisyonu, kül oranı, ısı değeri v.s) ve teminindeki kolaylıktır. Genellikle kömür kullanımı en uygun seçim olmaktadır. Göltaş Çimento Fabrikası'nda da yakıt olarak kömür kullanılmaktadır. Bununla beraber bazı

fabrikalarımızda olduğu gibi karma olarak yakıt kullanımı da mümkündür. Güneş ve elektrik enerjisi ile pişirilme üzerindeki araştırmalara da son senelerde başlanmıştır.

Döner fırın sisteminin stabilitesini bozarak ısı sarfiyatını menfi yönde etkileyecek yakıt özellikleri şunlardır:

1) Yakıtın fiziksel özellikleri

- a) Tane iriliği
- b) Yüzey nemi

2) Yakıtın kimyasal özellikleri

- a) Isıl değer
- b) Uçucu madde oranı
- c) Kül oranı

Kömür taneciğinin tam olarak yanabilmesi için belli bir zamana ihtiyaç vardır. Bu zaman, sıcaklığa, tane büyüklüğüne ve uçucu madde oranına bağlıdır.

İstenilen mesafede yakıtı yakarak, gerekli boyda ve sıcaklıkta alev elde edilebilmesi için değirmende öğütülen kömür iriliğinin uçucu madde oranına uygun olması gerekir. Karbon taneciği etrafında ilk alevin oluşmasını sağlayan uçucu maddelerin, taneciği tamamen yakacak miktarda sıcaklığı temin edip etmeyeceği kömürün tane büyüklüğü ile direkt olarak ilgilidir. Kömür fazla iri ise, iri tanelerin tehlikeli miktarları sinterde tutuşmaya fırsat bulamadan fırın girişine sürüklenir. Uçucu madde oranı % 20' den düşük kömürlerde tam yanmanın meydana gelmesi çok zordur. Uçucu madde oranı arttıkça yangın ve patlama tehlikesi de artar. Genel olarak, kömürün tam olarak yanabilmesi için uçucu madde oranı 90 µm. elek bakiyesinden daha fazla olmalıdır.

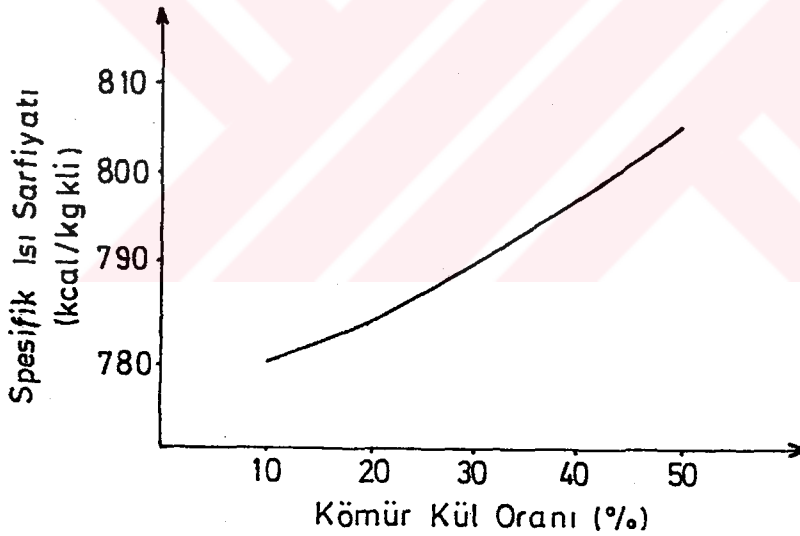
Yüksek nem oranına (yüzey nemi) sahip kömürler, fırına verilmeden önce sabit bir değere kadar kurutulmalıdır. Kurutma işleminde döner fırın sisteminin atık gazlarından faydalanılması, fabrikanın toplam ısı verimine olumlu yönde katkıda bulunacaktır. Rutubet fazla olduğu zaman kömürün içerisindeki suyu buharlaştırıp, alev sıcaklığına kadar ısıtmak için bir miktar kalori sarfi olacaktır. Bu nedenle yanma şartlarında ve alev formunda zayıflıklar meydana gelir. Rutubet arttıkça alev uzar ve alev sıcaklığı düşer. Fakat kömürün ilk tutuşması için bir miktar suya ihtiyaç vardır. Karbon (C) doğrudan doğruya hava oksijenine etki etmez. Yakıtın ateşlenmesi için az miktarda su buharının mevcudiyeti gereklidir. Bu nedenle öğütülüp kurutulan kömürde yaklaşık %1-1.5 nem miktarı yanmayı oluşturur[1].

Kömür kurutulur ve 0.09 mm. delikli elekte %5-20; 0.2 mm.'lik elekte %0.5 artık bırakacak incelikte öğütülerek inceltirilir. Bu incelik sınırları içinde kalmak üzere gazı az olan kömürler daha ince, gazı çok kömürler ise daha kalın öğütülür[8].

Fabrikalarımızda kullanılan kömürlerin kimyasal kompozisyonun farklı olması nedeniyle yakıt brülörüne verilen kömürdeki ısı değer oynamaları ısı verim yönünden oldukça ciddi bir problemdir.

Kullanılan kömürün ısı değeri arttığında veya azaldığında, sisteme giren ısı enerjisinde değişiklik olacağından, işletmenin stabilitesi bozulacaktır. Dengeyi tekrar sağlamak için, proses değişkenlerinde yapılacak bir değişiklik, sistemi hemen denge konumuna getirmeyebilir. Bu durumda; yüksek pişme sıcaklığı, minimize edilemeyen gaz debisi ve anzast erimesi gibi unsurlar gerek spesifik ısı sarfiyatını gerekse klinker kalitesini olumsuz yönde etkiler[3].

Ülkemizde kullanılan düşük kaliteli kömürlerden kaynaklanan en önemli sorunlardan biri de yüksek kül oranıdır. Genel olarak; kullanılan kömür külünün hemen hepsi klinkere dahil olarak sistemi terk eder. Normal olarak kömür külünün kimyasal kompozisyonu hammadde olarak kullanılan kile benzer yani kireç oranı düşüktür. Şekil 3.3 'de kademeli ön ısıtıcılı bir döner fırında kömür kül oranına bağlı olarak spesifik ısı sarfiyatı verilmektedir.



Şekil 3.3. Kademeli ön ısıtıcılı bir döner fırında kömür kül oranına bağlı olarak spesifik ısı sarfiyatı[3]

Bunun anlamı, düşük kaliteli (yüksek kül oranına sahip) kömür kullanımında, belirli bir LSF değerine ulaşmak için hammaddenin LSF değerinin artırılması gerektiğidir.

Genellikle; yüksek LSF değerine sahip bir hammadde karışımı elde etmek problem değildir. Ancak; fırındaki stabil şartları bozmadan, tatmin edici bir klinker kalitesi elde etmek için aşağıdaki şartların yerine getirilmesi gerekir.

- 1) Kömür külü sisteme devamlı olarak önceden tahmin edilen oranda girmelidir.

2) Kömür külü tüm klinkere homojen olarak dağılmalıdır.

Düşük kaliteli kömür kullanıldığında özgül ısı tüketiminin fuel-oil veya yüksek kaliteli kömürle çalışan duruma göre artacağı gözönüne alınmalıdır. Bunun bir nedeni, düşük kaliteli kömür ile çalıştığında sisteme beslenen hammaddenin azaltılması gereğidir. Çünkü kömür külü bir kısım hammadde karışımının yerini alacaktır. Sonuç olarak; ön ısıtıcıdaki ham karışım / duman gazı oranı azalır, ön ısıtıcıdan çıkan duman gazı entalpisi artar. Düşük kaliteli kömür kullanımında ham karışım/ duman gazları miktarının azalmasının diğer nedeni de düşük kaliteli kömürden oluşan duman gazı miktarının artmasıdır. Kömürdeki kül oranı %7-14 olmalıdır.

Düşük kaliteli kömür kullanımının yüksek özgül ısı tüketimine neden olmasının diğer bir nedeni de, kömürü taşıyan primer hava miktarının artması dolayısıyla sıcak sekonder havanın azaltılması gereğidir.

Bununla beraber; düşük kaliteli kömür kullanımının üretim maliyetine etkisi düşük kaliteli kömür ve yüksek kaliteli kömür arasındaki fiyat farkı ile dengelenecektir. Ayrıca, kömür külünün hammadde yerini alacağı da göz önüne alınmalıdır.

Buradan anlaşılacağı üzere, düşük kaliteli kömürün ön kalsinasyonda kullanımı, döner fırında kullanılmasından daha az sorun çıkarır. Bu na göre, düşük kaliteli kömür kullanılacağı zaman ön kalsinasyonlu fırın sistemi tercih edilmeli ve fırın sistemine ön kalsinasyon bölgesinden ısı girişi ile fırın brülöründen ısı girişi arasında mümkün olabilecek en yüksek oran sağlanmalıdır[3].

Kömürler organik ve mineral bileşim maddelerinden ibarettir. Karbon (C), hidrojen (H_2), oksijen (O_2), azot (N_2) organik bileşiklerdir. Kükürt (S), kül ve alkaliler, florür, klorür, fosfatlar da mineral bileşimlerini oluştururlar. Ayrıca kaynağına göre bir miktar su ihtiva eder. Fırına verilecek kömürde %1 'den daha az su bulunmalıdır.

Kömürde; karbon, hidrojen ve kükürt yanabilen bileşim maddelerini teşkil eder. Bu maddeler havanın oksijeni ile yanar ve ısı oluştururlar. Yakıtta yanıcı maddeler ne kadar fazla olursa yanma ısıları o denli yüksektir. Bir yakıtın değerlendirilmesinde sadece karbon ve hidrojen miktarı göz önüne alınır. Kükürt yanıcı olmasına rağmen kömürün bünyesinde olması iki şeyden dolayı istenmez.

1) Kalıcı kükürt: Kömür yanması ile külde kalan kükürttür. Kül ile beraber klinker bünyesine girer ki bu klinker kalitesi yönünden istenmeyen bir durumdur.

2) Yanıcı kükürt: Kömürdeki kükürdün bir kısmı yanarak SO_2 gazı haline geçer ve baca gazları ile sürüklenir. Kuru sistem fırınlarda baca gazları siklonlardan geçerken ve kısmen de farin kurutulması için farin değirmenine verildiğinde kalker ile SO_3 reaksiyona girerek $CaSO_4$ meydana gelir ve tekrar fırına gelir. Bu da klinkerdeki SO_3 miktarını artırır. Ayrıca $CaSO_4$ döner fırın intikallerine yapışarak daralmalara sebep

olduğu gibi döner fırında sülfat kemerlerini oluşturup fırın rejiminin bozulmasına sebep olmaktadır. Kömürdeki kükürt oranı %0.8-2.0 kadar olmalıdır[1].

3.3. Yakma Teçhizatı ve Alevin Yakıt Tüketimine Etkisi

Etkin yanma için gerekli en kritik donanım brülör teçhizatıdır. Kömürün primer hava ile yeterince karıştırılması ve yeter hızla püskürtülmesi etkin bir yanmanın ön koşuludur. Göltaş Çimento Fabrikası'nda da bu şekilde yakma söz konusudur. Burda ilk ateşlemelerde ısınma fuel-oillü olduğu için fuel-oil 120°C 'ye kadar buharla ısıtılır. Fırında kömür yanabilecek duruma gelinceye kadar fuel-oil ile ısıtmaya devam edilir. Bu şekilde duruş zamanına göre değişmek üzere 8-10 saat sürer.

Kömür parçacıkları fırına girdikleri zaman, alevden ve fırın duvarından radyasyon yolu ile ısınırlar. Tanecikler daha da ısınunca uçucu maddelerin destilasyonu başlar ve ilk alevlenme meydana gelir. Tanecikler ne kadar küçük olursa bu proses o kadar hızlı oluşur ve alev, tanecik büyüklüğü ve püskürtme hızına bağlı olarak, brülör ağzından belli bir uzaklıkta kendini gösterir.

Sekonder hava taneciklere ulaşınca yanma artar. Ancak başlangıçta hava ile kömürün tam karışımı sağlanamadığı için uçucu maddeler tümüyle yanamaz ve henüz yanmamış gazlarla birlikte bir miktar is oluşur. Alev boyunca karışma işlemi tamamlandıkça is ve koklaşmış kömür tanecikleri tamamıyla yanar. Alev boyu en iri tanenin yanması için geçen zamana göre oluşur. Genel olarak brülörden çıkış hızının artması, hava/kömür oranının artması, kömürdeki uçucu madde oranının artması ve tane büyüklüğünün azalması alev boyunu kısaltır. Panaj bölgesi de (brülör çıkışından ilk alevlenme noktası arasındaki mesafe) yukarıdaki değişikliklerden aynı şekilde etkilenir. Ancak brülör çıkış hızının artması ile panaj bölgesi büyür. Brülörün korunması için panaj bölgesinin yeterince uzun olması (tipik olarak 1 m. civarında) tuğlaların korunması için de alevin yeterince kısa olması gerekir. Bunun yanında kısa alev kalsinasyon bölgesini genişletir ve genellikle fırın kapasitesini artırır. Ancak kısa alev, civarındaki tuğlaların zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle alevin optimum boyu ve sıcaklığı her fabrikanın işletme şartlarına göre belirlenmelidir.

Aleve tesir eden faktörlerden bir diğeri de primer ve sekonder hava sıcaklıklarıdır. Primer havanın brülöre verilmesiyle, yakıtın alev borusu içinde tutuşması ve patlamalara sebep olması gibi bir tehlike vardır. Bundan dolayı çok fazla sıcak tutulması mahsurludur. Primer hava sıcaklığı için 400°C 'lik bir limit vardır. Sekonder hava ise ekipmanlara ve fırın kafasına zarar vermeyecek kadar yüksek olmalıdır. Bu bir yerde soğutucu veriminin de artırılması demektir[9].

En iyi ısı transferinin alevin hafifçe mala değmesi ile oluştuğu kabul edilir. Diğer taraftan, alev mala çok yatırılırsa bilhassa kömür ile çalışmada yakıt yanmadan malın içine girecektir. Eğer alev fırın cidarına yakın olarak yerleştirilirse bu defa da anzaştı yalayacak ve tuğla ömrü azalacaktır[3].

Alev sıcaklığı, fırın kafası ve refrakter malzemelerin müsaade ettiği kadar yüksek tutulursa etkin yanma ve ısı transferine katkıda bulunur. Genellikle, pişme sıcaklığından yaklaşık 300°C daha fazla bir sıcaklık alev için yeterli görülmektedir.

Brülörden geçen kömür karışımındaki külün bir kısmı pişme bölgesinde henüz oluşan klinkerin üzerine düşebilir. Böylece, yüzeyinde bir kül tabakası olan ve yüksek miktarda serbest kireç içeren klinker oluşabilir. Bu nedenle brülör, kömür külünü topraklaşmadan önce hammadde karışımı ile karışabileceği kadar ileri püskürtecek kapasitede olmalıdır.

Kömürdeki kül miktarı alevi de etkiler. Artan mineral oranı alev sıcaklığını, emisyonu düşürür ve yanma hızını da etkileyebilir. Bu durumda alev sıcaklığı ve ısı transferi, istenen LSF değerine ulaşmaya yetmeyebilir. Böyle durumlarda alev şiddetini arttırmak için, kömür karışımı daha ince öğütülmeli ve primer hava önceden ısıtılmalıdır.

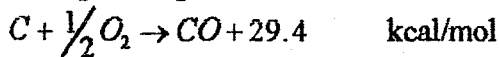
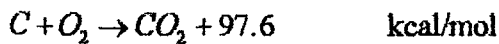
Kömürdeki külün fırının sınırlı bir bölgesinde çökelme eğilimi vardır. Kül, bu bölgede refrakter malzemeye yapışarak kemer oluşturur. Buna ek olarak refrakter malzemeyle kimyasal reaksiyona girebilir ve refrakter malzemeyi tahrip edebilir.

Bu nedenler dolayısıyla, alev uzunluğu ve konumu kontrol edilebilen bir brülör kullanımı avantaj sağlayacaktır[3].

3.4. Yakma Havasının Yakıt Sarfıyatına Etkisi

Yanma olayı birbiriyle birleşebilen bir yakıcı madde ile bir yanıcı madde arasındaki kimyasal reaksiyona denir. Yani yanma, yakıtta mevcut karbon, hidrojen ve kükürdün hava oksijeni ile ısı vererek birleşmesidir[1]. Döner fırında kömürün yakılması için gerekli oksijen(%70-95) klinker soğutma havasından temin edilir. Soğutucudan alınan havanın sıcaklığı ve sahip olduğu entalpi döner fırının özgül ısı tüketimini direkt olarak etkiler. Yakma havasının sıcaklığı kömür taneciğinin etkin biçimde ve istenilen mesafede yanmasını sağlayacaktır. Yakma havası miktarındaki yetersizlik veya sıcaklığındaki düşüş yanma verimini olumsuz yönde etkileyecektir.

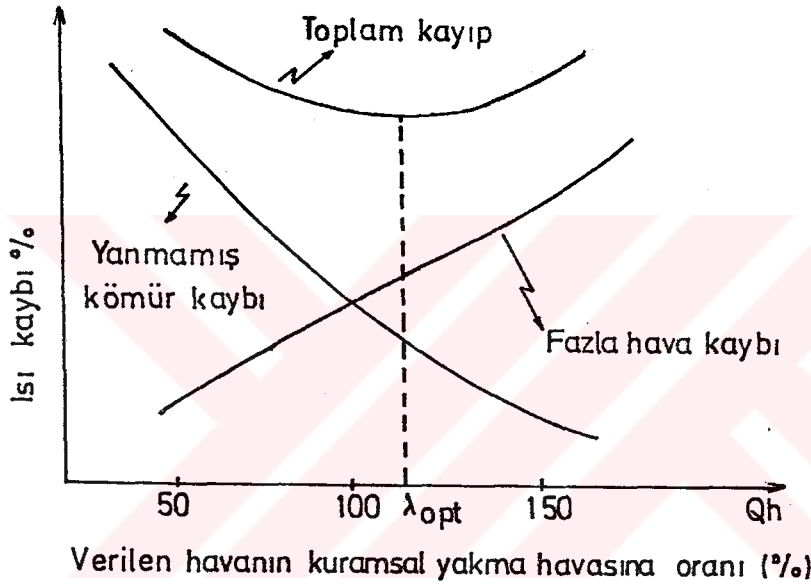
Aşağıda görüldüğü gibi karbon oksijenle iki ayrı biçimde birleşerek yanabilir;



Görüldüğü gibi fırına az hava verildiğinde eksik yanma oluşmakta ve her mol karbon için 68.2 kcal eksik enerji elde edilmektedir. Bunun aksine fazla hava verilirse

aynı miktar yakıt için alev uzar, soğur ve fırın girişi fazla ısınır. Alevin soğuması ısı transferini olumsuz yönde etkiler ve gerekli özgül ısı ihtiyacı artar.

Şekil 3.4' de optimum yakma şartları gösterilmektedir. Görüldüğü gibi yanmayı garantilemek için fazla hava verildiğinde, hammaddeye transfer edilmek için üretilen ısının bir kısmı, sisteme verilen fazla havanın ısıtılması için kullanılmakta, dolayısıyla ısı verimi düşürmektedir. Buna ek olarak, fırın sisteminde tasarımda kabul edilen miktarın üzerinde gaz bulunmasıyla da hem ısı verim hem de üretim düşecektir. Toz kömür yakma sistemlerinde fazla hava, genel olarak yanma için gerekli havanın %10-25 'idir.



Şekil 3.4. Eksik yanma ve fazla hava kaybı[3]

3.4.1. Sekonder hava

Daha önce belirtildiği gibi, yakma amacıyla soğutucudan alınan havanın(sekonder hava) miktarı kadar sıcaklığı da ısı verim ve özgül ısı sarfiyatını etkiler.

Bir fırına malı pişirmek için giren Q ısısı, yakıttan gelen Q_1 ısısı ile sekonder havadan gelen Q_2 ısılarının toplamına eşittir. Üretilen klinker miktarı M kg/saat, özgül ısı tüketimi q kcal/kg. kli. ise;

$$\begin{aligned} Q_1 &= M \cdot q && \text{kcal/saat ve} \\ Q_2 &= V_{\text{sek}} \cdot C_p \cdot T && \text{kcal/saat olduğuna göre} \\ Q &= M \cdot q + V_{\text{sek}} \cdot C_p \cdot T && \text{kcal/saat olur.} \end{aligned}$$

Görülmektedir ki, sekonder havanın fırına giriş sıcaklığı arttırılırsa, fırına verilen sabit bir Q ısı ihtiyacı için, q özgül ısı sarfiyatı azalır. Dolayısıyla sekonder havanın

mümkün olan en yüksek sıcaklıkta fırına verilebilmesi amacıyla, klinker soğutucunun mümkün olan en yüksek verimle çalıştırılması gerekir.

Soğutucu ısı kazandırma verimi, aşağıdaki şekilde tanımlanır. (%)

$$\frac{\text{Sıcak klinkerden sekonder havaya transfer olan ısı}}{\text{Fırını terkeden sıcak klinkerde bulunan ısı}} \times 100$$

Döner fırının yakma işlemi için gerekli sekonder hava ihtiyacı arttıkça soğutucu (ızgaralı) verimi de yükselecektir. Diğer bir değişle fırın sisteminin yakıt sarfiyatı düştükçe soğutucunun ısı kazandırma verimi de azalacaktır.

Genel olarak kuru sistemde ızgaralı soğutucu verimi, kuramsal olarak %70 civarında olabilir. Fiili verimi ise, fırına yakma için giren sekonder hava ile kömür taşıma amacıyla kullanılan primer hava ve kaçakların seviyesine bağlı olacaktır.

Buna ek olarak yüksek soğurma performansının diğer önemli faydası; sıcak yakma havası sayesinde alev sıcaklığı yükselmesi ile pişme bölgesindeki ısı transferinin artmasıdır.

Izgaralı soğutucuların veriminin artırılması soğutucudan geçen klinker tabakası kalınlığının artırılması ile sağlanabilir. Böylece, soğutma havası sıcak klinkerle daha uzun süre temas edeceğinden sıcaklığın da göreceli olarak daha fazla oranda artış meydana gelebilir. Göltaş Çimento Fabrikası'nda da ızgaralı soğutucu kullanılmaktadır.

Döner ve planet soğutucularda, karşı akıma dayalı bir ısı alışverişi meydana geldiğinden kuramsal olarak daha yüksek verim beklenebilir. Ancak, artan radyasyon kayıpları nedeniyle bu soğutucuların fiili verimi yaklaşık olarak ızgaralı soğutucular kadardır. Bu tip soğutuculardan daha yüksek verim alınabilmesine diğer bir engel de sıcak bölgedeki kanatlar ve soğutma boğazlarında kullanılabilecek tip malzemedeki sınırlamalardır[3].

3.4.2. Primer hava

Fırına giren ikinci tür hava kömürü brülör ağzına özel bir vantilatör vasıtasıyla naklederek bu noktadan belirli bir hızla püskürtmek için kullanılan primer havadır. Yakıt olarak kömür kullanılıyorsa primer hava miktarı toplam kullanılan hava miktarının %15-20 arasında olmaktadır[1].

Kömür değirmeninde öğütülen kömür fırına iki değişik sistemle verilebilir.

1) Direkt sistem : Bu sistemde, kömürün kurutulması ve öğütme sistemindeki sirkülasyonu için kullanılan hava, kömürün brülör ağzına taşınarak fırına püskürtülmesi için de kullanılır. Göltaş Çimento Fabrikası'ndaki sistem bu şekildedir.

2) Endirekt sistem : Bu sistemde ise öğütülen kömür bir stok silosunda depolanır. Fırına taşınması için gerekli miktar ve basınçta havanın içine bir besleme aygıtıyla boşaltılarak nakledilir.

Direkt sistemde fırına verilen primer havanın miktarı daha fazla olmaktadır. Buna ek olarak, bu havanın bazı hallerde kömürün kurutulması amacıyla da kullanıldığı göz önüne alınırsa, nem oranı da hayli yüksektir. Fırına sıcak sekonder havanın daha az kullanılması pahasına nispeten yüksek miktarda primer hava verilmesi ısı sarfiyatını artırır. Ayrıca söz konusu havanın içerisinde bulunması muhtemel olan yüksek orandaki nem, oluşan ısı enerjisinin bir kısmını kullanacaktır.

Dolayısıyla endirekt sistemle fırına kömür beslenmesiyle, direkt sisteme göre daha az yakıt tüketileceğini söylemek mümkündür[3].

3.4.3. Kaçak hava

Fırına verilen üçüncü tür hava ise fırın giriş ve çıkışı ile ön ısıtıcının çeşitli yerlerinden sisteme giren kaçak havadır.

Sisteme kaçak hava girmesi sonucunda ortam şartlarındaki hava, sisteme girdiği yerdeki sıcak gazın ısını düşürür. Diğer bir deyişle, sıcak gazdan kaçak havaya ısı transferi gerçekleşir. Bu durumda sistemde bulunan gaz miktarı da artarak üretimi olumsuz yönde etkileyecektir.

Dışarıdan sisteme kaçak hava girmesi normal şartlarda büyük oranda malzemeye transfer olacak ısıнын önemli bir kısmının kaçak hava sıcaklığını arttırmak amacıyla kullanılması sonucunu doğurur[3].

3.5. Proses Kontrol

Fırın performansını etkileyen başlıca unsurlar, beslenen malzemenin miktarı ve kompozisyonunda, verilen ısı enerjisinde, fırın içerisindeki gazın akışında, sekonder hava sıcaklığında ve malın fırın içerisindeki akış hızında meydana gelen değişimler ve dalgalanmalardır.

Genelde döner fırındaki klinkerleşme prosesinin kontrolü, oluşan klinkerin istenilen kalitede üretilmesini sağlamak üzere, beslenen mal miktarı ile primer enerji (yakıt) dengesini korumakla görevli tecrübeli pişiricilerle yapılır.

Ürün kalitesi, genelde, klinkerdeki serbest kireç oranı ile belirlenir. Sinterizasyon işleminin hayli ekzotermik bir yapıda olması, pişiricilerin daha stabil olan sıcak bölgede çalışma olasılıklarını arttırmaktadır. Daha az stabil olan optimum bölgede fırın çalıştırmak, doğal olarak pişiricilere riskli gelecektir. Çünkü, hammadde özelliklerinde ve

pişirme bölgesi sıcaklığında meydana gelebilecek küçük bir değişiklik kalitesiz klinkere ve dolayısıyla üretim kaybına neden olacaktır. Bu durumda, genel olarak pişiricilerin klinkeri yüksek özgül ısı tüketimi ve düşük klinker kalitesi pahasına, fazla pişirmeye meyilli olduklarını söylemek mümkündür.

Esasen, döner fırına giren hammadde ve yakıtın miktar ve kompozisyonlarındaki değişiklikler kaynağında yok edilirse, döner fırın işletme koşulları çok daha stabil hale gelir. Artan stabilitenin faydası, düşük maliyetle yüksek üretim sağlanması, daha verimli yakıt kullanımı, tuğla ömürlerinin uzaması ve kaliteli klinkerle kendini gösterecektir. Stabil fırın şartı demek, çok az veya hiç değişmeyen şartlarla denge şartlarında fırını tutmak demektir.

Alınan tüm tedbirlere rağmen fırın şartlarında meydana gelebilecek değişiklikler dikkatle izlenmeli ve stabiliteyi sağlamak amacıyla, fırın sistemindeki dört bağımsız kontrol parametresi (yakıt ve mal miktarı ile, baca gazı vantilatörü ve fırın devri) şartlara göre uygun biçimde ayarlanmalıdır. Ancak, her pişirici veya vardiya mühendisinin subjektif kontrol kriterlerinin, sistemin stabilitesine olumsuz etkide bulunacağı kabul edilmelidir. Örneğin; alev rengine göre pişirme sıcaklığı tespit edilirse proses, pişiricilerin farklı izlenimlerine bırakılmış demektir.

Vardiya arasındaki farklılıkların ve insandan kaynaklanan hata payının minimize edilmesi için, prosesin etkin kontrolünde bazı enstrümanlara ihtiyaç vardır. Bu enstrümanlardan okunacak değerler bir referans değerle karşılaştırılarak elle ya da otomatik olarak kontrol parametrelerinde yapılacak değişikliğe yön gösterecektir.

Isı ekonomisi yönünden, gelişmiş klinker üretimi uygulamalarında kullanılan enstrümanların hemen hepsi gerekli olmakla beraber, ısı ekonomisi yönünden en kritik olanları oksijen ve azotoksitlerin baca gazındaki oranının analiz edildiği ve kumanda panosunda bir gösterge ile izlendiği aygıtlardır.

Fırındaki en yüksek sıcaklığın, NOx emisyonuna göre kestirilmesi, gelişmiş fabrikalarda uygulanmaktadır. Fırın tahrik motorunun çektiği güçte bu amaçla bazen kullanılmakla beraber, NOx emisyonunun sıcaklığa daha kısa sürede cevap verdiği tespit edilmiştir. Yüksek NOx oranı yüksek sinter sıcaklığını göstermekte ve dolayısıyla fazla yakıt tüketimini ifade etmektedir.

Düşük NOx seviyesiyle çalışabilmesi için, fırının stabilitesinin korunması gerektiğine daha önce değinilmişti. Sistemi çok karmaşık otomatik kontrol yöntemleri ile çalıştırmak yerine (prosesin karmaşıklığı nedeniyle, karmaşık matematiksel kontrol yöntemleri henüz tam anlamıyla başarılı olamamıştır), ölçümlerden çıkarılan sonuçların ve kontrol parametrelerinin pişiriciler tarafından aynı şekilde yorumlanarak ayarlanması için bazı kurallar belirlenebilir.

Bu sistemde, herhangi bir proses değişkeni yüksek, normal, düşük olmak üzere üç konumludur. Amaç, değişkenin önceden belirlenecek normak konumunda tutulmasıdır.

Oksijen lmnn hemen döner fırın çıkışında yapılmasında büyük yarar vardır. Abgaz vantilatörü öncesindeki ikinci oksijen analiz cihazındaki değerle aradaki farklılık büyük oranda ise, mutlaka n ısıtıcıdan sisteme kaçak hava girdiği söylenebilir. n ısıtıcıdan sisteme girebilecek kaçak havanın özgül ısı tüketimine etkisi Kısım 3.4.3' de anlatılmıştı.

Teorik olarak, fırın çıkışındaki oksijen seviyesi ön ısıtıcı çıkışından fazla olmalıdır. Çünkü abgaz içerisindeki CO_2 oranı, fırın çıkışındaki gazlardan (kalsinasyonun bir kısmının n ısıtıcıda gerçekleşmesi nedeniyle) daha yüksektir. Fırın ıkışı oksijen oranının normal değeri, n ısıtıcıda malın kalsinasyon oranına bağlı olarak belirlenebilir. Kısım 5.3 'deki hesap tarzı, bu amaçla kolaylıkla kullanılabilir.

Oksijen analizinin hemen fırın çıkışında yapılması, yüksek sıcaklıkta analiz çubuğunun yanması dolayısıyla bazı hallerde sorun yaratmaktadır. Ancak ubuğun etrafından çevresel olarak su dolaştırılmasıyla, sıcaklığın kritik seviyeye ulaşması engellenebilir. Bu amaçla, önısıtıcı binasına tesis edilebilecek bir su deposu ve cihazdan gelen sıcak suyun atıldığı bir musluk yeterli olacaktır. Su deposu bir kaç günlük kapasiteye göre dizayn edildiği takdirde, elektrik kesilmesi v.s. gibi dış etkiler de sistemi etkilemeyecektir.

4. DÖNER FIRINDA ISI TRANSFERİ

Bir yerden bir yere ısı nakli üç yolla yapılır.

1) Radyasyon : Taneler birbirine temas etmeden, sıcak yüzeyden yayılan ısı dalgaları ile diğer yüzeyin ısınmasıdır.

2) Kondüksiyon : Sıcak yüzeyin soğuk yüzeyi temasla ısıtmasıdır.

3) Konveksiyon : Sıcaklığın bir akımla bir yerden diğer bir yere naklidir.

- Alevin yaydığı ısı dalgaları ile ısınma (alev radyasyonu)
- Alevin az da olsa teması ile ısınma (alev kondüksiyonu)
- Sıcak fırın duvarlarının yaydığı ısı ile ısınma (duvar radyasyonu)
- Fırın dönmesi ile sıcak fırın cidarının daha soğuk mala temasla ısınma (duvar kondüksiyonu)
- Sıcak gazların yaydığı ısı ile ısınma (gaz radyasyonu)
- Ön ısıtıcılarda gazın mal ile temasla ısınması (gaz kondüksiyonu)

olarak döner fırınlarda ısınma meydana gelir. Fırınlarda konveksiyonla ısınma çok azdır. Görüldüğü gibi, ısınmanın en önemli şekli, sıcak fırının duvarları ve alevden gelen radyasyon ve daha az tesirli olmakla birlikte malın sıcak fırın duvarlarından temasla yaptığı kondüksiyondur.

Transfer edilecek ısıнын en çok olabilmesi için iki yüzey arasındaki sıcaklık farkının en fazla olması gereklidir. Bu alevin neden mümkün en yüksek sıcaklıkta olması gereğini izah eder. Fırının değişik bölgelerinde ısı transferi farklıdır. Bu bakımdan fırına verilen ısı kadar, ısıнын fırın boyunca dağılımı da önemlidir. Mevcut göstergeler genellikle yalnız gaz sıcaklığını gösterir ve aynı yerdeki mal sıcaklığının bir göstergesi olmayabilir. Mesela gaz sıcaklığındaki bir değişiklik hemen maldaki bir değişiklik demek değildir. Bu fark malda daha sonra kendini gösterir. Görüldüğü gibi kalsinasyon bölgesindeki mal yavaş ısınmaktadır. Farindeki CO₂ tamamen çıkınca klinkerleşmenin ilk adımı başlar. Bu reaksiyon ekzotermiktir. Reaksiyon ısısının da tesiri ile malın sıcaklığı sinter girişinde birden yükselir. Pişmeden sonra tekrar düşerek soğutmaya dökülür.

Pişme bölgesinde gazdaki ısıнын radyasyonla fırın içindeki mala geçmesi yalnız gazı gören mal yüzeyinde olur ve yüzey ısınır. Malın merkezinde kalan kısım en soğuk bölgedir. Fırın dönmesi ile sinterdeki bu mal fırın cidarı ile beraber hareket eder. Belli bir yere gelince de birbiri üzerine yuvarlanırlar. Bu hareketle yüzey daimi yenilenir ve soğuk

taneler yüzeye çıkıp radyasyonla ısınırken ısınmış sıcak taneler malın içine karışarak kondüksiyon yoluyla daha soğuk olanları ısıtır.

Kalsinasyonda ve fırın girişinde ise durum farklıdır. Fırın cidarı daha düzgündür. Taneler çok az yuvarlanma fakat daha çok kayma hareketi yapar.

Ön ısıtıcılarda ise farın fırın gazları içinde süspansiyon halindedir. Sıcak gaz ile temasla çok çabuk en yüksek sıcaklığa ulaşır.

Aynı tarzdaki bir ısıtma fırın duvarlarıyla da oluşur. Sıcak gazlar, açıktaki fırın cidarını ısıtır. Bu ısının bir kısmı radyasyonla bir kısmı da fırın dönmesi ile farine geçer. Fırın ne kadar yavaş dönerse cidarlar o kadar ısınacak ve o kadar fazla radyasyon yapacağı gibi sıcak cidar malın altına gelince daha fazla ısı kondüksiyonla farine geçecektir. Dolayısıyla fırındaki malın alt ve üst noktalarındaki fırın duvarı sıcaklıkları farkı artacaktır. Bu durum malın pişmesi kadar anzast bağlama bakımından da çok önemli bir husustur.

Fırına verilen tüm ısının yarısından çok daha az kısmı pişme için sarfedilir. Kalan kısmı ise çeşitli şekillerde kaybolur. Bu bakımdan fırın sistemleri verimli çalışan ısı reküparatörleri değildir. Klinkerin pişmesi için 420-440 kcal/kg. kli. ısı (reaksiyon için) gereklidir. Bunun üzerindeki değerler fırın ve pişirme, soğutma sistemine bağlı olan kayıp ısılardır. Bu kayıp ısılardan kaçınılmaz fakat daha dikkatli operasyonlarla en aza indirilebilir[10].

5. DÖNER FIRIN ISI BALANSI

5.1. Fabrikanın Kimya Laboratuvarı ve İşletme Raporlarından Alınan Değerler

Aşağıda verilen değerler Göltaş Çimento Fabrikası 'ndaki II. Hat döner fırın için 1993 yılı değerleridir[11].

1) Döner fırında toplam kömür tüketimi (Kuru sistem için) = 75509 ton kömür /yıl

2) Klinker üretimi = 255200 ton klinker /yıl

3) Kullanılan kömürün alt ısı değeri (H_u) = 4600 ± 100 kcal/kg. kömür

4) Ortalama klinker analizi

<u>Bileşen</u>	<u>Miktar (%)</u>
CaO	65.98
MgO	2.05
Al ₂ O ₃	5.82
SiO ₂	20.64
Fe ₂ O ₃	3.80
SO ₃	1.19
Ateş yaiatı	0.05

5) Farin üretimi = 426458 ton farin /yıl

6) Farindeki CaCO₃ yüzdesi yıllık ortalaması = % 78.5 $\pm$ 0.4

7) Ön ısıtıcı çıkışındaki gaz sıcaklığı = 350°C

8) Döner fırına girişte farinin içerdiği nem= max %1.5

9) Döner fırından çıkan klinkerin soğutucuya girmeden önceki sıcaklığı 1100-1200°C dir. Soğutucuyu terk eden klinkerin soğutucudan çıkış sıcaklığı 80 °C 'dir.

10) Döner fırına verilen kömürün karbon, hidrojen ve kükürt yüzdeleri;

<u>Kömür bileşenleri</u>	<u>Miktar (%)</u>
Karbon	70.5
Hidrojen	5.5
Kükürt	2.5

11) Döner fırına verilecek yaklaşık farın yüzdeleri;

<u>Bileşen</u>	<u>Bileşenlerin Yüzdeleri (%)</u>
CaCO ₃	43.80
SiO ₂	12.37
Al ₂ O ₃	3.23
Fe ₂ O ₃	2.40
MgO	1.04
Ateş yatağı	36.14

5.2. Kuru Sistem Çimento Üretiminde Döner Fırın Isı Balansı

Bu sistemde yapılan ısı bilançosu hesabında gereken veriler, fabrikanın 1993-1994 yılı kimya laboratuvarı analiz sonuçları ile fabrikanın aynı yıldaki işletme raporlarından alınmıştır.

Döner fırına verilen yakıtın ve hammaddenin çevre sıcaklığında olduğu kabul edilmiş bu yüzden de hissedilir entalpi sıfır alınmıştır.

Hesaplamalarda c_p 'nin (sabit basınçtaki özgül ısı değeri) sıcaklığa bağlı olarak değiştiği değerler dikkate alınmıştır. Isı balansı düzenlenirken ve hesaplamalar yapılırken, birim klinker (1 kg) esas alınmıştır.

Meteorolojik verilere göre ortalama yıllık sıcaklık 4°C alınmıştır. Isı bilançosu hazırlanırken ısı girdileri ve ısı çıktıları tek tek hesaplanıp sonuçlar tablo halinde çıkartılacaktır.

5.2.1. Isı girdileri

5.2.1.1. Döner fırına birim klinker üretimi başına verilen ısı

Bu değer, döner fırının yıllık kömür tüketimi ve klinker üretimi ile kullanılan kömürün ısı değeri bulunabilir. 1993 yılında kuru sistem II.Hat döner fırındaki toplam kömür tüketimi: $I_{kt} = 75509$ ton kömür/ yıl , klinker üretimi: $\dot{U}_{kl} = 255200$ ton

kl/yıl olduğuna göre 1 kg klinker üretmek için gerekli kömür : i_{kt} = Birim klinker üretimi başına harcanan kömür.

$$i_{kt} = \frac{I_{kt}}{U_{kt}} = \frac{75509 \text{ ton kömür/yıl}}{255200 \text{ ton klinker/yıl}} = 0.295 \text{ kömür/klinker} \quad (5.1)$$

$$Hu = 4700 \text{ kcal/kg.kömür}$$

$$Hu = 4700 \times 4.1855 = 19672 \text{ kJ/kg.kömür.}$$

Buradan da birim üretim başına kuru sistem çimento üretiminde toplam enerji girdisi: q_G ,

$$q_G = i_{kt} \cdot Hu \quad (5.2)$$

$q_G = 0.295 \times 19672 = 5803.24 \text{ kJ/kg.klinker}$ olarak birim klinker başına harcanan ısı veya giren enerji miktarı bulunmuş olur.

İncelenen sistemde, kömürün döner fırına verilmeden önce neminin alınması için kurutmaya gönderilmesi gibi bir durum olmadığından, bu amaç için ayrıca kömür tüketilmemektedir. Dolayısıyla döner fırında 1 kg klinker üretmek için gerekli enerji $q_{DF} = q_G$ olur.

5.2.1.2. Farinin ön ısıtıcıya girmeden önceki ısı kazancı

Farin ön ısıtıcıya girmeden önce farin değirmeninde 4°C 'den 60°C 'ye kadar ön ısıtılmaktadır.

$$Q_{farin} = m_f \cdot c_{ff} \cdot (T_2 - T_1) \quad (5.3)$$

$$T_1 = \text{Ortam sıcaklığı} = 4 + 273 = 277^\circ\text{K}$$

$$T_2 = \text{Farinin farin değirmeni çıkış sıcaklığı} = 60 + 273 = 333^\circ\text{K}$$

$$c_{ff} = \text{Farinin sabit basınçtaki özgül ısısı} = 908 \text{ J/kg.}^\circ\text{K}$$

$$q_f = \frac{Q_f}{m_f} = c_{ff} \cdot (T_2 - T_1) = 908 \cdot (333 - 277) = 50.848 \text{ J/kg farin}$$

5.2.1.3. Soğutucu çıkışında ön ısıtılmış havanın aldığı ısı

Soğutucudan kg. klinker başına atılan enerji

$$q_{SG} = m_s \int_{T_1}^{T_2} c_{pH}(T) dT \quad (5.4)$$

Soğutucudan kg klinker başına döner fırına verilen sekonder hava toplam havanın üçte birini oluşturmaktadır.

Buradan

$$q_{sg} = \frac{1}{3} m \int_{T_1}^{T_2} c_{pH}(T) dT \quad (\text{Sekonder havanın fırına yakma havası olarak verdiği ısı})$$

Soğutucu çıkışından fırına verilen sekonder havanın enerjisini hesaplamadan önce soğutucudan atılan hava miktarı hesaplanmalıdır[12].

Havanın ortalama molekül ağırlığı M_H ,

$M_H = 28.97$ kg./kmol olarak verilmektedir[13].

Genel gaz sabiti $\bar{R} = 8.315$ kJ / kmol °K değerindedir[13].

Hesaplanan ortalama molekül ağırlığı için gaz sabiti R ,

$$R = \frac{8.315}{28.97} = 0.287 \text{ kJ/ kg}^\circ\text{K olur.}$$

İdeal gaz denkleminde,

$$P.V = m R T \quad (5.5)$$

bilinmekteydi. Denklem (5.5)' dan yararlanarak havanın 1 m³ 'ünün ağırlığı için

$$\frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \text{ ifadesini yazabiliriz.}$$

Isparta şartlarında basıncı 685 mmHg ve ortalama sıcaklığı 4°C alırsak bu değeri;

$$P = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.01325 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa (N/ m}^2\text{)} [13]$$

$$P = 0.9133 \text{ atm (Isparta şartlarında)}$$

$$T = 273 + 4 = 277^\circ\text{K} , R_{\text{hava}} = 287 \text{ J/kg }^\circ\text{K} [13], V = 1 \text{ m}^3$$

$$\frac{m}{V} = \frac{0.9133 \times 1.01325 \times 10^5}{287 \times 277} = 1.16 \text{ kg hava/ m}^3 \text{ hava}$$

olarak bulunur. Bu durumda soğutmaya verilen havanın kütlesi $1.16 \times 3.5 = 4.06$

kg/hava/kg klinker değerinde olacaktır.

Denklem (5.4)' nın sağ tarafındaki integral için havanın sıcaklığa bağlı özgül ısı kapasitesi fonksiyonunu kullanıyor ve

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{pH}(\theta) 100 d\theta = \frac{100}{28.97} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (28.016 + 0.19665\theta + 0.04823\theta^2 - 0.0019661\theta^3) d\theta \quad (5.6)$$

denklemini yazıyoruz[12]. Burada $\theta_1 = 0.04$, $\theta_2 = 2.25$ 'dir.

Denklem (5.6)' nin sağ tarafı integre edilip verilen sınır değerleri koyulursa, havanın çevre sıcaklığı ile soğutucu çıkış sıcaklığı arasındaki enerjisi için,

$$\int_{T_1}^{T_3} c_{PH}(T) dT = 216.028 \text{ kJ/kg hava}, (T_1=277^\circ\text{K}, T_3=498^\circ\text{K})$$

değeri bulunacaktır.

$$q'_{SG} = \frac{1}{3} \cdot 4.06 \cdot 216.028 = 292.357 \text{ kJ/kg. klinker}$$

5.2.2. Isı çıktıları

Burada döner fırına verilen enerji girdisinin, nasıl harcandığı incelenmiştir. Yani döner fırındaki ısı çıktıları tek tek hesaplanmıştır.

5.2.2.1. Klinker oluşum ısısı : q_{KO}

Bu ısı çıktısının hesabı için şu denklem verilmiştir[12].

$$q_{KO} = 4.1855(7.646\%CaO + 6.484\%MgO + 4.10\%Al_2O_3 - 5.116\%SiO_2 - 0.589\%Fe_2O_3) \quad (5.7)$$

Yıl boyunca üretilen klinker için, kimya laboratuvarından alınan değerler yerine yazılırsa ;

$$q_{KO} = 4.1855(7.646 \times 65.98 + 6.484 \times 2.05 + 4.10 \times 5.82 - 5.116 \times 20.64 - 0.589 \times 3.8)$$

$$q_{KO} = 1815.69 \text{ kJ/kg. klinker}$$

5.2.2.2. Farinden oluşan CO_2 ' nin baca gazı içinde götürdüğü ısı değeri : q_{FKD}

Kalsinasyon bölgesinde oluşan $CaCO_3 + ısı \rightarrow CaO + CO_2$ denklemi gereği, kalsiyum karbonatın bir kısmı CO_2 olarak ayrışmakta ve bacadan çıkarken bir miktar enerjiyi dışarı götürmektedir. $CaCO_3$ 'ün ayrışması esnasında gerekli endotermik reaksiyon ısısı, daha önce hesaplanmış olan klinker oluşum ısısı içine dahildir. Ayrışan karbondioksit miktarı için "farin-klinker dönüşüm katsayısı" ndan yararlanılır. 1993 yılında farin üretimi 426458 ton, klinker üretimi ise 255200 ton olarak verilmiştir. Bu durumda farin-klinker dönüşüm katsayısı f_{FK} ,

$$f_{FK} = \frac{\text{farin}}{\text{klinker}} = \frac{426458 \text{ ton farin / yıl}}{255200 \text{ ton klinker / yıl}} = 1,67$$

olarak bulunur.

$$q_{FKD} = f_{FK} \%CaCO_3 0.44 h_{CO_2} \quad (5.8)$$

denklemini farinden oluşan CO_2 'nin götürdüğü ısıyı verir[12]. $\text{CaCO}_3 + \text{ısı} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ reaksiyonundaki CaCO_3 'ün molekül ağırlığının 100 kg., CO_2 'in molekül ağırlığının ise 44 kg. olduğu dikkate alınrsa denklem (5.8)'deki 0.44 katsayısının, 1 kg. kalsiyum karbonatın oluşturduğu karbondioksit miktarı olduğu anlaşılabacaktır.

Farindeki CaCO_3 yüzdesinin yıllık ortalaması ise 1993 yılı laboratuvar analiz raporlarından 0.785 olarak alınmıştır.

Sabit basınçtaki özgül ısı kapasitesi tanımından[12],

$$\Delta h = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \quad (5.9)$$

denklemini yazılabiliyor. Bu durumda denklem (5.8)

$$q_{FKD} = f_{FK} \% \text{CaCO}_3 0.44 \int_{T_1}^{T_2} c_{p\text{CO}_2}(T) dT \quad (5.10)$$

şeklini alacaktır. Denklem (5.10)'da T_1 , çevre sıcaklığı olup $273+4^\circ\text{C}$ alınmıştır. T_2 , ön ısıtıcı çıkışındaki gaz sıcaklığını göstermekte olup bu değer fabrikanın işletme rapor defterinde $273+350^\circ\text{C}$ olarak kaydedilmiştir. Denklem 5.9' de,

$$\theta = \frac{t}{100} \quad (5.11)$$

dönüşümü yapılırsa[12], denklem (5.10)

$$q_{FKD} = f_{FK} \% \text{CaCO}_3 0.44 \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p\text{CO}_2}(\theta) 100 d\theta \quad (5.12)$$

formuna girecektir. Denklem (5.12)' in sağ tarafındaki, $\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p\text{CO}_2}(\theta) 100 d\theta$ integralinin

değeri, yani CO_2 'nin ön ısıtıcı çıkışındaki sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki enerji için, özgül ısı kapasitelerini sıcaklığın fonksiyonu olarak veren denklemden yararlanacağız[12]. CO_2 için kmol esasına dayalı bu fonksiyonu kullanarak,

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p\text{CO}_2}(\theta) 100 d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{100}{44} (-3.7357 + 30.529\theta^{0.5} - 4.1034\theta + 0.024198\theta^2) d\theta \quad (5.13)$$

$$= \frac{100}{44} \left(-3.7357\theta + \frac{30.529}{1.5} \theta^{1.5} - \frac{4.1034}{2} \theta^2 + \frac{0.024198}{3} \theta^3 \right) \Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$\theta_1 = \frac{t_1}{100} = \frac{4}{100} = 0.04$$

$$\theta_2 = \frac{t_2}{100} = \frac{350}{100} = 3.5$$

sınır değerleri yerine koyulursa, h için integralin değeri,

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p\text{CO}_2}(\theta) 100 d\theta = 216.789 \text{ kJ/kg.CO}_2 \text{ bulunur.}$$

Denklem (5.13)' daki 1/44 katsayısı , kj/ kmol CO₂ olarak çıkacak sonucu kj/kgCO₂ cinsinden bulabilmek amacıyla koyulmuştur. İntegralin sonucunda bulunan değer denklem (5.12)' de yerine koyulursa,

$$q_{FKD} = f_{FK} \%CaCO_3 0.44 \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{PCO_2}(\theta) 100 d\theta$$

$$q_{FKD} = 1.67 0.785 0.44 216.789 = 125.047 \text{ kj/kg klinker}$$

bulunur.

5.2.2.3. Farinde bulunan nemin buharlaşarak baca gazı içinde götürdüğü ısı: q_{FN}

İşletme raporlarına göre döner fırına girişte farin maksimum % 1.5 nem içermektedir.

$$q_{FN} = f_{FK} w_F \left(2490 + \int_{T_1}^{T_2} c_{PH_2O}(T) dT \right) \quad (5.14)$$

ifadesini kullanıyoruz[12]. Burada,

f_{FK} = farin - klinker dönüşüm faktörü

w_F = farindeki nem yüzdesi

olarak tanımlanmaktadır. Aynı ifadedeki 2490 kj/kg , 4° C' deki 1 kg. suyun buharlaştırılması için gerekli ısı olmaktadır[13]. T_1 çevre sıcaklığını, T_2 ön ısıtıcı çıkış sıcaklığını göstermektedir.

Denklem (5.14)' un sağ tarafındaki integral için denklem (5.11)' deki $\theta = \frac{t}{100}$

dönüşümü yapıyor ve suyun ısı kapasitesini sıcaklığın fonksiyonu olarak veren

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{PH_2O}(\theta) 100 d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{100}{18} (32.238 + 0.19234\theta + 0.10555\theta^2 - 0.0035952\theta^3) d\theta \quad (5.15)$$

ifadesini kullanıyoruz[12].

$$= \frac{100}{18} \left(32.238\theta + \frac{0.19234}{2}\theta^2 + \frac{0.10555}{3}\theta^3 - \frac{0.0035952}{4}\theta^4 \right) \Big|_{\theta_1}^{\theta_2}$$

$$\theta_1 = \frac{4}{100} = 0.04, \quad \theta_2 = \frac{350}{100} = 3.5$$

Bu değerler yerine yazılıp hesaplanırsa,

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{PH_2O}(\theta) 100 d\theta = 633.866 \text{ kj/ kg. H}_2\text{O değeri bulunacaktır.}$$

Bu değer denklem (5.14)'da kullanılarak,

$$q_{FN} = 1.67 0.015 (2490 + 633.866) = 78.252 \text{ kj/ kg. klinker} \quad \text{olarak bulunmuştur.}$$

5.2.2.4. Soğutmadan çıkan klinkerin götürdüğü ısı : q_{SK}

Döner fırından çıkıp soğutmaya giren klinker buradan yaklaşık 80°C 'de ayrılmaktadır. Burada 80°C 'de soğutucuyu terkeden klinkerle birlikte dışarı atılan ısı hesaplanmıştır. Klinkerin sabit basınçtaki özgül ısı kapasitesi c_{pk} , klinkerin soğutucudan çıktığı sıcaklık T_3 , ortam sıcaklığı T_1 olarak tanımlanırsa, soğutucudan çıkan 1 kg. klinkerin götürdüğü ısı q_{SK} ,

$$q_{SK} = \int_{T_1}^{T_3} c_{pk}(T) dT \quad (5.16)$$

denkleminde bulunabilecektir[12]. Klinkerin sabit basınçtaki özgül ısı kapasitesi için verilen denklemi denklem (5.11)'deki dönüşüm ile denklem (5.16) 'de kullanarak ,

$$q_{SK} = 4.1855 \cdot 100 \int_{\theta_1}^{\theta_3} (0.181 + 0.0071\theta) d\theta \quad (5.17)$$

ifadesini yazıyoruz[12].

$$q_{SK} = 4.1855 \cdot 100 \left(0.181\theta + \frac{0.0071\theta^2}{2} \right) \bigg|_{\theta_1}^{\theta_3}$$

$$\theta_1 = \frac{4}{100} = 0.04, \quad \theta_3 = \frac{80}{100} = 0.8$$

$$q_{SK} = 58.494 \text{ kJ/kg.klinker bulunacaktır.}$$

5.2.2.5. Ön ısıtıcı çıkışında gazla atılan ısı: q_{OG}

Ön ısıtıcı çıkışındaki gaz, farin değirmeni çalıştırıldığı zamanlar, hammaddenin kurutulması amacıyla buraya verilmektedir.

Ön ısıtıcı çıkışındaki gaz sıcaklığı yaklaşık 350°C'dir. Bu sıcaklık abgaz vantilatörüne gelinceye kadar ~325°C 'ye düşer ve vantilatör çıkışında ~ 300°C olur. Bu gazın bir kısmı farin değirmenine, bir kısmı kömür değirmenine, bir kısmı da elektro filtreler gider. Elektro filtrelerin verimli çalışması için filtreye giren gaz sıcaklığı min 110°C, max 130°C , ortalama 120°C olmalıdır. Bunun için soğutma kulesinden faydalanılır. Yaklaşık 300°C 'de farin değirmenine giren gaz buradan 90°C çıkarak filtreye oradan da bacaya gider. Farin değirmeninin çalışmadığı zamanlarda ön ısıtıcıdan çıkan gaz, soğutma kulesinde bu kez yaklaşık 200°C'ye soğutulduktan sonra filtreden geçirilir ve 150°C civarında bacadan atılır.

Ön ısıtıcıdan çıkan gazın farin değirmeninde hiç kullanılmadığı ve tamamının bacadan atıldığı kabulü ile birim klinker üretimi başına atılan enerji miktarı q_{OG} 'nin ne kadar olacağı hesaplanabilir.

Bunun için ilk adım olarak kg. klinker başına baca gazından atılan ısı bulunur. Döner fırına verilşen kömürün karbon, hidrojen ve kükürt yüzdeleri tablo halinde verilmişti: %C=0.705, %H₂=0.055,%S=0.025.

Harcanan kömür tüketimi için gerekli yakma havası miktarını oradan da yanma sonucu ürünlerin miktarını hesaplamak için önce yanma denklemleri çıkartılmalıdır.

Kömür bileşenleri karbon, hidrojen ve kükürdün yanma denklemleri aşağıdaki şekildedir.



Reaksiyona giren elemanların Çizelge 5.1 ' de verilen molekül ağırlıkları göz önüne alınarak ve denklem (5.18),(5.19),(5.20) kullanılarak 1 kg. yakıtın tam yanması için gerekli teorik oksijen miktarı ,

$$m_{O_2 \min} = \left(\frac{8}{3} C + 8H + S \right) \text{ kg oksijen/ kg. kömür} \quad (5.21)$$

olarak bulunur. Havanın kütleli olarak % 23 'ü oksijen ve % 77 'si azot olduğundan gerekli teorik yakma havası miktarı,

$$m_{YH} = 1.2 \frac{100}{23} \left(\frac{8}{3} C + 8H + S \right) \text{ kg.hava/kg.kömür} \quad (5.22)$$

olacaktır. 1.2 katsayısı yanma sırasında % 20 fazla hava verildiği içindir. Verilen kömür bileşimi göz önüne alınarak

$$m_{YH} = 1.2 \frac{100}{23} \left(\frac{8}{3} 0.705 + 8 0.055 + 0.025 \right) = 12.23 \text{ kg hava/kg. kömür}$$

olacaktır. Katı vesivı yakıtlar için λ değeri 1.2-1.5 arasında değişir[14].

Çizelge 5.1. Yanmada reaksiyona giren ve çıkan elemanların molekül ağırlıkları[12]

Eleman	Sembol	Molekül ağırlığı (kg/kmol)
Karbon	C	12
Hidrojen	H ₂	2
Oksijen	O ₂	32
Kükürt	S	32
Azot	N ₂	28
Karbondiyoksit	CO ₂	44
Su	H ₂ O	18
Kükürtdiyoksit	SO ₂	64

Yanma sonu ürünlerinin hesabı için aşağıdaki Çizelge 5.2'yi düzenliyoruz.

Çizelge 5.2. Yanma sonu ürünlerinin kütleli miktarları (Yakıt bileşiminden yararlanılarak hesaplanmıştır)[12]

Yanma sonu ürünleri	Yanma sonu ürünleri (kg)	Kütleli yüzde %
CO ₂	11/3 C ----- 2.585	19.854
H ₂ O	9H ₂ ----- 0.495	3.802
SO ₂	2S ----- 0.05	0.382
O ₂	0.23x fazla hava ----- 0.47	3.601
N ₂	0.77xgerçek hava ----- 9.42	72.351
TOPLAM	13.02	100

Çizelge 5.2 'deki fazla hava (10.2 x 0.2) 'da 10.2 katsayısı $\frac{100}{23} \left(\frac{8}{3} C + 8H + S \right)$ kg

hava/kg kömür denkleminden hesaplanmıştır. Diğer bir değişle 10.2 katsayısı, bileşimi verilen 1 kg. kömürün yanması için gerekli minimum hava miktarıdır. 11/3 , 9 ve 2 katsayıları ise denklem (5.18), (5.19), (5.20) gereği 1 kg. karbon, 1kg. hidrojen ve 1 kg. kükürdün oksijen ile reaksiyonu sonucu oluşacak yanma sonu ürünleri CO₂, H₂O ve SO₂'nin miktarlarını göstermektedir.

Çizelge 5.2 'de ayrı ayrı bulunan yanma sonu ürünleri toplanırsa, bileşimi verilen 1 kg. kömür yakıldığında oluşacak yanma sonu ürünlerinin 13.02 kg. olacağı bulunur.

1 kg. klinker üretmek için 0.295 kg. kömür harcanmaktaydı, bu durumda kg klinker başına oluşan baca gazı miktarı m_{YSU} [12] :

$$m_{YSU} = 13.02 \times 0.295 = 3.8409 \text{ kg gaz/kg.klinker} \quad (5.23)$$

olarak bulunur.

Baca gazı miktarı hesaplandıktan sonra bunun götürdüğü enerji, q'_{OG}

$$q'_{OG} = m_{YSU} \int_{T_1}^{T_2} c_{p_{YSU}}(T) dT \quad (5.24)$$

denkleminde bulunabilir [12].

Denklem (5.24) 'nin sağ tarafındaki integralde, denklem (5.11)' deki dönüşüm yapılarak yanma sonu ürünlerinin baca gazı çıkış sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki enerji için Çizelge 5.2 'de verilen baca gazı ürünleri dikkate alınarak,

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p_{YSU}}(\theta) 100 d\theta = 100 \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p_{CO_2}}(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p_{H_2O}}(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p_{SO_2}}(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p_{O_2}}(\theta) d\theta + \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p_{N_2}}(\theta) d\theta \right] \quad (5.25)$$

eşitliği yazılabilecektir [12].

Yanma sonu ürünlerinin özgül ısı kapasitelerini sıcaklığın fonksiyonu olarak veren eşitlikler denklem (5.25) 'de kullanılırsa,

$$\begin{aligned} \int_{\theta_1}^{\theta_2} c_{p_{YSU}}(\theta) 100 d\theta &= \frac{0.1985}{44} 100 \int_{\theta_1}^{\theta_2} (-3.7357 + 30.529\theta^{0.5} - 4.1034\theta + 0.024198\theta^2) d\theta \\ &+ \frac{0.038}{18} 100 \int_{\theta_1}^{\theta_2} (32.238 + 0.19234\theta + 0.10555\theta^2 - 0.0035952\theta^3) d\theta \\ &+ \frac{4.1855 \cdot 0.0038}{64} 100 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left(11.83 + \frac{6.05}{100}\theta - \frac{85.6}{\theta^2} \right) d\theta \\ &+ \frac{4.1855 \cdot 0.036}{32} 100 \int_{\theta_1}^{\theta_2} (8.27 + 0.0258\theta + 18.771\theta^2) d\theta \\ &+ \frac{4.1855 \cdot 0.7221}{28} 100 \int_{\theta_1}^{\theta_2} (6.5 + 0.1\theta) d\theta \end{aligned} \quad (5.26)$$

yazılır [12]

Denklem (5.26)'deki integraller alınıp alt ve üst sınır değerleri yerine konulursa, yanma sonu ürünlerinin bacagazı sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki enerjisi için,

$$\int_{T_1}^{T_2} c_{p_{YSU}}(T) dT = 405.29 \text{ kJ/kg.} \quad (T_1=277^\circ\text{K}, T_2=623^\circ\text{K})$$

elde edilecektir. Bu değer denklem (5.24)'de yerine koyulursa baca gazının götürdüğü enerji q'_{OG}

$$q'_{OG} = 3.8409 \times 10^8 - 1556.678 \text{ kJ/kg. klinker} \quad \text{bulunur.}$$

Eğer gazın tamamı kullanılmadan bacaya verilseydi, kg. klinker başına 1556.678 kJ 'lük bir enerji atılmış olacaktı. Oysa ön ısıtıcı çıkışındaki gaz farin değirmeninde ham madde kurutmak amacıyla kullanılmaktadır. Bu durum göz önüne alınarak kg. kömür başına oluşacak yanma sonu ürünleri miktarı 13.02 kg. gaz/kg. kömür olarak, döner fırının yıllık kömür tüketimi ise 75509 ton kömür/yıl olarak biliniyordu. Bu durumda, 1993 yılında ön ısıtıcı çıkışındaki gaz miktarı $13.02 \times 75509 \cdot 10^3 = 9.831 \cdot 10^8$ kg gaz/ yıl olacaktır. 1993 yılında döner fırın 6689 saat çalıştığından saatte atılan çıkış gazı miktarı

$$\frac{9.831 \cdot 10^8}{6689} = 146972.6417 \text{ kg gaz/saat olacaktır.}$$

Farin değirmeni aynı yıl içinde 5143 saat çalıştığından değirmenin 1 yıl içinde kullandığı gaz miktarı $146972.6417 \times 5143 = 7.558 \cdot 10^8$ kg gaz /yıl olarak bulunur. Yıllık klinker üretimi 255200 ton klinker /yıl olduğundan kg. klinker başına farin değirmeninde kullanılan gaz miktarı

$$\frac{7.558 \cdot 10^8}{255200 \cdot 10^3} = 2.96 \text{ kg gaz/kg klinker olacaktır.}$$

Yanma sonu ürünlerinin sabit basınçtaki özgül ısı kapasiteleri denklem (5.26)' de verilmişti. Gazın farin değirmenine giriş sıcaklığı 300°C, çıkış sıcaklığı 90°C arasındaki enerji için q_{FD} ,

$$q_{FD} = m_{FD} \int_{T_g}^{T_g} c_{p_{FSGJ}}(T) dT \quad (5.27)$$

denklemi yazılabilir [12]. Denklem (5.27)' ün sağ tarafındaki integral denklem (5.26) 'deki ifadelerden yararlanılarak çözüldüğünde,

$$\int_{T_g}^{T_g} c_{p_{FSGJ}}(T) dT = 270 \text{ kJ /kg gaz} \quad (T_g = 363^\circ\text{K} , T_g = 573^\circ\text{K}) \text{ değeri}$$

bulunacaktır . Bu değer denklem (5.27)'de kullanılarak, farin değirmeninde kullanılan enerji q_{FD} için:

$$q_{FD} = 2.96 \times 270 = 799.2 \text{ kJ/kg klinker değeri bulunur.}$$

Ön ısıtıcı çıkışındaki gazın tamamının dışarı atılması durumundaki enerji 1556.678 kJ/kg klinker idi. Bunun 799.2 kJ/kg klinker 'lik kısmı farin değirmeninde kullanıldığından ön ısıtıcı çıkışındaki gaz vasıtasıyla atılan enerji q_{OG} [12] :

$$q_{OG} = q'_{OG} - q_{FD} \quad (5.28)$$

$$q_{OG} = 1556.678 - 799.2 = 757.478 \text{ kJ/kg klinker olacaktır.}$$

5.2.2.6. Soğutucu ünite çıkışında atılan ısı : q_{SG}

Soğutmaya giren klinkerin ısını alan havanın yaklaşık üçte biri döner fırına sekonder hava olarak verilir. Kalanı multisiklon bacasından dışarı atılır. Izgaralı soğutucularda kilogram klinker başına 3 - 3.15 Nm³ hava verildiği belirtilmektedir. Fabrika işletmesinde bu değer 3.5 m³ / kg. klinker alınmaktadır. Soğutucu çıkışından atılan bu havanın enerjisini hesaplamadan önce soğutucudan atılan hava miktarı hesaplanmalıdır. Bu hesap bölüm 5.2.1.3 'de yapılmıştır.

Multisiklondan dışarı atılan hava, soğutucuya verilen havanın yaklaşık üçte ikisi idi. Kilogram klinker başına soğutucuya 4.06 kg.hava verilmekteydi. Soğutucudan kg.klinker başına atılan hava m_s ise,

$$m_s = 4.06 \frac{2}{3} = 2.706 \text{ kg.hava/ kg klinker}$$

bulunacaktır. Soğutucudan kg klinker başına atılan enerji için şu denklem yazılabilir[12].

$$q_{SG} = m_s \int_{T_1}^{T_2} c_{PH}(T) dT \quad (5.29)$$

Denklem (5.29)' da m_s , soğutucudan kg klinker başına atılan hava olup 2.706 kg.hava/kgklinker olarak hesaplanmıştı. Soğutucu çıkışındaki hava sıcaklığı, fabrikanın işletme raporlarından 225°C olarak alınmıştır. Çevre sıcaklığı ortalaması ise 4°C 'dir.

Havanın çevre sıcaklığı ile soğutucu çıkış sıcaklığı arasındaki enerjisi için,

$$\int_{T_1}^{T_2} c_{PH}(T) dT = 216.028 \text{ kJ/ kg hava , } (T_1=277^\circ\text{K}, T_2=498^\circ\text{K})$$

değeri bölüm 5.2.1.3 'de hesaplanmıştır. Bu değer denklem (5.29)' da yerine yazılırsa soğutucudan kg klinker başına atılan enerji q_{SG} ,

$$q_{SG} = 2.706 \times 216.028 = 584.571 \text{ kJ / kg klinker olacaktır.}$$

5.2.2.7. Radyasyon, konveksiyon kayıplarıyla yanma verimi ve diğer kaçaklar: q_{RK}

Buraya kadar yapılan kayıp enerji hesaplamalarının dışında kömür kurutma, radyasyon, konveksiyon kayıpları, yanma verimi ve diğer kaçaklar söz konusudur. İncelenen fabrikada kömür kurutma için herhangi bir enerji harcanmadığından bu durum dikkate alınmamaktadır. Radyasyon, konveksiyon kayıpları, yanma ve diğer kaçakların değeri ise toplam ısı girdisinde şimdiye kadar hesaplanan ısı kayıplarının çıkartılmasıyla bulunacaktır.

Radyasyon, konveksiyon ve diğer yollarla kaybedilen ısı kaybı; q'_{RK}

$$q'_{RK} = q_G + q_P + q'_{SG} - (q_{KO} + q_{FKD} + q_{FN} + q_{SK} + q_{FD} + q_{OG} + q_{SG}) \quad (5.30)$$

ifadesinden bulunabilir[12]. Daha önce hesaplanan ısı girdi ve çıktılarını denklem (5.30)' de kullanarak,

$$\begin{aligned} q'_{RK} &= 5803.24 + 50.848 + 292.357 - \\ &\quad (1815.69 + 125.047 + 78.252 + 58.494 + 799.2 + 757.478 + 584.571) \\ &= 6146.445 - 4218.732 \\ &= 1927.713 \text{ kJ/kg klinker olarak bulunacaktır.} \end{aligned}$$

Bu ısının da %10 'luk kısmı yanma verimi ve diğer kaçaklar olarak düşünülürse, radyasyon ve konveksiyonla fırın cidarından kaybolan ısı değeri,

$$q_{RK} = 1927.713 \times 0.90 = 1734.941 \text{ kJ/kg.klinker olarak bulunacaktır.}$$

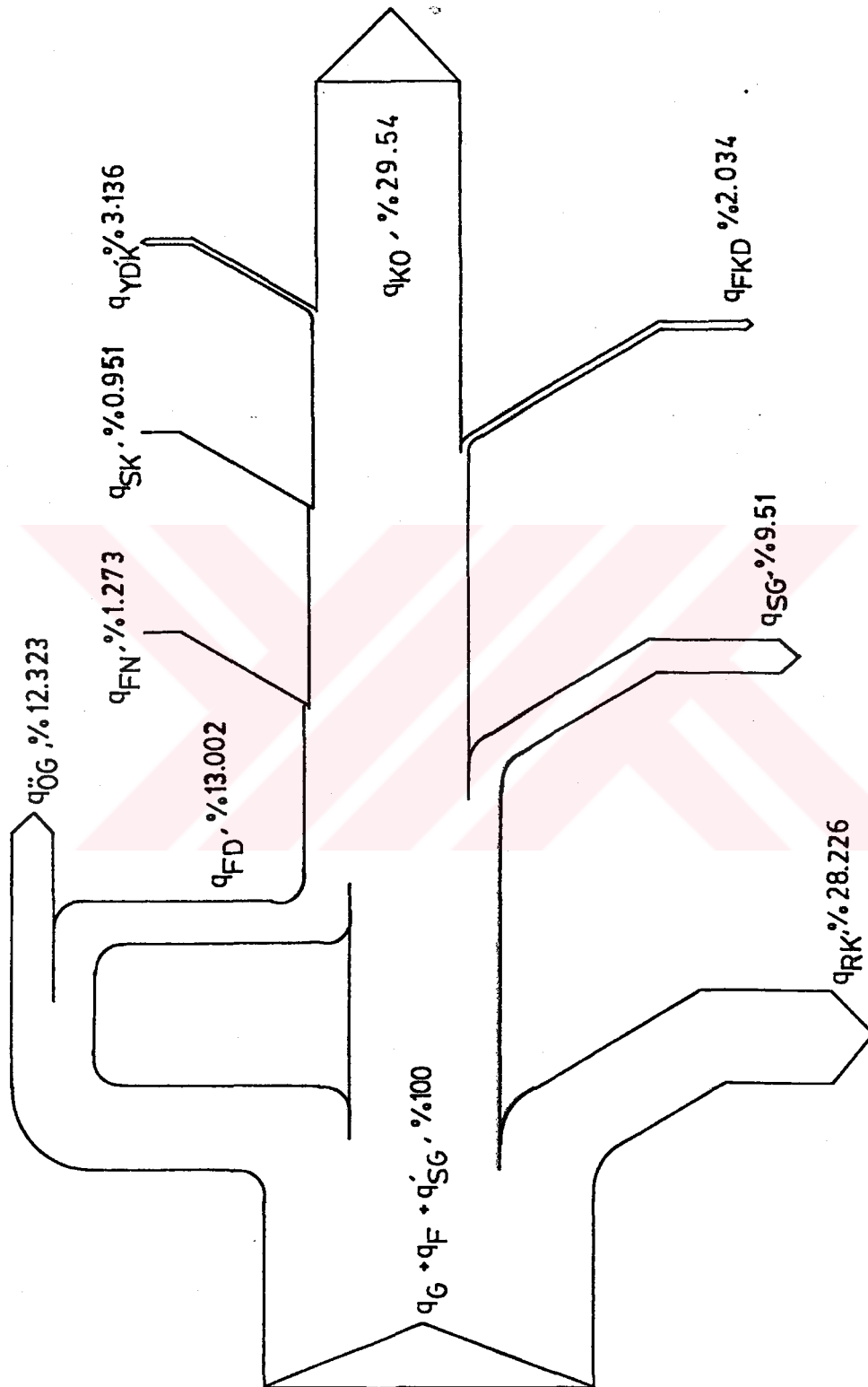
Yanma verimi ve diğer kaçaklar için olan ısı kaybı $q_{YDK} = 192.771 \text{ kJ/kgklinker}$ olarak bulunur.

Döner fırın için yapılan ısı bilançosu Çizelge 5.3' de özetlenmiştir. Isı bilançosunun grafik olarak gösterilmesi " Sankey diyagramı " ya da " ısı akış diyagramı " adıyla bilinmektedir[15]. Kuru sistem döner fırın için hazırlanan ısı bilançosu esas alınarak çizilen ısı akış diyagramı Şekil 5.1 ' de görülmektedir.

Çizelge 5.3. Kuru sistem döner fırın için ısı bilançosu

	Sembol	Enerji Dağılımı kj/kg klinker	Dağılım yüzdesi %
Isı girdileri			
Döner fırında yakılan kömürün verdiği ısı	q_G	5803.240	
Farinin ön ısıtıcıya girmeden önceki ısı kazancı	q_F	50.848	100
Soğutucu çıkışında ön ısıtılmış havanın aldığı ısı	q'_{SG}	292.357	
Isı çıktıları			
Klinker oluşum ısısı	q_{KO}	1815.690	29.540
Farinde oluşan CO ₂ 'nin baca gazı içinde götürdüğü ısı	q_{FKD}	125.047	2.034
Farinde bulunan nemin buharlaşarak baca gazı içinde götürdüğü ısı	q_{FN}	78.252	1.273
Soğutmadan çıkan klinkerin götürdüğü ısı	q_{SK}	58.494	0.951
Farin değirmeninde kullanılan ısı	q_{FD}	799.200	13.002
Ön ısıtıcı çıkışında baca gazının götürdüğü ısı	q_{OG}	757.478	12.323
Soğutucu çıkış multisiklonundan atılan ısı	q_{SG}	584.571	9.510
Yanma verimi ve diğer kayıplar	q_{YDK}	192.771	3.136
Radyasyon, konveksiyon kayıpları	q_{RK}	1734.941	28.226
TOPLAM	q_{Σ}	6146.445	100

Bilançoda görüldüğü gibi verilen ısıların % 29.540 'ı faydalı ısıdır. Geri kalan kaybolur. Bunların azaltılması veya çoğaltılması pişiricinin elindedir. Kayıp ısılardan kaçınılamaz fakat en aza indirilebilir.



Şekil 5.1. Sankey diyagramı

5.3. Hava Fazlalık Katsayısına Bağlı Olarak Ön Isıtıcı Çıkışındaki Kuramsal Oksijen Oranı

Döner fırın sisteminde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler sonucunda ön ısıtıcıdan atılan gazın konpozisyonu esas olarak aşağıdaki unsurlardan oluşur;

- Yanma ürünleri
 - Kalsinasyon sonucunda açığa çıkan CO_2
 - Hammadde ve kömürdeki kaba nem ile hammadde içerisindeki billur suyunun buharlaşması sonucundaki su buharı
 - Etkin yanma için sisteme verilen hava
- Kömürü yakmak için gerekli hava miktarı yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde bulunabilir[3].

$$Q_H = 1.001 \frac{Hu}{1000} + 0.5505 \quad (5.31)$$

$$Hu = 4700 \text{ kcal/kg kömür}$$

$$Q_H = 1.001 \frac{4700}{1000} + 0.5505 = 5.2552 \text{ Nm}^3/\text{kg kömür}$$

- Yanma sonucu oluşan duman gazları ise,

$$Q_D = 0.898 \frac{Hu}{1000} + 1.65 \quad (5.32)$$

denkleminde[3],

$$Q_D = 0.898 \frac{4700}{1000} + 1.65 = 5.8706 \text{ Nm}^3/\text{kg kömür}$$

bulunur.

- Bu durumda 1 kg. klinker pişirildiğinde kömürün yakılması sonucunda oluşan duman gazları miktarı,

$$Q_1 = Q_D \cdot k = \left(0.898 \frac{Hu}{1000} + 1.65 \right) \cdot k \text{ (Nm}^3/\text{kg klinker)} \quad (5.33)$$

denkleminde[3],

$$k=0.19$$

$$Q_1 = 5.8706 \times 0.19 = 1.1154 \text{ (Nm}^3/\text{kg klinker)}$$

bulunur.

- 1 kg. klinker üretildiğinde, CaCO_3 'ün ayrışması sonucunda açığa çıkan CO_2 miktarı aşağıdaki şekilde bulunabilir[3]:

$$Q_2 = 0.224 \frac{T}{100} S = 0.00224 \times T \times S \text{ (Nm}^3/\text{kg klinker)} \quad (5.34)$$

$$T = \% 78.5$$

$$S = \frac{\text{farin}}{\text{klinker}} = \frac{426458 \text{ ton farin / yıl}}{255200 \text{ ton klinker / yıl}} = 1.67$$

$$Q_2 = 0.00224 \times 0.785 \times 1.67 = 2.936 \times 10^{-3} \text{ (Nm}^3\text{/kg klinker)}$$

- Farindeki nemin buharlaşması sonucunda oluşacak su buharı da aşağıdaki şekilde bulunur[3]:

$$Q_3 = S \frac{w}{100} \frac{0.0224}{0.018} = 0.01244 \times S \times w \text{ (Nm}^3\text{/kg klinker)} \quad (5.35)$$

$$w = \%1.5, S = 1.67$$

$$Q_3 = 0.01244 \times 1.67 \times 0.015 = 3.116 \times 10^{-4} \text{ (Nm}^3\text{/kg klinker)}$$

- Kömürün tam yanmasını sağlamak amacıyla fırına verilen fazla hava ise aşağıdaki gibidir[3]:

$$Q_4 = Q_R \times k \times \lambda \text{ (Nm}^3\text{/kg klinker)} \quad (5.36)$$

$$k = 0.19, \lambda = 1.2$$

$$Q_4 = 5.2552 \times 0.19 \times 1.2 = 1.198 \text{ (Nm}^3\text{/kg klinker)}$$

Bu havanın ancak hacimsel olarak % 21'i oksijendir.

Tam yanma için, teorik havadan bir miktar fazla ısı gerekir. Döner fırınlarda fazla hava miktarını belirleyen parametreler; alev sıcaklığı, fırın duvarı sıcaklığı, türbülans, malzemenin fırında kalış süresi, kullanılan yakıtın tane büyüklüğü, dağılımı v.b. 'dir.

Tam yanma için gerekli fazla havanın yanma bölgesinde alev etkisini azaltarak sıcaklığın düşmesine yol açan bir etkisi vardır.

Fazla havanın ısı tüketiminde birkaç etkisi vardır. Düşük gaz sıcaklığı, düşük transfer verimi, düşük verimde daha fazla yakıt gerektirir. Daha fazla yakıt ile artan yanma ürünleri, fırın gazları v.b' deki ısı kayıplarını artırır.

Sonuçta fazla hava, tam olmayan yanmaya fırsat bırakmaksızın azalırken sinter ve kalsinasyon bölgelerinde aynı miktardaki yakıt miktarına rağmen sıcaklık artar. Bu durum sayesinde ya yakıt tüketimi azalacak ya da üretim artacaktır[2].

- Fırını terk eden toplam gaz miktarı[3]:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (5.37)$$

$$Q_T = 1.1154 + 2.936 \times 10^{-3} + 3.1162 \times 10^{-4} + 1.198 = 2.3166 \text{ (Nm}^3\text{/kg klinker)}$$

- Fırını terk eden oksijen miktarı ise:

$$Q_O = \left(0.21021 \frac{Hu}{1000} + 0.1156 \right) k \lambda \quad (5.38)$$

denkleminde[3],

$$Q_O = \left(0.21021 \frac{4700}{1000} + 0.1156 \right) 0.19 \times 1.2 = 0.2516 \text{ (Nm}^3\text{/kg klinker)}$$

bulunur.

$$\frac{Q_O}{Q_D} = \frac{0.2516}{5.8706} = 0.0428 = \%4.2 \text{ eder.}$$

Q_D : yanma sonucu oluşan duman gazları

Q_O : Fırını terk eden oksijen miktarı.

6. SONUÇLAR

Çimento sanayiinde ısı enerjisinin büyük bir bölümü döner fırında sarfedilir. Döner fırında ısı ekonomisi sağlayabilmek için, ilk olarak, bir ısı bilançosu (dengesi) hazırlamak faydalı olur. Böylece sistemin üretilen ısıyı nerede- ne kadar harcadığı ortaya çıkar. Bu aşamadan sonra, göreceli olarak ısıнын en çok tüketildiği bölümler üzerinde durularak, özgül tüketiminin düşürülmesine çalışılmalıdır.

Özgül ısı tüketiminin aşağıya çekilebilmesi için, genel olarak, aşağıdaki hususlara önem vermek gerekir:

1) Fiziksel ve kimyasal bileşimi yönünden pişirilmeye en yatkın, fakat kerner ve çok kalın anzast oluşumuna neden olmayacak özellikte, homojen bir hammadde ile fırının beslenmesi,

2) Fırına hammadde beslemesinin, proses şartlarına uygun biçimde değiştirilmesi ($\% \pm 5'$ den fazla değişmemesi stabil fırın şartları için tavsiye edilir) ve beslemenin istenen miktarda, sürekli olarak (üniform) yapılması,

3) Isıl değeri yüksek, kükürt ve kül oranı düşük kömür kullanılması. Eğer düşük kaliteli kömür kullanılarak maliyetin azaltılması düşünülüyorsa, fırına verilen kömür karışımının mutlaka homojene edilmesi ve sabit bir ısıl değer-kül oranı elde edilmeye çalışılması,

4) Sisteme ön ısıtıcıdan ve fırın giriş-çıkışından girebilecek kaçak havanın mutlaka önlenmesi,

5) Ön ısıtıcısı, fırın ve soğutmada uygun kalitede tuğla ve izolasyon malzemesi kullanılarak, radyasyon ve konveksiyonla olan ısı kayıplarının minimize edilmesi,

6) Primer havanın minimum oranda, mümkünse ısıtılmış olarak kullanılması,

7) Sekonder havanın maksimum miktar ve sıcaklıkta fırına çekilmesi,

8) Yakıtın özelliklerine uygun bir yakıt hazırlama ve püskürtme tesisatı kullanılması,

9) Fırın işletmesine en uygun alev formuyla çalışılması,

10) Tam yanmanın temini için her türlü tedbirin alınması. Lüzumsuz miktarda fazla hava veya atık gazlarda CO bulunacak derecede düşük hava ile çalışılmaması,

11) Klinkerin gereğinden fazla (yüksek yoğunlukta) pişirilmemesi,

12) Proses kontrol enstrümanlarına önem verilmesi. Mümkünse, fırındaki proses hakkında bilgi verebilecek tüm aygıtların tesis edilmesi. Bu aygıtların gösterdiği verilerin çok iyi değerlendirilmesi ile, stabil bir fırın rejimi temin edilmesi.

Bu çalışmada, Göltaş Çimento Fabrikasındaki II. hat döner fırında meydana gelen ısı olaylar birer birer incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, döner fırın bölgesinde

radyasyon ve konveksiyonla olan ısı kayıpları 1734.941 kJ/ kg klinker olarak fırına verilen toplam ısıнын % 28 'ini oluşturmaktadır. Ayrıca döner fırın dış cidar sıcaklıkları ölçülmüş (sinter bölgesinde 1300-1400°C) ve ısı transferinin bu bölgede ne denli güçlü olduğu gözlenmiştir. Kullanılmadan direkt atmosfere verilen bu ısı çok iyi bir şekilde dizayn edilmiş ısı değıştirmeçleri ile geri kazanılabilir. Bu amaçla Almanya' da Interatom Firması tarafından döner fırınlardaki atık ısıнын geri kazanılması amacıyla absorblayıcı bir sistem geliştirilmiş ve Göltaş Çimento Fabrikasına teklif edilmiştir. Bu sistem 1992 yılının ortalarından itibaren II. hat döner fırında uygulamaya alınmıştır ve halen de kullanılmaktadır.

Ayrıca enerjinin gittikçe pahalılaşması önceden cömertce çevreye atılan baca gazının enerjisini kullanmayı artık zorunlu kılmaktadır. Bir sistemin verimi, yararlı ısıнын sisteme giren toplam ısıya oranı olarak tanımlanmaktadır. Yararlı ısı giren ısı ile ısı kayıplarının farkına eşit olduğundan,

$$\text{Verim} = \frac{\text{Yakıtın verdiği ısı} - (\text{Konvektif} + \text{Baca kayıpları})}{\text{Yakıtın verdiği ısı}}$$

şeklinde yazılabilir.

Artık kıymetli bir enerji türü olmaya başlamış olan baca gazı enerjisinden aşağıdaki şekillerde faydalanabiliriz:

a) Yanma havasının ısıtılması: Bacadan çevreye atılan gazlar bir emiş fanı vasıtasıyla bir gaz / hava ısı eşanjörü üzerinden emilerek tekrar bacaya verilmektedir. Diğer taraftan taze hava fanı çevreden aldığı yanma havasını eşanjöre ve oradan da ısınmış olarak brülörlere göndermektedir. Böylece sistemde yakıttan ve dolayısıyla ısı enerjisinden tasarruf sağlanmaktadır.

b) Buhar elde edilmesi: Atık ısıdan yararlanmanın bir diğer yolu da, buhar üretimidir. Bu şekilde baca gazlarının ısısından yararlanarak doymuş buhar üretilir.

Yine baca gazından çıkan bu ısı, ön ısıtma için farin değirmenine ve kurutma için kömür değirmenine gönderilerek geri kazanılır.

Özellikle Türkiye gibi enerjide dışa bağımlı olan bir ülkede işletmeciler bu gibi ve buna benzer projeleri dikkatle değerlendirmelidirler kanaatindeyim.

KAYNAKLAR

- [1] ERKOVAN, İ., "Klinker Üretim Tekniği 1", Türkiye Çimento ve Toprak Sanayii T.A.Ş. Eğitim Yayınları.
- [2] KARAKOÇ, T.H., "Çimento Endüstrisinde Ekonomizasyonu ", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 216 s, 1987.
- [3] KUSEYRİ, S., "Çimento Sanayiinde Isı Ekonomisi" , Çimento Sanayiinde Enerji Tasarrufu Semineri, Tebliğler Kitabı, s. 119 -148, Ankara, 19 - 20 Ekim 1989
- [4] ÖZDEMİR, B., " Çimento Teknolojisi ", Türkiye Çimento Sanayii T.A.Ş., 288 s, 1973
- [5] GOUDA, G.R., " Başarılı ve Karlı Bir Çimento Fabrikasının Altın Anahtarı: Hammadde Karışımı ", Çev., BURİAN, K., World Cement Technology, s.3-19 1979.
- [6] GOLDMAN, KRAFT, W., SCHÜTTE, R., "Çimento Fırınlarda Kükürt Sirkülasyonu ", Çev., BURİAN, K., 7. Uluslararası Çimento Kimyası Kongresi, s.3-7, Paris, Ağustos 1980.
- [7] SPRUNG, S., " Klinker Teşekkülü ve Klinker Özellikleri ile Pişirme Tekniğinin Bağlantısı II ", Çeviri, 7. Uluslararası Çimento Kimyası Kongresi, s.5-16, Paris, Ağustos 1980.
- [8] SUSU, Ş., " Döner Fırın Yakma Düzenleri I", ÇİMHOL, s. 3 -16, Şubat 1974.
- [9] BAHADIR, E., " Döner Fırınlarda Klinkerin Pişmesine Tesir Eden Alev Faktörleri", s.3-7, Ankara.
- [10] BAHADIR, E., " Döner Fırınlarda Klinker Pişirme Tekniği, ÇİTOSAN, Teknik Yayınlar Serisi I, 134 s, Ankara, 1985.
- [11] Göltaş Çimento Fabrikası Arşiv ve Mühendisleri.
- [12] SAVAŞ, M., " Döner Fırın Isı Dengesi ", Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Deneysel Çalışma, Isparta, 1990.
- [13] TELLİ, Z.K., "Termodinamik", Akdeniz Üniversitesi, Isparta Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:19, 188 s, Isparta, 1984.
- [14] TELLİ, Z.K., " Yakıtlar ve Yanma ", Akdeniz Üniversitesi, Isparta Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:17, 157 s, Isparta, 1984.
- [15] EYİCE, S., "Isı Ekonomisi Cilt I", İstanbul, Çağlayan Basımevi, 431 s, 1981.

ÖZGEÇMİŞ

- 09.04.1972 Isparta'da doğdu.
- 1978-1983 Isparta Gazi İlkokulu'nda ilk öğrenim
- 1983-1989 Isparta'da orta ve lise öğrenimi
- 1989-1993 S.D.Ü.Müh.Mim.Fak.Makina Mühendisliği Bölümünde Yüksek öğrenim.
- 1993-1995 S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Lisans Üstü öğrenim.

