

152728

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PARALEL AKIŞLI ÖNKALSİNASYONLU ÇİMENTO
FABRİKASINDA ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ
MODELLEMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Fevzi SAVAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Yard.Doç.Dr. Ahmet KOLİP

Eylül 2004

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

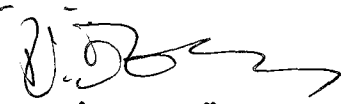
**PARALEL AKIŞLI ÖNKALSINASYONLU ÇİMENTO
FABRİKASINDA ENERJİ VE EKSERJİ
ANALİZİ / MODELLEMESİ**

DOKTORA TEZİ

A. Fevzi SAVAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA EĞİTİMİ

Bu tez 23/09/2004 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof Dr. İbrahim ÖZSERT
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Fethi HALICI
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Ahmet KOLİP
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. Muammer GAYAS
Jüri Üyesi


Yrd. Doç. Dr. İhsan KÜÇÜKRENDECI
Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Globalleşen dünyamızda, hızlı gelişen sanayii, insan ihtiyaçlarının hızlı artışı, sınırlı ve kıt olan kaynakların azalması ve enerji fiyatlarının yükselmesi insanları enerji kaynaklarını daha akıllıca kullanmaya zorlamış, daha az enerji ile daha ekonomik hayat şartları elde edebilmek için bir takım tedbirler almaya yöneltmiştir.

Çimentonun her çeşit inşaat ve alt yapı yatırımlarında kullanılması, çimento sektörünün ekonomik kalkınma ile birlikte gelişen bir sektör olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle çimento sektöründe, teknolojik gelişmeler ve maliyet düşürme çabaları büyük önem kazanmaktadır. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde çimento sektöründe maliyeti düşürmek için yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Çimento sektörü enerji yoğun bir sektördür. Isıl enerji ve elektrik enerjisi için ödenen paralar toplam maliyetin ortalama % 45-50'sini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, çimento sektöründe gittikçe önem kazanan enerji tasarrufu özellikle yakıt enerjisi için çeşitli parametrelerin etkilerinin incelenmesine imkan sağlayan bir modelleme yapılmış ve bu modellemeye uygun bilgisayar programı geliştirilmiştir.

Yapmış olduğum bu çalışmayı titizlikle yöneten, çalışma süresince maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim Sayın tez danışmanım kıymetli hocam Yrd. Doc. Dr. Ahmet KOLİP beye teşekkür eder, sonsuz şükranlarımı sunarım. Ayrıca sevgili eşim ve çocuklarıma çalışmam süresince göstermiş oldukları sabır ve özverileri için özellikle teşekkür ederim.

A. Fevzi SAVAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
TABLolar LİSTESİ	xxi
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxiv

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

ÇİMENTO TEKNOLOJİSİ	5
2.1. Genel Bilgiler.....	5
2.2. Çimentonun Dünya ve Türkiye'de Tarihi Gelişimi.....	5
2.3. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler	7
2.3.1. Kireç komponenti.....	7
2.3.1.1. Kalker.....	7
2.3.1.2. Tebeşir	8
2.3.1.3. Marn.....	8
2.3.2. Kil komponenti	8
2.3.3. Çimento hammaddesinde bulunan diğer maddeler	9
2.3.3.1. Magnezyumoksit.....	9
2.3.3.2. Alkaliler	9
2.3.3.3. Kükürt.....	10

2.3.3.4. Klorürler.....	10
2.3.3.5. Florürler	11
2.4. Çimento Üretimi	11
2.4.1. Yaş sistem çimento üretimi.....	13
2.4.2. Yarıyaş sistem çimento üretimi.....	15
2.4.3. Kuru sistem çimento üretimi.....	16
2.4.3.1. Önısıtıcı siklonlu kuru sistem	16
2.4.3.2. Önkalsinasyonlu kuru sistemler.....	21
2.4.3.3. Seri akışlı önkalsinasyonlu sistem	22
2.4.3.4. Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistem	24
2.4.3.5. Seri ve paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerin karşılaştırılması	26
2.5. Çimento Fabrikasında Yer Alan Önemli Diğer Üniteler	28
2.5.1. Döner fırın.....	28
2.5.2. Klinker soğutucuları.....	31
2.5.2.1. Izgaralı soğutucular.....	32
2.5.2.2. Döner soğutucular.....	33
2.5.2.3. Planet soğutucular.....	35
2.5.2.4. Düşey soğutucular.....	37
2.5.2.5. Soğutucularda değerlendirme kriterleri	38

BÖLÜM 3.

ÇİMENTO FABRİKALARINDA KÜTLE VE ENERJİ DENKLİKLERİ.....	40
3.1. Giriş.....	40
3.2. Kütle Denkliklerinin Kurulması.....	41
3.2.1. Baca gazı denklikleri.....	41
3.2.2. Baca gazı bileşenlerinin hesaplanması.....	42
3.2.3. Baca gazı içindeki su buharı miktarının hesaplanması	43
3.2.4. Hammaddedeki $MgCO_3$, $CaCO_3$ ve toplam CO_2 mol miktarların hesaplanması	44
3.3. Çimento Fabrikasında Üniteler Bazında Katı ve Gaz Kütle Denklikleri... 45	
3.3.1. Soğutucu üniteye katı ve gaz kütle denkliği	45

3.3.2. Döner fırın ünitesinde katı ve gaz kütle denkliği	47
3.3.3. Kalsinatör ünitesinde katı ve gaz kütle denkliği	48
3.3.4. Önısıtıcı siklon ünitesinde kütle denkliği.....	49
3.3.5. Girişte ve siklon kademelerinde katı kütle denkliği.....	51
3.3.6. Kimyasal ve mineralojik analizlerin hesaplanması.....	59
3.3.6.1. Hammaddenin giriş ve siklon kademelerinde kimyasal analizinin hesaplanması	59
3.3.6.2. Klinker ile hammaddenin giriş ve siklon kademelerinde mineralojik analizinin hesaplanması.....	61
3.4. Çimento Fabrikalarında Enerji Denkliklerinin Kurulması.....	63
3.4.1. Katı ve gaz maddelerin entalpileri	63
3.4.2. Kalsinatör ve kalsinatör üstü siklonlardaki reaksiyon enerjileri	65
3.4.3. Döner fırında klinker oluşum entalpisi	66
3.4.5. Klinker soğutucu ünitesinde enerji denkliği	66
3.4.5.1. Klinker soğutucularında duvar ısı kaybının hesaplanması ...	68
3.4.6. Döner fırın ünitesinde enerji denkliği	70
3.4.6.1. Döner fırınlarda duvar ısı kayıplarının hesaplanması.....	72
3.4.7. Kalsinatör ünitesinde enerji denkliği	78
3.4.8. Önısıtıcı siklon kademelerinde enerji denkliği	80

BÖLÜM 4.

ÇİMENTO FABRİKALARINDA EKSERJİ ANALİZİ	82
4.1. Giriş.....	82
4.2. Ekserji Kavramının Kısa Tarihçesi.....	82
4.3. Ekserji İle İlgili Temel Kavramlar	83
4.4. Katı ve Gaz Akımların Ekserjileri	86
4.4.1. Katı ve gaz akımların termomekanik ekserjileri	86
4.4.2. Katı ve gaz akımların kimyasal ekserjileri.....	88
4.5. Çimento Üretim Sistemlerinde Ekserji Denkliği	90
4.5.1. Klinker soğutma ünitesi	90
4.5.2. Döner fırın ünitesi	91
4.5.3. Kalsinatör ünitesi	92

4.5.4. Önısıtıcı siklon ünitesi	94
4.6. Çimento Üretim Sistemlerinde Oluşan Tersinmezliklerin Detaylandırılması	95
4.6.1. Klinker soğutma ünitesinde tersinmezliklerin detaylandırılması.....	96
4.6.2. Döner fırın ünitesinde tersinmezliklerin detaylandırılması	97
4.6.3. Kalsinatör ünitesinde tersinmezliklerin detaylandırılması.....	98
4.6.4. Önısıtıcı siklonlarda tersinmezliklerin detaylandırılması	100

BÖLÜM 5.

MATEMATİK MODELLEME VE NÜMERİK SONUÇLAR.....	103
5.1. Çimento Üretim Sistemlerinde Matematik Modelleme	103
5.2. Paralel Akışlı Önkalsinasyonlu Çimento Üretim Sistemlerinde Matematik Modelleme	105
5.3. Matematik Modelin Program Algoritması.....	113
5.4. Analizler ve Standart Parametreler	116

BÖLÜM 6.

NÜMERİK SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	119
6.1. Giriş.....	119
6.2. Değişken Parametre Olarak Hava Fazlalık Katsayısının Değerlendirilmesi.....	119
6.2.1. Hava fazlalık katsayısının kütleye etkisinin değerlendirilmesi.....	119
6.2.2. Hava fazlalık katsayısının baca gazı çıkış sıcaklığına etkisinin değerlendirilmesi	121
6.2.3. Hava fazlalık katsayısının tüm sisteme giren-çıkan enerji ve ekserji' ye etkisinin değerlendirilmesi.....	122
6.2.4. Hava fazlalık katsayısının döner fırına giren-çıkan enerji ve ekserji' ye etkisinin değerlendirilmesi.....	127
6.2.5. Hava fazlalık katsayısının kalsinatöre giren-çıkan enerji ve ekserji' ye etkisinin değerlendirilmesi.....	131
6.2.6. Hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubuna giren-çıkan enerji ve ekserji' ye etkisinin değerlendirilmesi	135

6.2.7. Hava fazlalık katsayısının tüm ünitelerde oluşan tersinmezliklere etkisi.....	139
6.2.7.1. Hava fazlalık katsayısının klinker soğutucusu ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi.....	139
6.2.7.2. Hava fazlalık katsayısının klinker döner fırın ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi.....	140
6.2.7.3. Hava fazlalık katsayısının kalsinatör ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi.....	141
6.2.7.4. Hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubu ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi	142
6.2.7.5. Hava fazlalık katsayısının tüm sistemde oluşan tersinmezliğe etkisi	143
6.3. Değişken Parametre Olarak Baca Tozu Miktarının Değerlendirilmesi	144
6.4. Değişken Parametre Olarak Tersiyer Havanın Tersiyer+Sekonder Havaya Oranının Değerlendirilmesi	149
6.5. Değişken Parametre Olarak Döner Fırına Giren Görünür Kalsinasyon Oranının Değerlendirilmesi.....	154
6.6. Değişken Parametre Olarak Döner Fırına Giren Hammadde Sıcaklığının Değerlendirilmesi	159
6.7. Değişken Parametre Olarak Döner Fırından Çıkan Baca Gazı ve Baca Tozu Sıcaklığının Değerlendirilmesi	163

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	170
7.1.Giriş.....	170
7.2. Kütle Denkliklerin Değerlendirilmesi.....	170
7.3. Enerji Denklerin Değerlendirilmesi.....	170
7.4. Ekserji Denkliği Açısından Değerlendirilmesi	177
7.5. Tersinmezliklerin Değerlendirme	182
7.6. Genel Değerlendirme	182
7.7. Öneriler	186

KAYNAKLAR.....	187
EKLER.....	194
ÖZGEÇMİŞ	206



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

A	:Yakma havası (kmol)
A(1)	: Klinker soğutma havası (kmol)
A(2)	: Klinker soğutucudan dışarı atılan hava (kmol)
A(3)	: Döner fırın sekonder havası (kmol)
A(4)	: Döner fırın yakıt sevk havası (kmol)
A(5)	: Döner fırın primer havası (kmol)
A(6)	: Kalsinatör tersiyer havası (kmol)
A(7)	: Kalsinatör yakıt sevk havası (kmol)
A(8)	: Kalsinatör primer havası (kmol)
Ash	: Yakıt külü (%)
BGM	: Toplam baca gazı (kmol)
BG(n)	: Döner fırın, kalsinatör ve siklon kademelerinde baca gazı miktarı (kmol)
BT(n)	: Döner fırın, kalsinatör ve siklon kademelerinde baca tozu miktarı (kg)
C	: Karbon
CaO, _{DF}	: Döner fırında hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan kalsiyumoksit (kg)
CaO, _{KA}	: Kalsinatör ünitesinde hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan kalsiyumoksit (kg)
CaO(n)	: Kalsinatör ünitesinin hemen üzerindeki siklon gruplarında kalsinasyondan açığa çıkan kalsiyumoksit (kg)
CaO, _{ykar(n)}	: Kalsinatör ünitesinin hemen üzerindeki siklon gruplarında yeniden karbonatlaşan kalsiyum oksit (kg)
CCM	: CaCO ₃ mol miktarı (kmol)
CE(n)	: Döner fırın, kalsinatör ünitesi ve siklon kademelerinde hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan karbondioksitin enerjisi (kJ)
CO ₂ , _{DF}	: Döner fırında hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan karbondioksit (kmol)

CO_2, KA	: Kalsinatörde hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan karbondioksit (kmol)
$CO_2, tut(n)$	: Yeniden karbonatlaşma ile tutulan karbondioksit (kmol)
Cy	: Yakıttaki karbon miktarı (%)
D	: Çap (m)
Dk	: Döner fırın yanma bölgesinde fırın iç çapı (m)
$F(n)$	: Girişte ve siklon kademelerindeki hammadde miktarı (kg)
FA	: Giriş-çıkış sızdırmazlıklarından sisteme giren kaçak hava miktarı (kmol)
$FE(n)$	: Giriş ve siklon kademelerinde hammadde enerjisi (kJ)
$FHE(n)$	: Giriş- çıkış sızdırmazlıklarından giren kaçak havanın enerjisi (kJ)
Fw	: Hammaddedeki nem miktarı (kmol)
$GE(n)$	: Döner fırın çıkışında ve siklon kademelerinde baca gazlarının enerjisi (kJ)
GKO	: Paralel hat gaz dağılım oranı (%)
$HE(n)$	: Klinker soğutma ünitesine giren çıkan hava akımlarının enerjisi (kj)
HK	: Klinker oluşum entalpisi (kJ)
H_2O, F	: Hammaddedeki nem miktarı (%)
Hy	: Yakıttaki hidrojen miktarı (%)
K	: Klinker miktarı (kg)
$KE(n)$	: Döner fırın çıkışında ve klinker soğutma ünitesine giren çıkan klinker akımlarının enerjisi (kJ)
KKF	: Hammaddedeki kızdırma kaybı (%)
KKw	: Hammaddedeki kristal suyu miktarı (kmol)
L	: Uzunluk (m)
Lk	: Fırın uzunluğu (m)
MCM	: $MgCO_3$ mol miktarı (kmol)
N_2	: Azot gazı
Ny	: Yakıttaki azot miktarı (%)
$n_{sd,df}$	: Döner fırın ünitesinde serbestlik derecesi
$n_{sd,ka}$	: Kalsinatör ünitesinde serbestlik derecesi
$n_{sd,ös}$	: Önısıtıcı siklon grubunda serbestlik derecesi
$n_{sd,sog}$	: Soğutma ünitesinde serbestlik derecesi
$n_{sd,tsis}$	: Sistemin toplam serbestlik derecesi

O_2	: Oksijen gazı
O_y	: Yakıttaki oksijen miktarı (%)
$P(n)$	: Yeniden karbonatlaşma oranı (%)
R	: Gaz sabitesi (kJ/kmol.K)
R_1	: Hammaddenin kalsinatör ünitesinin hemen üzerindeki siklondaki kalsinasyon oranı (%)
R_{DF}	: Hammaddenin döner fırındaki kalsinasyon oranı (%)
rg	: Döner fırına giren hammaddedeki görünür kalsinasyon oranı (%)
R_{KA}	: Hammaddenin kalsinatör ünitesindeki kalsinasyon oranı (%)
Q_R	: Kalsinatör ünitesinin hemen üzerindeki siklonda olan reaksiyon enerjisi (kJ)
$Q_{R,DF}$	: Döner fırında olan reaksiyon enerjisi (kJ)
$Q_{R,k}$	: Kalsinatör ünitesinde olan reaksiyon enerjisi (kJ)
$Q_{W,DF}$	: Döner fırın duvarından olan ısı kaybı (kJ)
$Q_{W,KA}$	: Kalsinatör ünitesindeki duvar ısı kaybı (kJ)
$Q_{W(n)}$	: Önısıtıcı siklonlarındaki duvar ısı kaybı (kJ)
Δs	: Entropi farkı (kJ)
S_y	: Yakıttaki kükürt miktarı (%)
$TE(n)$	: Döner fırın, kalsinatör ve siklon kademelerindeki baca tozunun enerjisi (kJ)
$TKMF$	: Hammaddede girişte toplam karbonat miktarı (%)
TSO	: Tersiyer havanın (tersiyer+sekonder havaya)oranı (%)
U_{oo}	: Uçucu olmayan oksitler
V_t	: Fırın özgül hacmi ($m^3h/ton.klinker.$)
$V(n)$	: Hammaddedeki $MgCO_3$ miktarı (kg)
$\underline{V(n)}$	: Hammaddedeki $MgCO_3$ miktarı (%)
$Y(n)$	: Hammadde ve klinkerdeki CaO miktarı (kg)
$\underline{Y(n)}$	: Hammadde ve klinkerdeki CaO miktarı (%)
Y_{AW}	: Yakma havasındaki nem miktarı (kmol)
Y_{DF}	: Döner fırın yakıtı (kg)
Y_{KA}	: Kalsinatör ünitesi yakıtı (kg)
$Y_{KE(n)}$	: Yeniden karbonatlaşma enerjisi (kJ)
Y_{NW}	: Yakıttaki nem miktarı (kmol)
Y_{TI}	: Döner fırın çıkışında baca tozundaki $CaCO_3$ miktarı (kg)

YV	: Yanma verimi (%)
YY_w	: Yakıtın yanmasından oluşan su buharı (kmol)
$Z(n)$	: Hammadde ve klinkerdeki diğer oksitler miktarı (kg)
$\underline{Z(n)}$	: Hammadde ve klinkerdeki diğer oksitler miktarı (%)
$X(n)$	: Hammadde ve klinkerdeki $CaCO_3$ miktarı (kg)
$\underline{X(n)}$	: Hammadde ve klinkerdeki $CaCO_3$ miktarı (%)
X_s	: Havanın nisbi nemi (gr/kmol-hava)
X_{T1}	: Döner fırın çıkışında baca tozundaki $CaCO_3$ miktarı (kg)
$W(n)$	: Hammadde ve klinkerdeki MgO miktarı (kg)
$\underline{W(n)}$	: Hammadde ve klinkerdeki MgO miktarı (%)
λ	: Hava fazlalık katsayısı
$\eta_{(n)}$	: Siklon verimi

İndisler

DF	: Döner fırın
F	: Hammadde
K	: Klinker
KS	: Klinker soğutucusu
OI	: Önısıtıcı
KA	: Kalsinatör
Y	: Yakıt

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Çimento üretim tesislerinde, tüketilen elektriğin ünitelere göre dağılımı.....	4
Şekil 2.1.	Bir çimento fabrikasında malzeme akış şeması.....	12
Şekil 2.2.	Basit bir yaş sistem fırında bölgelere göre sıcaklık (°C) durumları..	13
Şekil 2.3.	Ana hatlarıyla yaş sistem çimento üretim sistemi.....	14
Şekil 2.4.	Yarıyaş sistem çimento üretimi.....	15
Şekil 2.5. a.	Seri akışlı önısıtıcı siklonlu sistemin şematik görünüşü.....	18
Şekil 2.5. b.	Paralel akışlı önısıtıcı siklonlu sistemin şematik görünüşü.....	19
Şekil 2.6.	Dört kademeli önısıtıcı siklonlarda tipik bir gaz ve farin ısı profili.	20
Şekil 2.7.	Seri akışlı önkalsinasyonlu sistemin şematik görünüşü.....	23
Şekil 2.8.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemin şematik görünüşü.....	25
Şekil 2.9.	Döner fırın ters akım prensibi kesiti.....	29
Şekil 2.10.	Izgaralı soğutucunun şematik resmi.....	33
Şekil 2.11.	Döner soğutucu.....	35
Şekil 2.12.	Planet soğutucusu.....	37
Şekil 2.13.	Düşey soğutucu.....	38
Şekil 3.1.	Klinker soğutucusunda giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi.....	47
Şekil 3.2.	Döner fırın ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi.....	48
Şekil 3.3.	Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi.....	49
Şekil 3.4.	Önısıtıcı siklon ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi.....	50
Şekil 3.5.	Girişte ve siklon kademelerindeki katı akımlara ait bileşenler.....	52
Şekil 3.6.	Soğutucu ünite de giren-çıkan enerji akımlarının şematik gösterilişi.....	68
Şekil 3.7.	Döner fırın ünitesinde giren-çıkan enerji akımlarının şematik gösterilişi.....	71
Şekil 3.8.	Döner fırın duvarında sıcaklık gradyanı.....	77

Şekil 3.9.	Kalsinatörde giren-çıkan enerjilerin şematik gösterilişi.....	78
Şekil 3.10.	Genel halde önısıtıcı siklon kademesinde enerji akımlarının şematik gösterilişi.....	81
Şekil 4.1.	Sistemle çevre arasında ekserji etkileşiminin şematik gösterilişi....	85
Şekil 4.2.	Soğutma ünitesine giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi.....	91
Şekil 4.3.	Döner fırın ünitesine giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi.....	92
Şekil 4.4.	Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi.....	93
Şekil 4.5.	Önısıtıcı üniteye giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi.....	94
Şekil 4.6.	Klinker soğutma ünitesinde ekserji kaybının detaylandırılmasının şematik gösterilişi.....	96
Şekil 4.7.	Döner fırın ünitesinde ekserji kaybının detaylandırılmasının şematik gösterilişi.....	98
Şekil 4.8.	Kalsinatör ünitesinde kayıp ekserjinin detaylandırılmasının şematik gösterilişi.....	100
Şekil 4.9.	Önısıtıcı üniteye kayıp ekserjinin detaylandırılmasının şematik gösterilişi.....	101
Şekil 5.1.	Dört kademeli önkalsinasyonlu çimento fabrikasında modelleme için kullanılan değişkenler.....	108
Şekil 5.2.	Paralel akışlı kalsinatörlü çimento fabrikasında kütle, enerji ve ekserji denkliklerini hesaplayan bilgisayar programı akış şeması.....	115
Şekil 6.1.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin tozsuz hammadde miktarına etkisi.....	120
Şekil 6.2.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin toplam yakıt miktarı değişimine etkisi.....	120
Şekil 6.3.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatör yakıt değişimine etkisi.....	121
Şekil 6.4.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemde baca gazı ve baca tozu çıkış sıcaklığına etkisi.....	122
Şekil 6.5.a.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	123

Şekil 6.5.b.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	124
Şekil 6.6.a.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	125
Şekil 6.6.b.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	125
Şekil 6.7.a.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	126
Şekil 6.7.b.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	126
Şekil 6.8.a.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırına giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	127
Şekil 6.8.b.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	128
Şekil 6.9.a.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırına giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	129
Şekil 6.9.b.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	129
Şekil 6.10.a.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırına giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	130
Şekil 6.10.b.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	130
Şekil 6.11.a.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatöre giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	131
Şekil 6.11.b.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatöre çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	132
Şekil 6.12.a.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatöre giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	132

Şekil 6.12.b.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	133
Şekil 6.13.a.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatöre giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	134
Şekil 6.13.b.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	134
Şekil 6.14.a.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	135
Şekil 6.14.b.	Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	136
Şekil 6.15.a.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	137
Şekil 6.15.b.	Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	137
Şekil 6.16.a.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	138
Şekil 6.16.b.	Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	138
Şekil 6.17.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin klinker soğutucusu ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi.....	140
Şekil 6.18.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırın ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi.....	141
Şekil 6.19.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin önkalsinatör ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi.....	142
Şekil 6.20.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubu ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi.....	143
Şekil 6.21.	Hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemde tersinmezlik değişimine etkisi.....	144
Şekil 6.22.a.	Değişken parametre olarak baca tozu miktarının döner fırın yakıtı değişimine etkisi.....	145

Şekil 6.22.b.	Değişken parametre olarak baca tozu miktarının kalsinatör fırın yakıt değişimine etkisi.....	145
Şekil 6.23.a.	Normal kömür yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarındaki değişime etkisi.....	146
Şekil 6.23.b.	Normal kömür yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarındaki değişimine etkisi.....	146
Şekil 6.24.a.	Test kömürü yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve miktarındaki ekserji değişimine etkisi.....	147
Şekil 6.24.b.	Test kömürü yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve miktarındaki ekserji değişimine etkisi.....	147
Şekil 6.25.a.	Fuel-oil yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarındaki değişimine etkisi.....	148
Şekil 6.25.b.	Fuel-oil yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarındaki değişimine etkisi.....	148
Şekil 6.26.a.	Değişken parametre olarak tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranının döner fırın yakıt değişimine etkisi.....	150
Şekil 6.26.b.	Değişken parametre olarak tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranının kalsinatör yakıt değişimine etkisi.....	150
Şekil 6.27.a.	Normal kömür yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	151
Şekil 6.27.b.	Normal kömür yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	151
Şekil 6.28.a.	Test kömürü yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	152
Şekil 6.28.b.	Test kömürü yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	152
Şekil 6.29.a.	Fuel-oil yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	153

Şekil 6.29.b.	Fuel-oil yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	153
Şekil 6.30.a.	Görünür kalsinasyon oranı parametresinin döner fırın yakıt değişimine etkisi.....	154
Şekil 6.30.b.	Görünür kalsinasyon oranı parametresinin kalsinatör yakıt değişimine etkisi.....	155
Şekil 6.31.a.	Normal kömür yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimine etkisi.....	156
Şekil 6.31.b.	Normal kömür yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimine etkisi.....	156
Şekil 6.32.a.	Test kömürü yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimine etkisi.....	157
Şekil 6.32.b.	Test kömürü yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimine etkisi.....	157
Şekil 6.33.a.	Fuel-oil yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimine etkisi.....	158
Şekil 6.33.b.	Fuel-oil yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimine etkisi.....	158
Şekil 6.34.a.	Değişken parametre olarak döner fırına giren hammadde sıcaklığının döner fırın yakıt değişimine etkisi.....	159
Şekil 6.34.b.	Değişken parametre olarak döner fırına giren hammadde sıcaklığının kalsinatör yakıt değişimine etkisi.....	160
Şekil 6.35.a.	Normal kömür yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	160
Şekil 6.35.b.	Normal kömür yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	161
Şekil 6.36.a.	Test kömürü yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	161

Şekil 6.36.b.	Test kömürü yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	162
Şekil 6.37.a.	Fuel-oil yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	162
Şekil 6.37.b.	Fuel-oil yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	163
Şekil 6.38.a.	Değişken parametre olarak döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığının döner fırın yakıt değişimine etkisi.....	164
Şekil 6.38.b.	Değişken parametre olarak döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığının kalsinatör yakıt değişimine etkisi.....	164
Şekil 6.39.a.	Normal kömür yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	165
Şekil 6.39.b.	Normal kömür yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	166
Şekil 6.40.a.	Test kömürü yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	167
Şekil 6.40.b.	Test kömürü yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	167
Şekil 6.41.a.	Fuel-oil yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	168
Şekil 6.41.b.	Fuel-oil yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi.....	168
Şekil 6.42.a.	Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin kalsinatöre giren ekserji miktarı değişimine etkisi.....	169
Şekil 6.42.b.	Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin kalsinatörden çıkan ekserji miktarı değişimine etkisi.....	169
Şekil 7.1.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin normal kömür yakıtı ile hesaplanmış enerji denkliği.....	174

Şekil 7.2.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin test kömürü yakıtı ile hesaplanmış enerji denkliği.....	175
Şekil 7.3.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin fuel-oil yakıtı ile hesaplanmış enerji denkliği.....	176
Şekil 7.4.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin normal kömür yakıtı ile hesaplanmış ekserji denkliği.....	179
Şekil 7.5.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin test kömürü yakıtı ile hesaplanmış ekserji denkliği.....	180
Şekil 7.6.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin fuel-oil yakıtı ile hesaplanmış ekserji denkliği.....	181



TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Türkiye'deki Çimento fabrikalarda Türk Standardı altında üretilen çimento tipleri.....	7
Tablo 2.2.	Fırın uzunluğuna göre çeşitli fırın sistemlerinde bölgeler.....	30
Tablo 2.3.	Çeşitli tip fırın sistemleri ve fırın uzunlukları.....	30
Tablo 2.4.	Çeşitli tipler için fırın uzunluk/çap oranı ve özgül hacmi.....	30
Tablo 2.5.	Çeşitli tip fırın sistemleri için fırın özgül hacmi bağıntıları.....	31
Tablo 3.1.	Klinker soğutucusunda giren-çıkan katı ve gaz kütle akımları.....	47
Tablo 3.2.	Döner fırın ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımları.....	48
Tablo 3.3.	Kalsinatör ünitesine giren-çıkan katı ve gaz kütle akımları.....	49
Tablo 3.4.	Önısıtıcı siklon ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlar...	50
Tablo 3.5.	Paralel akışlı dört siklonlu kalsinatörlü çimento fabrikasında $\text{CaCO}_3(\text{X})$ ve $\text{CaO}(\text{Y})$ denklıklarının matris formunda gösterilişi.....	56
Tablo 3.6.	Katı akımların özgül ısı fonksiyonları.....	64
Tablo 3.7.	Gaz akımların özgül ısı fonksiyonları.....	65
Tablo 3.8.	Soğutucu ünite de giren-çıkan enerjiler.....	68
Tablo 3.9.	Klinker temel alınarak soğutucuların enerji kayıpları.....	70
Tablo 3.10.	Döner fırın ünitesine giren-çıkan enerji akımları.....	71
Tablo 3.11.	Çimento döner fırını duvarında tipik sıcaklık gradyanı.....	73
Tablo 3.12.	Döner fırın ve tüplerdeki ısı transfer katsayılarını veren yaklaşık eşitlikler.....	75
Tablo 3.13.	Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan enerjiler.....	79
Tablo 3.14.	Genel halde önısıtıcı siklon kademesinde giren-çıkan enerjiler.....	81
Tablo 4.1.	Katı akım bileşenlerine ait kimyasal ekserjiler.....	89
Tablo 4.2.	Gaz akımları için çevre tanımı.....	90
Tablo 4.3.	Soğutma ünitesinde giren-çıkan ekserjiler.....	91
Tablo 4.4.	Döner fırın ünitesine giren-çıkan ekserjiler.....	92
Tablo 4.5.	Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan ekserjiler.....	93
Tablo 4.6.	Önısıtıcı ünite de giren-çıkan ekserjiler.....	94

Tablo 5.1.	Paralel akışlı kalsinatörlü dört önısıtıcı siklon gruplu çimento fabrikasında değişkenler listesi.....	106
Tablo 5.2.	Önısıtıcı siklon grubuna ait değişkenler listesi.....	110
Tablo 5.3.	Kalsinatör ünitesi için değişkenler listesi.....	111
Tablo 5.4.	Döner fırın ünitesinde değişken listesi.....	112
Tablo 5.5.	Klinker soğutma ünitesinde değişken listesi.....	112
Tablo 5.6.	Önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento fabrikasında atanan değişkenler listesi.....	113
Tablo 5.7.	Hammadde ve kömür külü analizi.....	116
Tablo 5.8.	Yakıt türlerine ait analizler.....	116
Tablo 5.9.	Kalsinatörlü çimento fabrikası için standart parametreler.....	117
Tablo 5.10.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sistemi modellemesin' de kullanılan parametre ve aralıkları.....	118
Tablo 7.1.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde yakıt enerjisi tüketimi.....	171
Tablo 7.2.	Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde toplam ekserji kaybı.....	177
Tablo 7.3.	Çeşitli yakıtların (kJ/TL) değerlendirilmesi.....	183
Tablo Ek.3.1.	Normal kömür yakıtı için standart duruma ait çimento fabrikasında oluşan tersinmezliklerin üniteler bazında detaylandırılması.....	203
Tablo Ek.3.2.	Test kömürü yakıtı için standart duruma ait çimento fabrikasında oluşan tersinmezliklerin üniteler bazında detaylandırılması.....	204
Tablo Ek.3.3.	Fuel-oil yakıtı için standart duruma ait çimento fabrikasında oluşan tersinmezliklerin üniteler bazında detaylandırılması.....	205

ÖZET

Anahtar kelimeler : Çimento üretimi, Enerji analizi, Paralel akışlı ısıtıcı, Matematik modelleme

Çimento klinkeri üretimi sırasında, hammaddenin sisteme siklonlu ısıtıcıdan beslenmesi ile başlayan ve klinkerin soğutucudan çıkması ile tamamlanan işlemler sırasında oluşan ısı ve madde taşınım olaylarını formülize etmek için matematiksel denklik yapılması mümkündür. Bu çalışmada, bunun için enerji ve madde denklikleri esas alınarak, her bir ünite için (ısıtıcı, kalsinetör, by-pass, döner fırın ve ızgaralı soğutucu gibi) ayrı denklikler geliştirilmiştir. Denkliklerin her biri fırın beslemesi, gaz ve toz akışı şeklinde matematiksel olarak birbirine bağlıdır ve tüm sistem için kararlı hal koşulunu hesaplamak mümkündür.

Bu çalışmada, paralel akışlı kalsinatörlü dört siklon kademeli çimento üretim sistemlerinde enerji ve kütle denkliklerinin birlikte çözümünü öngören bir matematik model geliştirilmiştir. Ayrıca matematik modele uygun bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu programda değişik yakıtlar ve değişik işletme koşullarında değişken parametre alınarak her üniteye ayrıntılı olarak sıcaklık, kütle, enerji ve ekserji değerleri elde edilebilmektedir. Enerji dengesi sistemi bir bütün olarak ele alıp hesaplanabildiği gibi ısıtıcı siklon, kalsinatör, döner fırın ve soğutucu ünite için ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Bu modelin temeli, fabrika birimleri ile ısıtıcı, kalsinatör, gaz çıkışı, döner fırın ve ızgaralı soğutucu uyum içinde olan enerji ve materyal dengesine dayanmaktadır.

Matematik modelin önemli bir kısmını oluşturan kütle denklikleri, CaCO_3 , CaO , MgCO_3 (veya MgO) ve diğer oksitler olmak üzere dört ayrı bileşen üzerine kurulmuştur. Ayrıca çevre ve referans madde tanımı yapılarak ayrıntılı ekserji denklikleri de kurulmuş her bir ünite ve tüm sistem için tersinmezlikler detaylandırılmıştır.

Hazırlanan bilgisayar programından elde edilen nümerik sonuçlar ile paralel akışlı önkalsinasyonlu çimento üretim sistemine ait hammadde, baca gazı ve baca tozu sıcaklıkları, kütle, enerji, ekserji miktarları ve tersinmezlikler ile ilgili grafikler çizilerek standart parametrelerle karşılaştırılmıştır.

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS / MODELLING AT A PARALLEL FLOW PRECALCINER CEMENT PLANT

SUMMARY

Keywords: Cement production; Parallel flow precalciner; Energy analysis; Mathematical modelling

The mathematical balance described can be used for calculation the heat and material transfer phenomena from when kiln meal is fed into a cyclone preheater to discharge of the clinker from the cooler. In this study, it is based on energy and material balance, and consist of individual models for the plant components, namely preheater, calciner, gas off-take (bypass), rotary kiln and grate cooler. The balances are linked mathematically to one another through the flows of kiln feed, gas and dust, and make it possible to calculate a steady-state continuation for the entire cement plant.

In this study, mathematical model which solve mass equilibrium and energy in four stage precalciner of parallel flow cement product systems with simultaneous flow has been developed. A computer program that suitable for this mathematical model has also been prepared. Temperature, mass, energy and exergy values in every unity have been obtained in this program as a function of different fuels and the running conditions. The energy equilibrium system is fully or aparatly calculated for preheater cyclone, rotary kiln and cooler unity. The model is based on energy and material balances and consists of individual models for the plant components, namely preheater, calciner, gas off-take (bypass), rotary kiln and grate cooler.

Mass balances are developed for four individual components, namely CaCO_3 , CaO , MgCO_3 (or MgO) and other oxides. Thus, recarbonization in cyclone stages, calcination in the last cyclone stage or calciner, calcination in the rotary kiln and associated heat effects have been calculated separately to construct a detailed mass and energy flow diagram. Detailed exergy balances have also been calculated based on a proper definition on environment and references substances.

The effects of different operating parameters such as apparent calcination ratio, recarbonization ratio, rotary kiln inlet temperature, dust content of stack gas, excess air coefficient, heat losses from rotary kiln and clinker cooler and the ratio of tertiary air to seconder air on energy and exergy efficiencies have been investigated by varying the numerical values of these parameters within predetermined intervals and evaluating the numerical results obtained via the computer program. Energy, exergy and mass graphics were plotted using numerical results from computer software. The graphics were analyzed according to predetermined standard parameters.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çimentonun her çeşit inşaat ve alt yapı yatırımlarında kullanılması, çimento sektörünün ekonomik kalkınma ile birlikte gelişen bir sektör olmasına neden olmaktadır.

Gelişme sürecinde olan ülkemizin alt yapı yatırımlarını aralıksız sürdürme zorunluluğu, hızla artan nüfusu ve konut edindirmeye yönelik kredi politikalarının sağlıklı işleme gereği ve bunların çimento talebi üzerinde olumlu etkilerinden hareketle yapılan tahminlere göre, sektörün önümüzdeki yıllarda öneminin daha da artması beklenmektedir. Türk çimento sektörünün bu tür faaliyetlerle ve edinilen deneyimlerinin birikimi ile ülke kalkınmasına 2000' li yıllarda daha da etkin katkılarda bulunabileceği beklenmektedir [1]. Ayrıca komşumuz Irak'taki savaş sonrası yeniden yapılanma beklentisi, ülkemiz çimento sektörünün pazar açısından son derece avantajlı bir konumda olduğunu göstermektedir.

Dünyada 2002 yılı itibariyle çimento üretim kapasitesinin 1.72 milyar ton/yıl olmasına karşılık 1.67 milyar ton/yıl bir tüketim gerçekleşmiştir. Bu rakamlar dünya çimento sektöründe çetin bir rekabetin olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla bu rekabetten hem teknolojisi en iyi olan hem de en ucuza üretim yapan üreticiler karlı çıkacaklardır.

Ülkemizde çimento üretimi, 2003 yılında 35 milyon ton/yıl (çimento) olarak gerçekleşmiştir. Türk Çimento Sektörü, 2003 yılında Avrupa' da birinci, Dünya' da ikinci ihracatçı ülke konumundadır. Çimento sektöründe modernizasyon ve kapasite arttırıcı yatırımlara ağırlık verilmesi neticesinde özellikle son yıllarda teknolojik açıdan önemli gelişme kaydedilmiş olup ürün kalitesi de buna paralel olarak yükselmiştir [2, 3].

1912 yılında özel sektöre ait iki çimento fabrikası 20 bin ton/yıl ile üretime başlayan çimento sektörümüz 2003 yılında 35 milyon ton/yıl üretime ve toplam fabrika sayısı 55' e ulaşmıştır.

Türkiye'de yıllar itibariyle çimento üretimi ve tüketimi karşılaştırıldığında üretim miktarının tüketim miktarından daha yüksek seyrettiği görülmektedir. Bu açıdan Türk çimento sektörü, ortaya çıkan üretim fazlasını dış pazarlara satabilmek ve mevcut pazar kapasitesini koruyabilmek için diğer çimento üretici ülkelerle rekabet yapmak zorundadır.

Doğal enerji kaynaklarının hızla tükeniyor olması dünyanın her yerinde önemli bir problem olarak görülmekte ve enerji konusu bu bağlamda çok ciddi olarak ele alınmaktadır [4]. Enerjiyi yoğun olarak kullanan endüstriler arasında %31,2' lik bir oranla demir-çelik endüstrisi ilk sırayı almakta, ikinci sırada %17,9 ile çimento, üçüncü sırada %14,3 ile petrokimya endüstrisi bulunmaktadır [5]. Enerjiyi yoğun olarak kullanan endüstriler arasında ikinci sırada yer alan çimento endüstrisinde enerji tasarrufu ile ilgili çalışmalar son derece önem arz etmektedir. Son çeyrek yüzyılda çimento endüstrisi modernizasyon ve yeni teknolojilerin geliştirilmesinde ciddi adımlar atmıştır [6].

Ülkemiz çimento sektöründe birim üretim başına tüketilen enerji (ısı ve elektrik enerjisi cinsinden) toplam çimento maliyetinin ortalama %45-50' sini oluşturmaktadır. Enerji tüketiminin bu denli yoğun olduğu çimento sektörünün sırf maliyetlerini düşürmek amacıyla değil, aynı zamanda enerji tasarrufu açısından da üzerine çok yük düşmektedir. Bunun için, enerji darboğazlarına aday ülkemizde çok daha geçerli olan 'Verimli kullanım yoluyla tüketimini azaltabildiğimiz enerji ürettiğimiz enerjidir' yaklaşımını benimseyerek, yüzde oranlarının ne olduğuna, hatta kendini geri ödeme sürelerinin orta ve uzun vadeli (>5-6 yıl) olmasına dahi bakmaksızın bu konuda yapılabilecekleri milli bir görev olarak görmek zorundayız. Bundan dolayı çimento endüstrisinde enerji tasarrufu ayrıca önem taşımaktadır [7].

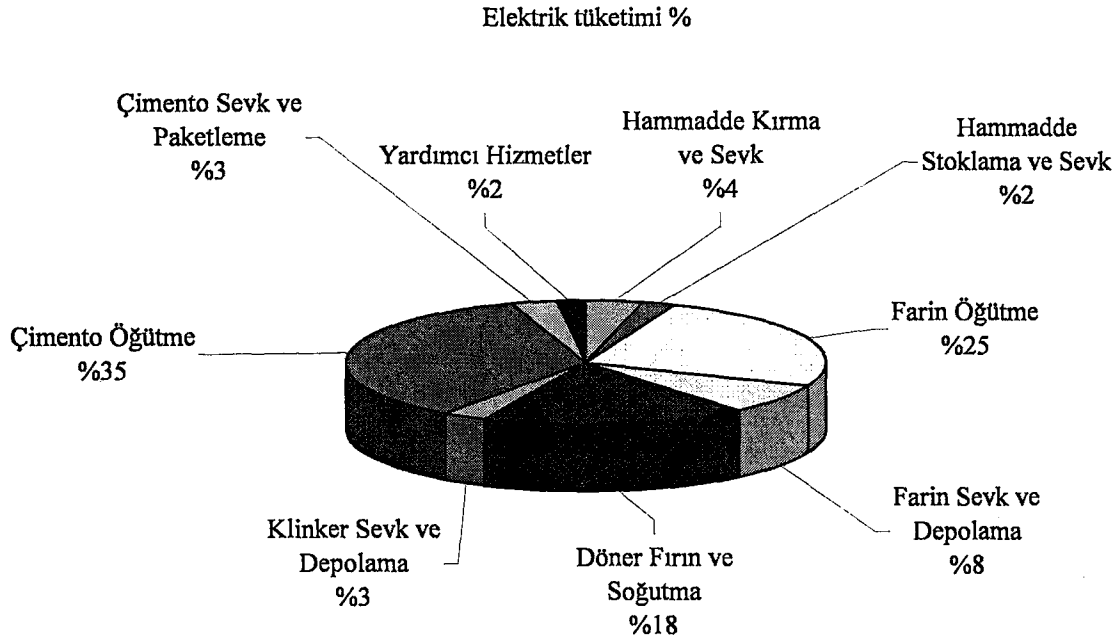
Enerji tasarrufu konusu bu sektörle ilgilenen çok kimsenin dikkatini çekmiştir. Ülkemizde bir çok fabrikada hem elektrik ve hem de özellikle yakıt enerjisinden

tasarruf ederek daha ucuza üretim yapabilmek amacıyla önkalsinasyonlu sisteme dönüşüm çalışmaları yapılmıştır. Dünyada artık yeni kurulan fabrikalar tamamen önkalsinasyonlu sistem olarak inşa edilmektedir.

Kalsinatörlü (önkalsinasyonlu) sistemler ekonomik açıdan, enerji tüketimini düşürürken klinker üretiminde bir artış sağlar ve işletme koşullarını büyük ölçüde geliştirir. Yüksek kalorifik değerli yakıtların (gaz, Fuel-oil, kömür) daima artan maliyetlerine karşılık, kalsinatörlü sistemlerde kalorifik değeri düşük kömür ve atık yakıtlar kullanılabilir.

Çimento endüstrisinde enerji tasarrufu, ısı ve elektrik enerjisi olarak iki başlıkta ele alınmaktadır. Çimento fabrikasında ısı enerjisinin ana konusu; yakıtlar ve yakma sistemleri, ısıtma-soğutma ve ısı transferi sistemleri, ısı iletimi ve ısı yalıtımı nedeniyle oluşan kayıpların önlenmesine yönelik yalıtım teknolojileri ile atık ısının geri kazanımı teknolojileridir. Isı enerjisi büyük oranda döner fırında klinkeri pişirmekte ve kalsinatörde de hammaddeyi %90-95’ lere varan oranda kalsine etmekte kullanılmaktadır. Isı enerjisi; yanma, iletim ve ısıma kayıpları ile atık ısı şeklinde ele alınmaktadır.

Elektrik enerjisinin ana konuları ise, varsa, uygun elektrik enerjisi elde etmede kullanılan enerji dönüşüm teknolojileri ile üretilen elektriğin kullanıcılara verimli şekilde gönderilmesi için elektrik teknolojisi (iletim ve dağıtım sistemleri) ve elektriğin verimli kullanım teknolojisidir. Çimento üretim tesislerinde tüketilen elektrik enerjisinin hangi ünitelerde ortalama ne kadar kullanıldığını gösterir grafik Şekil 1.1.’ de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Çimento üretim tesislerinde tüketilen ortalama elektrik enerjisinin ünitelere göre dağılımı[8]

Burada sunulan çalışmanın esas amaçlarından birisi de, çimento endüstrisinde enerji tasarrufu (özellikle ısı enerjisi) konusuna bilimsel platformda katkı sağlamaktır. Öncelikle enerji tasarrufuna yönelik olan bu araştırmada, kütle ve enerji denkliklerinin fabrika verileri kullanılarak hesaplanmasıyla ilgili bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Bu konu Bölüm 5' te detaylı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmada fabrikaya ait her hangi bir parametrenin, kütle ve enerji denliğini nasıl etkilediği hususu grafiklerle gösterilmiştir (hava fazlalık katsayısının, yakıt kalitesinin, klinker soğutucuya verilen soğutma havası miktarının, primer havanın, fırın duvar ısı kaybının, döner fırın ve siklonlardan çıkan baca gazı sıcaklıklarının, siklon verimlerinin değişmesi vb gibi).

Bu çalışmada ayrıca, çimento üretim sistemlerinde kullanılabilir enerjinin (ekserji) analizi yapılmıştır. Böylece, hangi ünitelerde ve ne şekilde ekserji kaybı olduğu hesaplanmıştır. Özellikle kayıp ekserjinin önlenebilir kısmı için alternatif fikirlerin geliştirilmesi imkanı doğmaktadır.

BÖLÜM 2. ÇİMENTO TEKNOLOJİSİ

2.1. Genel Bilgiler

Dünyada yıllık üretilen çimento miktarı yaklaşık iki milyar ton/yıl kadardır. Çimento üretimi ve tüketimi, bir ülkenin gelişimini karakterize eden en önemli kriterlerden biridir. Kalkınmanın gerçekleşmesi, üretim artarken kalitenin artması ve giderlerdeki azalma ile mümkündür. Bu, ancak sektördeki klasik metotları geliştirici araştırmalar ile mümkündür.

Çimento; silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demiroksit ihtiva eden hammaddelerin sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarımamül klinkerin bir veya daha fazla katkı maddesi ile öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Esas itibarıyla kalsiyumoksit'in (CaO) alumina ve demiroksitle vermiş olduğu bileşiklerden meydana gelir. Dayanım ve hacim sabitliği gibi normlarla öngörülen şartlara haizdir [9].

2.2. Çimentonun Dünya ve Türkiye'de Tarihi Gelişimi

Çimento kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "Caementum" kelimesinden türetilmiştir. Çimento; Latince' deki Caementum kelimesinden İngilizceye Cement, Almancaya Zement, Fransızcaya Ciment ve İtalyancaya Cemento olarak geçmiştir. Orta çağda harç anlamında da kullanılan bu sözcük Farsçada bağlayıcı anlamına gelen Kemend kelimesine dönüşmüş ve Türkçeyede Kement olarak geçmiştir. Günümüzde telaffuz benzerliğinden dolayı, İtalyanca "Cemento" kelimesi Türkçede çimento olarak kullanılmaktadır. Çimentonun kullanımı MÖ 2000' li yıllara kadar uzanmaktadır [10]. Eski Mısırlıların kalsine edilmiş killi jipsten oluşan bir tür çimento kullandıkları, Anadolu' daki Hattuşaş ve Boğazkale gibi antik Hitit kentlerinde de kireç ile doğal puzzolanik toprakların karıştırılarak harç yapıldığı bilinmektedir [11]. Avrupa' da ise ilk kez İtalya'da,

Büyük Roma İmparatorluğunda Sezar döneminde (MÖ 12-14 yy.) Caligula Whart, yapılar da çimentoyu kullanmıştır. 1756 yılında John Smeaton, İngiltere' nin Cornwall sahilindeki Eddystone deniz fenerinin yeniden yapımında yumuşak kalker ve kilden üretilen bir çimento kullanmıştır. 1802 yılı Fransa çimento sanayisinin başlangıcıdır. İlk olarak 1824 yılında İngilterede üretilen çimento bu tür yapı malzemeleri arasında en önemli yeri tutmaktadır. Amerika' daki ilk portland çimentosu üretimi ise 1871 yılında David O. Saylor tarafından gerçekleştirilmiştir [12]. Türkiye' nin çimento sektörü ile tanışması 1911 yılında özel sektör girişimi ile olmuştur. 1912 yılında "Aslan Osmanlı Anonim Şirketi" ne ait Darıca ile Eskişehir fabrikaları işletmeye alınmıştır [13]. Biri yaş diğeri kuru sistem olarak kurulan bu fabrikalarda 100-150 ton/gün kapasiteli iki fırın bulunmakta idi.

Birinci Dünya Savaşı nedeniyle bütün dünyada yaşanan ekonomik durgunluktan çimento sektörü de etkilenmiş ve 1925 yılına kadar fazla gelişme gösterememiştir. 1926 yılında İstanbul' da Bakırköy Çimento Fabrikaları T.A.Ş. tarafından 14000 ton/yıl kapasiteli Kurt Çimento Fabrikası ile Ankara' da 18000 ton/yıl kapasiteli Ankara Çimento Sanayii T.A.Ş. işletmeye alınmıştır.

Cumhuriyet döneminde modern çimento sanayii ilk adımları 1929 yılında Anadolu Çimentoları T.A.Ş.' nin Kartal' daki 65000 ton/yıl kapasiteli Yunus Fabrikası ve Türk Çimentosu ve Su Kireci A.Ş.' nin 65000 ton/yıl kapasiteli Zeytinburnu Fabrikası ile atmıştır. Cumhuriyet ile birlikte ülkemizde yeni fabrikalar devreye girmiş bir taraftan üretim artarken diğ er taraftan artan çimento ihtiyacını karşılamak üzere ithalat devam etmiştir. Devlet ilk çimento fabrikasını 1943 yılında Sivas'ta açmıştır. Bu yıllarda toplam kapasite 370000 ton/yıla kadar ulaşmıştır [3, 14].

Türkiye' nin en eski ve önemli sanayi sektörlerinden olan çimento endüstrisi özellikle yetmişli yıllardan sonra yaptığı atakla Türkiye' yi dünya çimento üreticilerinin önemli isimleri arasına sokmuştur. 1912' lerde İstanbul'da 20000 ton/yıl kapasite ile hayata geçen çimento sektörü 2003 yılına gelindiğinde 35 milyon ton/yıl üretim ile, üretimde Avrupa' da üçüncü, dünyada sekizinci sıraya yükselmiştir [1, 2, 3]. Türkiye' de üretilen çimento tipleri Tablo 2.1. de verilmiştir.

Tablo 2.1. Türkiye’ deki Çimento fabrikalarında Türk standardı altında üretilen çimento tipleri, [15].

Türk Standartlarındaki Çimento Tipleri			
Çimento Tipleri	TS No:	Adı	İşareti
CEM I	TS 119	Portland Çimentosu	PÇ
	TS 12139	Portland-Curufllu	PCÇ/A
	TS 12141	Portland-Silika	PSFÇ
	TS 10156	Katkılı Çimento	KÇ 32,5
CEMII	TS 26	Traslı Çimento	TÇ 32,5
	TS 640	Uçucu Küllü Çimento	UKÇ 32,5
	TS 12140	Portland-Kalkerli	PLÇ/A
	TS12143	Portland Kompoze	PKÇ/A
CEM III	TS 20	Curufllu Çimento	CÇ
CEM IV	TS 12144	Puzzolanik Çimento	PZÇ/A
CEM V	TS 12142	Kompoze Çimento	KZÇ/A
	TS 21	Beyaz Çimento	BPÇ
	TS 3646	Erken Yüksek Dayanımlı	EYÇ
	TS 10157	Sülfatlara Dayanımlı	SDÇ
	TS 809	Süper Sülfatlı	SSÇ
	TS 22	Harç Çimentosu	HÇ

2.3. Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler

Çimento üretiminde hem doğal mineraller hem de endüstriyel atık ürünler kullanılmaktadır. Kireç, silis, alüminyumoksit, demir ve demiroksit içeren mineraller çimento üretiminde hammadde olarak kullanılır. Kireç yönünden zengin minerallere kireç komponenti, kireç yönünden fakir olan fakat genelde fazla silis, alüminyumoksit ve demiroksit içeren minerallere de kil komponenti denir. Çimento üretiminde bu iki ana komponentin hesaplanmış karışımı seçilir.

2.3.1. Kireç komponenti

Kireç komponenti; kalker, tebeşir ve marn olarak ele alınmaktadır.

2.3.1.1. Kalker

Kimyasal bileşiminde en az %90 CaCO_3 (Kalsit) içeren kayalara kalker yada kireç taşı adı verilmektedir. Ayrıca mineralojik bileşiminde en az %90 kalsit minerali bulunan kayalara da kalker adı verilmektedir. Kalsit doğada geniş ölçüde

bulunmaktadır. Portland çimentosu üretimi için tüm jeolojik biçimlerdeki CaCO_3 uygundur. Kalker ve tebeşir, kalsitin en fazla yaygın olan şekilleridir. Mermer ise, kalsitin gözle görülür taneli kristal yapılı bir cinsidir. Kalkerin sertliği jeolojik yaşına göre tespit edilir. Jeolojik formasyon ne kadar eski olursa kalker o kadar sert olur.

2.3.1.2. Tebeşir

Tebeşir, jeolojinin tebeşir çağında oluşmuş ve jeolojik bakımdan nispeten yeni olan bir tortul taşıdır. Kalkerin aksine çok yumuşak topraksı bir yapısı vardır. Saf cinslerinde % 89-99 CaCO_3 ihtiva eder.

2.3.1.3. Marn

Doğada %50-70 oranında kalker ve %30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayalara marn denilmektedir. Yer yüzünde geniş ölçüde yaygın olduğu için çimento üretiminde en fazla kullanılan hammaddedir. Jeolojik bakımdan Marn CaCO_3 ' ın ve killi maddelerin aynı zamandaki çökelti teşekkülü sonucunda oluşmuş tortul taşıdır. Çimento klinkeri, ortalama %70 kalker ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilmektedir. Marn doğal olarak bu bileşimi taşıdığından veya bu bileşime çok yakın özellikte bulunduğu için ideal çimento hammaddesidir. Ayrıca kalkere göre daha yumuşak olması nedeniyle kolay işlenebilmekte ve kırma-öğütme sırasında enerji tüketimi düşük olmaktadır. Sertliği kalkerin sertliğinden çok düşüktür. Marn bünyesindeki killi maddelerin artması ile sertlik gittikçe düşer marnın rengi killi maddelerle ilgili olarak sarıdan gri siyaha kadar değişir [13].

2.3.2. Kil komponenti

Çimento yapımında ikinci önemli hammadde kildir. Kil teriminin geniş bir anlamı vardır. Hem bir kayaç terimi olarak, hem de hammadde tane boyu terimi olarak kullanılmaktadır. Kayaç olarak bozunma ürünleri yada hidrotermal olaylarla oluşmuş çökeller için kullanılan bir terimdir. Killerin kimyasal analizleri; silisyum, alüminyum ve sudan oluştuklarını göstermektedir. Demir, alkaliler ve toprak

alkalilerde değişik miktarlarda yer almaktadır. Kil terimi, doğal olarak, topraklı, ince taneli ve su ile karıştıklarında plastik özellikleri gelişen materyalleri içine almaktadır.

Kayaç oluşturan kil mineralleri değişik oranlarda bir kayaç içerisinde bulunabilirler. Bunlar killi kayaçların temel bileşenleridirler. Genellikle kristal formda ve küçük partiküller halinde oluşmaktadırlar. Killerin ana maddesi alüminyum silikat hidratlardır. Mineralojik bileşiminde %90' a kadar kil minerali bulunduran kayaçlara kil denilmektedir [16].

Killerin erime noktaları 1150 °C' den 1785 °C' ye kadar değişmektedir. İçinde yabancı madde bulundurmayan killer genellikle beyaz renktedir. Yabancı maddelerin miktar ve cinsine göre killerde renk sarıdan siyaha kadar değişmektedir.

2.3.3. Çimento hammaddesinde bulunan diğer maddeler

2.3.3.1. Magnezyumoksit

Magnezyumoksit, klinker fazlarında klinkerin %2 ağırlığına kadar yer almaktadır. Bu miktardan fazlası klinkerde serbest MgO (Periklas) olarak bulunur. Periklas su ile reaksiyona girerek $MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$ e dönüşür. $Mg(OH)_2$, MgO ' den daha büyük hacim işgal eder ve betonda genleşme çatlaklarının meydana gelmesine neden olabilir (magnezit genleşmesi). MgO çimento içerisine yüksek fırın cürufu ile de girer (cürufu çimentolarda) ve klinkerdeki MgO miktarının verilen limitler içerisinde kalmasına dikkat edilmelidir.

2.3.3.2. Alkaliler

K_2O ve Na_2O esas olarak kil ve marnlı maddelerde bulunur. Bu bileşikler Feldspat, Mika ve İllit tanecikleri arasında dağınık olarak bulunur. Bir kısım alkaliler katı yakıt maddelerinden kömür külü ile çimento bünyesine girerler. Döner fırında pişirme esnasında sinter bölgesindeki alkalilerin bir kısmı buharlaşır ve alkali sirkülasyonu meydana gelir. Önsıtmalı sistemlerde sıkça rastlanan alkali klorür sirkülasyonu fırın içi sinter bölgesinde kemerleşmeye sebep olur. Alkaliler genel olarak çimento

içerisinde bazı maddelerle birleşerek genleşme olayına neden olurlar (alkali genleşmesi). Alkali genleşmesinin önlenmesi için Na_2O ağırlıkça %0,6' yı geçmemelidir [17]. Hammadde (farin) içindeki alkali miktarı fazla olduğu takdirde alkali miktarını uygun sınıra düşüre bilmek için yanma gazları içinde bulunan alkalilerin önısıtıcıya geçmeden evvel By-pass ile uzaklaştırılması gerekir.

2.3.3.3. Kükürt

Kükürt hemen hemen bütün çimento hammaddelerinin içinde Sülfat (Pirit ve Markosit FeS_2) olarak bulunur. Yakıt maddeleri içindeki kükürt miktarı ise çok değişkendir.

Doğal gazda % 0 iken

Ağır fuel-oil de % 3,5-5

Kömürlerde ise % 1-9 oranlarında bulunur.

Yakıt maddesinin ve farinin içerdiği kükürt yanma ve buharlaşma sonucunda sinter bölgesinde gaz halinde SO_2 ' i oluşturur. Bu oluşum fırın gazında buharlaşmış alkali ile oksijeni alarak buhar halindeki alkali sülfata dönüşür. Alkali sülfat, döner fırının nispeten soğuk bölgelerinde pişecek ve önısıtıcıda ısıtılan maddenin üzerinde yoğunlaşır. Çok azı baca tozu ile birlikte uçar diğer kısmı alkali sülfat halinde pişecek madde ile sinter bölgesine döner ve zor uçucu olması nedeniyle klinker ile fırından çıkar. Klinkere bağlı bulunan alkali sülfatlar çimentonun başlangıç mukavemeti için çok faydalıdır. Buna karşılık yüksek kükürt miktarı, baca gazlarında SO_2 ' i arttırdığından önısıtıcı siklonlarda tıkanıklıklara (cidar sarmaları) ve döner fırında sülfat kemerleri oluşumuna neden olur.

2.3.3.4. Klorürler

Klorürler döner fırınlarda alkalilerle reaksiyona girer. Fırın gazları ile sürüklenerek önısıtıcıda biriken alkali klorürlerini oluştururlar. Bunlar pişecek madde ile birlikte fırına tekrar geri dönerler, ancak alkali sülfatlarından farklı olarak sinter bölgesinde tamamen buharlaşırlar. Fırın duruşuna kadar devamlı sirkülasyon yaparlar.

Klorürün giderilmesi için fırın gazlarının %10-25 miktarındaki kısmı önısıtıcıya girmeden by-pass edilmelidir. Tecrübelerle göre farinde %0,015 Cl bulunursa by-pass gereklidir.

Klorürler çeliğin paslanmasını hızlandırdıkları için çimento içinde istenmezler. Sadece çimentonun başlangıç mukavemetinin artmasına yardımcı oldukları saptanmıştır. Genellikle çimento içinde %0.01 Cl den fazlası istenmez [18].

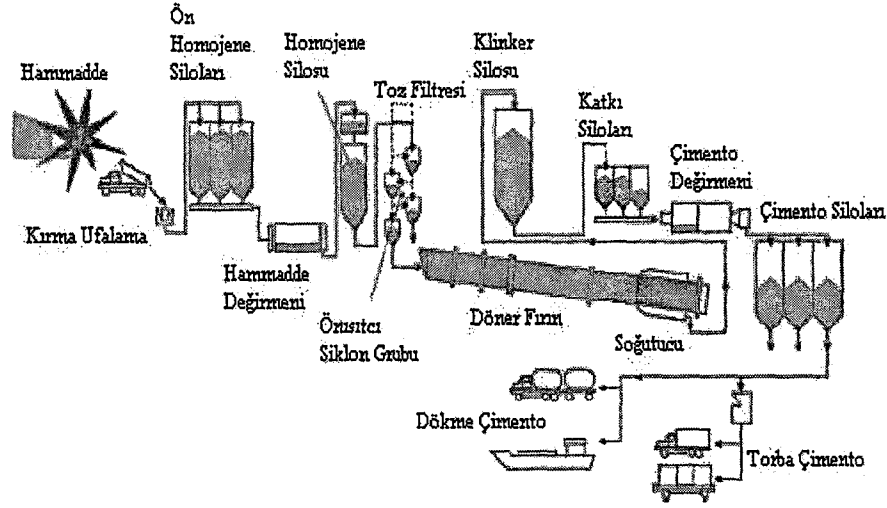
2.3.3.5. Florürler

Hammadde içerisinde %0,03-0,8 arasında bulunur. Klorüre nazaran zor uçarlık gösterir ve bu nedenle fırın sisteminde zararlı evreler oluşturmaz [9].

2.4. Çimento Üretimi

Kullanım amacına uygun çimento üretimi, klinkerin bileşen yüzdesine bağlıdır. Bu sebepten hammaddenin önceden belirlenerek buna göre hazırlanması gerekir. Kalker ve kilin bileşen yüzdelerine göre hammadde içindeki oranları çeşitli metotlarla belirlenir. En çok kullanılan "çapraz hesap metodu" dur [9].

Çimento üretiminde ilk olarak kil ve kireç parçalanıp kaba kırılmaları gerçekleştirildikten sonra, farin değirmeninde ince olarak öğütülür, kurutulur ve homojenizasyon sağlanır. Hammadde, genellikle yaş sistemde bilyalı, kuru sistemde bilyalı ve valsli hammadde değirmenlerinde öngörülen inceliğe kadar öğütülür. Daha sonra elde edilen farin sistemine göre farklı derecelerde çalışan döner fırınlarda pişirilir ve soğutularak fındık büyüklüğünde oluşan klinker elde edilir. İçerisindeki kirecin söndürülmesinden sonra klinkere belli oranlarda katkı maddeleri eklenir ve öğütülür. Öğütülen çimento paketli veya dökme olarak satışa sunulur, (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Bir çimento fabrikasında malzeme akış şeması [9, 19].

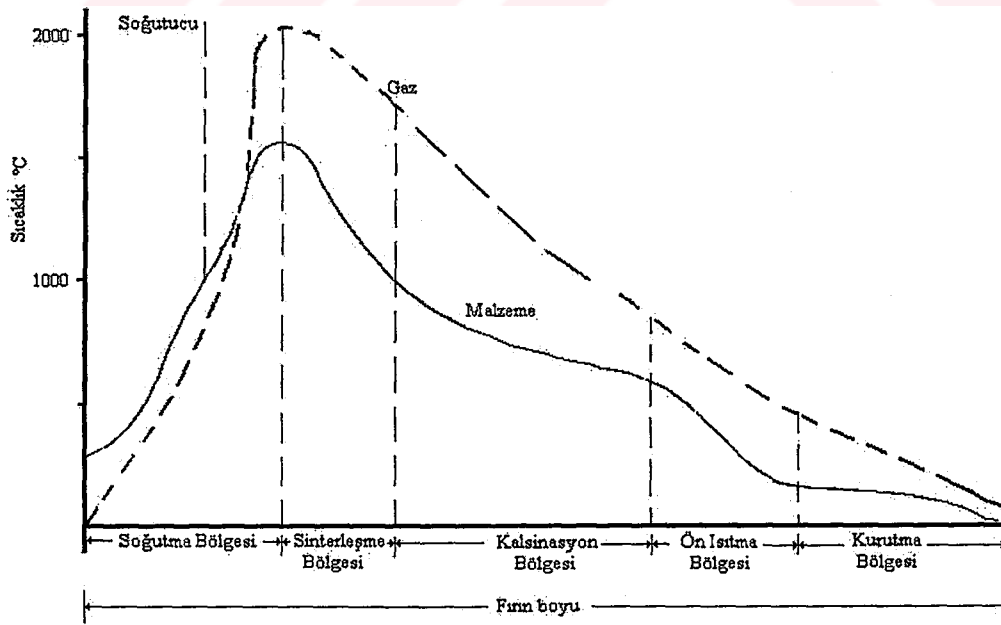
Entegre bir çimento üretim tesisinde üretim safhaları şunlardır:

- Hammaddenin hazırlanması
- Ocaklardan hammaddenin alınması
- Hammaddenin yüklenmesi ve nakliyesi
- Hammaddenin kaba kırılması
- Farin hazırlama ve homojenleştirme
- Farinin pişirilmesi
- Klinkerin soğutulması
- Öğütme
- Paketleme

Çimento üretim ve teknolojisinde en önemli farklılıklar fırın ünitelerinde kendini göstermektedir. Yaş sistem, yarı kuru sistem ve kuru sistem (önısıtıcı siklonlu ve kalsinatörlü) olmak üzere üç ayrı sistemde çimento üretimi gerçekleştirilmektedir. Döner fırına verilen hammadde yaş sistemde kurutma, önısıtma, kalsinasyon ve sinterleme süreçlerinden geçer. Kuru sistemde ise hammaddenin fırına kurutulmuş ve önısıtılmış olarak girmesinden dolayı, ısı enerjisi tüketiminde kilogram klinker başına (klinker/kg) yaş sisteme (6000-6900 kJ/kg) göre (3100-4000 kJ/kg) ısı enerjisi tüketimi ile üstünlük göstermektedir [20].

2.4.1. Yaş sistem çimento üretimi

İlk çimento döner fırınları, yaş sistem olarak dizayn edilmiştir. Bunun nedeni, öncelikle toz haline getirilen hammaddelerin karıştırılmasında karşılaşılan zorluktan kaynaklanıyordu. Bunun yanı sıra, birçok yerde kullanılmakta olan hammaddenin fiziksel özellikleri, çamurlu çalışmayı daha kolay bir yöntem olarak benimsemeyi gerektiriyordu. Yaş sistemlerde, kalker ve kil karışım oranına %20-30 oranında su ilave edilerek değirmende öğütme işlemi yapıldıktan sonra çamur haline getirilen karışım pişirilir. Bu sistemin en önemli sorunu ısı tüketiminin yüksek oluşudur (6000-6900 kJ/kg.klinker). Yaş sistemde gerekli düzeltmeler yapıldıktan ve homojene edildikten sonra zincirli uzun fırınlara sevk edilen çamur; giriş tarafındaki zincir bölgesinde rutubetini kaybeder, orta bölgede kalsine olur, çıkış tarafındaki sinter bölgesinde klinkerize olur ve soğutucuya dökülür [20]. Basit bir yaş sistem fırın, bir dizi bölümlerden oluşmaktadır. Bu bölümler, en iyi şekilde gaz ve malzeme sıcaklıklarına göre tanımlanmaktadır. Şekil 2.2.' de tipik ve basit bir yaş sistem çimento fırınındaki ısı bölgeleri görülmektedir. Malzemenin sıcaklık derecesini gösteren eğrideki sapmalar, pişme prosesinin değişik fazlarını göstermektedir.

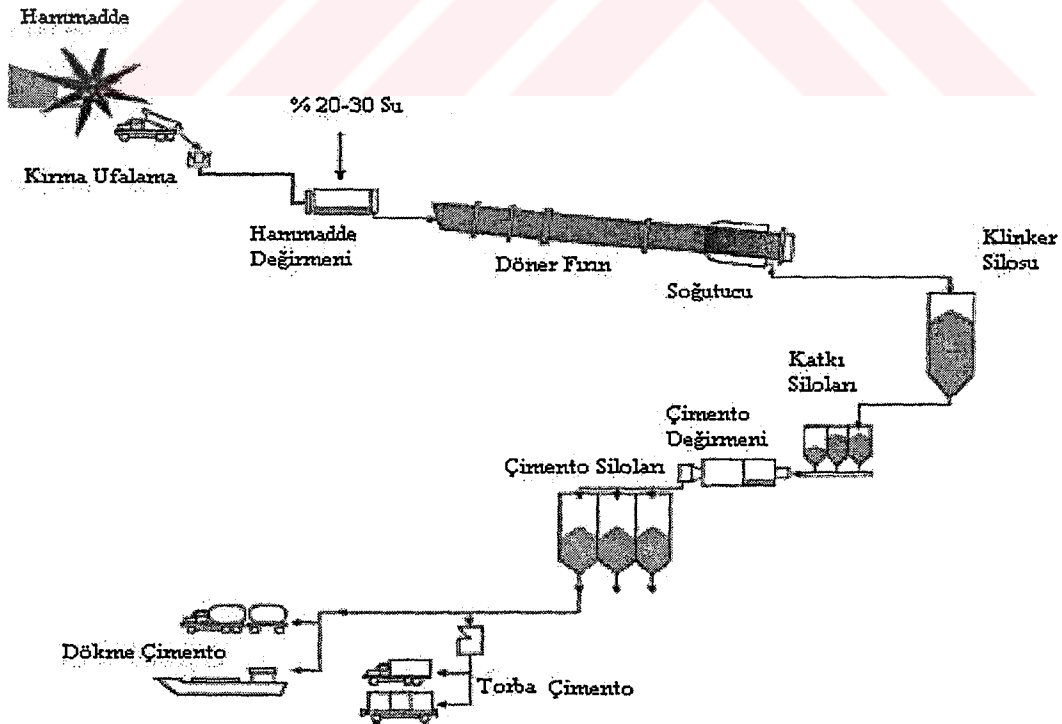


Şekil 2.2. Basit bir yaş sistem fırında bölgelere göre sıcaklık (°C) durumları

Yaş sistem çimento döner fırınında bölgeler itibarı ile şu işlemler meydana gelmektedir;

- A) Kurutma bölgesi: Çamurun önısıtılması, malzeme yüzeyindeki serbest suyun buharlaşması, malzemedeki kapiler etki ve adaptasyon suretiyle tutulmuş olan nemin buharlaştırılması,
- B) Önısıtma bölgesi: Malzemenin kurumasının tamamlanmasıyla, malzeme sıcaklığının kalsinasyon başlangıç işlemine doğru yükselmeye başlaması,
- C) Kalsinasyon bölgesi: Kil minerallerinin dehidratasyonu ve yeni fazların oluşmaya başlamasıyla malzemenin kalsine olması,
- D) Sinterleşme bölgesi: Klinker oluşumunun endotermik reaksiyonlarının meydana gelmesi,
- E) Soğutma bölgesi: Klinkerin optimum sıcaklığa kadar soğutulmasının sağlanması,

Şekil 2.3.' de ana hatlarıyla yaş sistem çimento üretim sistemi görülmektedir.

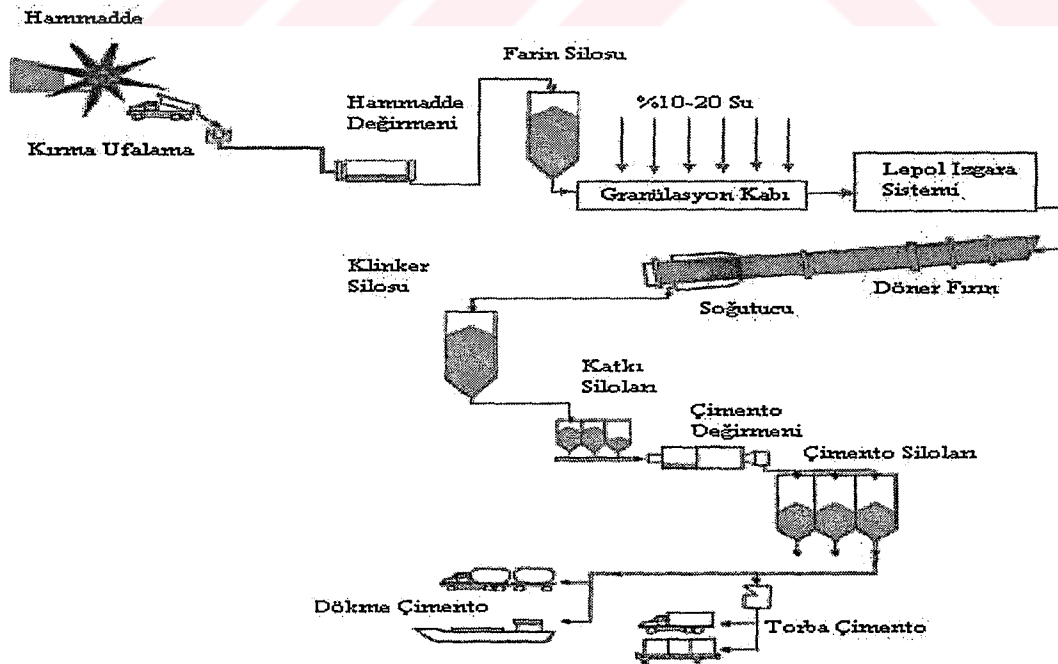


Şekil 2.3. Ana hatlarıyla yaş sistem çimento üretim sistemi [19]

Bu sistem ancak hammaddenin çok rutubetli ve sedimanter marn ve kilden oluşması halinde ekonomik olabilir. Ülkemizde yaş fırınların çoğunluğu 1965-1973 yılları arasında üretim kapasitelerinin artırılması amacı ile, 1974 yılından itibaren ise yakıt tasarrufu sağlamak amacı ile kuru sisteme çevrilmiştir. Halen ülkemizde yaş sistem küçük kapasiteli 2 fırın (Çorum ve Bartın) faaliyetini sürdürmektedir [21].

2.4.2. Yarıyaş sistem çimento üretimi

Bu sistem, fırın girişine bir önısıtıcı ızgara ilave edilerek daha kısa fırınlarda daha az ısı sarfiyatıyla klinker üretimi gerçekleştirilmekte ve genellikle LEPOL sistemi olarak adlandırılmaktadır [21]. Yarıyaş sistemde değirmenden alınan hammadde sırasıyla hammadde silolarına, bunkere ve granülasyon ünitesine alınır. Granülasyon kabı ve granül tabağına dökülen hammaddeye %10-20 oranında su püskürtülerek granül hale getirilir ve fırına beslenir. Sıcak fırın gazları granül tabakasını iki kez kat ederek (yaklaşık 100 °C' ye düşünceye kadar) ısısını ısıtma ve kurutma için hammaddeye transfer etmektedirler. Ayrıca bu sistem ile ısı tüketiminin 3516 kJ/kg.klinker' e kadar düşürülebilmesinin yanında fırın boyunun da 40-70 m' ye kadar düşürülmesi gerçekleşmektedir. Fırın kapasiteleri de 1500 ton/gün' e kadar çıkabilmektedir [16, 22]. Şekil 2.4.' de yarıyaş sistem çimento üretimi görülmektedir.



Şekil 2.4. Yarıyaş sistem çimento üretimi [19]

2.4.3. Kuru sistem çimento üretimi

Yaş sistemlerde fırına verilen çamurdaki suyun buharlaştırılması için yaklaşık 2300-2700 kJ/kg.klinker' lik ısı tüketimi gerekmektedir. Enerji maliyetlerindeki artışlarla birlikte bu ısıyı geri kazanmak için hammaddenin fırına kuru olarak beslendiği kuru sistem çimento üretimi geliştirilmiştir. Kuru sistem çimento üretimi esas itibarıyla önısıtıcı siklonlu ve önkalsinasyonlu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Günümüzde çimento üretim sistemlerinin büyük çoğunluğunun önkalsinasyonlu şekle dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir [23].

2.4.3.1. Önısıtıcı siklonlu kuru sistem

Önısıtıcı siklonlu ilk döner fırın 12 Mayıs 1953 tarihinde kullanılmıştır. Bu önısıtıcı Klockner Humboldt Deutz tarafından imal edilmiş ve batı Almanya' da Bockum' da Bomke Blecham fabrikalarında kullanılmıştır. Bu yıllardan itibaren geliştirilerek en verimli hale getirilmiştir. Önısıtıcı siklonların çimento fabrikalarında kullanılmasındaki esas amaç, fırını 900-1150 °C de terk eden sıcak fırın gazlarının enerjisinden istifade etmektir. Bu amaç gerçekleşirken hammaddenin kurutulması, önısıtılması ve kısmen kalsinasyonu da fırın dışında olmakta dolayısıyla fırın üretim kapasitesi yaş sisteme göre çok fazla artmaktadır. Çeşitli tiplerdeki önısıtıcı siklonlu sisteme hammadde kuru şekilde verilerek özgül ısı tüketiminde ve fırın boyutlarında azalma sağlanmaktadır [24].

Önısıtıcı siklonlu fırın ünitelerinin avantajları şunlardır:

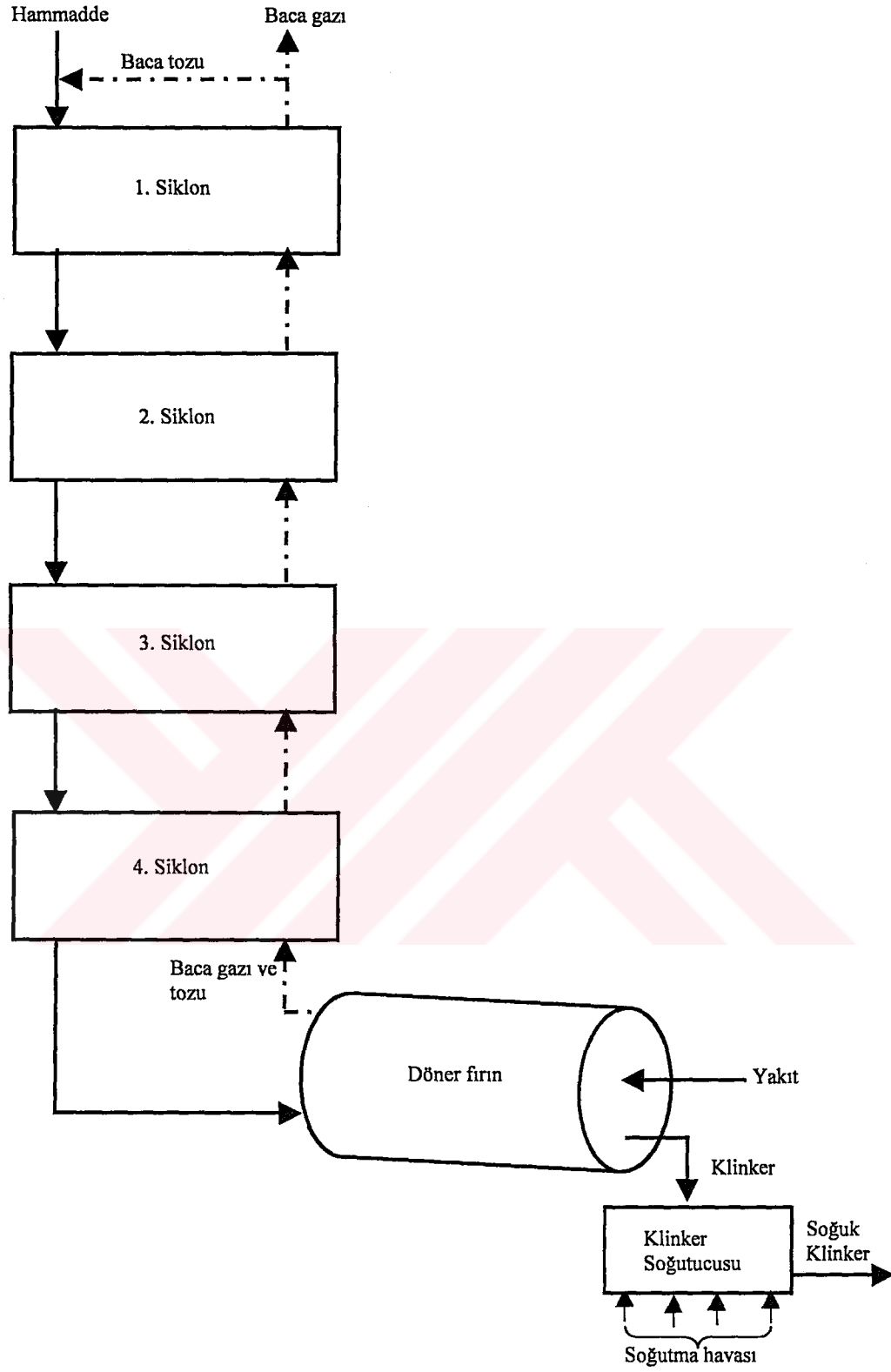
- Tüm tesiste ve döner fırın verimliliğinde artma,
- Kuru hammadde kullanılmasının bir sonucu olarak fırın gazları ile süspanse edilmiş katı partiküller arasında ısı transferinin iyileşmesi ile her kg klinker için ısı tüketiminde 3500 kJ' un altına düşebilme,
- Kil, fırın cürufu vb. non-plastik hammaddelerin kullanılabilmesi,
Nem durumu %0.5-1.0 den fazla olmayan hammaddelerin 0.09 mm' lik eleklerde %29 incelikte tutularak öğütülebilirliği,
- Daha üniform ve daha çok önısıtmanın bir sonucu olarak klinkerin kalitesinde iyileşme,

- Bir çok hareketli kısımların eliminasyonu ile daha güvenilir işlem,
- Daha az konstrüksiyon ve bakım masrafları.

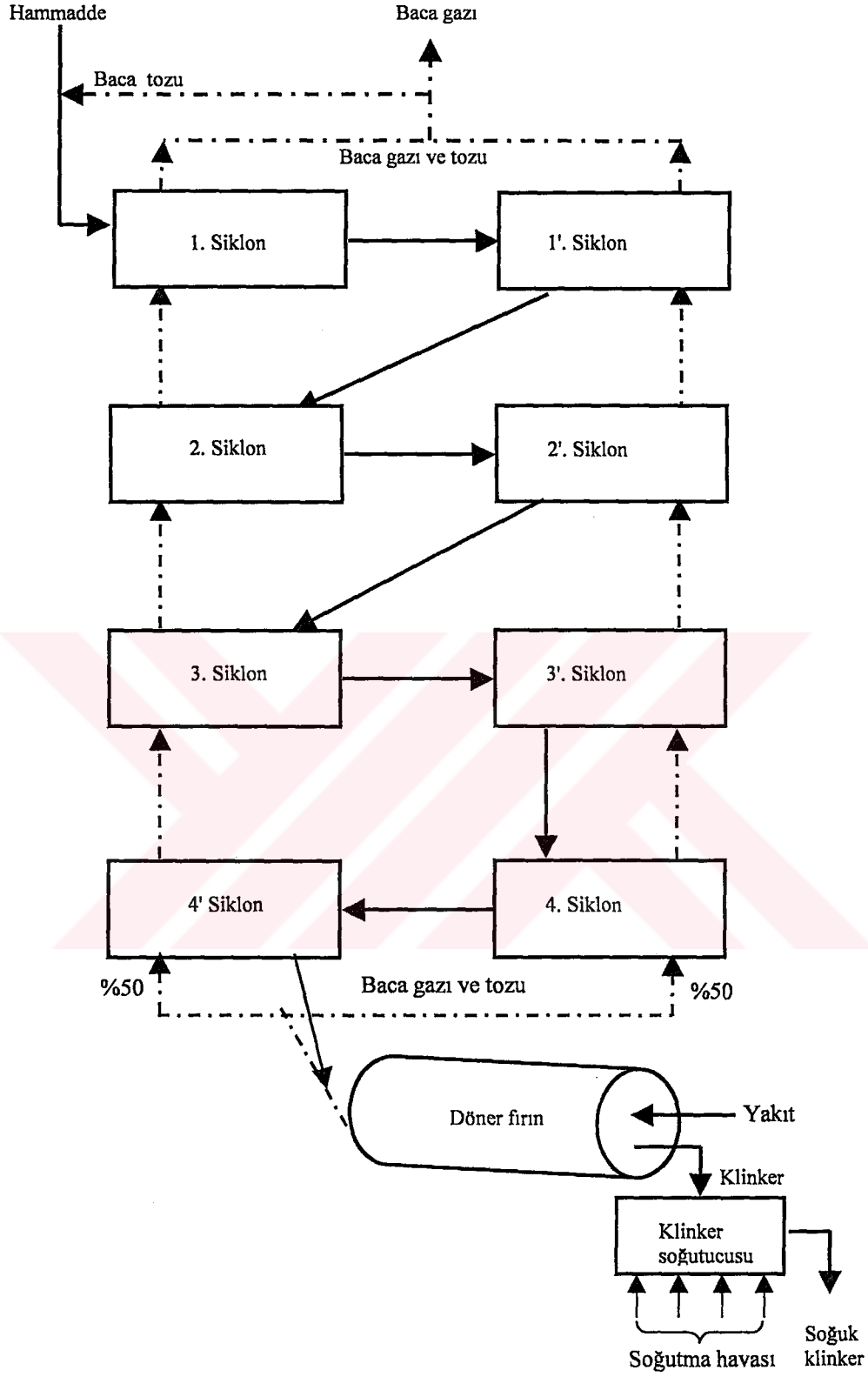
Önısıtıcı siklonları bilinen toz tutucu siklonlardan ayıran temel fark, katı maddenin sıcak gazlardan tamamen ayrılmaması ve birbirini takip eden kademelerde ısıtılarak yoluna devam etmesidir. Bu nedenle önısıtıcı siklonların silindirik kısımlarının yüksekliği, toz tutucu siklonların yüksekliğinin $2/3$ ' nü aşmayacak şekilde azalmıştır. Böylece gaz ve hammadde partikülleri arasındaki ısı transferi artmakta ve bütün siklon kademelerindeki çap aynı veya hemen hemen aynı olmaktadır. Yalnız hammadde akışına göre ilk siklon genellikle daha küçük fakat iki adet olarak yapılır.

Önısıtıcı siklonlu sistemler gaz ve farin akışına göre seri ve paralel akışlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Seri ve paralel akışlı önısıtıcı siklonlu sistemler Şekil 2.5.a. ve Şekil 2.5.b. de gösterilmektedir. Döner fırından çıkan sıcak gazlar önısıtıcı siklonlara eşit dağıtılmış şekilde paralel hatların içinden geçer. Fakat farinin %100' ü üst siklonların yalnız birisinden beslenir. Farinin tamamı bütün siklon kademelerinden seri şekilde geçer. Her kademedede %100 "soğuk" hammadde ile %50 "sıcak" gaz arasında her zaman ısı alışverişi meydana gelir ve sıcak gaz "soğuk" farin tarafından ve konvensiyonel (klasik)sistemlerde olduğundan daha güçlü bir şekilde soğutulur.

Son etki, atık gaz ısısında azalmadır. Isı enerjisinin çoğu sistem içinde kalır ve atık gaz ile birlikte kaybolmaz. Pek çok önısıtıcı siklonlu sistemde dört kademeli siklon sistemi kullanılmaktadır. Önısıtıcı siklonlu sistemlerde kademe sayısını arttırarak daha düşük yakıt sarfiyatı üzerine yapılan çalışmalar ve bunun uygulamaları vardır (beş hatta altı kademe).

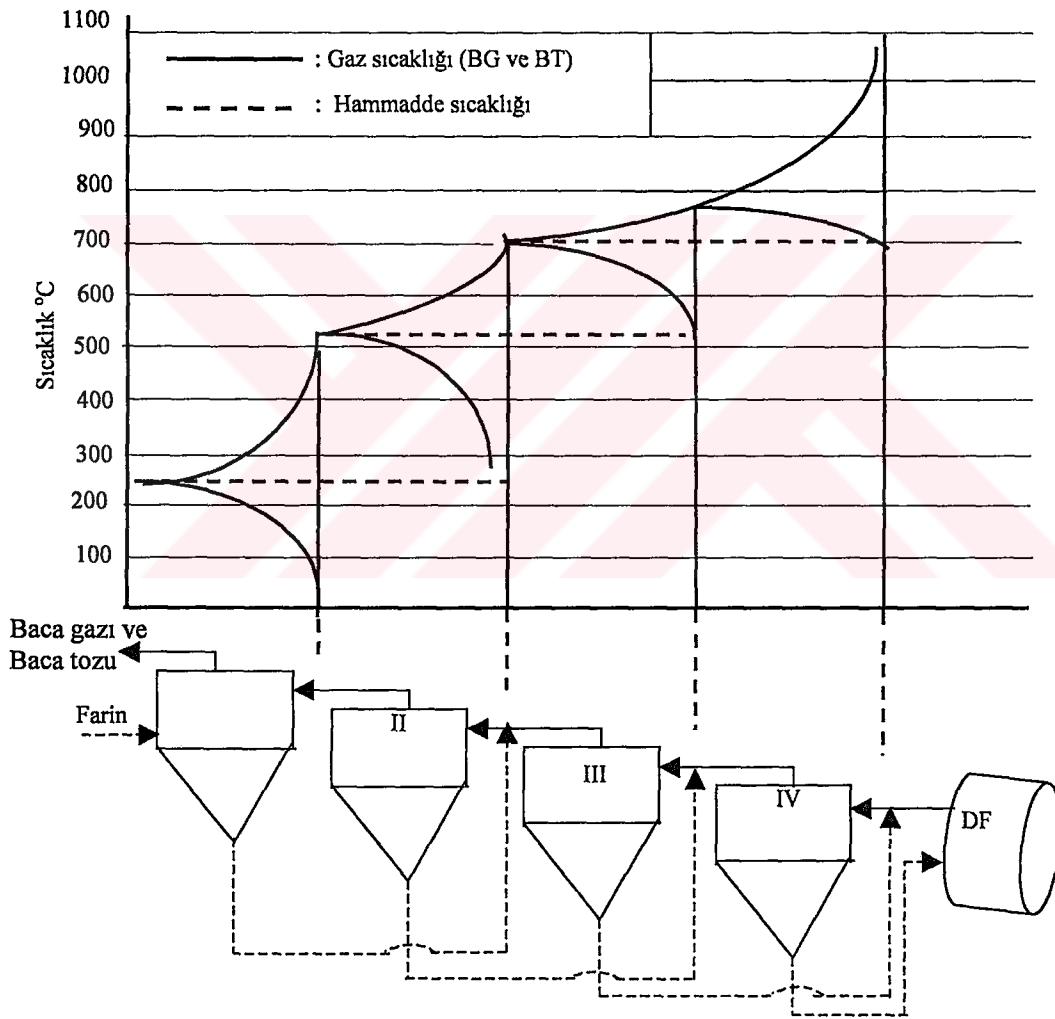


Şekil 2.5.a. Seri akışlı önısıtıcı siklonlu sistemin şematik görünüşü



Şekil 2.5.b. Paralel akışlı önısıtıcı siklonlu sistemin şematik görüntüsü

Ancak sistemde sirküle eden alkali miktarı fazla ise kademe sayısını arttırmak sakıncalıdır. Kademe sayısını arttırmak baca gazı fanının çektiği elektrik enerjisini artırma problemini de beraberinde getirmektedir. Bundan dolayı dört kademe sayısı ideal bir sayı olarak ortaya çıkmaktadır. Önısıtıcı siklonlu sistem, şematik olarak zıt yönlü paralel akışlı ısı değiştirici sistemidir. Tipik bir dört kademeli önısıtıcı siklonlu sistemde her kademedeki katı ve gaz akımının giriş-çıkış sıcaklıkları Şekil 2.6.'da görülmektedir. Sistemin her kademesindeki bu sıcaklıklar, önısıtıcı siklonların değişik tiplerinde çok fazla farklılık göstermez.



Şekil 2.6. Dört kademeli önısıtıcı siklonlarda tipik bir gaz ve farin sıcaklık profili

2.4.3.2. Önkalsinasyonlu kuru sistemler

1950' lerde dört kademeli önısıtıcı siklonlu sistemler düşük yakıt tüketiminden dolayı çimento endüstrisinde oldukça popülerdi. 1970' lerde başlayan büyük kapasiteli fırınlara doğru olan akım, büyüyen fırın ebatları ve fırın refrakter malzeme aşınmasında büyük artışlara neden olmuş ve problemlere yol açmıştır. Fırın çapı, termik yüke ve gaz hızına göre tespit edildiğinden, kalsinasyon için önısıtıcıya yakıt verme fikri doğmuştur.

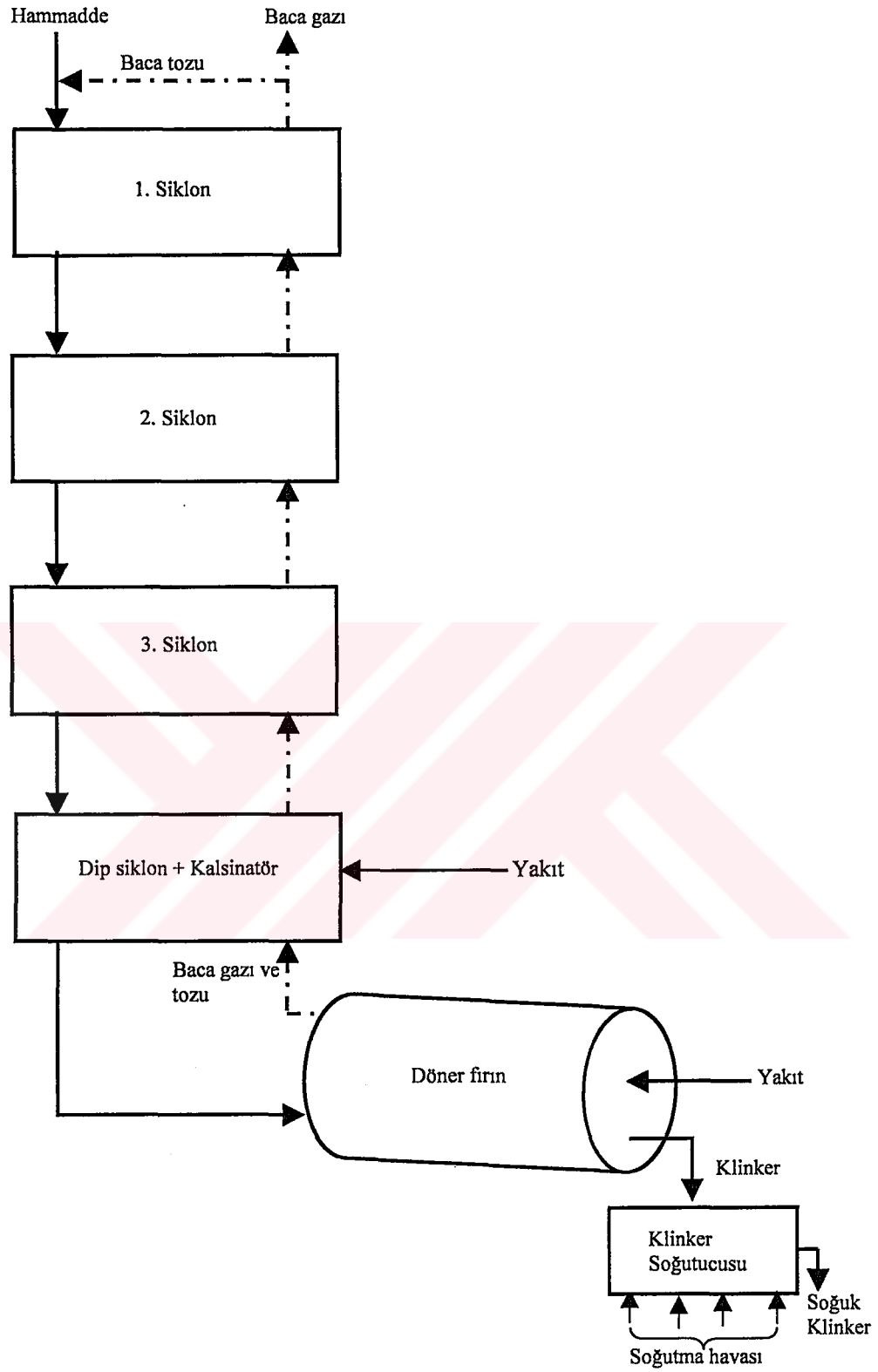
Önkalsinasyonlu fırın sisteminin ilk uygulaması 1971 yılında IHI (Ishikawajima Harima Heavy Industries) tarafından gerçekleştirilmiştir. 1973 yılından itibaren dünyanın yaşadığı enerji krizinin büyük etkisi ile önkalsinasyon teknolojisi kısa sürede büyük bir gelişim göstermiştir [25]. Önkalsinasyon terimi, yakıt girdisinin fırınla (fırına girişten önceki bir noktaya) daha farin fırına girmeden önce dağıtılarak farinin normalden daha ileri bir dereceye kadar kalsine edilmesinin sağlanması işlemini ifade etmektedir. Fırından önce yakıt tatbik edilen nokta, fırınla önısıtıcı arasında bulunan bir yer olabilir. Önkalsinasyonlu sistemlerde, yakıtın yanması için gereken hava, döner fırınla önısıtıcı arasında sisteme iki yoldan verilmektedir; ya soğutucudan gelen bir kanalla tersiyer havadan veya döner fırını hava fazlası ile çalıştırarak fırın çıkış gazlarından, fırından sonra ilave edilen yakıtın tamamen yanmasını sağlayacak miktarda oksijen temin edilir.

Önkalsinasyonlu sistemlerde kalsinasyonun %80-95' i en alt kademede (kalsinatör) meydana gelmektedir. Bu kademede farin, önkalsinasyon' unun gerektirdiği reaksiyon sıcaklığından dolayı önısıtıcıdan çıkan atık gazın sıcaklığı klasik sisteme göre yaklaşık 30 °C daha yüksek olmaktadır. Öte yandan daha küçük boyutta olan döner fırın cidarından olan ısı kaybının azalmasıyla yakıt tasarrufu sağlanmakta ve gazların fırından çıkış sıcaklığında bir artış görülmektedir. Bu durumda mevcut dört kademeli önısıtıcı siklonlu sistem, beş kademeli yapılarak atık gaz sıcaklığında 30 °C' lik bir düşüşle ısı tasarrufu sağlanabilmektedir [26]. Ancak bu şekilde sağlanan ısı tasarrufunun bir kısmı önısıtıcı siklonlarda artan basınç kaybını karşılamak için harcanan ek enerji ile dengelenmektedir. Önkalsinasyonlu sistemler seri akışlı ve paralel akışlı olmak üzere ikiye ayrılırlar.

2.4.3.3. Seri akışlı önkalsinasyonlu sistem

Seri akışlı önkalsinasyon sistemi, dik boruda kurulmuş kalsinatör tankı ile veya döner fırın üstündeki önısıtıcı siklon (dip) ve bunun konstrüksiyonuna ilave edilmiş bir yanma kamarasından meydana gelir. Bu sistem dört/beş/altı kademe önısıtıcı siklona sahip olabilir. Sıcak yanma havası, üçüncül (tersiyer) hava borusu ile genellikle klinker soğutucusundan alınır ve kalsinatör girişinde fırın gazlarıyla karıştırılır. Seri akışlı önkalsinasyonlu sistemlerde kalsinatörü terk eden (dip siklona giren) gaz sıcaklığı 900 °C civarına kadar ulaşır. Yüksek kül içerikli kömürler, alt ısı değerleri düşük olmasına rağmen kalsinatörde yakılabilir. Yakıt külü ise hammadde ile çok iyi bir karışım oluşturur ve sonuçta çimento içerisinde bağlanır.

Kullanılan toplam yakıtın %55-60' ı kadarı kalsinatörde yakılır. Kalsinatör, lastik ve ağaç kabuğu gibi atık yakıtların kullanımı için de idealdir. Döner fırın gazlarının by-pass 'ı %0-100 arasında kullanım esnekliğine sahiptir (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Seri akışlı önkalsinasyonlu sistemin şematik görünüşü

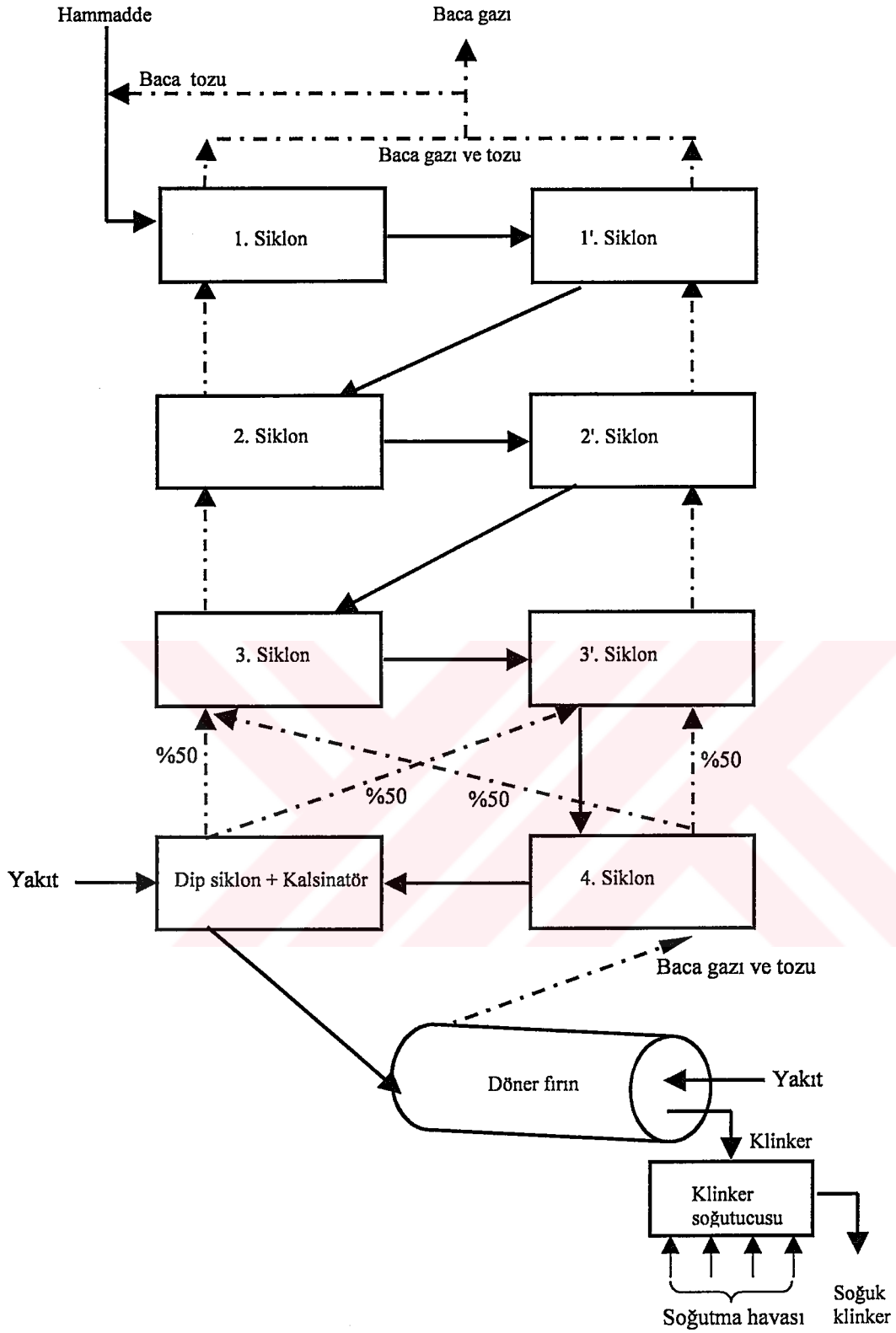
2.4.3.4. Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistem

Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistem, mevcut paralel akışlı önısıtıcı siklonlu sistemlerin kapasitelerini arttırmak için sisteme kalsinatör ilave edilmesiyle elde edilir (genellikle dip siklon kalsinatöre dönüştürülür). Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerin 4-6 kademe siklon gruplarının kapasiteleri 3000-7500 ton/gün arasında değişmektedir.

Paralel akışlı önkalsinasyon sisteminde kalsinatör, fırın üst borusuna paralel yerleştirilir. Klinker soğutucusundan alınan ısınmış (tersiyer) hava, kalsinatör ateşlemesinde kullanılır. Döner fırın gazları kalsinatör içinden geçmediği için kalsinatördeki, atmosfer fırın gazlarından arındırılmıştır. Bu durum, kalsinatör ebatlarının minimum boyutlarda tutulmasını sağlar. İlave olarak fırın atık gazında bulunan karbondioksit, alkali, sülfür ve klorür gibi gazlar kalsinatöre girmediği için kalsinasyon prosesi üzerinde zararlı etkileri olmaz. En alttaki siklon kademesinden sonra döner fırından ve kalsinatör ünitesinden gelen gazlar karıştırılarak paralel iki akış elde edilir. Bu gazlar fan vasıtasıyla her iki paralel önısıtıcı siklon gurubundan geçer. Her siklon gurubu için ayrı bir fan bulunduğundan gaz akışının kontrolü daha kolay olmaktadır.

Kalsinatöre temin edilen hava, kalsinatörde optimum yanma ve kalsinasyon şartlarını belirler. Üretim sırasında hava miktarı iki gaz analiz cihazı ile ayarlanır, bu cihaz aynı zamanda her iki önısıtıcı hattındaki CO ve O₂ miktarlarını sürekli kontrol eder. Tersiyer hava kalsinatör ünitesine yüksek hızla ve teğet olarak girerek farin, yakıt ve yanma havasını mükemmel bir şekilde karıştırır. Farinde görülen kalsinasyon davranış farklılıkları bir kontrol devresi ile düzenlenir. Ayrıca bu devre, yakıt beslemesini, kalsinasyon sıcaklığını sabit düzeyde tutmak için kullanılmaktadır.

Düşük kaliteli yakıtların kalsinatörde kullanılması mümkündür. Bununla birlikte kullanılan yakıt toplam yakıt ihtiyacının yaklaşık %50-60' ıdır ve fırına beslenen hammadde kalsinasyon yüzdesi 90-95' e ulaşır (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemin şematik görüntüsü

2.4.3.5. Seri ve paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerin karşılaştırılması

Burada, seri ve paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerin hem avantaj hem de dezavantaj açısından bir karşılaştırılması yapılmıştır.

A- Seri ve paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemin avantajları

- Toplam yakıtın %60' ına kadar varan miktarının kalsinatörde yakılabilmesi, diğer bir deyimle "termal prosesin %60' ının ısıtıcı gruba (kalsinatöre) kaydırılması" mümkündür. Böylece sinter termal yükünün kabul edilebilir sınırlar içinde kalması şartıyla fırın çapını artırarak çok büyük kapasitelere ulaşmak mümkündür. Klasik ısıtıcı siklonlu fırın sisteminin önkalsinasyonlu sisteme çevrilmesiyle mevcut kapasitenin iki katına ulaşılabilir.
- Önkalsinasyonlu sistemde fırın termal yükünün azaltılması ve fırın hızının artırılması suretiyle fırın refrakter ömrünü ısıtıcı siklonlu sistemlere göre iki katına çıkarmak mümkündür.
- Refrakter ömrünün artırılmasıyla fırının kapasitesi kullanım süresini %90' ın üzerine çıkarmak mümkündür. Bu değer, ısıtıcı siklonlu fırın sistemlerinde % 75-85' dir. Fırın kullanım süresinin artırılması fırını daha fazla zaman işletmede tutmaktır. Bu nedenle bu sonuç maliyeti düşüren en önemli faktör olmaktadır.
- ısıtıcı siklonlu fırın sistemlerinde fırın gazlarının minimum %70' inin ısıtıcıda kullanılması gereklidir. Diğer ifade ile fırın gazlarının maksimum %30' u by-pass edilebilir. Önkalsinasyonlu sistemlerde fırın termal yükünün azaltılması ve kalsinasyon reaksiyonlarının ısıtıcı kısmında oluşması nedeniyle yüksek fırın gazı by-pass' ı yüksek ısı kaybı olmaksızın gerçekleştirilmektedir. Fırın gazının tamamının by-pass edilerek işletildiği önkalsinasyonlu fırın sistemleri vardır.
- Önkalsinasyonlu sistemlerde fırın gazı by-pass' ının her yüzde biri, kg klinker başına 6,0-8,5 kJ kayıp ısı demektir. Bu değer ısıtıcı siklonlu sistemlerde 16,5-21 kJ/kg.klinker kadardır.
- Önkalsinasyonlu sistemlerde toplam yakıtın %60' ının düşük sıcaklıkta yakılması nedeniyle (kalsinatörde 900-1100 °C) NO_x emisyonu, yakıtın tamamının fırında yakıldığı (veya yüksek alev sıcaklığı istendiği) ısıtıcı sistemlere nazaran

düşüktür. Kalsinatör ünitesinin kullanılması suretiyle NO_x emisyonunun %50 azaltıldığı rapor edilmektedir. Bunun yanında özel dizayn edilmiş kalsinatör sistemleri ile fırında oluşan NO_x indirgenerek etkisinin minimize edilmesi mümkün olmaktadır [27].

- Kalsinatörde düşük sıcaklıkta yanma gereği nedeniyle kalorifik değeri düşük yakıtların kullanılması mümkün olmaktadır (atık kömür, tahta ürünler, tarımsal atıklar, lastik parçaları vb). Bununla birlikte bu tip yakıtların kimyasal bileşimi ve yanma karakteristiklerinin de dikkate alınması gereklidir. Çünkü içerebileceği uçucu komponentler nedeniyle (sülfür, klorür, alkali) prosesi etkileyebilirler. Önkalsinasyonlu sistem yüksek kükürt içeren kömürlerin kullanımı açısından ısıtıcı siklonlu sistemlere nazaran daha toleranslıdır.
- Fırın termal yükünün azaltılması nedeniyle sinterde gaz fazına geçen ve fırın girişinde, ısıtıcı siklon grubunun alt kademelerinde yapışmalara neden olan komponentlerin (SO_2 , Na, K, Cl) bu etkisini %50 oranında azaltmak mümkün olmaktadır. Bu durum fırın kapasitesi kullanım süresini arttıran diğer önemli faktörlerden biridir [28].
- Yakıt ihtiyacının (kullanımın) fırın ve kalsinatör üniteleri arasında paylaşılması, fırın operasyonunun kolaylıkla kontrol edilmesini sağlar. Yani kalsinasyon ve klinkerizasyon reaksiyonları ayrı olarak kontrol edilebilmektedir. Önkalsinasyonlu sistemlerin bu özelliği prosesin otomasyonunu mümkün kılan en önemli faktördür [29, 30].
- Isıtıcı gaz çıkış sıcaklığının ve buna bağlı olarak ısı tüketiminin azalması ile daha ekonomik bir proses olmaktadır.

B- Seri ve paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerin dezavantajları

Yukarıda belirtilen birçok faydalarının yanında önkalsinasyonlu sistemin dezavantajları da şunlardır;

- Isıtıcı siklon grubunda, önkalsinasyon kamarası (kalsinatör) ve sekonder gaz kanalı olduğu için yüksek basınç düşümü olmaktadır. Bu nedenle ilave basınç kaybını kompanse etmek için ısıtıcı siklon grubunun 3. ve 4. kademelerinde ekstenel veya yatay şekilde özel olarak dizayn edilmiş "düşük basınç düşümlü" siklon yerleştirme ihtiyacı ortaya çıkabilmektedir.

- İlave yakıt hazırlama, sevk etme ve yakma sistemleri ile sekonder gaz kanalı sistemin karmaşıklığını arttırmaktadır. Bu yüzden arıza riski artmaktadır.
- Düşük refrakter sarfiyatı yanında; Geçiş bölgesinde sinter bölgesinin ön kısmında yüksek üretim oranı, değişen proses şartları ve özellikle alkali ve sülfür etkisi nedeniyle yüksek refrakter aşınması vardır. Ayrıca yüksek fırın sekonder hava sıcaklığı nedeniyle fırın gazı refrakteri ve alev borusu refrakteri daha yüksek derecede aşınmaya maruz kalırlar. Yüksek sekonder hava sıcaklığı, fırın ağız konstrüksiyonunun kullanım süresini azaltan önemli bir faktördür.

Özet olarak önkalsinasyonlu sistemin avantajları yukarıda belirtilen dezavantajlarına nazaran kıyaslanmayacak derecede önemlidir [31].

2.5. Çimento Fabrikasında Yer Alan Önemli Diğer Üniteler

Çimento fabrikalarında önısıtıcı siklon grubu ve kalsinatör ünitesi dışında kütle ve enerji dengeliği açısından göz önüne alınması gereken diğer önemli üniteler döner fırın ve klinker soğutucularıdır.

2.5.1. Döner fırın

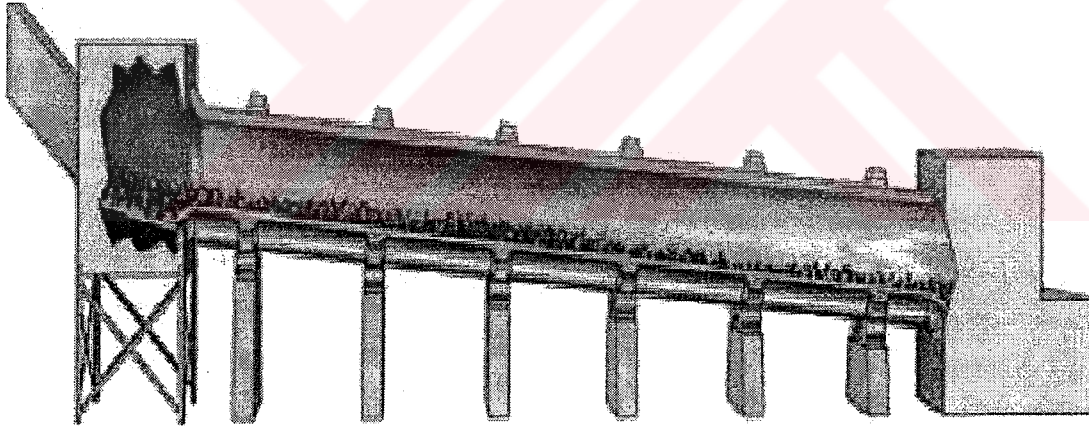
Döner fırınlar; endüstride çimentonun klinkerizasyonu, kireçtaşı kalsinasyonu, kok kömürünün kalsinasyonu, cevher oksidini indirgeme vb. gibi geniş amaçlı kullanılmaktadırlar [32, 33]. Çimento endüstrisinde döner fırını ilk olarak İngiliz Frederik Ransome İngiltere'de 5 Mayıs 1885 yılında ve daha sonra da 20 Nisan 1886 yılında Amerika'da uygulamıştır. Bu döner fırın o tarihlerde kömür tozu yakılması bilinmediği için gazla ısıtılmıştır.

Döner fırınlar yavaşça dönen silindir şeklinde bir borudan ibarettir. Yatay olarak %3-4 eğime sahiptirler [20]. İç kısmı ateşe dayanıklı olan malzeme (refrakter) ile örülmüştür. Döner fırınların çevre hızı yaklaşık 0,15-0,30 m/s arasındadır. Fırının yukarı kısmından fırına beslenen hammadde pişirilerek klinker şeklinde alt ucundan soğutucuya dökülür. Yakma düzeni fırının aşağı kısmına yani boşaltma kısmına monte edilmiştir. Böylece fırın ters akım prensibine göre çalışmaktadır. Döner

fırında katı, sıvı ve gaz yakıtlar kullanılabilir (toz kömür, fuel-oil veya doğalgaz), (Şekil 2.9.).

Uzunluğa göre fırın mantosu iki veya daha çok sayıda taşıyıcı düzen (gale) üzerine oturmaktadır. Bunların her takımı iki taşıyıcı ruloya sahiptir. Bu rulolar, fırın merkezi ile rulo merkezini birleştiren hat ve fırın merkezinden dikey olarak inen hat arasında 30° lik açı yapacak şekilde monte edilmektedir [34].

Fırın tahrik sistemi, fırın mantosunun yaklaşık ortalarından, daha ziyade fırın giriş ucuna yakın olmak üzere galelerden birisinin yanında monte edilmektedir. Tahrik sisteminin hararetten korunabilmesi için sinter bölgesinden uzağa yerleştirilmesine dikkat edilmelidir. Tahrik sistemi fırın üzerine monte edilmiş olan büyük bir dişli (kuron dişli), pinyon tahrik dişlisi ve devir düşürecek bir dişli kutusundan oluşmaktadır. Bundan başka



Şekil 2.9. Döner fırın ters akım prensibi kesiti

elektrik kesilmelerinde fırını deformasyondan korumak için veya fırın tamirlerinde fırını yavaş yavaş döndürmek için yardımcı bir tahrik sistemi de monte edilmektedir.

Döner fırın kapasitelerinin artması geometrik boyutlarındaki artmayla ilgilidir. Böylece uzunluğu 200 m' ye ve çapı 7 m' ye kadar arttırmak mümkündür. Ancak yaş sistem fırınlar için bu durumlar mümkün olmamaktadır. Döner fırınların daha büyük

olmaları her bir kg'lık klinker için daha fazla efektif hacim gerektirdiği gibi nadiren 4200 kJ/kg.klinker 'lik ısı değerinin altına düşülür [24, 35]. Yaş, yarıyaş, uzun kuru, önısıtıcı siklonlu ve önkalsinasyonlu sistemlerde fırın içerisindeki reaksiyonlar fırın uzunluğuna göre yaklaşık Tablo 2.2.' de olduğu gibi değerlendirilir [36].

Tablo 2.2. Fırın uzunluğuna göre çeşitli fırın sistemlerinde bölgeler

Fırın Sistemleri	Çamur ve önısıtmaya	Buharlaştırma ve önısıtma	Kalsinasyon	Pişme
Yaş sistem fırınlar	% 5	%40	%33	%22
Yarıyaş (Lepol) fırınlar	-	-	%55	%45
Uzun kuru fırınlar	-	%30	%47	%23
Önısıtıcı siklonlu fırınlar	-	-	%60	%40
Önkalsinatörlü fırınlar	-	-	%35	%65

Çeşitli tip fırın sistemleri için fırın uzunluğunu veren yaklaşık ifadeler Tablo 2.3.' te verilmektedir[24].

Tablo 2.3. Çeşitli tip fırın sistemleri ve fırın uzunlukları

Fırın Tipleri	Fırın uzunluk ifadesi (m)
Kuru sistem önısıtıcı siklonsuz fırın	$40 \cdot D_k$
İki önısıtıcı siklonlu fırın	$30 \cdot D_k$
Dört önısıtıcı siklonlu fırın	$17,5 \cdot D_k$

Fırın uzunluk/çap oranı ile özgül hacmi çeşitli tipler için Tablo 2.4 'da verilmiştir,

Tablo 2.4. Çeşitli tipler için fırın uzunluk/çap oranı ve özgül hacmi [24].

Fırın sistemleri	Uzunluk / çap	Özgül hacim (t/m.24.h)
Uzun yaş fırınlarda	30 - 45	0,5 - 0,85
Gepol, Lepol, Döpol veya önısıtıcı siklonlu fırınlarda	12 - 17	1,8 - 3,8
Humboldt, Krupp, Smidth, Wedag, Five-Lille ve Nicement (SSCB) fırınlarda	15	1,8 - 3,8

Fırın özgül hacmi, tuğladan tuğlaya fırın çapı (iç çap) dikkate alınarak fırın hacminin fırın günlük klinker üretimine oranı olarak kabul edilir. Çeşitli tip fırın sistemleri için fırın özgül hacmini veren yaklaşık formüller de şöyledir (Tablo 2.5.), [24].

Tablo 2.5. Çeşitli tip fırın sistemleri için fırın özgül hacim bağıntıları

Fırın tipleri	Fırın Özgül hacmi ($m^3.h/ton$ klinker.)
Dört önısıtıcı siklonlu fırın	$11 \cdot D_k^{0,25}$
Üç önısıtıcı siklonlu fırın	$15 \cdot D_k^{0,25}$
İki önısıtıcı siklonlu fırın	$19 \cdot D_k^{0,25}$
Tek önısıtıcı siklonlu fırın	$24 \cdot D_k^{0,25}$
Kuru sistem önısıtıcısız fırın	$29 \cdot D_k^{0,25}$
Yaş sistem fırın	$K_1 \cdot D_k^{0,25}$
Burada $K_1 = 23 - 0,009.t_k$ dır, t_k ise zincir bölgesinden sonraki fırın iç sıcaklığıdır ($^{\circ}C$ olarak). Aynı zamanda D_k , yanma bölgesindeki fırın iç çapıdır (m olarak).	

2.5.2. Klinker soğutucuları

Klinker soğutucuları, klinker ve soğutma havasının birbirleriyle direkt teması ve buna bağlı olarak birinin ısınıp, diğerinin soğuması nedeniyle ısı aktarım düzeneklerinden biri olan ısı değiştiricileri sınıfına girer. Genel anlamda, ısı değiştiricilerinde aynı yönlü, karşıt yönlü ve çapraz akım olmak üzere üç temel akış şekli vardır. Klinker soğutucuları ise klinker ile yakma havasının karşıt ve çapraz akım yönüyle teması olacak şekilde düzenlenmiştir. Isıtılmış ve kısmen kalsine olmuş farin halinde döner fırına giren hammadde, burada pişerek klinker haline dönüşür. Klinker, döner fırından çıktığında kor halinde olup, sıcaklığı $1200-1450^{\circ}C$ arasında değişmektedir. Fırın ağız halkasından geçerek klinker soğutucusuna gelir. Soğutucunun görevi, sadece klinkeri soğutmak olmayıp, önısıtmaya tabi tutulmuş soğutma havasının bir kısmını sekonder hava şeklinde döner fırına, diğer bir kısmını da tersiyer hava şeklinde kalsinatöre yanma havası olarak kullanılmak üzere geri vermektir. Soğutucudan çıkan klinkerin, aktarma elemanlarına zarar vermeyecek

kadar soğutulmuş olması gerekir. Klinkerin soğuk olması, aşırı ısınma ihtimalini azaltması açısından çimento değirmenleri için de yararlı olmaktadır.

Klinker soğutucuları, çimento endüstrisinde aşağıdaki işlevleri yerine getirmek için kullanılırlar [37, 38, 39]:

- Döner fırından çıkan klinkeri sürekli işletme koşullarında kaliteli çimento üretebilecek optimum sıcaklığa kadar soğutma. Böylece soğutulmuş klinker kolayca boşaltılır, depolanır ve karışım haline getirilerek çimento elde edilir.
- Pişme prosesi için gerekli sekonder (hatta tersiyer) havanın önısıtılmasını sağlama. Buna göre fırının pişme bölgesinde klinker oluşumu için gereken 1450 °C gibi yüksek sıcaklık en az yakıt enerjisi harcayarak kazanılmış olur.

Klinker soğutucularında klinkerden soğutma havasına ısı transferi; eş akımlı, karşı akımlı yada ters akımlı olarak gerçekleştirilebilir, fakat uygulamada daha ziyade son iki yöntem kullanılmaktadır [40].

Klinker soğutucuları genel olarak dört tipte imal edilirler. Bunlar şunlardır;

- Izgaralı soğutucular (Grate coolers)
- Döner soğutucular (Rotary-coolers)
- Planet soğutucular (Planetary-coolers)
- Düşey soğutucular (Shaft-coolers)

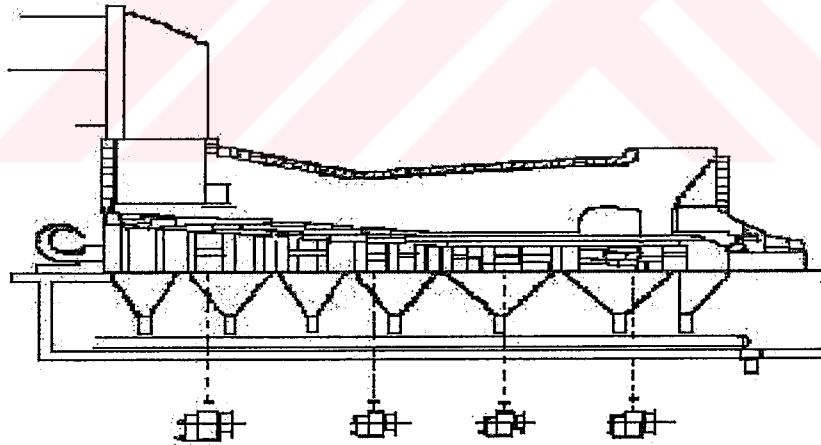
2.5.2.1. Izgaralı soğutucular

Havanın üflenmesi yoluyla soğutma yapan ve genel olarak Fuller soğutucu adıyla tanınan ızgaralı klinker soğutucu, Fuller firması Catasaugaua ABD tarafından döner fırınla birlikte etkili olması için imal edilmiştir. Izgaralı soğutucuda, klinker hızlı bir başlangıç soğutmasına tabi tutularak kalitesi yükseltilir. Izgaralı soğutucular, günümüzde kullanılan kuru çimento üretim sistemler için de en çok kullanılan ve yüksek soğutma verimi sağlayan soğutucu tipidir [41]. Izgaralı soğutucuda klinkerden çekilen ısı; döner fırının sekonder havası, kalsinatörün tersiyer havası (üçüncül hava) ve soğutucu dan atmosfere atılan hava ile de hammadde kurutmada veya kömürlü sistemlerde kömür kurutmada kullanılmaktadır. Ayrıca ızgaralı

soğutucu, klinkerin 1350-1450 °C gibi yüksek sıcaklıkta girmesine imkan sağlamaktadır [42].

Izgaralı soğutucu çok sayıda kamaralardan ibarettir. Sürgülü izgaralı soğutucular biri sabit, diğeri hareketli olan izgaralar dizisinden meydana gelir. Hareketli izgaralar (plakalar) bir redüktör ve krank-biyel mekanizmasından aldıkları sürme hareketiyle klinkeri soğutucu içinde çıkış yerine doğru iterler. Hareketli izgaralı plakaların sürme uzunluğu yaklaşık 120 mm dir[9]. Vantilatörler tarafından izgara altlarından üflenen soğutma havası debisiyle ilgili olarak klinkeri istenen düşük sıcaklıklara (50-150 °C) kadar soğutmak mümkündür.

Izgaralı soğutucular imalat durumlarına göre; eğimli (sloping-grate), yatay (horizontal-grate), kombine (combi-grate) ve çift kademe (duostage-grate) izgaralı soğutucular olmak üzere sınıflandırılırlar. Türkiye de klinker soğutucu olarak en fazla Fuller tipi yatay izgaralı soğutucu kullanılmaktadır. Şekil 2.10.' de Izgaralı soğutucunun şematik resmi görülmektedir.



Şekil 2.10. Izgaralı soğutucunun şematik resmi

2.5.2.2. Döner soğutucular

İlk geliştirilen tip soğutucular olup karşı akım prensibine göre çalışan ısı değiştiriciler gibi oldukça basit soğutuculardır. Temel dizaynları itibariyle döner fırınlara benzerler ve asgari bakımı sağlayacak mekanik dizaynlar yapmaya çok

uygundurlar. Izgaralı soğutucuların ve planet soğutucuların ortaya çıkmasıyla, yeni kurulan fabrikalarda döner soğutuculara günümüzde pek rastlanmamaktadır. Bunun sebebi yüksek kapasiteli tesislerde, döner soğutucuların boyutlarının çok büyümesine bağlı olarak yatırım maliyetlerinin de artmasıdır.

Döner soğutucuların çalıştırılmaları çok basittir, kontrol edilecek tek şey, dönme hızıdır. Hava akış miktarı kontrol edilerek pişme koşullarına göre ayarlanmaktadır. Döner soğutucularda hava kütlesi sürekli olarak, soğutucu içinden geçerken klinkerden ısı alır. Klinker ve havanın spesifik ısı kapasiteleri yaklaşık aynı olduğu için birim hava kütlesinin, teorik olarak eşdeğer birim kütledeki klinkeri çevre ısısına kadar soğutması mümkün olmaktadır, aynı zamanda havanın, klinkerin giriş sıcaklığına kadar çıkarılması mümkündür.

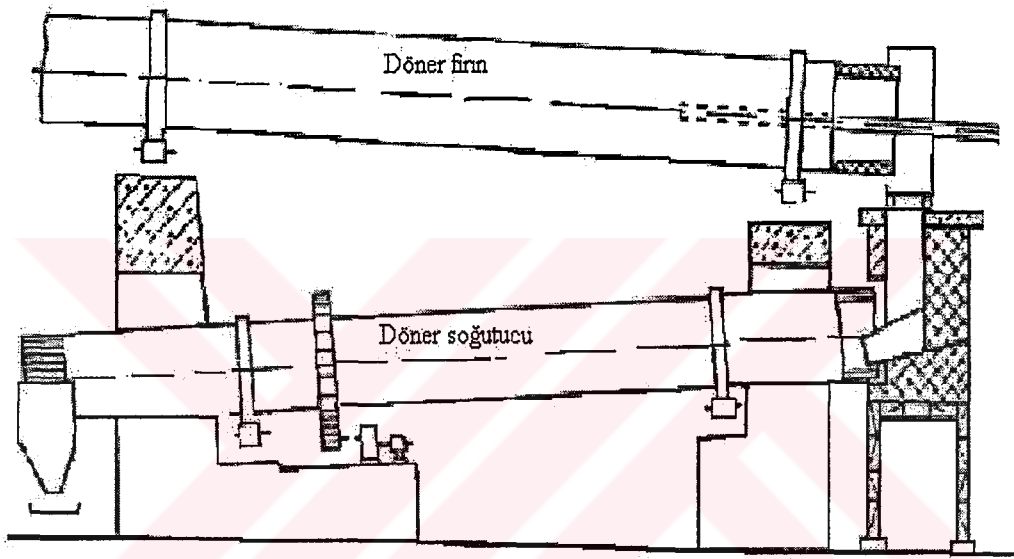
Bu nedenle, iç radyasyon kaybı olmadığını ve hava/klinker oranının 1' den büyük olduğu varsayılırsa döner soğutucunun maksimum teorik etkinliği %100 olacaktır. Kuşkusuz bu %100 etkinliği pratikte sağlamak mümkün olmamaktadır. Uygulamada etkinlikler %50-80 arasında değişmektedir.

Döner soğutucuda etkinliğin azalması ve düşük ısı geri kazanımının nedenleri şunlardır;

- Soğutucu mantosundan, radyasyon ve konveksiyon ısı kayıpları önlenememektedir. Soğutucunun, ilk ya da son 1/3' lük bölümünü refrakter malzeme ile kaplayarak bu kayıplar asgariye indirilebilmektedir. Bu şekilde oluşan ısı kayıpları, toplam ısı kaybının %25' ini oluşturmaktadır.
- Soğutucudan alınan yakma havasının yüzdesi ne kadar fazla olursa soğutucunun etkinliği de o kadar yüksek olmaktadır. Döner soğutucuya hava döner fırının fanı vasıtasıyla çekilmektedir. Bu durumda fırın başı çevresinde ve soğutucu sızdırmazlık elemanlarında daima açıklıklar bulunduğundan, çevre havası buralardan içeri sızmaktadır. Kaçaklardan oluşan sızıntı havası, yanma havasının maksimum miktarının soğutucudan geçmesini ve klinkerle temas etme oranını azaltmaktadır.
- Soğutucu içinden maksimum miktarda hava geçiyor olsa bile, eğer havayla klinker bir biriyle yeterli süre temasta kalmıyorsa etkinlik yine düşük olacaktır. Temas

süresini uzatmak için soğutucunun uzunluğu arttırılabilirse de bu kez hem ısı kayıpları hem de maliyet yükselecektir. En pratik çözüm, soğutucu içerisine, kaldırıncılar gibi bir takım düzeneklerin konulmasıdır. Bu şekilde ısı transfer miktarı arttırılmış olacaktır.

Döner soğutucuların çevre hızları 0,2-0,4 m/s kadardır. Soğutma tamburlarında uzunluk/çap oranı yaklaşık olarak 10-12 ve 24 saatte soğutma kapasitesi 2,5-3,5 ton.klinker/ Nm^3 hava veya 0,25 -0,4 Nm^3 hava/ton.klinkerdir (Şekil 2.11.), [43].



Şekil 2.11. Döner soğutucu

2.5.2.3. Planet soğutucular

Planet soğutucular, fırının boşaltma ağzı altında çepe çevre yer alan 9-11 borudan oluşmaktadır ve bunlar giriş boruları vasıtasıyla ayrı ayrı fırınla bağlantılıdır. Bu soğutucuların çalışma prensibi, döner soğutucuyu andırır. Borular metalik ve refrakter kaldırıncılarla donatılmıştır ve uzunluklarının yarısına kadar refrakter malzeme ile kaplanmıştır. Boruların boyu, çaplarının yaklaşık 8-10 katıdır. Planet soğutucuların mekanik olarak çalışmasındaki enerji tüketimi önemsiz sayılabilir, çünkü sadece havayı boruların içine çekmek için enerjiye ihtiyaç vardır.

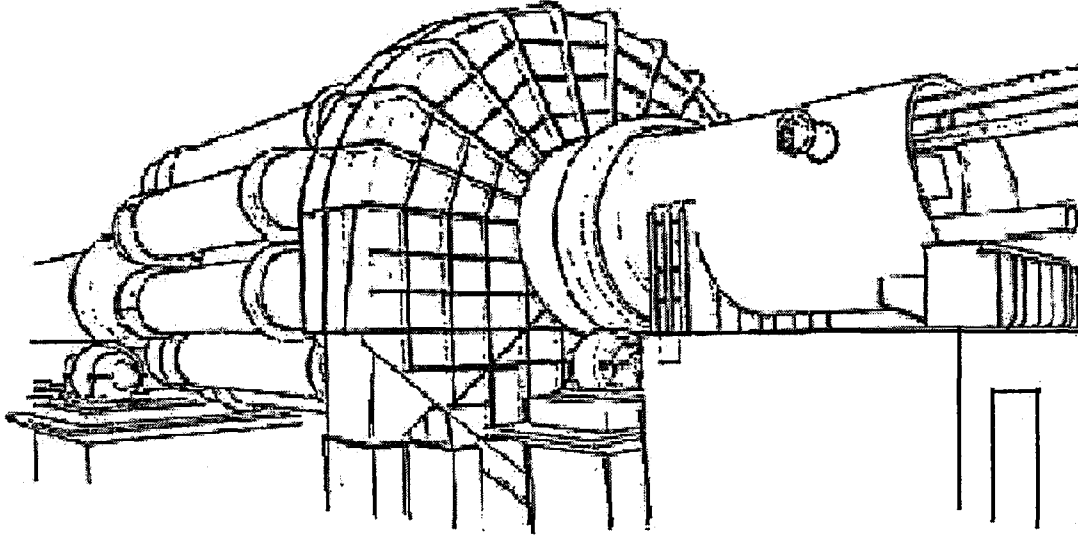
Planet soğutucuların esas fonksiyonu önceleri çevreye radyasyonla ısı yaymak suretiyle klinkerin soğutulması olarak öngörülmüştür. Bu tip soğutucularda döner

fırından çıkan sıcak klinkerin sahip olduğu ısıнын yarısından fazlası radyasyonla kaybolmaktadır. Bu da yüzey sıcaklıklarına yol açtığından, fırın boyutları büyüdükçe problemler ortaya çıkmaktadır. Sıcak bölgeyi izole etmekle, yüzey ısısı önemli ölçüde azaltıldığından çok daha büyük soğutucuların kullanılması mümkün olabilmektedir. Isı transferi sekonder hava ile yapılmaktadır. Kuru sistem fırınlarda yüksek ekonomiyle çalışmak için ısı transferi amacıyla soğutucu içine bir takım donanımlar ilave edilmektedir.

Modern bir planet soğutucuda radyasyonla ısı kayıpları %20 ye kadar inmektedir. Döner soğutucularda olduğu gibi planet soğutucular içindeki tüm soğutma havası, yanma işleminde önısıtmaya tabi tutulmuş sekonder hava olarak kullanılmaktadır. Bu tip soğutucuda iyi bir sızdırmazlık sağlanmışsa, toplam yanma havasının %75' i temin edilmektedir.

Planet soğutucularda, yaş proseste sekonder hava için 600 °C ve kuru proseste de 850 °C' lik bir sıcaklık sağlanabilmektedir. Klinkerde 120-150 °C' lik çıkış sıcaklığı temin edilmekte ve ısı geri kazanım etkinliği kuru proseste %66 yaş proseste %73 dolayında olmaktadır. İzolasyon boyunu arttırmak suretiyle daha iyi bir etkinlik sağlamak mümkün olmakta ise de giriş konstrüksiyonunda kullanılan malzemenin sıcaklığa dayanım derecesi nedeniyle, kısıtlamaya sebep olmakta ve sekonder hava sıcaklığı 850 °C' yi geçememektedir [44].

Planet soğutucularda, soğutucu borular döner fırına tespit edilmiş olduğundan dönüş hızları bağımsız olarak arttırılamamaktadır. Soğutucunun verimini artırmanın tek yolu kaldırıcı sayısını çoğaltmaktır; ama bunu yaparken klinker tozu resirkülasyonunun artmamasına dikkat edilmelidir. Planet soğutucular 4500 ton/gün ve daha büyük kapasite ile üretim yapan tesislerde kullanılabilmektedirler(Şekil 2.12.).

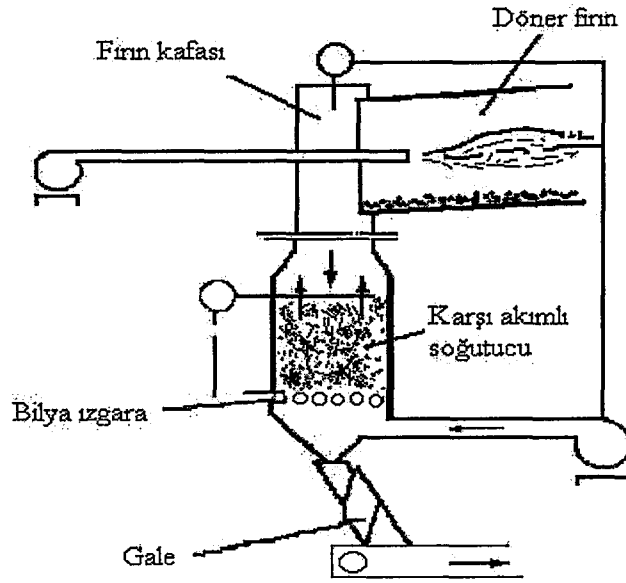


Şekil 2.12. Planet soğutucusu

2.5.2.4. Düşey soğutucular

Düşey soğutucularda, klinkerin soğutulması fikri yeni değildir. Düşey klinker soğutucuları alanında bir çok patent mevcuttur. Düşey soğutucu E. BADE tarafından geliştirilmiş ve Wather Beratherm şirketi tarafından Köln’ de günlük 3000 ton/gün kapasitenin üzerindeki kuru sistem üretim yapan bir çimento fabrikasında kullanılmıştır. Günümüz çimento üretim sistemlerinde düşey soğutucuların kullanımı yok denecek kadar azdır.

Düşey soğutucuya giren soğutma havası şu şekilde dağıtılır; hava hacminin %35’ i ızgaranın altından, %45’ i şaft yüksekliğinin yarısındaki bir noktadan ve %20’ si şaftın daralan kısmından üflenir. Soğutma havasının miktarına bağlı olarak soğutucudan çıkan klinker çevre sıcaklığının 250-280 °C üzerine kadar soğutulabilir. Sekonder hava sıcaklığı 900-1000 °C kadardır. Soğutma havası miktarı 1,1 Nm³/kg.klinker. ve soğutucunun etkinliği %80 civarındadır (Şekil 2.13.).



Şekil 2.13. Düşey soğutucu

2.5.2.5. Soğutucularda değerlendirme kriterleri

Klinker soğutucularının değerlendirilmelerinde şu faktörlere dikkat edilir [9].

- Soğutucunun ısı verimliliğinin yüksekliğine (sıcak klinkerden geriye kazanılan ve yakma işlemi için alınan sekonder ve tersiyer havanın sahip olduğu ısılarının fırını terk eden klinkerin toplam ısı miktarına oranına),
- Soğutucu etki değerinin yüksekliğine (soğutucuya giren sıcak klinker ile soğutucudan çıkan sıcak sekonder ve tersiyer hava arasındaki sıcaklık farkı olarak tanımlanır). Döner fırın ve kalsinatöre mümkün olduğu kadar fazla ısıyı sekonder ve tersiyer hava ile birlikte ileten soğutucu faydalı kabul edilir,
- Klinker soğutma derecesine (soğutucuyu terk eden klinkerin sıcaklığı olarak kabul edilir ve bu sıcaklık çeşitli soğutucu tiplerinde yaklaşık 50-300 °C arasındadır.).

Değişik soğutucu tipleri arasında genel bir karşılaştırma yapıldığı takdirde aşağıdaki noktalar göze çarpmaktadır [9]:

- Döner ve planet soğutucuların spesifik enerji tüketimi diğer klinker soğutuculara oranla daha düşüktür.

- Döner, planet ve düşey soğutuculardaki soğutma havası miktarı döner fırında yakma işlemi için gerekli hava miktarıyla sınırlandırılmaktadır. Dolayısıyla bu soğutucuları terk eden klinkerin sıcaklığı daha yüksektir.
- Izgaralı soğutucudan çıkan klinkerin sıcaklığının düşük olması klinker soğutmada kullanılan hava miktarının yüksek olmasına bağlıdır. Fazla sıcak hava, kısmen kurutma maksatları için kullanılır ve kısmen atmosfere atılır. Bu durumda istenmeyen tozu tutmak için filtre gibi ek masraflara gerek duyulur.



BÖLÜM 3. ÇİMENTO FABRİKALARINDA KÜTLE VE ENERJİ DENKLİKLERİ

3.1. Giriş

Endüstrinin modellenmesi yaygın bir şekilde yapılmaktadır. Çimento klinkeri üretimi sırasında, ham karışımın sisteme siklonlu önısıtıcıdan beslenmesi ile başlayan ve klinkerin soğutucudan çıkması ile tamamlanan işlemler sırasında oluşan ısı ve kütle taşınım olaylarını formülize etmek için çimento fabrikasında matematiksel modelleme yapılması mümkündür [45, 46]. Bunun için enerji ve kütle denklıkları esas alınarak her bir ünite için (önısıtıcı, kalsinatör, döner fırın ve soğutucu gibi) ayrı modeller geliştirilir. Modellerin her biri, farin beslemesi, gaz ve toz akışı şeklinde matematiksel olarak bir birine bağlıdır ve tüm proses ünitesi içinde kararlı hal koşulunu hesaplamak mümkündür [47].

Farklı çimento üretim sistemleri için (yaş, yarıyaş, kuru v.b.) değişik kütle denklik hesaplama metotları vardır. Kütle denkliklerinin kurulması üzerine farklı metotlar içeren bir çok makale yayınlanmıştır [48, 49]. Özellikle bu çalışmada belirtilecek olanlar kuru sistem çimento üretimine ait olanlardır .

Çimento üretim sistemleri bir bütün olarak ele alındığında kütle denklığı klinker üretimi esas alınarak karbon, kükürt, azot, hidrojen ve oksijen dengelerinin yanı sıra kalsiyumoksit, silisyumoksit, alüminyumoksit, demiroksit, magnezyumoksit ve uçucu olmayan oksitler olmak üzere altı adet oksit denklığı ile kurulur [23, 50]. Bu denkliklerde kolaylık olması için 1 kg veya 100 kg klinker üretimi esas alınarak gerekli kuru hammadde, yakıt, yanma havası, kuru baca gazı, yanma ve buharlaşmadan oluşan su buharı ve baca tozu miktarları hesaplanır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için baca gazı, baca tozu, hammadde, klinker ve yakıtın kimyasal kompozisyonlarının bilinmesi gerekir. Yukarıda sayılan altı adet bilinmeyen

çözülebilmesi için ilk dört denkliğe ilave olarak herhangi iki oksit denkleğinin kullanılması hesaplamada kolaylık sağlar [23, 51, 52].

Çimento üretim sistemlerinde kütle denkleğlerinin hesaplanabilmesi için bir başka metot, yukarıda ifade edilen yöntemle enerji denkleğinin de ilave edilmesidir. Böylece prosesin tümü veya herhangi bir ünitesi için kütle ve aynı zamanda enerji denkleğlerinin hesaplanması mümkün olmaktadır. Ayrıca bu yöntemle yanma gazı analizinin önceden bilinmesine gerek yoktur (yanma denkleğleriyle hesaplanabildiğinden).

3.2. Kütle Denkleğlerinin Kurulması

3.2.1. Baca gazı denkleğleri

Baca gazı denkleğleri genellikle aşağıda verilen üç temel denklik üzerine kurulur [53]. Çimento üretiminde hammaddeden klinker elde etmek için gerekli ısı, yakıtın yanmasından elde edilmektedir [23].

Karbon denkleğı

$$\text{Yakıtle giren C} + \text{Hammaddeyle giren C} = \text{Baca gazıyla çıkan C} \quad (3.1)$$

Oksijenle denkleğı

$$\text{Yakıtle giren O}_2 + \text{Yanma havasıyla giren O}_2 + \text{Hammadde ile giren O}_2 = \text{Yakıtın hidrojeni ve kükürt' ü ile birleşen O}_2 + \text{Baca gazı ile çıkan O}_2 \quad (3.2)$$

Azot denkleğı

$$\text{Hava ile giren N}_2 = \text{Baca gazı ile çıkan N}_2 \quad (3.3)$$

3.2.2. Baca gazı bileşenlerinin hesaplanması

Baca gazı bileşenleri, yakıtın yanmasından ve hammaddenin kalsinasyonundan meydana gelir. Baca gazı denklıkları aşağıdaki gibi kurulur [53].

Minimum yakma havası miktarı:

$$A_{\min} = \frac{Y \frac{100}{23} \left[\frac{8}{3} C_y + S_y + (8H_y - O_y) \right]}{28,97} \quad (3.4)$$

Gerekli yakma havası:

$$A = A_{\min} \lambda \quad (3.5)$$

Baca gazı bileşenleri:

$$\begin{aligned} CO_2 &= Y.C_y \frac{YV}{12} + \frac{44}{100} X_o + \frac{44}{84} V_o \\ CO &= Y.C_y \frac{1-YV}{12} \\ O_2 &= 0,21.A.(\lambda - 1) \\ N_2 &= 0,79.A \\ SO_2 &= Y \frac{S_y}{32} \\ H_2O &= Y \left[\frac{H_2O_y}{18} + \frac{H_y}{2} \right] + A.X_s + F_w + KK_w \end{aligned} \quad (3.6)$$

Toplam baca gazı miktarı:

$$BGM = CO_2 + CO + O_2 + N_2 + SO_2 + H_2O \quad (3.7)$$

Baca Gazı Bileşenlerinin % si:

$$\%CO_2 = CO_2/BGM$$

$$\%CO = CO/BGM$$

$$\%O_2 = O_2/BGM$$

$$\%N_2 = N_2/BGM$$

$$\%SO_2 = SO_2/BGM$$

$$\%H_2O = H_2O/BGM$$

} (3.8)

3.2.3. Baca gazı içindeki su buharı miktarının hesaplanması

Çimento fabrikalarında baca gazları ile atılan su buharı beş ayrı şekilde oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla; yakıtın yanmasıyla, yakıt neminin buharlaşmasıyla, yakma havası nemiyle giren, hammaddedeki nemin buharlaşmasıyla ve hammadde kristal suyunun buharlaşmasıyla oluşan su buharı olarak hesaplanır.

Yakıtın yanmasından meydana gelen su buharı:

Yakıtın bünyesinde bulunan hidrojen, yanma esnasında serbest kalarak yakıt içindeki oksijen ve yakma havası oksijeni ile birleşerek su buharını oluşturur .

$$YY_w = Y \frac{Hy}{2} \quad (3.9)$$

Yakıt neminin buharlaşmasıyla meydana gelen su buharı:

Kullanılan yakıt eğer kömür ise kuru kömür zor yandığından yanmanın kolaylaşması için kömürde %1-1,5 civarında nem istenir [9]. Yanma esnasında bu nem buharlaşarak baca gazına karışır.

$$YN_w = Y \frac{H_2O_y}{18} \quad (3.10)$$

Yakma havası nemiyle giren su buharı:

Yakıtın yanması için gerekli yakma havası ve sisteme çeşitli yerlerden giren kaçak havanın içerisinde ilgili coğrafi bölgenin ve iklimin durumuna göre belli oranda nem vardır. Bu nem baca gazı içerisindeki diğer su buharları ile birlikte ele alınır.

$$Y_{AW} = X_s.A \quad (3.11)$$

Hammadde neminin buharlaşmasından oluşan su buharı:

Prosesle işlem görmek üzere verilen hammaddenin içerisinde belli bir oranda nem bulunmaktadır. Bu nem yüksek sıcaklıklarda buharlaşarak baca gazına karışır.

$$F_w = F(1) \frac{H_{2O,F}}{[18.(1 - H_{2O,F})]} \quad (3.12)$$

Hammadde kristal suyunun buharlaşmasıyla oluşan su buharı:

Sisteme verilen hammaddenin kristal suyu yüksek sıcaklıklarda buharlaşarak baca gazına karışmaktadır.

$$KK_w = F(1) \frac{\%KK_{,F} - 0,44 \left[\frac{\%CaO_{,F}}{56} + \frac{\%MgO_{,F}}{40} \right]}{18} \quad (3.13)$$

3.2.4. Hammaddedeki $MgCO_3$, $CaCO_3$ ve toplam CO_2 mol miktarların hesaplanması

Kuru hammadde içinde bulunan MgO ' nun tamamen $MgCO_3$ halinde bulunduğu ve kızdırma kaybının tamamen karbonatların bozunmasıyla kristal suyunun uçmasından meydana geldiği varsayılarak kuru hammadde içindeki $MgCO_3$, $CaCO_3$ ve toplam CO_2 mol miktarları aşağıdaki şekilde hesaplanır.

MgCO₃ mol miktarı:

$$MCM = \%MgO_F \cdot \frac{84}{40} \cdot F \quad (3.14)$$

CaCO₃ mol miktarı:

$$CCM = \frac{\text{Hammaddedeki toplam karbonat} - (84 \cdot MCM)}{100} \quad (3.15)$$

Toplam CO₂ mol miktarı:

$$TCM = MCM + CCM \quad (3.16)$$

3.3. Çimento Fabrikasında Üniteler Bazında Katı ve Gaz Kütle Denklikleri

Bu kısımda çimento fabrikasında katı ve gaz kütle denkleğinde esas alınan üniteler ayrı ayrı ele alınmaktadır.

3.3.1. Soğutucu ünite katı ve gaz kütle dengliği

Önkalsinasyonlu çimento üretim proseslerinde yakma havası olarak kullanılan sekonder ve tersiyer hava, soğutucu ünitelerden temin edilir. Soğutucuya giren sıcak klinkeri soğutmak için kullanılan soğutma havasının yaklaşık %20-40' lık bir kısmı yakma havası olarak değerlendirilmektedir.

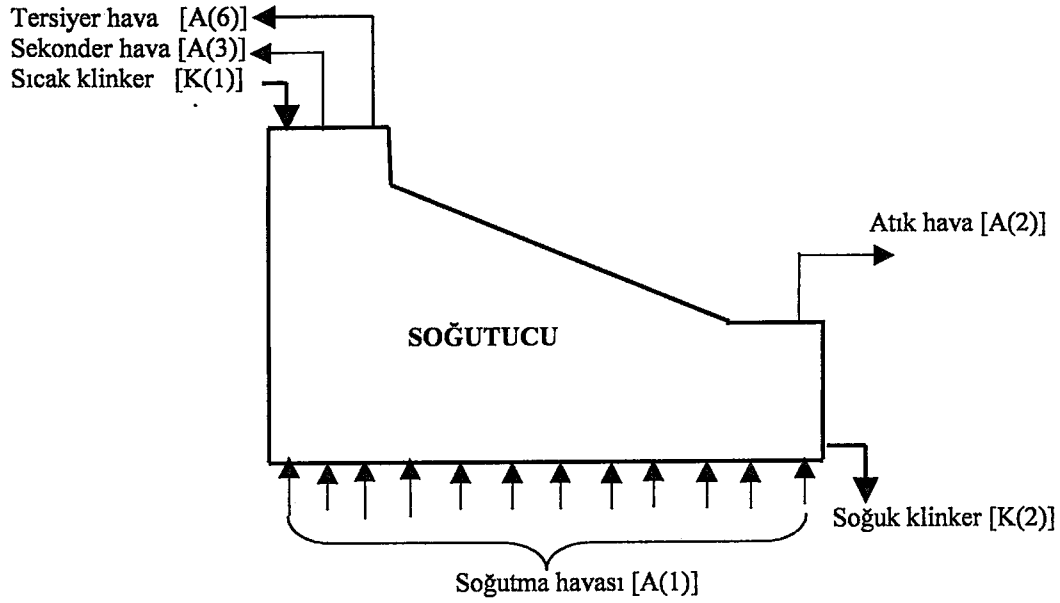
Klinker soğutma ünitesinde hava dengliği yapılırken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir;

- Primer hava sıcaklığı 425 °C'nin üzerine çıkmamalıdır. Bu sıcaklığın üzerinde kömür tozları patlayabilir. Primer hava, kömürü fırına taşıyacak kadar olmalıdır ve tüm yakma havasının %10-30' u arasında olmalıdır. Kömür yakıt için %30' a kadar

olan uçucu maddelerde primer, toplam havanın %20-30' u, %30' dan fazla uçucu maddeli kömürlerde ise toplam havanın %30-45' i arasında olmalıdır [20, 43].

- Primer havanın bir kısmı soğutucudan atılan atık sıcak havadan alındığı veya kompresörler ile şartlandırıldığı için sıcaklığı 90-150 °C arasında olmaktadır.
- Soğutucudan dışarıya atılan atık havanın sıcaklığı genellikle 180-250 °C arasındadır ve miktar olarak soğutucuya giren soğutma havasının %60-80' i kadardır.
- Sekonder havanın sıcaklığı alev uzunluğunu ayarlar ve 650-1100 °C arasındadır. Kömür yakıtlı sistemlerde genellikle 650-900 °C arasında değişmektedir.
- Çimento fabrikalarında en fazla kullanılan soğutucu tipi ızgaralı soğutucudur. Izgaralı soğutucularda soğutucuya giren soğutma havası 2,0-3,5 Nm³/kg.klinker kadardır.

Soğutucu üniteye kütle dengliği soğutucunun tipine göre biraz farklılık göstermektedir. En fazla kullanılan soğutucu tipi olduğu için burada ızgaralı soğutucuyla ilgili kütle dengliği verilmiştir. Yaş, yarıyaş ve önısıtıcı siklonlu kuru sistem çimento üretiminde yakıt sadece döner fırında yakıldığından klinker soğutucularıyla ilgili kütle denglikleri aynı olmaktadır. Önkalsinasyonlu sistemin diğer sistemlerden farkı, döner fırın ve kalsinatörde yakıt yakılıyor olmasıdır. Yanmanın olduğu her iki yerde de sekonder ve tersiyer hava klinker soğutucusundan temin edilmektedir. Soğutucudan döner fırına alınan yakma havasına sekonder hava, kalsinatör ünitesine alınan yakma havasına da tersiyer (üçüncül) hava denilmektedir. Şekil 3.5. ve Tablo 3.1.' de ızgaralı tip klinker soğutucusunda katı ve gaz kütle akımları görülmektedir [37, 54, 55].



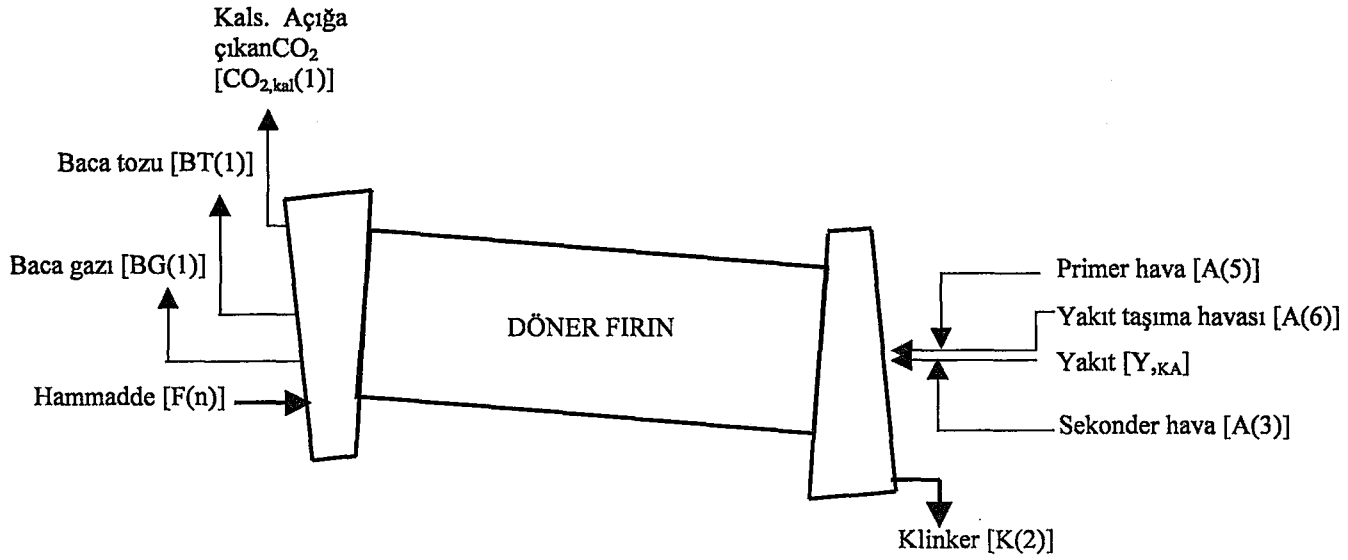
Şekil 3.1. Klinker soğutucusunda giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 3.1. Klinker soğutucusunda giren-çıkan katı ve gaz kütle akımları

GİREN KÜTLELER		ÇIKAN KÜTLELER	
- Sıcak klinker	[K(1)]	- Soğuk klinker	[K(2)]
- Soğutma havası	[A(1)]	- Soğutucudan atılan atık hava	[A(2)]
		- Sekonder hava	[A(3)]
		- Tersiyer hava	[A(6)]

3.3.2. Döner fırın ünitesinde katı ve gaz kütle denkliği

Döner fırın ünitesine giren katı kütle akımı kısmen kalsine olmuş hammaddedir. Çıkan katı kütle akımı döner fırında pişen klinker ve baca gazı içerisinde sürüklenen baca tozudur. Giren gaz kütle ise yakıtın yanması için gerekli olan primer ve sekonder havadır. Çıkan gaz kütle yanma ürünleri ve hammaddenin geri kalan kalsinasyonundan açığa çıkan CO_2 dir (Şekil 3.2. ve Tablo 3.2.).



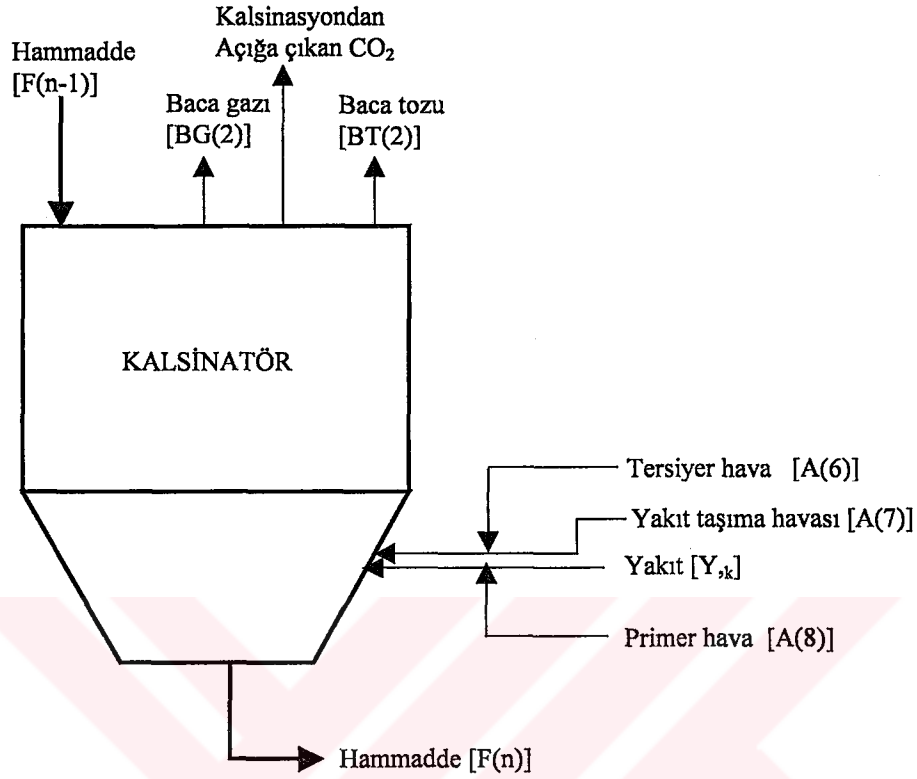
Şekil 3.2. Döner fırın ünitesinde giren–çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 3.2. Döner fırın ünitesinde giren–çıkan katı ve gaz kütle akımları

GİREN KÜTLELER	ÇIKAN KÜTLELER
- Hammadde [F(n)]	- Sıcak klinker [K(1)]
- Sekonder hava [A(3)]	- Baca tozu [BT(1)]
- Yakıt taşıma havası [A(4)]	- Baca gazı [BG(1)]
- Primer hava [A(5)]	- Kalsinasyondan açığa çıkan CO ₂ [CO _{2,kal} (1)]

3.3.3. Kalsinatör ünitesinde katı ve gaz kütle dengliği

Kalsinatör ünitesindeki giren–çıkan katı ve gaz kütle akımları döner fırın ünitesindeki gibidir (Şekil 3.3. ve Tablo 3.3.), [56, 57].



Şekil 3.3. Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 3.3. Kalsinatör ünitesine giren-çıkan katı ve gaz kütle akımları

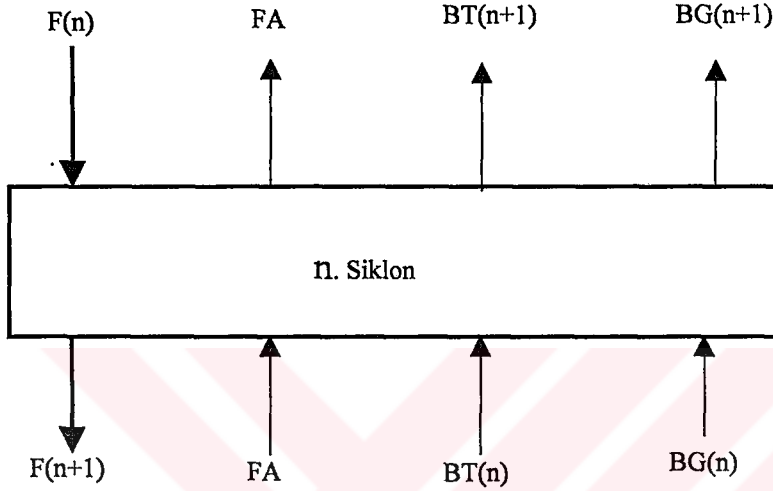
GİREN KÜTLELER	ÇIKAN KÜTLELER
- Hammadde [F(n-1)]	- Hammadde [F(n)]
- Tersiyer hava [A(6)]	- Baca tozu [BT(2)]
- Yakıt taşıma havası [A(7)]	- Baca gazı [BG(2)]
- Primer hava [A(8)]	- Kalsinasyondan açığa çıkan CO ₂ [CO _{2,kal} (2)]

3.3.4. Önısıtıcı siklon ünitesinde kütle denklği

Önısıtıcı siklon ünitesinin en alt kademesinde hammadde döner fırından ve kalsinatörden gelen baca gazı ve baca tozu akımlarının getirmiş olduğu ısı ile kısmen kalsine olmaktadır. Ayrıca önısıtıcı siklon ünitesinin en alt kademesinin bir

üzerindeki kademedede hammadde ve baca tozundaki MgO ' nun bir kısmı yeniden karbonatlaşarak baca gazı içerisindeki CO_2 ' in bir miktarını tutmaktadır. Döner fırın ve kalsinatördeki kalsinasyondan açığa çıkan CO_2 , yanma gazları ve kaçak hava gaz akımları, hammadde ve baca tozu ise katı akımları oluşturmaktadır [49, 58].

Önısıtıcı siklon ünitesinde giren-çıkan kütleler Şekil 3.4. ve Tablo 3.4. de görülmektedir.



Şekil 3.4. Önısıtıcı siklon ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 3.4. Önısıtıcı siklon ünitesinde giren-çıkan katı ve gaz kütle akımları

GİREN KÜTLELER		ÇIKAN KÜTLELER	
-Hammadde	$[F(n)]$	-Hammadde	$[F(n+1)]$
-Baca tozu	$[BT(n)]$	-Baca tozu	$[BT(n+1)]$
-Baca gazı	$[BG(n)]$	-Baca gazı	$[BG(n+1)]$
-Kaçak hava	$[FA]$	-Kaçak hava	$[FA]$

Siklonlardaki hammadde giriş boruları kenarlarından, toz segmanlarının iyi olmaması sebebiyle fırın girişinden, fırın hammadde giriş borusu kenarlarından ve intikal kamarasındaki şişleme kapaklarından sisteme kaçak hava girmektedir. Özellikle fırına hammadde beslemesi basınçlı hava ile yapılıyorsa önısıtıcı üniteye giren kaçak hava miktarı hatırı sayılır orandadır. Hammadde bir Fuller tipi pompa ile taşınıyorsa sisteme giren kaçak hava miktarı yaklaşık olarak 0,065 kg hava/kg.klinker kadardır.

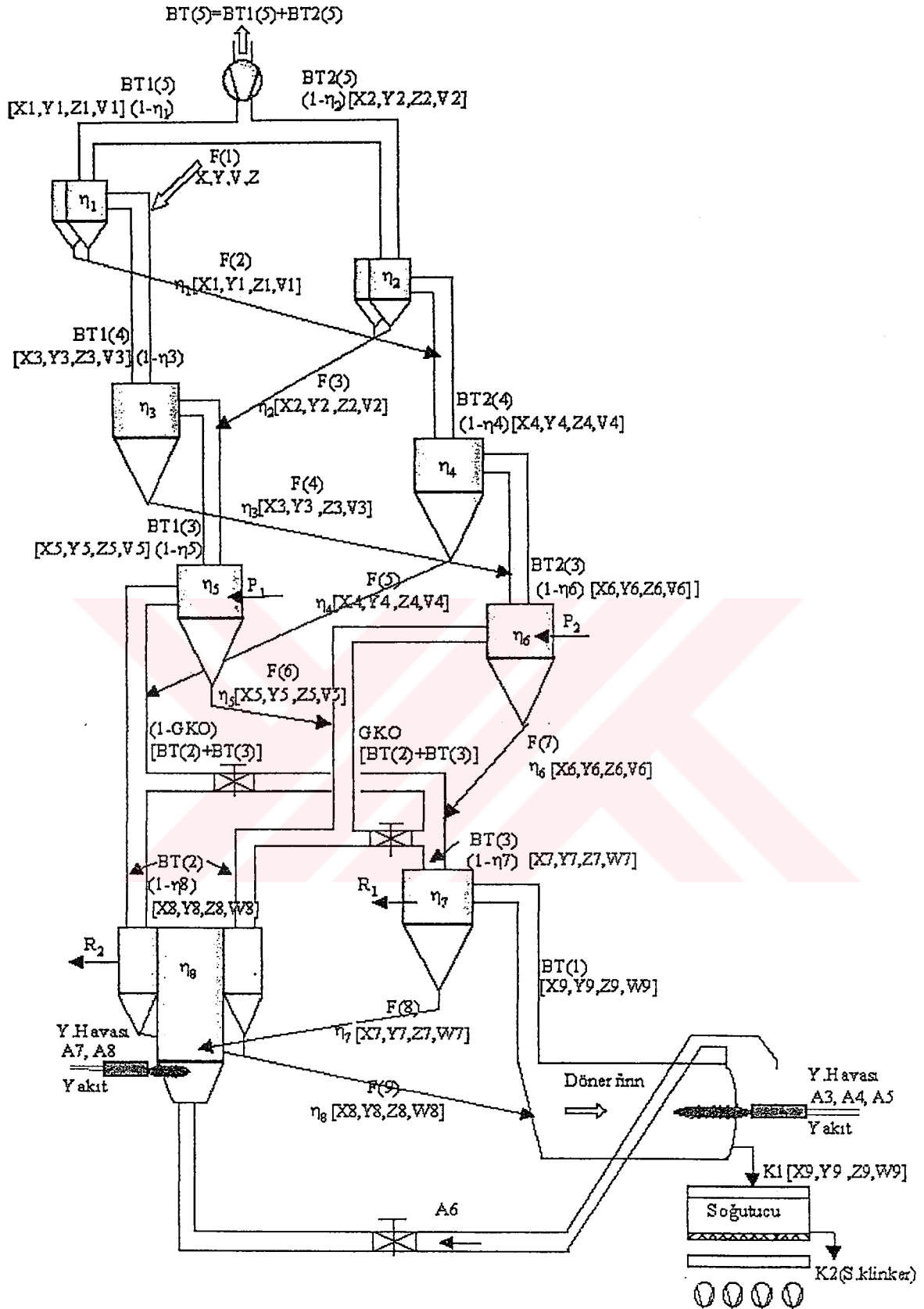
Şayet hammadde air-lift ile taşınıyor ise kaçak hava miktarı 0,12 kg hava/kg.klinker kadar olmaktadır [48].

3.3.5. Girişte ve siklon kademelerinde katı kütle denklği

Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemde girişte ve siklon kademelerinde katı kütle denklikleri kurulurken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [23, 49, 50, 52].

- Klinkerdeki uçucu olmayan oksitlerin toplamı 1,0' dır,
- Döner fırında ve kalsinatörde yakılan yakıt külünün tamamı klinker tarafından absorbe edilir,
- Döner fırından fırın gazlarıyla sürüklenerek çıkan baca tozları tamamen klinkerin kimyasal analiziyle aynıdır,
- Girişte hammaddedeki MgO tamamen $MgCO_3$ halindedir,
- Hammaddedeki $MgCO_3$ kalsinatörün bir üzerindeki siklonda tamamen kalsine olmaktadır,
- R_{KA} kadar $CaCO_3$ kalsinatörde kalsine olmaktadır,
- R_1 kadar $CaCO_3$ kalsinatörün bir üzerindeki siklonda kalsine olmaktadır,
- P_2 kadar CaO kalsinatörün iki üzerindeki siklonda yeniden karbonatlaşmaktadır,
- P_1 kadar CaO kalsinatörün üç üzerindeki siklonda yeniden karbonatlaşmaktadır,
- Sistemdeki bütün katı akımlar $CaCO_3$, CaO , $MgCO_3$ (veya MgO) ve diğer oksitler olmak üzere dört bileşenden oluşmaktadır(Şekil 3.5.).

Paralel akışlı dört önısıtıcı siklon kademeli önkalsinasyonlu çimento üretim sisteminde katı akımlara ait bileşenler Şekil 3.6.' da gösterilmiştir. Girişte ve siklon kademelerinde $CaCO_3(X)$ ve $CaO(Y)$ denklikleri aşağıdaki şekilde kurulmuştur. Ayrıca bu denklikler Tablo 3.5.' de matris formunda gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Girişte ve siklon kademelerindeki katı akımlara ait bileşenler

Bu varsayımlara uygun olarak hammaddenin kimyasal kompozisyonu için aşağıdaki düzenleme yapılmıştır.

$$UF_1 = \frac{CaO_{,F}.100}{56} + \frac{MgO_{,F}.84}{40} + SiO_{2,F} + Al_2O_{3,F} + Fe_2O_{3,F} \quad (3.17)$$

$$UF = \frac{1}{UF_1} \quad (3.18)$$

Toz sirkülasyonu olmaksızın gerekli hammadde miktarı:

$$F = \frac{U_{oo,k} - Y.Ash.U_{oo,Y}}{UF.U_{oo,F}} \quad (3.19)$$

$$X_0 = F.CAO_{,F}.UF/56$$

$$X = X_0 + (1 - \eta_1).X_1$$

$$0,56.\eta_1.X_1 - 0,56.(1 - \eta_2).X_2 - 0,56.(1 - \eta_3).X_3 + \eta_1.Y_1 - (1 - \eta_2).Y_2 - (1 - \eta_3).Y_3 = 0,56.X_0$$

$$0,56.\eta_2.X_2 - 0,56.(1 - \eta_3).X_3 - 0,56.(1 - \eta_4).X_4 + \eta_2.Y_2 - (1 - \eta_3).Y_3 - (1 - \eta_4).Y_4 = 0,56.X_0$$

$$0,56.\eta_3.X_3 - 0,56.(1 - \eta_4).X_4 - 0,56.(1 - \eta_5).X_5 + \eta_3.Y_3 - (1 - \eta_4).Y_4 - (1 - \eta_5).Y_5 = 0,56.X_0$$

$$0,56.\eta_4.X_4 - 0,56.(1 - \eta_5).X_5 - 0,56.(1 - \eta_6).X_6 + \eta_4.Y_4 - (1 - \eta_5).Y_5 - (1 - \eta_6).Y_6 = 0,56.X_0$$

$$0,56.\eta_4.X_4 - 0,56.X_5 + (1 - GKO).0,56.[(1 - \eta_7).X_7 + (1 - \eta_8).X_8] + \eta_4.Y_4 - Y_5 + (1 - GKO).[(1 - \eta_7).Y_7 + (1 - \eta_8).Y_8] = 0$$

$$0,56.\eta_5.X_5 - 0,56.X_6 + GKO.0,56.[(1 - \eta_7).X_7 + (1 - \eta_8).X_8] + \eta_5.Y_5 - Y_6 + GKO.[(1 - \eta_7).Y_7 + (1 - \eta_8).Y_8] = 0$$

$$0,56.\eta_7.X_7 - 0,56.(1 - \eta_8).X_8 + \eta_7.Y_7 - (1 - \eta_8).Y_8 = 0,56.X_0 + Y_9$$

$$0,56.\eta_8.X_8 + \eta_8.Y_8 = 0,56.X_0 + Y_9 + YK.Ash.CAY$$

(3.20a)

$$\begin{aligned}
&\eta_1.Y_1 - (1 - \eta_2).Y_2 - (1 - \eta_3).Y_3 = 0 \\
&\eta_2.Y_2 - (1 - \eta_3).Y_3 - (1 - \eta_4).Y_4 = 0 \\
&\eta_3.Y_3 - (1 - \eta_4).Y_4 - (1 - \eta_5).Y_5 = 0 \\
&\eta_4.Y_4 - (1 - \eta_5).Y_5 - (1 - \eta_6).Y_6 = 0 \\
&(1 - P_1).\eta_4.Y_4 - Y_5 + (1 - GKO).(1 - P_1).[(1 - \eta_7).Y_7 + (1 - \eta_8).Y_8] = 0 \\
&(1 - P_2).\eta_5.Y_5 - Y_6 + GKO.(1 - P_2).[(1 - \eta_7).Y_7 + (1 - \eta_8).Y_8] = 0 \\
&-0,56.R_1.\eta_6.X_6 - \eta_6.Y_6 + Y_7 = Y_9 \\
&-0,56.R_2.\eta_7.X_7 - \eta_7.Y_7 + Y_8 = YK.Ash.CAY
\end{aligned}
\tag{3.20b}$$

Giriş ve siklon kademelerinde $MgCO_3$ (V) ve MgO (W) denklikleri de düzenlenerek aşağıda verilmiştir (paralel akışlı dört siklon kademeli önkalsinasyon örneği için).

$$\begin{aligned}
&WT(1) = BT(1).MgO_{,k} \\
&W_{cy} = Y_k \cdot Ash \cdot MgO_{,y} \\
&V_0 = F \cdot UF.MgO_{,F}. (84/40) \\
&V = V_0 + (1 - \eta_1).V_1 + (1 - \eta_2).V_2 \\
&V_1 = [V_0 + (1 - \eta_2).V_2 + (1 - \eta_3).V_3]/\eta_1 \\
&V_2 = [V_0 + (1 - \eta_3).V_3 + (1 - \eta_4).V_4]/\eta_2 \\
&V_3 = [V_0 + (1 - \eta_4).V_4 + (1 - \eta_5).V_5]/\eta_3 \\
&V_4 = (V_0 + (1 - \eta_5).V_5 + (1 - \eta_6).V_6)/\eta_4 \\
&V_5 = \{V_0 + (1 - \eta_6).V_6 + [(1 - GKO).84/40].[(1 - \eta_7). W_7 + (1 - \eta_8).W_8]\}/\eta_5 \\
&V_6 = \{V_0 + [(1 - \eta_7). W_7 + (1 - \eta_8).W_8]. 84/40\}/\eta_6 \\
&W_7 = [V_0.40/84 + (1 - \eta_8). W_8 + WT(1)]/\eta_7 \\
&W_8 = [V_0.40/84 + WT(1) + W_{cy}]/\eta_8
\end{aligned}
\tag{3.21}$$

Benzer şekilde girişte ve siklon kademelerinde diğer oksitler (Z) ile ilgili denklikler şöyle kurulur (paralel akışlı dört siklon kademeli önkalsinasyon örneği için).

$$ZK = U_{00,k} - [X_k + CaO_{,k} + MgO_{,k}]$$

$$ZT(1) = BT(1).ZK$$

$$Z_{cy} = Y_k.Ash.Z_y$$

$$Z_0 = F - [X_0 + Y_0 + V_0]$$

$$Z = Z_0 + (1 - \eta_1).Z_1 + (1 - \eta_2).Z_2$$

$$Z_1 = [Z_0 + (1 - \eta_2).Z_2 + (1 - \eta_3).Z_3]/\eta_1$$

$$Z_2 = [Z_0 + (1 - \eta_3).Z_3 + (1 - \eta_4).Z_4]/\eta_2$$

$$Z_3 = [Z_0 + (1 - \eta_4).Z_4 + (1 - \eta_5).Z_5]/\eta_3$$

$$Z_4 = [Z_0 + (1 - \eta_5).Z_5 + (1 - \eta_6).Z_6]/\eta_4$$

$$Z_5 = \{Z_0 + (1 - \eta_6).Z_6 + (1 - GKO).[(1 - \eta_7).Z_7 + (1 - \eta_8).Z_8]\}/\eta_5$$

$$Z_6 = [Z_0 + (1 - \eta_7).Z_7 + (1 - \eta_8).Z_8]/\eta_6$$

$$Z_7 = [Z_0 + ZT(1) + (1 - \eta_8).Z_8]/\eta_7$$

$$Z_8 = [Z_0 + ZT(1) + Z_{cy}]/\eta_8$$

(3.22)

Tablo 3.5. Paralel akışlı dört siklon kademeli önkalsinasyonlu çimento fabrikasında $\text{CaCO}_3(\text{X})$ ve $\text{CaO}(\text{Y})$ denkliklerinin matris formunda gösterilişi

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈		
1	0,56*η ₁	-0,56*(1-η ₂)	-0,56*(1-η ₃)	0	0	0	0	0	η ₁	-(1-η ₂)	-(1-η ₃)	0	0	0	0	0	0,56*X ₀	
2	0	0,56*η ₂	-0,56*(1-η ₃)	-0,56*(1-η ₄)	0	0	0	0	0	η ₂	-(1-η ₃)	-(1-η ₄)	0	0	0	0	0,56*X ₀	
3	0	0	0,56*η ₃	-0,56*(1-η ₄)	-0,56*(1-η ₅)	0	0	0	0	0	η ₃	-(1-η ₄)	-(1-η ₅)	0	0	0	0,56*X ₀	
4	0	0	0	0,56*η ₄	-0,56*(1-η ₅)	-0,56*(1-η ₆)	0	0	0	0	0	η ₄	-(1-η ₅)	-(1-η ₆)	0	0	0,56*X ₀	
5	0	0	0	0,56*η ₄	-0,56	0	(1-GKO)*0,56*(1-η ₇)	(1-GKO)*0,56*(1-η ₈)	0	0	0	η ₄	-1	0	(1-GKO)*(1-η ₇)	(1-GKO)*(1-η ₈)	0	
6	0	0	0	0	0,56*η ₅	-0,56	GKO*0,56*(1-η ₇)	GKO*0,56*(1-η ₈)	0	0	0	0	η ₅	-1	GKO*(1-η ₇)	GKO*(1-η ₈)	0	
7	0	0	0	0	0	0	0,56*η ₇	-0,56*(1-η ₈)	0	0	0	0	0	0	η ₇	-(1-η ₈)	0,56*X ₀ +Y ₉	
8	0	0	0	0	0	0	0	0,56*η ₈	0	0	0	0	0	0	0	η ₈	0,56*X ₀ +Y ₉ + (YK*Ash*CAY)	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	η ₁	-(1-η ₂)	-(1-η ₃)	0	0	0	0	0	0	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	η ₂	-(1-η ₃)	-(1-η ₄)	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	η ₃	-(1-η ₄)	-(1-η ₅)	0	0	0	0	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	η ₄	-(1-η ₅)	-(1-η ₆)	0	0	0	
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(1-P ₁)*η ₄	-1	0	(1-GKO)*(1-P ₁)*(1-η ₇)	(1-GKO)*(1-P ₁)*(1-η ₈)	0	
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(1-P ₂)*η ₅	-1	(GKO)*(1-P ₂)*(1-η ₇)	(GKO)*(1-P ₂)*(1-η ₈)	0	
15	0	0	0	0	0	0,56*R1*η ₈	0	0	0	0	0	0	0	0	-η ₈	1	Y ₉	
16	0	0	0	0	0	0	-0,56*R2*η ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	-η ₇	1	YK*Ash*CAY

Giriş ve siklon kademelerinde hammadde ve baca tozu miktarları aşağıdaki şekilde hesaplanır (paralel akışlı dört siklon kademeli önkalsinasyonlu sistem örneği için).

(NI; paralel akışlı dört siklon kademesi için 9, beş siklon kademesi için 11 ve altı siklon kademesi için 13 alınacaktır).

Hammadde miktarları,

$$F(1) = X + Y + V + Z \quad (3.23)$$

n=1'den NI-3'e kadar olmak üzere,

$$\begin{aligned} F(n+1) &= \eta(n) \cdot [X(n) + Y(n) + V(n) + Z(n)] \\ F(NI-1) &= \eta(NI-2) \cdot [X(NI-2) + Y(NI-2) + W(NI-2) + Z(NI-2)] \\ F(NI) &= \eta(NI-1) \cdot [X(NI-1) + Y(NI-1) + W(NI-1) + Z(NI-1)] \end{aligned} \quad (3.24)$$

Baca tozu miktarları,

$$\begin{aligned} BT(2) &= [1 - \eta(NI-1)] \cdot [X(NI-1) + Y(NI-1) + W(NI-1) + Z(NI-1)] \\ BT(3) &= [1 - \eta(NI-2)] \cdot [X(NI-2) + Y(NI-2) + W(NI-2) + Z(NI-2)] \\ BT1(2) &= (1 - GKO) \cdot [BT(2) + BT(3)] \\ BT2(2) &= GKO \cdot [BT(2) + BT(3)] \\ BT1(3) &= [1 - \eta(NI-4)] \cdot [X(NI-4) + Y(NI-4) + V(NI-4) + Z(NI-4)] \\ BT1(4) &= [1 - \eta(NI-6)] \cdot [X(NI-6) + Y(NI-6) + V(NI-6) + Z(NI-6)] \\ BT1(5) &= [1 - \eta(NI-8)] \cdot [X(NI-8) + Y(NI-8) + V(NI-8) + Z(NI-8)] \\ BT2(3) &= [1 - \eta(NI-3)] \cdot [X(NI-3) + Y(NI-3) + V(NI-3) + Z(NI-3)] \\ BT2(4) &= [1 - \eta(NI-5)] \cdot [X(NI-5) + Y(NI-5) + V(NI-5) + Z(NI-5)] \\ BT2(5) &= [1 - \eta(NI-7)] \cdot [X(NI-7) + Y(NI-7) + V(NI-7) + Z(NI-7)] \end{aligned} \quad (3.25)$$

Döner fırında kalsinasyondan açığa çıkan CaO ve CO₂

$$\text{CaO}_{(1)} = 0,56 \cdot \eta(\text{NI} - 1) \cdot X(\text{NI} - 1) \quad (3.26)$$

$$\text{CO}_{2(1)} = \text{CaO}_{(1)} / 56 \quad (3.27)$$

Kalsinatör ünitesinde (4'.Siklon) kalsinasyondan açığa çıkan CaO ve CO₂

$$\text{CaO}_{(2)} = (X(\text{NI} - 2) \cdot \eta(\text{NI} - 2) - X(\text{NI} - 1)) \cdot 0,56 \quad (3.28)$$

$$\text{CO}_{2(2)} = \text{CaO}_{(2)} / 56 \quad (3.29)$$

4. Siklonda açığa çıkan CaO ve CO₂

$$\text{CaO}_{(3)} = (X(\text{NI} - 3) \cdot \eta(\text{NI} - 3) - X(\text{NI} - 2)) \cdot 0,56 \quad (3.30)$$

$$\text{CO}_{2(3)} = \text{CaO}_{(3)} / 56 \quad (3.31)$$

3'. Siklonda yeniden karbonatlaşan CaO ve tutulan CO₂

$$\begin{aligned} \text{CaO}_{\text{ykar}(1)} = & P2 \cdot \{ \eta(\text{NI} - 4) \cdot Y(\text{NI} - 4) + [\text{GKO} \cdot (1 - \eta(\text{NI} - 2))] \cdot [Y(\text{NI} - 2) \\ & + (1 - \eta(\text{NI} - 1) \cdot Y(\text{NI} - 1))] \} \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\text{CaO}_{2,\text{tut}(1)} = \text{CaO}_{\text{ykar}(1)} / 56 \quad (3.33)$$

3. Siklonda yeniden karbonatlaşan CaO ve tutulan CO₂

$$\begin{aligned} \text{CaO}_{\text{ykar}(2)} = & P1 \cdot \{ \eta(\text{NI} - 5) \cdot Y(\text{NI} - 5) + [(1 - \text{GKO}) \cdot (1 - \eta(\text{NI} - 2))] \cdot [Y(\text{NI} - 2) \\ & + (1 - \eta(\text{NI} - 1) \cdot Y(\text{NI} - 1))] \} \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\text{CaO}_{2,\text{tut}(2)} = \text{CaO}_{\text{ykar}(2)} / 56 \quad (3.35)$$

Kalsinatör yada siklona giren hammaddenin tamamındaki CaCO₃ miktarındaki kalsinasyon oranına gerçek kalsinasyon oranı, kalsinatör yada siklona giren hammaddedeki CaCO₃' ın siklon veya kalsinatörü terk eden baca tozu hariç tutularak çıkan hammaddedeki CaCO₃ miktarına oranına görünür kalsinasyon oranı denir (kalsinatör veya dip siklon girişinde) .

Görünür kalsinasyon oranı,

$$Rg(1) = \frac{\frac{100}{56} Y(NI-2)}{X(NI-2) + \frac{100}{56} Y(NI-2)} \quad (3.36)$$

Döner fırın girişinde görünür kalsinasyon oranı,

$$Rg(2) = \frac{\frac{100}{56} Y(NI-1)}{X(NI-1) + \frac{100}{56} Y(NI-1)} \quad (3.37)$$

3.3.6. Kimyasal ve mineralojik analizlerin hesaplanması

3.3.6.1. Hammaddenin giriş ve siklon kademelerinde kimyasal analizinin hesaplanması

Bu analizin yapılabilmesi için ya giriş hammaddesinin kimyasal analizini esas alıp ileriye doğru gidilerek siklon kademelerindeki hammadde ve klinkerin kimyasal analizlerinin hesaplanması ya da klinkerin kimyasal analizini esas alıp geriye doğru gidilerek siklon kademeleri ve girişteki hammaddenin kimyasal analizinin hesaplanması şeklinden birisi tercih edilmelidir. Burada ilk ifade edilen yol hesaplama esas alınacaktır.

Klinkerin kimyasal analizi:

$$\left. \begin{aligned} CaO_{,k} &= F.CaO_{,F}(1) + Y_k.Ash.CaO_{,Yk} + Y_{DF}.Ash.CaO_{,YDF} \\ SiO_{2,k} &= F.SiO_{2,F}(1) + Y_k.Ash.SiO_{2,Yk} + Y_{DF}.Ash.SiO_{2,YDF} \\ Al_2O_{3,k} &= F.Al_2O_{3,F}(1) + Y_k.Ash.Al_2O_{3,Yk} + Y_{DF}.Ash.Al_2O_{3,YDF} \\ Fe_2O_{3,k} &= F.Fe_2O_{3,F}(1) + Y_k.Ash.Fe_2O_{3,Yk} + Y_{DF}.Ash.Fe_2O_{3,YDF} \\ MgO_{,k} &= F.MgO_{,F}(1) + Y_k.Ash.MgO_{,Yk} + Y_{DF}.Ash.MgO_{,YDF} \\ SO_{3,k} &= F.SO_{3,F}(1) + Y_k.Ash.SO_{3,Yk} + Y_{DF}.Ash.SO_{3,YDF} \end{aligned} \right\} \quad (3.38a)$$

$$U_{oo,k} = CaO_{,k} + SiO_{2,k} + Al_2O_{3,k} + MgO_{,k} \quad (3,38b)$$

Dört siklon kademeli paralel akışlı önkalsinasyonlu sistem örneği için CaO, CaCO₃, MgO ve MgCO₃ denklikleri bölüm (3.3.5.)’ de verilmişti. Diğer bileşenlere ait denklikler ise burada verilecektir. İlgili denklikler kurulurken herhangi bir siklon için giren hammadde ve çıkan baca tozu akımlarının aynı kimyasal özellikleri taşıdığı göz önüne alınmıştır. Dip siklondan yukarıya doğru birinci siklona kadar gidilmek suretiyle denklikler kurularak her defasında siklona giren hammadde akımının kimyasal analizi hesaplanır [48, 50, 57].

Aşağıya örnek olması için yalnız Al₂O₃ eşitlikleri çıkarılmıştır (Paralel akışlı dört siklon kademeli önkalsinasyonlu sistem örneği için).

Önkalsinasyonlu sistemde döner fırına geçen hammaddenin kimyasal analizi:

$$Al_2O_3, F(9) = \frac{Al_2O_3, k + BT(1) \cdot Al_2O_3, k - YDF \cdot Ash \cdot Al_2O_3, YDF}{F(9)} \quad (3.39)$$

Önkalsinasyonlu sistemde (dip siklon+kalsinatöre) giren hammaddenin kimyasal analizi:

$$Al_2O_3, F(8) = \frac{F(9) + BT(2) \cdot Al_2O_3, F(9) - Yk \cdot Ash \cdot Al_2O_3, k}{F(8)} \quad (3.40)$$

$$Al_2O_3, F(7) = \frac{F(8) + BT(3) \cdot Al_2O_3, F(8) - BT(1) \cdot Al_2O_3, k}{F(7)} \quad (3.41)$$

$$Al_2O_3, F(6) = \frac{F(7) + BT(2) \cdot Al_2O_3, F(7) - GKO \cdot [BT(2) \cdot Al_2O_3, F(9) + BT(3) \cdot Al_2O_3, F(8)]}{F(6)} \quad (3.42)$$

$$Al_2O_3, F(5) = \frac{F(6) + BT(1) \cdot Al_2O_3, F(6) - (1 - GKO) \cdot [BT(2) \cdot Al_2O_3, F(9) + BT(3) \cdot Al_2O_3, F(8)]}{F(5)} \quad (3.43)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(4) = \frac{\text{F}(5) + \text{BT2}(4) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(5) - \text{BT2}(3) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(7)}{\text{F}(4)} \quad (3.44)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(3) = \frac{\text{F}(4) + \text{BT1}(4) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(4) - \text{BT1}(3) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(6)}{\text{F}(3)} \quad (3.45)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(2) = \frac{\text{F}(3) + \text{BT2}(5) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(3) - \text{BT2}(4) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(5)}{\text{F}(2)} \quad (3.46)$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(1) = \frac{\text{F}(2) + \text{BT1}(5) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(2) - \text{BT1}(4) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3, \text{F}(4)}{\text{F}(1)} \quad (3.47)$$

3.3.6.2. Klinker ile hammaddenin giriş ve siklon kademelerinde mineralojik analizinin hesaplanması

Hammaddenin giriş ve siklon kademeleri ile döner fırın çıkışında klinkerin rasyonel analizinin hesaplanmasında aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [51].

- Girişte ve siklon kademelerindeki hammadde akımları için;
- MgO tamamen MgCO_3 halindedir,
 - Karbonatın geri kalan kısmı CaCO_3 halindedir,
 - CaO' in geri kalan kısmı $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (CS) halindedir,
 - Fe_2O_3 ve Al_2O_3 tamamen $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ halinde olup SiO_2 ' nin geri kalan kısmı serbest oksit halindedir,
 - İlave olarak kalsinatör ünitesinde CaCO_3 ' in kalsinasyonundan açığa çıkan CaO ve MgO' in tamamı serbest oksit halindedir,

Döner fırın çıkışı ve siklon kademelerindeki baca tozu akımı için;

- Döner fırından baca gazları içinde sürüklenerek kalsinatörün hemen üzerindeki siklona giren ve bu siklon ile kalsinatörden çıkan baca tozu akımlarında MgO tamamen serbest oksit halindedir. $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ' nin toplam U_{00} ' lere olan oranı kalsinatörden fırına giren hammaddedeki oranına eşittir. Bu durumda CaO' in geri kalan kısmı serbest oksit halindedir,

- Diğer bileşenler ve diğer kademelerdeki baca tozu akımlarının analizinde hammadde için yapılan varsayımlar geçerlidir.

Klinker için,

- MgO tamamen serbest oksit halindedir,
- SO₃ tamamen CaSO₄ halindedir,
- Fe₂O₃ tamamen 4CaO·Al₂O₃ (C₄AF) halindedir,
- Al₂O₃'ün geri kalan kısmı tamamen 3CaO·Al₂O₃ (C₃A) halindedir,
- CaO'ın geri kalan kısmı ile SO₂'in tamamı 2CaO·SiO₂ (C₂S) ve 3CaO·SiO₂ (C₃S) halindedir,

Bu varsayımlara göre hammaddenin giriş ve siklon kademelerindeki mineralojik analizi kmol olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 \text{MgCO}_3(n) &= \frac{\% \text{MgO}(n)}{40} F(n) \\
 \text{CaCO}_3(n) &= \frac{(F(n) \cdot \text{TKMF}(n) - \text{MgCO}_3(n) \cdot 84)}{100} \\
 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2(n) &= \frac{\% \text{CaO}(n) \cdot F(n)}{56} - \text{CaCO}_3(n) \\
 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2(n) &= \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3(n)}{102} F(n) \\
 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2(n) &= \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3(n)}{160} F(n) \\
 \text{SiO}_2(n) &= \frac{\% \text{SiO}_2}{60} F(n) - [\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2(n) + \text{Al}_2\text{O}_3(n) \cdot \text{SiO}_2(n) + \text{Fe}_2\text{O}_3(n) \cdot \text{SiO}_2(n)]
 \end{aligned}
 \tag{3.48}$$

Baca tozunun döner fırın çıkışı ve siklon kademelerindeki mineralojik analizi de benzer şekilde hesaplanır (Klinker birim alınmıştır.).

$$\begin{aligned}
\text{MgO} &= \frac{\% \text{MgO}, k}{40} \\
\text{CaSO}_4 &= \frac{\% \text{SO}_3, k}{80} \\
\text{C}_4\text{AF} &= \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3, k}{160} \\
\text{C}_3\text{A} &= \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3, k}{102} - \text{C}_4\text{AF} \\
\text{C}_2\text{S} &= \frac{3 \cdot (\% \text{SiO}_2, k)}{60} + \frac{4 \cdot (\% \text{Fe}_2\text{O}_3, k)}{160} + \frac{\% \text{SO}_3, k}{80} + 3 \cdot \text{C}_3\text{A} - \frac{\% \text{CaO}, k}{56} \\
\text{C}_3\text{S} &= \frac{\% \text{Si}_2, k}{60} - \text{C}_2\text{S}
\end{aligned} \tag{3.49}$$

3.4. Çimento Fabrikalarında Enerji Denkliklerinin Kurulması

Isının büyük oranda önemli olduğu çimento üretim proseslerinde kütle ve enerji denkliklerinin çıkarılması üzerine bir çok çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan en önemlileri [45, 54, 59, 60, 61, 62, 63] dir. Yaş sistem çimento üretiminde birim klinker başına enerji tüketimi 4500 kJ/kg.klinker iken bu değer klasik önısıtıcı siklonlu sistem çimento üretiminde 3300 kJ/kg.klinker, geliştirilmiş önkalsinasyonlu sistemlerde ise 3070 kJ/kg.klinker değerine kadar düşürülebilmektedir. Özgül ısı tüketimi, çimento üretiminde maliyeti doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Özgül ısı tüketimi; kullanılan yakıt kalitesinden, hammaddenin pişebilirlik kabiliyetinden ve fabrikanın sahip olduğu teknoloji imkanlarından etkilenmektedir. Minimum çimento maliyeti için kütle ve enerji denkliklerinin iyi yapılması ve takip edilmesi gerekir [64, 65].

3.4.1. Katı ve gaz maddelerin entalpileri

Çimento üretim proseslerinde hammadde, baca tozu ve klinker katı akımları; kaçak hava, soğutma havası, kalsinasyondan açığa çıkan CO₂ ve yakıtın yanmasından oluşan yanma gazları da gaz akımlarını meydana getirirler.

Katı ve gaz madde akımlarının entalpileri, özgül ısı kapasite (c_p) ifadesinden faydalanılarak hesaplanır. Bu özgül ısı kapasite ifadeleri katı ve gaz madde akımları için Tablo 3.6. ve Tablo 3.7.' te verilmektedir.

Tablo 3.6. Katı akımların özgül ısı fonksiyonları [51, 65, 66]

Madde	C_p (kJ/kg.K) $T(K)$
Hammadde ve baca tozu	$0,8 + 2,93 \cdot 10^{-4} \cdot T$
Sıcak klinker	$0,7934 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot T$
Soğuk klinker	$0,6783 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot T$

Özgül ısı kapasite c_p ifadesinden faydalanılarak entalpi ifadesi,

$$dh = c_p \cdot dt \quad (3.50)$$

dır. Sıvı suyun ısınma, buharlaşma ve gaz fazları süreçleri bir arada olduğu zaman su buharının entalpisi,

$$H_{Sbuh} = M_{su} \cdot \left[c_{p_{sv}}(373 - T_0) + \Delta H_{buh}(373) + \int_{373}^T c_{p_{buh}} \cdot dT \right] \quad (3.51)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlikler geniş bir sıcaklık aralığında güvenli şekilde kullanılmaktadır.

Tablo 3.7. Gaz akımların özgül ısı fonksiyonları [67, 68].

Madde	$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad [(kJ/kmol.K), \quad T (K), \quad T_c = 298,15 K]$
CO ₂	$22,26 * (T - T_c) + \frac{5,981 * 10^2}{2} * (T^2 - T_c^2) - \frac{3,501 * 10^{-5}}{3} * (T^3 - T_c^3) + \frac{7,469 * 10^{-9}}{4} * (T^4 - T_c^4)$
CO	$28,16 * (T - T_c) + \frac{0,1675 * 10^2}{2} * (T^2 - T_c^2) + \frac{0,5372 * 10^{-5}}{3} * (T^3 - T_c^3) - \frac{2,222 * 10^{-9}}{4} * (T^4 - T_c^4)$
HO ₂	$32,24 * (T - T_c) + \frac{0,1923 * 10^2}{2} * (T^2 - T_c^2) + \frac{1,055 * 10^{-5}}{3} * (T^3 - T_c^3) - \frac{3,595 * 10^{-9}}{4} * (T^4 - T_c^4)$
N ₂	$28,90 * (T - T_c) - \frac{0,1571 * 10^2}{2} * (T^2 - T_c^2) + \frac{0,8081 * 10^{-5}}{3} * (T^3 - T_c^3) - \frac{2,873 * 10^{-9}}{4} * (T^4 - T_c^4)$
O ₂	$25,48 * (T - T_c) + \frac{1,520 * 10^2}{2} * (T^2 - T_c^2) - \frac{0,7155 * 10^{-5}}{3} * (T^3 - T_c^3) + \frac{1,312 * 10^{-9}}{4} * (T^4 - T_c^4)$
SO ₂	$16,40 * (T - T_c) + \frac{14,58 * 10^2}{2} * (T^2 - T_c^2) - \frac{11,20 * 10^{-5}}{3} * (T^3 - T_c^3) + \frac{32,42 * 10^{-9}}{4} * (T^4 - T_c^4)$

3.4.2. Kalsinatör ve kalsinatör üstü siklonlardaki reaksiyon enerjileri

Hammadde fırına girmeden önce kalsinatörde miktar kalsine olmaktadır. Bu oran, paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerde döner fırına beslenen hammadde de %90-95' e ulaşmaktadır [69].

Kalsinatördeki kalsinasyon reaksiyonu endotermik (ısı alan) olup reaksiyon enerjisi aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$Q_{Rk} = 3200. [CaO_{KA} + Y_k.Ash.CaO_y] + 2175. [Y_k.Ash.MgO_y] \quad (3.52)$$

Kalsinatörün hemen üzerindeki siklonda da hammadde bir miktar kalsine olmaktadır.

Bu reaksiyon enerjisi kalsinatördeki benzer olup aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$Q_R = 3200.CaO_{(NI-2)} + 2175.MgO_{(NI-2)} \quad (3.53)$$

Hammadde ve baca tozundaki CaO ve MgO' in P2 kadarlık kısmı kalsinatörün hemen üzerindeki ikinci (NI-3) ve P1 kadarlık kısmı üçüncü (NI-4) siklonda yeniden karbonatlaşmaktadır [22].

Yeniden karbonatlaşma reaksiyonları ekzotermik (ısı veren) olup reaksiyon enerjileri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$YKE,(1) = 3200.CaO_{,ykar} \quad (3.54)$$

$$YKE,(2) = 3200.CaO_{,ykar} + 2175.MgO_{ykar} \quad (3.55)$$

ifadeleri ile hesaplanır.

3.4.3. Döner fırında klinker oluşum entalpisi

Çimento klinkeri döner fırınlarda pişirilmektedir. Klinker oluşum entalpisi çeşitli yollarla hesaplanabilmektedir. Burada kullanılan oluşum entalpisinin hesaplanması, H. Zur Strassen' in vermiş olduğu faktörlerle klinkerin kimyasal analizlerinin çarpılıp toplanmasıyla yapılmaktadır [70].

$$HK = \%CaO_{,k} .3200 + \%MgO_{,k} .2715 + \%Al_2O_{3,k} .1721 - [\%Fe_2O_{3,k} .247 + \%SiO_{2,k} .2142] \quad (3.56)$$

3.4.5. Klinker soğutucu ünitesinde enerji denkliği

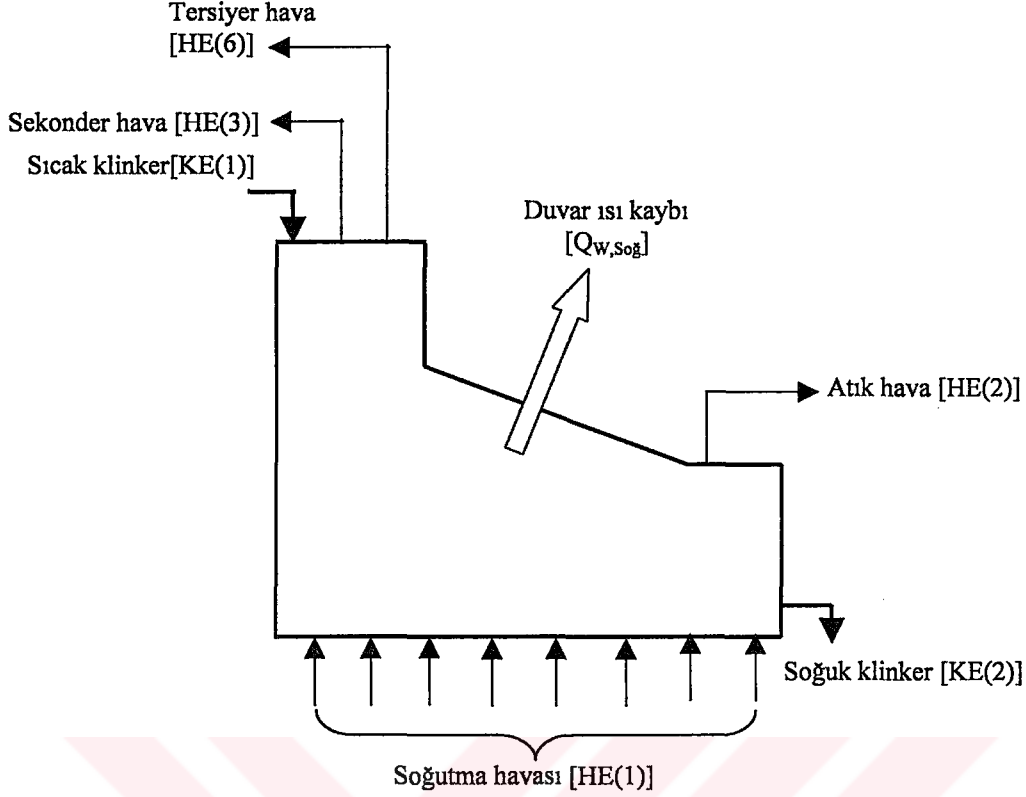
Farklı tiplerdeki klinker soğutucularını termal verimliliklerine göre proses mühendisliği sınırları içinde karşılaştırmak önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bunlar yakıt enerjisi tüketimi, hava fazlası, döner fırında önsoğutma bölgesi uzunluğu ve klinker granülometrisi gibi hammadde ve yakıtın özelliklerinden etkilenen unsurlardır [37].

Klinker soğutucularının termal etkinliğini değerlendirmek için deneyler yapılarak soğutucu etrafındaki kütle ve enerji denklilikleri kurulmuştur. Bu denkliliklerden her hangi birini temel alarak elde edilebilen karakteristik kriterler ile hem soğutucunun tüm prosese etkisini belirlemek, hem de soğutucuyu optimize etmek için gerekli yöntemleri tahmin etmek mümkündür. Klinker soğutucularında kütle ve enerji denkliğinin kurulmasına yönelik çalışmaların en önemlileri [37, 54, 43, 71] dir.

Klinker soğutucuları, basit olarak, entalpi akışı halindeki enerji akışının pişme prosesi için geri kazanılamayan kısmından ileri gelen enerji kayıplarını göz önüne alarak değerlendirebilir. Bunlarla birlikte, soğutucunun işletmesini optimize etmek veya enerji geri kazanımını maksimum hale getirmek için spesifik belirlemeler sağlayamaması yüzünden enerji kaybı, yalnız başına, zayıf bir termal etkinliğin sebebini açıklamak için yeterli değildir. Bu nedenle soğutucunun tipine, proses içinde yerleştirilmesine, soğutucu etrafındaki kütle ve enerji denklilikleri kurulabilmesine uygun olarak verimlilik terimi tanımlanır.

Klinkerin ortam sıcaklığına kadar soğutulamamasından dolayı soğutma havasıyla beraber ayrılan ısı, su ısıtma sistemleri gibi ısı değiştirici elemanlardan sızan ısı, sistemin cidarından uzaklaşan ısı ve giriş boruları soğutucudan enerji kaybına neden olmaktadır. Önısıtıcı siklonlu, yaş ve yarıyaş sistemlerde önısıtılmış yakma havası soğutucudan sekonder hava olarak; önkalsinasyonlu sistemlerde ön ısıtılmış yakma havası farklı sıcaklıklarda sekonder ve tersiyer hava şeklinde ikiye ayrılarak alınmaktadır. Yakma havasının kütle ve enerji akışı sekonder ve tersiyer hava akışının toplamından oluşmaktadır.

Soğutucu etrafında genel bir enerji denkliği kurulurken sistem önkalsinasyonlu değilse tersiyer hava ile ilgili denklik olmayacaktır. Bu özellik göz önünde bulundurularak enerji denkliği Şekil 3.10. ve Tablo 3.10.' da verilmiştir.



Şekil 3.6. Soğutucu üniteye giren-çıkan enerji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 3.8. Soğutucu üniteye giren-çıkan enerjiler

GİREN ENERJİLER	ÇIKAN ENERJİLER
- Sıcak klinker ile [KE(1)]	- Soğuk klinker ile [KE(2)]
- Soğutma havası ile [HE(1)]	- Soğutucudan atılan atık hava ile [HE(2)]
	- Tersiyer hava ile [HE(6)]
	- Sekonder hava ile [HE(3)]
	- Duvar ısı kaybı ile [Qw, soğ]

3.4.5.1. Klinker soğutucularında duvar ısı kaybının hesaplanması

Klinker soğutucularında duvar ısı kaybı, döner fırınlarda olduğu gibi hesaplanmaktadır. Klinker soğutucularında bu hesaplama, fırın önsoğutma bölgesi ve soğutucunun kendisi olmak üzere genelde iki kademede gerçekleştirilir. Önsoğutma bölgesinden olan ısı kayıpları için bu bölgenin uzunluğu (L_{sb}) bilinmelidir. Bu nokta fırından ayrılan klinker sıcaklığı [T_k] için referans alınır. Her ne kadar hammadde karakteri ve klinker kalitesine büyük ölçüde bağlı olmasına rağmen fırının pişme bölgesinde minimum yakıt enerjisi tüketimi için klinker oluşumu 1450°C ' de

olmalıdır. Klinker, önsoğutma bölgesinde daha fırından çıkmadan bir miktar soğutulmaktadır [37, 20]. Önsoğutma bölgesi uzunluğu kesin bir biçimde ölçülemez ve hesaplama için belli bir formül yoktur.

Tersiyer hava kanalsız fırınlar için yaklaşık önsoğutma bölgesi uzunluğu;

$$L_{sb} = \frac{D \cdot (1450^0 C - T_k)}{250 \cdot K} \quad (3.57)$$

ile belirlenebilir. Tersiyer hava kanallı fırınlarda önsoğutma bölgesi uzunluğunun daha fazla olduğu düşünülmektedir [37].

Fırın ön soğutma bölgesi duvarında olan ısı kaybı;

$$Q_{sb} = \alpha_{top} \cdot \pi \cdot D \cdot L_{sb} \cdot (T_w - T_0) \quad (3.58)$$

eşitliği ile hesaplanır.

Soğutucu duvarından kaybolan ısı; ızgaralı soğutucu, planet soğutucu ve döner soğutucular için ayrı ayrı eşitlikler halinde verilecektir.

A-) Izgaralı soğutucu duvarından kaybolan ısı:

Izgaralı soğutucunun duvarından çevreye kaybolan ısı konveksiyon ve radyasyon yoluyla olmaktadır [37].

$$\left. \begin{aligned} Q_{kon} &= \alpha_{kon} \cdot A_w \cdot (T_w - T_0) \\ Q_{rad} &= \varepsilon_w \cdot \sigma_B \cdot A_w \cdot (T_w^4 - T_0^4) \end{aligned} \right\} (3.59)$$

Burada; A_w soğutucunun duvar yüzey alanını, ε_w duvar yüzeyinden yayılma katsayısını ($\varepsilon_w = 0,9$), σ_B Stefan-Boltzman sabitini ($\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ ve α_{kon} konvektif ısı iletim katsayısını ($\alpha_{kon} = 7 W/m^2 \cdot K$) göstermektedir.

B-) Döner soğutucuların duvarından kaybolan ısı;

$$\alpha_{top} = 0,3 \cdot D + 9,25 + 4,9 \left(\frac{tw}{100} \right) + 0,14 \left(\frac{tw}{100} \right)^2 + 0,076 \left(\frac{tw}{100} \right)^3 \quad \left. \vphantom{\alpha_{top}} \right\} (3.60)$$

$$Q_{w,soğ} = \alpha_{top} \cdot \pi \cdot D \cdot L_{sb} \cdot (T_w - T_0)$$

ile ifade edilmektedir [71]. Burada L_{sb} soğutucu uzunluğudur.

C-) Planet soğutucuların duvarından kaybolan ısı;

Planet soğutucular için ise radyasyon, doğal ve zorlanmış konveksiyonla olan ısı transferi birleştirilerek döner fırınlarda olduğu gibi hesaplanabilir. Böylece,

$$Q_{w,soğ} = \alpha_{top} \cdot A_w \cdot (T_w - T_0) \quad (3.61)$$

eşitliği ile veya 1.6 amprik faktör ve planet soğutucunun manto yüzey alanı (A_w) kullanılarak şu şekilde hesaplanır [37].

$$Q_{w,soğ} = 1,6 \cdot \alpha_{top} \cdot A_w \cdot (T_w - T_0) \quad (3.62)$$

Federal Almanya' da çimento araştırma enstitüsünde klinker soğutucuları üzerinde çalışan bir gurup tarafından klinkeri temel olarak enerji kaybı ile ilgili yapılan çalışma sonuçları Tablo 3.9.' da verilmektedir [37].

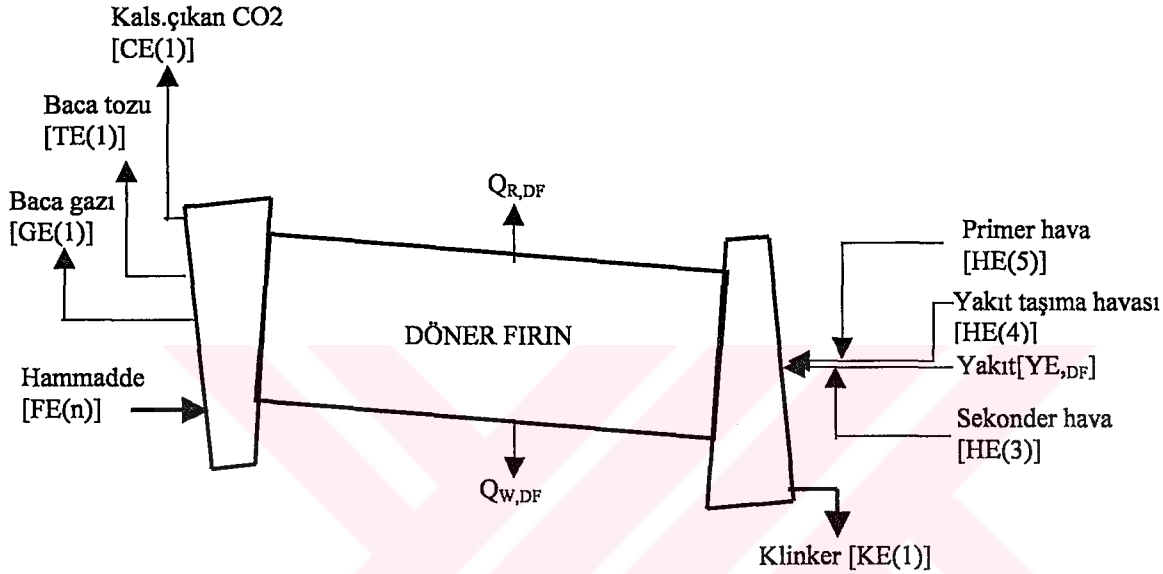
Tablo 3.9. Klinker temel alınarak soğutucuların enerji kayıpları

Soğutucu tipi	Kayıp enerji (kJ/kg.klin.)	Ölçüm sayısı
Döner soğutucu	440	2
Planet soğutucu	555	2
Izgaralı soğutucu	480-570	7

3.4.6. Döner fırın ünitesinde enerji denkliği

Çimento fabrikalarında döner fırın ünitesinde enerji denkliğinin kurulması yanmanın yanında diğer faktörlerin de bilinmesini gerektirmektedir [34, 72]. Çimento üretim sistemlerinin tümünde hammaddenin pişirilerek klinker haline getirilmesi döner fırın ünitesinde gerçekleşmektedir. Döner fırın ünitesi, bütün üretim metotlarında aynıdır

ve ters akım prensibine göre çalışan bir ısı değıştircisi (ısı eşanjörü) gibidir. Yaş, yarı yaş ve kuru önısıtıcılı siklonlu sistemlerde yakıtın tamamı döner fırında yakılır. Önkalsinasyonlu sistemlerde ise yakıtın bir kısmı kalsinatör ünitesinde yakılmaktadır. Döner fırında enerji akışı, yakıtın her iki ünite de yakılabilme hali göz önünde bulundurularak bütün sistemler için geçerli olan durum Şekil 3.7.' de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Döner fırın ünitesinde giren-çıkan enerji akımlarının şematik gösterilişi

Şekil 3.7. göz önüne alınarak döner fırın ünitesinde enerji denkliği düzenlenerek Tablo 3.10.' da verilmiştir.

Tablo 3.10. Döner fırın ünitesine giren-çıkan enerji akımları

GİREN ENERJİLER	ÇIKAN ENERJİLER
- Hammadde ile [FE(n)]	-Klinker ile [KE(1)]
-Sekonder hava ile [HE(3)]	-Baca tozları ile [TE(1)]
-Yakıt taşıma havası ile [HE(4)]	-Baca gazları ile [GE(1)]
-Primer hava ile [HE(5)]	-Kalsinasyondan açığa çıkan CO ₂ ile [CE(1)]
-Yakıt ile [YE _{DF}]	-Reaksiyon ısısı ile [Q _{R,DF}]
	-Radyasyon ve konveksiyon ile olan ısı kaybı [Q _{W,DF}]

3.4.6.1. Döner fırınlarda duvar ısı kayıplarının hesaplanması

Döner fırınların duvarından ısı kaybı radyasyon ve konveksiyon ile olmaktadır. Fırın enerji denkliği için döner fırınların duvar ısı kayıplarını kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalan yaklaşımlarla hesaplamak yeterli olmaktadır [73, 74]. GARDEİK ve arkadaşları döner fırın duvar ısı kayıplarını veren deneysel ifadeleri yayınlamışlardır [37, 60, 61, 62]. Bu çalışma döner fırında ısı dengesi yapılmasında çok kolaylık sağlamaktadır ve burada ısı transferi katsayılarının belirlenmesi için yaklaşık eşitlikler verilmiştir (Tablo 3.12.).

Döner fırın duvarından kayıp olan ısı $\Delta x=1\text{m'}$ lik fırın uzunluğu için Tablo 3.11. ve Tablo 3.12. ile GARDEİK ve arkadaşlarının çalışmaları dikkate alınarak şöyle hesaplanır.

Fırından çevreye kondüksiyon ile olan ısı transferi:

$$\Delta Q_{\text{kon}} = \alpha_{\text{kon}} \cdot (T_w - T_0) \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x \quad (3.63)$$

Fırından çevreye radyasyonla olan ısı transferi:

$$\Delta Q_{\text{rad}} = \alpha_{\text{rad}} \cdot (T_w - T_0) \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x \quad (3.64)$$

Tablo 3.12. deki yaklaşım ifadelerini kullanmak üzere döner fırının çeşitli noktalarındaki sıcaklıklarla ilgili değerler Tablo 3.11.' da ve verilen sıcaklık değerlerinin yerleri Şekil 3.8. de görülmektedir [75].

Tablo.3.11. Çimento döner fırını duvarında tipik sıcaklık gradyeni (°C)

	Sıcak yüzey sıcaklığı t_1	Dış yüzey sıcaklığı t_2	Δt ($t_1 - t_2$)	Ort. Log . sıcaklık
<u>Fırın kafası:</u>				
Kuru sistem uzun fırın	875	200	675	460
Önısıtıcı siklonlu fırın	1100	230	870	560
Önkalsinasyonlu fırın	1200	245	955	600
<u>Fırın çıkış bölgesi:</u>				
Kaplamasız	1300	410	890	770
Hafif kaplamalı	1050	365	685	650
Orta kaplamalı	650	280	370	440
Ağır (fazla) kaplamalı	450	225	225	330
<u>Yanma bölgesi:</u>				
Kaplamasız	1475	440	1035	860
Hafif kaplamalı	1100	360	740	660
Orta kaplamalı	750	280	470	480
Çok kaplamalı	500	240	260	350
<u>Geçiş bölgesi:</u>				
Kaplamasız	1300	410	890	770
Hafif kaplamalı	1050	365	685	650
Orta kaplamalı	650	280	370	440
Çok kaplamalı	450	225	225	330
<u>Kalsinasyon bölgesi:</u>				
Alt kısım izolasyonsuz	1230	160	1070	530
Alt kısım izolasyonlu	1230	240	990	610
Orta kısım izolasyonsuz	1100	150	950	480
Orta kısım izolasyonlu	1100	220	880	550
Üst kısım izolasyonsuz	1000	140	860	440
Üst kısım izolasyonlu	1000	210	790	510
<u>Önısıtma bölgesi:</u>				
Uzun kuru fırın izolasyonsuz	875	130	745	390
Uzun kuru fırın izolasyonlu	875	190	685	450
Önısıtıcı siklonlu izolasyonsuz	925	140	785	420
Önısıtıcı siklonlu izolasyonlu	925	200	725	470
<u>Zincir bölgesi:</u>				
Uzun kuru fırın	575	140	435	310

Tablo 3.11' in devamı

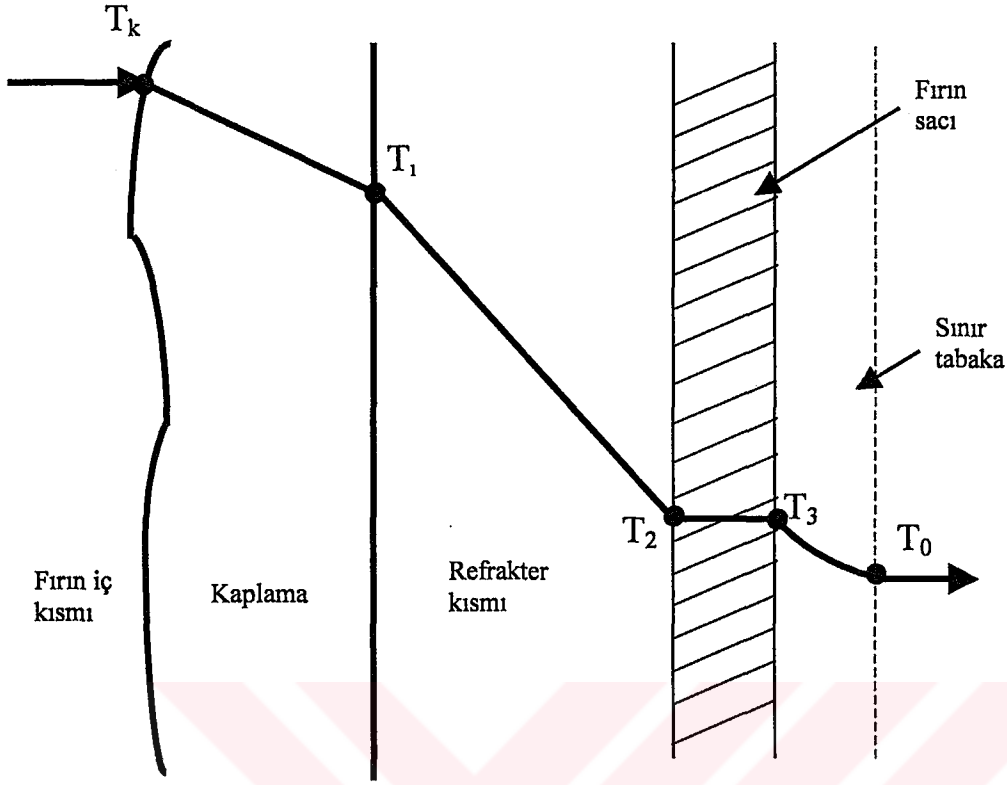
<u>Fırın giriş bölgesi :</u>				
Uzun kuru fırın	425	130	295	450
Önısıtıcı siklonlu fırın	875	205	670	460

Tablo 3.12. Döner fırın ve tüplerdeki ısı transfer katsayılarını veren yaklaşık eşitlikler

Uygulama alanı	Yaklaşık denklem	Katsayılar	Geçerlilik alanı
Düşük rüzgar hızlarında Serbest ve zorlanmış konveksiyon $Wl \leq 2 \text{ m/s}$	$\alpha_{kon} = aD + a_0 + a_1 \left(\frac{t_w}{100} \right) + a_2 \left(\frac{t_w}{100} \right)^2 + a_3 \left(\frac{t_w}{100} \right)^3$ Birimler: $\alpha_{kon} = W / M^2 * K$, $D = m$, $t_w = ^\circ C$	$a=0,3$ $a_0=4$ $a_1=3,5$ $a_2=0,85$ $a_3=0,076$	$Wl \leq 2 \text{ m/s}$ $2 \text{ m} \leq D \leq 8 \text{ m}$ $10^0 C \leq t_w \leq 30^0 C$ $100^0 C \leq t_w \leq 500^0 C$
Yüksek rüzgar hızlarında serbest ve zorlanmış konveksiyon $2 \text{ m/s} \leq Wl \leq 10 \text{ m/s}$	$\alpha_{kon} = bWl + b_0 + (b_1 + b_2 Wl) \frac{t_w}{100}$ Birimler: $\alpha_{kon} = W / M^2 * K$, $Wl = m / s$, $t_w = ^\circ C$	Çap aralığı(m) b $2,75 \leq D \leq 3,25$ 2,37 4,98 $3,25 \leq D \leq 3,75$ 2,27 5,05 $3,75 \leq D \leq 4,25$ 2,18 5,11 $4,25 \leq D \leq 4,75$ 2,11 5,19 $4,75 \leq D \leq 5,25$ 2,05 5,27 $5,25 \leq D \leq 5,75$ 1,98 5,40 $5,75 \leq D \leq 6,25$ 1,93 5,48 $6,25 \leq D \leq 6,75$ 1,87 5,66 $6,75 \leq D \leq 7,25$ 1,83 5,70	Çap aralığı(m) $2 \text{ m/s} \leq Wl \leq 2 \text{ m/s}$ $2,75 \text{ m} \leq D \leq 7,25 \text{ m}$ $10^0 C \leq t_w \leq 30^0 C$ $100^0 C \leq t_w \leq 500^0 C$
Radyasyon	$\alpha_{kon} = C_0 + C_1 \left(\frac{t_w}{100} \right) + C_2 \left(\frac{t_w}{100} \right)^2$ Birimler: $\alpha_{kon} = W / M^2 * K$, $Wl = m / s$, $t_w = ^\circ C$	$C_0=5,25$ $C_1=1,40$ $C_2=0,99$	$\varepsilon_w=0,9$ $15^0 C \leq t_w \leq 25^0 C$ $100^0 C \leq t_w \leq 500^0 C$
Serbest ve zorlanmış konveksiyon ile radyasyon toplam ısı iletimi $Wl \leq 2 \text{ m/s}$	$\alpha_{top} = \alpha_{kon} + \alpha_{rad}$ $\alpha_{top} = AD + Ao + A1 \left(\frac{t_w}{100} \right) + A2 \left(\frac{t_w}{100} \right)^2 + A3 \left(\frac{t_w}{100} \right)^3$ Birimler $\alpha_{kon} = W / M^2 * K$, $Wl = m / s$, $t_w = ^\circ C$	$A=0,3$, $Ao=9,25$, $A1=4,9$, $A2=0,14$, $A3=0,076$	$Wl \leq 2 \text{ m/s}$, $\varepsilon_w = 0,9$ $2 \text{ m} \leq D \leq 8 \text{ m}$ $15^0 C \leq t_w \leq 25^0 C$ $100^0 C \leq t_w \leq 500^0 C$

Tablo 3.12' nin devamı

Serbest ve zorlanmış konveksiyon ile radyasyon toplam ısı iletimi 2 m/s ≤ Wl ≤ 10 m/s	α _{top} = α _{kon} + α _{rad}		Çap aralığı(m)						B ₁ B ₂ B ₃				ε _w = 0,9	
	α _{top} = BWl + Bo + (B1 + B3Wl) $\frac{t_w}{100}$ + B2 $\left(\frac{t_w}{100}\right)^2$												2 m/s ≤ WL ≤ 10 m/s	
	Birimler: α _{kon} = W / M ² * K , Wl = m / s , t _w = °C												2,75 m ≤ D ≤ 7,25	
													10 ⁰ C ≤ to ≤ 30 ⁰ C	
													100 ⁰ C ≤ tw ≤ 500 ⁰ C	
			</											



Şekil 3.8. Döner fırın duvarında sıcaklık gradyeni [T (K)]

Fırından çevreye olan toplam ısı transferi aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$Q_{W,DF} = \Delta Q_{kon} + \Delta Q_{rad} \quad (3.65)$$

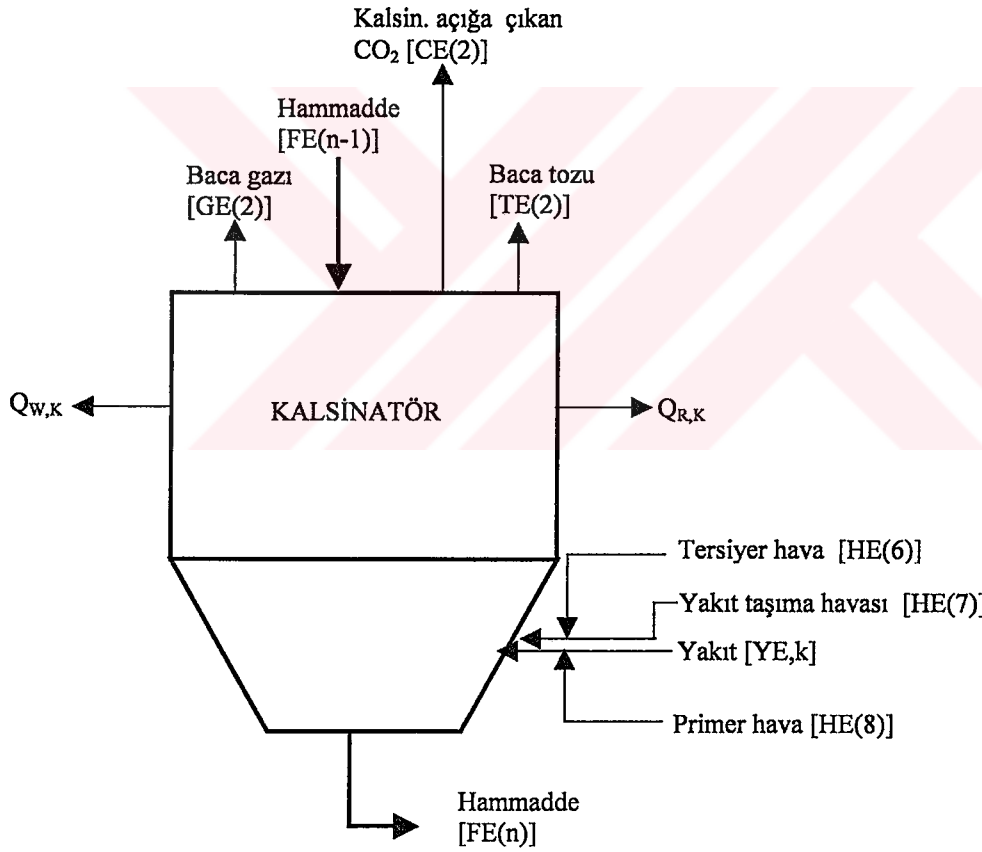
Fırın klinker çıktısı (ton/gün) dikkate alınarak birim klinker başına duvar ısı kaybı ise;

$$q_{W,DF} = \frac{Q_{W,DF}}{m_{klin}} \quad (3.66)$$

denkliği ile hesaplanır.

3.4.7. Kalsinatör ünitesinde enerji denklği

Enerji tasarrufu sağlamak ve fırınların kapasitesini arttırmak amacıyla kalsinasyon işleminin döner fırın bünyesinden alınarak, dip siklonda ikinci bir yakıt yakıldığında bu siklon kalsinatör adını almaktadır [76, 30]. Esasen dip siklonda yakıt yakılmasından başka da önısıtıcı siklonlu sistemden farkı yoktur. Kalsinatör içinde genel olarak gerçekleşen proses uygun toz farin besleme akımıyla birlikte tersiyer havanın, döner fırın çıkış toz ve gazları ile kalsinatördeki yanma sisteminden oluşan yanma gazlarının karışması esasına dayanmaktadır. Ancak burada incelenen paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemde döner fırından çıkan toz ve gazlar kalsinatör ünitesine değil, bir üst siklona yönlendirilmektedir (Şekil 3.9. ve Tablo 3.13.).



Şekil 3.9. Kalsinatörde giren-çıkan enerjilerin şematik gösterilişi

Tablo 3.13. Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan enerjiler

GİREN ENERJİLER	ÇIKAN ENERJİLER
- Hammadde ile [FE(n-1)]	- Baca tozu ile [TE(2)]
- Tersiyer hava ile [HE(6)]	- Baca gazı ile [GE(2)]
- Yakıt taşıma havası ile [HE(7)]	- Hammadde ile [FE(n)]
- Primer hava ile [HE(8)]	- Kalsinasyondan açığa çıkan CO ₂ ile [CE(2)]
- Yakıt ile [YE _k]	- Kalsinasyon reaksiyon entalpisi ile [Q _{R,K}]
	- Radyasyon ve konveksiyon ile [Q _{W,K}]

Kalsinatör çıkışında yanma gazları içindeki tozların sıcaklığının gaz sıcaklığına eşit olduğu kabul edilir.

Klinker formasyonuna karışan ardışık reaksiyonlar, basitleştirme için üç grupta incelenir [57];

- 1- Kaolinit'in dehidratasyonu ve MgCO₃' in dekarbonasyonu sadece kalsinatörde ve kalsinatör üstü siklonda oluşmaktadır,
- 2- Kalsinasyonun önemli bir kısmı kalsinatörde meydana gelmektedir. Kalsinasyon reaksiyon enerjisinin bir kısmı klinker faz oluşumunda geri alınmaktadır.
- 3- C₃S, C₃A ve C₄AF' nin oluşumu sadece döner fırında olur ve bu reaksiyon ekzotermiktir.

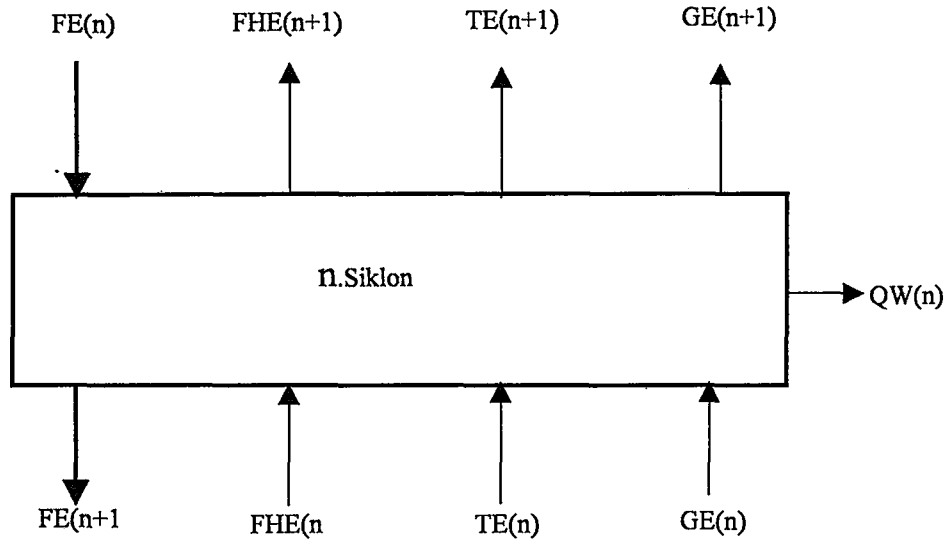
Kalsinatör ünitesinde reaksiyon entalpisini belirlemek için toplam reaksiyon entalpisinin kalsinatör ve döner fırın arasında doğru paylaştırılması gerekir. Bundan başka, CaCO₃' ın dekarbonasyonu ile C₂S oluşumunun aynı zamanda meydana geldiği varsayılır. Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerde kalsinasyon; hammaddenin özelliklerine, işletme koşullarına ve kalsinatörün tasarımına bağlıdır. İkincil yakıcıya verilen yakıt; kimyasal kompozisyon, partikül boyut dağılımı, yanma ve kalsinasyon sonundaki CO₂' nin kısmi basıncı, materyal sıcaklığı, ve kalsinatördeki tutulma zamanına bağlıdır [59].

3.4.8. Önısıtıcı siklon kademelerinde enerji denkliği

Isı mühendisliği bakımından en önemli nokta tozun ve gazın birbirine karıştırılmasıdır. Prensipde toz ve gaz arasında tam olarak sıcaklık eşitlemesinden bahsedilemez. Bu durum maksimum ısı değişimine karşılık gelmektedir. Isı değişiminin, dolayısıyla da termal verimlilik siklonun dizaynına bağlıdır. Spesifik örneklerdeki termal verim, ayrı ayrı siklonlardaki enerji dengesinin ve operasyonel ölçümlerin yardımıyla belirlenebilir. Ancak bu ölçümler karmaşıktır ve önısıtıcının aşağı bölgeleri için kullanışlı değildir. Bu yüzden önısıtıcı siklon kademelerinde enerji denkliği akışkan maddelere dayanan hesaplamalarla mümkün olmaktadır [59].

Her siklon kademesinde enerji denkliği yapılırken hammaddenin, baca gazının, yakma havasının, fırın giriş-çıkış sızdırmazlıklarından giren kaçak havanın, kalsinasyondan meydana gelen CO_2 ' nin ısı yükleri ile hammadde nemi ve kristal suyunun buharlaşma enerjisi ve teorik reaksiyon enerjisi (MgCO_3 , CaCO_3 ve kil minerallerinin ilgili kademelerde ayrışmaları için verilen) dikkate alınır [22, 23].

Önısıtıcı siklonların her bir kademesi için ısı olaylar şu şekilde gerçekleşmektedir. Birinci siklon kademesinde; hammaddenin, hammadde transfer havasının ısıtılması, hammadde nemi ve kristal suyunun buharlaştırılması, baca gazı, baca tozu ve kaçak havanın soğutulması ile radyasyon ve konveksiyon ısı kaybı olmaktadır. Ara siklon kademelerinde; hammaddenin ısıtılması, baca gazlarının, baca tozlarının ve kaçak havanın soğutulması, radyasyon ve konveksiyon kaybı meydana gelmektedir. Kalsinatörün hemen üstündeki siklonlarda hammaddenin ve fırın giriş-çıkış sızdırmazlıklarından giren kaçak havanın ısıtılması, hammaddedeki CaCO_3 ' ın kısmen kalsinasyonu, fırından gelen gazların ve baca tozlarının soğutulması, radyasyon ve konveksiyon kaybı olmaktadır. İlave olarak kalsinatör ve hemen üzerindeki siklon gurubundan sonraki siklonlara gelen baca tozları içindeki MgO ' in tamamı ve CaO ' in bir kısmı yeniden karbonatlaşmaktadır. (Şekil 3.10. ve Tablo 3.14.).



Şekil 3.10. Genel halde önısıtıcı siklon kademesinde enerji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 3.14. Genel halde önısıtıcı siklon kademesinde giren-çıkan enerjiler

GİREN ENERJİLER	ÇIKAN ENERJİLER
- Hammadde ile [FE(n)]	- Hammadde ile [FE(n+1)]
- Baca gazı ile [GE(n)]	- Baca gazı ile [GE(n+1)]
- Baca tozu ile [TE(n)]	- Baca tozları ile [TE(n+1)]
- Kaçak hava ile [FHE(n)]	- Kaçak hava ile [FHE(n+1)]
	- Radyasyon ve konveksiyon kaybı [Qw(n)]

BÖLÜM 4. ÇİMENTO FABRİKALARINDA EKSERJİ ANALİZİ

4.1. Giriş

Dünya enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması bir çok ülkeyi enerji politikalarını yeniden gözden geçirmelerine ve verimli enerji kullanımı konusunda etkili tedbirler almalarına yöneltmiştir. Petrol, doğal gaz ve kömür gibi enerji kaynaklarını verimli bir şekilde kullanan enerji sistemlerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Termodinamiğin birinci kanununa göre enerji korunur ve birinci kanun yüksek kaliteli bir enerjinin düşük kaliteli bir enerjiye çevrilmesi sonucunda oluşan enerji kaybını açıklayamamaktadır. Bu kayıp, termodinamiğin ikinci kanunu ve ekserji kavramıyla açıklanabilmektedir. Bu nedenle, ekserji analizi, termodinamik yönden üretim işlemlerinin iyileştirilmesi imkanlarını belirleyip değerlendirmek için kullanılır. Verimli kullanım, termodinamiğin hem birinci hem de ikinci yasası ile belirlenir. Ayrıca, ekserji (kullanılabilirlik) üretilen enerjinin kalitesini uygun olarak belirler [5, 6, 77].

4.2. Ekserji Kavramının Kısa Tarihçesi

Faydalı enerji kavramının kapalı sistemlerde pratik uygulamaları 1889'da GOUY tarafından gösterilmiştir. Gouy ayrıca belli bir işlemde faydalı enerjideki kaybın, çevre sıcaklığı ile işleme katılan tüm cisimlerin entropi değişimlerinin toplamının çarpımına eşit olduğunu da ifade etmiştir.

$$e_{\text{kayıp}} = T_0.S_{\text{ür}} \quad (4.1)$$

Ekserjinin ilk tanımı BAEHR tarafından "ekserji, enerjinin diğer enerji türlerine dönüştürülebilene kısmıdır" şeklinde yapılmıştır. Daha ayrıntılı ve nicel hesaplamalar için kullanılabilecek bir tanım ise BOSNJAKOVIĆ tarafından, " ekserji tersinir bir

süreç sonunda çevre ile sistemin denge haline gelmesi durumunda elde edilebilecek maksimum iş miktarıdır" şeklinde ifade edilmiştir. Bosnjakovic'in tanımına uygun olarak ekserjinin hesaplanabilmesi için çevrenin; basınç, sıcaklık ve kimyasal kompozisyonu gibi birçok değerinin belirtilmesi ve tersinir bir işlemin var olduğunun kabul edilmesi gerekir. Ekserji analizi için tersinir sürecin nasıl olduğu önemli değildir. Sadece işlemin başlangıç ve bitiş noktaları için gerekli olan koşulların bilinmesi gereklidir [78].

Bu arada SZARGUT maddelerin standart kimyasal ekserjilerinin değerlendirilmeleri için referans madde teorisini geliştirmiştir. Ekserji kelimesi terim olarak 1953 yılında RANT tarafından ortaya atılmıştır [79]. Bu terim hemen genel bir kabul görmüş ve kullanılabilirlik, faydalı enerji, enerji kapasitesi ve diğer birçok ilgili terimlerin yerini almıştır. Kimyasal ve ısıl proseslerin ekserji metodu analizlerini yapmak yakın yıllarda geniş ölçüde kabul görmektedir.

4.3. Ekserji İle İlgili Temel Kavramlar

Ekserji analizi enerji kaynaklarının daha verimli kullanılması amacıyla yapılır. Bu analiz ile israf ve kayıpların yeri, nedeni ve büyüklüğü belirlenebilir. Bu tip bilgiler, enerji yönünden verimli yeni sistemlerin tasarımında ve var olan sistemlerin veriminin artırılmasında kullanılır. Ekserji analizi ayrıca, I. kanun yaklaşımının bazı olumsuzluklarını da ortaya koyar. Böylece, enerji yönünden incelendiğinde, bir gazın (ya da sıvının) bir vanadan ısı aktarımı olmaksızın genişlemesi kayıpsız bir şekilde yer alır. Ancak böyle bir genişlemenin termodinamik yönden verimsiz olduğu bilinir. Ekserji analizi bunu kolayca ortaya koyar [6, 77].

Ekserji metodu termodinamik kayıpları sadece I. kanuna göre değil, hem I. ve hem de II. kanuna dayanarak değerlendiren bir termodinamik analiz metodudur. Bundan dolayı ekserji II. kanun analizleri adı altında bilinen termodinamik analizler sınıfına aittir. Bunun diğer adı kullanılabilirlik analizidir [80 ,81, 82].

Ekserji analizinin esas amacı ısı ve kimyasal proseslerin termodinamik kusurlarının sebeplerini miktar olarak değerlendirmek ve meydana çıkarmaktır. Bu analiz

proseslerin geliştirilmesi için ihtimalleri gösterir fakat ihtimallerin uygulanabilirliği üzerinde karar veremez. Ekserji analizi ayrıca ekonomik analizlerde de güvenilir bir karar olur [83, 84].

Süreçlerin ekserji analizinin temelini oluşturan yaklaşım, ısı ve entalpi gibi değişik enerji türlerinin biri faydalı diğeri faydasız iki farklı kısımdan meydana geldiğinin kabul edilmesidir [85, 86, 87]. Diğer enerji türlerine dönüştürülmesi mümkün olmayan enerjiye kullanılmaz enerji, bağlı enerji veya anerji denir.

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji} \quad (4.2)$$

Çeşitli enerji türlerini üç grupta incelemek mümkündür;

- 1-) Diğer enerji türlerine sınırsız olarak dönüştürülebilen enerji (mekanik ve elektrik enerjisi gibi),
- 2-) Diğer enerji türlerine sınırlı olarak dönüştürülebilen enerji (iç enerji ve ısı gibi),
- 3-) Diğer enerji türlerine dönüştürülemeyen enerji (çevrenin iç enerjisi gibi).

Ekserji, bir sistemin veya belli bir enerji formunun çevresine göre maksimum iş potansiyelidir veya belli bir enerji biçiminin değişiklik meydana getiren iş kapasitesi cinsinden ifade edilen bir ölçütüdür. Ekserji metodunda en önemli rolü çevrenin oynadığı açıkça görülmektedir [87, 88, 89].

Ekserjinin hesaplanabilmesi için;

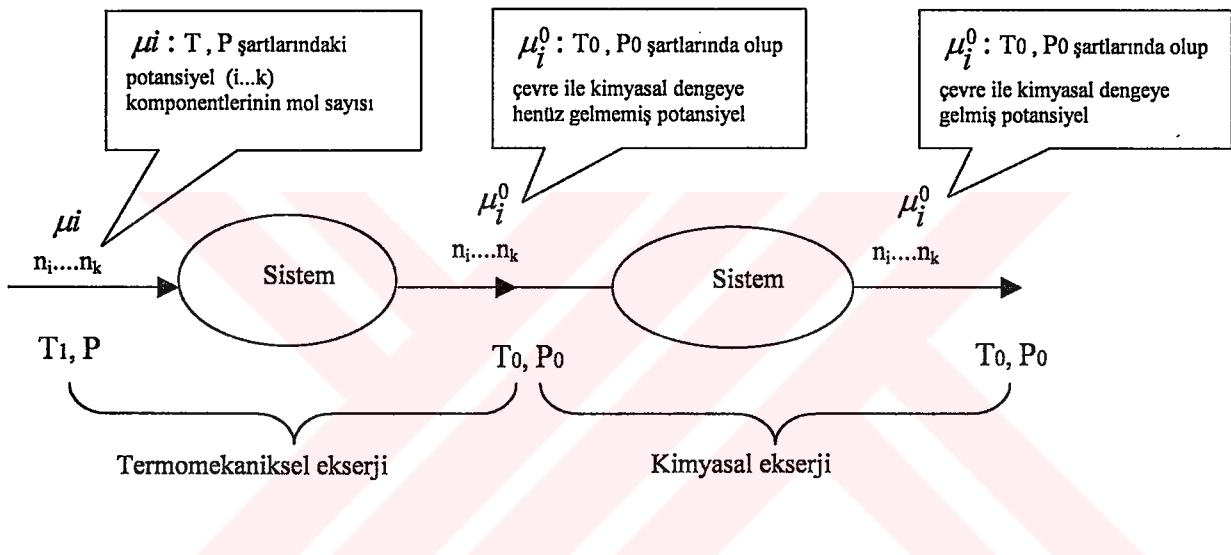
- 1-) Çevrenin sıcaklık, basınç ve kimyasal kompozisyonunun kesin ve doğru olarak belirtilmesi,
- 2) Tersinir bir işlemin var olduğunun kabul edilmesi gerekir.

Ekserji analizi için çevrenin tanımı yapılırken temel ilke, çevrenin tam bir denge durumunda (termomekanik ve kimyasal) olmasıdır. Bir madde akışının ekserjisi değerlendirilirken çevrenin ısı ekserjisinin sıfır olduğu ve serbestçe tanımlanan yaygın çevresel maddelerden oluştuğu kabul edilir. Bu yaygın çevresel maddeler, birbirleriyle denge halindedir ve bunların ölü durumda (dead state) oldukları söylenebilir [80].

Sistem ile çevre arasındaki dengenin üç temel şartı vardır;

- 1-) Isıl denge $T=T_0$ (Net ısı akışı yok)
- 2-) Mekanik denge $P=P_0$ (Net iş akışı yok)
- 3-) Kimyasal denge $\mu_i=\mu_{i,0}$ (Net madde akışı yok)

Fizikokimyasal denge; kimyasal potansiyellerin eşit olduğu durumdur. Ancak kimyasal denge sağlandıktan sonra kütle transferi sona erer. Bir komponent; (T, P) şartlarından (T₀, P₀) şartlarına getirildiğinde (ısı ve mekanik denge şartlarında) termomekanik ekserji, fizikokimyasal denge şartlarında ise kimyasal ekserji söz konusudur (Şekil 4.1.), [90].



Şekil 4.1. Sistemle çevre arasında ekserji etkileşiminin şematik gösterilişi

$$\mu_i^0 = \mu_i(T_0, P_0) + R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{P_i^0}{P_0} \quad (4.3)$$

i komponentinin çevredeki kısmi basıncı P_i^0 olduğundan denklem (4.3) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\mu_i^0 = \mu_i(T_0, P_0) + R \cdot T_0 \cdot \ln X_i^0 \quad (4.4)$$

burada X_i^0 ; i komponentinin (T₀, P₀) şartlarındaki mol kesridir.

4.4. Katı ve Gaz Akımların Ekserjileri

Çimento fabrikalarında katı akımları hammadde (farin) ve baca tozu oluşturmaktadır. Gaz akımlarını ise baca gazını oluşturan gaz bileşikleri oluşturmaktadır. Hammadde, baca tozu ve baca gazı akımlarının ekserjileri, termomekanik ve kimyasal olmak üzere iki ayrı şekilde ele alınacaktır [91].

4.4.1. Katı ve gaz akımların termomekanik ekserjileri

Özgül ısı (c_p) ifadesinden hareket ederek herhangi bir akımın entropisi (faz değişimi de dahil);

$$\Delta s = \int c_p \frac{dT}{T} + \frac{\Delta H}{T} \quad (4.5)$$

olarak hesaplanır. Su buharının (sıvı+buharlaştırma+su buharı fazları dikkate alınarak) entropisi ise

$$\Delta s = \int_T^{373} c_{p_{sıvı}} \frac{dT}{T} + \frac{\Delta H_{buh}}{373} + \int_{373}^T c_{p_{buh}} \frac{dT}{T} \quad (4.6)$$

şeklinde hesaplanır. Tablo 3.6 ve 3.7' de verilen katı ve gaz akımlar için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak verilmiş olan özgül ısı (c_p) ifadeleri aynen entalpi eşitlikleri gibi geniş bir sıcaklık aralığında güvenle kullanılabilir.

Termomekanik ekserji ifadesi;

$$e_{tm} = \Delta h - T_0 \cdot \Delta s \quad (4.7)$$

dir. Yukarıda verilen entropi ve termomekanik ekserji hesaplama formülleri çimento fabrikalarındaki katı ve gaz akımlara aşağıdaki gibi uygulanır.

Hammadde için;

$$eF_{,tm} = \Delta h_{,F} - T_0 \cdot \Delta s_{,F} \quad (4.8)$$

Baca tozu için;

$$eBT_{,tm} = \Delta h_{,BT} - T_0 \cdot \Delta s_{,BT} \quad (4.9)$$

Klinker için;

$$eK_{,tm} = \Delta h_{,K} - T_0 \cdot \Delta s_{,K} \quad (4.10)$$

Kaçak hava için;

$$eFH_{,tm} = \Delta h_{,FH} - T_0 \cdot \Delta s_{,FH} \quad (4.11)$$

Soğutma havası için;

$$eH_{,tm} = \Delta h_{,H} - T_0 \cdot \Delta s_{,H} \quad (4.12)$$

Kalsinasyondan oluşan CO₂;

$$e_{,CO_2,tm} = \Delta h_{,CO_2} - T_0 \cdot \Delta s_{,CO_2} \quad (4.13)$$

Yanma ürünleri (baca gazı) için;

$$eBG_{,tm} = \sum_{i=1}^n \Delta h_{,i} - T_0 \cdot \Delta s_{,i} \quad (4.14)$$

4.4.2. Katı ve gaz akımların kimyasal ekserjileri

Kimyasal ekserjinin değerlendirilmesi için çeşitli modeller önerilmiştir. Gaz akımlarının kimyasal ekserjilerinin hesaplanmasında, referans çevre tanımı kullanılır. Kimyasal ekserji için referans çevre tanımı termodinamik kavram ile doğal çevre arasındaki farkı belirlemek için sıkça kullanılır. Standart kimyasal ekserji, çevre sıcaklığı (T_0) ve basıncı (P_0) değerine (örneğin: 298,15 K ve 101325 Pa) dayandırılır. Standart çevre, doğal çevreyi olabildiğince yansıtan standart bileşimde referans maddelerden oluşan bir çevre olarak tanımlanır [77, 85, 92, 93].

Katı akımların her kademede kimyasal ekserjilerinin hesaplanmasında Bölüm 3' te hesaplama şekli verilen hammadde, baca tozu ve klinkerin mineralojik analizinden faydalanılacaktır. Katı akımları oluşturan bileşiklerin kimyasal ekserjileri ayrı ayrı toplanarak ilgili katı akıma ait kimyasal ekserji bulunmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan bu bileşenlere ait kimyasal ekserji değerleri Tablo 4.1.' de verilmektedir.

Tablo 4.1. de verilen değerler göz önüne alınarak giriş ve siklon kademelerindeki hammadde ve baca tozu akımlarının kimyasal ekserjilerinin hesabı;

$$eF_{kim} = eCaCO_3 + eMgCO_3 + eCaO.SiO_2 + eAl_2O_3.SiO_2 + eFe_2O_3.SiO_2 + eSiO_2 \quad (4.15)$$

Klinkerin kimyasal ekserjilerinin hesabı;

$$eK_{kim} = eC_2S + eC_3S + eC_3A + eC_4AF + eMgO + eCaSO_4 \quad (4.16)$$

Tablo 4.1. Katı akım bileşenlerine ait kimyasal ekserjiler [23]

Bileşenler	Kimyasal ekserji (kJ/kmol)	Bileşenler	Kimyasal ekserji (kJ/kmol)
Al_2O_3 s, α , corundum	200400	CaSO_4 s, α , anhydrite	8200
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ s, sillimanite	15400	Fe_2O_3 s, hematite	16500
CO g	275100	H_2 g	236100
CO_2 g	19870	H_2O l	900
CaCO_3 s, calcite	1000	H_2O g	9490
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ s, dolomite	15100	K_2O s	413100
CaO s	110200	MgO s	66800
$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ s	275400	MgCO_3 s	37900
$2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ s	460400	N_2 g	690
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ s	500600	O_2 g	3970
$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ s, volastonite	23600	Na_2O s	296200
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ s, β	95700	SO_2 g	313400
$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ s	219800	SiO_2 s, quartz	1900
CaS	844600	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	15000 18400
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	667000		

Gaz akımlara ait kimyasal ekserji hesaplamalarında esas alınan dört adet komponent için çevre tanımı Tablo 4.2. de verilmektedir [85].

Tablo 4.2. Gaz akımları için çevre tanımı ($P_0=101,325$ kPa ve $T_0=298$ °K)

Gaz Referans maddeler	Mol fraksiyonu (kesri)
N ₂	0,75700
O ₂	0,20120
H ₂ O	0,02170
CO ₂	0,00033
Diğer	0,01977

Baca gazının kimyasal ekserjisi:

$$e_{BG, kim} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{X_i}{X_{i,0}} \quad (4.17)$$

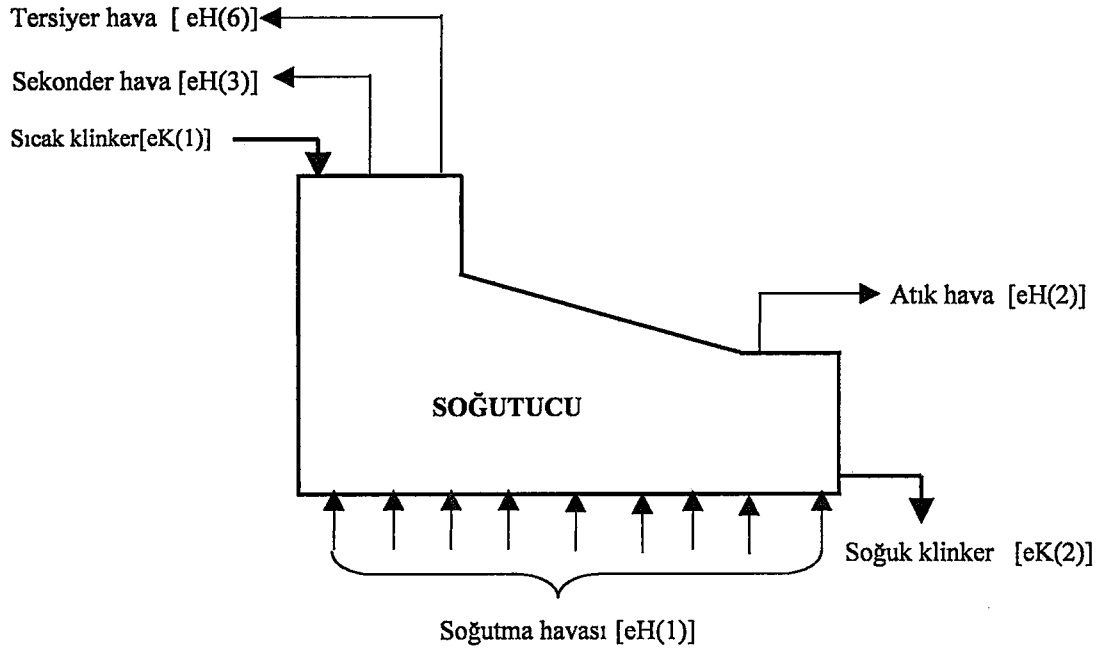
ifadesi ile hesaplanmaktadır.

4.5. Çimento Üretim Sistemlerinde Ekserji Denkliği

Çimento üretim sisteminde ekserji denkliği, sistemin her bir ünitesine giren ve çıkan akımların ekserji analizlerini gösteren modeller yardımı ile kurulmuştur. Bu çalışmada, çimento üretim sistemine uygulanan ekserji analizleri; soğutma, döner fırın, kalsinatör ve önısıtıcı siklon üniteleri olarak incelenmiştir.

4.5.1. Klinker soğutma ünitesi

Çimento üretim sistemlerinde klinkerin soğutulması için gerekli olan soğutma havası çevreden temin edilmektedir. Klinker soğutma ünitesinde ekserji akımları Şekil 4.2. ve Tablo 4.3.' te verilmiştir.



Şekil 4.2. Soğutma ünitesine giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 4.3. Soğutma ünitesinde giren-çıkan ekserjiler

GİREN EKSERJİLER	ÇIKAN EKSERJİLER
- Sıcak klinker ile [eK(1)]	- Soğuk klinker ile [eK(2)]
- Soğutma havası ile [eH(1)]	- Soğutucudan atılan hava ile [eH(2)]
	- Sekonder hava ile [eH(3)]
	- Tersiyer hava ile [eH(6)]
TOPLAM [eGKS]	TOPLAM [eCKS]

Klinker soğutucusunda oluşan ekserji kaybı (tersinmezlik);

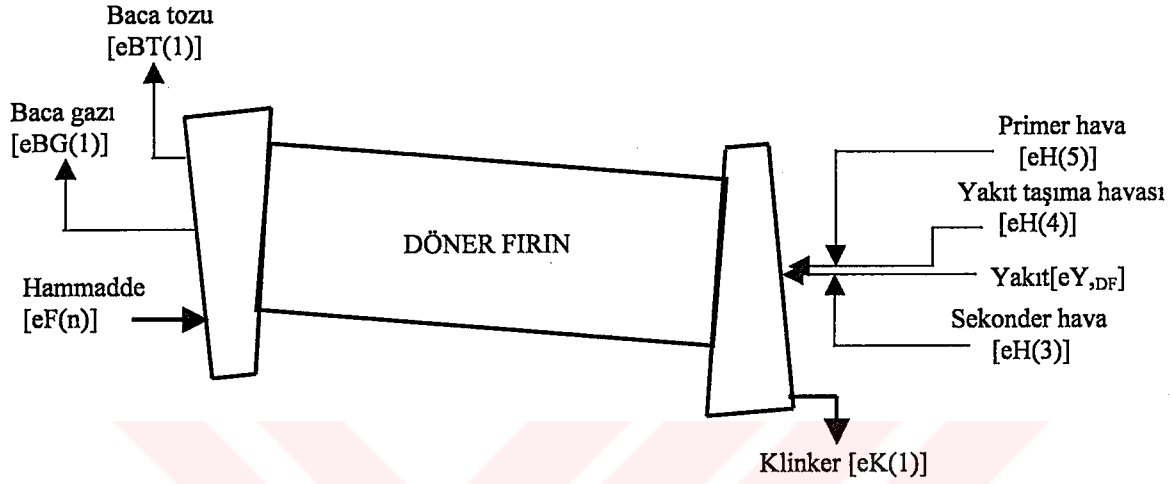
$$IKS = eGKS - eCKS \quad (4.18)$$

4.5.2. Döner fırın ünitesi

Çimento üretim sistemlerinden yaş sistemde hammaddenin tamamı döner fırında kalsine olmaktadır. Önısıtıcı siklonlu sistemde hammaddenin (%30-%50)' si ve önkalsinasyonlu sistemde ise hammaddenin (%80-%95)' i döner fırına gelmeden kalsine olmakta geriye kalan kısmı ise döner fırında kalsine olmaktadır. Ekserji

analizi hesaplamalarında hammaddenin kalsinasyonundan açığa çıkan CO₂ döner fırın, kalsinatör ve önısıtıcı ünitelerde baca gazı akımı içine katılmıştır.

Döner fırın ünitesine giren-çıkan ekserji akımları Şekil 4.3. ve Tablo 4.4.' te görülmektedir.



Şekil 4.3. Döner fırın ünitesine giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo.4.4. Döner fırın ünitesine giren-çıkan ekserjiler

GİREN EKSERJİLER	ÇIKAN EKSERJİLER
- Hammadde ile [eF(n)]	- Klinker ile [eK(1)]
- Sekonder hava ile [eH(3)]	- Baca tozları ile [eBT(1)]
- Taşıma havası ile [eH(4)]	- Baca gazları ile [eBG(1)]
- Primer hava ile [eH(5)]	
- Yakıt ile [eY _{DF}]	
TOPLAM [eGDF]	TOPLAM [eCDF]

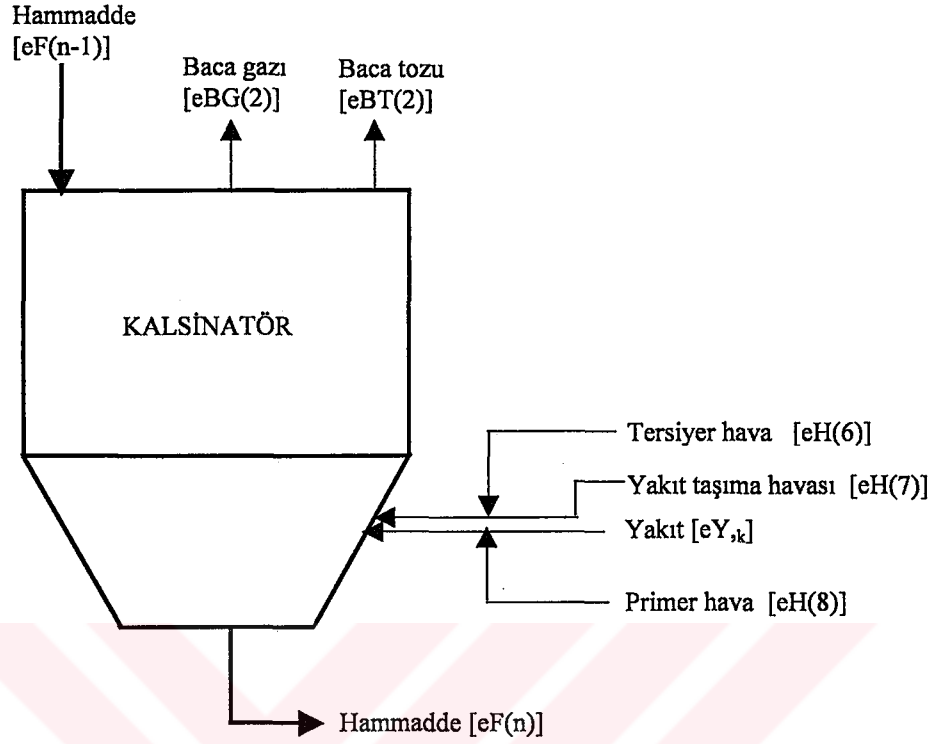
Döner fırın ünitesinde oluşan kayıp ekserji (tersinmezlik);

$$IDF = eGDF - eCDF \quad (4.19)$$

4.5.3. Kalsinatör ünitesi

Kalsinatör ünitesi, çimento üretim sistemlerinde kullanılan yakıtın yaklaşık %45-65 oranlarında yanmasından ve %95' lere varan kalsinasyondan dolayı döner fırın gibi düşünülebilir. Yanmadan ve kalsinasyon işlemi açısından ele alındığında bu iki ünite

de ekserji davranışları benzer olmaktadır. Kalsinatör ünitesinde ekserji akımları Şekil 4.4. ve Tablo 4.5.' de verilmiştir.



Şekil 4.4. Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 4.5. Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan ekserjiler

GİREN EKSERJİLER	ÇIKAN EKSERJİLER
- Hammadde ile [eF(n-1)]	- Hammadde ile [eF(n)]
- Tersiyer hava ile [eH(6)]	- Baca tozu ile [eBT(2)]
- Taşıma havası ile [eH(7)]	- Baca gazı ile [eBG(2)]
- Primer hava ile [eH(8)]	
- Yakıt ile [eY,k]	
TOPLAM [eGOK]	TOPLAM [eCOK]

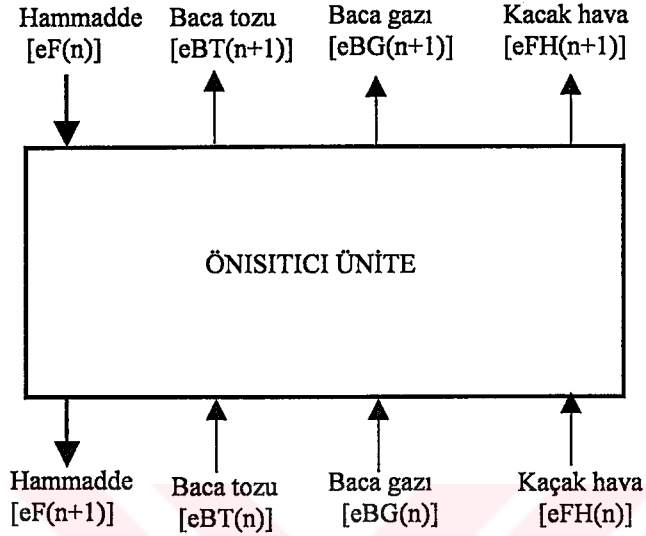
Kalsinatör ünitesinde meydana gelen ekserji kaybı (tersinmezlik);

$$IOK = eGOK - eCOK$$

(4.20)

4.5.4. Önısıtıcı siklon ünitesi

Önısıtıcı siklon ünitesinde, ayrı ayrı siklonlar ve bir bütün olarak ele alınarak yapılan ekserji denklığı (Şekil 4.5. ve Tablo 4.6.) verilmektedir.



Şekil 4.5. Önısıtıcı üniteye giren-çıkan ekserji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 4.6. Önısıtıcı üniteye giren-çıkan ekserjiler

GİREN EKSERJİLER		ÇIKAN EKSERJİLER	
- Hammadde ile	$[eF(n)]$	- Hammadde ile	$[eF(n+1)]$
- Baca tozları ile	$[eBT(n)]$	- Baca tozu ile	$[eBT(n+1)]$
- Baca gazları ile	$[eBG(n)]$	- Baca gazı ile	$[eBG(n+1)]$
- Kaçak hava ile	$[eFH(n)]$	- Kaçak hava ile	$[eFH(n+1)]$
TOPLAM	$[eGOS]$	TOPLAM	$[eCOS]$

Önısıtıcı siklonlu üniteye meydana gelen ekserji kaybı (tersinmezlik);

$$IOI = eGO S - eCOS \quad (4.21)$$

Önısıtıcı siklonlu üniteye ekserji analizi yapılırken, göz önüne alınan ekserji akımları şu şekildedir. İlk siklondaki ekserji akımları, ara siklonlardaki ekserji akımlarından hammadde neminin ve kristal suyunun buharlaşmasından kaynaklanan farklılığa sahiptir. İlk siklona giren ekserjiler; hammadde ile, bir alt siklondan gelen baca gazı, baca tozu ve kaçak hava ile olmaktadır. İlk siklondan çıkan ekserjiler ise bir alt

siklona geçen hammadde ile, hammadde nemi ve kristal suyunun buharlaştırılması, siklondan dışarı çıkan baca gazı, baca tozu ve kaçak hava ile olmaktadır. Dip ve ara siklon kademelerinde ise su buharlaşmasından kaynaklanan ekserji yer almaz. Hesaplamalara kolaylık olması için kalsinasyondan açığa çıkan CO_2 baca gazı içinde ve CaO hammadde ile baca tozu içine katılmıştır.

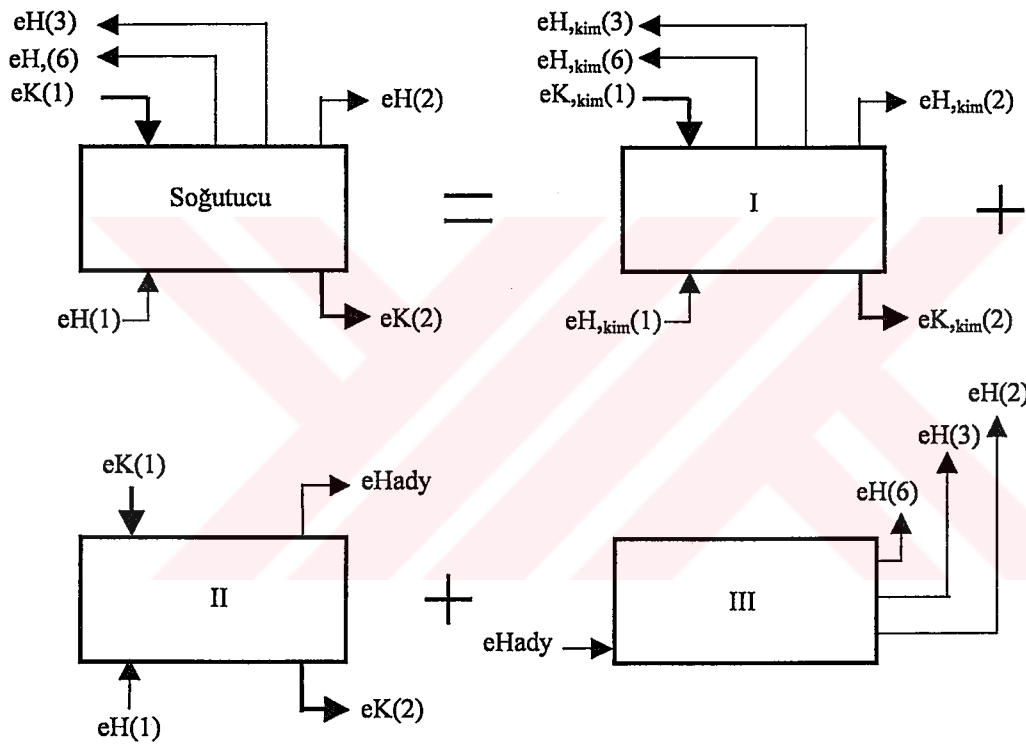
4.6. Çimento Üretim Sistemlerinde Oluşan Tersinmezliklerin Detaylandırılması

Tersinmezlik, iş yapma kabiliyetinde eksilme gibi düşünülebilir. İşe dönüştürülebilecek olan fakat dönüştürülemeyen enerjiyi gösterir. Bir hal değişimindeki tersinmezlikler ne kadar az olursa yapılan iş o ölçüde çok olacaktır [89]. Benzer biçimde, karmaşık bir mühendislik sisteminin daha etkin çalışmasını sağlamak için, sistemin her ünitesiyle ilgili tersinmezlikleri bulmak ve bunları olabildiğince azaltmak gerekir.

Bu çalışmada tersinmezliklerin; yanmadan, kimyasal tepkimeden, ısı-kütle karışımından ve ünite ile çevre arasındaki ısı transferinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Bütün ünitelerde bu dört tür ekserji kaybı hesaplanmaktadır. Ancak yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı sadece döner fırın ve kalsinatör ünitesinde (yanma buralarda olduğu için) mevcuttur. Kimyasal tepkimeden kaynaklanan ekserji kaybı, ilgili üniteye giren çıkan katı ve gaz akımların referans alınan maddelere ve tanımlı çevreye göre kimyasal ekserjileri karşılaştırılarak hesaplanmıştır (Tablo 4.1. ve Tablo 4.2.). Hem yanmadan hem de kimyasal tepkimeden, ısı-kütle karışımından kaynaklanan ekserji kaybı, ilgili üniteye tüm olayların adyabatik şartlarında meydana geldiği varsayılarak hesaplanmaktadır [23]. İlgili ünite ile çevre arasındaki ısı transferinden kaynaklanan ekserji kaybı; ısı-kütle karışımındaki çıkış şartlarıyla normal ünite çıkış şartları karşılaştırılarak bulunmaktadır. Bütün üniteler sanki dört parça imiş gibi kabul edilerek hesaplanan bu dört ekserji kaybının toplamı, ilgili üniteye daha önce hesaplanan kayıp ekserji miktarına eşit olmalıdır [23, 91]. Burada dikkat edilmesi gereken husus, her kütle akışının kimyasal ve termomekaniksel ekserjilerinin ayrı ayrı hesaplanmasıdır.

4.6.1. Klinker soğutma ünitesinde tersinmezliklerin detaylandırılması

Soğutma ünitesinde, yanma olmadığı için yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı yoktur. Isıl etkileşim sıcak klinker ile çevreden temin edilen soğutma havası arasında olmaktadır. Klinker soğutma ünitesinde ısı-kütle karışımından kaynaklanan ekserji kaybının hesaplanması, farklı sıcaklıklarda dışarı hava çıkmasından (Sekonder, tersiyer ve atık hava gibi) oldukça zorluk arz etmektedir. Bu ünite için ilgili ekserji kaybı hesaplanırken adyabatik şartlarda giren soğutma havasının [A(1)] tamamının aynı sıcaklıkta çıktığı kabul edilmiştir (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Klinker soğutma ünitesinde ekserji kaybının detaylandırılmasının şematik gösterilişi

1-) Kimyasal tepkimeden kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IKS_{kim} = eK_{kim}(1) + eH_{kim}(1) - [eK_{kim}(2) + eH_{kim}(2) + eH_{kim}(3) + eH_{kim}(6)] \quad (4.22)$$

2-) Yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IKS_{yan} = 0 \quad (4.23)$$

3-) Isı-kütle karışımından kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IKS_{kar} = eK(1) + eH(1) - [eK(2) + eH_{ady}] \quad (4.24)$$

4-) Soğutma ünitesi ile çevresi arasındaki ısı transferinden kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IKS_{ısı} = eH_{ady} - [eH(2) + eH(3) + eH(6)] \quad (4.25)$$

5-) Klinker soğutma ünitesindeki toplam tersinmezlik;

$$IKS = IKS_{kim} + IKS_{yan} + IKS_{kar} + IKS_{ısı} \quad (4.26)$$

4.6.2. Döner fırın ünitesinde tersinmezliklerin detaylandırılması

Bu ünite de dört tür ekserji kaybı mevcuttur. Şekil 4.7. göz önüne alınarak kayıp ekserji aşağıdaki gibi detaylandırılır.

1-) Kimyasal tepkimeden kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IDF_{kim} = eY_{kim}(DF) + eF_{kim}(n) + eH_{kim}(3) + eH_{kim}(4) + eH_{kim}(5) - [eK_{kim}(1) + eBG_{kim}(1) + eBT_{kim}(1)] \quad (4.27)$$

2-) Yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IDF_{yan} = [eY_{DF} + eH(3) + eH(4) + eH(5)] - eBG(1)_{ady} \quad (4.28)$$

3-) Isı-kütle karışımından kaynaklanan ekserji kaybı;

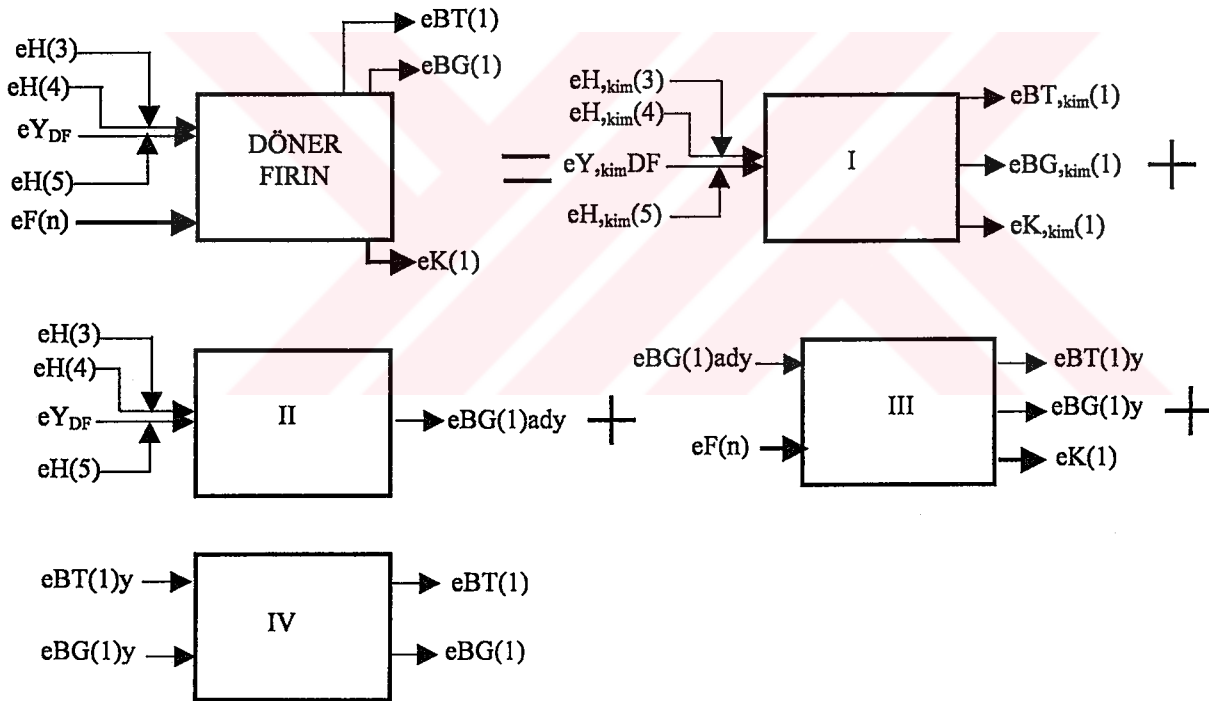
$$IDF_{kar} = eBG(1)_{ady} + eF(n) - [eK(1) + eBG(1)_y + eBT(1)_y] \quad (4.29)$$

4-) Döner fırın ünitesi ile çevresi arasındaki ısı transferinden kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IDF_{ısı} = eBG(1)_y + eBT(1)_y - [eBG(1) + eBT(1)] \quad (4.30)$$

5-) Döner fırın ünitesindeki toplam tersinmezlik;

$$IDF = IDF_{kim} + IDF_{yan} + IDF_{kar} + IDF_{ısı} \quad (4.31)$$



Şekil 4.7. Döner fırın ünitesinde ekserji kaybının detaylandırılmasının şematik gösterilişi

4.6.3. Kalsinatör ünitesinde tersinmezliklerin detaylandırılması

Bu ünite de dört tür ekserji kaybı vardır. Şekil 4.8. göz önüne alınarak aşağıdaki gibi detaylandırılır.

1-) Kimyasal tepkimeden kaynaklanan ekserji kaybı

$$I_{OK,kim} = eY_{kim}(KA) + eF_{kim}(n-1) + eH_{kim}(6) + eH_{kim}(7) + eH_{kim}(8) - [eF_{kim}(n) + eBG_{kim}(2) + eBT_{kim}(2)] \quad (4.32)$$

2-) Yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı;

$$I_{OK,yan} = [eY_{KA} + eH(6) + eH(7) + eH(8)] - eBG(2)_{ady} \quad (4.33)$$

3-) Isı-kütle karışımından kaynaklanan ekserji kaybı;

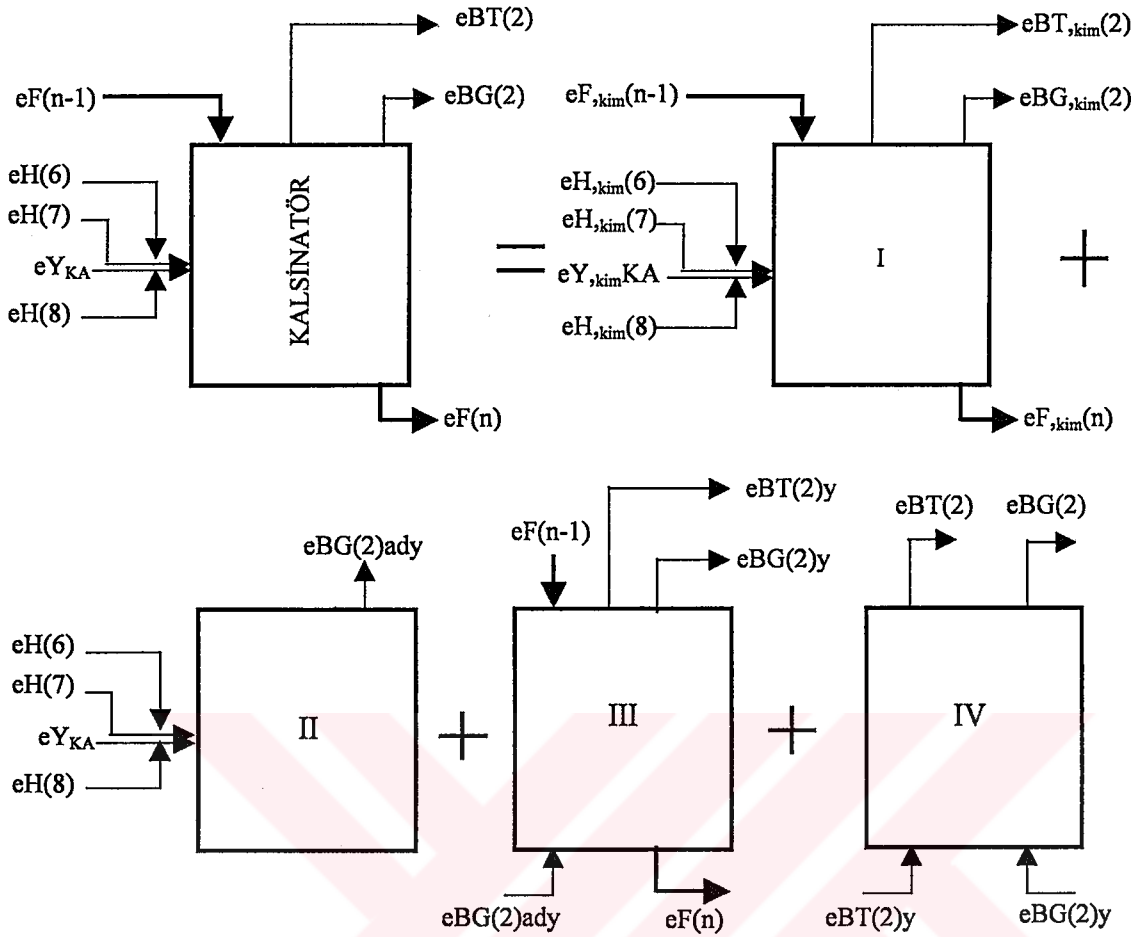
$$I_{OK,kar} = eF(n-1) + eBG(2)_{ady} - [eF(n) + eBG(2)_y + eBT(2)_y] \quad (4.34)$$

4-) Kalsinatör ünitesi ile çevresi arasındaki ısı transferinden kaynaklanan ekserji kaybı;

$$I_{OK,ısı} = eBG(2)_y + eBT(2)_y - [eBG(2) + eBT(2)] \quad (4.35)$$

5-) Kalsinatör ünitesinde toplam tersinmezlik;

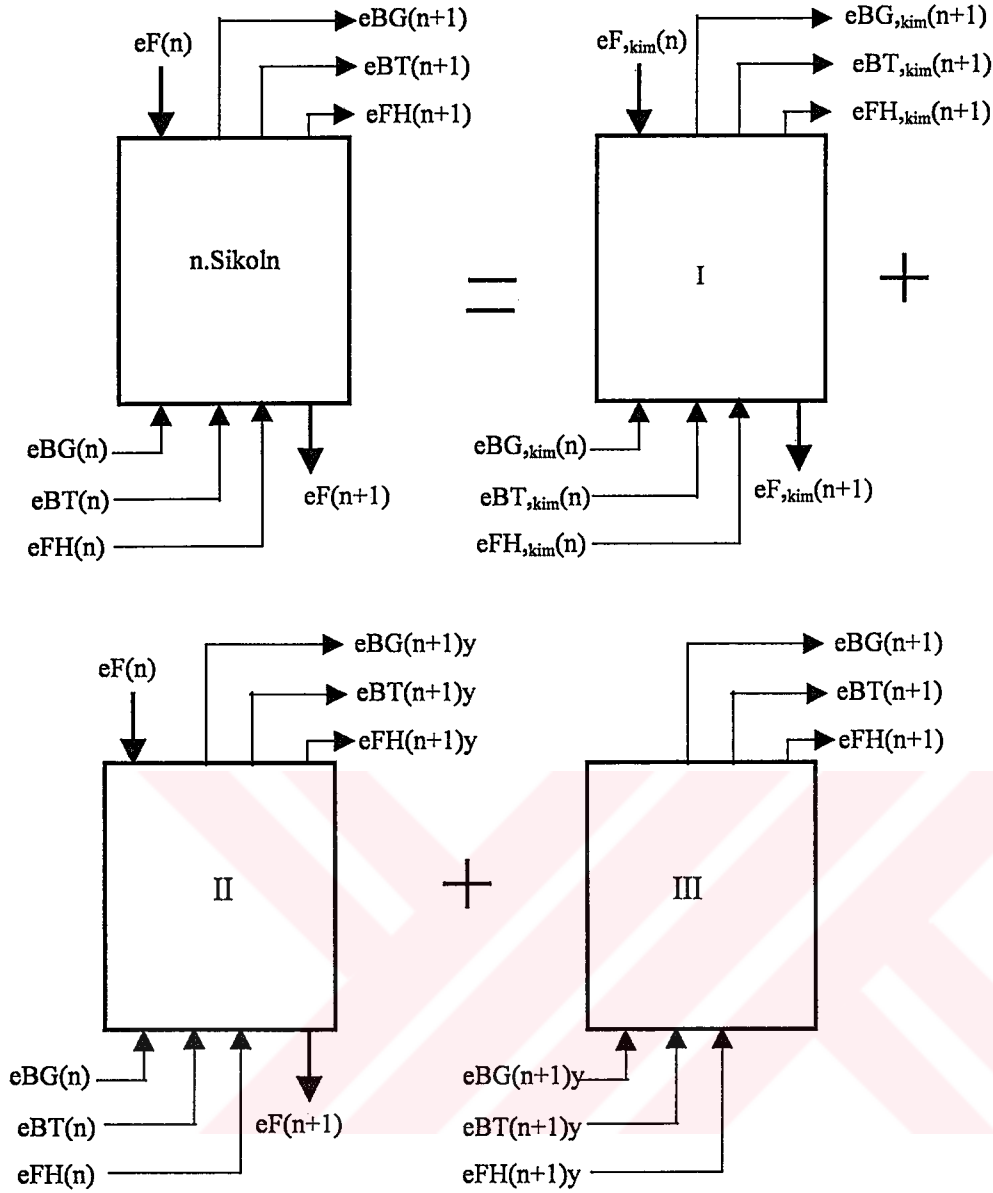
$$I_{OK} = I_{OK,kim} + I_{OK,yan} + I_{OK,kar} + I_{OK,ısı} \quad (4.36)$$



Şekil 4.8. Kalsinatör ünitesinde kayıp ekserjinin detaylandırılmasının şematik gösterilişi

4.6.4. Önısıtıcı siklonlarda tersinmezliklerin detaylandırılması

Bu üniteye yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı yoktur. Önısıtıcı siklon ünitesinde kayıp ekserjinin detaylandırılması Şekil 4.9. de verilmiştir.



Şekil 4.9. Önısıtıcı ünite de kayıp ekserjinin detaylandırılmasının şematik gösterilişi

1-) Kimyasal tepkimeden kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IOI_{kim} = eF_{kim}(n) + eBG_{kim}(n) + eBT_{kim}(n) + eFH_{kim}(n) - [eF_{kim}(n+1) + eBG_{kim}(n+1) + eBT_{kim}(n+1) + eFH_{kim}(n+1)] \quad (4.37)$$

2-) Yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IOI_{yan} = 0 \quad (4.38)$$

3-) Isı-kütle karışımından kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IOI_{kar} = eBG(n) + eBT(n) + eFH(n) + eF(n) - [eF(n+1) + eBG(n+1)_y + eFH(n+1)_y + eBT(n+1)_y] \quad (4.39)$$

4-) Önısıtıcı siklon ünitesi ile çevresi arasındaki ısı transferinden kaynaklanan ekserji kaybı;

$$IOI_{ısı} = eBG(n+1)_y + eBT(n+1)_y + eFH(n+1)_y - [eBG(n+1) + eBT(n+1) + eFH(n+1)] \quad (4.40)$$

5-) Önısıtıcı ünite toplam tersinmezlik;

$$IOI = IOI_{kim} + IOI_{yan} + IOI_{kar} + IOI_{ısı} \quad (4.41)$$

BÖLÜM 5. MATEMATİK MODELLEME VE NÜMERİK SONUÇLAR

5.1. Çimento Üretim Sistemlerinde Matematik Modelleme

Endüstrinin pek çok dalında matematiksel modelleme proseslere yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Çimento endüstrisinde döner fırınlarda çimento klinkeri pişme prosesi için az oranda model geliştirilmiştir. Bunun önemli bir sebebi, ısı transferinin karmaşık bir reaksiyon olması ve fırında kimyasal, fiziksel ve mineralojik reaksiyonların aynı anda gerçekleşmesidir. Prosesleri incelemek için yapılan işletme ölçümleri karmaşık olup, bazı durumlarda teknik açıdan yeterli değildir. Bu ölçümlerin başlıcaları, döner fırın ile kalsinatör arasındaki ısı transferi, her bir siklon kademesinde gaz ile farin beslemesi ve ayrıca ızgaralı soğutucuda soğutma havası ve klinker arasında meydana gelen ısı transferleri ile ilgili ölçümlerdir [44].

Bu çalışmadan önce kütle ve enerji denklikleri ile ilgili yapılmış modelleme çalışmalarında ELKJAER [48] sadece önısıtıcı siklonlarda ısı analiz için modelleme yapmıştır. LOCHER [44, 60, 64, 65] Çimento üretim sistemlerinde kalsinatör, döner fırın ve soğutucu üniteleri ile yanma üzerine ayrı ayrı çalışmalar yapmıştır. KOLİP [23] ise seri akışlı önısıtıcı siklonlu ve önkalsinasyonlu çimento fabrikalarında enerji ve ekserji analizi isimli doktora çalışmasında bu konuda ilk olarak kütle, enerji ve ekserji modellemelerinin üçünü birlikte yapmıştır. ELKJAER' in [48] önısıtıcı siklonlarda enerji tüketimi ve sıcaklıkların belirlenmesi amacıyla hazırladığı matematik modelde girdi olarak fırın sistemi bilgileri ve özgül ısı tüketimi alınmaktadır. Siklon kademelerinde kütle miktarları hesaplanmakta ve hava fazlası, kaçak hava, siklon verimi, primer hava miktarı, yeniden karbonatlaşma, by-pass durumları değişken parametre alınarak bunların özgül ısı tüketimi ve siklon kademelerindeki sıcaklıklara etkileri hesaplanabilmektedir. Bu konuda FEI [58]' nin soğutucu ve fırın sistemi bilgilerini girdi olarak kullanılan bir modelleme çalışması

bulunmaktadır. Bu modelde, kütle ve kalsinasyon miktarı hesaplamalarında hammadde kızdırma kaybı ve kalsinasyon sıcaklıklarının etkisi esas alınarak fırın gazlarındaki toz miktarı ve siklon verimi parametre seçilerek önisıttıcı siklonlarda sıcaklıklar ve özgül ısı tüketiminin değişimi incelenmiştir. Ayrıca GARDEİK [50] daha ziyade klinker soğutucusu üzerinde yoğunlaştırdığı çalışmasını yayınlamıştır. Fırına giren hammadde sıcaklığı ile görünür kalsinasyon derecesi, kalsinatör yakıt enerjisi oranı ile kalsinasyon arasındaki bağıntı ve fırın gazlarındaki toz miktarı değişken parametre alınarak eğriler çizilmiştir.

FRISCH ve arkadaşları [49] tersiyer hava kanallı ve tersiyer hava kanalsız önkalsinasyon sistemlerinin karşılaştırılması için hazırladıkları matematik modelde özellikle döner fırında enerji balansı üzerinde durarak görünür kalsinasyon oranını ve fırın gazlarındaki toz miktarını değişken parametre olarak almışlardır.

Bu çalışmanın daha önce yapılmış olan çalışmalardan farkları şunlardır:

- Bundan önceki çalışmalarda reaksiyon enerjileri girdi olarak verilmesine karşılık bu çalışmada kalsinasyon miktarı ve klinker analizine göre hesaplanmaktadır.
- Döner fırın kayıpları diğer çalışmalarda girdi parametresi olarak alınmasına rağmen bu çalışmada [61, 62, 63]' e göre hesaplanmıştır.
- Bu çalışmada hammadde, yakıt ve yakıt külü analizi girdi parametre olarak giriş ve siklon kademelerindeki katı akımlar ile klinkerin kimyasal analizi hesaplanarak elde edilmektedir.
- Bu çalışmanın diğer bir ilginç yanı kütle denkleğinin CaCO_3 , CaO , MgCO_3 veya (MgO) ve diğer oksitler olmak üzere dört komponentten yola çıkılarak hesaplanmış olmasıdır. Katı akımların hesaplanmasının ardından diğer oksitlerin detaylı analizleri de hesaplanmaktadır. Bu dört komponent yardımıyla siklon kademelerinde yeniden karbonatlaşma, gerçek ve görünür kalsinasyon tanım ve hesaplamaları yapılmıştır.
- Paralel akışlı önkalsinasyonlu çimento üretim sistemine ait daha önce yapılmış her hangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Dolayısıyla yapılan bu modelleme, paralel akışlı önkalsinasyonlu sistem üzerine yapılan ilk çalışmadır. Ayrıca bu çalışmada bundan önceki çalışmalardan farklı olarak, paralel akışlı önkalsinasyonlu çimento

Üretim sistemine ait ünitelerin ve tüm sistemin kütle, enerji ve ekserji analizi modellenmesi yapılmıştır.

- Paralel akışlı önkalsinasyonlu imento üretim sistemine ait hazırlanan bu modelleme için bir bilgisayar programı geliştirilmiştir.
- Geliştirilen bu bilgisayar programı ile tüm sistem ve ünitelere ait katı ve gaz kütle miktarları, katı gaz kütlelerin ünitelere giriş-çıkış sıcaklıkları, enerji ve ekserji denklikleri hesaplanarak tersinmezlikler (kayıp ekserji) detaylandırılmıştır.
- Yapılan modellemeye uygun olarak geliştirilen bilgisayar programı ile paralel akışlı önkalsinasyonlu imento üretim sisteminde değişik parametrelerin (yakıt kalitesi, hava fazlalık katsayısı, kalsinasyon oranı, döner fırın ve kalsinatör arasındaki yakıt dağılımı, soğutucu kaybı, v.b) sistemin özgül enerji tüketimi üzerine etkilerini incelemek mümkündür.

Burada çalışmada yukarıda belirtilen araştırmalarda yapılan modelleme belli bir sistematikte birleştirilmiştir. Ayrıca girdi parametrelerin tamamına yakın bir kısmı hesapla bulunmaktadır. Hesapla bulunmayan parametreler fiili çalışma ve literatüre uygun olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmada, imento üretiminde yaş sistem ve yarı yaş sistemlerinin kuru sisteme adaptasyonları ile kuru sistemin kapasitesinin arttırılması amaçlı olarak önkalsinasyonlu sistem modifikasyonlarına ait makalelerden istifade edilmiştir. Bu çalışmada, özellikle paralel akışlı önkalsinasyonlu imento üretim sistemi üzerinde durulmuştur.

Çalışmamızın genel amacı; hammadde, yakıt ve yakıt külü analizleri esas alınarak paralel akışlı önkalsinasyonlu dört kademeli imento üretim sistemlerinde kütle, enerji ve ekserji denkliklerinin hesaplanması olarak ifade edilebilir.

5.2. Paralel Akışlı nkalsinasyonlu imento retim Sistemlerinde Matematik Modelleme

Burada imento üretim sistemlerinden olan paralel akışlı önkalsinasyonlu dört kademeli sistem için örnek matematik modelleme verilecektir. Paralel akışlı

önkalsinasyonlu kuru sistem çimento fabrikasının kütle ve enerji denklikleri için verilen bu modellemede Bölüm 3.2.7.' de yapılan kabuller geçerlidir. Hazırlanan matematik modellemede kullanılan değişkenler listesi Tablo 5.1.' de verilmiş ve modellemede Şekil 5.1. esas alınmıştır.

Toplam değişken sayısı 129' dur. Modelleme, kolaylık olması için üniteler bazında ayrı ayrı yapılacaktır. Birinci siklondan ve ikinci siklondan çıkan BT1(5) ve BT2(5)' in tekrar sisteme girdiği kabul edildiğinden F(1), X,Y,Z ve V değişkenleri listeye dahil edilmemiştir.

Tablo 5.1. Paralel akışlı kalsinatörlü dört önısıtıcı siklon gruplu çimento fabrikasında değişkenler listesi

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
F	BT(1)	BG(1)	A(1)	T _k (1)	Q _{w,DF}	η ₁	T _F (1)	X _S	X ₀	Y ₀	Z ₀	V ₀
F(2)	BT(2)	BG(2)	A(2)	T _k (2)	Q _{w,KA}	η ₂	T _F (2)= T1(5)	P ₁	X ₁	Y ₁	Z ₁	V ₁
F(3)	BT(3)	BG(3)	A(3)	Th(1)	Q _{w,sog}	η ₃	T _F (3)= T2(5)	P ₂	X ₂	Y ₂	Z ₂	V ₂
F(4)	BT1(3)	BG1(3)	A(4)	Th(2)	Q _{w(1)}	η ₄	T _F (4)= T1(4)	R ₁	X ₃	Y ₃	Z ₃	V ₃
F(5)	BT1(4)	BG1(4)	A(5)	Th(3)	Q _{w(2)}	η ₅	T _F (5)= T2(4)	R _{DF}	X ₄	Y ₄	Z ₄	V ₄
F(6)	BT1(5)	BG1(5)	A(6)	Th(4)	Q _{w(3)}	η ₆	T _F (6)= T1(3)	R _{KA}	X ₅	Y ₅	Z ₅	V ₅
F(7)	BT2(3)	BG2(3)	A(7)	Th(5)	Q _{w(4)}	η ₇	T _F (7)= T2(3)	λ _{DF}	X ₆	Y ₆	Z ₆	V ₆
F(8)	BT2(4)	BG2(4)	A(8)	Th(6)	Q _{w(5)}	η ₈	T _F (8)= T(3)	λ _{KA}	X ₇	Y ₇	Z ₇	V ₇
F(9)	BT2(5)	BG2(5)	GKO	Th(7)	Q _{w(6)}	K	T _F (9)= T(2)	Y _{DF}	X ₈	Y ₈	Z ₈	V ₈
			H ₂ O _F	Th(8)	Q _{w(7)}	FA	T(1)	Y _{KA}	X ₉	Y ₉	Z ₉	V ₉
			T _{y,KA}	T _{y,DF}								
9	18	27	38	49	59	69	79	89	99	109	119	129

Not: 10.11.12 ve 13.sutundakideğişkenler yüzde (%) olarak alınacaktır.

Önısıtıcı siklon ünitesinde:

1.Siklon:

$$BG1(5) = BG1(4) + Fw + KKw$$

$$F.X_0 + BT1(4).X_3 = X_1.[F(2) + BT1(5)]$$

$$F.Y_0 + BT1(4).Y_3 = Y_1.[F(2) + BT1(5)]$$

$$F.Z_0 + BT1(4).Z_3 = Z_1.[F(2) + BT1(5)]$$

$$F.V_0 + BT1(4).V_3 = V_1.[F(2) + BT1(5)]$$

$$X_1 + Y_1 + Z_1 + V_1 = 1$$

$$BT1(5) = F(2).(1-\eta_1)/\eta_1$$

Enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik.

1'.Siklon:

$$BG2(5) = BG2(4)$$

$$F(2).\underline{X}_1 + BT2(4).\underline{X}_4 = \underline{X}_2.[F(3) + BT2(5)]$$

$$F(2).\underline{Y}_1 + BT2(4).\underline{Y}_4 = \underline{Y}_2.[F(3) + BT2(5)]$$

$$F(2).\underline{Z}_1 + BT2(4).\underline{Z}_4 = \underline{Z}_2.[F(3) + BT2(5)]$$

$$F(2).\underline{V}_1 + BT2(4).\underline{V}_4 = \underline{V}_2.[F(3) + BT2(5)]$$

$$\underline{X}_2 + \underline{Y}_2 + \underline{Z}_2 + \underline{V}_2 = 1$$

$$BT2(5) = F(3).(1-\eta_2)/\eta_2$$

Enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik.

2.Siklon:

$$BG1(4) = BG1(3)$$

$$F(3).\underline{X}_2 + BT1(3).\underline{X}_5 = \underline{X}_3.[F(4) + BT1(4)]$$

$$F(3).\underline{Y}_2 + BT1(3).\underline{Y}_5 = \underline{Y}_3.[F(4) + BT1(4)]$$

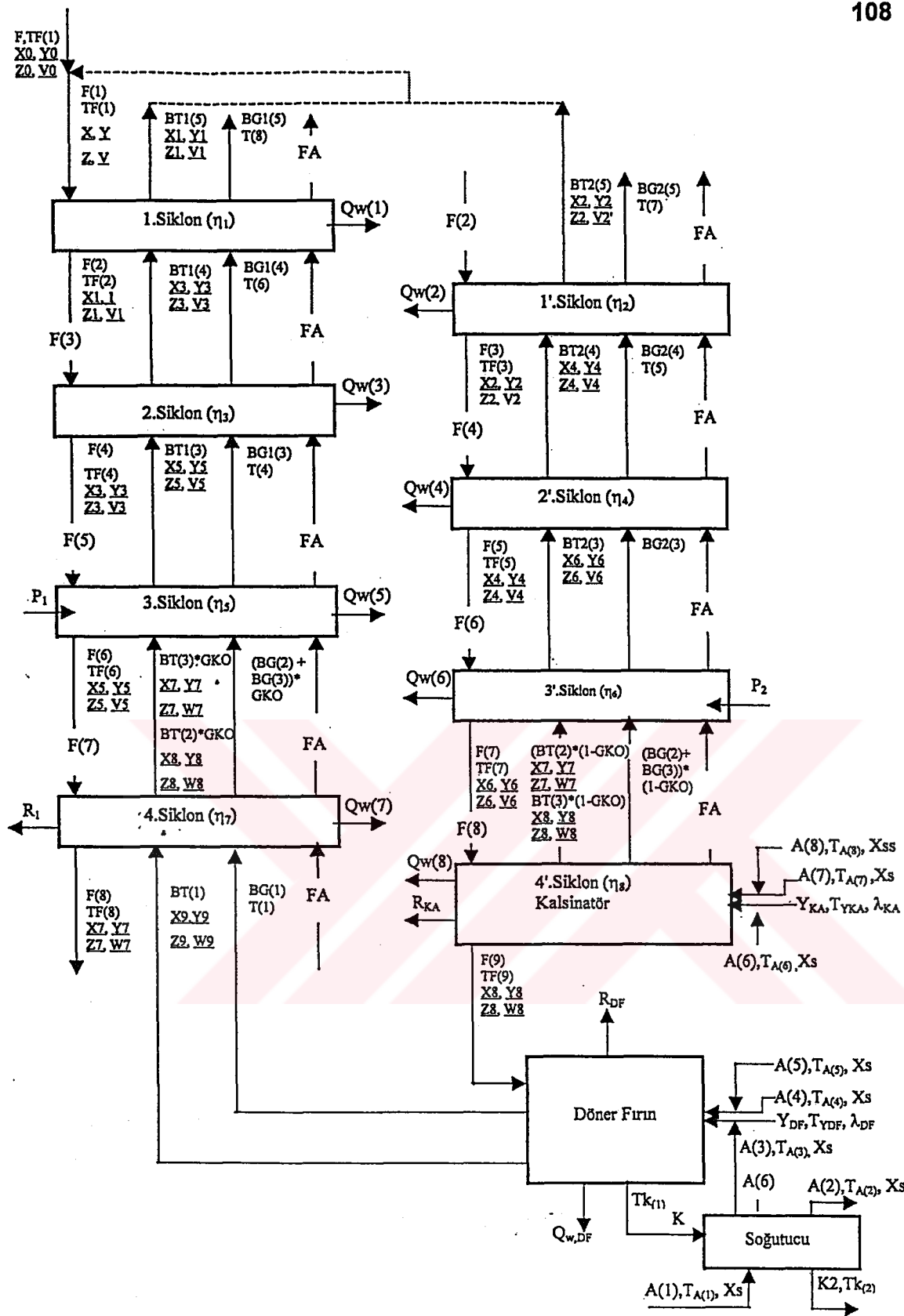
$$F(3).\underline{Z}_2 + BT1(3).\underline{Z}_5 = \underline{Z}_3.[F(4) + BT1(4)]$$

$$F(3).\underline{V}_2 + BT1(3).\underline{V}_5 = \underline{V}_3.[F(4) + BT1(4)]$$

$$\underline{X}_3 + \underline{Y}_3 + \underline{Z}_3 + \underline{V}_3 = 1$$

$$BT1(4) = F(4).(1-\eta_3)/\eta_3$$

Enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik.



Şekil 5.1. Dört kademeli önkalsinasyonlu çimento fabrikasında modelleme için kullanılan değişkenler

2'.Siklon:

$$BG2(4) = BG2(3)$$

$$F(4).\underline{X}_3 + BT2(3).\underline{X}_6 = \underline{X}_4.[F(5) + BT2(4)]$$

$$F(4).\underline{Y}_3 + BT2(3).\underline{Y}_6 = \underline{Y}_4.[F(5) + BT2(4)]$$

$$F(4).\underline{Z}_3 + BT2(3).\underline{Z}_6 = \underline{Z}_4.[F(5) + BT2(4)]$$

$$F(4).\underline{V}_3 + BT2(3).\underline{V}_6 = \underline{V}_4.[F(5) + BT2(4)]$$

$$\underline{X}_4 + \underline{Y}_4 + \underline{Z}_4 + \underline{V}_4 = 1$$

$$BT2(4) = F(5).(1-\eta_4)/\eta_4$$

Enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik

3.Siklon:

$$BG1(3) = [(GKO).(BG(2) + BG(3))] - \{P1.(44/56).[F(5).\underline{Y}_4 + (GKO).(BT(2).\underline{Y}_8 + BT(3).\underline{Y}_7)\}$$

$$F(5).\underline{X}_4 + [(GKO).(BT(2).\underline{X}_{78} + BT(3).\underline{X}_7)] + \{P1.(100/56).[F(5).\underline{Y}_4 + (GKO).(BT(2).\underline{Y}_8 + BT(3).\underline{Y}_7)\} = \underline{X}_5.[F(6) + BT1(3)]$$

$$(1-P1).[F(5).\underline{Y}_4 + (GKO).(BT(2).\underline{Y}_8 + BT(3).\underline{Y}_7)] = \underline{Y}_5.[F(6) + BT1(3)]$$

$$[F(5).\underline{Z}_4 + (GKO).(BT(2).\underline{Z}_8 + BT(3).\underline{Z}_7)] = \underline{Z}_5.[F(6) + BT1(3)]$$

$$[F(5).\underline{V}_4 + (GKO).(84/40).(BT(2).\underline{W}_8 + BT(3).\underline{W}_7)] = \underline{V}_5.[F(6) + BT1(3)]$$

$$\underline{X}_5 + \underline{Y}_5 + \underline{Z}_5 + \underline{V}_5 = 1$$

$$BT1(3) = F(6).(1-\eta_5)/\eta_5$$

Enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik.

3'.Siklon:

$$BG2(3) = (1-GKO).[BG(2) + BG(3)] - \{P2.(44/56).[F(6).\underline{Y}_5 + (1-GKO).[BT(2).\underline{Y}_8 + BT(3).\underline{Y}_7]\}$$

$$F(6).\underline{X}_5 + [(1-GKO).(BT(2).\underline{X}_8 + BT(3).\underline{X}_7)] + \{P2.(100/56).[F(6).\underline{Y}_5 + (1-GKO).(BT(2).\underline{Y}_8 + BT(3).\underline{Y}_7)\} = \underline{X}_6.[F(7) + BT2(3)]$$

$$(1-P2).\{F(6).\underline{Y}_5 + (1-GKO).[BT(2).\underline{Y}_8 + BT(3).\underline{Y}_7]\} = \underline{Y}_6.[F(7) + BT2(3)]$$

$$\{F(6).\underline{Z}_5 + (1-GKO).[BT(2).\underline{Z}_8 + BT(3).\underline{Z}_7]\} = \underline{Z}_6.[F(7) + BT2(3)]$$

$$\{F(6).\underline{V}_5 + (1-GKO).(84/40).[BT(2).\underline{W}_8 + BT(3).\underline{W}_7]\} = \underline{V}_6.[F(7) + BT2(3)]$$

$$\underline{X}_6 + \underline{Y}_6 + \underline{Z}_6 + \underline{V}_6 = 1$$

$$BT2(3) = F(7).(1-\eta_6)/\eta_6$$

Enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik

4.Siklon:

$$BG(3) = BG(1) + (44/100).R1.[F(7).\underline{X}_6 + BT(1).\underline{X}_9] + F(7).\underline{V}_6.(44/84)$$

$$F(7).\underline{X}_6 + BT(1).\underline{X}_9 - R1.[F(7).\underline{X}_6 + BT(1).\underline{X}_9] = \underline{X}_7.[F(8) + BT(3)]$$

$$F(7).\underline{Y}_6 + BT(1).\underline{Y}_9 + R1.(100/56).[F(7).\underline{Y}_6 + BT(1).\underline{X}_9] = \underline{Y}_7.[F(8) + BT(3)]$$

$$F(7).\underline{Z}_6 + BT(1).\underline{Z}_9 = \underline{Z}_7.[F(8) + BT(3)]$$

$$F(7).\underline{V}_6.(40/84) + BT(1).\underline{W}_9 = \underline{W}_7.[F(8) + BT(3)]$$

$$\underline{X}_7 + \underline{Y}_7 + \underline{Z}_7 + \underline{W}_7 = 1$$

$$BT(3) = F(8).(1-\eta_7)/\eta_7$$

Enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik

Kalsinatör ünitesi hariç olmak üzere diğer yedi siklon için 91 adet değişken vardır.

Bu değişken listesi Tablo 5.2.' de verilmektedir.

Tablo 5.2. Önisıtıcı siklon grubuna ait değişkenler listesi

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F	BT(1)	BG(1)	FA	$Q_{W(1)}$	η_1	$T_F(1)$	$\underline{X}_0$	$\underline{Y}_0$	$\underline{Z}_0$	$\underline{V}_0$
F(2)	BT(2)	BG(2)	P_1	$Q_{W(2)}$	η_2	$T_F(2)=T1(5)$	$\underline{X}_1$	$\underline{Y}_1$	$\underline{Z}_1$	$\underline{V}_1$
F(3)	BT(3)	BG(3)	P_2	$Q_{W(3)}$	η_3	$T_F(3)=T2(5)$	$\underline{X}_2$	$\underline{Y}_2$	$\underline{Z}_2$	$\underline{V}_2$
F(4)	BT1(3)	BG1(3)	R_1	$Q_{W(4)}$	η_4	$T_F(4)=T1(4)$	$\underline{X}_3$	$\underline{Y}_3$	$\underline{Z}_3$	$\underline{V}_3$
F(5)	BT1(4)	BG1(4)	GKO	$Q_{W(5)}$	η_5	$T_F(5)=T2(4)$	$\underline{X}_4$	$\underline{Y}_4$	$\underline{Z}_4$	$\underline{V}_4$
F(6)	BT1(5)	BG1(5)	$H_2O_{,F}$	$Q_{W(6)}$	η_6	$T_F(6)=T1(3)$	$\underline{X}_5$	$\underline{Y}_5$	$\underline{Z}_5$	$\underline{V}_5$
F(7)	BT2(3)	BG2(3)		$Q_{W(7)}$	η_7	$T_F(7)=T2(3)$	$\underline{X}_6$	$\underline{Y}_6$	$\underline{Z}_6$	$\underline{V}_6$
F(8)	BT2(4)	BG2(4)				$T_F(8)=T(3)$	$\underline{X}_7$	$\underline{Y}_7$	$\underline{Z}_7$	$\underline{W}_7$
	BT2(5)	BG2(5)				$T(1)$	$\underline{X}_9$	$\underline{Y}_9$	$\underline{Z}_9$	$\underline{W}_9$
8	17	26	32	39	46	55	64	73	82	91

Ayrıca yukarıda görüldüğü gibi tepkime olsun veya olmasın her bir siklon için 8 adet denklem yazılabilmektedir. Bu durumda serbestlik derecesi;

$$n_{sd,ös} = 91 - (8.7)$$

$$= 35$$

Kalsinatör siklon ünitesi:

$$A(6) + A(7) + A(8) = f_k(Y_{KA}, \lambda_{KA})$$

$$F(8).X_7 - R_2.[F(8).X_7] = X_8.[F(9) + BT(2)]$$

$$F(8).Y_7 + R_2.(56/100).[F(8).X_7] = Y_8.[F(9) + BT(2)]$$

$$F(8).Z_7 = Z_8.[F(9) + BT(2)]$$

$$F(8).BG(2) = f_{KA}(Y_{KA}, \lambda_{KA}, H_{KA}) + (44/100).R_2.[F(8).X_7]$$

$$W_7 = W_8.[F(9) + BT(2)]$$

$$X_8 + Y_8 + Z_8 + W_8 = 1$$

$$BT(2) = F(9).(1 - \eta_8)/\eta_8$$

Enerji denkliği olmak üzere 9 adet denklik.

Kalsinatör ünitesi için değişkenler listesi ise Tablo 5.3.' de verilmektedir.

Tablo 5.3. Kalsinatör ünitesi için değişkenler listesi

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F(8)	BT(2)	A(6)	Th(6)	Xs	η_8	$T_F(9)=T(2)$	X_7	Y_7	Z_7	W_7
F(9)	BG(2)	A(7)	Th(7)	λ_{KA}	R_{KA}	$T_F(8)$	X_8	Y_8	Z_8	W_8
		A(8)	Th(8)	Y_{KA}	$Q_{W(8)}$	$T_{Y,KA}$				
2	4	7	10	13	16	19	21	23	25	27

Kalsinatör ünitesinde değişken sayısı 27 tanedir. Bu durumda serbestlik derecesi ise;

$$n_{sd,ka} = 27-9$$

$$= 18$$

Döner fırın ünitesi:

Döner fırın ünitesinde denklikler ise aşağıdaki gibidir.

$$BG(1) = f(Y_{DF}, H_{DF}, \lambda_{DF}) + F(9).X_8.R_{DF}.(44/100)$$

$$A(3) + A(4) + A(5) = f(Y_{DF}, \lambda_{DF})$$

$$F(9).Y_8 + (56/100).R_{DF}.F(9).X_8 = Y_9.[BT(1) + K]$$

$$F(9).Z_8 = Z_9.[BT(1) + K]$$

$$F(9).W_8 = W_9.[BT(1) + K]$$

$$X_9 + Y_9 + Z_9 + W_9 = 1$$

Döner fırında duvar ısı kaybı formülü ve enerji denkliği olmak üzere 8 adet denklik
Döner fırın ünitesi için değişkenler listesi ise Tablo 5.4.' de verilmektedir.

Tablo 5.4. Döner fırın ünitesinde değişken listesi

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F(9)	BT(1)	A(3)	Th(3)	T _{v,DF}	T(1)	Y _{DF}	X ₈	Y ₈	Z ₈	W ₈
K(1)	BG(1)	A(4)	Th(4)	T _{F(9)}	λ _{DF}	X _s	X ₉	Y ₉	Z ₉	W ₉
		A(5)	Th(5)	Tk(1)	R _{DF}	Q _{w,DF}				
2	4	7	10	13	16	19	21	23	25	27

Döner fırın ünitesinde değişken sayısı 27 tanedir. Bu durumda serbestlik derecesi ise;

$$n_{sd,df} = 27-8$$

$$= 19$$

Klinker soğutma ünitesi:

Klinker soğutma ünitesinde denklikler ise aşağıdaki gibidir.

$$K = K(1) = K(2)$$

$$A(1) = A(2) + A(3) + A(6)$$

Enerji denkliği olmak üzere iki adet denklik

Klinker soğutma ünitesinde değişken sayısı Tablo 5.5.' de verilmektedir.

Tablo 5.5. Klinker soğutma ünitesinde değişken listesi

1	2	3	4	5	6	7
A(1)	A(6)	Tk(1)	Th(2)	Q _{w,sog}	X ₉	W ₉
A(2)	K(2)	Tk(2)	Th(3)		Y ₉	Z ₉
A(3)		Th(1)	Th(6)			
3	5	8	11	12	14	16

Soğutma ünitesindeki serbestlik derecesi;

$$n_{sd,sog} = 16-2$$

$$= 14$$

Paralel akışlı kalsinatörlü dört önısıtıcı siklon kademeli sistem bir bütün olarak ele alındığında toplam serbestlik derecesi;

$$n_{sd,tsis} = 129-(56+9+8+2)$$

= 54

Tablo 5.6.' da verilen değişkenler, serbestlik dereceleri için kullanılmıştır.

Tablo 5.6. Önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento fabrikasında atanan değişkenler listesi

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$QW_{(1)}$	$QW_{(8)}$	η_1	Th(1)	Th(6)	T(1)	FA	A(1)	$\underline{X}_9$
$QW_{(2)}$	QW_{DF}	η_2	Th(2)	Th(7)	Tk(1)	λ_{DF}	BT(1)	$\underline{Y}_9$
$QW_{(3)}$	$QW_{soğ}$	η_3	Th(3)	Th(8)	Tk(2)	λ_{KA}	K	$\underline{Z}_9$
$QW_{(4)}$		η_4	Th(4)	TF(1)	$T_{y,DF}$	R_{DF}	TSO	$\underline{W}_9$
$QW_{(5)}$		η_5	Th(5)	TF(9)	$T_{y,KA}$	R_{KA}	GKO	$\underline{Y}_0$
$QW_{(6)}$		η_6				R_1	$H_2O_{,F}$	$\underline{V}_9$
$QW_{(7)}$		η_7				P_1	Xs	
		η_8				P_2		
7	10	18	23	28	33	41	48	54

5.3. Matematik Modelin Program Algoritması

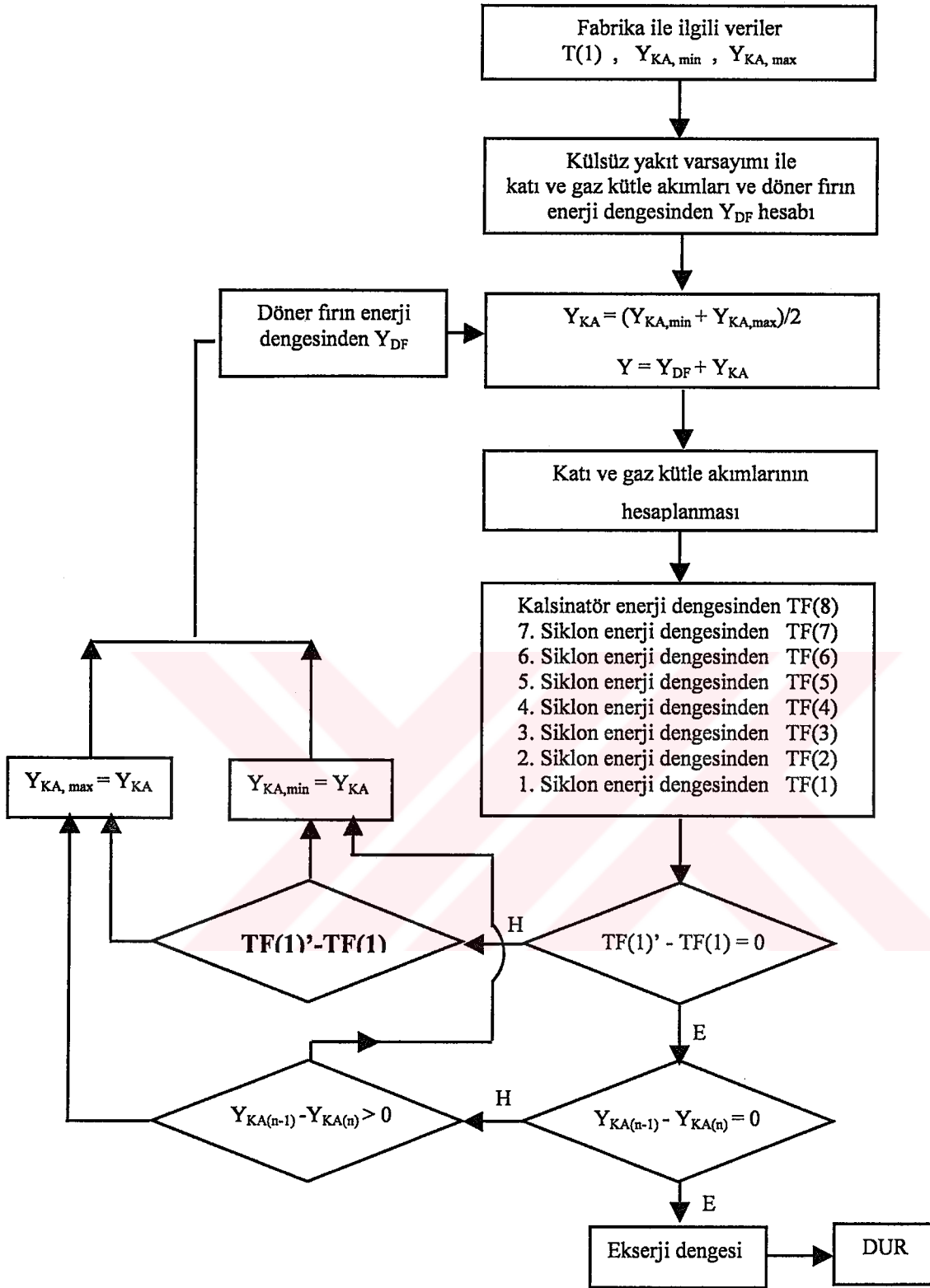
Önkalsinasyonlu kuru sistem çimento fabrikalarında klinker soğutucusu, kalsinatör, döner fırın ve önısıtıcı siklon üniteleri yer alır. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli sistem için detaylı olarak yapılan modellemede toplam serbestlik derecesi 54 olarak hesaplanmış olup çözüme gidilebilmesi için atanan değişkenler Tablo 5.6.' da verilmiştir. . Değişkenler açısından önısıtıcı siklon ünitelerinin sayısına bağlı olarak siklon grubunun serbestlik derecesi değişir. Önkalsinasyonlu sistem çimento fabrikası için yukarıda belirtilen değişkenlerin çözümü için geliştirilen bilgisayar programının akış şeması Şekil 5.2.' de verilmiştir.

Bu programın çözüm algoritması şu şekildedir. İlk önce önkalsinasyonlu çimento fabrikasına ait veriler programa data olarak girilir. Döner fırın çıkış sıcaklığı sabit parametre ve önkalsinatör yakıtı için minimum ve maksimum değerler belirlenerek hedef parametre seçilir (programda önısıtıcı siklon guruplarına giren hammadde sıcaklığı). Böylece döner fırın enerji denkleğinden döner fırın yakıtı, kalsinatör için minimum ve maksimum değerlerle yapılan iteratif yaklaşımla bulunan yakıt miktarı dikkate alınarak tüm sistem için kütle ve enerji denklikleri hesaplanır. Programda iteratif yaklaşım, yarıya bölme metodu ile yapılmıştır. Kalsinatör enerji denkleği yardımıyla kalsinatöre gelen hammadde sıcaklığı TF(8) hesaplanır. Kalsinatörün

hemen üzerindeki siklondan itibaren yukarıya doğru gidilerek her bir siklon için enerji denklileri yapılır ve her defasında siklona giren hammadde sıcaklığı hesaplanır.

En üst yani birinci siklonda yapılan enerji denklisi sonucu bulunan hammadde giriş sıcaklığının TF(1) başlangıçta verilen hedef parametre sıcaklığına eşit olup olmadığı karşılaştırılır. Sıcaklık eşit çıkarsa işleme ekserji denklisi ile devam edilir. Eğer eşit çıkmaz ise hesapla bulunan sıcaklığın başlangıçta kabul edilen sıcaklıktan büyük veya küçük olması durumuna göre iterasyonla yeni yakıt hesaplanır ve yukarıdaki işlemler yeniden tekrarlanır. Başlangıçta kabul edilen hammadde giriş sıcaklığı ile programda hesaplanan sıcaklığın denkleştigi iterasyonda hesaplanan kütle ve enerjiler esas alınarak ekserji analizi hem tüm sistem hem de üniteler bazında yapılır.





Şekil 5.2. Paralel akışlı kalsinatörlü çimento fabrikasında kütle, enerji ve ekserji denkliliklerini hesaplayan bilgisayar programı akış şeması

5.4. Analizler ve Standart Parametreler

Kısım 5.3. de Algoritması izah edilen ve akış şeması verilen bilgisayar programına verilen hammadde, kömür külü ve çeşitli yakıt türlerine (katı, sıvı, gaz) ait analizler Tablo 5.7. ve Tablo 5.8.' de sunulmuştur.

Tablo 5.7. Hammadde ve kömür külü analizi [95]

Bileşenler (%)	Hammadde (%)	Kömür külü (%)
CaCO ₃	77,50	-
SiO ₂	42,672	17,05
Al ₂ O ₃	13,607	43,81
Fe ₂ O ₃	3,481	25,52
CaO	2,151	5026
MgO	1,511	2,19
SO ₃	-	5,20
Nem	0,74	-
Uoo	63,422	93,83

Tablo 5.8. Yakıt türlerine ait analizler

Bileşenler	Normal Kömür (%)	Test Kömürü (%)	Fuel-oil (%)
C	57,00	78,00	86,00
H	4,30	5,00	12,00
O	5,86	6,00	1,00
S	4,19	1,00	0,10
N	1,50	1,50	1,00
Nem	2,00	0,00	0,00
Kül	25,15	8,50	0,10
Hu(kJ/kg-yakıt)	20600	3250	43534

Paralel akışlı önkalsinasyonlu çimento üretim prosesi esas alınarak dört önısıtıcı siklon kademeli sistem için hesaplamalarda kullanılan standart parametreler Tablo 5.9. da verilmiştir.

Tablo 5.9. Kalsinatörlü çimento fabrikası için standart parametreler

Parametreler	Sembol	Birim	Değeri
1 Kg Klinker (temel alınmıştır)	K	1	Kg
Döner fırından baca gazlarıyla sürüklenen baca tozu	BT(1)	0,15	Kg
Soğutucuya verilen hava	A(1)	2,50	m ³
Kaçak sızıntı hava	FA	0,00	Kg
Çevre havasının nispi nemi	Xs	0,0128	gr
Hammaddenin nemi	H ₂ O _F	0,74	%
3.Siklonda yeniden karbonatlaşma oranı	P ₁	1,00	%
3'.Siklonda yeniden karbonatlaşma oranı	P ₂	3,00	%
4.Siklonda kalsinasyon oranı	R ₁	6,00	%
Soğutucuya girişteki klinker sıcaklığı	Tk(1)	1350,00	°C
Soğutucu çıkışındaki klinker sıcaklığı	Tk(2)	100,00	°C
İlk siklona girişte hammadde sıcaklığı	TF(1)	60,00	°C
Döner fırına girişte hammadde sıcaklığı	TF(9)	860,00	°C
Döner fırın yakıt sıcaklığı	Ty,DF	25	°C
Kalsinatör yakıtın sıcaklığı	Ty,KA	25	°C
<u>Duvar ısı kayıpları</u>			
1. Siklonda	Q _w (1)	40,00	KJ
2. Siklonda	Q _w (2)	35,00	KJ
3. Siklonda	Q _w (3)	33,00	KJ
4. Siklonda	Q _w (4)	25,00	KJ
5. Siklonda	Q _w (5)	25,00	KJ
6. Siklonda	Q _w (6)	25,00	KJ
7. Siklonda	Q _w (7)	25,00	KJ
8. Kalsinatör ünitesi	Q _w (8)	45,00	KJ
<u>Siklon verimleri</u>			
1. Siklon	η ₁	95	%
2. Siklon	η ₂	95	%
3. Siklon	η ₃	90	%
4. Siklon	η ₄	90	%
5. Siklon	η ₅	85	%
6. Siklon	η ₆	85	%
7. Siklon	η ₇	80	%
Kalsinatör ünitesi	η ₈	75	%
Kalsinatördeki kalsinasyon oranı	R _{KA}	95	%
Döner fırındaki kalsinasyon oranı	R _{DF}	100,00	%
Soğutucu ünite de duvar ısı kaybı	Q _{w,soğ}	15,00	KJ
Döner fırından çıkan baca gazı sıcaklığı	T(1)	1100,00	°C
Döner fırın hava fazlalık katsayısı	λ _{DF}	15,00	%
Kalsinatör hava fazlalık katsayısı	λ _{KA}	15,00	%
3. ve 3'. Siklonlara giren baca gazı ve tozu oranı	GKO	50,00	%
Tersiyer havanın Toplam Sekonder havaya oranı	TSO	77,00	%
1. Siklona girişte hammadde de CaCO ₃ yüzdesi	X ₀	77,27	%
Klinkerdeki CaCO ₃ yüzdesi	X ₉	0,00	%
1. Siklona girişte hammadde de CaO yüzdesi	Y ₀	0,00	%
Klinkerdeki CaO yüzdesi	Y ₉	64,618	%

Tablo 5.9' un devamı

1. Siklona girişte hammadde de $MgCO_3$	V_0	1,53	%
Klinkerdeki MgO yüzdesi	W_9	2,352	%
1. Siklona girişte hammadde de diğer oksitlerin yüzdesi	Z_0	21,20	%
Klinkerdeki diğer oksitlerin yüzdesi	Z_9	31,836	%
Soğutucuya giren hava sıcaklığı	Th(1)	25,00	$^{\circ}C$
Soğutucudan atılan hava sıcaklığı	Th(2)	220,00	$^{\circ}C$
Sekonder hava sıcaklığı	Th(3)	730,00	$^{\circ}C$
Döner fırın yakıt taşıma havası sıcaklığı	Th(4)	120	$^{\circ}C$
Döner fırın primer hava sıcaklığı	Th(5)	25,00	$^{\circ}C$
Kalsinatöre giren tersiyer hava sıcaklığı	Th(6)	900,00	$^{\circ}C$
Kalsinatör yakıt taşıma havası sıcaklığı	Th(7)	120	$^{\circ}C$
Kalsinatör primer hava sıcaklığı	Th(8)	25,00	$^{\circ}C$

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört kademeli çimento üretim sistemi için normal kömür, test kömürü ve fuel-oil analizleriyle altı farklı parametre (Tablo 5.10.) kullanılmıştır. Kullanılan parametreler yardımıyla normal kömür, test kömürü ve fuel-oil yakıtları ile elde edilen ekserji ve enerji denkliği sonuçlarına ait grafikler Bölüm 6' da verilerek yorumlanacaktır.

Tablo 5.10 Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sistemi modellemesin' de kullanılan parametre ve aralıkları

Parametreler	Değer aralıkları
Hava fazlalık katsayısı	1,08; 1,10; 1,11; 1,12; 1,13; 1,14; 1,15; 1,16; 1,18; 1,18; 1,19; 1,20; 1,21; 1,22; 1,23
Döner fırından çıkan baca tozu miktarı (kg/kg.klinker))	0,08; 0,10; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24
Tersiyer havanın/(Tersiyer + Sekonder) havaya oranı	0,68; 0,70; 0,72; 0,74; 0,76; 0,78; 0,80; 0,82; 0,84; 0,86
Görünür kalsinasyon oranı	0,87; 0,88; 0,89; 0,90; 0,91; 0,92
Hammaddenin döner fırına giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)	800; 815; 830; 845; 860; 875; 890; 900
Baca tozu ve baca gazının döner fırından çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)	900; 950; 1000; 1050; 1100; 1150; 1200

BÖLÜM 6. NÜMERİK SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1.Giriş

Bu bölümde, paralel akışlı dört önısıtıcı siklon kademeli önkalsinasyonlu çimento üretim prosesi için Bölüm 5, Kısım 3' te (Şekil 5.2.) akış şeması ve algoritması verilen bilgisayar programından

- Hava fazlalık katsayısı,
- Baca tozu miktarı,
- Tersiyer havanın (sekonder+tersiyer) havaya oranı,
- Görüntür kalsinasyon oranı,
- Döner fırına giren hammadde sıcaklığı,
- Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı,

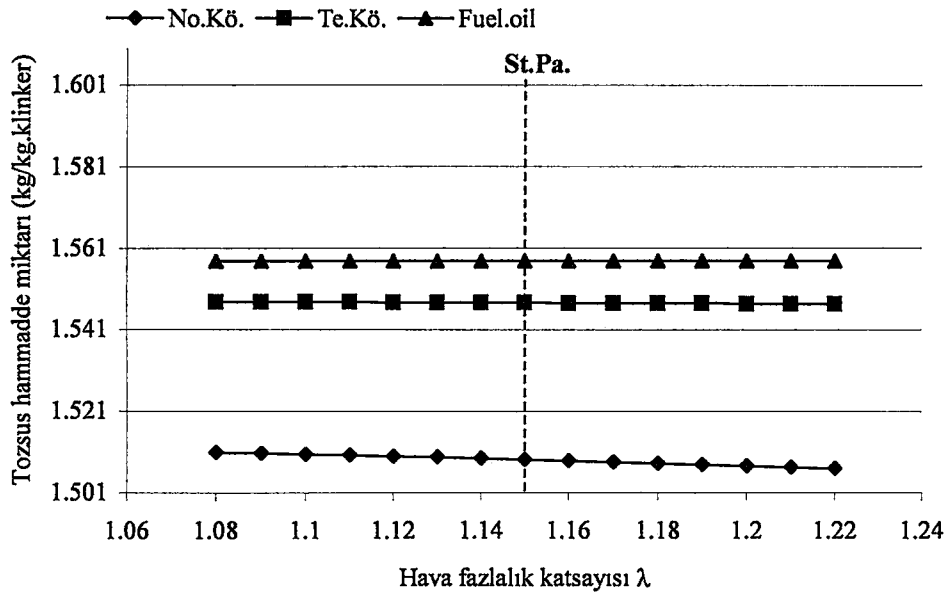
olarak seçilen değişken parametrelere ait sistemin baca gazı ve baca tozu çıkışı sıcaklık değişimi, kütle, enerji ve ekserji denkliklerinden elde edilen nümerik sonuçlar kullanılarak çizilen grafiklerin değerlendirilmesi örnek olması bakımından sadece hava fazlalık katsayısı parametresi için yapılmıştır. Diğer beş parametre için ise kütle, enerji ve ekserji değişimlerinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

6.2. Değişken Parametre Olarak Hava Fazlalık Katsayısının Değerlendirilmesi

Hava fazlalık katsayısı parametresi diğer parametrelerden farklı olarak ele alınmış ve kütle, sıcaklık, enerji ve ekserji grafikleri çizilmiştir.

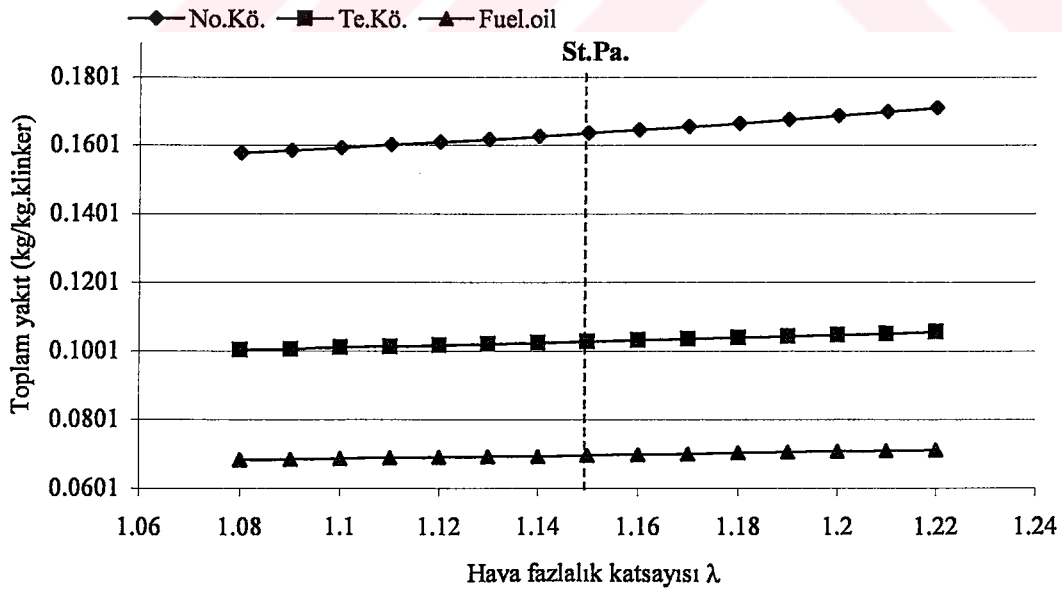
6.2.1. Hava fazlalık katsayısının kütleye etkisinin değerlendirilmesi

Hava fazlalık katsayısının değişken parametre olarak tozsuz hammadde miktarına etkisi Şekil 6.1., sistemin toplam yakıt miktarına olan etkisi Şekil 6.2. ve kalsinatör yakıtına ait etkisi ise Şekil 6.3. de görülmektedir.



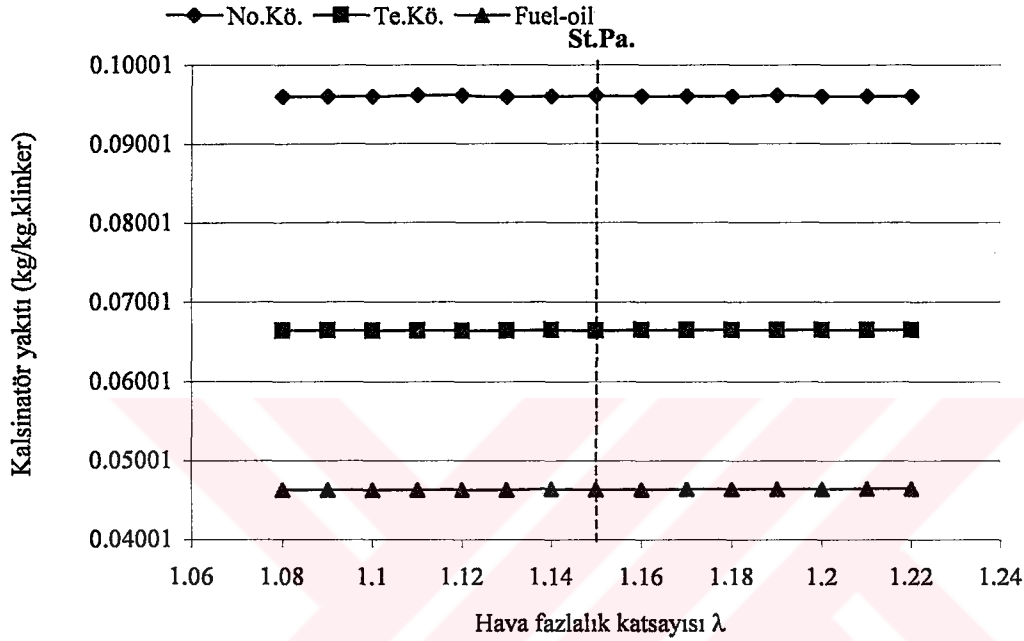
Şekil 6.1. Hava fazlalık katsayısı parametresinin tozsuz hammadde miktarına etkisi

Şekil 6.1.de görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısının artması ile kullanılan yakıtlar içinde normal kömür için tozsuz hammadde miktarında değişim olmaktadır, test kömürü ve fuel-oil yakıtlarında ise tozsuz hammadde miktarı sabittir.



Şekil 6.2. Hava fazlalık katsayısı parametresinin toplam yakıt miktarı değişimine etkisi

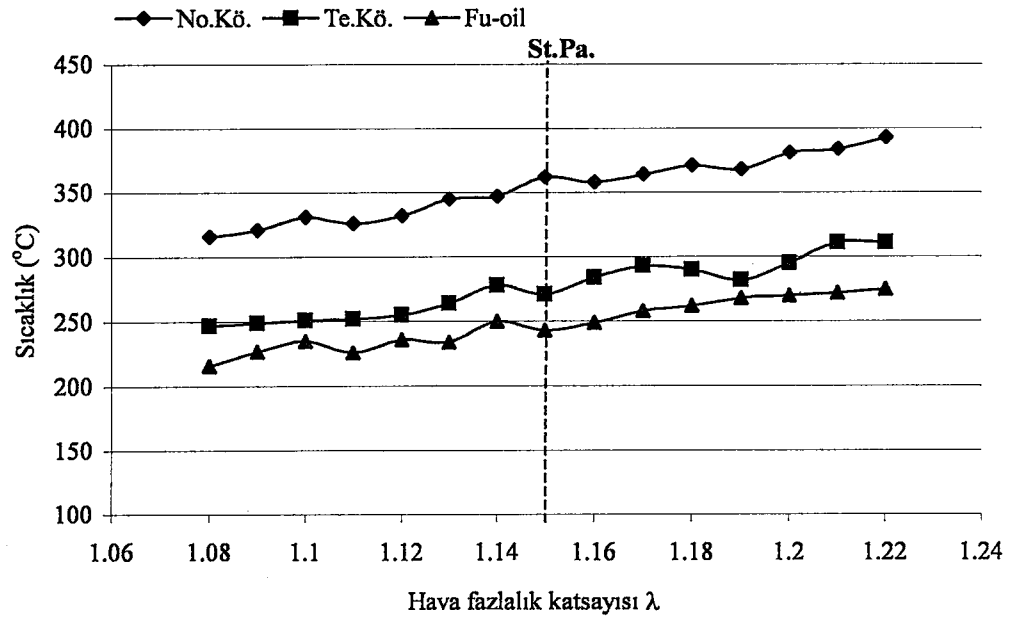
Şekil 6.2. de hava fazlalık katsayısının artmasının sistemin baca gazlarında O_2 miktarını, gaz sıcaklığını, ısı tüketimi ve bunun sonucu olarak kullanılan yakıt miktarını arttırdığı görülmektedir. Ayrıca hava fazlalık katsayısındaki değişim yakıtlardan en çok normal kömür miktarını etkilemektedir. Şekil 6.3. de ise kalsinatör yakıtının hava fazlalık katsayısına bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 6.3. Hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatör yakıt değişimine etkisi

6.2.2. Hava fazlalık katsayısının baca gazı çıkış sıcaklığına etkisinin değerlendirilmesi

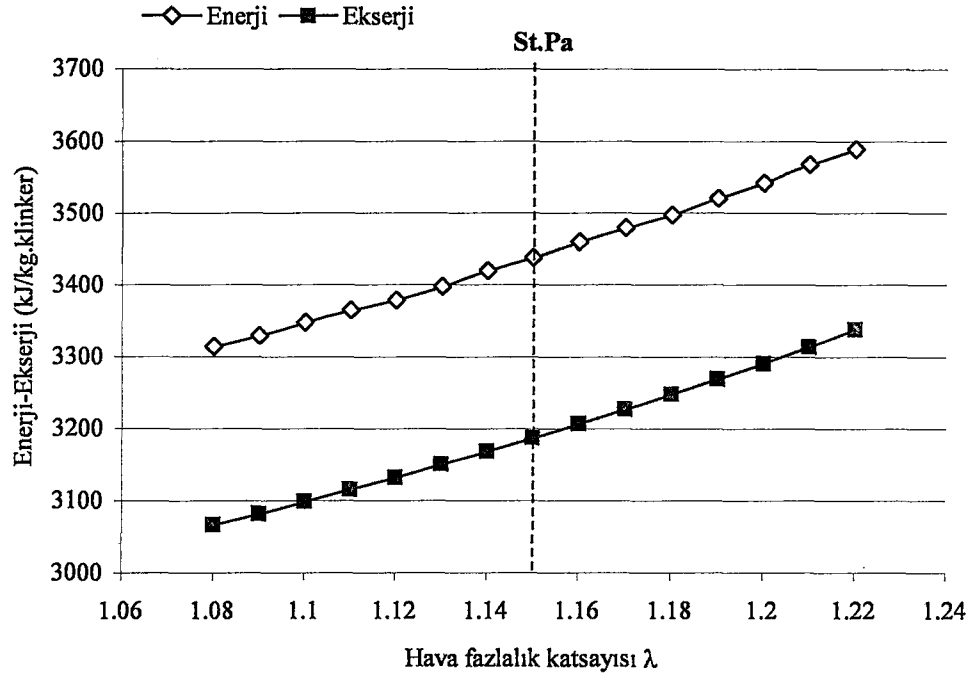
Şekil 6.4. görüldüğü üzere, hava fazlalık katsayısı arttıkça her üç yakıt türü için tüm sistemde baca gazı ve baca tozu çıkış sıcaklığı yükselmektedir. Normal kömür yakıtının baca gazı çıkış sıcaklığı, test kömürü ve fuel-oil yakıtlarındaki artışlara oranla daha yüksektir. Normal kömürde hava fazlalık katsayısı sistemin baca gazı ve tozu sıcaklığını aşırı derecede yükseltmektedir.



Şekil 6.4. Hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemde baca gazı ve baca tozu çıkış sıcaklığına etkisi

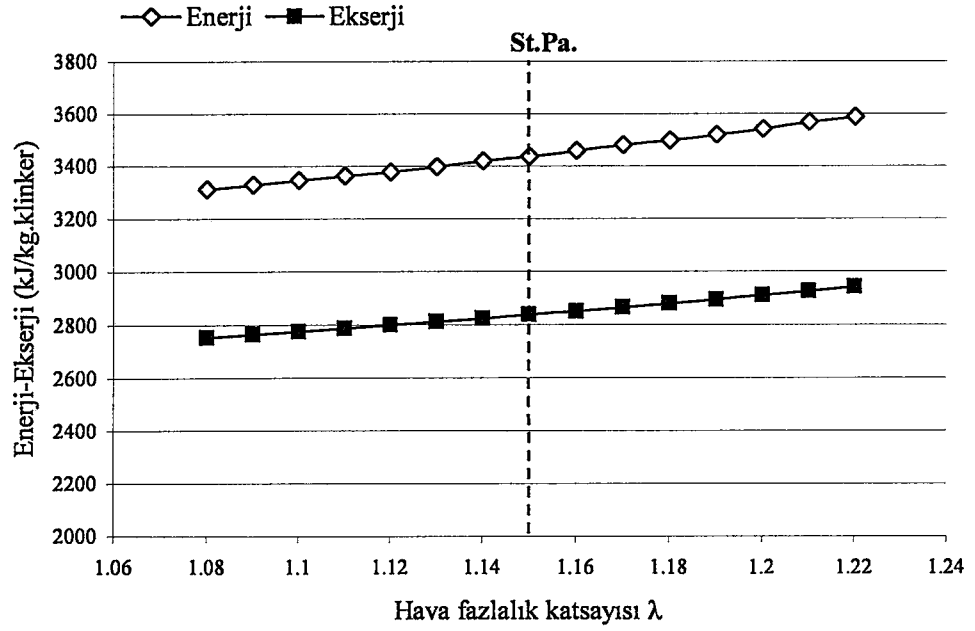
6.2.3. Hava fazlalık katsayısının tüm sisteme giren-çıkan enerji ve ekserji'ye etkisinin değerlendirilmesi

Hava fazlalık katsayısı parametresinin enerji ve ekserjiye etkisi normal kömür, test kömürü ve fuel-oil yakıtları için tüm sistem, döner fırın ve kalsinatör olmak üzere değerlendirilmiştir. Normal kömür yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.5.a. da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.5.b.' de, test kömürü yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.6.a. da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.6.b.' de, Fuel-oil yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.7.a. da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.7.b.' de görülmektedir.



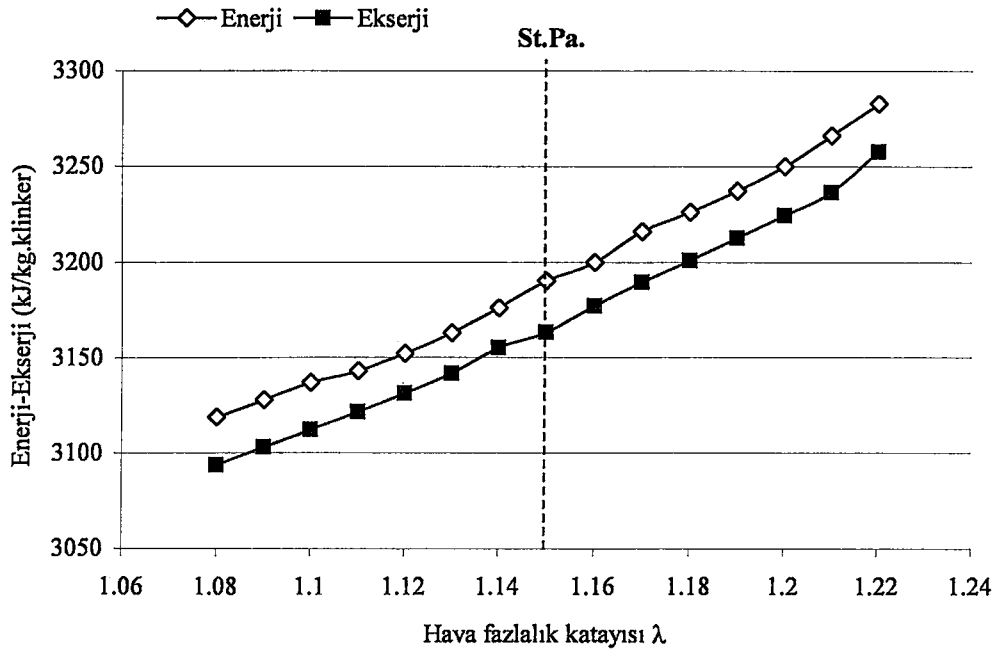
Şekil 6.5.a. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Hava fazlalık katsayısı yakıt tüketimini arttırmakta ve bunun sonucu olarak ta baca gazının ısı yükü artmaktadır. Normal kömür için hava fazlalık katsayısına bağlı olarak baca gazı ısı yüküne bağlı olarak Şekil 6.5.a.' da görüldüğü gibi tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı artmaktadır. Şekil 6.5.b.' de ise hava fazlalık katsayısı oranındaki artış ile birlikte normal kömür için tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarındaki yükselme görülmektedir.

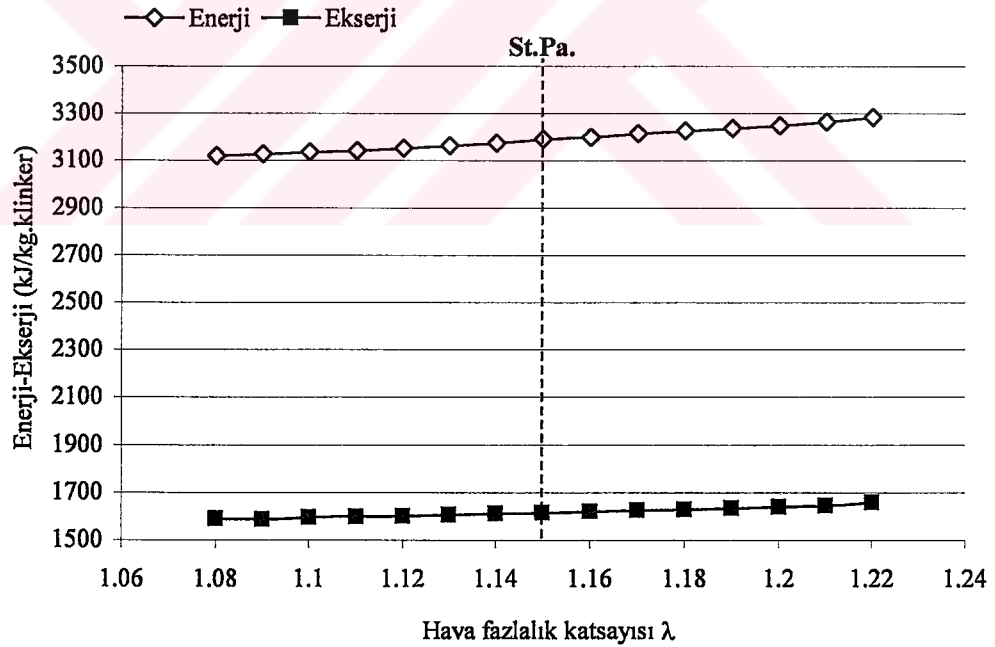


Şekil 6.5.b. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Şekil 6.6.a.' da test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısındaki artışa bağlı olarak tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı görülmektedir. Şekil 6.6.b.' de ise test kömürü için hava fazlalık katsayısı oranındaki artış ile birlikte tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı görülmektedir.



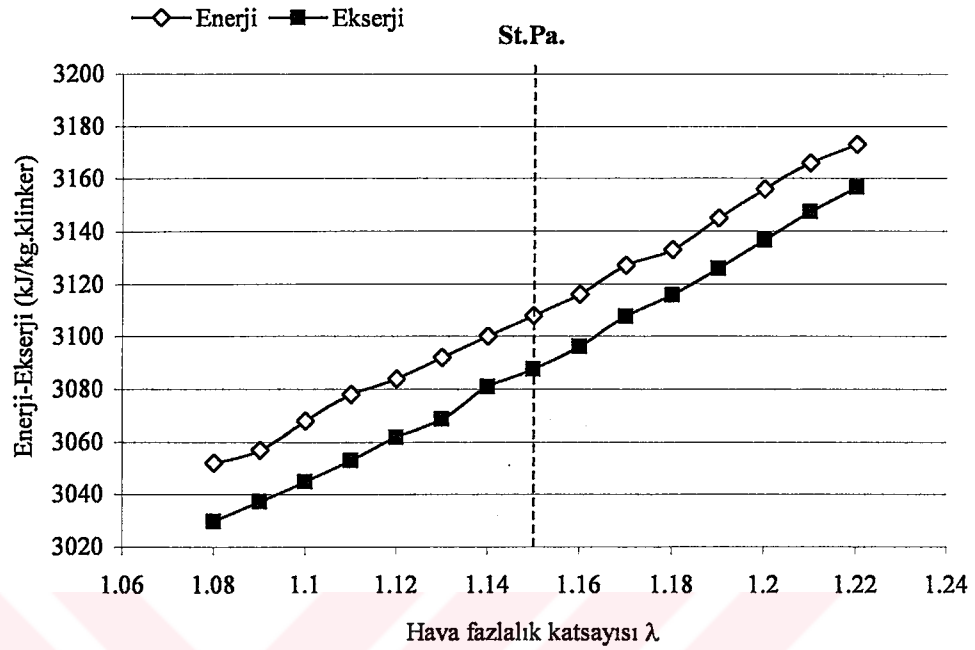
Şekil 6.6.a. Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi



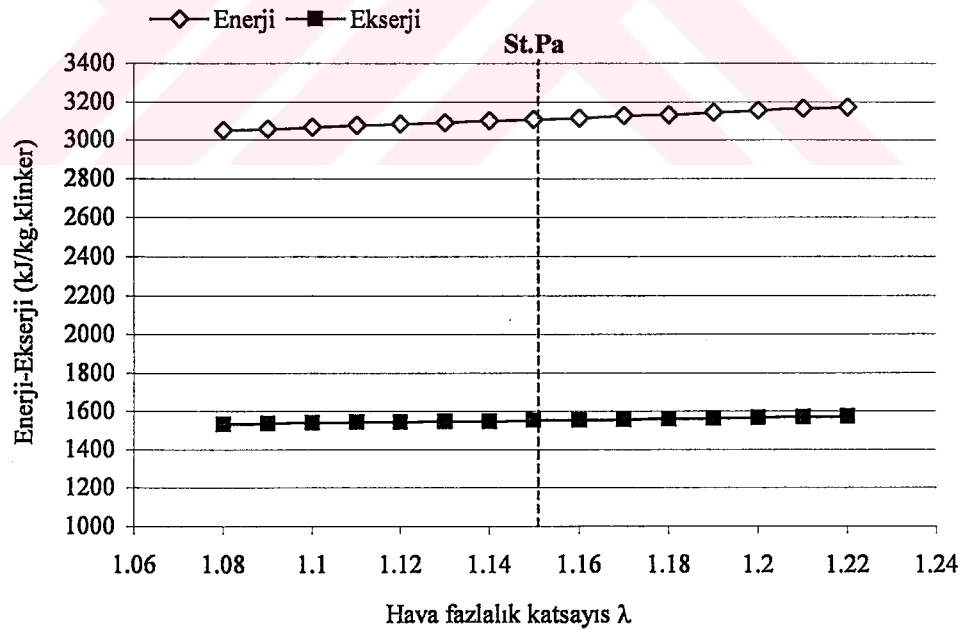
Şekil 6.6.b. Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı, hava fazlalık katsayısındaki artıştan diğer yakıtlar kadar çok etkilenmemektedir. Şekil 6.7.a.' da Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısındaki artışa bağlı olarak tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı görülmektedir. Şekil

6.7.b.' de ise hava fazlalık katsayısı oranındaki artışa bağlı olarak fuel-oil yakıtı için tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarının etkileşimi görülmektedir.



Şekil 6.7.a. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

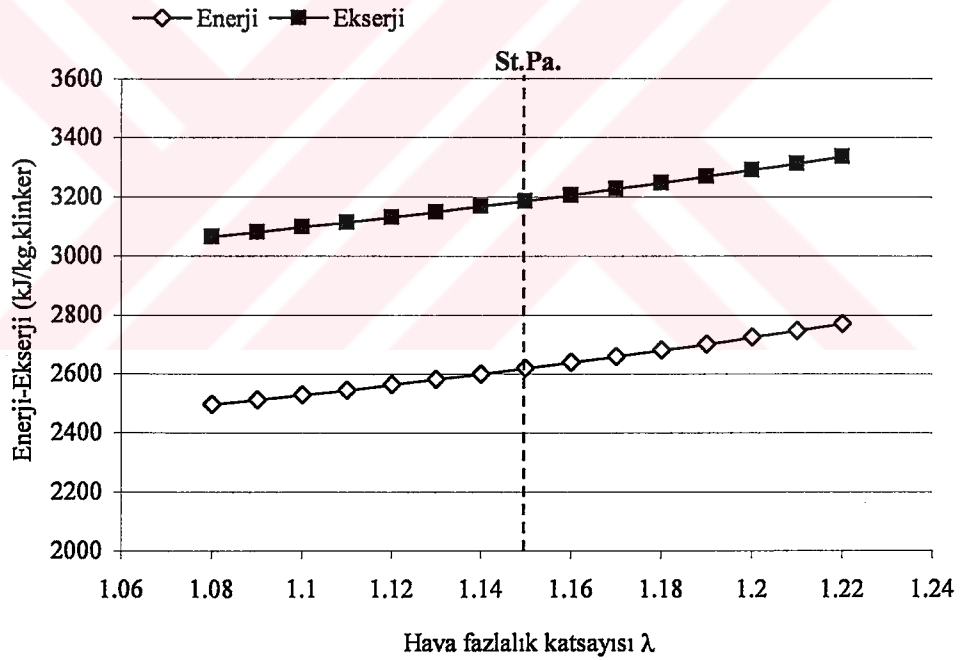


Şekil 6.7.b. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

6.2.4. Hava fazlalık katsayısının döner fırına giren-çıkan enerji ve ekserji' ye etkisinin değerlendirilmesi

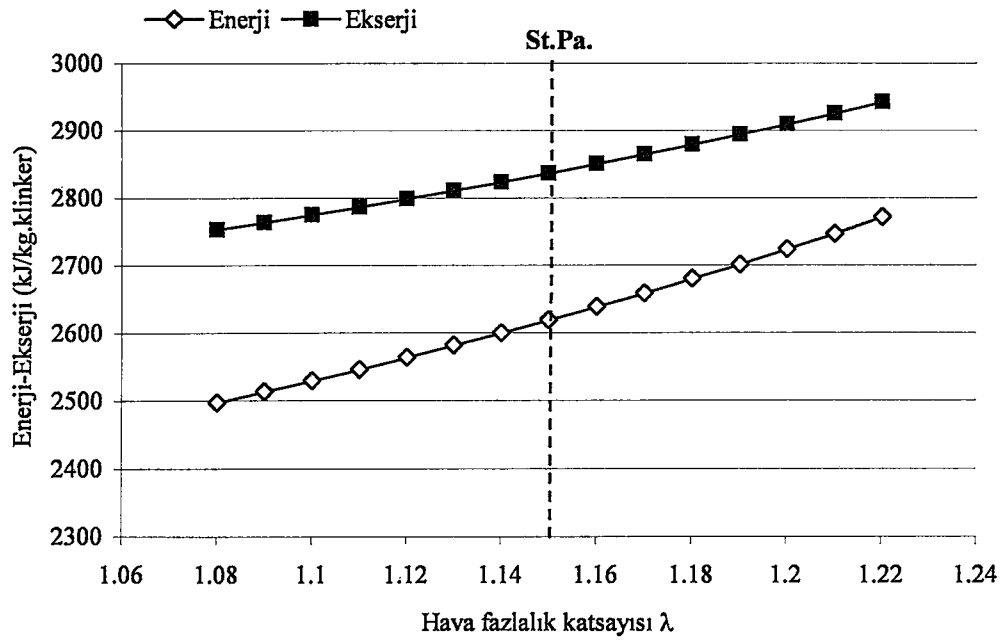
Normal kömür yakıtı ile döner fırına giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.8.a. da, döner fırından çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.8.b.' de, test kömürü yakıtı ile döner fırına giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.9.a. da, döner fırından çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.9.b.' de, fuel-oil yakıtı ile döner fırına giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.10.a. da, döner fırından çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.10.b.' de görülmektedir.

Hava fazlalık katsayısının normal kömür yakıt tüketimini olumsuz etkilediği için kalsinatörde meydana gelen kalsinasyon miktarına bağlı olarak hammaddenin döner fırına taşıdığı enerji ve ekserji miktarı yüksektir. (Şekil 6.8.a.).



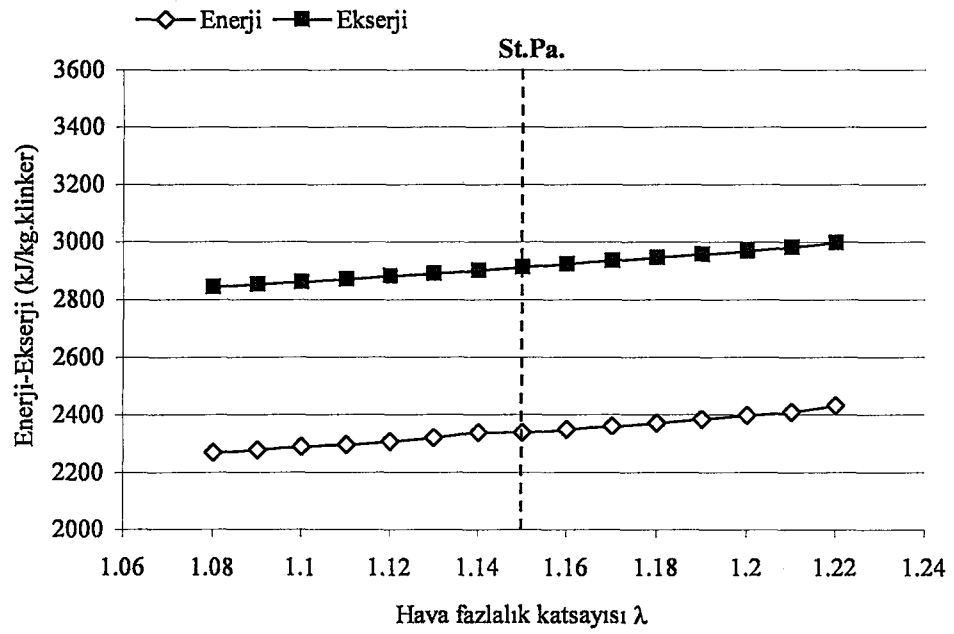
Şekil 6.8.a. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırına giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Şekil 6.8.b.' de görüldüğü gibi normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısının artışı döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarı artmaktadır.

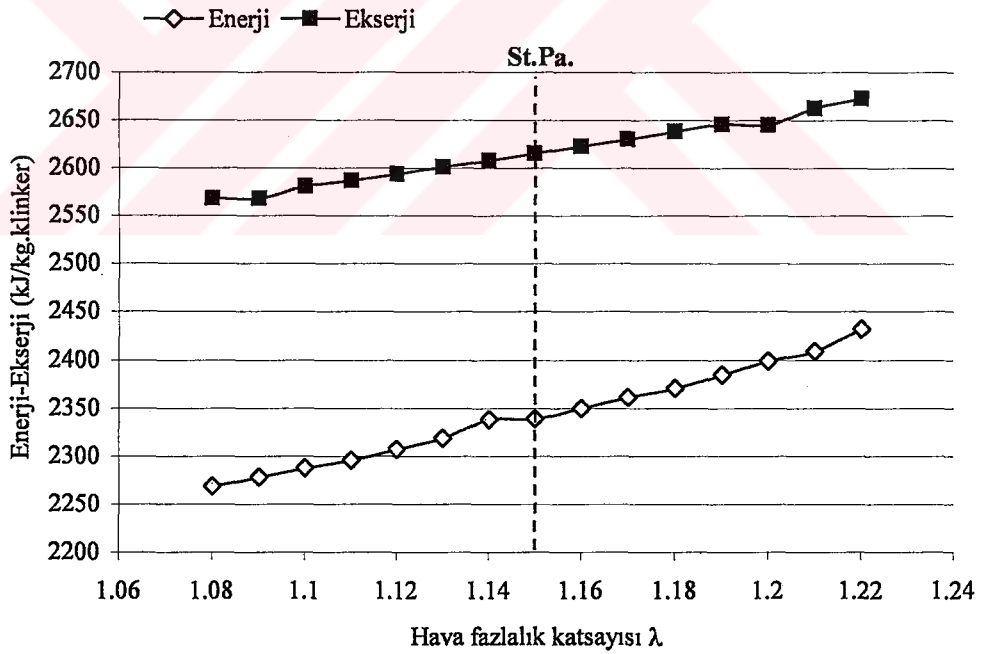


Şekil 6.8.b. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Hava fazlalık katsayısının artması test kömürü için tüm sistemin yakıt tüketimini az da olumsuz etkilemektedir. Ayrıca döner fırına giren yakıt ve kalsinatörden gelen hammaddeye bağlı olarak Şekil 6.9.a.' da test kömürü için döner fırına giren enerji ve ekserji miktarlarındaki artış görülmektedir. Şekil 6.9.b.' de ise döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarları görülmektedir.

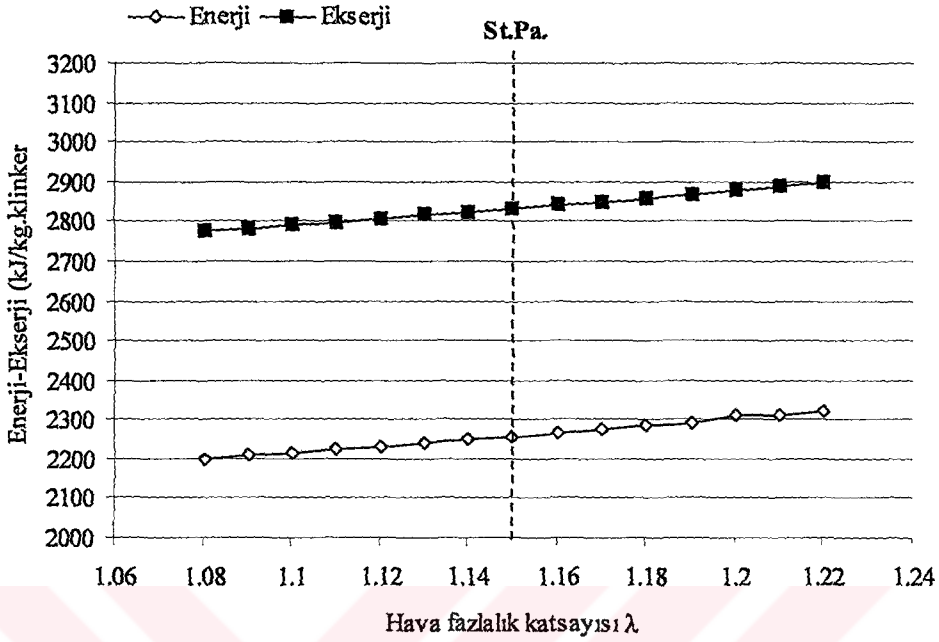


Şekil 6.9.a. Test kömürlü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırına giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

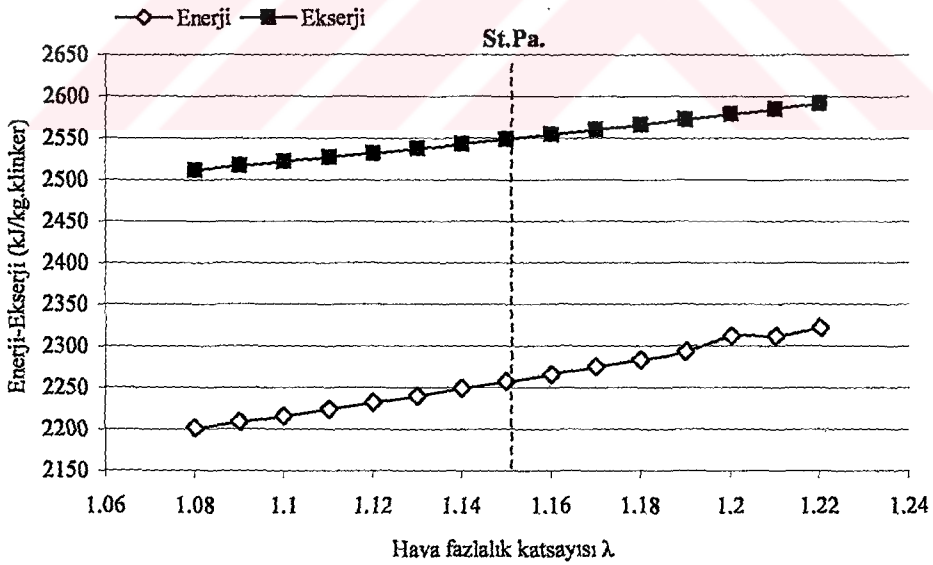


Şekil 6.9.b. Test kömürlü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı için diğer yakıt türlerinde olduğu gibi döner fırına giren enerji ve ekserji miktarındaki değişim Şekil 6.10.a.' da, döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarındaki değişim ise Şekil 6.10.b.' de, görülmektedir.



Şekil 6.10.a. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırına giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

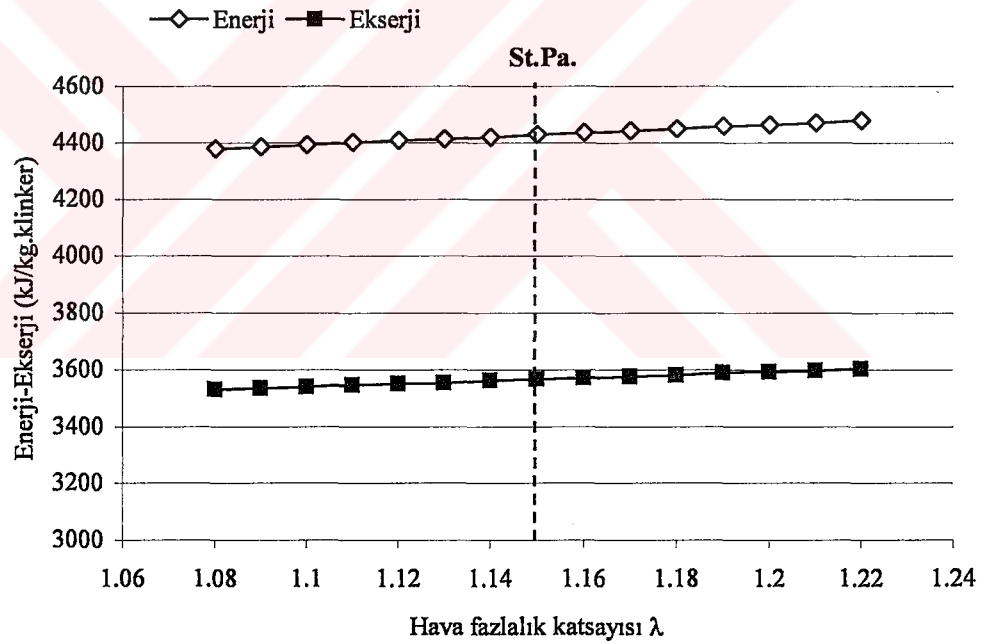


Şekil 6.10.b. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırından çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

6.2.5. Hava fazlalık katsayısının kalsinatöre giren-çıkan enerji ve ekserji' ye etkisinin değerlendirilmesi

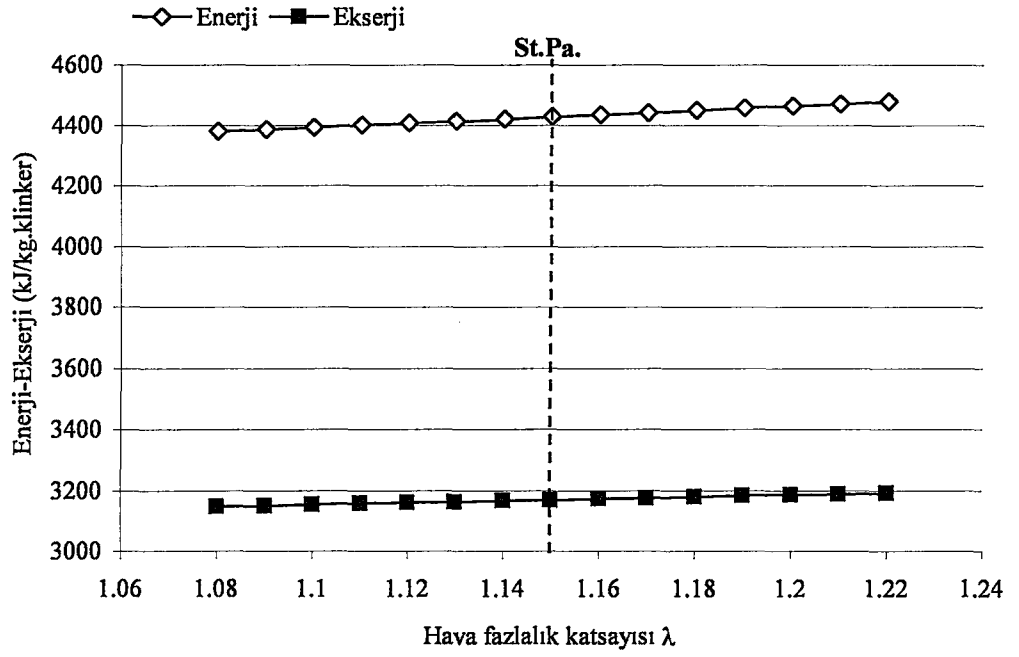
Normal kömür yakıtı ile kalsinatöre giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.11.a. da, kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.11.b.' de, test kömürü yakıtı ile kalsinatöre giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.12.a. da, kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.12.b.' de, fuel-oil yakıtı ile kalsinatöre giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.13.a. da, kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.13.b.' de görülmektedir.

Normal kömür yakıtı için kalsinatör ünitesinde hava fazlalık katsayısının artması, bu üniteye giren enerji ve ekserji miktarlarını olumsuz etkilemektedir (Şekil 6.11.a.).



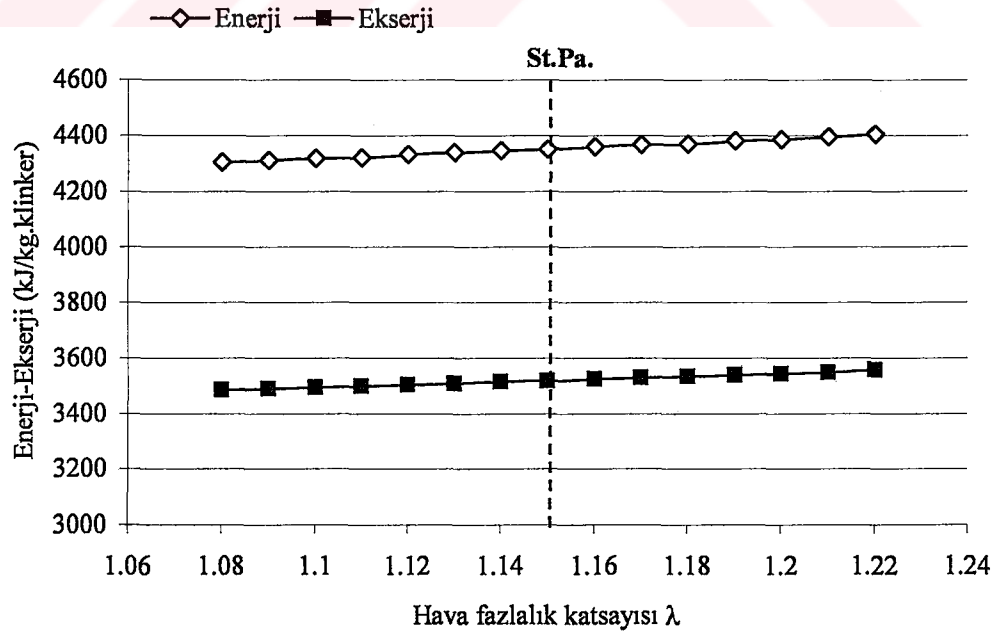
Şekil 6.11.a. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatöre giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Normal kömür için kalsinatör ünitesinde hava fazlalık katsayısının artması, bu ünitenden çıkan enerji ve ekserji miktarlarını olumsuz etkilemektedir (Şekil 6.11.b.).



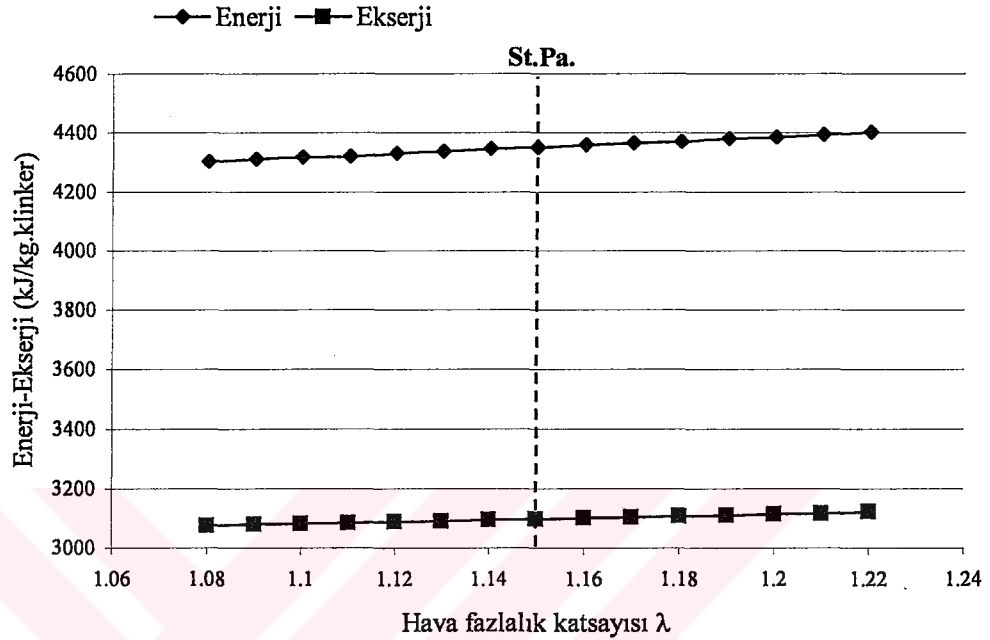
Şekil 6.11.b. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısına bağlı olarak kalsinatör ünitesine giren enerji ve ekserji miktarlarındaki değişim olumsuz etkilenmektedir (Şekil 6.12.a.).



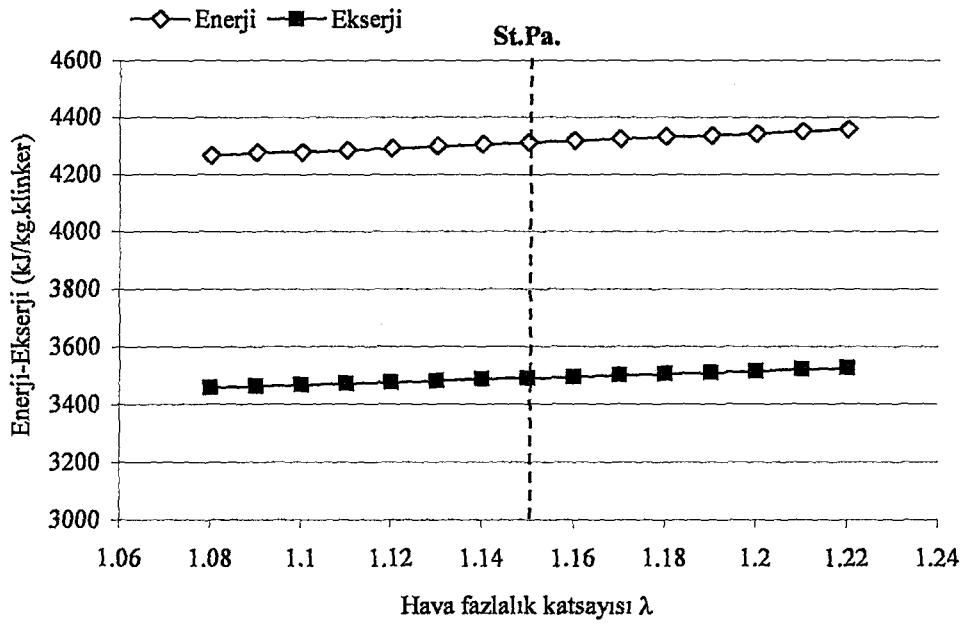
Şekil 6.12.a. Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatöre giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısına bağlı olarak kalsinatör ünitesinden çıkan enerji ve ekserji miktarlarındaki değişim olumsuz etkilenmektedir (Şekil 6.12.b.).

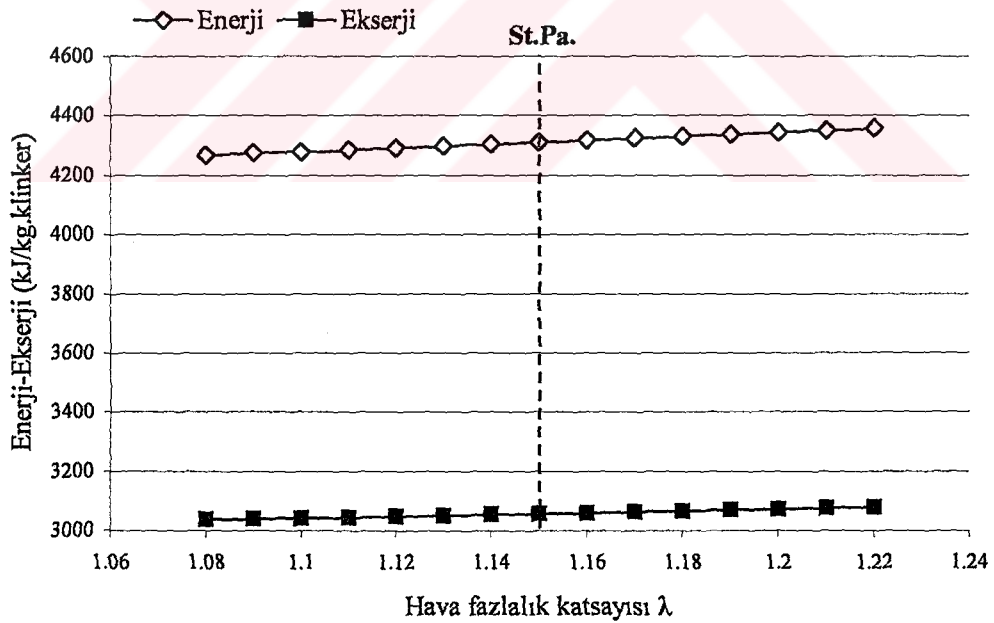


Şekil 6.12.b. Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Şekil 6.13.a.' da fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısına bağlı olarak kalsinatör ünitesine giren enerji ve ekserji miktarlarındaki değişiminin olumsuz etkilendiği görülmektedir. Ayrıca, kalsinatör ünitesinde fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı artışının bu ünitenden çıkan enerji ve ekserji değişimini olumsuz etkilediği Şekil 6.13.b.' de görülmektedir.



Şekil 6.13.a. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatöre giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

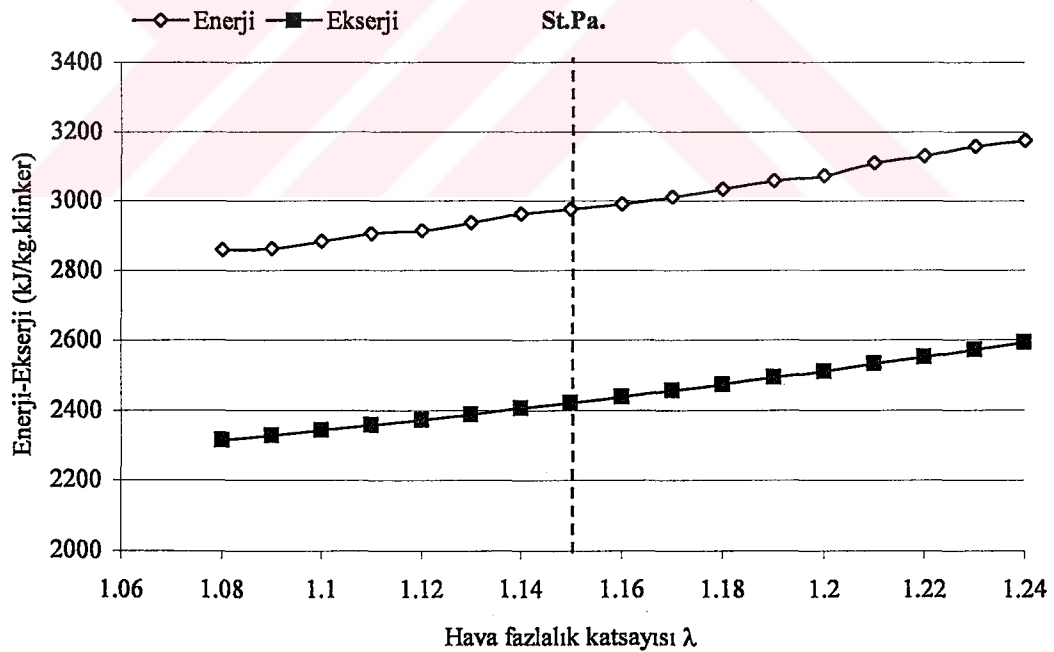


Şekil 6.13.b. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin kalsinatörden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

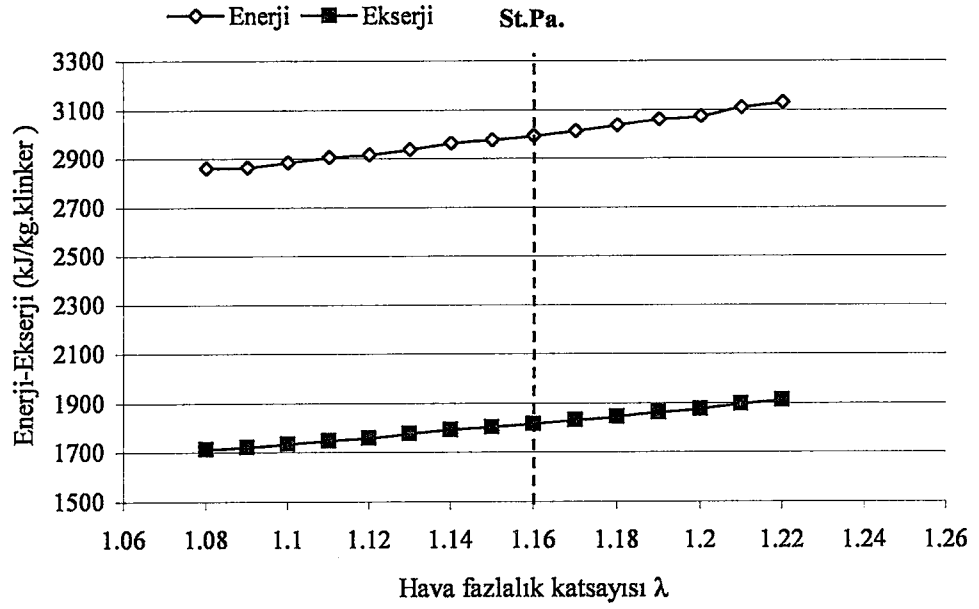
6.2.6. Hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubuna giren-çıkan enerji ve ekserji' ye etkisinin değerlendirilmesi

Normal kömür yakıtı ile önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.14.a. da, önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.14.b.' de, test kömürü yakıtı ile önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.15.a. da, önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.15.b.' de, fuel-oil yakıtı ile önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.16.a. da, önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.16.b.' de görülmektedir.

Hava fazlalık katsayısı normal kömür yakıtı için önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarını olumsuz etkilemektedir (Şekil 6.14.a.). Şekil 6.14.b. de ise normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarları değişimine olumsuz etkisi görülmektedir.

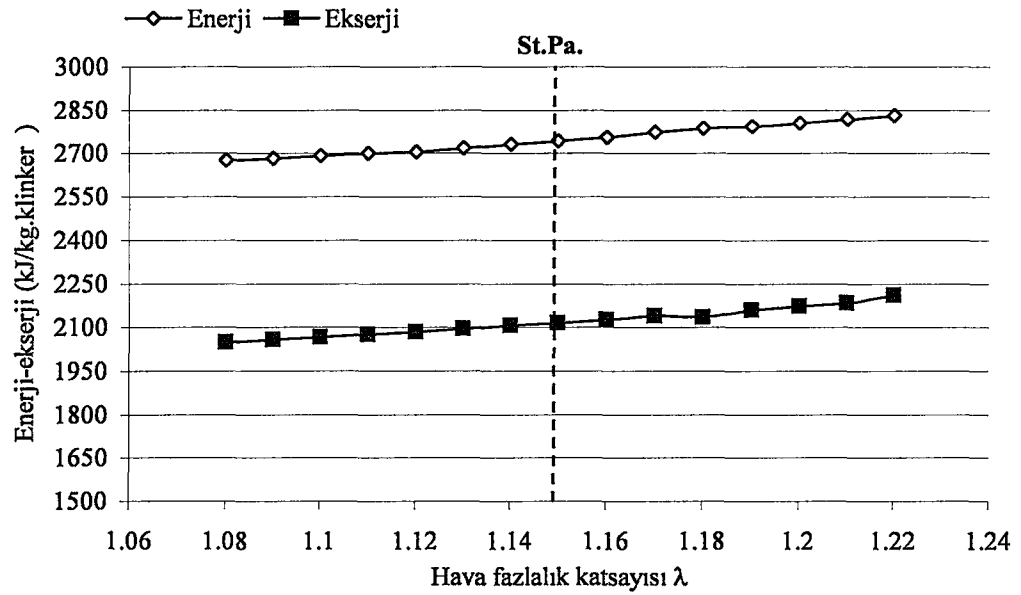


Şekil 6.14.a. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

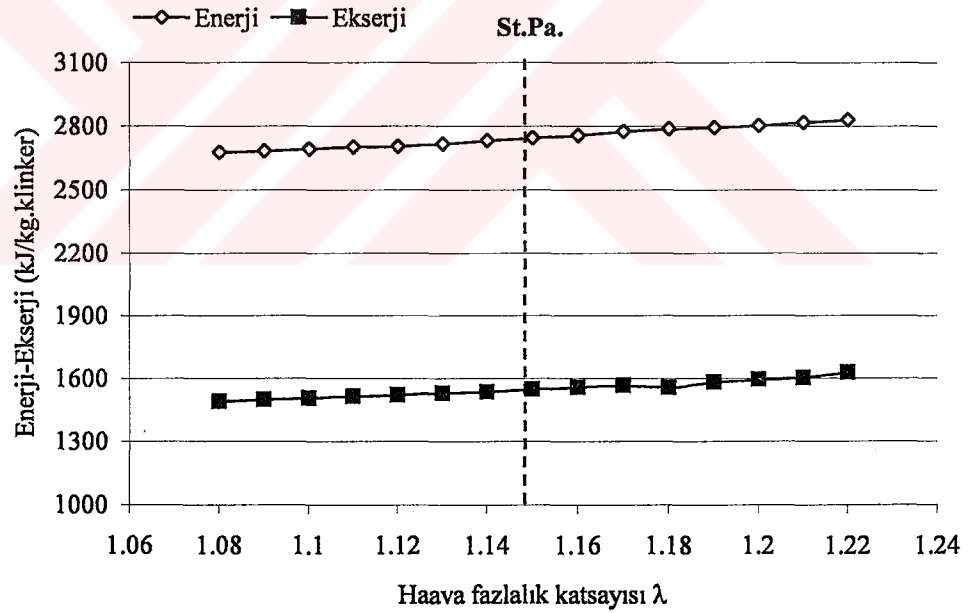


Şekil 6.14.b. Normal kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı kullanıldığında hava fazlalık katsayısının artması enerji-ekserji değişimini olumsuz yönde etkilenmektedir. Şekil 6.15.a. test kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarları değişimine olumsuz etkisi görülmektedir. Şekil 6.15.b.' de ise test kömür yakıtı için hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarları değişimine olumsuz etkisi görülmektedir.



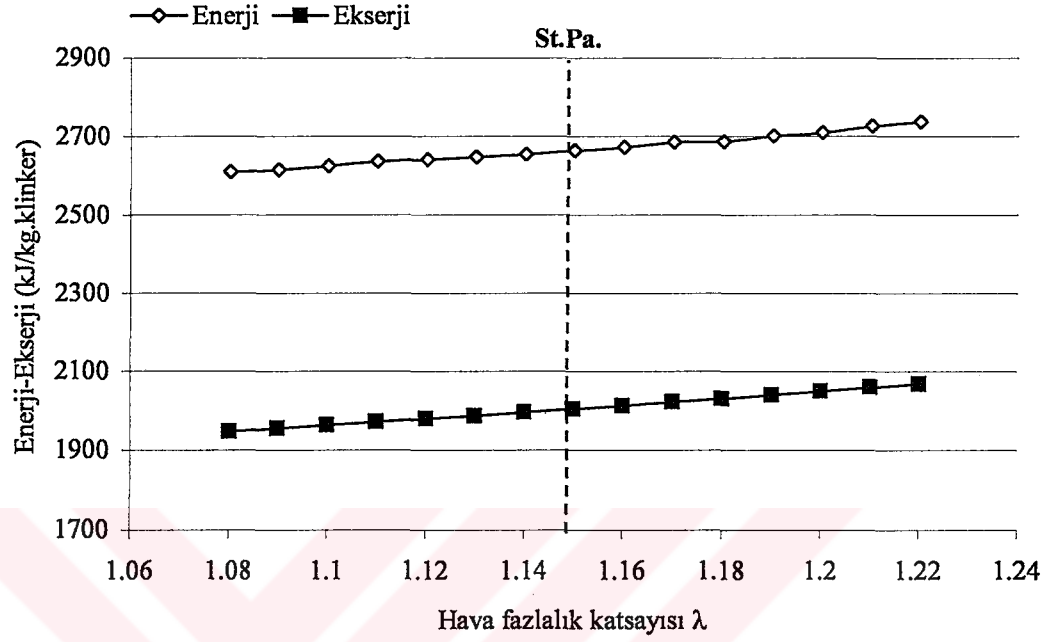
Şekil 6.15.a. Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi



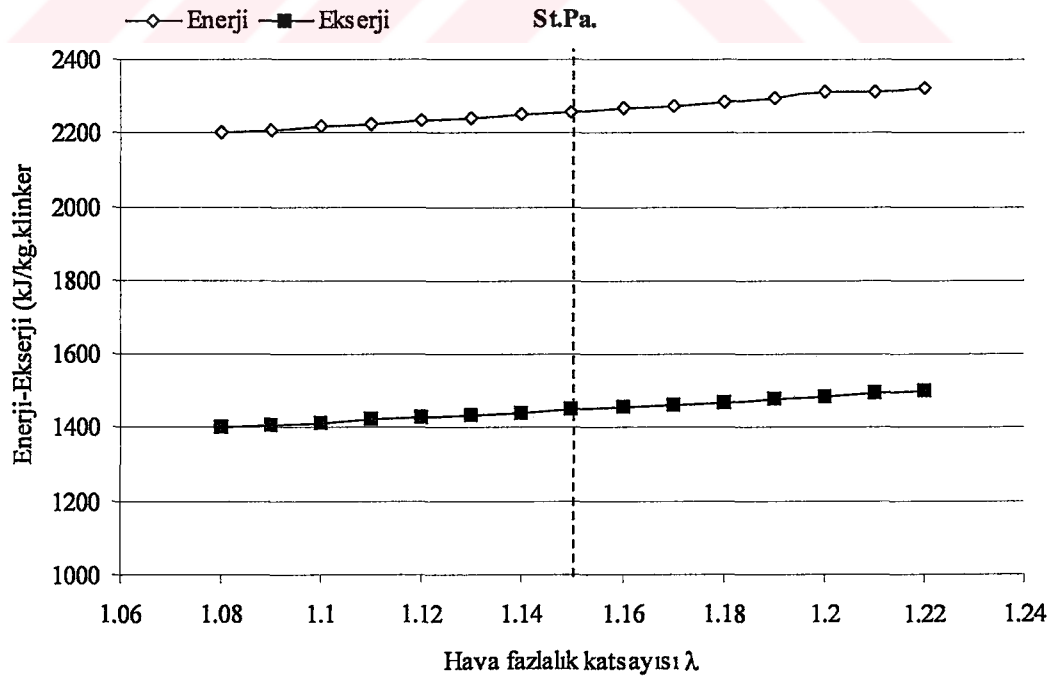
Şekil 6.15.b. Test kömürü yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı diğer yakıtlarda olduğu gibi hava fazlalık katsayısının artmasından olumsuz etkilenmektedir. Şekil 6.16.a. fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarları değişimine olumsuz etkisi

görülmektedir. Şekil 6.16.b.'de ise fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarları değişimine olumsuz etkisi görülmektedir.



Şekil 6.16.a. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubuna giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi



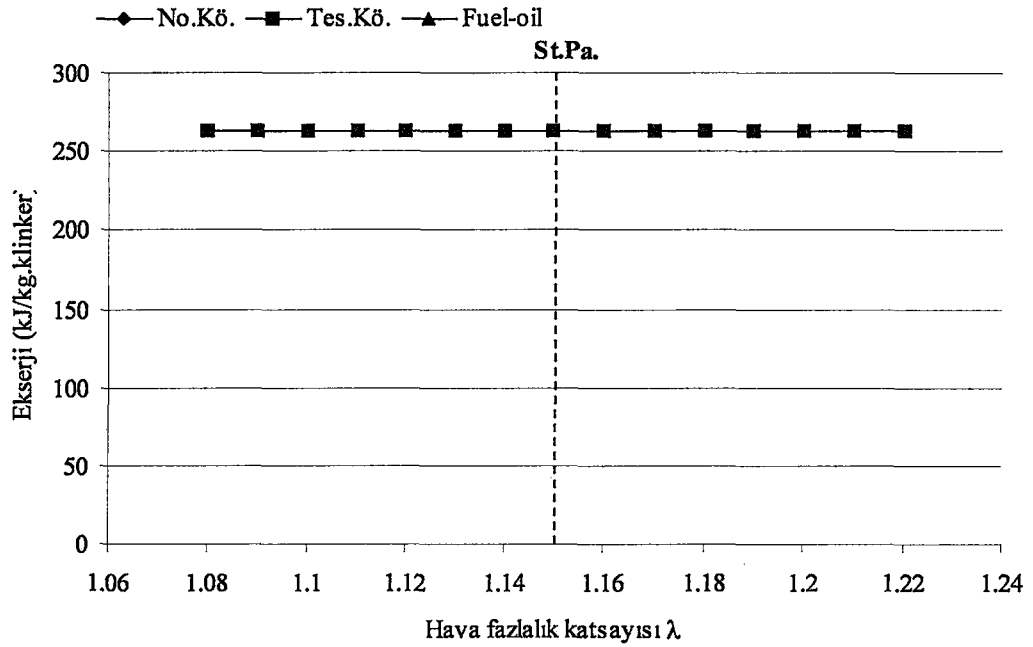
Şekil 6.16.b. Fuel-oil yakıtı için hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubundan çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

6.2.7. Hava fazlalık katsayısının tüm ünitelerde oluşan tersinmezliklere etkisi

Modellemesini yaptığımız çimento üretim sisteminde yanmadan, kimyasal tepkimeden, ısı-kütle karışımından ve ünite ile çevresi arasındaki ısı transferinden olmak üzere dört çeşit tersinmezlik (ekserji kaybı) vardır. Burada hava fazlalık katsayısı parametresi ile tüm ünitelerdeki tersinmezlikler üç farklı yakıt türü için (normal kömür, test kömürü, fuel-oil) değerlendirilmiştir. Ayrıca hava fazlalık katsayısı parametresine ait tersinmezliklerin detayları üç farklı yakıt türü için standart parametre değerleri ile (normal kömür, test kömürü, fuel-oil) EK-3' de verilmektedir.

6.2.7.1. Hava fazlalık katsayısının klinker soğutucusu ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi

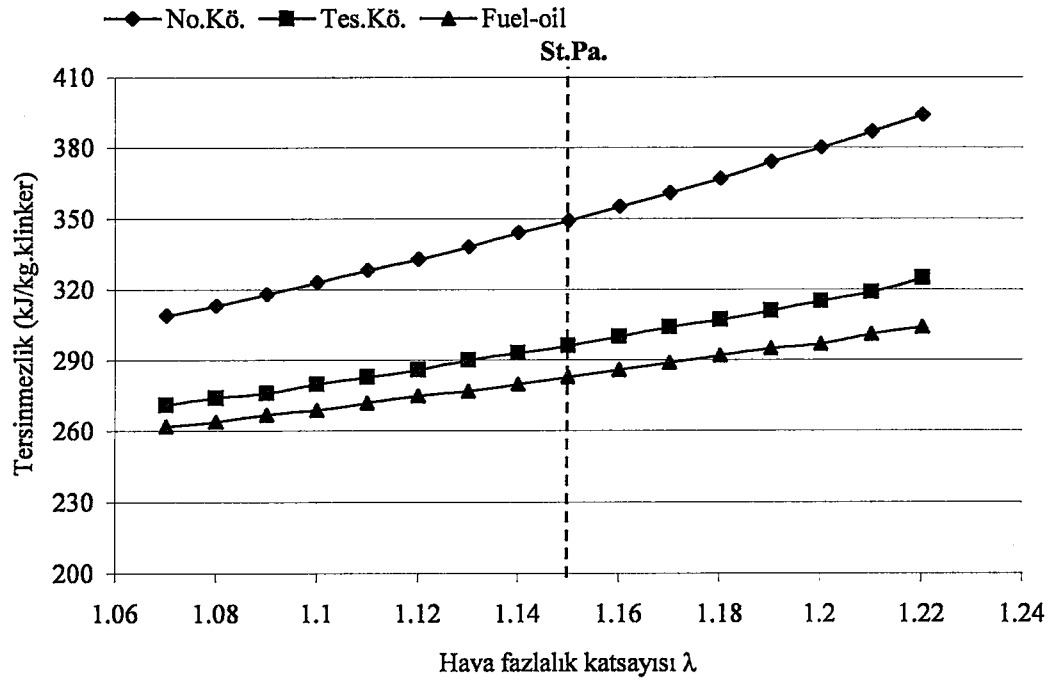
Klinker soğutucusunda hava fazlalık katsayısına bağlı toplam tersinmezlik kullanılan üç farklı yakıt türü için aynıdır. Klinker soğutucusunda yanma olmadığından ve klinker soğutucusuna giren kütleler hava fazlalık katsayısından etkilenmediğinden dolayı tersinmezlik değişmemektedir (Şekil 6.17.).



Şekil 6.17. Hava fazlalık katsayısı parametresinin klinker soğutucusu ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi

6.2.7.2. Hava fazlalık katsayısının klinker döner fırın ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi

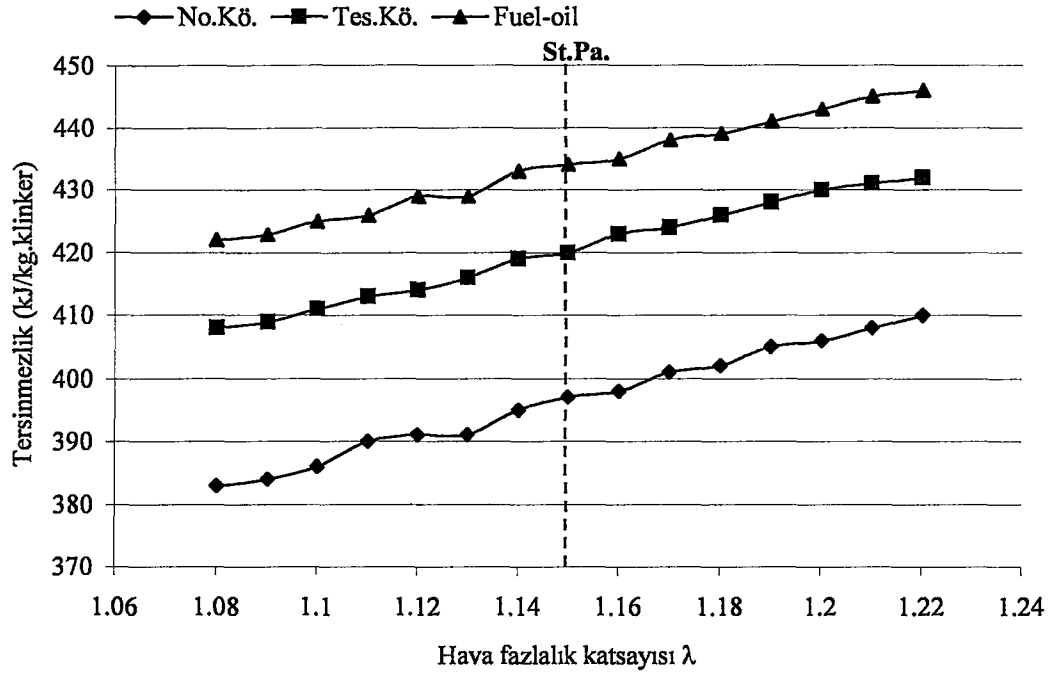
Döner fırın ünitesinde hava fazlalık katsayısının artmasına bağlı olarak toplam tersinmezlik miktarı olumsuz yönde etkilenmektedir. Döner fırında yanma olması yanmadan kaynaklanan tersinmezliği diğer tersinmezliklere göre daha fazla etkilemektedir. Bunun sebebi hacimsel olarak fazla havanın yakıt tüketimini arttırmasıdır (Şekil 6.18.).



Şekil 6.18. Hava fazlalık katsayısı parametresinin döner fırın ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi

6.2.7.3. Hava fazlalık katsayısının kalsinatör ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi

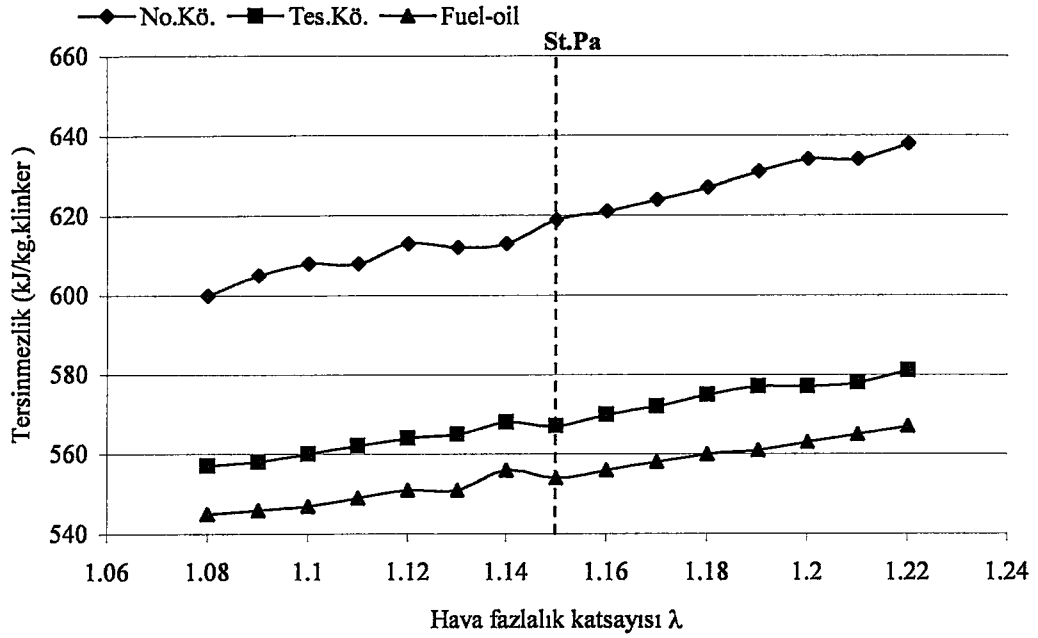
Önkalsinatör ünitesinde hava fazlalık katsayısının artmasına bağlı olarak oluşan toplam tersinmezlik, döner fırında olduğu gibi olumsuz etkilenmektedir. Kalsinatör ünitesinde yanma olması yanmadan olan tersinmezliği diğer tersinmezliklere göre daha fazla etkilemektedir. Kalsinatör ünitesi, döner fırın ile karşılaştırıldığında buradaki tersinmezlik daha azdır. Bunun sebebi kalsinatör ünitesinin baca gazı çıkış sıcaklığı döner fırına göre daha düşüktür. (Şekil 6.19.).



Şekil 6.19. Hava fazlalık katsayısı parametresinin önkalsinatör ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi

6.2.7.4. Hava fazlalık katsayısının önısıtıcı siklon grubu ünitesinde oluşan tersinmezliğe etkisi

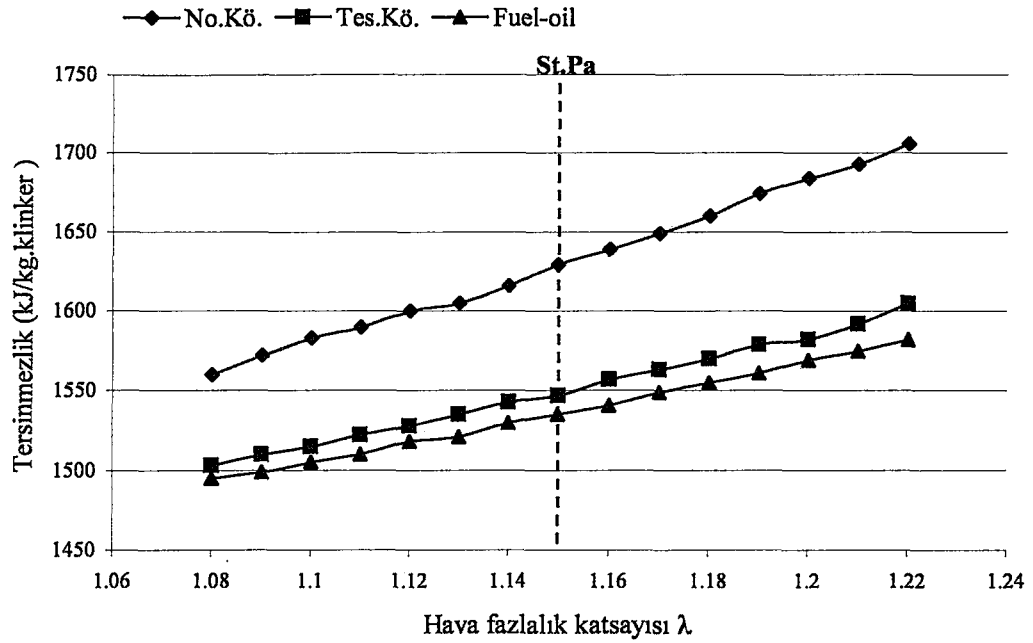
Önısıtıcı siklon grubu ünitesindeki tersinmezlik değişimi hava fazlalık katsayısının artmasından olumsuz etkilenmektedir. Bu üniteye yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı yoktur. Bu üniteye oluşan ekserji kaybı baca gazları ile hammaddenin karışımı ve ısı transferi ile ünite ve çevresi arasında olan ısı transferinden kaynaklanmaktadır (Şekil 6.20.).



Şekil 6.20. Hava fazlalık katsayısı parametresinin önısıtıcı siklon grubu ünitesinde tersinmezlik değişimine etkisi

6.2.7.5. Hava fazlalık katsayısının tüm sistemde oluşan tersinmezliğe etkisi

Döner fırın ve kalsinatörde yanmadan kaynaklanan tersinmezlik, kimyasal tepkimeden kaynaklanan tersinmezlik, baca gazı ile hammaddenin karışımı ve ısı transferinden kaynaklanan tersinmezlik, bütün ünitelerden çevreye olan ısı transferinden kaynaklanan tersinmezliklerin toplamı tüm sistemdeki tersinmezlikleri oluşturduğundan hava fazlalık katsayısının artması tüm sistemi tersinmezlik açısından olumsuz etkilemektedir (Şekil 21.).

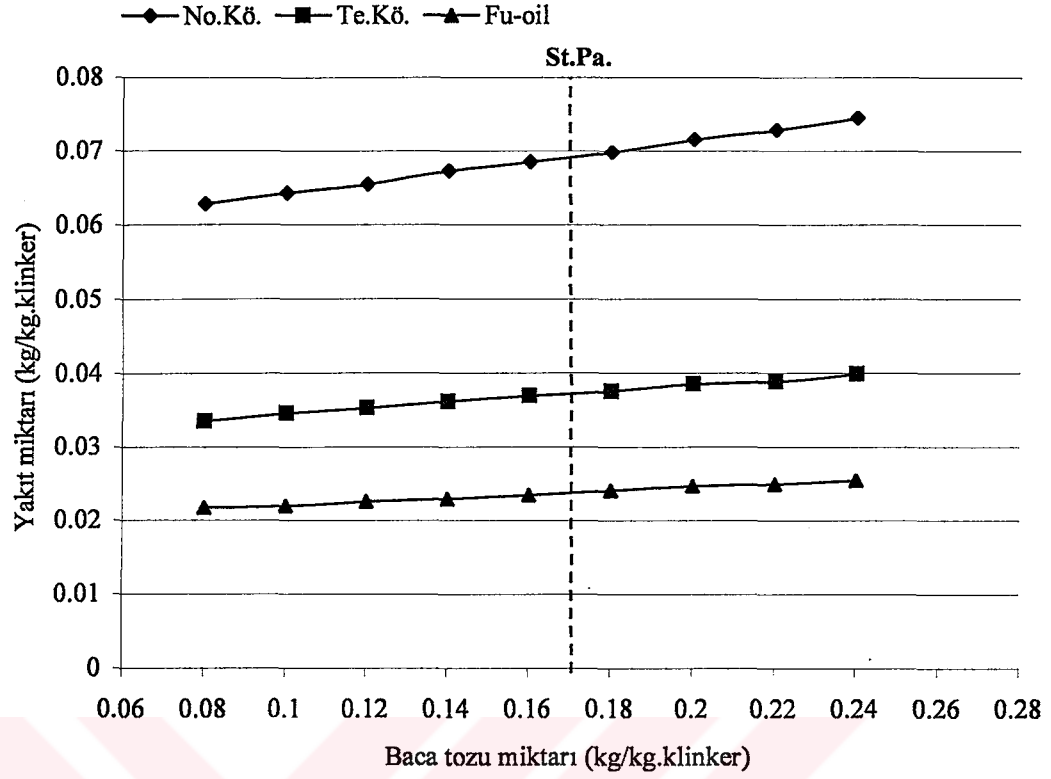


Şekil 6.21. Hava fazlalık katsayısı parametresinin tüm sistemde tersinmezlik değişimine etkisi

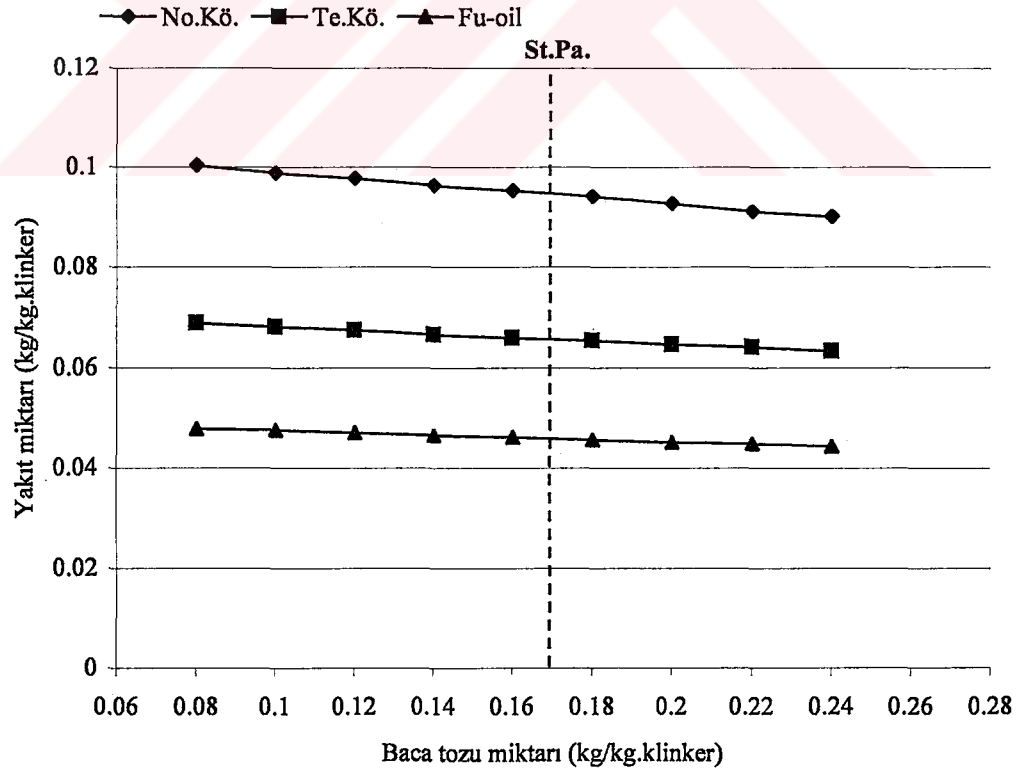
6.3. Değişken Parametre Olarak Baca Tozu Miktarının Değerlendirilmesi

Baca tozu miktarı değişken parametresi normal kömür, test kömürü ve fuel-oil yakıtları için döner fırın ve kalsinatör yakıtlarının değişimleri, tüm sisteme giren-çıkan enerji ve ekserji değişimleri değerlendirilmiştir. Döner fırın yakıt değişimi Şekil 6.22.a.'da, kalsinatör yakıt değişimi ise Şekil 6.22.b.'de verilmiştir. Normal kömür yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.23.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.23.b.' de, test kömürü yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.24.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.24.b.' de, fuel-oil yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.25.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.25.b.' de görülmektedir.

Baca tozu miktarında, standart parametre gözönünde bulundurularak yapılan artış miktarı döner fırın yakıtını artırırken (Şekil 22.a.), kalsinatör yakıtını azaltmaktadır (Şekil 22.b.).

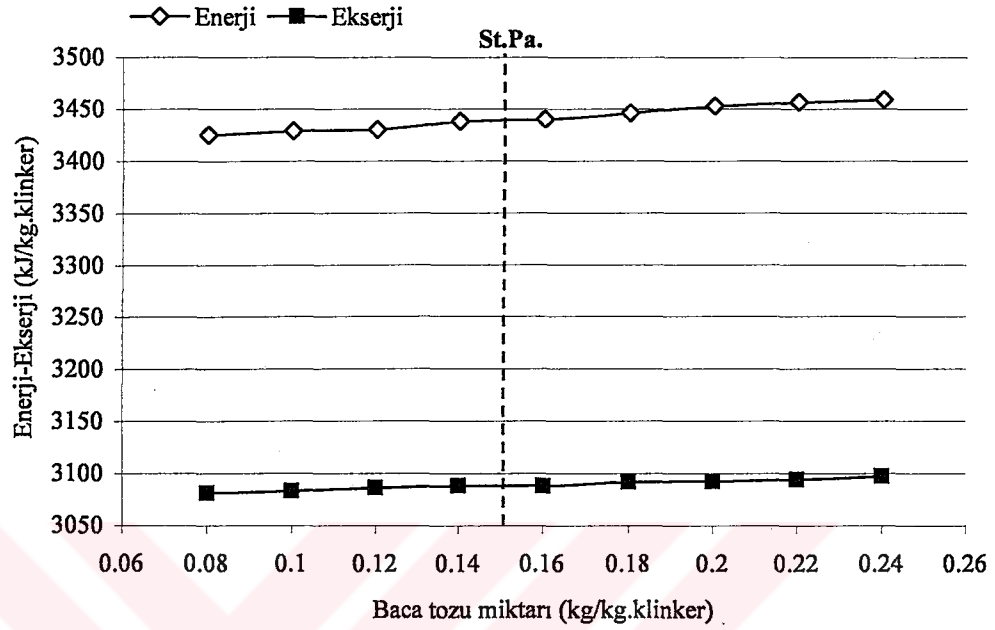


Şekil 6.22.a. Değişken parametre olarak baca tozu miktarının döner fırın yakıt değişimine etkisi

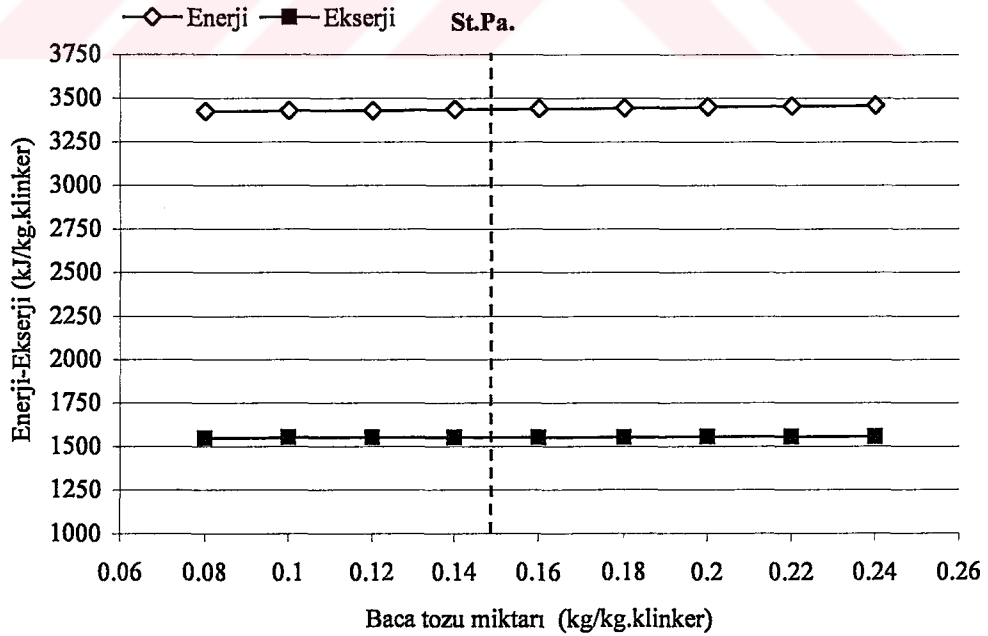


Şekil 6.22.b. Değişken parametre olarak baca tozu miktarının kalsinatör fırın yakıt değişimine etkisi

Normal kömür yakıtı için baca tozu miktarındaki artış tüm sisteme giren (Şekil 6.23.a.) enerji-ekserji ve çıkan (Şekil 6.23.b.) enerji-ekserji değişimlerini az etkilemektedir.

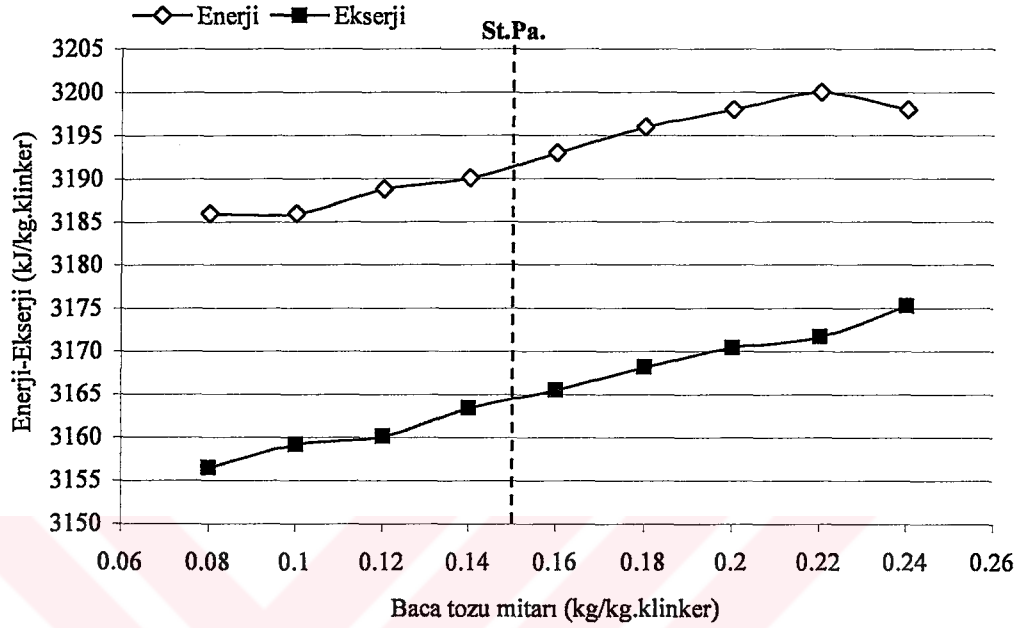


Şekil 6.23.a. Normal kömür yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarındaki değişime etkisi

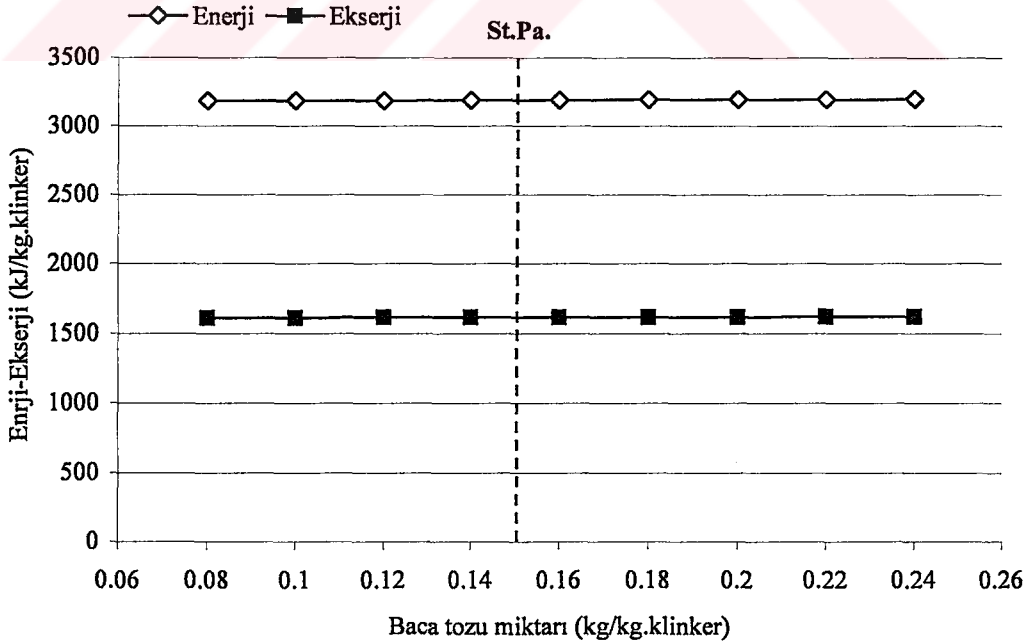


Şekil 6.23.b. Normal kömür yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarındaki değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı için baca tozu miktarındaki artış tüm sisteme giren enerji-ekserji (Şekil 6.24.a.), ve çıkan (Şekil 6.24.b.) enerji-ekserji miktarı değişimlerini az etkilemektedir.

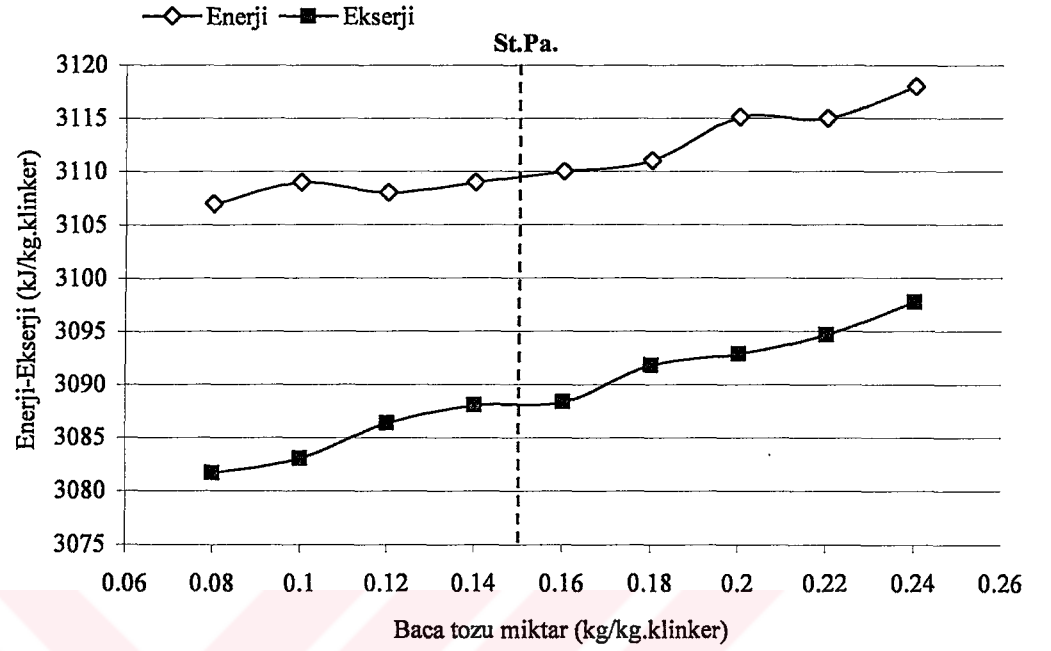


Şekil 6.24.a. Test kömürü yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve miktarındaki ekserji değişimine etkisi

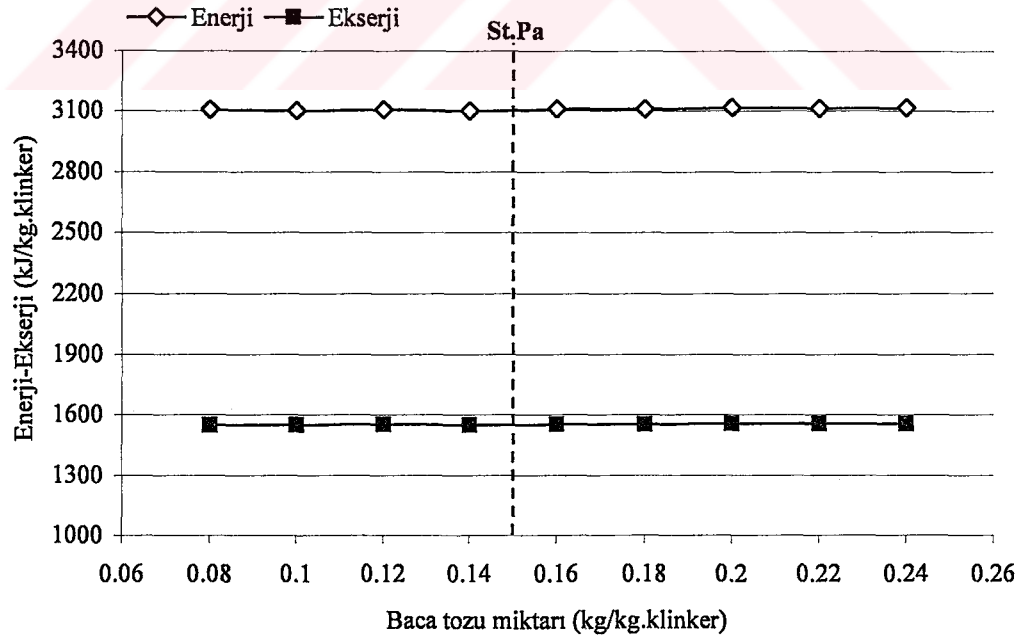


Şekil 6.24.b. Test kömürü yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve miktarındaki ekserji değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı için baca tozu miktarındaki artış tüm sisteme giren ve çıkan enerji-ekserji değişimlerini az etkilemektedir (Şekil 6.25.a.giren), (Şekil 6.25.b.çıkan).



Şekil 6.25.a. Fuel-oil yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarındaki değişimine etkisi

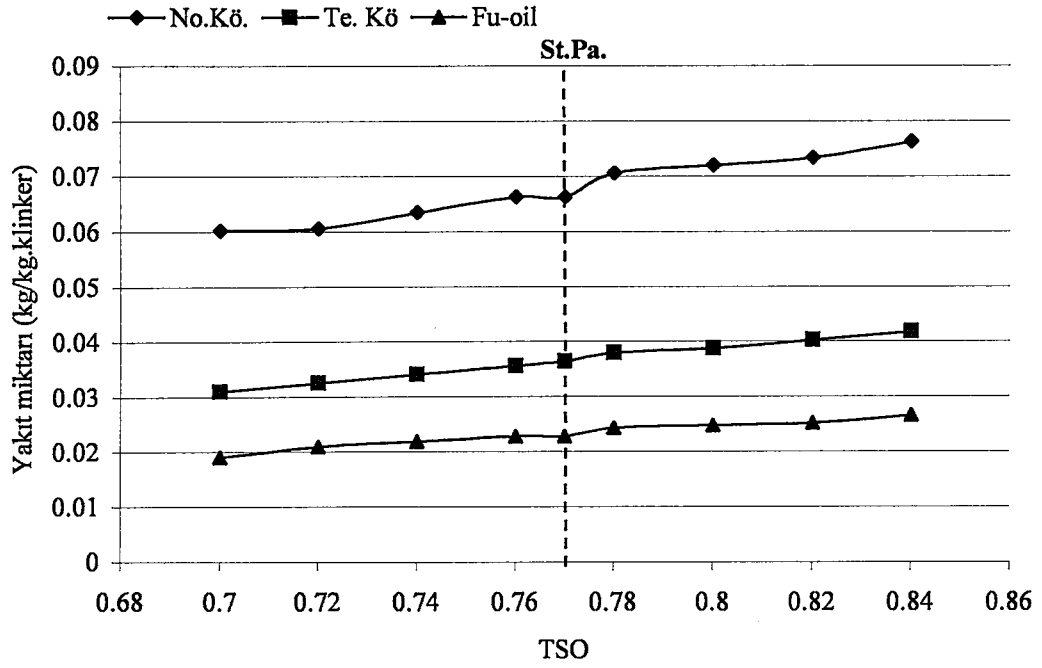


Şekil 6.25.b. Fuel-oil yakıtı için baca tozu miktarı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarındaki değişimine etkisi

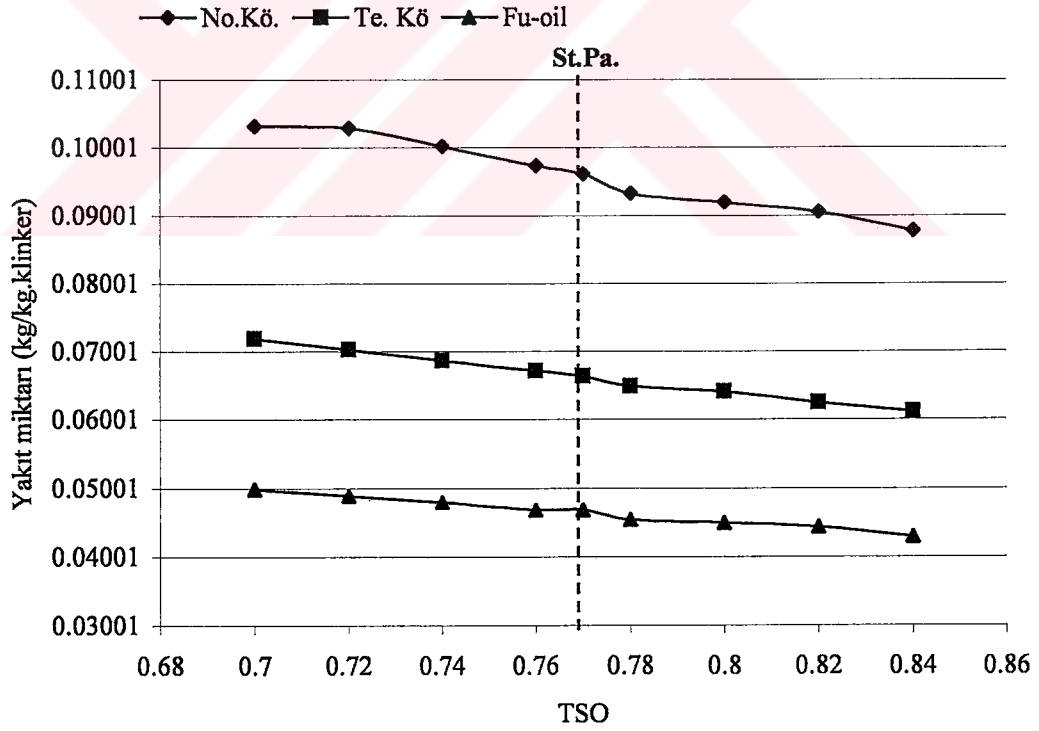
6.4. Değişken Parametre Olarak Tersiyer Havanın Tersiyer+Sekonder Havaya Oranının Değerlendirilmesi

Tersiyer havanın, tersiyer+sekonder havaya oranı değişken parametresinin normal kömür, test kömürü ve fuel-oil yakıtları için döner fırın ve kalsinatör yakıtlarının değişimleri, tüm sisteme giren-çıkan enerji ve ekserji değişimleri değerlendirilmiştir. Döner fırın yakıt değişimi Şekil 6.26.a.'da, kalsinatör yakıt değişimi ise Şekil 6.26.b.'de verilmiştir. Normal kömür yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.27.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.27.b.' de, test kömürü yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.28.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.28.b.' de, fuel-oil yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.29.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.29.b.' de görülmektedir.

Tersiyer havanın, tersiyer+sekonder havaya oranı parametresi döner fırın yakıt tüketiminin artmasına (Şekil 6.26.a.) ve önkalsinatör yakıt miktarının azalmasına neden olmaktadır (Şekil 6.26.b.). Döner fırın yakıt tüketiminin artmasının sebebi klinker soğutucusundan gelen sekonder havanın miktar olarak artmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şekilde kalsinatöre gelen tersiyer hava miktarının azalması bu ünite de kullanılan yakıtı miktarını azaltmaktadır. Döner fırın ve kalsinatör arasındaki yakıt paylaşımı çimento üretim sisteminin toplam yakıt tüketimini değiştirmemektedir.

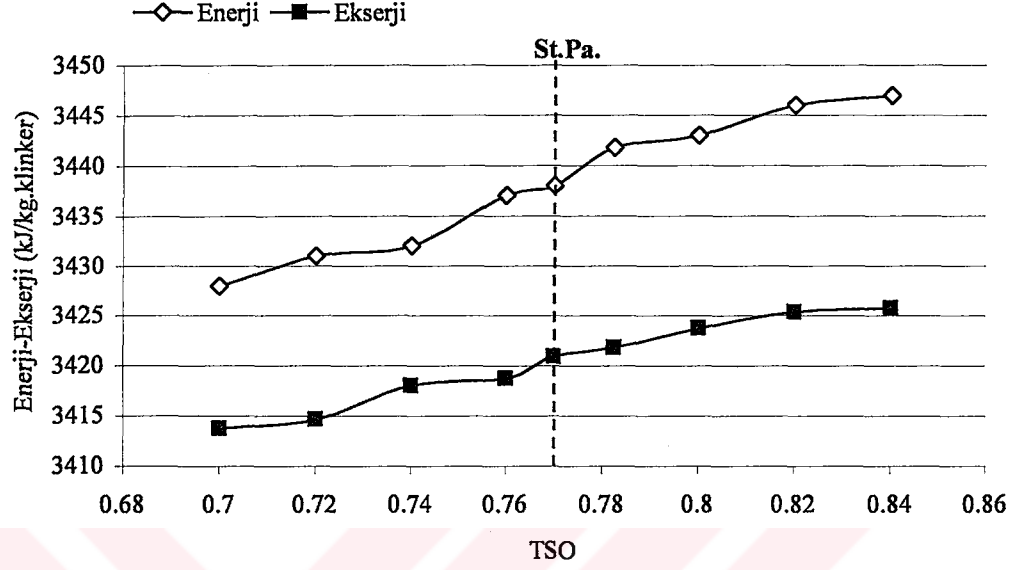


Şekil 6.26.a. Değişken parametre olarak tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranının döner fırın yakıt değişimine etkisi

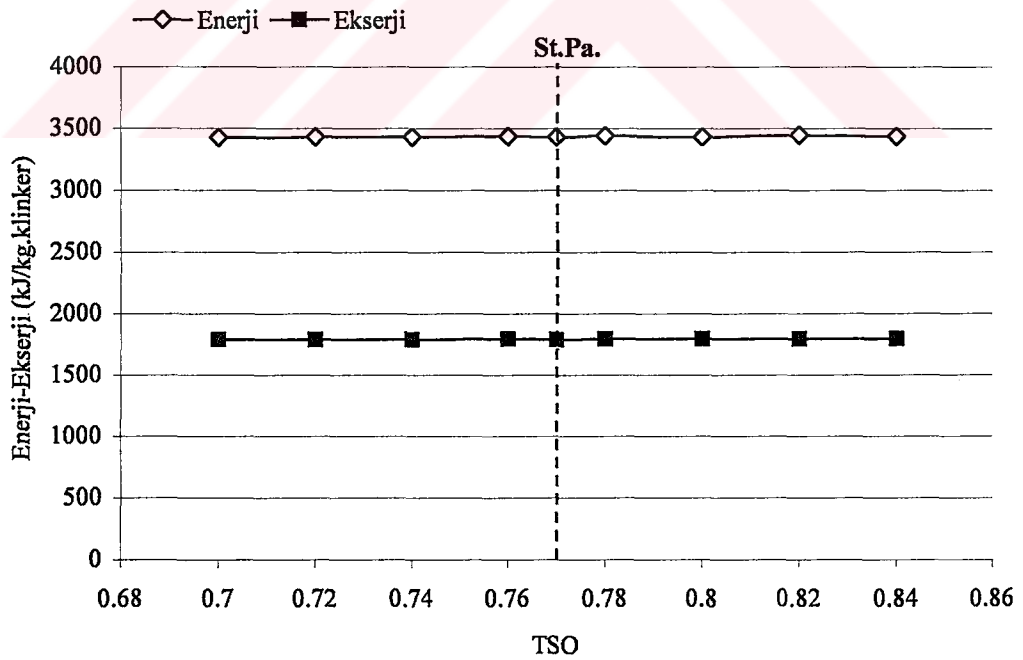


Şekil 6.26.b. Değişken parametre olarak tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranının kalsinatör yakıt değişimine etkisi

Normal kömür yakıtı için tersiyer havanın, tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji-ekserji (Şekil 6.27.a.) ve çıkan enerji-ekserji (Şekil 6.27.b.) miktarlarında çok az oranda değişiklik oluşturmaktadır.

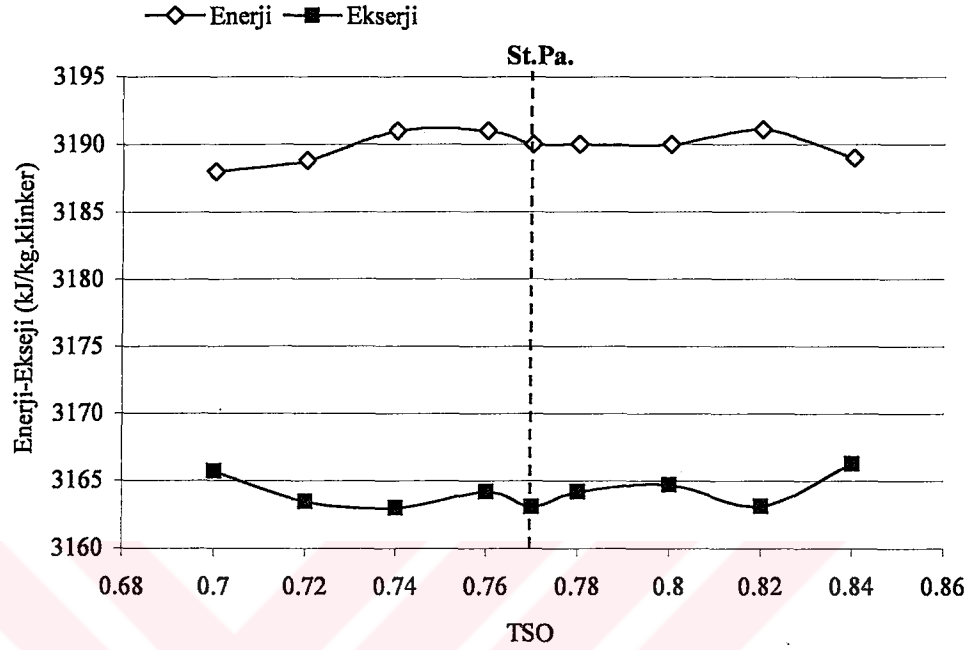


Şekil 6.27.a. Normal kömür yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

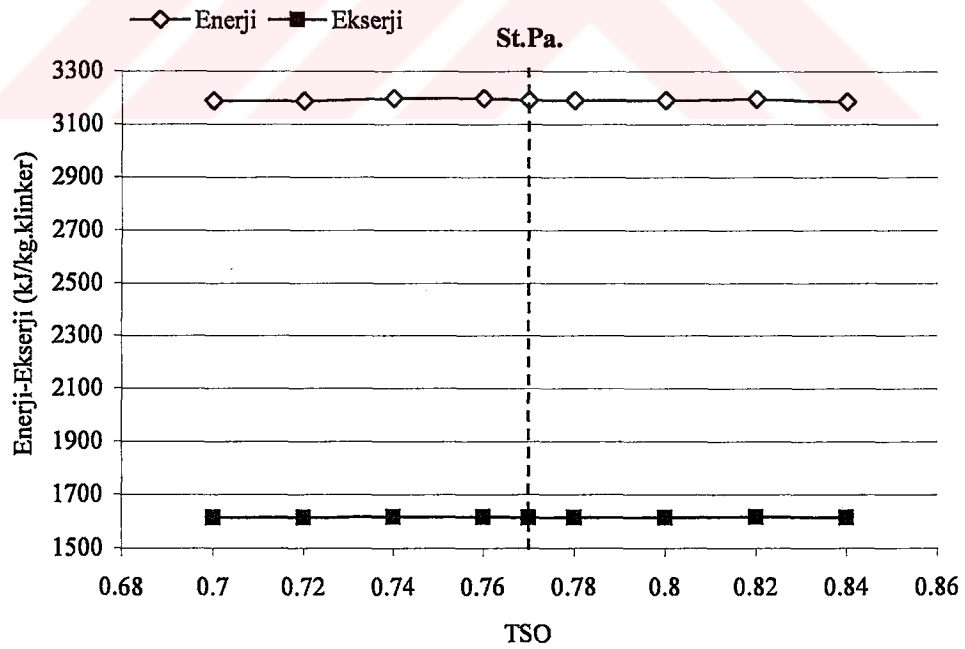


Şekil 6.27.b. Normal kömür yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı için tersiyer havanın, tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji-ekserji (Şekil 6.28.a.) ve çıkan enerji-ekserji (Şekil 6.28.b.) miktarlarındaki değişimi etkilememektedir.

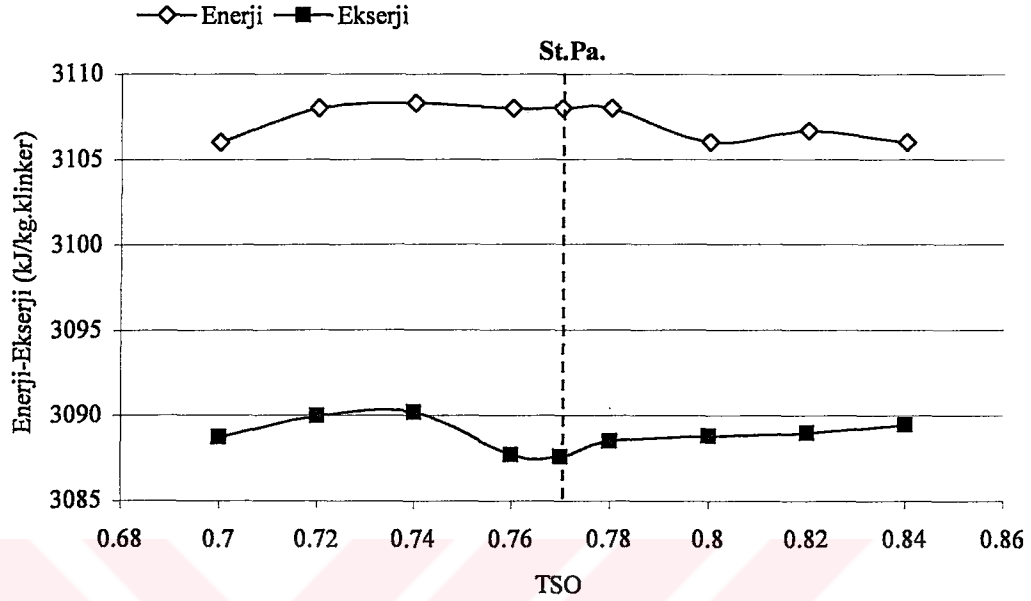


Şekil 6.28.a. Test kömürü yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

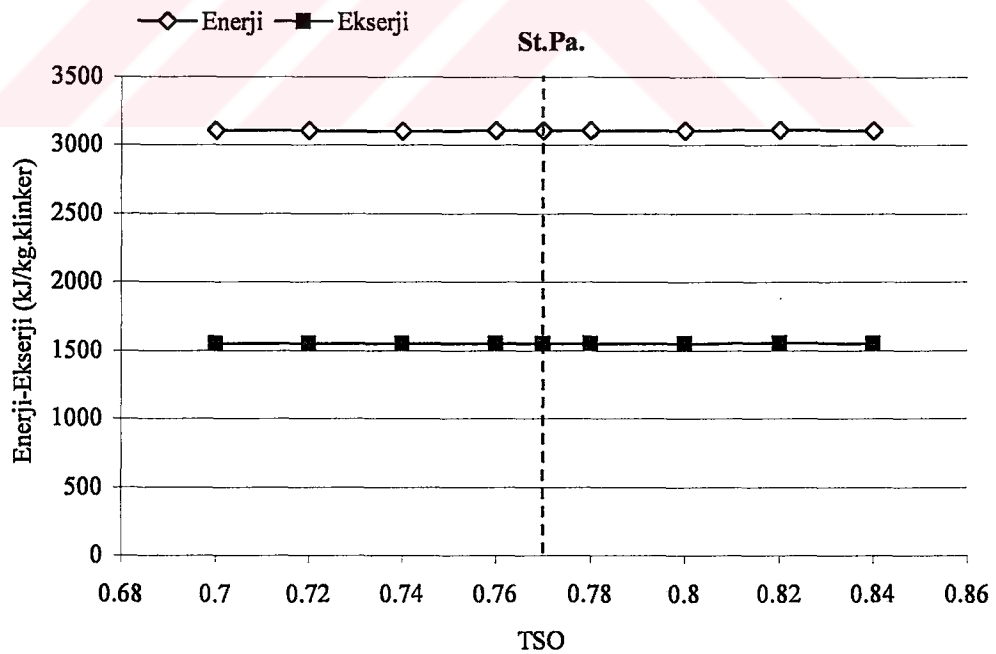


Şekil 6.28.b. Test kömürü yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı için tersiyer havanın, tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji-ekserji (Şekil 6.29.a.) ve çıkan enerji-ekserji (Şekil 6.29.b.) miktarlarında önemli bir değişim oluşturmamaktadır.



Şekil 6.29.a. Fuel-oil yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

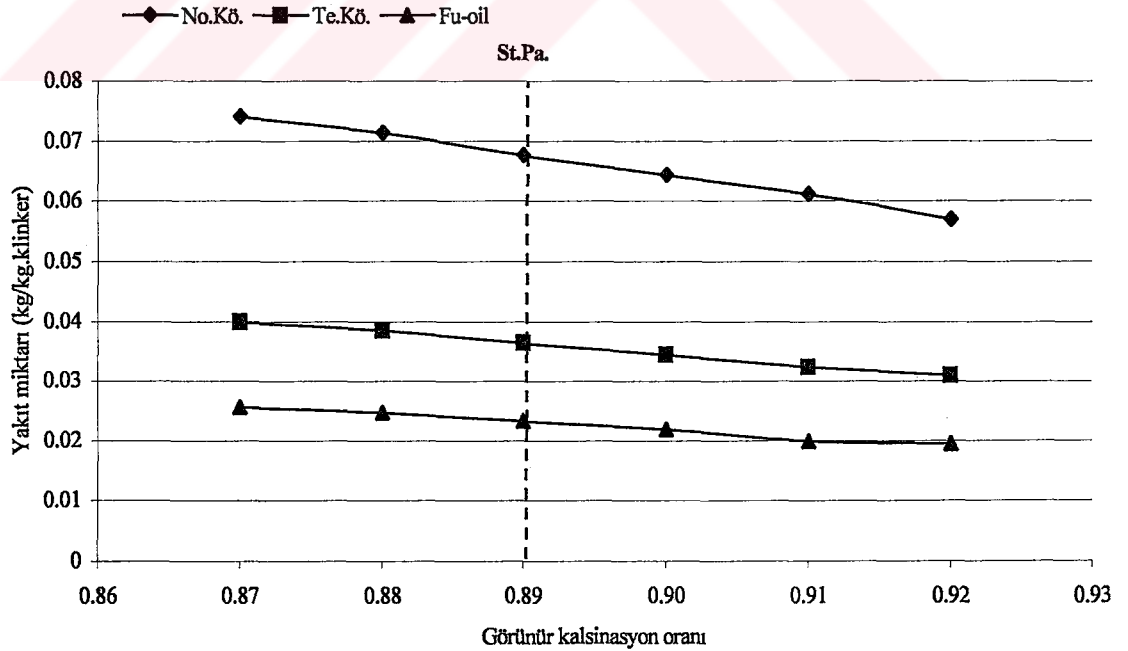


Şekil 6.29.b. Fuel-oil yakıtı için tersiyer havanın tersiyer+sekonder havaya oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

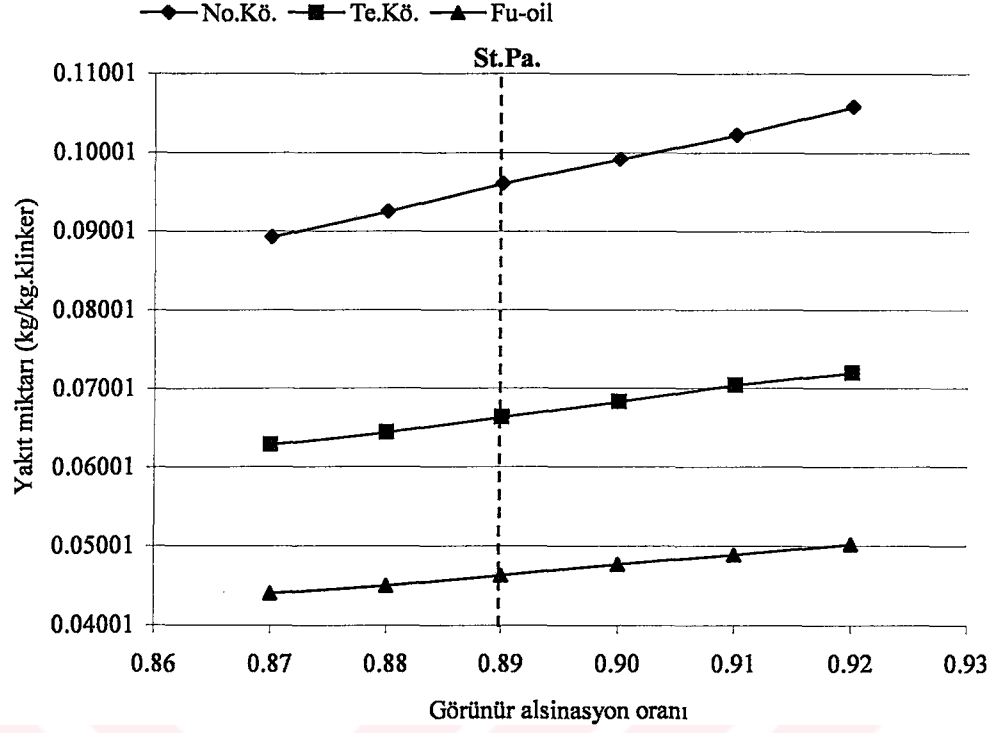
6.5. Değişken Parametre Olarak Döner Fırına Giren Görünür Kalsinasyon Oranının Değerlendirilmesi

Görünür kalsinasyon oranı değişken parametresinin normal kömür, test kömürü ve fuel-oil yakıtları için döner fırın ve kalsinatör yakıt değişimleri, tüm sisteme giren-çıkan enerji ve ekserji değişimleri değerlendirilmiştir. Döner fırın yakıt değişimi Şekil 6.30.a.'da, kalsinatör yakıt değişimi ise Şekil 6.30.b.'de verilmiştir. Normal kömür yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.31.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.31.b.' de, test kömürü yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.32.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.32.b.' de, fuel-oil yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.33.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.33.b.' de görülmektedir.

Döner fırın girişte görünür kalsinasyon oranındaki değişim döner fırın yakıtını azalmasına neden olurken (Şekil 6.30.a.), kalsinatör yakıtının da artmasına neden olmaktadır(Şekil 6.30.b.).

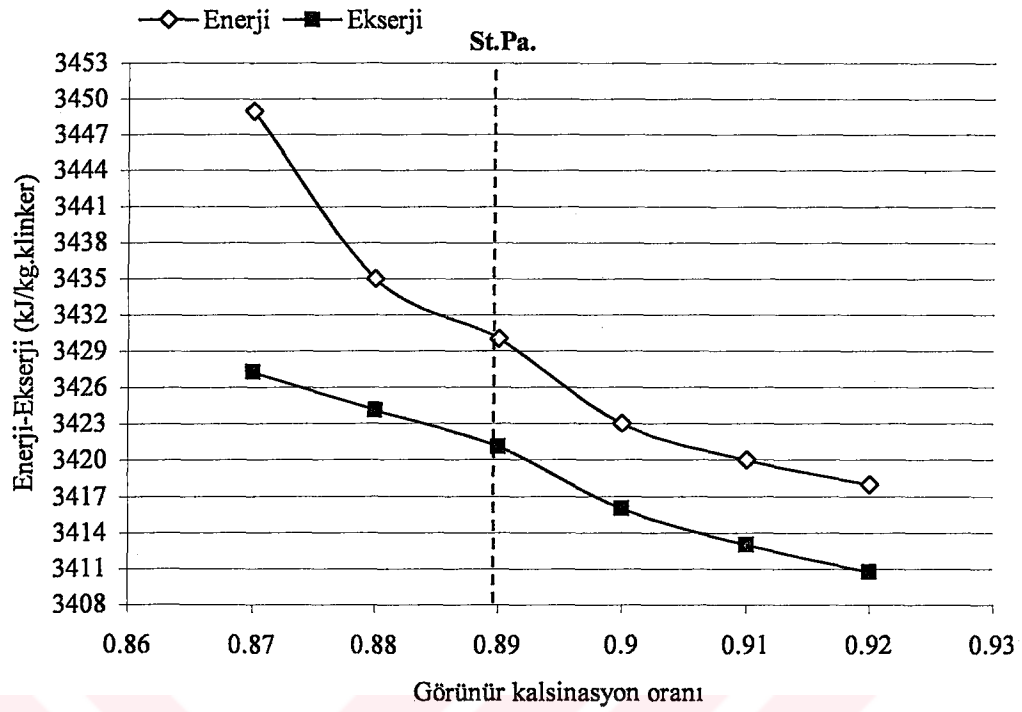


Şekil 6.30.a. Görünür kalsinasyon oranı parametresinin döner fırın yakıt değişimine etkisi

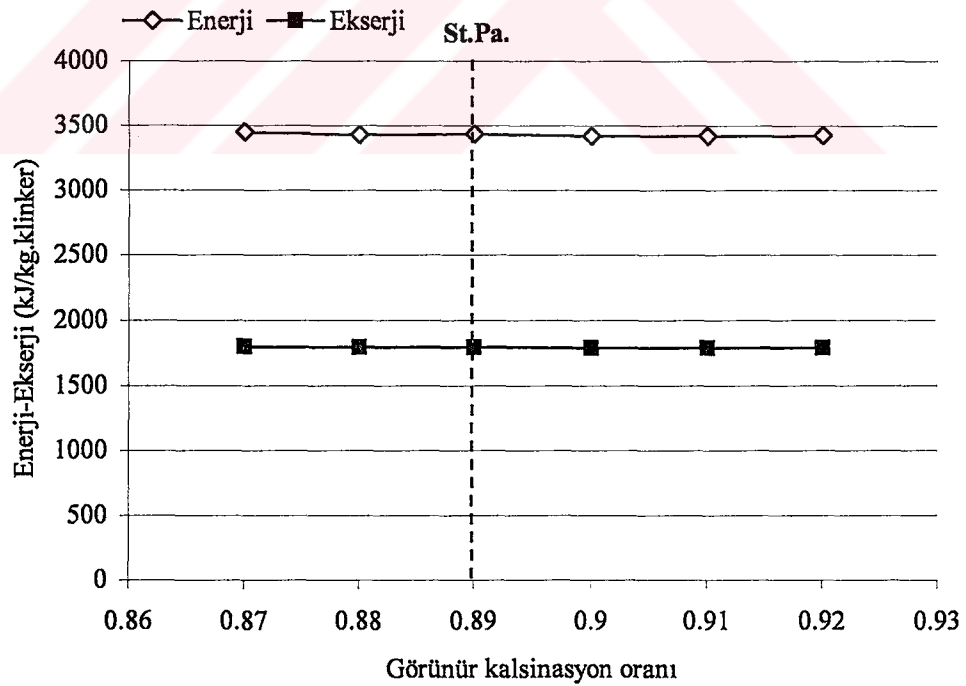


Şekil 6.30.b. Görünür kalsinasyon oranı parametresinin kalsinatör yakıt değişimine etkisi

Normal kömür yakıtı için döner fırına girişteki hammadde görünür kalsinasyon oranının değişimi, tüm sisteme giren enerji-ekserji (Şekil 6.31.a.) miktarını diğer yakıt türlerine oranla biraz daha fazla olumsuz etkilemektedir. Yine normal kömür yakıtı için döner fırına girişteki hammadde görünür kalsinasyon oranının değişimi tüm sistemden çıkan enerji-ekserji (Şekil 6.31.b.) miktarı değişimini çok az olumsuz etkilenmektedir.

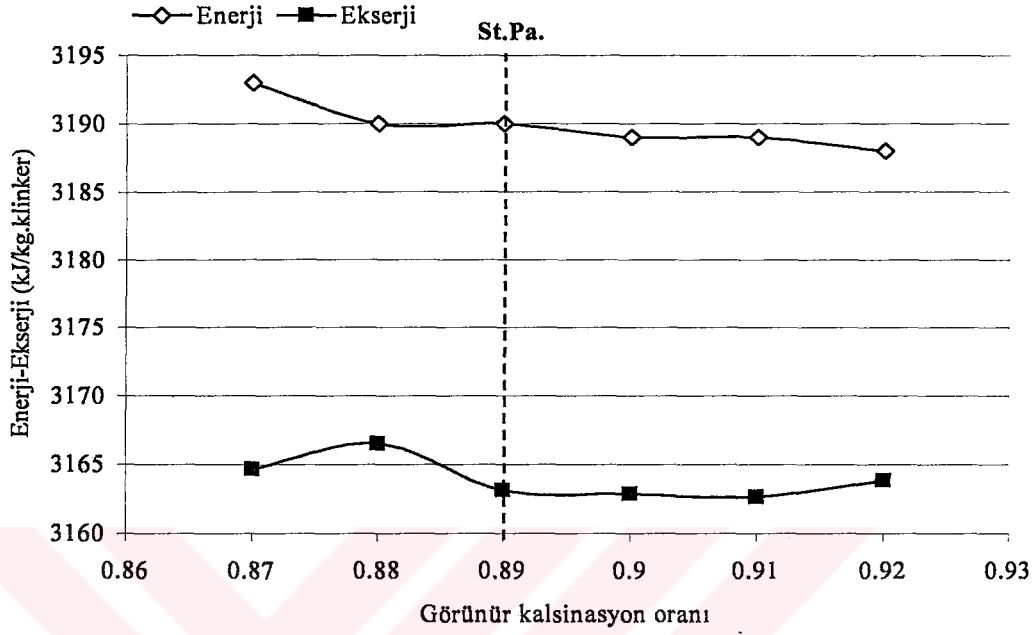


Şekil 6.31.a. Normal kömür yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimine etkisi

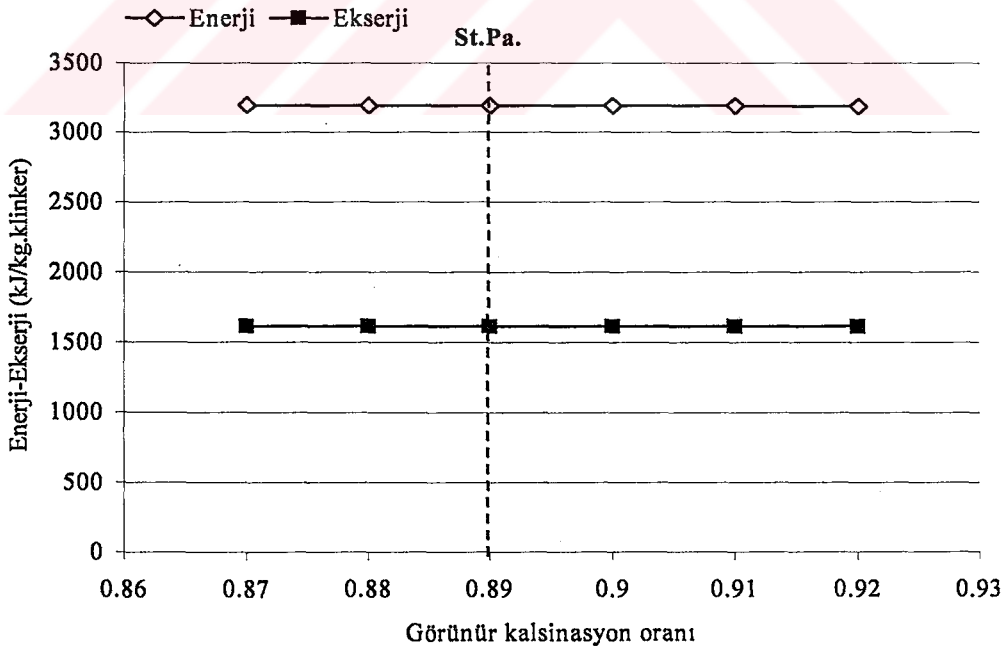


Şekil 6.31.b. Normal kömür yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı için döner fırın girişi hammadde görünür kalsinasyon oranı değişimi, tüm sisteme giren enerji-ekserji miktarı (Şekil 6.32.a.) ve çıkan enerji-ekserji miktarı (Şekil 6.32.b.) değişimlerini çok az etkilemektedir.

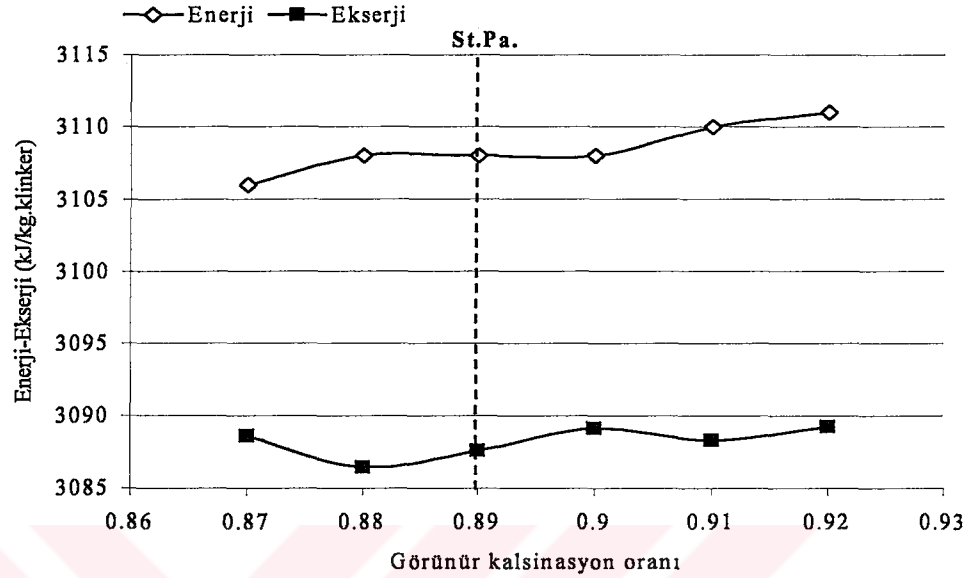


Şekil 6.32.a. Test kömürü yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimine etkisi

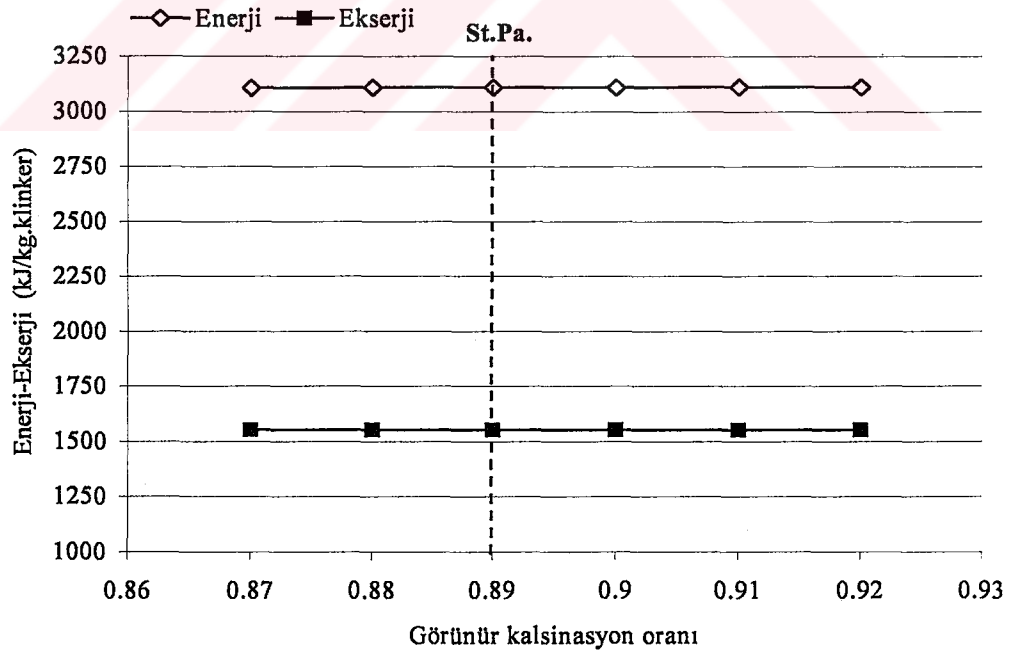


Şekil 6.32.b. Test kömürü yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı için döner fırın girişi hammadde görünür kalsinasyon oranı değişimi, tüm sisteme giren enerji-ekserji miktarı değişimini (Şekil 6.33.a.) ve çıkan enerji-ekserji miktarı değişimini (Şekil 6.33.b.) çok az etkilemektedir.



Şekil 6.33.a. Fuel-oil yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimine etkisi

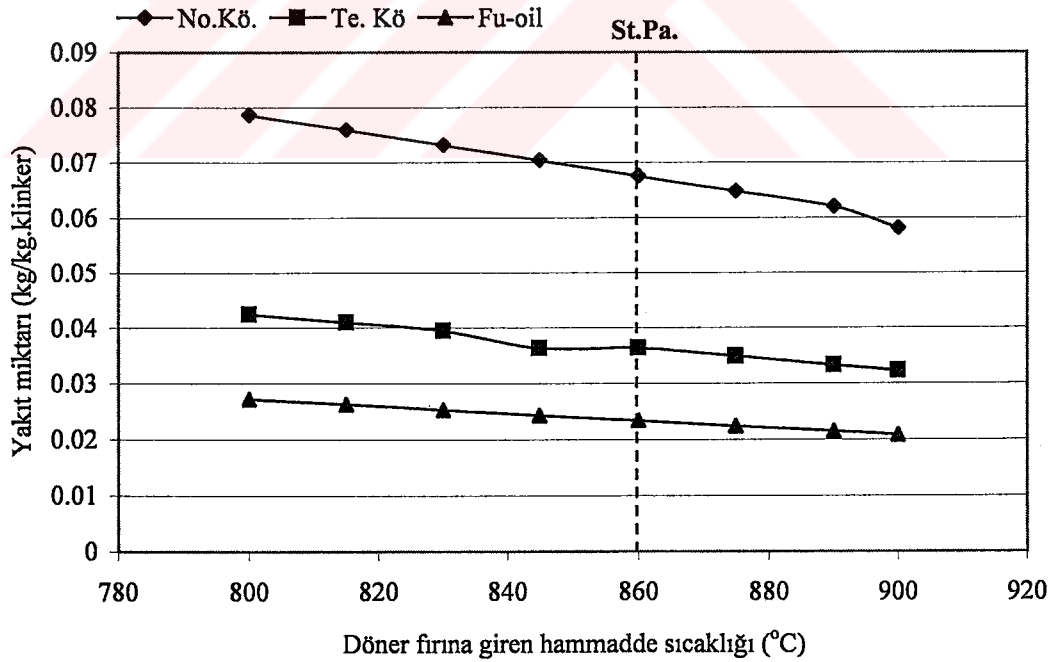


Şekil 6.33.b. Fuel-oil yakıtı için görünür kalsinasyon oranı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimine etkisi

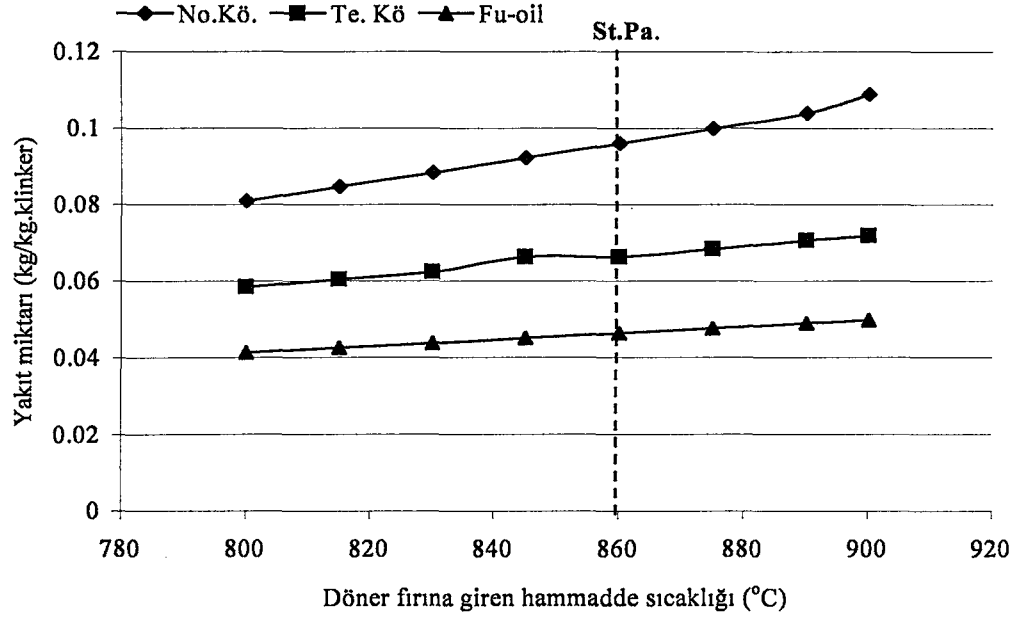
6.6. Değişken Parametre Olarak Döner Fırına Giren Hammadde Sıcaklığının Değerlendirilmesi

Döner fırına giren hammadde sıcaklığı değişken parametresinin normal kömür, test kömürü ve fuel-oil yakıtları için döner fırın ve kalsinatör yakıt değişimleri, tüm sisteme giren-çıkan enerji ve ekserji değişimleri değerlendirilmiştir. Döner fırın yakıt değişimi Şekil 6.34.a.'da, kalsinatör yakıt değişimi ise Şekil 6.34.b.'de verilmiştir. Normal kömür yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.35.a.'da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.35.b.'de, test kömürü yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.36.a.'da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.36.b.'de, fuel-oil yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.37.a.'da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.37.b.'de görülmektedir.

Döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresindeki artış döner fırın yakıtını azaltmakta (Şekil 6.34.a.) ve kalsinatör yakıtını ise arttırmaktadır (Şekil 6.34.b.).

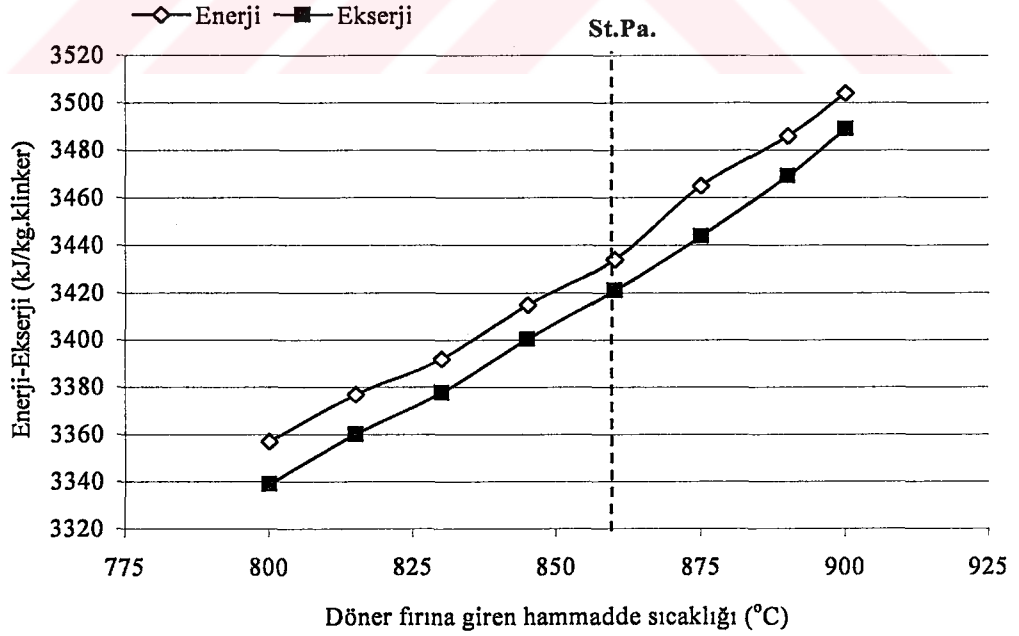


Şekil 6.34.a. Değişken parametre olarak döner fırına giren hammadde sıcaklığının döner fırın yakıt değişimine etkisi

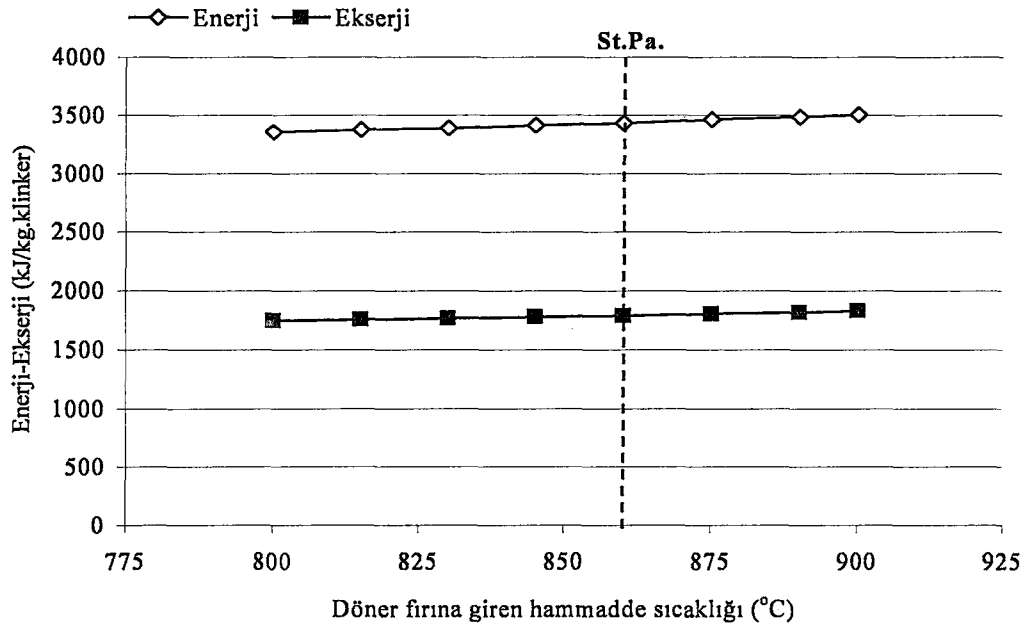


Şekil 6.34.b. Değişken parametre olarak döner fırına giren hammadde sıcaklığının kalsinatör yakıt değişimine etkisi

Normal kömür yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığındaki artış tüm sistem giren enerji-ekserji değişimini (Şekil 6.35.a.) ve tüm sistemden çıkan enerji-ekserji değişimini (Şekil 6.35.b.) olumsuz etkilemektedir.

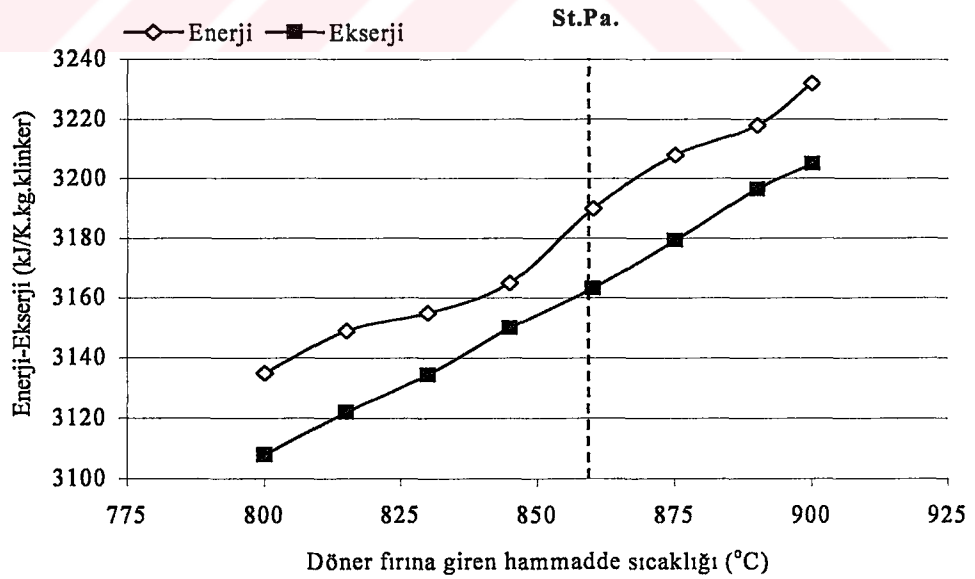


Şekil 6.35.a. Normal kömür yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

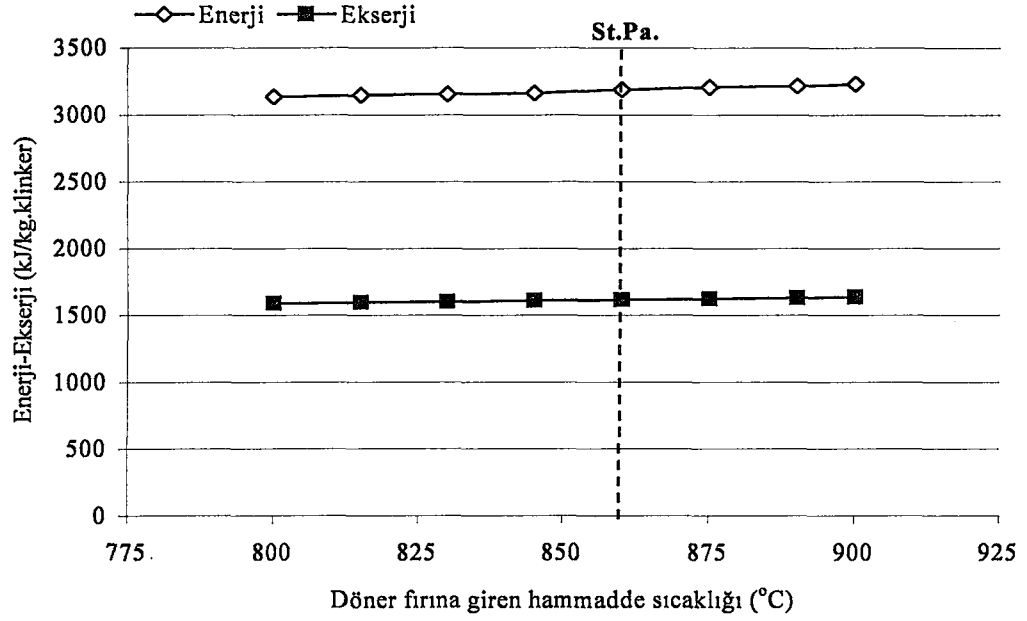


Şekil 6.35.b. Normal kömür yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığındaki artış tüm sistem giren enerji-ekserji değişimini (Şekil 6.36.a.) ve tüm sistemden çıkan enerji-ekserji değişimini (Şekil 6.36.b.) olumsuz etkilemektedir.

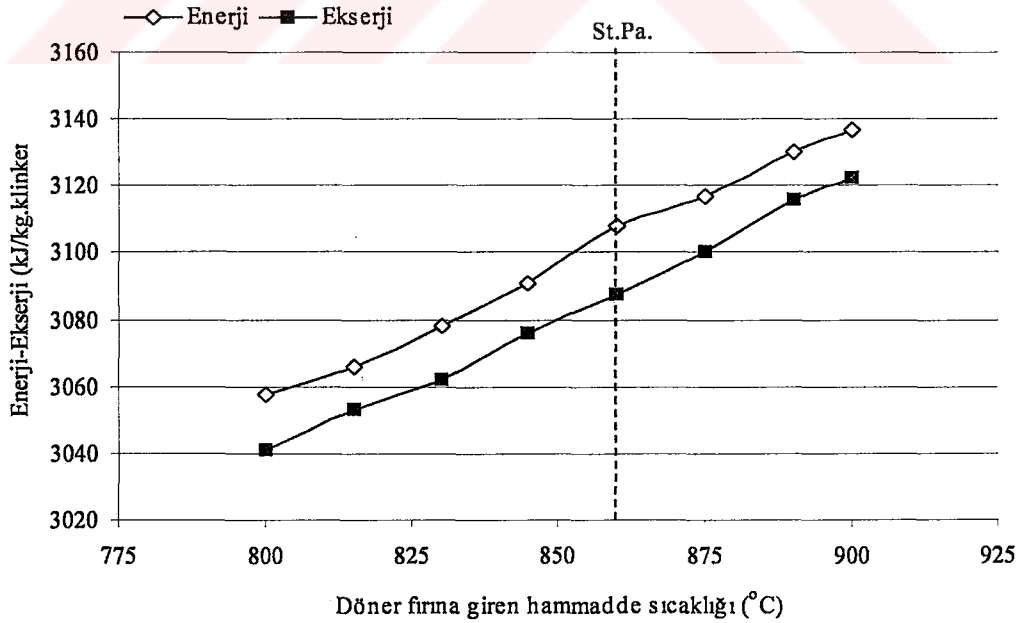


Şekil 6.36.a. Test kömürü yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

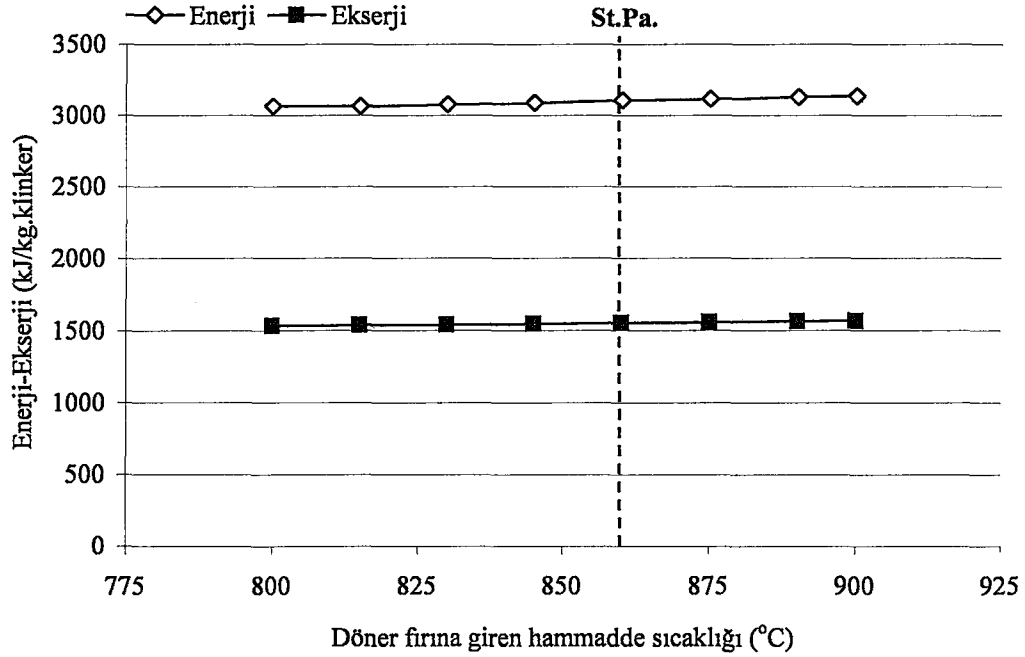


Şekil 6.36.b. Test kömürü yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığındaki artış tüm sistem giren enerji-ekserji değişimini (Şekil 6.37.a.) ve tüm sistemden çıkan enerji-ekserji değişimini (Şekil 6.37.b.) olumsuz etkilemektedir.



Şekil 6.37.a. Fuel-oil yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

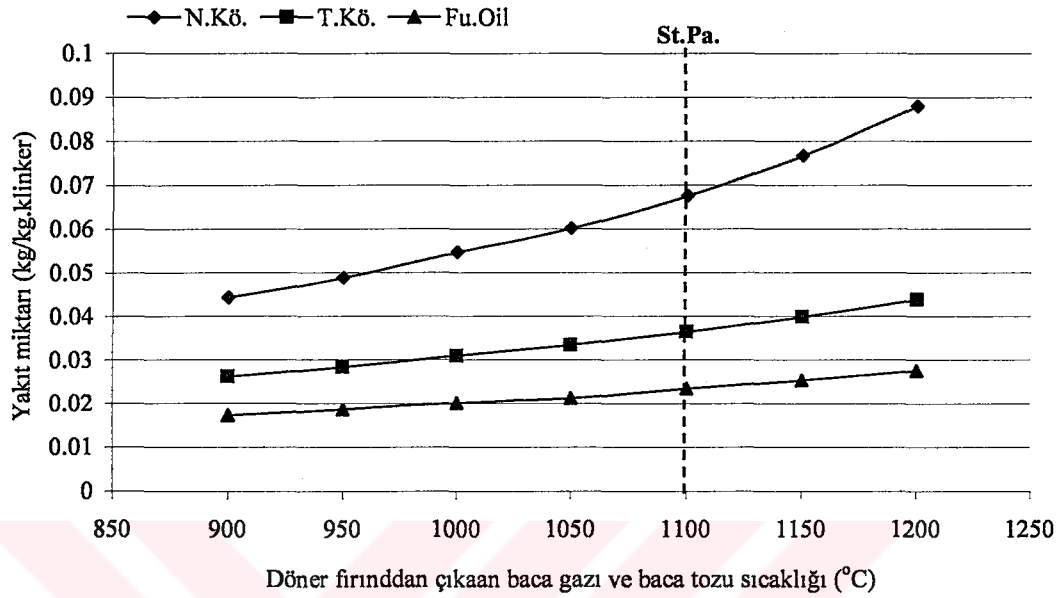


Şekil 6.37.b. Fuel-oil yakıtı için döner fırına giren hammadde sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

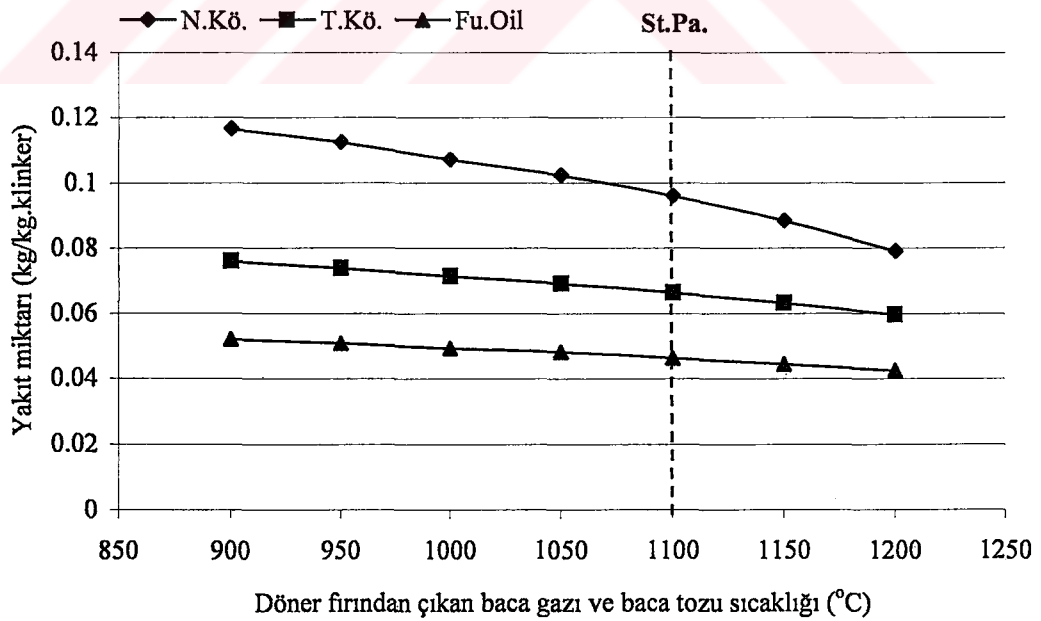
6.7. Değişken Parametre Olarak Döner Fırından Çıkan Baca Gazı ve Baca Tozu Sıcaklığının Değerlendirilmesi

Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı değişken parametresinin normal kömür, test kömürü ve fuel-oil yakıtları için döner fırın-kalsinatör yakıt değişimleri, tüm sisteme giren-çıkan enerji ve ekserji değişimleri değerlendirilmiştir. Döner fırın yakıt değişimi Şekil 6.38.a.'da, kalsinatör yakıt değişimi ise Şekil 6.38.b.'de verilmiştir. Normal kömür yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.39.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.39.b.' de, test kömürü yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.40.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.40.b.' de, fuel-oil yakıtı ile tüm sisteme giren enerji ve ekserji değişimi Şekil 6.41.a.' da, tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji değişimi ise Şekil 6.41.b.' de, kalsinatöre giren-çıkan ekserji değişimi Şekil 6.42.a. ve Şekil 6.42.b.' de görülmektedir.

Döner fırından çıkan baca tozu sıcaklığı parametresindeki artış döner fırın yakıtın artırır iken (Şekil 6.38.a.), kalsinatör yakıtının da azalmasına neden olmaktadır (Şekil 6.38.b.).

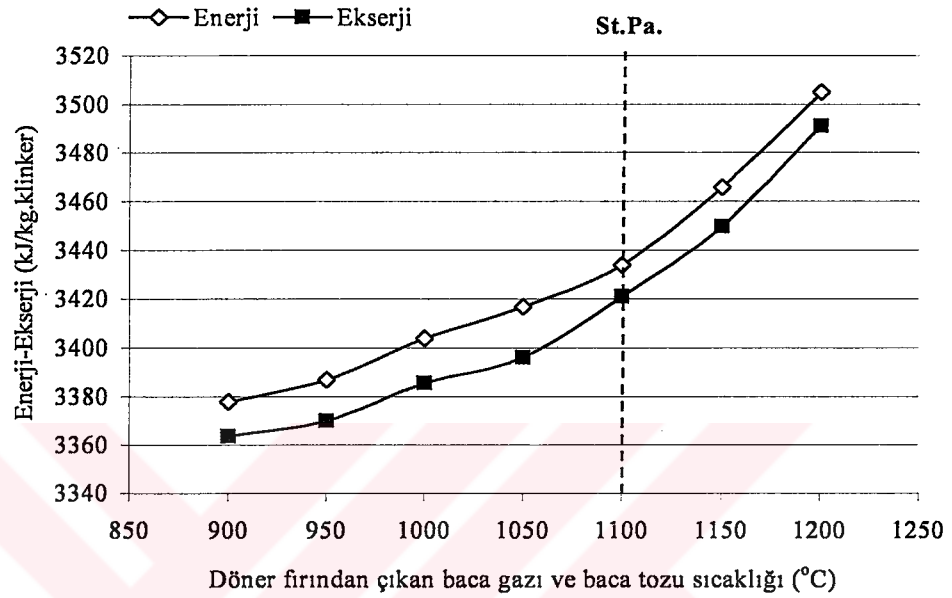


Şekil 6.38.a. Değişken parametre olarak döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığının döner fırın yakıtı değişimine etkisi

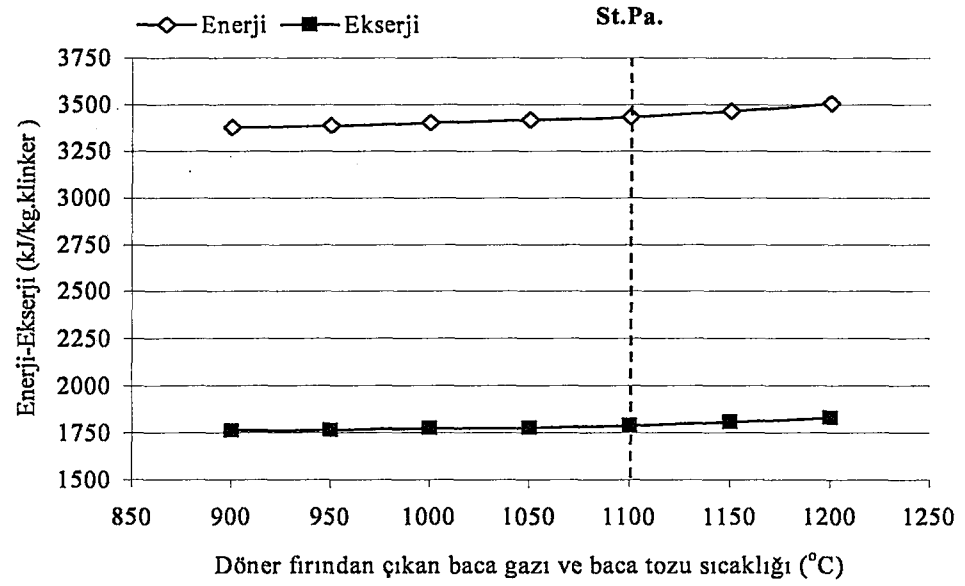


Şekil 6.38.b. Değişken parametre olarak döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığının kalsinatör yakıtı değişimine etkisi

Normal kömür yakıtı için döner fırından çıkan baca tozu sıcaklığı parametresindeki artışın döner fırına giren enerji-ekserji miktarı değişimine olumsuz etkisi (Şekil 6.39.a.) ve çıkan enerji-ekserji miktarı değişimine olumsuz etkisi ise (Şekil 6.39.b.) de görülmektedir.

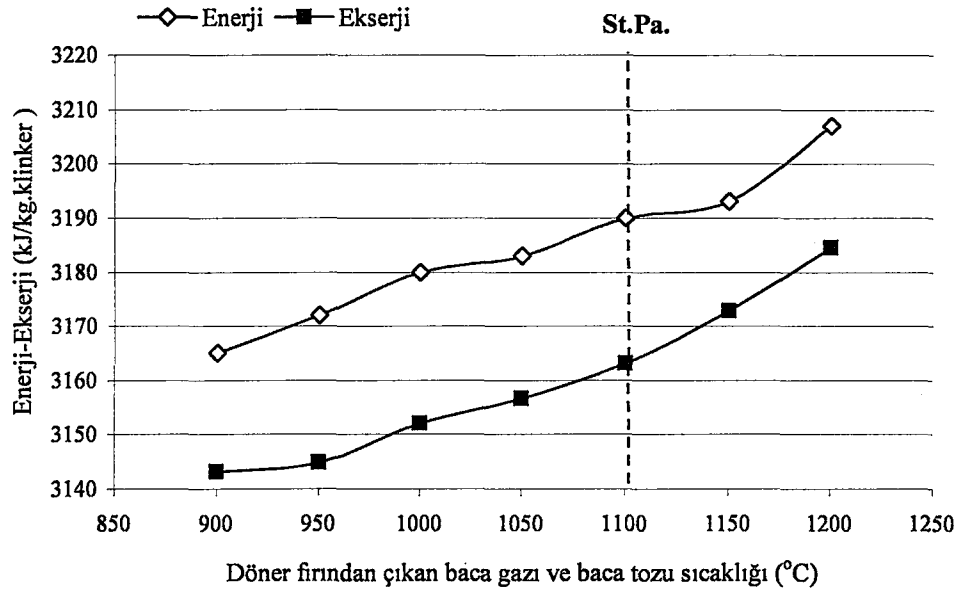


Şekil 6.39.a. Normal kömür yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

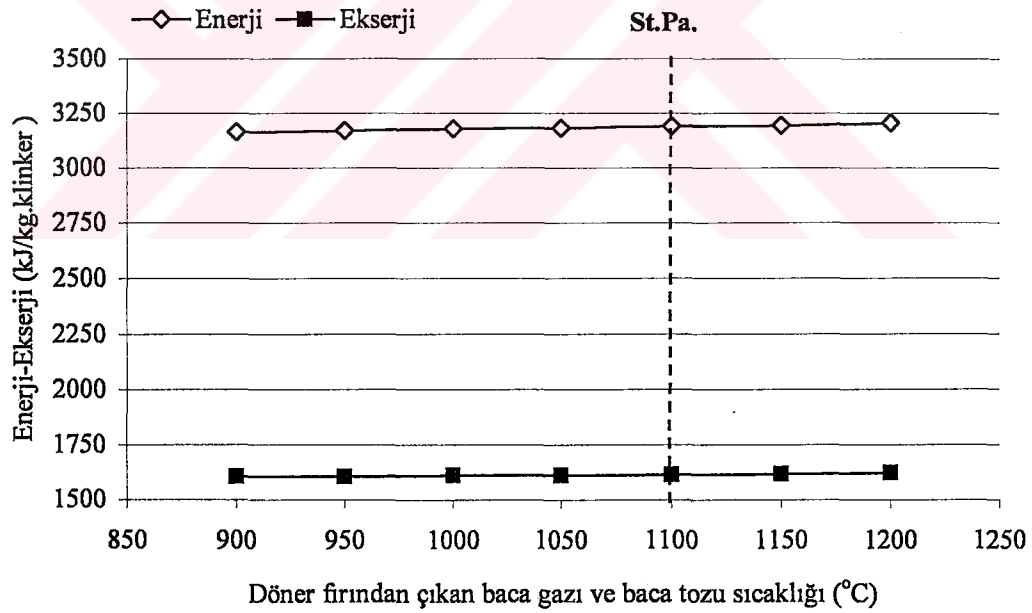


Şekil 6.39.b. Normal kömür yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Test kömürü yakıtı için döner fırından çıkan baca tozu sıcaklığı parametresindeki artışın döner fırına giren enerji-ekserji miktarı değişimine olumsuz etkisi (Şekil 6.40.a.) da, ve çıkan enerji-ekserji miktarı değişimine olumsuz etkisi ise (Şekil 6.40.b.) de görülmektedir.

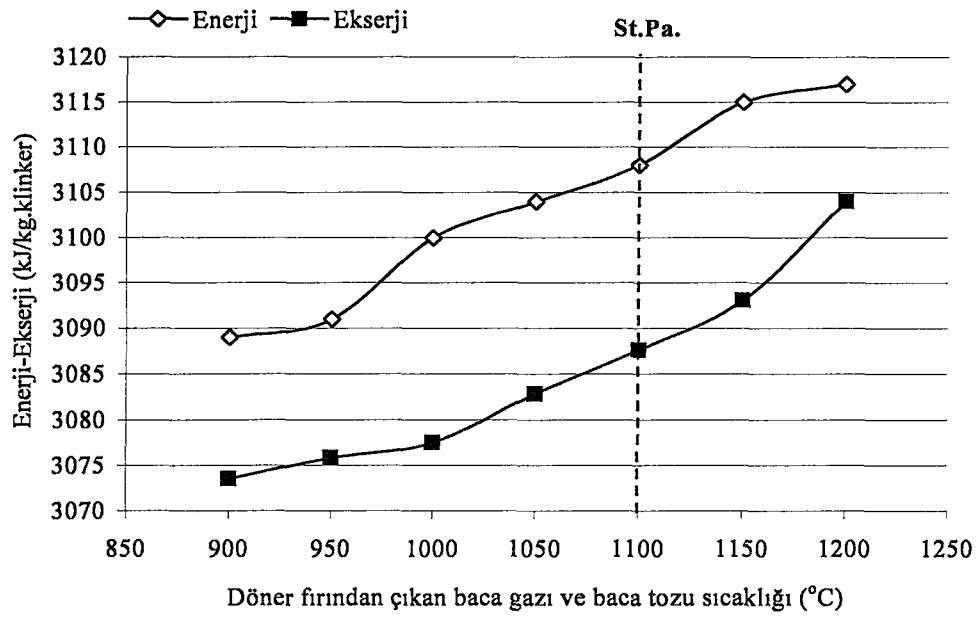


Şekil 6.40.a. Test kömürü yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

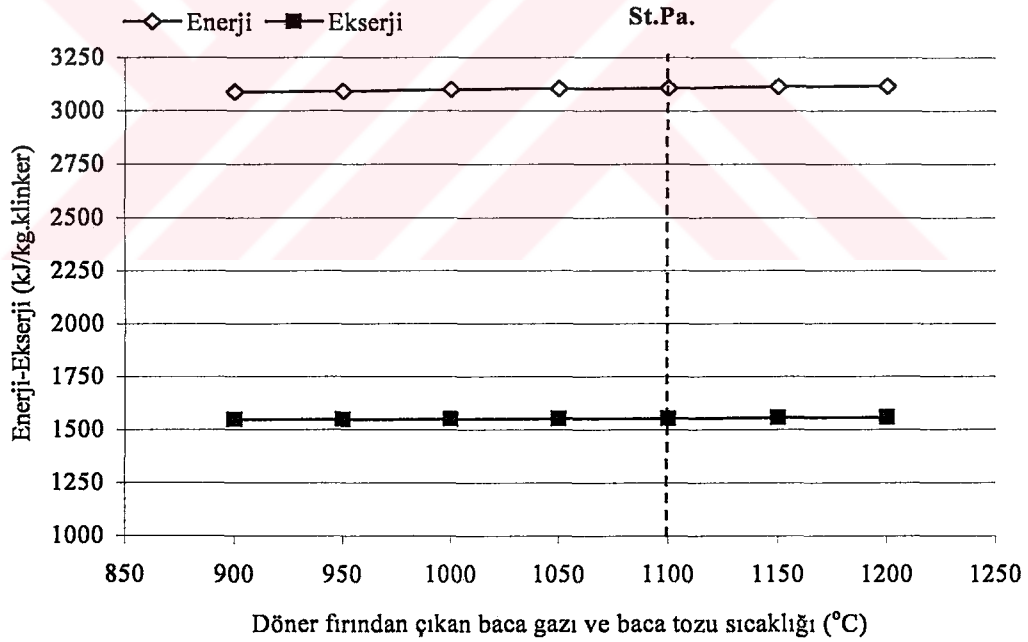


Şekil 6.40.b. Test kömürü yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Fuel-oil yakıtı için döner fırından çıkan baca tozu sıcaklığı parametresindeki artışın döner fırına giren enerji-ekserji miktarı değişimi (Şekil 6.41.a.) da, ve çıkan enerji-ekserji miktarı değişimine olumsuz etkisi (Şekil 6.41.b.) de görülmektedir.

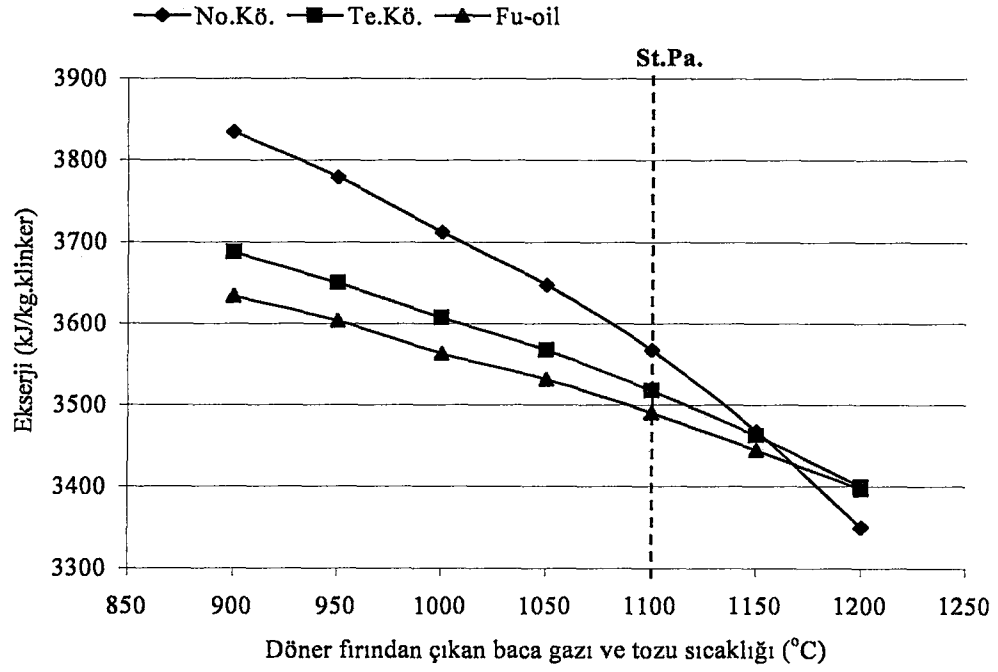


Şekil 6.41.a. Fuel-oil yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sisteme giren enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

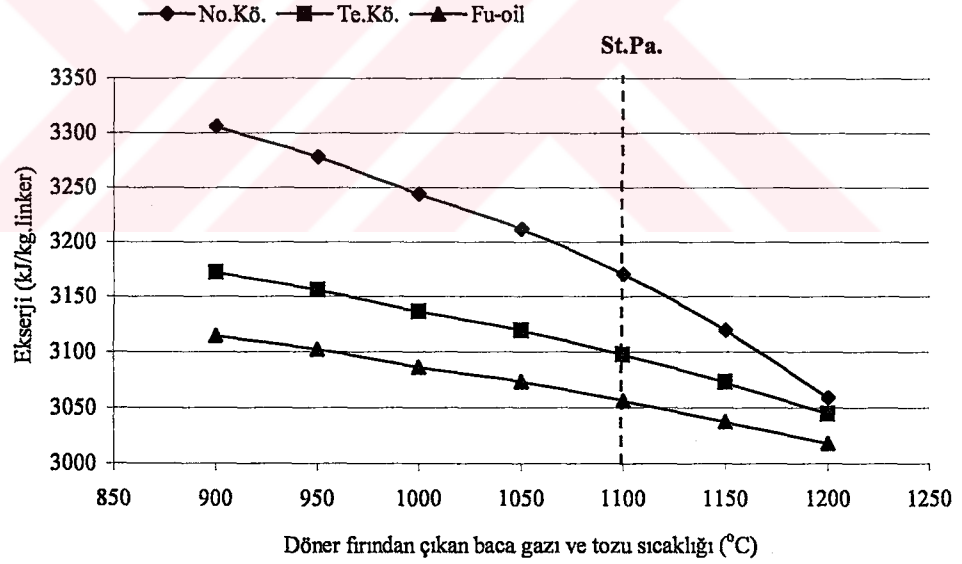


Şekil 6.41.b. Fuel-oil yakıtı için döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin tüm sistemden çıkan enerji ve ekserji miktarı değişimine etkisi

Döner fırından çıkan baca gazı sıcaklığı parametresi kalsinatöre giren enerji-ekserji miktarını (Şekil 6.42.a.), aynı şekilde kalsinatörden çıkan enerji-ekserji miktarını da azaltmaktadır (Şekil 6.42.b.).



Şekil 6.42.a. Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin kalsinatöre giren ekserji miktarı değişimine etkisi



Şekil 6.42.b. Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığı parametresinin kalsinatörden çıkan ekserji miktarı değişimine etkisi

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1.Giriş

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim prosesleri için belirlenmiş bazı parametrelerle kütle, enerji ve ekserji denklikleri açısından elde edilen nümerik sonuçlar ile çizilen grafiklerin değerlendirilmesi ayrı ayrı yapılacaktır.

7.2. Kütle Denkliklerin Değerlendirilmesi

Elde edilen nümerik sonuçlar ile çizilen grafikler incelendiğinde farklı üç yakıt türü (normal kömür, test kömürü ve fuel-oil) ile elde edilmiş toz sirkülasyonsuz hammadde ve 1.siklona giren hammadde miktarları arasında farklılık olduğu görülmektedir. Bunun sebebi yakıt külünün klinker tarafından absorbe edilmesidir. Kül miktarı fazla olan normal kömür yakıtı kullanıldığında gerekli hammadde miktarı az olmaktadır (Şekil 6.1.). Ayrıca yakıtların değerlendirmesi yapıldığında normal kömür miktarı bütün değişken parametre şartlarında test kömürü ve fuel-oil yakıtlarına nazaran miktar olarak daha fazla olmaktadır (Şekil 6.2.).

Yakma havası ve atmosfere atılan baca gazı miktarı yönünden bakıldığında fuel-oil ve test kömürü daha avantajlı durum almaktadır. Bundan dolayı bu iki yakıt türünde baca gazı fanının debisi ve gücü de olumlu etkilenmektedir.

7.3. Enerji Denklerin Değerlendirilmesi

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sistemi standart parametreler ile enerji denkliği gözönüne alınarak toplam yakıt enerjisi

tüketimi yönünden sıralama yapıldığında normal kömür, test kömürü ve fuel-oil şeklinde oluşmaktadır (Tablo 7.1.).

Tablo 7.1. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde yakıt enerjisi tüketimi (standart durum)

Yakıt türü	Yakıt enerjisi tüketimi (kJ/kg.klinker)
Normal kömür	3373,76
Test kömürü	3112,53
Fuel-oil	3037,16

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sistemi normal kömür yakıtı kullanılarak değişken parametreler için karşılaştırıldığında şunlar görülmektedir;

- Hava fazlalık katsayısındaki değişme özgül yakıt tüketimini, siklon kademelerinde hammadde ve baca gazı sıcaklığını arttırmakta, ayrıca döner fırın ile kalsinatör arasındaki yakıt dağılımını çok az (yakıt paylaşımını) etkilemektedir. Hava fazlalık katsayısında standart parametre gözönünde bulundurularak % 1' lik artış yakıt enerjisi tüketimini yaklaşık % 0,45 (14-22 kJ/kg.klinker), (Şekil 6.5.a.ve Şekil 6.5.b., Şekil 6.6.a.ve Şekil 6.6.b., Şekil 6.7.a. ve Şekil 6.7.b.) atmosfere atılan baca gazı sıcaklığını da yaklaşık 3-5 °C kadar arttırmaktadır (Şekil 6.4.),
- Döner fırına giren hammaddenin görünür kalsinasyon oranındaki değişim özgül yakıt enerjisi tüketimini çok az etkilemektedir. Siklon kademelerindeki hammadde, baca gazı ve baca tozu sıcaklıklarını hiç etkilememektedir. Ancak yakıtın döner fırın ve kalsinatör arasındaki paylaşımında önemli oranda etkili olmaktadır(Şekil 6.22.a. ve Şekil 6.22.b.). Hammaddenin görünür kalsinasyon oranı standart parametre gözönünde bulundurularak % 1 arttırıldığı zaman kalsinatör yakıtı da % 1.8 (52 kJ/kg.klinker) kadar artmaktadır,
- Döner fırından baca gazlarıyla sürüklenerek çıkan baca tozu miktarındaki artış, özgül yakıt enerjisi tüketimini ve siklon kademelerindeki hammadde ve baca gazı sıcaklıklarını çok az etkilemektedir. Döner fırın ile kalsinatör arasındaki yakıt paylaşımında baca tozu miktarı % 2 arttırıldığında kalsinatör yakıtı yaklaşık % 0,7 (8 kJ/kg.klinker) kadar azalmaktadır(Şekil 6.14.b.),

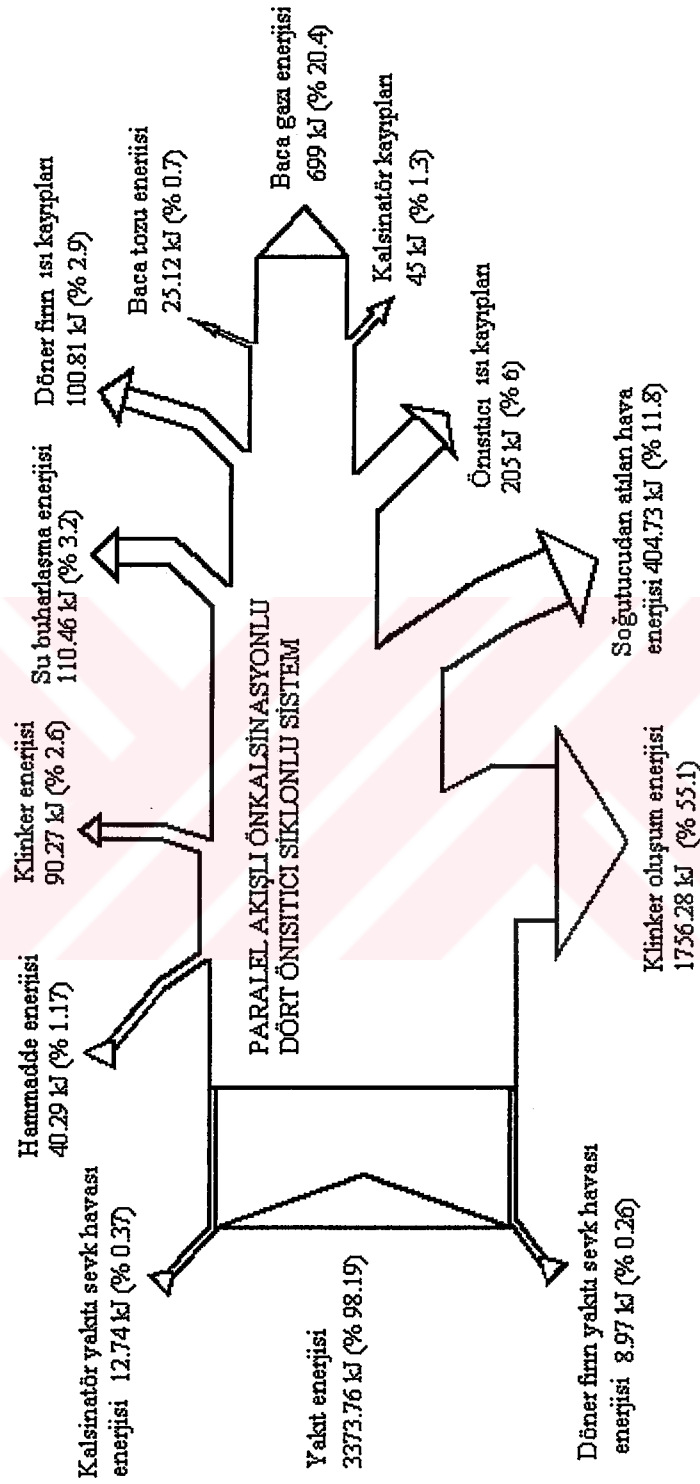
- Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde tersiyer havanın (tersiyer+sekonder havaya) oranı, döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığındaki özgül yakıt enerjisi tüketimini ve siklon kademelerindeki hammadde, baca gazı ve baca tozu sıcaklıklarını çok az etkilemektedir. Tüm sistemin özgül yakıt enerji tüketiminde değişim görülmemekte, fakat yakıtın döner fırın ile kalsinatör arasındaki paylaşımında sekonder havanın %1'lik artışı kalsinatör yakıtının yaklaşık olarak %1,7 (28 kJ/kg.klinker) kadar azalmasına neden olmaktadır(Şekil 6.18.b.),
- Döner fırına giren hammadde sıcaklığının artması özgül yakıt enerjisi tüketimini ve siklon kademelerindeki hammadde ile baca gazı ve baca tozu sıcaklıklarını olumsuz yönde etkilemektedir. Standart parametre gözönüne alınınca döner fırına giren hammadde sıcaklığındaki 15 °C'lik artış, yakıt enerjisi tüketimini 32 kJ/kg.klinker kadar arttırmaktadır(Şekil 6.27.a., Şekil 6.28.a ve Şekil 6.29.a.). Döner fırına giren hammadde sıcaklığındaki artış, atmosfere atılan baca gazı sıcaklığını ve buna bağlı olarak ta baca gazı enerjisinin yükselmesine neden olmaktadır. Döner fırına giren hammadde sıcaklığının standart parametre gözönüne alınarak 15 °C'lik artması ile kalsinatör yakıtının yaklaşık % 1.96 (94 kJ/kg.klinker) kadar arttığı görülmektedir(Şekil 6.26.b.),
- Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığındaki artış özgül yakıt enerjisini ve atmosfere atılan baca gazı enerjisini arttırmaktadır. Standart parametre sıcaklığı gözönüne alınınca 50 °C'lik artış kalsinatör yakıtında % 5 (178 kJ/kg.klinker) kadar azalmaya neden olmaktadır(Şekil 6.30.b.),
- Döner fırın duvar ısı kaybı ve soğutucunun toplam ısı kaybı arttıkça özgül yakıt enerjisi tüketimi ve siklon kademelerindeki sıcaklık gradyeni ile atmosfere atılan baca gazının ve baca tozunun çıkış sıcaklığına etkisi olumsuz olmaktadır.
- Kaçak hava miktarındaki artış bu çalışmada ihmal edilmiştir, fakat özgül yakıt enerjisi tüketimini ve siklon kademelerindeki hammadde ile baca gazı ve baca tozu sıcaklıklarını olumsuz etkilemektedir.

Değişken parametreler içinde değerlendirme yapıldığında ise hava fazlalık katsayısı, görünür kalsinasyon oranı, tersiyer havanın (tersiyer+sekonder havaya) oranı, baca tozu miktarı, döner fırına giren hammadde sıcaklığı ve döner fırından çıkan baca gazı

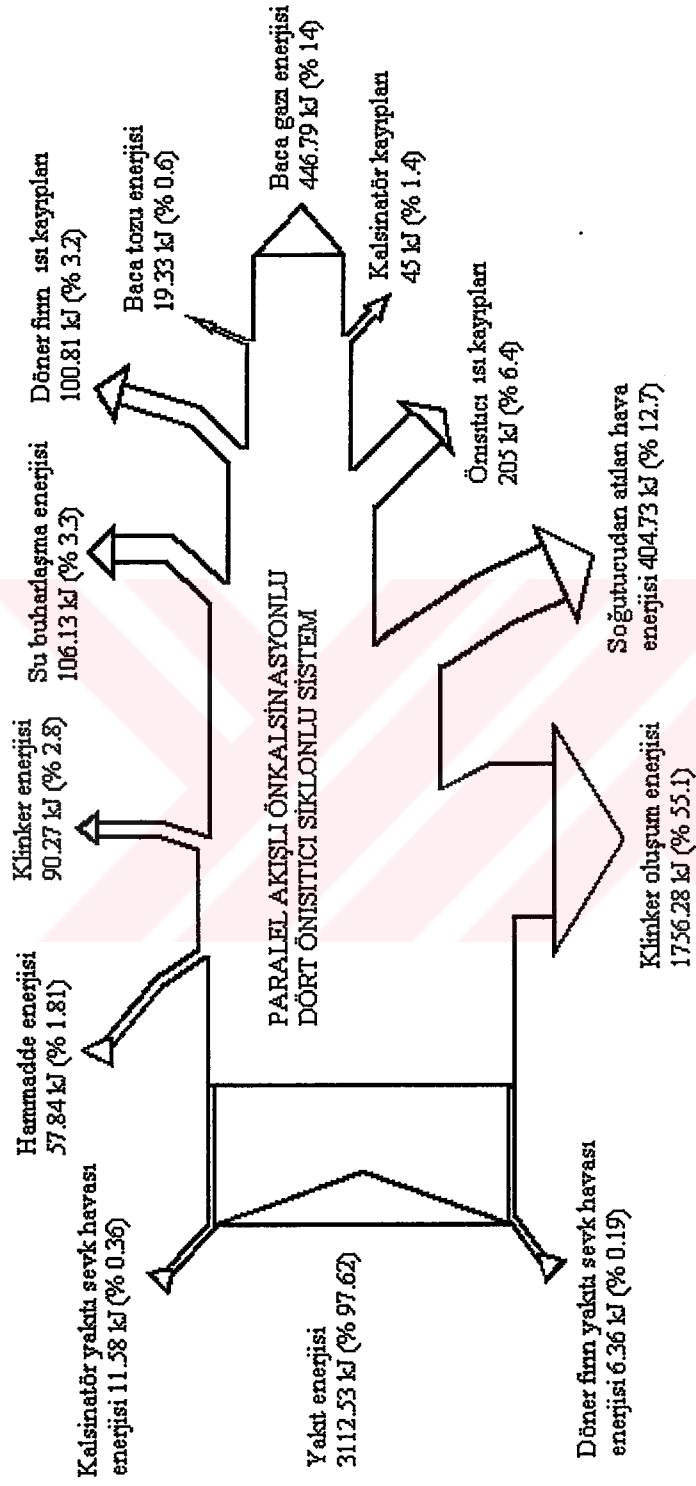
ve baca tozu sıcaklığındaki artış miktarlarına bağlı olarak yakıt enerjisi tüketimi artmaktadır.

Yakıtın kalsinatör ile döner fırın arasında paylaşımı ise görünür kalsinasyon oranına, döner fırına giren hammadde sıcaklığına bağlı olarak artmasına karşılık, döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığına, hava fazlalık katsayısına, baca tozu miktarına ve tersiyer havanın (tersiyer+sekonder hava) oranına bağlı olarak' da azalmaktadır.

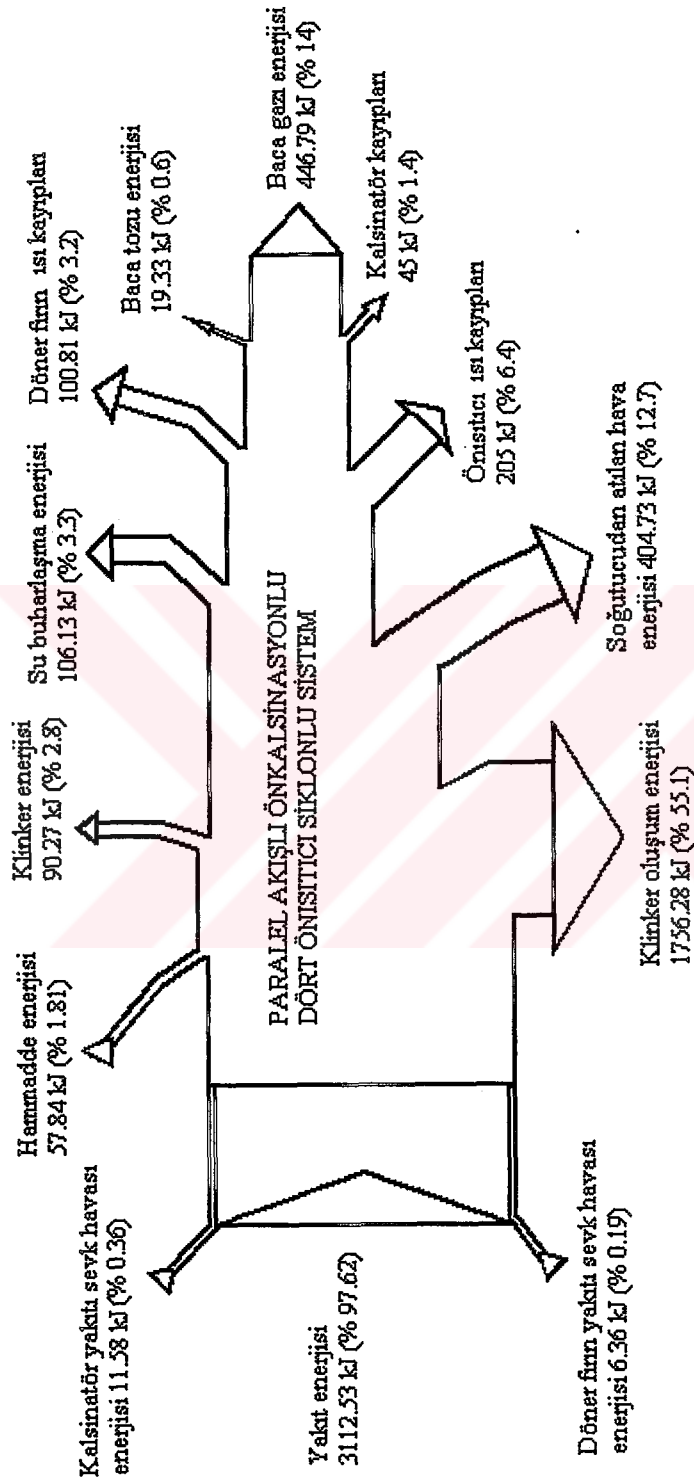
Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde kullanılan üç farklı yakıt türünden elde edilen enerji denklikleri için hazırlanan sankey diyagramı, normal kömür yakıtı için Şekil 7.1.' de test kömürü yakıtı için Şekil 7.2.' de ve fuel-oil yakıtı için ise Şekil 7.3.'de verilmektedir. Test kömürü yakıtı kullanılarak paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin bütün ünitelerine ait enerji denklikleri geliştirilerek programla elde edilen nümerik sonuçlar örnek olması açısından Ek-1' de verilmektedir.



Şekil 7.1. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önütücü siklon kademeli çimento üretim sisteminin normal kömür yakıtı ile hesaplanmış enerji dengliği



Şekil 7.2. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört ön ısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin test kömürlü yakıtı ile hesaplanmış enerji dengliği



Şekil 7.2. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört ön ısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin test kömürü yakıtı ile hesaplanmış enerji dengliği

7.4. Ekserji Denkliği Açısından Değerlendirilmesi

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde kullanılan yakıt türleri standart parametreler ile ekserji denkliği açısından karşılaştırıldığında toplam ekserji kaybı yönünden en iyilik sıralaması fuel-oil, test kömürü ve normal kömür şeklinde olmaktadır (Tablo 7.2.).

Tablo 7.2. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde toplam ekserji kaybı

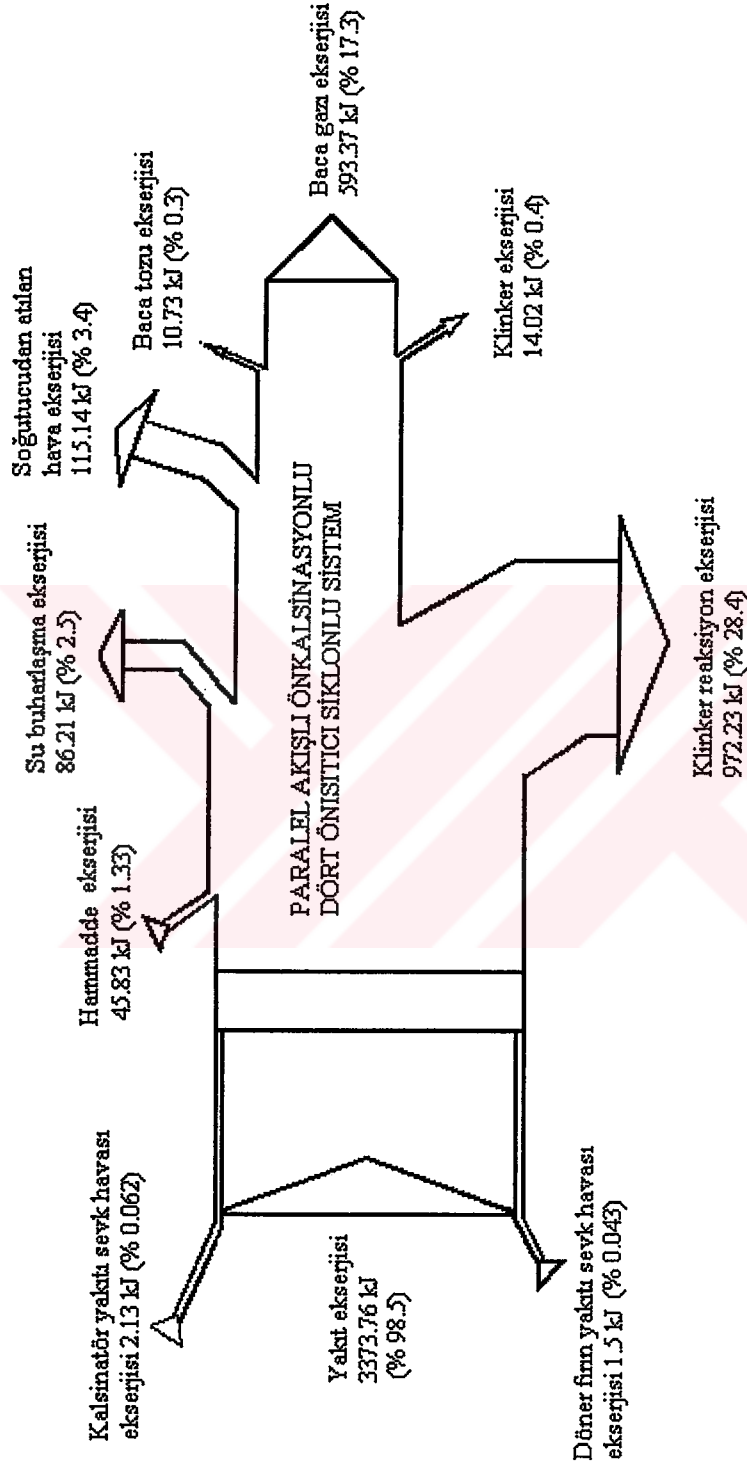
Yakıt türü	Toplam ekserji kaybı (kJ/kg.klinker)
Normal kömür	1629,37
Test kömürü	1547,54
Fuel-oil	1535,39

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde normal kömür yakıtı kullanılarak standart parametre değerleri ile ekserji denkliği açısından karşılaştırıldığında;

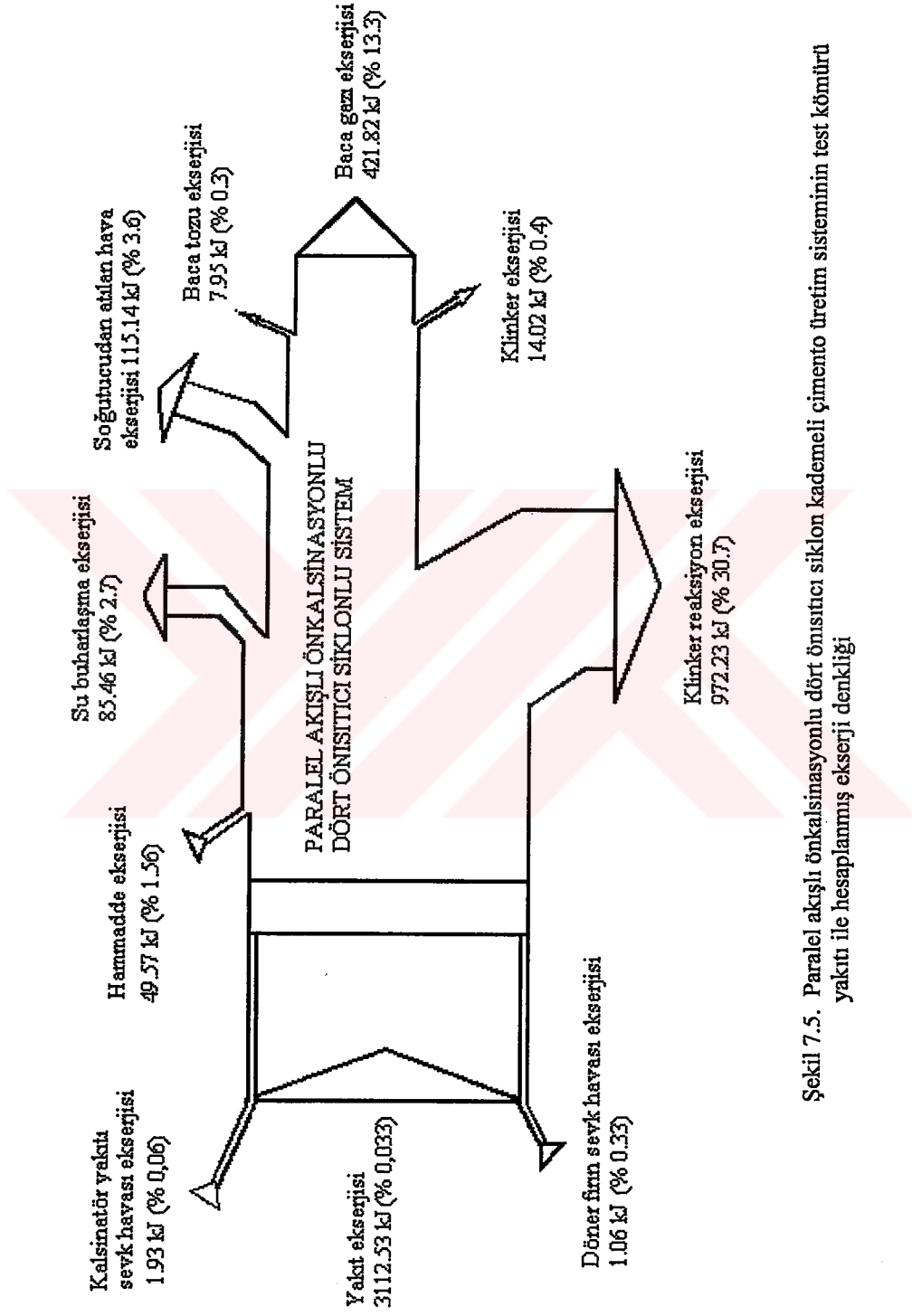
- Hava fazlalık katsayısındaki artış oranı sistemin toplam ekserji kaybını olumsuz etkilemektedir(Şekil 6.5.a. ve Şekil 6.5.b., Şekil 6.6.a. ve Şekil 6.6.b., Şekil 6.6.a. ve Şekil 6.7.b.). Bunun sebebi, hava fazlalık katsayısı oranına bağlı olarak yakma havasının miktarının değişmesidir. Ayrıca hava fazlalık katsayısı oranına bağlı olarak tersiyer hava ve sekonder hava miktarlarındaki değişmelerin olması, döner fırın ve kalsinatör ünitesindeki ekserji kayıplarının (tersinmezliklerin) artmasına neden olmaktadır(döner fırın için; Şekil 6.8.a. ve Şekil 6.8.b., Şekil 6.9.a. ve Şekil 6.9.b., Şekil 6.10.a. ve Şekil 6.10.b., kalsinatör için; Şekil 6.11.a. ve Şekil 6.11.b., Şekil 6.12.a. ve Şekil 6.12.b., Şekil 6.13.a. ve Şekil 6.13.b.)
- Döner fırına giren hammaddedeki görünür kalsinasyon oranındaki değişim sistemin toplam ekserji kaybını hiç etkilememektedir. Döner fırına giren hammaddedeki görünür kalsinasyon oranındaki değişim döner fırındaki toplam tersinmezliği azaltmakta, kalsinatör ünitesindeki toplam tersinmezliği ise arttırmaktadır.
- Döner fırından baca gazlarıyla sürüklenerek çıkan baca tozu miktarındaki değişim sistemin toplam ekserji kaybını çok az miktarda olumsuz etkilemektedir. Döner fırında tersinmezlik artmakta, kalsinatördeki tersinmezlik azalmaktadır.

- Sekonder havanın (tersiyer+sekonder havaya) oranı miktarındaki değişme sistemin toplam ekserji kaybını çok az etkilemesine karşılık, döner fırında ekserji kaybının artmasına ve kalsinatör ünitesinde ise azalmasına neden olmaktadır (Şekil 6.19.a, Şekil 6.19.b., Şekil 6.20.a., Şekil 6.20.b., Şekil 6.21.a. ve Şekil 6.21.b.).
- Hammaddenin döner fırına giriş sıcaklığının artması döner fırında ekserji kaybını azaltmakta, kalsinatör ünitesi ekserji kaybını arttırmakta ve sistemin toplam ekserji kaybını ise çok az miktarda olumsuz etkilemektedir(Şekil 6.27.a. ve Şekil 6.27.b, Şekil 6.28.a. ve Şekil 6.28.b., Şekil 6.29.a. ve Şekil 6.29.b.).
- Döner fırından çıkan baca gazı ve baca tozu sıcaklığındaki değişim döner fırın ekserji kaybını ve sistemin toplam ekserji kaybını olumsuz etkilemesine karşılık kalsinatör ünitesinin ekserji kaybını azaltmaktadır (Şekil 6.34.a., ve Şekil 6.34.b.)

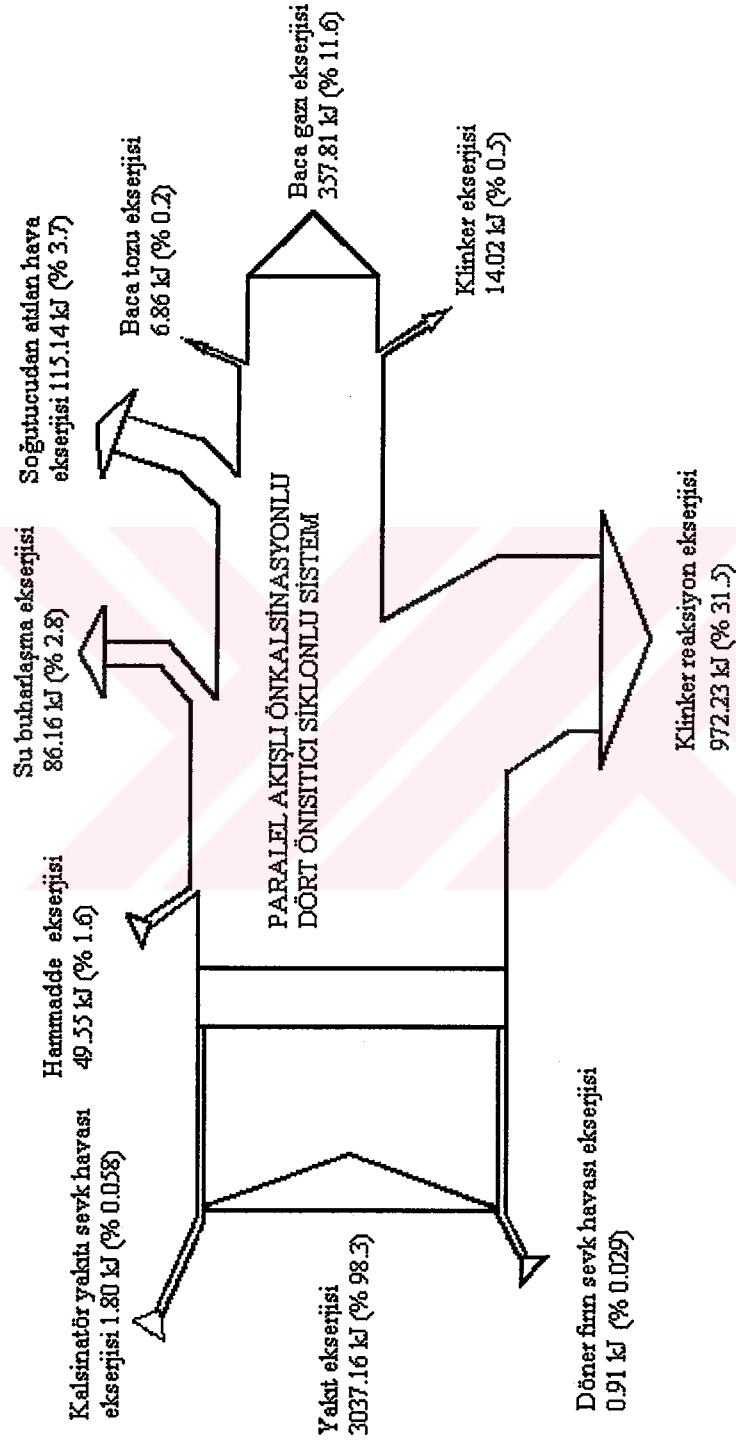
Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde kullanılan üç farklı yakıt türünden elde edilen ekserji denklikleri için hazırlanan sankey diyagramı; normal kömür yakıtı için Şekil 7.4.' de, test kömürü yakıtı için Şekil 7.5.' de ve fuel-oil yakıtı için ise Şekil 7.6.' da verilmektedir. Geliştirilen programla elde edilen nümerik sonuçlar örnek olması açısından test kömürü yakıtı kullanılarak paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin üniteler bazında ekserji denklikleri Ek-2' de sunulmaktadır.



Şekil 7.4. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin normal kömür yakıtı ile hesaplanmış ekserji dengliği



Şekil 7.5. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminin test kömürü yakıtı ile hesaplanmış ekserji dengliği



Şekil 7.6. Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önisitici siklon kademeli çimento üretim sisteminin fuel-oil yakıtı ile hesaplanmış ekserji dengliği

7.5. Tersinmezliklerin Değerlendirmesi

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde tersinmezlikler üç yakıt türü açısından karşılaştırıldığında yanmadan oluşan (tersinmezlik) ekserji kaybı sıralamasında döner fırın ve kalsinatör ünitesi için en düşük kayıp ekserji normal kömür, test kömürü ve fuel-oil olarak sıralanmaktadır.

Çimento üretim sisteminin üniteleri ile çevresi arasında ısı transferinden oluşan ekserji kaybı sıralaması yapıldığında en düşük ekserji kaybı fuel-oil, test kömürü ve normal kömür olarak sıralanmaktadır.

Çimento üretim sisteminde kimyasal ekserji, ısı ve kütle karışımı ile oluşan ekserji kaybı sıralamasında ise en düşük kayıp fuel-oil, test kömürü ve normal kömür olarak sıralanmaktadır.

Genel olarak toplamda üç yakıt türü için sıralama yapıldığında ise en düşük ekserji kaybı fuel-oil, test kömürü ve normal kömür olarak sıralanmaktadır.

7.6. Genel Değerlendirme

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sistemi üç farklı yakıt türü için özgül yakıt enerjisi tüketimi gözönüne alınarak karşılaştırıldığında en uygunluk sırası fuel-oil, test kömürü, ve normal kömür şeklinde olmaktadır (Tablo 7.1.). Fiyat açısından fuel-oil, diğerlerinden yaklaşık iki buçuk kat daha pahalı olmaktadır (Tablo 7.3.). Fiyatlandırma yönünden karşılaştırma yapıldığında en uygun yakıt düşük kaliteli kömür olarak görülmektedir. Ancak düşük kaliteli kömür, döner fırında istenen alev sıcaklığını tek başına sağlayamamaktadır. Bundan dolayı genel olarak döner fırına bu tür yakıtlar paçal yada petrokok şeklinde verilmektedirler.

Tablo 7.3. Çeşitli yakıtların (kJ/TL) değerlendirilmesi [96, 97, 98, 99, 100]

	Kül miktarı (%)	Alt ısı değeri (kJ/kg)	kJ/TL	Fiyat (TL/ton)*
Tunçbilek (kuru kömür)	26,98	16312	0.204	80.000.000
Çan Linyiti (kuru kömür)	17,67	21482	0.188	113.760.000
Linyit (kuru kömür)	17	23860	0.15	157.069.000
İthal Linyit (kuru kömür)	17	27209	0.129	211.864.000
Soma kömür (kuru kömür)	23,12	19674	0.116	169.419.000
Soma kömür(kuru kömür)	21,15	23023	0.115	200.000.000
İthal kömür	13	29302	0.112	260.000.000
Fuel-oil (No:6)	-	38511	0.092	417.000.000
Fuel-oil (No:4)	-	40604	0.045	895.000.000

* Yakıt fiyatları Haziran 2004 tarihli dir.

Düşük kaliteli kömürlerde toplam kükürt oranı diğerlerinin yaklaşık üç katı ve toplam nem oranı ile diğerlerinin en az iki katı kadardır. Bundan dolayı düşük kaliteli kömürler sistemde alkali sirkülasyonunu olumsuz etkilemekte ve kömür kurutmada daha fazla ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. Fırın sisteminde düşük kaliteli kömür kullanımı, artan kemer oluşumu problemine de neden olabilir, döner fırına giren kömür külünün, fırının belirli bölgesinde çökme eğilimi vardır. Kömür külü bu bölgede fırının refrakter malzemesine yapışarak kemer oluşturur. Kül kimyasal olarak fırının refrakter malzemesiyle reaksiyona girebilir ve onu tahrip eder. Büyük bir kemerin sökülmesi fırının durmasına neden olur. Bütün bu sebeplerden dolayı alev uzunluğunu ve pozisyonunu ayarlamak suretiyle kemer oluşumunu engellemek mümkün olmaktadır. Düşük kaliteli kömür kullanıldığında, fırın sisteminin spesifik ısı tüketiminin, fuel-oil veya yüksek kaliteli kömürle çalışan durumlara göre artacağı göz önüne alınmalıdır. Bunun nedeni ise düşük kaliteli kömür ile çalışıldığında hammadde beslemesinin azalmasıdır (kömür külü bir kısım hammadde yerini almaktadır). Yukarıda açıklamalardan anlaşılacağı gibi, düşük kaliteli kömürün önkalsinasyonda kullanımı, döner fırında kullanılmasından daha az problem getirir. Buna göre, düşük kaliteli kömür kullanılacağı zaman, önkalsinasyonlu fırın sistemi tercih edilmeli ve fırın sistemi önkalsinasyondaki ısı girişi ile fırın brülöründeki ısı girişi arasında mümkün olabilecek en yüksek oranı sağlayacak şekilde dizayn

edilmelidir. Kaliteli kömüre göre ortaya çıkan fazla düşük kaliteli kömür, kömür öğütme değirmenlerinde ilave elektrik enerjisi tüketimine sebep olmaktadır. Çimento fabrikalarında en fazla elektrik enerjisi tüketen ünitelerin başında öğütme üniteleri gelmektedir. Düşük kaliteli kömürler, diğerlerinden daha fazla yanma gazı oluşturdıklarından atmosfere atılan ısı da yüksek olmaktadır. Bütün dezavantajlarına rağmen külünün klinker tarafından absorbe edilmesinden dolayı hammadde açısından faydalı olmaktadır. Ancak hammadde diğer bütün kalemler gözönüne alındığında pek fazla önemsenecek maliyet yükü getirmemektedir. Günümüzde yukarıda sayılan gerekçelerden dolayı bir çok çimento fabrikası yetkilileri ithal kaliteli kömürleri kullanarak enerji tasarrufu yaptıklarını ifade etmektedirler. Kaliteli kömür kullanımı tarafımızdan da tavsiye edilmektedir.

Ekserji kayıpları temelde, yanmadan, kimyasal tepkimeden, ısı-kütle karışımından ve ünite ile çevresi arasındaki ısı transferinden olmak üzere dört kısımda ele alınmıştır. Yanma ve kimyasal tepkimeden meydana gelen ekserji kayıpları önlenemez kayıplardır. Isı ve kütle karışımı ile ünite ve çevresi arasında ısı transferi ile oluşan ekserji kaybının bir kısmını önlemek mümkündür.

Tüm sistem yada üniteler bazında ekserji kaybı (tersinmezlik) detaylandırıldığında yanmadan kaynaklanan ekserji kaybı sadece döner fırın ve kalsinatör ünitesinde olmaktadır. Bu ekserji kaybı önlenemeyen ekserji kaybıdır. Bütün ünitelerde ısı-kütle karışımı, sistemle çevresi arasındaki ısı transferinden kaynaklanan ekserji kaybı vardır. Sistemle çevresi arasında meydana gelen ekserji kaybını izolasyon vb. işlemlerle azaltmak mümkündür. Döner fırın duvar ısı kaybı, klinker soğutucusundan çıkan atık hava enerjisi atmosfere atılan baca gazı ve baca tozu enerjisi çeşitli şekillerde faydalı enerjiye dönüştürülebilir. Ancak maliyet/fayda oranı gözönüne alınmalıdır.

Paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önisıttıcı siklon kademeli çimento üretim sistemi yakıt türleri bazında ele alındığında toplam ekserji kaybı kalsinatörde normal kömüre göre test kömürü ve fuel-oil' de giderek artma göstermektedir. Bunun sebebi bütün operasyonlarda döner fırın sıcaklığının sabit parametre alınmasıdır. Isı-kütle karışımı

ile ünite ve çevresi arasındaki ısı transferinden kaynaklanan ekserji kaybı ise normal kömüre göre giderek azalma göstermektedir.

Çimento sektöründe ısıdan yeterince yararlanılamamakta dolayısı ile ısı kayıplarının önüne tam olarak geçilememektedir. Önısıtıcı ve kalsinatörlü sistemlerde ortalama en düşük özgül yakıt enerjisi tüketimi 3265 kJ/kg.klinker dir. 1 kg klinker elde edilmesi için gerekli enerji yaklaşık 1750-1800 kJ/kg.klinker dir. Buna göre yaklaşık 1465-1515 kJ/kg.klinker kadar ısı sarfı, soğutucu ve siklonlarda radyasyon ve konveksiyonla, atmosfere atılan baca gazı, baca tozu ve soğutucudan atılan hava ile kaybolup gitmektedir. Prosesi, kaliteyi bozmadan ve çevreye zarar vermeden yapılabilecek enerji tasarrufu ile ülkemize çok ciddi ekonomik kazanç sağlanabilir. Isıl değeri yüksek, kül ve kükürt oranı düşük kömür kullanılması, eğer düşük kaliteli kömür kullanılarak maliyetin azaltılması düşünülüyorsa, fırına ve kalsinatöre verilen kömür karışımının mutlaka homojene edilmeli ve sabit bir ısıl değer-kül oranı elde edilmeye çalışılmalıdır. Ayrıca 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 (uniform) yapılması sağlanmalıdır.

Isı tasarrufu amacıyla enerji ve ekserji açısından değerlendirildiğinde paralel akışlı önkalsinasyonlu dört önısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde klinker pişirmede kullandığımız ısı enerjisinin verimliliği için öncelikle sisteme taze hava girişini engellemek, yani primer havanın minimum oranda olması, mümkünse ısıtılmış olarak kullanılması, sisteme önısıtıcı siklonlardan ve fırın giriş-çıkışından girebilecek kaçak havanın mutlaka önlenmesi gerekir. Ayrıca atmosfere atılan sıcak baca gazı ve soğutucudan atılan atık havadan ısının geri kazanılması gerekmektedir

Atmosfere atılan baca gazlarının sıcaklığı nispeten düşük (250-350 °C) olduğu için hammadde değirmeninde (farin) ve kömür kurutma ile bina ısıtılması ve sıcak su elde edilmesinde değerlendirilebilir. Benzer şekilde soğutucudan atılan atık havadan kömür kurutmada yararlanılabilir. Ayrıca soğutucudan atılan atık hava bir filtreden geçirilerek tekrar soğutma havası olarak kullanılabilir (böyle sistemlere kombi soğutucular denilmektedir). Bu durumda soğutucu üniteden toplam ısı kaybı

dolayısıyla ekserji kaybı önemli oranda azaltılmış olur. Yanmadan kaynaklanan kayıpların önlenmesi; lüzumsuz miktarda fazla hava veya atık gazlarda CO bulunacak derecede düşük hava ile çalışılmaması gerekir.

Önısıtıcı siklonlar, döner fırın, yüksek verimli soğutucular ve alev boruları, ısı geçirgenliği çok düşük refrakterler ve iyi izole edilmiş gaz yolları radyasyon ve konveksiyonla olan ısı kayıplarını mümkün olduğu kadar önlenerek ekserji kaybı da azaltılmış olur.

7.7. Öneriler

Burada sunulan bu model, şu anda kullanılan üretim sistemleriyle sadece belli kabuller için gerçekçi sonuçları vermektedir. Prensip, ölçme ile bir çok model varsayımlarının kontrolünü yapmak mümkündür. Yüksek sıcaklık bölgelerinde yüksek doğrulukta ölçümlere ihtiyaç vardır.

Bu modelle alkali klorür döngü sirkülasyonunun hesabını yapmak mümkün değildir. Bu sirkülasyonların çimento fabrikalarındaki enerji akışına olan etkisi ayrı ayrı örnekler olarak düşünülebilir ve bu sirkülasyonlar modele entegre olabilir. Aynı durum alkali sülfatlar için de geçerlidir.

Ayrıca yapılan bu çalışmaya ek olarak alkali klorür ve alkali sülfat By-pass miktarı, paralel hatlar arasındaki gaz paylaşımı oranı (GKO), hammadde girişinin birinci siklonun yanı sıra bir kısmının diğer üst siklonlardan verilebilme durumları, soğutucu, döner fırın, kalsinatör ve siklon teknolojileri değişken parametre alınarak yakıt enerjisinin yanında elektrik enerjisi tasarrufu fabrika veya sistemler bazında incelemeye değer konulardır. Döner fırın ve soğutucu arasındaki etkileşimlerin de mutlaka dikkate alınması gerekir Çimento üretim proseslerinde termoekonomi uygulaması başlı başına bir araştırma konusu olmaktadır. Benzer şekilde çeşitli üretim sistemleri ve çeşitli fabrika imalat teknolojileri yatırım ve işletme maliyetleri açısından incelenerek termoekonomi, yatırım ve işletme hususlarında objektif bir değerlendirme kriterleri oluşturabilecek çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] [http:// www.nethaber.com.tr/haber/haberler/0,101,101288_4,00.html](http://www.nethaber.com.tr/haber/haberler/0,101,101288_4,00.html), 10/06/2004
- [2] [http:// www.etimenkol.com.tr/raporlar/sektörler/ÇİMENTO pdf](http://www.etimenkol.com.tr/raporlar/sektörler/ÇİMENTO.pdf), 12/01/2004
- [3] ERŞEN K., VURAL İ., "2003 Yılı Türk Çimento Sektörü", TÇMB Yayınları, Mart-Nisan, 2004
- [4] SİPAHİ, F., "Teknolojik Gelişmeler Vasıtası ile Enerji Verimi", Çimento Dünyasından Tercüme, (Çeviri), Sayı 148, s.11-19, Aralık, 1996
- [5] GÜRER, T., İLERİ, A., "Türk Sanayiinde 2010 Yılına kadar Enerji ve Ekserji Kullanımı", Mühendis ve Makine, Cilt. 40, Sayı 473, Sayfa 19-28, Temmuz, 1999
- [6] KARAKOÇ, T.H., "Çimento Endüstrisinde Elektrik Enerjisi Yönetimi ve Elektrik Enerjisi Tasarrufu", Çimento Sanayinde Enerji Tasarrufu Semineri Tebliğler, 1989
- [7] ÖNER, M., "Ball Size Rationing Affects Clinker Grinding", World Cement Research, February, pp.101-106, 1999
- [8] ÇETİNKAYA, M., <http://www.tcma.org.tr/tr/haber/anasayfa.40.htm>, 03/04/2004
- [9] ÖZDEN, N., "Çimento Teknolojisi", ÇİTOSAN, Ankara, 1973
- [10] [www.metalurji.org.tr/metalurji ve malzeme](http://www.metalurji.org.tr/metalurji_ve_malzeme), Cilt 24, Sayı124, 2002
- [11] ROUMAİN, J.C., SARKAR, L., "Cements of the 21st Century" Cement and Concrete Technology in the 2000s Second International Symposium, pp.29-43, İstanbul, Turkey 6-12 September, 2000
- [12] Global Cement Report Fourth Edition, CEMBUREAU, 2001
- [13] KULA İ., "Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi", Doktora Tezi, SA.Ü. Fen. Bil. Enst. Kimya A.B.D., 2000
- [14] USLU S., "Cumhuriyetin 78. Yılında Türk Çimento Sektörü", TÇMB Yayınları, Eylül-Ekim, 2001
- [15] www.tse.org.tr/Turkish/Abone/Standard_Ara.asp?sira=1&durum=G
- [16] <http://www.ekutup.dpt.gov.tr/imalatsa/oik.525.pdf>, 01/02/2004

- [17] ZEYBEK, M.S., "Borlu Çimentoların Üretilmesi ve Nötron Tutma Kapasitelerinin Araştırılması", Doktora Tezi, SA.Ü. Fen Bil. Enst., Kimya A.B.D., 2000
- [18] ŞENÖZ, B.Ö., YALÇIN, S., "Çimento Fırınlarda Alkali Klorür Sirkülasyonunun Kemer Oluşumu Üzerine Etkileri", TÇMB Yayınları, Ocak-Şubat, 2002
- [19] KAAANTEE, U., ZEVENHOVEN, R., BACKMAN, R., HUPA, M., "Modelling A Cement Manufacturing Process to Study Possible Impacts of Alternative Fuels" TMS Fall 2002 Extraction and Processing Division Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects Lulea, Sweden June 16-20,2002
- [20] E. BAHADIR, "Döner Fırınlarda Klinker Pişirme Tekniği", Çitosan Yayınları, Ankara, 1985
- [21] Orta Anadolu İhracatçılar Birlikleri Genel Sekreterliği, "Çimento Sektörü Raporu", Ocak, 2000
- [22] OKBAŞ, Y., "Klinker Üretim Prosesinde Hava Kaçakları ve Bedeli", Çimento Sanayiinde Enerji Tasarrufu Semineri Tebliğleri, 1989
- [23] KOLİP, A., "Çimento Üretiminde Enerji ve Ekserji Analizi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen. Bil. Enstitüsü, 1993
- [24] LUDERA, L.M., "Design Methods For Cyclone Preheaters of Rotary Kilns", ZKG, No:1, 1989
- [25] HARDER, J., "Development of Precalcining Technology in Cement Industry", ZKG INTERNATIONAL, Vol.55, No:10, pp. 34-41, 2002
- [26] BURİAN, K., "Önkalsinasyonlu Fırın Sistemleri ile Enerji Tüketiminde Sağlanan Tasarruf", TCMB Yayınları, (Çeviri), Cilt. 18, Sayı 166, 1981
- [27] TÜRKER, P., "Çok Kademeli Kalsinasyon Prosesi", Çimento Dünyasından Tercümeler, (Çeviri), Sayı 109, s. 32-40, 1988
- [28] TÜRKER, P., "Önkalsinatörlü Fırın Sisteminde Anzast ve Klinker Birikimi Meydana Gelmesinin Mekanizması", Çimento Dünyasından Tercümeler, Cilt.12, Sayı 135, s. 1-4, Ağustos-2000
- [29] MERSMANN, M., "Approaches in Modernization of Kiln Lines-Especially Considering Capacity Increase, Reduction of Energy Consumption, Fuel Substitution and Emissions", Cement and Concrete Technology in the 2000s Second International Symposium, pp.242-249, İstanbul, Turkey 6-12 September, 2000
- [30] HARDER, J., "Development of Precalcining Technology in the Cement Industry", ZKG INTERNATIONAL, Vol.55, No:10, pp.34-39, 2002

- [31] BAYBURTLU, K., "Günümüzde Önkalsinatör Teknikleri", Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, TÇMB Yayınları, No: 246, s.1-10, 1987
- [32] BOATENG, A.A., BARR,P.V., "A Thermal Model for the Rotary Kiln Including Heat Transfer Within the Bed", Heat Mass Transfer, Vol.39, No:10, pp.2131-2147, 1996
- [33] ERHARD, H.S., SCHEUER, A., "Burning Technology and Thermal Economy", ZKG INTERNATIONAL , Vol.47, No:2, pp.34-41, 1994
- [34] GOCER, C., "Döner Fırın Mühendisliği", Adana Çimento Sanayii T.A.Ş. Yayınları, No.2, Ocak-2001
- [35] KOTHARI, S.S., UNNIKRIISHNAN, A.N., "Optimum Capacity for A Clinker Production Line", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55 ,No:1, pp.70-79, 2002
- [36] PERAY, K.E., WADDELL, J.J., "The Rotary Cement Kiln", Chemical Publishing Co., New York, 1972
- [37] TÜRKER, P., "Klinker Soğutucularının Termal Olarak Değerlendirilmesi", TÇMB Yayınları (Çeviri), Cilt.25, Sayı.253, ss.13-31, 1988
- [38] DOVER, P., "Hot Cooler Technology", ICReview, No.1, pp.35-39, January, 2004
- [39] MANI, R.S., SRIDHAR, S., RAM, K.K., "Efficiently Cooler", ICReview, No.1, pp.31-32, January, 2004
- [40] MURLIDHARAN, V.M., SWAMINATHAN, R., LAGU, S.R., KULKARNI, R.V., "Waste Heat Recovery from Clinker Cooler for Seawater Desilation", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55 ,No:10, pp.87-93, 2002
- [41] HOENIG, H., SYLLA, M., "Industrial Clinker Cooling with due Regard to the Cement Properties", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 51 ,No:6, pp.318-333, 1998
- [42] <http://www.cembureau.be>, "Best Available Techniques For The Cement Industry ", CEMBUREAU, 1999, 12/11/2003
- [43] STEINBACH, V., "A Mathematical Model of Rotary Cooler", ZKG, No:11, pp.264-266, 1987
- [44] LABAN, O., "Cement Engineers Handbook", Fourth Edition , 1983
- [45] LOCHER, G., "Mathematical Models for the Cement Clinker Burning Process Part I:Reactions and Unit Operations", ZKG INTERNATIONAL, Vol.55, No:1, pp. 29-37, 2002

- [46] KHURANA, S., BANERJEE, GAÏTONDE, U.", Energy Balance and Cogeneration for a Cement Plant", Applied Thermal Engineering, Vol.22, pp.485-494, 2002.
- [47] ERKOVAN, İ., "Çimento Üretiminde Enerji Tasarrufu", TÇMB, No:230, 1986
- [48] OKBAŞ, Y., "Matematiksel Model Uygulayarak Dört Kademeli Siklonlu Önısıtıcıda Isı Harcamasının Tayini", TÇMB Yayınları, (Çeviri), No:241, 1987
- [49] FRISCH, V., JESCHAR, R., GERDEİK, H.O., "Precalcining With and Without a Tertiary Air Dust a heat Technological Comparison With Aid of a Mathematical Model For Energy Transfer in the Rotary Kiln", ZKG, No:2, pp.58-65, 1982
- [50] GARDEİK, H.O., "Fuel Energy Consumption in Cement Burning With Precalcining", ZKG, No:12, pp.611-617, 1981
- [51] GÜRÜZ, H.K., "Çimento Fabrikalarında Kütle ve Enerji Denklikleri", Kimya Mühendisliği Dergisi , No:84, s.15-24, 1977
- [52] BAÇ, N., "Çimento Üretiminde Kütle ve Enerji Denklikleri", TCMB, 1984
- [53] BORAT, O., "Yanma Stokiyometrisi", İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, 1988
- [54] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 4: Great Cooler" ,ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:2, pp.46-58, 2002
- [55] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 5:Complete Plant, "ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:7, pp.25-37, 2002
- [56] KOLYFETIS, E. VAYANES,C.G., "Mathematical Modelling of Separate Line Precalciner", ZKG, No:11, pp.29-33, 1988
- [57] GARDEİK, H.O., and ROSEMAN, H., "Fuel Energy Consumption and Fuel Energy Apportionment in the Precalcining Process", ZKG, No:9, pp.435-444, 1981
- [58] FEI, P., "Thermal Analyses of Cyclone Preheater System Based on A Mathematical Model", ZKG, No:3, pp.139-141, 1986
- [59] LOCHER, G."Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 2:Preheater, Calciner and Bypass", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:1, pp.39-50, 2002
- [60] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 3:Rotary Kiln", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:3, pp.68-80, 2002
- [61] GARDEİK, H.O., LUDWIG, H. And STEINBIB, E., "Calculation of Heat Loss Trough the Walls of Rotary Kiln and Mills:Part I", ZKG, No:2, 1980

- [62] GARDEIK, H.O., LUDWIG, H. "Calculation of Heat Loss Trough the Walls of Rotary Kiln and Mills:Part II", ZKG, No:5, 1985
- [63] ONISSI, T.R., "Some Considerations on Heat Transfer in The Rotary Kiln", ZKG, No:8, 1970
- [64] SCHEUER, A., ELLERBROCK, H.,G., "Possible ways of saving energy in cement production", ZKG, No:7, pp.175-182, 1992
- [65] DIŞÇIOĞLU, A., "Basit Yöntemle Döner Fırın Isı Bilançosunun Çıkarılması", TÇMB, No:189, 1983.
- [66] LABAHN, O., "Cement Engineers Handbook", Fourth Edition , 1983
- [67] CENGEL, Y., A., "Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer", 1997
- [68] BÜYÜKTÜRK, A., R., "Termodinamik Cilt I Termodinamiğin Temel Yasaları", Uludağ Ün. Basım Evi, 1982
- [69] BEKER, H., HAMILTON, M., Çev. KATNAS, F., " Önkalsinatör ve Fırınlr", TÇMB, Cilt.9, Sayı 96, s. 41-44, 1997
- [70] PERAY, E., K., "Cement Manufacturers Handbook", Chemical publishing Co. Inc., 1979, USA
- [71] KREFT, W., GÜNNERWIG, L. "Possibilities for Energy Saving in the Clinker Burning Process by Optimization of rotary Coolers and Planetary Coolers", ZKG, No:1, pp.12-1989
- [72] CARVALHO, M., MODIVATE, De O. "Theoretical Energy Requirement for Burning Clinker", Cement and Concrete Research , Vol.29, pp.695-698, 1999
- [73] CHAKRABARTI, B.K., "Investigations on Heat Loss Trough the Kiln Shell in Magnesite Dead Burning Process: A Case Study", Applied Thermal Engineering, Vol.22, pp.1339-1345, 2002
- [74] MRATINS, M.A., OLIVEIRA, L.S., FRANCA, A.S., "Modelling and Simulation of Limestone Calcination in Rotary Kilns Part 1: pilot kiln", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:4, pp.76-85, 2002
- [75] PERAY, E. K., "The Rotary Cement Kiln", Chemical Publishing Co. Inc., 1986, USA.
- [76] ROSEMAN, H., "Energy Transfer in Precalcining Installations", ZKG, No:4, pp.84-86, 1986
- [77] BOLAT, E., "Proses Tasarımı Ders Notları", Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, 2002-2003

- [78] KOYUN, T., ÜÇGÜL, İ., " Silindirik Yansıtıcı İki Yüzeyli Kollektörler İle Düz Yüzeyli Kollektörlerin I. ve II. Yasa Verimliliklerinin İrdelenmesi", Sayı 530, Mart 2004
- [79] MARTINAS, K. and FRANKOWICZ, M., "Extropy-Reformulation of the Entropy Principle", Periodical Polytechnica Ser. Chem. Eng. Vol.44, No.1, pp. 29-38, 2000
- [80] BAUMGARTNER, S., and ARONS, J.S., "Necessity and Inefficiency in the Generation of Waste A Thermodynamic Analysis ", Journal of Industrial Ecology, Vol.7, No.2, pp.1-19, 2003
- [81] WALL, G., "Exergy Flows in Industrial Processes", Energy Vol.13, No.2, pp.197-208, 1988
- [82] SHUKUYU, M., HAMMACHE, A., "Introduction to the Concept of Exergy" VTT RESEARCH NOTES 2158 ESPOO 2002, Apri 25 2002l, ISSN 1455-0865 (URL:<http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
- [83] GONG, M., WALL, G., "On Exergetic, Economics and Optimization of Technical Processes to Meet Environmental Conditions", International Conference on Thermodynamic Analysis and Improvement of Energy Systems, pp.453-460, Beijing, China, June 10-13, 1997
- [84] DENBIGH, K.G., "Chemical Engineering Science", pp.1-9, 1956
- [85] ARIKOL, M., "Ekserji Analizine Giriş", TÜBİTAK, Proje No: 06300448401, 1985, Gebze-Kocaeli
- [86] KOTAS, T.J., "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", Butterworth, 1985.
- [87] KORONEO, C., VASILAKIS, N., THEODOSIOUS, G. And MOUSSIOPOULOUS, N., "Exergy Analysis of Cement and Concrete Production", IEEEES-1, pp.275-280, 13-17 July 2003, İzmir, Turkey
- [88] DURMUŞ, A., KURTBAŞ, İ., GÜLÇİMEN, F., DURM "Akım Ortamına Yerleştirilen Kesik Konik Türbülatorlerin Sabit Yüzey Sıcaklığına Sahip Bir Tüpde Isı Transferi ve Ekserji Kaybına Etkisi", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 4, Sayı 3, s.175-184, Ekim, 2002
- [89] ÇENGEL, Y.A., "Thermodynamics An Engineering Approach", Third Edition, 1988
- [90] KOLİP, A., "Ekserji Analizi Ders Notları", Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi , Makine Eğitimi Bölümü, 2002
- [91] KOLİP, A., ÖZTÜRK, İ.T., KÖSE, R. ve ARIKOL, M., "Çimento Fabrikası için Enerji ve Ekserji Analizi", TIBTD, 1990, Kayseri

- [92] KOTAS, T.J., "Exergy Method of Thermal Plants Analysis", Butterworths, London,1985"
- [93] SHIGAKI, N., AKIYAMA, T., TSUKIHASHI, "Energy Analysis of Steel Production Processes", Material Transaction, Vol.43 , No:3, pp.379-384, 2002
- [94] TOPAL, H., "Evsel Isıtmadan Kaynaklanan SO₂ Emisyonunun Azaltılmasında Kireç ve Kireç-Melas Karışımın Kullanılması", Gazi Üniv.Müh.Mim. Fak. Der., Cilt 15, No.1, S 15-29, 2000
- [95] Nuh Çimento A.Ş. Hereke/Kocaeli
- [96] www.gli.gov.tr/analiz.html, 17/07/2004
- [97] [www.gli.gov.tr/fiyatlar htm](http://www.gli.gov.tr/fiyatlar.htm),l 17/07/2004
- [98] www.igdas.com.tr/index_sanayi_wasp?link=yakit, 19/ 07/2004
- [99] www.dosider.org/tablo/konutyakuti, 12/07/2004
- [100] [www.tki-cli.com/fiatlar htm](http://www.tki-cli.com/fiatlar.htm) 12/07/2004

EKLER

EK-1

Paralel Akışlı Dört Siklon Kademeli Önkalsinatörlü Sistemde Tablo 5.7' deki Hammadde Analizi ve Tablo 5.8' deki Yakıt Analizine Göre Hesaplanan Enerji Dengesi Sonuçları

 ****PARALEL AKIŞLI DÖRT SIKLON KADEMELİ ÖNKALSİNATÖRLÜ ****
 *****SİSTEMDE ENERJİ DENGESİ*****

Hesaplamalarda çözüme başlangıç ve temel olarak 1 kg klinker esas alınmıştır.

Hammadde analizi olarak Tablo 5.7' deki hammadde analizi, yakıt analizi olarak ise Tablo 5.8' deki test kömürü analizi kullanılmıştır.

Hesaplamalarda çözüme başlangıç ve temel olarak 1 kg klinker esas alınmıştır.

Hammadde analizi olarak Tablo 5.7' deki hammadde analizi, yakıt analizi olarak ise Tablo 5.8' deki test kömürü analizi kullanılmıştır.

TÜM SİSTEM İÇİN ENERJİ DENGESİ			
GİREN ENERJİLER:		ÇIKAN ENERJİLER :	%
YAKIT İLE	= 3112.53	KLİNKER REAKSİYON EN.	= 1756.28 0.551
HAMMADDE İLE	= 57.84	KLİNKER İLE	= 90.27 0.028
FIRIN FUEL SEVK AIR	= 6.36	SOĞ. ATILAN HAVAYLA .	= 404.73 0.127
KALSİ.FUEL SEVK AIR	= 11.58	BACA GAZI İLE	= 446.79 0.140
SOĞUTMA HAVASI İLE	= 0.00	BACA TOZU İLE	= 19.33 0.006
KAÇAK HAVA İLE ...	= 0.00	DÖNER FIRIN KAYIPLARI	= 100.81 0.032
TOPLAM	= 3188.30	ÖNKALSİNATÖR KAYIPLARI	= 45.00 0.014
		ÖN ISITICI KAYIPLARI.	= 205.00 0.064
		SU BUHARLAŞMA ENERJİSİ	= 106.13 0.033
		KAÇAK HAVA İLE	= 0.00 0.000
		BY-PASS GAZLARI İLE .	= 0.00 0.000
		TOPLAM	= 3190.48 1.001

KLİNKER SOĞUTMA ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ			
GİREN ENERJİLER		ÇIKAN ENERJİLER :	%
SICAK KLİNKER İLE ...	= 1497.44	SOĞUK KLİNKER İLE	= 90.27 0.060
SOĞUTMA HAVASI İLE	= 0.00	SOĞ. ATILAN HAVAYLA	= 404.73 0.270
TOPLAM	= 1497.44	FIRIN SEKONDER HAVASI	= 190.41 0.127
		KALSİ.SEKONDER HAVASI	= 812.03 0.542
		TOPLAM	= 1497.44 0.999

DÖNER FIRIN ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ			
GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :	%
YAKIT İLE	= 1103.04	KLİNKER İLE	= 1497.44 0.640
HAMMADDE İLE	= 1039.66	BACA GAZI İLE	= 686.17 0.293
FIRIN SEKONDER HAVASI	= 190.41	BACA TOZU İLE	= 168.47 0.072
FIRIN FUEL SEVK HAVASI	= 6.36	FIRINDAKİ REAKSİYONLA.	= 113.43 0.048
TOPLAM	= 2339.47	FIRIN KAYIPLARIYLA	= 100.81 0.043
		SU BUHARLAŞMA ENERJİSİ	= 0.00 0.000
		KAÇAK HAVA İLE	= 0.00 0.000
		TOPLAM	= 2339.47 1.096

KALSİNATÖR ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :		%
YAKIT İLE	= 1979.63	HAMMADDE İLE	= 1025.80	0.231
HAMMADDE İLE	=1624.83	BACA GAZI İLE	= 1335.27	0.301
KALSI.FUEL SEVK HAVASI =	12.74	BACA TOZU İLE	= 297.81	0.067
KALS.TERSİYER HAVAYLA =	812.03	KALSİNATÖRDEKİ REAKS	= 1720.29	0.388
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KALSİNATÖR KAYIPLARI	= 45.00	0.010
TOPLAM	=4429.24	SU BUHARLAŞMA ENERJİSİ	= 4.81	0.001
		KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
		TOPLAM	= 4428.98	0.998

DİP SİKLON ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :		%
HAMMADDE İLE	= 1702.96	HAMMADDE İLE	= 1624.83	0.573
BACA GAZI İLE	= 964.05	BACA GAZI İLE	= 725.32	0.255
BACA TOZU İLE	= 168.47	BACA TOZU İLE	= 286.73	0.101
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KALSİNASYON ENERJİSİ	= 173.44	0.061
TOPLAM	= 2835.49	SİKLON KAYIPLARIYLA	= 25.00	0.009
		KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
		TOPLAM	= 2835.33	0.999

3. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :		%
HAMMADDE İLE	= 1502.97	HAMMADDE İLE	= 1702.96	0.597
BACA GAZI İLE	= 1030.30	BACA GAZI İLE	= 932.99	0.327
BACA TOZU İLE	= 292.27	BACA TOZU İLE	= 189.22	0.066
YENİ. KARBONATLAŞ'MA =	24.96	SİKLON KAYIPLARIYLA	= 25.00	0.008
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
TOPLAM	= 2850.50	TOPLAM	= 2850.18	0.998

3'. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :		%
HAMMADDE İLE	= 1239.37	HAMMADDE İLE	= 1502.97	0.586
BACA GAZI İLE	= 1030.30	BACA GAZI İLE	= 868.33	0.338
BACA TOZU İLE	= 292.27	BACA TOZU İLE	= 167.00	0.065
YENİD. KARBONATLAŞ'MA =	0.53	SİKLON KAYIPLARIYLA	= 25.00	0.010
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
TOPLAM	=2562.4	TOPLAM	= 2563.30	0.999

2. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :		%
HAMMADDE İLE	= 965.15	HAMMADDE İLE	= 1239.37	0.593
BACA GAZI İLE	= 932.99	BACA GAZI İLE	= 757.90	0.363
BACA TOZU İLE	= 189.22	BACA TOZU İLE	= 65.23	0.031
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	SİKLON KAYIPLARIYLA ..	= 25.00	0.011
TOPLAM	= 2087.37	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
		TOPLAM	= 2087.50	0.998

2'. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :		%
HAMMADDE İLE	= 646.74	HAMMADDE İLE	= 965.15	0.574
BACA GAZI İLE	= 868.33	BACA GAZI İLE	= 635.43	0.378
BACA TOZU İLE	= 167.00	BACA TOZU İLE	= 50.80	0.030
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	SİKLON KAYIPLARIYLA ..	= 30.00	0.018
TOPLAM	= 1682.07	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
		TOPLAM	=1681.38	1.000

1. SIKLON ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER :		%
HAMMADDE İLE	= 332.94	HAMMADDE İLE	= 646.74	0.559
BACA GAZI İLE	= 757.90	BACA GAZI İLE	= 457.06	0.395
BACA TOZU İLE	= 65.23	BACA TOZU İLE	= 16.58	0.014
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	SİKLON KAYIPLARIYLA ..	= 35.00	0.030
TOPLAM	=1156.07	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
		TOPLAM	= 1155.39	0.998

1'. SIKLON ÜNİTESİ İÇİN ENERJİ DENGESİ

GİREN ENERJİLER :		ÇIKAN ENERJİLER		%
HAMMADDE İLE	= 40.29	HAMMADDE İLE	= 332.94	0.458
BACA GAZI İLE	= 635.43	BACA GAZI İLE	= 242.53	0.334
BACA TOZU İLE	= 50.80	BACA TOZU İLE	= 8.54	0.018
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	SİKLON KAYIPLARIYLA	= 40.00	0.055
TOPLAM	= 726.52	SU BUHARLAŞMA ENERJİSİ	= 102.26	0.140
		KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	0.000
		TOPLAM	= 726.27	1.005



EK-2

Paralel Akışlı Dört Siklon Kademeli Önkalsinatörlü Sistemde Tablo 5.7' deki Hammadde Analizi ve Tablo 5.8' deki Yakıt Analizine Göre Hesaplanan Ekserji Dengesi Sonuçları

 PARALEL AKIŞLI DÖRT SİKLON KADEMELİ ÖNKALSİNATÖRLÜ
 *****SİSTEMDE EKSERJİ DENGESİ*****

Hesaplamalarda çözüme başlangıç ve temel olarak 1 kg klinker esas alınmıştır.
 Hammadde analizi olarak Tablo 5.7' deki hammadde analizi, yakıt analizi olarak ise
 Tablo 5.8' deki test kömürü analizi kullanılmıştır.

TÜM SİSTEM İÇİN EKSERJİ DENGESİ			
GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
YAKIT İLE	= 3112.53	KLİNKER REAKSİYON EKS.	= 972.23
HAMMADDE İLE	= 49.57	KLİNKER İLE	= 14.02
FİRİN FUEL SEVK AIR	= 1.06	SOĞ. ATILAN HAVAYLA .	= 115.14
KALSİ.FUEL SEVK AIR	= 1.93	BACA GAZI İLE	= 421.82
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	BACA TOZU İLE	= 7.95
SOĞUTMA HAVASI İLE	= 0.00	SU BUHARLAŞMA EKSERJİ.	= 84.46
TOPLAM	= 3165.09	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
		BY-PASS GAZLARI İLE .	= 0.00
		TOPLAM	= 1615.62
		TOPLAM EKSERJİ KAYBI..	= 1549.47
		TOPLAM	= 3165.09

KLİNKER SOĞUTMA ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ			
GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
SICAK KLİNKER İLE ...	= 1938.84	SOĞUK KLİNKER İLE	= 986.25
SOĞUTMA HAVASI İLE	= 0.00	SOĞ. ATILAN HAVAYLA	= 115.14
TOPLAM	= 1938.84	FİRİN SEKONDER HAVASI	= 101.26
		KALSİNATÖR SEKO.HAVASI	= 473.18
		TOPLAM	= 1675.84
		SOĞUTUCU EKSERJİ KAYBI	= 263.00
		TOPLAM	= 1938.84

DÖNER FİRİN ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ			
GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
YAKIT İLE	= 1103.04	KLİNKER İLE	= 1938.84
HAMMADDE İLE	= 1707.08	BACA GAZI İLE	= 514.12
FİRİN SEKONDER HAVASI	= 101.26	BACA TOZU İLE	= 162.57
FİRİN FUEL SEVK HAVASI	= 1.06	SU BUHARLAŞMA EKSERJİ	= 0.00
TOPLAM	= 2912.43	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
		TOPLAM	= 2615.53
		FİRİN EKSERJİ KAYBI	= 296.90
		TOPLAM	= 2912.43

ÖNKALSİNATÖR ÜNİTESİNDE EKSERJİ DENGESİ

GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
YAKIT İLE	= 2009.49	HAMMADDE İLE	= 1707.08
HAMMADDE İLE	= 1035.20	BACA GAZI İLE	= 894.87
KALSİNATÖR SEKO.HAVASI=	473.18	BACA TOZU İLE	= 495.60
KALSI.FUEL SEVK HAVASI =	1.93	SU BUHARLAŞMA EKSERJİ.	= 0.00
TOPLAM	= 3519.80	TOPLAM	= 3097.55
		KALSİNATÖR EKSER.KAYBI	= 422.25
		TOPLAM	= 3519.80

DİP SİKLON ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ

GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
HAMMADDE İLE	= 984.24	HAMMADDE İLE	= 1035.20
BACA GAZI İLE	= 514.12	BACA GAZI İLE	= 244.04
BACA TOZU İLE	= 162.57	BACA TOZU İLE	= 182.68
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
TOPLAM	= 1660.94	TOPLAM	= 1461.92
		SİKLON EKSERJİ KAYBI..	= 199.02
		TOPLAM	= 1660.94

3. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ

GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
HAMMADDE İLE	= 873.83	HAMMADDE İLE	= 984.24
BACA GAZI İLE	= 600.90	BACA GAZI İLE	= 515.79
BACA TOZU İLE	= 338.50	BACA TOZU İLE	= 109.36
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
TOPLAM	= 1813.23	TOPLAM	= 1609.39
		SİKLON EKSERJİ KAYBI..	= 203.84
		TOPLAM	= 1813.23

3'. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ

GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
HAMMADDE İLE	= 555.48	HAMMADDE İLE	= 873.83
BACA GAZI İLE	= 600.90	BACA GAZI İLE	= 468.46
BACA TOZU İLE	= 338.10	BACA TOZU İLE	= 97.09
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
TOPLAM	=1494.47	TOPLAM	=1439.38
		SİKLON EKSERJİ KAYBI..	= 55.09
		TOPLAM	=1494.47

2. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ

GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
HAMMADDE İLE	= 384.21	HAMMADDE İLE	= 555.48
BACA GAZI İLE	= 515.79	BACA GAZI İLE	= 392.82
BACA TOZU İLE	= 109.36	BACA TOZU İLE	= 29.24
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
TOPLAM	= 1009.36	TOPLAM	= 977.54
		SİKLON EKSERJİ KAYBI..	= 31.81
		TOPLAM	=1009.36

2'. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ

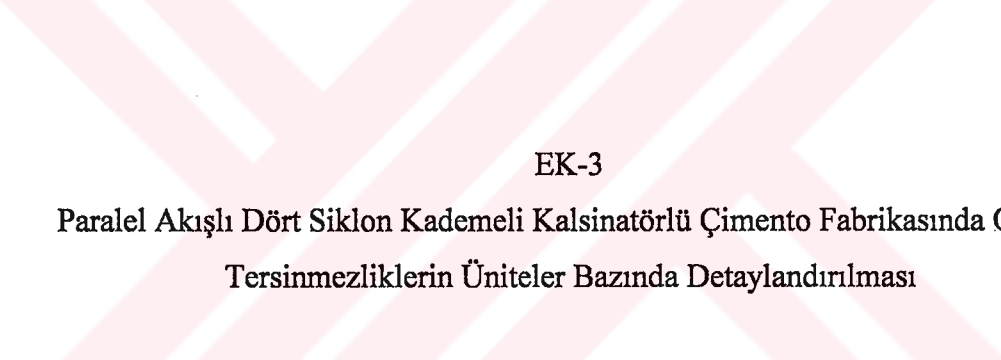
GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
HAMMADDE İLE	= 213.13	HAMMADDE İLE	= 384.21
BACA GAZI İLE	= 468.46	BACA GAZI İLE	= 324.69
BACA TOZU İLE	= 97.09	BACA TOZU İLE	= 20.22
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
TOPLAM	= 778.69	TOPLAM	= 729.12
		SİKLON EKSERJİ KAYBI..	= 49.57
		TOPLAM	= 778.69

1. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ

GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
HAMMADDE İLE	= 96.76	HAMMADDE İLE	= 213.13
BACA GAZI İLE	= 392.82	BACA GAZI İLE	= 242.35
BACA TOZU İLE	= 29.24	BACA TOZU İLE	= 5.46
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
TOPLAM	= 518.82	TOPLAM	= 460.95
		SİKLON EKSERJİ KAYBI..	= 57.87
		TOPLAM	= 518.82

1'. SİKLON ÜNİTESİ İÇİN EKSERJİ DENGESİ

GİREN EKSERJİLER :		ÇIKAN EKSERJİLER :	
HAMMADDE İLE	= 49.57	HAMMADDE İLE	= 96.76
BACA GAZI İLE	= 324.69	BACA GAZI İLE	= 179.47
BACA TOZU İLE	= 20.22	BACA TOZU İLE	= 2.48
KAÇAK HAVA İLE	= 0.00	KAÇAK HAVA İLE	= 0.00
TOPLAM	= 394.48	SU BUHARLAŞMASI İLE ..	= 84.46
		TOPLAM	= 363.17
		SİKLON EKSERJİ KAYBI..	= 31.31
		TOPLAM	= 394.48



EK-3

Paralel Akışlı Dört Siklon Kademeli Kalsinatörlü Çimento Fabrikasında Oluşan
Tersinmezliklerin Üniteler Bazında Detaylandırılması

Tablo. Ek.3.1.1. Normal kömür yakıtı için standart duruma ait çimento fabrikasında oluşan tersinmezliklerin üniteler bazında detaylandırılması

	KİMYASAL TEPKİMEDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	YANMADAN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	KATI/GAZ KARIŞIMI İLE ISI TRANSFERİNDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	ÜNİTE İLE ÇEVRE ARASINDA ISI TRANSFERİNDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	TOPLAM TERSİNMEZLİK (KJ)
ÖNİSİTİCİ	184,8422	0,0000	379,9398	54,4277	619,2095
SIKLON GRUBU					
KALSİNATÖR ÜNİTESİ	-1221,022	50,1365	1202,6440	365,6381	397,3965
DÖNER FIRIN ÜNİTESİ	107,2070	173,0305	-100,8569	170,3851	349,7656
KLİNKER SOĞ. ÜNİTESİ	0,0000	0,0000	263,0025	0,0000	263,0025
TOPLAM	-928,9726	223,1670	1744,7290	590,4510	1629,3740

Tablo Ek.3.2. Test kömürlü yakıtı için standart duruma ait çimento fabrikasında oluşan tersinmezliklerin üniteler bazında detaylandırılması

	KİMYASAL TEPKİMEDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	YANMADAN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	KATI/GAZ KARIŞIMI İLE ISI TRANSFERİNDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	ÜNİTE İLE ÇEVRE ARASINDA ISI TRANSFERİNDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	TOPLAM TERSİNMEZLİK (KJ)
ÖNİTİCİ	186,0307	0,0000	352,2371	29,0481	5671.3158
SİKLON GRUBU					
KALSİNATÖR ÜNİTESİ	-1228,660	94,0754	1215.2330	339.6666	420.3152
DÖNER FIRIN ÜNİTESİ	114,9304	143,8630	-101.8381	139.9461	296.9011
KLİNKER SOĞ. ÜNİTESİ	0,0000	0,0000	263,0025	0.0000	263.0025
TOPLAM	-927,6988	237,9385	1728,6350	508,6608	1547.5350

Tablo Ek.3.3.Fuel-oil yakıtı için standart duruma ait çimento fabrikasında oluşan tersinmezliklerin üniteler bazında detaylandırılması

	KİMYASAL TEPKİMEDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	YANMADAN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	KATI/GAZ KARIŞIMI İLE ISI TRANSFERİNDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	ÜNİTE İLE ÇEVRE ARASINDA ISI TRANSFERİNDEN KAYNAKLANAN TERSİNMEZLİK (KJ)	TOPLAM TERSİNMEZLİK (KJ)
ÖNİSİTİCİ SİKLON GRUBU	186,4337	0,0000	333,6074	34,8824	554,9233
KALSİNATÖR ÜNİTESİ	-1230,601	87,5474	1239,5930	337,5554	434,0938
DÖNER FIRIN ÜNİTESİ	116,9492	120,6835	-94,6512	140,3904	283,3721
KLİNKER SOĞUTUCU ÜNİTESİ	0,0000	0,0000	263,0025	0,0000	263,0025
TOPLAM	-927,2184	208,2309	1741,5510	512,8382	1535,3920

ÖZGEÇMİŞ

A .Fevzi SAVAŞ 1966 yılında Kütahya'nın Altıntaş ilçesine bağlı Sadıkkırı köyünde doğdu. İlkokulu doğum yeri olan Sadıkkırı Köyü İlköğretim Okulun' da, Ortaokulu Kütahya Cumhuriyet lisesi orta kısmında, Lise eğitimini Kütahya Endüstri Meslek Lisesin' de tamamladı. 1985 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Bölümü Tesisat Teknolojisi Öğretmenliğini kazandı ve 1989 yılında mezun oldu. 1990-1991 yılları arasında vatani görevini Erzurum' da Levazım Yedek Subay olarak tamamladı. 1991 yılında Avcılar Endüstri Meslek Lisesinde öğretmenlik görevine başladı. 1994 yılında Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknik Eğitim Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek lisans eğitimini 1996 yılında tamamladı. 1996 yılında Dumlupınar Üniversitesi Osmaneli MYO' ya Öğretim görevlisi olarak atandı ve halen bu göreve devam etmektedir. 1997 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora eğitimine başladı. Evli ve iki çocuk babasıdır.