

**YAŞ YÖNTEMLE ÜRETİM YAPAN ÇİMENTO FABRİKASINDA ENERJİ VE
EKSERJİ ANALİZİ**

Abid USTAOĞLU

**Bartın Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**BARTIN
Temmuz 2011**

KABUL:

Abid USTAOĞLU tarafından hazırlanan “YAŞ YÖNTEMLE ÜRETİM YAPAN ÇİMENTO FABRİKASINDA ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ” başlıklı bu çalışmada jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 28.07.2011

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Yaşar YETİŞKEN (K.Ü.)
Üye: Yrd. Doç. Dr. M. Emin AKAY (B.Ü.)
Üye: Yrd. Doç. Dr. Volkan KIRMACI (B.Ü.)

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum. (..... /..... / 2011).

Doç. Dr. Ali Naci TANKUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Abid USTAOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAŞ YÖNTEMLE ÜRETİM YAPAN ÇİMENTO FABRİKASINDA ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Abid USTAOĞLU

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. M. Emin AKAY

Temmuz 2011, 111 sayfa

2011 yılı başındaki istatistiklere göre, tükettiği enerjinin % 75'ini ithalatla karşılayan ülkemizde; hem enerjide dışa bağımlılığın azaltılmasında, hem de üretimdeki enerji maliyetinin düşürülmesi ekonomik dengeler için büyük önem taşımaktadır. Sanayi sektörü enerji tüketiminde en büyük paya sahiptir. Endüstriyel faaliyetlerde enerjinin verimli kullanılmasıyla; tüketim azalacak, sera gazları emisyonu düşecek ve ucuzlayan sanayi ürünü fiyatları sebebiyle uluslararası rekabet gücü açısından sanayicilerimize avantaj sağlayacaktır. Çimento sektörü, hem enerji yoğunluğu yüksek sanayi kolu olması sebebiyle, maliyetler içinde enerjinin payı büyüktür. Bu nedenle, enerjinin verimli kullanılması ve tüketimin düşürülmesi bu işkolunda öncelikli bir yer tutmaktadır.

Bu tezin ana amacı, gerçek işletme verileri kullanılarak bir çimento fabrikasının; enerji taraması (enerji tasarrufu etüdü) yapmak, enerji ve ekserji analizini gerçekleştirmektir.

ÖZET (devam ediyor)

Aynı zamanda bu çalışmada Türkiye’de yaş sistemle üretim yapan tek çimento fabrikası olan Bartın çimento fabrikasının, kuru sistemle üretim yapan bir çimento fabrikası ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Enerji taraması yapılan Bartın çimento fabrikasında önce olarak standart enerji tüketim (SET) değerleri, klinker ve çimento toplam üretimi için bulunmuştur. Çıkan bu değerler kullanılarak kümülatif değerler toplamı (CUSUM) grafiği ile performans analizi yapılmıştır. İkinci aşamada fabrikada termodinamik analizleri yapılacak sistemler tespit edilmiş, bu sistemlere giren ve çıkan, enerjiler ve ekserjiler hesaplanmıştır. Ayrıca enerji ve ekserji verimleri bulunmuştur. Çıkan bu değerler kuru sistemle üretim yapan bir fabrika ile karşılaştırılmış ve veriminin kuru sistemlere göre ne kadar düşük olduğu gösterilmiştir. Üretim anında oluşan “atık ısının geri kazanılması” için tavsiyelerde bulunulmuştur.

Anahtar Sözcükler: Enerji ve ekserji analizi, yaş yöntem, çimento üretimi, enerji taraması, CUSUM grafiği.

Bilim Kodu: 625.04.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ENERGY AND EXERGY ANALYSIS IN THE CEMENT FACTORY USING WET METHOD

Abid USTAOĞLU

Bartın University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assist. Prof. Dr. M. Emin AKAY

July 2011, 111 pages

According to the statistics recorded at the beginning of the year 2011, Turkey supplies 75% of the energy to consume through import. Therefore, reducing both the energy costs and energy supplement by import would hold the key factor for the economic balance of our country. Industrial sector carries bigger share of the total energy consumption. With economical use of energy, consumption and emission of greenhouse gases would decrease; industrial goods prices would become cheaper so that Turkish industrialists would have advantages within the competitive world market. In terms of energy intensity, energy consumption consists of higher rate within the cost in cement industry. Due to this reason, using energy in efficiently and reduction in energy consumption have a priority in this sector.

Main objective of this thesis are to make energy saving study, to apply energy and exergy analysis using real time operational data in a cement factory. On the other hand,

ABSTRACT (continued)

Bartın cement factory, which is only cement factory making production by wet method in Turkey, was compared with another cement factory using dry method.

In Bartın cement factory, firstly energy study was carried out and specific energy consumption (SEC) was calculated for clinker and cement production. Performance analysis was done with CUSUM graph (cumulative sum control chart) by using these calculation results. Secondly the system, whose thermodynamic analysis was examined, was determined. Energies going in and going out into the system and exergy values for these systems were then calculated. Also, energy and exergy efficiencies were calculated for the whole systems. The results obtained through the energy and exergy analysis were evaluated with other factories making cement production with dry method. Comparisons showed that wet method is much lower than dry methods in terms of energy efficiency. At the end of this thesis some recommendations are offered for the waste heat recovery.

Key Words: Energy and exergy analysis, wet method, cement production, energy survey, CUSUM graph.

Science Code: 625.04.01

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında beni yönlendiren ve yardımını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. M. Emin AKAY'a, fabrikada verilerin alınması ve ölçümlerin yapılması konusunda yardımını esirgemeyen; Bartın Çimento A. Ş. Genel Müdürü Fevzi Bingöl'e, üretim şefi Hamza YANAR'a, üretim müdürü Özcan AKARSU'ya, teknik işler müdürü Levent ULUÇAY'a ve yardımlarını esirgemeyen diğer çalışanlara teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmamda her türlü maddi ve manevi desteği sağlayan Yrd. Doç. Dr. Bilal DEMİREL'e, Yrd. Doç. Dr. Volkan KIRMACI'ya, çalışmalarıyla katkıda bulunan Dr. Öğ. Alb. Ziya SÖĞÜT'e, Yrd. Doç. Dr. Ahmet KOLİP'e, Doç. Dr. Ünal ÇAMDALI'na, sorularımda yardımcı olan Prof. Dr. Mehmet KANOĞLU'na, Prof. Dr. İbrahim DİNÇER'e, Arş.Gör. Dr. M. Tolga BALTA'ya, Ehsan Amirabedin'e, tez hazırlanırken bana destek olan asistan arkadaşlarım Arş. Gör. Ali YARAŞ'a, Arş. Gör. Muzaffer KARAGÖZ'e, Arş. Gör. Bilal KURŞUNCU'ya Arş. Gör. Volkan AKGÜL'e ve Arş. Gör. İbrahim KARADEMİR'e yürekten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca her zaman beni teşvik eden, beni yalnız bırakmayan ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen eşim Rukiye USTAOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 ÇİMENTO TEKNOLOJİSİ.....	1
1.1 GİRİŞ VE ÇİMENTONUN TARİHÇESİ.....	1
1.2 ÇİMENTO.....	2
1.2.1 Çimentonun Yapısı.....	2
1.2.2 Çimento Çeşitleri.....	2
1.2.3 Türk Standartlarına Göre Çimento Tipleri	4
1.3 DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE ÇİMENTO ENDÜSTRİSİ	5
1.3.1 Çimento Üretim Teknolojileri.....	6
1.3.1.1 Yaş Sistemle Üretim.....	6
1.3.1.2 Yarıyaş Sistemle Üretim	7
1.3.1.3 Kuru Sistemle Üretim.....	8
1.3.2 Çimento Sektöründe Enerji Tüketimi	9
1.4 ÇALIŞMA BÖLGESİ VE ÇİMENTO ARAŞTIRMALARI	11
1.4.1 SANKO Bartın Çimento Fabrikası ve Üretim Şartları.....	11
1.4.2 Literatür Araştırması	12
BÖLÜM 2 TERMODİNAMİK KAVRAMLAR.....	19

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.1 TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ KANUNU	19
2.2 TERMODİNAMİĞİN İKİNCİ KANUNU	20
2.3 EKSERJİ VE TANIMI.....	21
2.4 EKSERJİNİN ÖNEMİ	22
2.5 EKSERJİNİN ANALİZ METODLARI	23
2.5.1 İş Etkisi İle Ekserji Transferi.....	25
2.5.2 Isı Etkisi İle Ekserji Transferi	25
2.5.3 Madde Akışı İle Birleştirilmiş Ekserji	26
2.5.3.1 Fiziksel Ekserji.....	27
2.5.3.2 Kimyasal Ekserji	28
2.5.4 Ölü Hal	31
2.5.5 Tersinmezlik (Ekserji Kaybı)	32
2.5.5.1 Kısmi Olayından Gelen Ekserji Kaybı	32
2.5.5.2 Sürtünmeden Gelen Ekserji Kaybı.....	32
2.5.5.3 Sonlu Sıcaklık Farkındaki Isı Transferindeki Ekserji Kaybı	33
2.5.6 Ekserjinin Açık ve Kapalı Sistemler Açısından Ele Alınması	33
2.5.7 Ekserji Verimliliği.....	34
2.5.7.1 Basit Verimlilik	35
2.5.7.2 Rasyonel Verimlilik	35
2.5.7.3 Geçişli Ekserji İle Verimlilik	35
BÖLÜM 3 ÇİMENTO FABRİKASININ ENERJİ KONTROLÜ.....	37
3.1 ENERJİ VERİMLİLİĞİ MEVZUATI	37
3.2 ÇİMENTO FABRİKASININ FAALİYET ALANI.....	39
3.3 ENERJİ TARAMASI AŞAMALARI	39
3.4 ÇİMENTO FABRİKASI ENERJİ TÜKETİM VERİLERİ.....	40
3.4.1 Çimento Fabrikasının Üretim ve Enerji Tüketim Verileri Dağılımı	43

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.4.2 Spesifik Enerji Tüketimi	49
3.5 KÜMÜLATİF TOPLAM DEĞERLER (CUSUM) GRAFIĞİNİN ÇİZİLMESİ.....	50
BÖLÜM 4 ÇİMENTO FABRİKASININ ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ.....	53
4.1 DÖNER FIRIN VE SOĞUTUCU BÖLÜMÜNDE KÜTLE, ENERJİ VE EKSERJİ	56
4.1.1 Döner Fırın ve Soğutma Bölümünde Kütle Analizi.....	57
4.1.2 Döner Fırın ve Soğutma Bölümünde Enerji Analizi.....	61
4.1.3 Döner Fırın ve Soğutma Bölümü Enerji Verimliliği.....	68
4.1.4 Döner Fırın ve Soğutucu Bölümünün Ekserji Analizi	69
4.1.5 Döner Fırın ve Soğutma Bölümü Ekserji Verimi.....	83
4.2 TRAS KURUTMA BÖLÜMÜNÜN KÜTLE, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ	84
4.2.1 Tras Kurutucu Bölümü Kütle Dengesi.....	84
4.2.2 Tras Kurutma Bölümü Enerji Analizi	85
4.2.3 Tras Kurutma Bölümü Enerji Verimi.....	88
4.2.4 Tras Kurutma Bölümü Ekserji Analizi.....	88
4.2.5 Tras Kurutma Bölümü Ekserji Verimliliği.....	89
4.3 KÖMÜR KURUTMA BÖLÜMÜNÜN KÜTLE, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ.....	89
4.3.1 Kömür Kurutma Bölümünün Kütle Denkliği.....	90
4.3.2 Kömür Kurutma Bölümünün Enerji Denkliği.....	91
4.3.3 Kömür Kurutma Bölümü Enerji Verimi	93
4.3.4 Kömür Kurutma Bölümü Ekserji Analizi	94
4.3.5 Kömür Kurutma Bölümü Ekserji Verimi.....	96
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	97
5.1 SONUÇLAR	97
5.2 ÇİMENTO FABRİKASININ ENERJİ TÜKETİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	97
5.3 FABRİKANIN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	98
5.3.1 Döner Fırın ve Soğutma Bölümü	100
5.3.2 Tras Kurutma Bölümü.....	102
5.3.3 Kömür Kurutma Bölümü	103
5.4 ÖNERİLER.....	104

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR.....	105
ÖZGEÇMİŞ	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1	Yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri 7
1.2	Yarıyaş sistemle üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri. 7
1.3	Kuru sistemli (önkalsinasyonlu ve seri akışlı) üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri..... 9
2.1 a)	İkinci yasanın Kelvin-Planck açıklaması 20
2.1 b)	Clausius'un ikinci yasa açıklaması 20
2.2	Bir prosesde ekserji verimi ile yıkım, kaynak tüketimi ve kaybolan ekserji emisyollarının arasındaki ilişki 22
2.3	Sürekli akış halindeki açık bir sistem..... 23
2.4	Ekserji kullanım kayıpları 24
2.5	Sonlu bir sıcaklık farkında gerçekleşen ısı geçişi işlemi sırasında ekserjinin geçişi ve yok oluşu..... 22
2.6	Herhangi bir sıcaklık ve basınçta bulunan sistemin ekserji farkı..... 28
3.1	Fabrikanın enerji tüketim değerlerinin GJ ve TEP cinsinden oranı 41
3.2	Fabrikanın enerji tüketim maliyeti oranları..... 42
3.3	Çimento fabrikası elektrik enerjisi tüketimi (kWh) 44
3.4	Çimento fabrikasının yerli taş kömürü tüketimi (ton)..... 45
3.5	Çimento fabrikasının ithal kömür tüketimi 46
3.6	Fabrikanın genel üretim ve enerji tüketimi oranlarının karşılaştırılması 48
3.7	SET değerleri grafiksel karşılaştırılması 50
3.8	Kümülatif değerler toplamı (CUSUM) grafiği..... 52
4.1	Çimento fabrikası imalat akış şeması ve kalite kontrol Safaları. 54
4.2	Çimento fabrikası klinker ve çimento üretim safaları şematik olarak 55
4.3	Döner fırının şematik olarak temel çalışma prensibi 57
4.4	Döner fırın ve soğutma bölümü kütle akış şeması 58
4.5	Döner fırın ve soğutucu bölümü kütle denkliği sistem sınırı 59
4.6	Sistem sınırına giren ve çıkan enerji akış şeması..... 61

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
4.7	Döner fırın sistemine giren enerji yüzde dağılımları	64
4.8	Döner fırın sisteminden çıkan enerji yüzde dağılımları	64
4.9	Soğutucuya kütle, ısı ve iş ile enerji girişi	66
4.10	Soğutucudan kütle, ısı ve iş ile enerji çıkışı	66
4.11	Döner fırın ve soğutma bölümüne giren enerjilerin yüzdeleri	68
4.12	Döner fırın ve soğutma bölümünden çıkan enerjilerin yüzdeleri.....	68
4.13	Tras kurutma bölümüne giren ve çıkan kütle akış şeması	84
4.14	Tras kurutma bölümü sisteme giren ve çıkan enerjiler	85
4.15	Tras kurutma bölümüne giren enerji yüzdeleri	87
4.16	Tras kurutma bölümünden çıkan enerji yüzdeleri.....	87
4.17	Kömür kurutma bölümü akış şeması.....	90
4.18	Kömür kurutma bölümünün enerji akışı ve sistem sınırı	93
4.19	Kömür kurutma bölümüne giren enerji yüzdeleri	93
4.20	Kömür kurutma bölümünden çıkan enerji yüzdeleri.....	93

TABLolar DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
1.1	TS EN 197-1'e göre çimento tipleri.....	4
1.2	2001 yılı dünya klinker üretim kapasitesi	5
1.3	İmalat sanayii alt sektörlerinde enerji yoğunluğu	10
2.1	Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması.....	21
2.2	Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri	29
2.3	Bazı yakıtların kimyasal ekserjilerinin alt ve üst ısıl değere oranı	31
3.1	Sanayi enerji kontrol birimi ve enerji yöneticisi şartları fabrika TEP değerleri	37
3.2	Çimento fabrikasının faaliyet alanı ve 2010 yılı üretim miktarları.....	39
3.3	Elektrik birim fiyatları TEDAŞ geneli 2010 yılı tarifesi.....	40
3.4	Çimento fabrikasının GJ ve TEP cinsinden enerji tüketim değerleri.....	41
3.5	Çimento fabrikasının enerji tüketim maliyeti.....	42
3.6	Çimento fabrikasının enerji tüketimi ve CO ₂ emisyonu ton olarak	43
3.7	Çimento fabrikasının 2010 yılı aylık çimento ve klinker üretimi.	43
3.8	Fabrikanın 2010 yılında harcadığı elektrik enerjisi.....	44
3.9	Fabrikanın 2010 yılı yerli taş kömürü tüketimi.....	45
3.10	Fabrikanın 2010 yılı ithal linyit kömürü tüketimi.....	46
3.11	Çimento fabrikasının 2010 yılı aylık olarak enerji tüketimi toplamı	47
3.12	Çimento fabrikasının 2010 yılı aylık olarak enerji tüketimi maliyeti	47
3.13	Birim kütle enerjisi, birim kütle maliyeti ve birim enerji maliyeti	49
3.14	Fabrikanın SET değerleri	49
3.15	CUSUM grafiği için değerlerin hesaplanması	51
4.1	Döner fırına giren ve çıkan maddelerin kütle dengesi	58
4.2	Soğutucuya giren ve çıkan maddelerin kütle dengesi	59
4.3	Döner fırın ve soğutucu bölümü kütle dengesi	60
4.4	Döner fırına kütle, ısı ve iş ile enerji girişi.....	63
4.5	Döner fırından kütle, ısı ve iş ile enerji çıkışı	63
4.6	Soğutucuya kütle, ısı ve iş ile enerji girişi	65
4.7	Soğutucudan kütle, ısı ve iş ile enerji çıkışı	65
4.8	Döner fırın ve soğutucu bölümü sistemine giren enerjiler	67
4.9	Döner fırın ve soğutucu bölümü sisteminden çıkan enerjiler	67
4.10	Döner fırın ve soğutma bölümünün verimleri.....	69

TABLULAR DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
4.11	Döner fırına giren enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji.....	73
4.12	Döner fırından çıkan enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji	75
4.13	Soğutucuya giren enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji	77
4.14	Soğutucudan çıkan enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji	79
4.15	Döner fırın ve soğutma bölümüne giren ekserjiler.....	82
4.16	Döner fırın ve soğutma bölümünden çıkan ekserjiler	85
4.17	Tras kurutma bölümü kütle denkliği	86
4.18	Tras kurutma bölümüne kütle, ısı ve iş olarak giren enerjiler.....	87
4.19	Tras kurutma bölümünden kütle, ısı ve iş olarak çıkan enerjiler	87
4.20	Tras kurutma bölümüne giren ekserjiler	88
4.21	Tras kurutma bölümünden çıkan ekserji	89
4.22	Kömür kurutma bölümüne giren maddeler	92
4.23	Kömür kurutma bölümünden çıkan maddeler.....	92
4.24	Kömür kurutma bölümüne giren enerjiler.....	95
4.25	Kömür kurutma bölümünden çıkan enerjiler	95
4.26	Kömür kurutma bölümüne giren ekserjiler	95
4.27	Kömür kurutma bölümünden çıkan ekserjiler.....	95
5.1	Çimento fabrikası ısıl proseslerin enerji ve ekserji verimi.....	99
5.2	Yaş sistem, kuru sistem verimlerini karşılaştırılması.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_c	:	Akışkanın kesit alanı (m^2)
c_p	:	Özgül ısı (kJ/kgK)
e_{kim}	:	Birim kimyasal enerji (kJ/kg)
$ex_{kayıp}$:	Kayıp ekserji (kJ/kg)
E	:	Enerji (kJ)
$E_{küttele}$:	Kütlesel enerji (kJ)
Ex_f	:	Fiziksel ekserji (kJ)
$Ex_{ış}$:	İş ile ekserji geçişi (kJ)
$Ex_{ısı}$:	Isı ile ekserji geçişi (kJ)
Ex_{kim}	:	Kimyasal ekserji (kJ)
$Ex_{kim, kar}$:	Karışımların kimyasal ekserjisi (kJ)
$Ex_{küttele}$:	Kütle ile ekserji geçişi (kJ)
Ex_{st}	:	Standart kimyasal ekserji (kJ)
$Ex_{yokoluş}$:	Ekserji yok oluşu (kJ)
g	:	Yerçekimi ivmesi (m^2/s)
H_u	:	Net kalorifik değer ($kcal/kg$)
h	:	Entalpi (birim) (kJ/kg)
h_{fg}	:	Buhar kısma entalpisi (kJ/kg)
I	:	Ekserji yıkım (kJ)
$I_{dış}$:	Dış ekserji kayıpları (kJ)
$I_{iç}$:	İç ekserji kayıpları (kJ)
m	:	Kütle (kg)
P_o	:	Referans basıncı (kPa)
P_{oo}	:	Kısmi basınç (kPa)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

Q	:	Isı enerjisi (kJ)
Q_f	:	Sürtünmeden kaynaklanan ısı (kJ)
R	:	Gaz sabiti (kJ/kgK)
S	:	Entropi (kJ/kgK)
T_0	:	Referans sıcaklığı (K)
T_s	:	Kaynak sıcaklığı (K)
x_i	:	Kütlesel fraksiyon
V	:	Hız (m^2)
V_n	:	Normal hız (m^2)
w	:	Suyun kütleli fraksiyonu
W	:	İş enerjisi (kJ)
$W_{çevre}$:	Çevre tarafından yapılan iş (sınır işi) (kJ)
z	:	Yükseklik(m)
ΔE_{sistem}	:	Sistemdeki enerji değişimi (kJ)
ΔU	:	İç enerji değişimi (kJ/kg)
ΔE_k	:	Kinetik enerji değişimi (kJ)
ΔE_p	:	Potansiyel enerji değişimi (kJ)
ΔEx_f	:	Fiziksel ekserji değişimi (kJ)
ΔG_o	:	Oluşum Gibbs fonksiyonu (kJ/mol)
ϕ	:	Kapalı sistemlerde ekserji (kJ)
η	:	Verim
ρ	:	Yoğunluk (kg/m^3)
φ	:	Yakıtın kimyasal ekserjisinin, yakıtın ısı değerine oranı
ψ	:	Açık sistemlerde ekserji (kJ)

KISALTMALAR

C	:	Karbon
ETKB	:	Enerji ve tabii kaynaklar bakanlığı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

H	:	Hidrojen
NCV	:	Net kalorifik değer(kcal/kg)
O	:	Oksijen
S	:	Kükürt
TEP	:	Ton eşdeğer petrol
VDZ	:	Alman çimento üretimi birliği

İNDİSLER

0	:	Referans durumu
I	:	Birinci durum
2	:	İkinci durum
I	:	Birinci durum
II	:	İkinci yasa
ç	:	Çıkış
g	:	Giriş
tr	:	Tersinir
y	:	Yararlı

BÖLÜM 1

ÇİMENTO TEKNOLOJİSİ

1.1 GİRİŞ VE ÇİMENTONUN TARİHÇESİ

Çimento yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "caementum" sözcüğünden türemiş, sonraları "bağlayıcı" anlamında kullanılmaya başlamıştır. Bağlayıcı ve birleştirici özelliği sebebiyle Roma devleti döneminde "opus caementum" adıyla kullanılmıştır (Göçer 2009).

Kirecin bağlayıcı özelliğinin, M.Ö. 2000'li yıllarda keşfedildiği yaygın kanaati yaygındır. Eski Mısır, Kıbrıs, Girit ve Mezopotamya'nın değişik yörelerinde yapı malzemesi olarak kirecin kullanıldığı tespit edilmiştir. Eski Yunanlılar ve Romalılar kireci hidrolik bağlayıcı olarak kullanmışlardır. M.Ö. 70 - 25 yılları arasında yaşamış olan *Mimar Vitruvius* "On Architecture" (Mimarlık Üzerine) adlı 10 ciltlik kitabında puzolan ve kireç karışımlarının hidrolik özelliklerinden bahsetmiş, nehir ve deniz kıyısında yapılacak olan yapılarda kullanılabilecek harç için karışım oranı bile vermiştir. Araştırma sonuçları Anadolu'da Çatalhöyük'teki evlerin yapımında kullanılan sıvanın 7000 yıl öncesine tarihlendiğini ortaya koymuştur (URL-1, 2011).

Selçuklu ve Osmanlı yapılarında Duvar harcı olarak "Horasan harcı" adı verilen bir bağlayıcı kullanıldığı görülmektedir. Bu harcın bileşiminde, pişmiş toprak tozu, kuvarz kumu, kireç, kül hatta yumurta akının kullanıldığı tespit edilmiştir. Değişik tip liflerin (keçi kılı, palmye lifi, saman, vb.) harca yaklaşık % 3 oranında katıldığı da görülmüştür (URL-2, 2011).

Çimento doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Çimento tanelerinin göz açıklığı 5 ila 90 mikron arasındadır. Diğer bağlayıcı maddeler gibi çimentolar da; CaO, MgO gibi alkalik öğeler ve SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ gibi hidrolik öğelerden oluşur. Çimento bağlayıcılık görevini su ile tepkimeye girdikten sonra kazandığı için hidrolik bağlayıcı olarak

adlandırılır. Alkalın ve hidrolik ögelerin oranları bağlayıcı maddenin niteliğini belirler (URL-6, 2011). Çimento, su ile karıştırılıp plastik hamur durumuna geldikten bir süre sonra, havada ya da su içinde yavaş yavaş katılaşır. Bu katılaşmaya “Piriz” adı verilir. Normal şartlar altında (28 °C sıcaklık ve yağmursuz havada) bu katılaşma olayı ilk on dakikada başlar ve adına “Yalancı Piriz” denir, bir saat civarında ise donma ve mukavemet artar. Ancak bu olay içinde bulunulan koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilir, herhangi bir kimyasal priz geciktirici kullanılmadıysa ve hava sıcaklığı çok düşük değilse, yaklaşık 10 saat gibi bir süreçte donma gerçekleşir (URL-6, 2011). Göçer’e (2009) göre, Alman çimento üretimi birliğinin (VDZ) yayınladığı cep kitabı çimentoyu aşağıdaki gibi tarif etmektedir:

- ✓ Çimento bir hidrolik bağlayıcıdır.
- ✓ Diğer hidrolik bağlayıcılardan, örneğin hidrolik kireçten “daha yüksek olan sıkıştırma dayanımı” ile ayırt edilir.

1.2 ÇİMENTO

1.2.1 Çimentonun Yapısı

Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcıdır. Çimentonun ana bileşeni klinkerdir. Klinker, temel olarak kalsiyum, silisyum, alüminyum ve demir oksitlerinden oluşmaktadır. Klinker üretmek için, kireçtaşı ve kil karışımı öğütülüp, homojenize edilerek, döner fırınlarda 1450 °C’de pişirilir. Daha sonra klinkere % 4-5 oranında alçı taşı eklenip, çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir (Cembureau 2008). Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir. Normal betonda agrega taneleri en sağlam unsur olduğundan, diğer iki unsur (çimento hamuru ve aderans) mukavemeti belirlemektedir. Çimento hamurunun mukavemeti önemli ölçüde su/çimento oranına da bağlıdır (URL-3, 2011).

1.2.2 Çimento Çeşitleri

Dünyada; Portland çimentosu, Traslı çimentolar, Yüksek fırın cüruf çimentosu, Katkılı çimentolar ve diğer çimento türleri olarak, beş cins çimento üretilmektedir (Kuleli 2010).

Portland Çimentosu: Betonarme yapılarda kullanımı en yaygın çimento türüdür. Portland çimentosu belirli oranda kalker taşı (CaCO_3) ile kil (SiO_2 ve Al_2O_3) karıştırılıp, klinkerde

pişirilmesinden sonra, bilyeli değirmende öğütülerek elde edilir. Klinkere bir miktar alçı taşı da eklenmesiyle çimentonun sertleşmesini geciktirilebilir.

Traslı Çimentolar: Traslar silisli ve alüminli maddeler içeren volkanik tüflerdir. Kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri olmamakla beraber, çimentoda mevcut kireçle bu özelliği kazanırlar. Bu tür çimentolar imalat aşamasında portland çimentosu klinkerine aktif volkanik tüfler veya benzeri traslar katılarak, bunların öğütülmesiyle elde edilir. Karışımda ki tras oranı % 20 - 40 düzeyinde tutulur. Bu tür çimentoların geçirimsizliği az hidrasyon ısıları düşük olduğundan genellikle su yapılarında kullanılırlar.

Yüksek Fırın Cüruf Çimentosu: Granüle yakın fırın cürufu ile Portland çimentosu klinkeri karışımının az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi ile elde edilir. Genelde, bu tür çimentolar deniz suyu ve diğer sülfatlı ortamlarda portland çimentosuna kıyasla daha yavaş dayanım kazanırlar ve daha yüksek bir dayanıma sahip olurlar. Ancak geçirimsizlikleri daha düşüktür.

Katkılı Çimentolar: Portland çimentosu klinkerinin ağırlıkça en fazla % 19'nun puzolanik malzeme ile değiştirilmesi ve alçı taşı eklenmesiyle elde edilir. Katkılı çimento tarılsı çimento için belirtilen özelliklere sahiptir fakat traslı çimentodan farkı puzolan oranının daha fazla olmasıdır.

Diğer Çimento Türleri:

- ✓ Uçucu Küllü Çimento
- ✓ Süper Sülfat Çimentosu
- ✓ Sülfata Dayanıklı Çimento
- ✓ Erken Dayanımı Yüksek Çimento
- ✓ Düşük hidrasyon ısılsı çimento olarak çeşitlenmektedir.

Dünya'da çimento üretim ve satışına 1878 yılında başlanmasına rağmen, Türkiye'nin çimento sektörü ile tanışması ise esas olarak 1912 yılında özel sektör girişimi ile olmuştur. 34 yıl geç başlanması su kireci imalinin yeterli olmaması ve bu yılların Osmanlı İmparatorluğu'nun çöküş dönemlerine rastlamasından kaynaklanmaktadır.

1.2.3 Türk Standartlarına Göre Çimento Tipleri

Betonda kullanılan çimento tipleri ve uygunluk değerlendirmesi TS EN 197 serilerinde standartlaştırılmıştır (URL-3, 2011). TS EN 197-1 standardı, ülkemizde şu anda beton üretiminde kullanılan çimento tiplerinden daha fazla çimento tipinin kullanılabilmesini sağlamaktadır. TS EN 197-1, çimentoları, CEM I'den (Portland Çimentosu) CEM V'e (kompoze çimento) kadar beş ana tipte işaretlendirmektedir. İşaretleme; ana çimento tipi; Portland çimento klinkeri oranı; ikinci ana bileşen; standart (örn. 28-günlük) dayanım sınıfı ve erken dayanım kazanma hızı gibi kriterleri belirtmektedir. Örneğin bir Portland Cürufllu Çimento tipi CEM II / A - S 42,5 N şeklinde gösterilir. Burada "N" normal erken dayanımı, "R" hızlı erken dayanımı göstermektedir. Standart dayanım sınıfları olarak; Alt-tip, ikinci ana bileşeni (bu örnekte yüksek fırın cürufunu) göstermektedir. Portland çimentosu klinkerinin oranını (A) yüksek, (B) orta ve (C) düşük olarak göstermektedir. TS EN 197-1 standardına göre çimentolar Tablo 1.1'de de gösterilmiştir.

Tablo 1.1 TS EN 197-1'e göre çimento tipleri (URL-3, 2011).

İptal Edilen Türk Standardı		Yeni standart		Klinker oranı (%)
Standart Kodu	İşaretleme	Çimento tipi	TS EN 197 - 1'e göre işaretleme	
TS 19	PÇ	Portland çimento	CEM - I	% 95 - 100 klinker
TS 12139	PCCÇ	Portland - cürufllu çimento	CEM - II / A - S	% 80 - 94 klinker + % 20 - 6 cüruf
			CEM - II / B - S	% 65 - 79 klinker + % 35 - 21 cüruf
TS 12141	PSFÇ	Portland - silis dumanlı çimento	CEM - II / A - D	% 90 - 94 klinker + % 10 - 6 s. dumanı
			CEM - II / A - P	% 80 - 94 klinker + % 20 - 6 doğal puzolan

Tablo 1.1'de de gösterilen TS EN 197-1'deki değişik çimento tiplerine göre çimentonun bileşen malzemeleri aşağıdaki gibidir:

- ✓ Ana bileşen, örneğin Portland çimentosu klinkeri,
- ✓ İkinci ana bileşen, örneğin uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, silis dumanı,
- ✓ Minör ilave bileşen, örneğin uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kalker, doğal puzolan,
- ✓ Priz ayarlayıcı, örn. kalsiyum sülfat,
- ✓ Kimyasal katkıları, örneğin pigmentler, hava sürükleyici katkıları.

Çimentoda ikinci ana bileşeni belirten harfler şu şekildedir:

- ✓ S: yüksek fırın cürufu,
- ✓ D: silis dumanı,
- ✓ P: doğal puzolan,
- ✓ Q: doğal kalsine puzolan,
- ✓ V: silissi uçucu kül,
- ✓ W: kalkersi uçucu kül,
- ✓ T: pişmiş şist,
- ✓ M: üsttekilerden ikisi veya daha fazlası.

1.3 DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ÇİMENTO ENDÜSTRİSİ

1756 yılında John Smeaton tarafından, İngiltere'nin Cornwall sahilindeki Eddystone deniz fenerinin yeniden yapımında yumuşak kalker ve kil bileşimli bir çimento kullanmıştır. 1802 yılı Fransa çimento sanayinin başlangıcıdır. Amerika'daki ilk portland çimentosu üretimi ise 1871 yılında David O. Saylor tarafından gerçekleştirilmiştir (Göçer 2009). Çimento sektörü, bugün dünyada sanayi kolları arasında yüksek bir üretim payına sahiptir. Çin dünya çimento üretiminin yaklaşık % 47,5 ile % 50 arasındaki payı üretmektedir. 2001 yılı dünya klinker üretim kapasiteleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2 2001 yılı dünya klinker üretim kapasitesi (Söğüt 2005).

Ülkeler	Kapasite (x10 ³ ton)	Ülkeler	Kapasite (x10 ³ ton)	Ülkeler	Kapasite (x10 ³ ton)
Çin	550.000	Japonya	96.000	A.B.D.	93.000
Hindistan	115.000	İtalya	46.000	Rusya	65.000
Fransa	24.000	Endonezya	45.000	Kore Cum.	62.000
Almanya	43.000	İspanya	40.000	Taywan	26.000
Brezilya	45.000	Türkiye	33.000	Dünya Top.	1.800.000

1912 yılında özel sektöre ait iki çimento fabrikası 20 bin ton/yıl ile üretime başlayan çimento sektörümüz 2003 yılında 35 milyon ton/yıl üretime ulaşmıştır (Savaş 2004). Ülkemiz çimento sektöründe 1926 yılına kadar olan dönem hariç, daima resmi ve özel sektör bir arada üretim yapmış ve 1960 yılından sonra da hemen yarı yarıya oran ile mevcut kapasiteyi paylaşmıştır. 1960'da Türkiye bir miktar çimento ihraç edebilir duruma gelmişse de 1963-70 yıllarında

tekrar ithalata devam etmek zorunda kalmıştır. 1980' den günümüze düzenli şekilde artan ihracatımız 2000 yılı itibari ile 6,5 milyon tona ulaşmıştır. 2001 yılı içerisinde meydana gelen ekonomik kriz nedeni ile iç tüketimin 25 milyon ton civarında gerçekleşmesi ve 8 milyon tona yakın ihracat ile üretimin dengelenmesi beklenmektedir. Türkiye 2003 yılı itibari kapasite 36,408 milyon ton klinker ve 66,363 milyon ton çimento üretme kapasitesine sahiptir. Bu dönemde Türkiye yurt dışına 7.362.923 ton çimento ihraç etmiştir (Söğüt 2005).

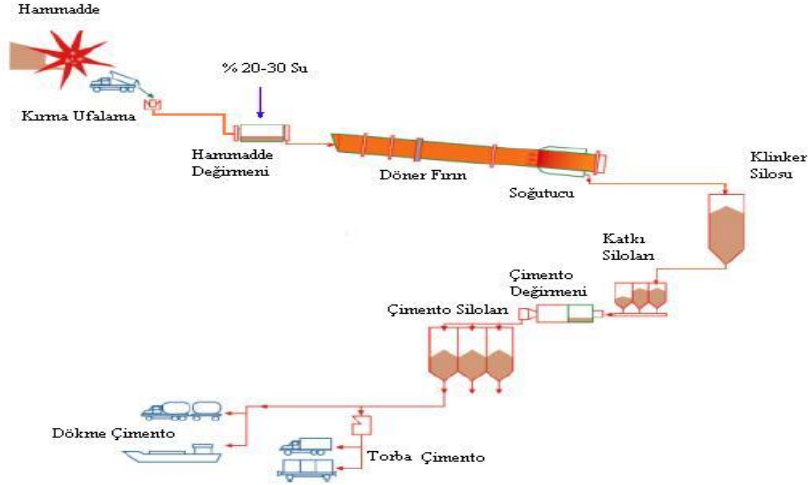
Türkiye'de çimento üretimine ilişkin ilk geliştirilen standart 1959 yılının 6/640 numaralı standardıdır. Bu standart'ta değişik portland çimento, yüksek fırın cüruf çimentosu gibi çimento türlerine ilişkin üretim standartları belirlenmiştir. 1975 ve 1985 yılları arasında eski standartları iptal eden ve çimento çeşitlerini 6'dan 11'e çıkaran 6 farklı standart geliştiren Türkiye, 2000 yılında Avrupa standartlarını norm haline getirmiş ve EN 197 standardını benimsemiştir. Bu standart çerçevesinde CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V tipleri tanımlanmıştır. Ayrıca yeni katkı maddelerinin standartları ile yeni kimyasal, fiziksel, mekanik test metot ve uygulamaları da EN 197 kapsamındadır (URL-3, 2011).

1.3.1 Çimento Üretim Teknolojileri

Çimentonun üretilmesinde; yaş sistem, yarıyaş sistem ve kuru sistem olmak üzere 3 farklı teknoloji kullanılmaktadır (Savaş 2004). Yarı yaş sistemle üretim pek kullanılmamaktadır. Türkiye 1980'li yıllarda kuru üretime geçmiştir.

1.3.1.1 Yaş Sistemle Üretim

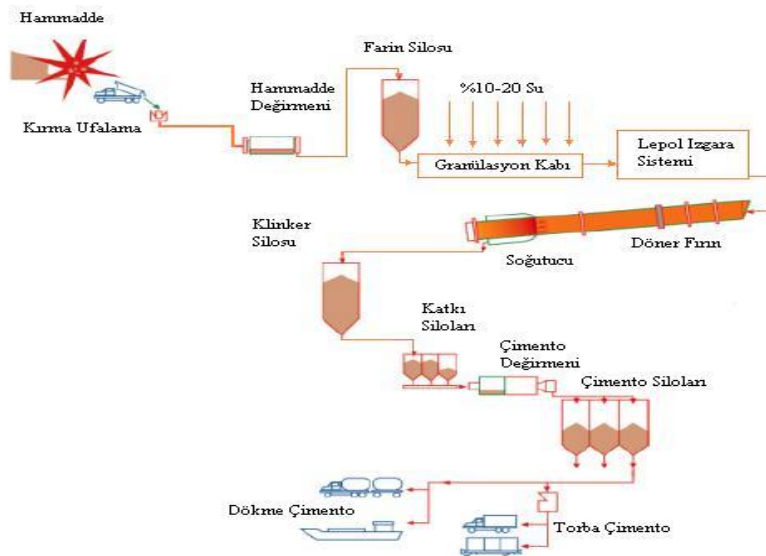
18. yüzyıldan itibaren, ilk çimento döner fırınları, yaş sistem olarak tasarlanmıştır. Bunun sebebi, toz halindeki hammaddelerin karıştırılmasında karşılaşılan güçlülük ve çamurlu çalışmanın “daha kolay ve tozsuz” olmasıdır. Yaş sistemde, kalker ve kil karışımına % 20-30 oranında su ilave edilir, değirmende öğütme işlemi yapıldıktan sonra, çamur haline getirilen karışım pişirilmektedir. Bu sistemin en zayıf yanı ısı tüketiminin 1 kg klinker üretimi için 6.000 – 6.900 kJ gibi yüksek oluşudur (Savaş 2004). Yaş sistemde homojene edilen çamur, fırınlara sevk edilir, fırın girişinde rutubetini kaybeder, orta bölgede kalsine olur, çıkış tarafındaki sinter bölgesinde klinkere dönüşür ve soğutucuya dökülür. Şekil 1.1 'de Yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri (Savaş 2004).

1.3.1.2 Yarıyaş Sistemle Üretim

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 (Akçaylı 2003). Yarıyaş sistemde değirmenden alınan hammadde sırasıyla; hammadde silolarına, bunkere ve granülasyon ünitesine alınır. Granülasyon kabı ve granül tabağına dökülen hammaddeye % 10-20 oranında su püskürtülmesiyle granüle hale getirilerek, fırına beslenir. Sıcak fırın gazları granül tabakasını iki kez kat ederek (yaklaşık 100 °C'ye düşecek şekilde) ısısını ısıtma ve kurutma için hammaddeye transfer etmektedirler.



Şekil 1.2 Yarıyaş sistemle üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri (Savaş 2004).

Ayrıca bu sistem ile ısı tüketiminin 3516 kJ/kg. klinker'e kadar düşürülebilmesinin beraberinde, fırın boyunun da 40-70 m' ye kadar kısaltılması sağlanmakta, fırın kapasiteleri de 1500 ton/gün' e kadar çıkabilmektedir. Yarıyaş sistemle üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri Şekil 1.2'de verilmiştir.

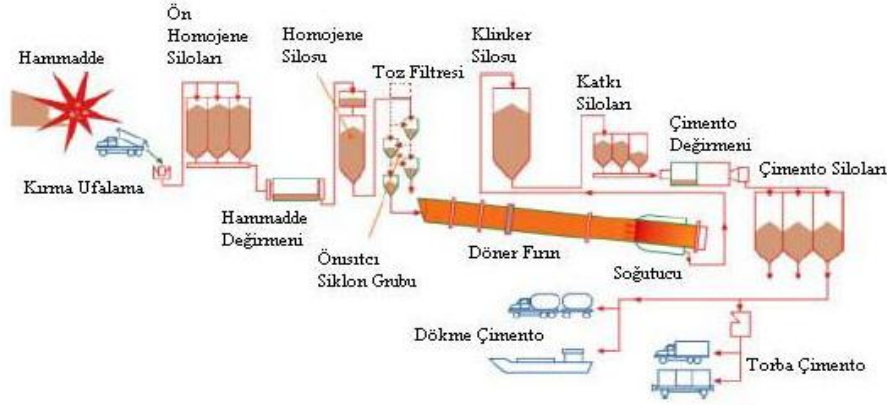
1.3.1.3 Kuru Sistemle Üretim

Kuru sistem çimento üretimi esas itibariyle; önısıtıcı siklonlu ve önkalsinasyonlu olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Günümüzde çimento üretim sistemlerinin büyük çoğunluğunun önkalsinasyonlu tipte üretim yapmaktadır (Savaş 2004). Kuru sistemde; hammadde karışımı kurutularak öğütüldükten sonra, toz halinde pişirilir, sonra da çimento değirmenlerinde öğütülür.

Kuru sistemle çimento üretiminde konkasörde kırılmış hammadde, farin değirmeninde öğütülerek homojene edilir. Öğütme işlemi sırasında farin, fırından alınan yanma gazları ile kurutulur. Kurutma ve ısıtma işlemleri yaş ve yarı yaş sistemden farklı olarak, döner fırında yapılmadığı için, fırın boyu diğerlerine göre kısadır. Kuru sistem fırınlarında yalnızca kalsinasyon ve sinterleme işlemleri yapılmaktadır. Önısıtıcı ünitesinde döner fırın çıkışındaki gaz siklon kademelerinden geçerken, enerjisini vererek soğur, homojene edilmiş farin ise ters istikamette geçerken enerji ile ısınır ve kısmen kalsine olur. Kademe sayısı 4 veya daha fazla olabilir, kademe arttıkça ısı tasarrufu artar (Akçaylı 2003).

Kuru sistem fırınların ön kalsinasyon sistemine de sahip olması halinde, yakıt döner fırından başka kalsinatörde de yakılmaktadır. Kalsinatöre sekonder hava olarak, soğutmadan sıcak gaz alınmaktadır. Önısıtıcılı kuru sistem döner fırında fırına girişteki kalsinasyon derecesi en fazla % 40 iken, ön kalsinasyonlu sistemlerde bu değer % 80-90 oranına çıkmaktadır. Ön kalsinasyonlu döner fırınlarda kalsinatörde düşük kalorili kömür kullanılabilir ve ısı harcaması % 5-10 kadar düşer ve fırın kapasitesi artar.

Yaş ve kuru sistem arasındaki en önemli fark, kavurma ve soğutma aşamasında kullanılan döner fırında harcanan yakıt miktarında meydana gelmektedir. Yaş yöntemde harcanan enerji 1200-1650 kcal/kg. iken, kuru sistemde 550-650 kcal/kg. olmaktadır (Akçaylı 2003). Kuru sistemli (önkalsinasyonlu ve seri akışlı) üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri Şekil 1.3'de gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Kuru sistemli (önkalsinasyonlu ve seri akışlı) üretim yapan çimento fabrikası üretim kademeleri (Savaş 2004).

1.3.2 Çimento Sektöründe Enerji Tüketimi

Çimento sektörü enerji yoğun bir sektördür. Isıl enerji ve elektrik enerjisi için ödenen paralar toplam maliyetin ortalama % 45-50'sini oluşturmaktadır (Savaş 2004). Genel olarak çimento sektörünün enerji tüketimi, sanayi sektörünün % 12-15'ini, ülkelerin toplam enerji tüketiminin % 2-6'sını tüketmektedir. 1999 ve 2000 rakamları değerlendirildiğinde, sanayi sektörü enerji tüketiminin % 13,2 - 10,9'u çimento sektörüne aittir (Söğüt 2005). Avrupa Çimento Birliği – Cembureau tarafından yapılan araştırmalarla, enerji tüketimini düşürmek ve emisyonları azaltmak için “Birlikte işleme” yaklaşımı benimsenmiştir. Buna göre, atık malzemelerin çimento üretiminde hem hammadde olarak, hem de birincil yakıt olarak kullanılmaktadır (Cembureau 2008). Birlikte işlenmesi söz konusu olan maddeler;

- ✓ Atık makine yağları ve sanayi tesislerinden çıkan katalizörler
- ✓ Mineral bileşeni klinker üretimine uygun olan kontamine olmuş toprak gibi maddeler,
- ✓ Hem ısıl değeri, hem de mineral bileşeni uygun kâğıt hamuru ve kullanılmış lastik gibi maddeler,
- ✓ Kanalizasyon çamuru ve arıtma çamuru, olarak çeşitlenmektedir (Cembureau 2008).

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 (Savaş, 2004). Çimento üretiminde oluşturulabilecek “sürdürülebilir enerji kullanımı” yaklaşımı ile gereksinimi olan enerjinin en az finansmanla, en az çevresel ve sosyal maliyetle ve sürekli olarak teminine olanak sağlayan politikaların oluşturulması, gelişmiş üretim teknolojileri ve uygulamaları ile sağlanacaktır. Bu şartların sağlanması aşağıda sıralanan üç ana ilkeye dayanmaktadır (Söğüt 2005):

- ✓ Enerjinin etkin kullanımı ve enerji tasarrufu,
- ✓ Enerji üretimi ve kullanımında çevreye verilen zararın ve kirlenmenin asgariye indirilmesi için çevre dostu enerji stratejilerin geliştirilmesi,
- ✓ Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın kullanımı

Endüstriyel üretimdeki enerji yoğunluklarını belirtmek için, Narin ve Akdemir (2006) TÜİK verilerini kullanarak, çeşitli imalat sanayi kollarında 1995-2001 dönemine ait enerji yoğunluklarını “TEP / Çıktı Bin Dolar” cinsinden ortaya koymuşlardır. Sonuçlar Tablo 1.3’de gösterilmiştir.

Tablo 1.3 İmalat sanayii alt sektörlerinde enerji yoğunluğu (Narin ve Akdemir 2006).

Kodlar	Sektörler	TEP / Çıktı Bin Dolar 1995	TEP / Çıktı Bin Dolar 1998	TEP / Çıktı Bin Dolar 2001
3	İmalat Sanayi ortalaması	0,134	0,135	0,129
31	Gıda	0,058	0,062	0,057
32	Dokuma ve giyim	0,051	0,045	0,052
33	Orman	0,062	0,054	0,089
34	Kağıt, selüloz	0,129	0,208	0,241
35	Kimya	0,101	0,129	0,081
36	Taş, toprak, çimento ve seramik	0,753	0,618	0,767
37	Metal	0,454	0,533	0,568
38	Diğer	0,015	0,012	0,015

Tablo 1.3’deki enerji yoğunluğu sonuçları incelendiğinde şunlar görülmüştür:

- ✓ İmalat sanayinde 0,135 ile 0,129 TEP / Çıktı.Bin Dolar arasında değişmektedir.
- ✓ En düşük sanayi alanı 0,045 ile 0,052 TEP / Çıktı.Bin Dolar arasında değişen değerle dokuma ve giyim sektörüdür.
- ✓ Taş, toprak, çimento ve seramik sektörü 0,618 ile 0,767 TEP / Çıktı.Bin Dolar arasında değişen değerle en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.

Bu sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, çimento üretiminde “enerji yoğunluğunun düşürülmesi” çalışmaları; hem maliyeti azaltacak, hem de enerjide dışa bağımlı ülkemizin ithalatını düşürerek, stratejik bir avantaj sağlayacaktır. Diğer yandan Avrupa Çimento Birliği – Cembureau’nun tespitlerine göre, bir çimento fabrikasında çimento maliyetinin yaklaşık % 40’ını yakıt ve elektrik giderleri oluşturmaktadır. Son iki yılda, elektrik giderlerinin maliyet içindeki payı % 14’den % 25’e fırlamıştır (URL-5, 2006). Klinker üretimi için teorik enerji ihtiyacını belirleyen faktör; kimyasal ve mineralojik reaksiyonlar olup, değerleri 1700 - 1800 MJ/ton.klinker arasında değişmektedir. Farklı üretim tiplerine göre gerçek enerji ihtiyacı aşağıda verilmiştir (URL-5, 2006):

- ✓ Kuru sistem, çok kademeli (3 – 6 kademe) siklonlu ön ısıtmalı ve önkalsinatörlü fırınlarda, 3000 - 3800 MJ/ton.klinker
- ✓ Kuru sistem, döner fırınlı, siklonlu ön ısıtmalı sistemlerde • 3100 - 4200 MJ/ton.klinker
- ✓ Yarı kuru – yarı yaş sistemlerde 3300 - 4500 MJ/ton.klinker
- ✓ Kuru tip ve uzun fırın kullanımı halinde 5000 MJ/ton.klinker değerine çıkar,
- ✓ Yaş tip ve uzun fırınlarda 5000 - 6000 MJ/ton.klinker ve
- ✓ Şaft tipi fırın kullanımı ve özel tip çimento üretiminde 3100 - 6500 MJ/ton.klinker

1.4 ÇALIŞMA BÖLGESİ VE ÇİMENTO ARAŞTIRMALARI

1.4.1 SANKO Bartın Çimento Fabrikası ve Üretim Şartları

Tezin çalışma alanı SANKO Holding'e bağlı Bartın Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş. fabrikasıdır. 1954 yılında temeli atılan ve 1962 yılında üretime başlayan Bartın Çimento 2005 yılı sonu itibariyle SANKO Holding'e katılıp Bartın Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş. adını almıştır. Tesis Gölbucağı Mahallesi Kuyu mevkiinde kurulu olup, İnkumu ve Bartın limanı yolu üzerindedir. Fabrikanın klinker üretim kapasitesi 710 ton/gün, çimento üretim kapasitesi 3.100 ton/gün'dür. Bartın Çimento fabrikasında klinker üretiminde “yaş sistem” kullanmakta olup, kuru sisteme geçiş çalışmaları devam etmektedir. TSE 197-1 standartlarına uygun CEM I ve CEM II tip çimento türevleri piyasa talebine göre üretilebilmektedir. Her ürün için TS Uygunluk belgesi, CE Belgeleri ve Gost-R Belgeleri mevcuttur (URL-7, 2011).

Bartın Çimento Fabrikası, Çevre ve Orman Bakanlığı onaylı “A Grubu Emisyon İzin Belgesi” almıştır. Fabrikanın çevresel etkilerinin azaltılması, tozsuzlaştırma gibi çalışmaları devam

etmektedir. Fabrikamıza İl Çevre ve Orman Müdürlüğü tarafından çevreye gösterdiği duyarlılıktan dolayı "Teşekkür Plaketi" verilmiştir. Bartın Çimento Fabrikası, TS EN ISO 9001-2008 Kalite Yönetim Sistemi, OHSAS 18001-2007 İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi belgelerine ve IQNET Sertifikası'na sahiptir. ISO 14001 Çevre Yönetim Sistemi Belgelendirme çalışmaları devam etmektedir (URL-7, 2011).

1.4.2 Literatür Araştırması

Çimento üretiminde uygulanan; enerji taraması, enerji ve ekserji analizi, yakma verimliliği ve emisyonların azaltılması konularında yapılan çalışmaların bazıları aşağıda sıralanmıştır:

Dutrow vd. (2010) çalışmalarında, Amerikan Çevre Araştırma Kurumu – EPA ile çimento fabrikaları arasında “EPA’s ENERGY STAR® Partnership” ismiyle anılan bir program çerçevesinde yapılmıştır. Program enerji verimliliği ve sera gazı emisyonlarını azalmayı amaçlamaktadır. Çalışmada çimento fabrikası operasyonları; hammadde hazırlama, klinker üretimi, çimento hazırlama, fabrika bakım hizmetleri ve üretim yöntemini değiştirme olmak üzere beş gruba ayrılmıştır.

Çamdalı (2001) yaptığı “Termodinamik Analizlerde çevre Sıcaklığının Değişiminin Etkisi ve Endüstriyel Uygulamalar” adlı çalışmasında, döner fırında ekserji kaybı matematiksel eşitlikleri elde edilmiştir. Döner fırında 1 saatlik üretim için kayıp olan maksimum ekserji 116.305 MJ, minimum ekserji miktarı ise 114.758 MJ ve fark 1.547 MJ olmuştur. Sonuçta döner fırının çevre sıcaklığı arttıkça sistemden kayıp olan ısının ekserjisinin (q) azaldığı, çevre sıcaklığı azaldıkça da bu ifadenin arttığı görülmüştür.

Hanle vd. (2004) bildirisinde ABD çimento üretiminde oluşan karbon dioksit emisyonlarını incelemiştir. 2001 yılında IPCC hesaplama yöntemine göre, 36 TgCO₂ değerinde olup, endüstri kaynaklı emisyonların % 3,7 oranını oluşturmaktadır. Ortalamalara göre, yaş yöntemlerin enerji sarfiyatı 6,3 MBtu/st iken, kuru yöntemlerde 5,5 MBtu/st tespit edilmiştir. Halen kömür % 71, petrol % 12, atık maddeler % 9 ve % doğalgaz % 4 ve kalan % 5’de muhtelif yakıtlar kullanılmaktadır. Öte yandan imalatta gerekli olan yüksek sıcaklıklar nedeniyle, enerjinin daha verimli kullanılması, emisyonların azaltılması önemli görülmüştür.

Lu vd. (2010) çalışmasında, Çin’deki çimento üretiminde Yaşam Döngüsü Analizi (YDA) gerçekleştirmiştir. Tespitlere göre; 2005’te ülkede 5100 çimento fabrikası bulunmakta ve

yılda 1,4 milyon ton çimento üretilmektedir. Ülkede yaş yöntem yaygın olduğundan, hem enerji yoğunluğu, hem de sera gazı emisyonları yüksektir. Yalnız % 6,4 işletme kuru yöntem kullanmaktadır. Kuru yöntemin yaygınlaşmasıyla, yaş yöntemde 5.3-7.1 GJ/t klinker olan spesifik enerji tüketimi 3.2-3.5 GJ/t klinker değerine düşeceği tespit edilmiştir.

Platonova, A. (2006) yaptığı “Energy saving adjustable AC drives for the cement Industry equipment” adlı Yüksek Lisans Tezinde, çimento üretiminde enerji harcayan prosesleri ve donanımı değerlendirmiş ve bu enerji giderini azaltıcı yollar araştırmıştır. Platonova’ya (2006) göre, tipik bir çimento fabrikasının elektrik tüketimi 1 ton çimento için 110 – 120 kWh arasında değişmektedir. Harcanan enerjinin % 90’ı klinker üretimi anında gerçekleşmektedir. Bu aşamada, motorlar, sürücüler, fanlar gibi dönen ekipmanlar ana elektrik tüketim kaynağıdır. Tipik bir çimento fabrikasında, güçleri birkaç kW’tan MW boyutuna kadar değişen 500 - 700 arasında elektrik motoru kullanılmaktadır. Bu büyük güç tüketimini azaltmak için; değişken hız kontrollü sürücüler, frekans konverterli tahrik sistemleri, kaskadlı konverterler gibi uygulamalar tavsiye edilmiştir.

Engin ve Arı (2005) çalışmalarında, 600 ton.klinker/gün kapasiteli kuru tip döner fırında enerji taraması ve enerjinin geri dönüşümü araştırması yapmışlar, sisteme giren enerjinin yaklaşık % 40’ının atık gaz olarak kaybedildiğini tespit etmişlerdir. Döner fırına uygulanan enerji taramasına göre, atık ısı enerjisinin bir buhar üreticisiyle değerlendirilmesi için örnek bir uygulama yapmışlar ve enerjinin 4 MW’a eşdeğer % 15,6’lık kısmının geri kazanabileceğini görmüşlerdir.

Çamdalı vd. (2004) tarafından kuru tip çimento üreten tesiste, ön ısıtıcılı döner fırınının kütle, enerji ve ekserji analizleri, termal ve kimyasal yönden yapılmış ve verimlilik hesaplanmıştır. Döner fırında; iletim, dağıtım ve ışınımdan doğan ısı kayıpları % 3 bulunmuştur. Toplam enerjideki ekserji kayıpları % 36,5 olup, çoğu baca gazları yoluyla olmak üzere, klinkerin üretimindeki kimyasal reaksiyonların doğurduğu ısı kaybı kökenlidir. Enerji verimliliği % 97 çıkmakla beraber, ekserji verimliliği % 64,4 olmuştur.

Söğüt vd. (2010) makalelerinde, bir çimento fabrikasında hammadde prosesi üzerinde eksorgoekonomik ve termodinamik analizler uygulamışlardır. Analiz sonucunda farin değirmeninin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla % 62 ve % 25 bulunmuştur. Bunun sebebi ürünlerin gerçek entalpi ve entropi değerleri verimleri düşürmesidir. Değirmenden alınan farin

ürününün birim maliyeti 0,0071 - 0,011 \$ / kg değerleri arasında bulunmuştur. Buna göre, hesaplanan maliyetler ile fabrikanın maliyet değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Değirmenin ekserji veriminin yükseltilmesi farin maliyetlerini düşürecektir.

Koreneos vd. (2003) Beton ve çimento üretiminin ekserji analizine yönelik yaptıkları çalışmalarında çimento ve beton üreten sanayi kuruluşlarının temel amacının çevre etkileri ve enerji maliyet oranlarını minimize etmeleri gerektiğini vurgulamaktadırlar. Yunanistan'da beton ve çimento üreten prosesleri kapsayan bu çalışmada, ekserji analiz metodu kullanılarak, prosesler üzerinde enerji kullanımının çevresel etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda; proseslerin yıllık enerji analizleri yapılarak, ekserji kayıplarının önemli bir kısmının döner fırında petrokok'un yanması ile açığa çıkan atık gazların oluşturduğu belirtilmektedir. Bu durumda ekserji kayıplarının önlenmesi için; sistem veriminin yükseltilmesi veya yeni teknolojilerin kurulması önerilmiştir.

Worrell ve Galitsky (2004) ABD'deki bir çimento tesisinde enerji verimliliğini artırma çalışmalarını incelemişlerdir. Sektörün primer yakıtlarının linyit ve kok olduğu, 1970'lerle birlikte doğalgazın öne çıktığı belirtilmiştir. Diğer yandan, eski lastikleri de kapsayan katı atıkların yakılmasında da hafif bir artış tespit edilmiştir. 1970 – 1999 döneminde çimento üretiminde özgül tüketim yıllık % 1 olmak üzere, 7,3 MBtu/short ton değerinden 5,3 MBtu/short ton değerine düşmüştür. Buna paralel olarak, karbondioksit emisyonu da % 16 oranında olarak, 0,31 t.CO₂ / ton.çimento miktarından 0,26 t.CO₂ / ton.çimento değerine gerilemiştir. Tarihsel süreçteki bu gelişmelerin aksine, ülkedeki fabrikaların 1999 itibarıyla % 25'inin yaş yöntem kullandığı tespit edilmiştir. Bu fabrikaları da kapsayan imal yöntemlerinin iyileştirilmesi ve enerji tüketiminin azaltılması için; fırın yanma sisteminde iyileştirmeler, fırın cidarından kaçak ısının azaltılması, modern plakalı soğutucu uygulamaları, güç üretimi için ısı geri kazanımı, düşük basınç düşümüne sahip siklonların kullanımı, uzun döner fırınları çok katlı multisiklon kuleler ile değiştirmek, soğutucularda optimizasyon çalışmaları gibi uygulamalar önerilmiştir.

Bashmakov (2009) Rusya'da çimento üretiminde kuru metod kullanılmakta olup, klinker / çimento oranı 1'den küçüktür. Bu oran Çin, Hindistan ve Brezilyada % 70 – 90 arasındadır. Rusya'daki çimento fabrikaları önkalsinatörlü ve altı kademeli önisıtılıcı olup, spesifik enerji tüketimi 3 GJ/t.klinker mertebesindedir. Bu değer 2000-2005 döneminde % 2,6 oranında azalmıştır. Yapılan hesaplamalara göre; spesifik enerji tüketimi 0,118 tep/t olarak

ölçülmüştür. Bu değer Güney Kore'ye göre % 75 daha yüksektir. Rusya'nın çimento sektöründe pratikte sağlanabilecek en düşük spesifik enerji tüketimi değeri 0,09 – 0,11 GJ/t olarak çıkmıştır. Çimento üretiminde tüketilen yakıt cinsine bakıldığında, batı Avrupa ülkeleri % 80 - 95 oranında kömür kullanırken, Rusya % 90 oranında doğalgaz yakmaktadır.

Kabir vd. (2010) çalışmalarında, kuru yöntemle çimento üreten fabrikada; enerji taraması ve ısı işlemler (piroprosesler) sürecinde Enerji Verimliliği araştırması yapmışlardır. Bu tesiste, yıllık 8.784 saatlik sürede 640.809 ton klinker üretilmiş olup, Piroproseslerde fabrikanın toplam enerji tüketiminin % 95,48 değerine tekabül eden, 4164,02 kJ/kg. klinker enerji harcanmıştır. Sistemin termik verimi % 41 olmuştur. Bu değer modern işletmelerin % 50–54 arasındaki değerinden düşüktür. Sisteme giren ısının, fırın cidarlarından ve baca gazlarından kaybolan yüzdesi sırasıyla; % 11,97 ve % 27,9 olmuştur. Fabrikada enerji verimliliğini arttırmak için önerilen yöntemler olarak; atık ısı geri kazanım sisteminin kurulması ve fırın cidarlarının çift katlı yapılması çözümleri önerilmiştir. Bu çözümlerle sağlanacak enerji tasarrufu sırasıyla; 42,88 MWh/yıl ve 5,30 MW olarak hesaplanmıştır. Atık ısı geri kazanım sisteminin tesisinin kurulması ve çift cidarlı fırın çözümlerinin getirisi yıllık 2318,18 USD olmaktadır. Son olarak uygulamanın çevresel kazancı atmosfere %14.10 daha az sera gazı deşarjıdır.

Kolip vd. (2004) “Energy saving technology of cement manufacturing” adlı makalelerinde, paralel akışlı önısıtmalı siklon sisteminde madde balansı ile ilgili farklı matematik modeller uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda, istenen kalitede klinker üretmenin yolunun hassas ve doğru hammadde oranlarıyla mümkün olduğunu ortaya konulmuştur.

Koroneos vd. (2011) çalışmalarında Yunanistan'da; evsel ve endüstriyel amaçlı enerji ve ekserji araştırması yapmışlardır. Güvenilir veri temini düşüncesiyle 1990 – 2004 periyodu incelenmiştir. Evsel ve endüstriyel amaçlı enerji ve ekserji hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve sonuçları daha önce Yunan ulaştırma sektörü için yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. Evsel kullanımda 2003 yılı için enerji ve ekserji verimleri sırasıyla; % 22,36 ve % 20,9 olmuştur. Aynı yılda endüstriyel amaçlı enerji ve ekserji verimleri sırasıyla; % 53,72 ve % 51,34 çıkmıştır. Sonuçlara göre enerji ve ekserji verimliliği, ülkenin de ekonomik verimliliği anlamına gelmektedir ve bu yolda çözümler getirilmesi için ışık tutacağı vurgulanmıştır. Söğüt vd. (2010) Kuru tip çimento üretiminde farin değirmeninin termoeconomik analizini yapmışlardır. Değirmenin enerji ve ekserji verimleri sırasıyla ortalama; % 82,9 ve % 18,44

bulunmuştur. Farin çıkışı ürünün birim maliyeti de 0,00708 – 0,01078 \$ / kg arasında hesaplanmıştır. Farinin ekserjetik maliyetinin hesaplanmasında farin değirmeninin ekserji veriminin doğrudan etkisi olduğu görülmüş, Değirmenin ekserji veriminin yükseltilmesiyle farin işletme maliyetinin düşeceği anlaşılmıştır. Farin değirmeninde oluşan yüksek kayıpların giderilmesinde, değirmenin yapısal özelliklerini bozmayacak, kızgın yağ veya su akışkanlı serpantinli sistem gibi, enerji geri kazanım sistemleri kullanımı uygun olacağı belirtilmiştir.

Kolip ve Savaş (2008) çalışmalarında, “Dört Kademeli Paralel Akışlı ve Önısıtıcı Siklonlu bir Çimento Fabrikasında Kütle ve Enerji Denkliklerinin Matematik Modellenmesi” adı altında bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Bu programda; CaO, CaCO₃, MgCO₃ (veya MgO) ve diğer oksitler şeklinde göre sisteme giren dört bileşen kabul edilmiş, siklon kademelerinde dolanan; hammadde, baca tozu, döner fırın çıkışı ve siklon grubu kademelerinde; yanma ürünleri, su buharları ve kalsinasyondan açığa çıkan CO₂'den oluşan baca gazı kütlesi ve bütün kademelerde enerji denkliği yardımıyla sıcaklıklar hesaplanmıştır. Modelle göre; 1 kg klinker başına hesaplanan; tozsuz hammadde miktarı 1,47 kg, paralel siklon grubundan çıkan baca tozu miktarı 0,203 kg'dır. Her bir kademedeki reaksiyon enerjileri hesaplanmıştır. Çalışmayla sunulan model sayesinde, kullanılan çeşitli yakıtların ve hammaddeler gibi parametrelerin enerji ve kütle denkliklerine etkileri hem sistem bazında hem de tek tek üniteler bazında görülebilmektedir.

Utlu vd. (2006) çalışmalarında; hammadde hazırlama ve farin değirmeni çalışması işlemlerinde enerji ve ekserji analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla örnek alınan bir çimento fabrikasının gerçek verileri kullanılmış ve kapasitesi 82,9 ton/saat olan farin değirmeni incelenmiştir. Sonuçta ünitenin enerji ve ekserji verimliliğinin sırasıyla; % 84,3 ve % 25,2 olduğu bulunmuştur. Yapılacak Enerji Verimliliği iyileştirme çalışmalarında enerji ve ekserji verimliliği değerlerinin esas alınması gerekliliği vurgulanmıştır.

Sogut vd. (2009) çalışmalarında, ele alınan bir çimento fabrikasına ait farin değirmeni için enerji ve ekserji analizi yapmışlardır. Enerji ve ekserji verimliliklerinin sırayla; % 74 ve % 10,68 olduğu görülmüştür. Bu verimleri yükseltmek için; enerji geri kazanım sistemleri uygulanmasının gerekli olduğu belirtilmiş, bu uygulamayla enerji ve ekserji verimliliklerinin % 82 ve % 48'e yükselebileceği hesaplanmıştır. Masanet ve Worrell (2007) ENERGY STAR isimli bir enerji verimliliği programını çimento üretimine uygulamışlardır. Bu program US EPA destekli olup, fabrika yöneticilerine enerji verimliliğini arttırmak için bir rehber niteliği

taşımaktadır. ENERGY STAR programı fabrikaların Enerji Verimliliği faaliyetlerini; enerji yönetimi, motor sistemleri, basınçlı hava sistemleri, fırınlar, öğütme ve ufalama, prosesi değiştirme ve öne çıkan teknolojiler gibi başlıklar halinde değerlendirmektedir. Faaliyet çeşitlerinin enerji tüketimleri incelendiğinde, çimento fabrikasında en büyük elektriksel tüketimin % 80 ile motorların tahrikinde olduğu ve bunun ABD için yıllık 10.000 GW.h değerini aştığı belirlenmiştir. Sonuç olarak yapılması gerekli enerji tasarrufu faaliyetleri;

- ✓ Değirmenler çalışmadığı zaman basınçlı hava sistemleri ve toz toplayıcıların durdurulması,
- ✓ Kaçakların önlenmesi (bu çözüm her kaçak başına yıllık 30.000 \$ tasarruf sağlamaktadır.),
- ✓ Yardımcı sistem elamanlarının gereksiz hallerde “relanti çalışmasının” önlenmesi (fabrika başına yıllık 0,5 MW tasarruf sağlamaktadır.),
- ✓ Kullanılan basınçlı havanın 85 psi’den 65 psi’ye (5,86 bar’dan 4,48 bar’a) düşürülmesi ve basınçlı havanın lüzumsuz kullanımının önlenmesi,
- ✓ Daha verimli motorların kullanılması,
- ✓ V kayışlarının dişli kayışlarla değiştirilmesi ve
- ✓ Etkili bakım yönetim sistemi şeklinde sıralanmıştır.

Bohan (2008) araştırmasında son elli yılda çimento Enerji Verimliliği artırma çalışmalarını değerlendirmiştir. Araştırmaya göre, 1959 yılında 577 adet düşük verimli çimento fabrikası 56 milyon ton çimento üretirken, 2008 yılında 178 fabrika 91 milyon ton çimento üretmektedir. Bu dönemde sağlanan Enerji Verimliliği başarıları aşağıda verilmiştir:

- ✓ Üretime harcanan ortalama enerji 9,70 MBTU/klinker değerinden 4,375 MBTU/klinker değerine gerilemiştir.
- ✓ İşgücü verimliliği, işçi başına 0,714 ton.saat değerinden 2,97 ton.saat değerine yükselmiştir.
- ✓ Spesifik enerji tüketimi; yaş yöntem kullanan fabrikalarda 1,629 kcal/kg değerinden 1,200 kcal/kg’a ve kuru yöntem kullanan işletmelerde de 1,102 kcal/kg değerine inmiştir. Hatta günümüzde bunu 690 kcal/kg’a düşürmüş tesisler vardır. Bu başarılarla alternatif yakıt kullanımının rolü bulunmaktadır.
- ✓ Hava kirliliği kontrol sistemleri kullanımı da yaygınlaşmış, fabrikaların net değerlerinin % 20’si mertebelerine yükselmiştir. Fırınlarda “sıfır emisyon” çalışmaları devam etmektedir.

Murtishaw vd. (2006) çalışmalarında orta Amerika ülkelerinden Guatemala'da hem elektrik enerjisi, hem de çimento üretimi esnasında enerji tüketimi – CO₂ misyonları ilişkisini analiz etmişlerdir. Yönetmelikler enerji üretimi için 0.567 kgCO₂/kWh emisyon değeri koymuştur. İşletme anında bu değer, emisyonları 0,702 kgCO₂/kWh'den 0,507 kgCO₂/kWh değerine çekilmesiyle fazlasıyla sağlanmıştır. Buna paralel olarak, çimento fabrikalarında çimento üretimindeki CO₂ emisyonları ton başına 205 - 225 kg arasında değiştiği görülmüştür.

Worrell ve Galitsky (2004) US EPA destekli araştırmalarında; çimento üretiminde Enerji Verimliliği ve giderlerin azaltılma yöntemlerini etüt etmişlerdir. Kok ve linyitin ana yakıt olduğu sektörde, 1970'lerden itibaren doğalgaz ve atık lastikler de yakıt olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1970 -1999 döneminde çimento üretiminde spesifik enerji tüketimi yılda % 1 düşerek, 7,3 MBtu/short ton'dan 5,3 MBtu/short ton'a inmiştir. Aynı dönemde karbon emisyonu da % 16 düşerek, 0,31 tC/ton'dan 0,26 tC/ton'a azalmıştır. Enerji Verimliliğindeki bunca iyileştirmelere rağmen, ABD'de 1999 sonunda çimento fabrikalarının % 25'i hala yaş yöntem kullanmaktadır. Bunların kuru yönteme geçirilmesi “daha verimli üretim” için şarttır.

Sathaye (2011) çalışmasında, çimento üretiminde enerji tüketimi ve sera gazı azaltma yollarını araştırmıştır. Çözümler hem yaş, hem de kuru yöntem kullanan işletmeler için; Hammadde hazırlama, Yakıt hazırlama, Klinker üretimi, Son ürün işlemleri ve Genel tedbirler ana başlıkları altında toplanmıştır. Uygulanan tedbirlerle 2004 rakamlarına göre, % 27 enerji tasarrufu sağlamak mümkün olmuştur. Böylece yıllık % 19 Maliyet tasarrufu sağlanırken, yaş ve kuru yöntemler için karma değer, 2.8 MtC / yıl emisyon azaltımı olmuştur.

Hasanbeigi vd. (2010) çalışmasında Tayland çimento endüstrisini; enerji tüketimi ve emisyonlar açısından incelemiştir. 265 GWh harcayan çimento sektörü, ülke elektriksel tüketiminin % 8'ini oluşturmaktadır. 2005 yılı rakamlarına göre klinker / çimento oranı % 82 olan bu sektörde, yılda 20,6 milyon ton CO₂ çıkmakta, enerji yoğunluğu 3,11 GJ/ton.çimento iken, elektrik tüketimi de 94,3 kWh/ ton.çimento ve temel enerji yoğunluğu 4,09 GJ/ ton.çimento değerinde olmaktadır.Ülkede elektriksel tasarruf potansiyeli 1697 GWh olup, çimento üretiminde kullanılan enerjinin % 51'ine tekabül etmekte olup, buna paralel olarak CO₂ emisyonunda da 902 kiloton azalma sağlanacaktır. Maliyet etkin yakıt verimliliği iyileştirme imkânı 17.214 TJ ve toplam yakıt verimi iyileştirme imkânı da 21.202 TJ değerindedir. Enerji verimliliği artırılırken maliyet etkin CO₂ emisyonu azaltımı 2.229 kton ve toplam CO₂ azaltım imkânı da 2.603 kton değerindedir.

BÖLÜM 2

TERMODİNAMİK KAVRAMLAR

2.1 TERMODİNAMİĞİN BİRİNCİ KANUNU

Termodinamiğin birinci yasası enerjinin yoktan var edilemeyeceğini ve var olan bir enerjinin de yok olamayacağını, ancak enerji fiziksel veya kimyasal işlemlerle bir biçimden diğer bir biçime dönüşebileceğini söyler. Genel olarak enerjinin niceliğiyle yani miktarıyla alakalıdır. Enerjinin korunumu Eşitlik 2.1 de ifade edilmiştir. Burada ΔE_{sistem} sistemdeki enerji değişimini, E_2 sistemden çıkan enerjiyi, E_1 ise sisteme giren enerjiyi göstermektedir. Sistemin enerjisindeki değişim sistemin potansiyel, kinetik ve iç enerjisindeki değişimlerin toplamıdır. Bunu da Eşitlik 2.2 ile ifade edilebilir (Çengel ve Boles 2008; Çetinkaya 1999). Buradan iç enerji değişimi Eşitlik 2.3, kinetik enerji değişimi Eşitlik 2.4, potansiyel enerji değişimi Eşitlik 2.5 ile ifade edilebilir. Bu eşitliklerde m kütleyi, g yer çekimi ivmesini, u iç enerjiyi, V hızı, z de yüksekliği vermektedir. Bir sistem sınırından enerji ısı (Q), iş (W) veya kütle ($E_{kütle}$) olarak üç şekilde geçebilir. Bununla beraber enerjinin korunumu Eşitlik 2.6 ile ifade edilebilir (Çengel ve Boles 2008; Çetinkaya 1999).

$$\Delta E_{sistem} = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

$$\Delta E_{sistem} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (2.2)$$

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) \quad (2.3)$$

$$\Delta E_k = m(V_2^2 - V_1^2) / 2 \quad (2.4)$$

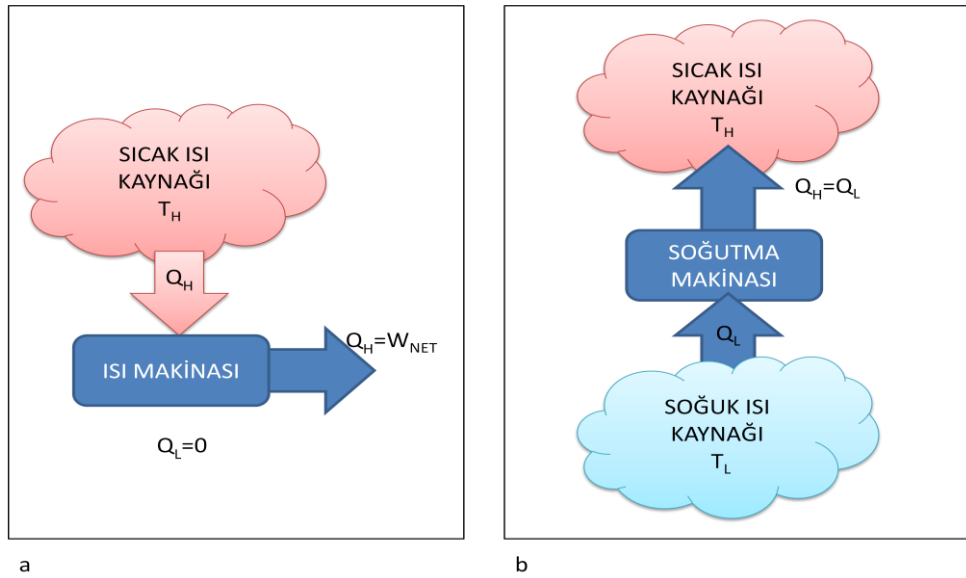
$$\Delta E_p = mg(z_2 - z_1) \quad (2.5)$$

$$\Delta E_{sistem} = E_2 - E_1 = (Q_2 - Q_1) + (W_2 - W_1) + (E_{kütle,2} - E_{kütle,1}) \quad (2.6)$$

2.2 TERMODİNAMIĞİN İKİNCİ KANUNU

Termodinamiğin birinci kanunu enerjinin niceliği üzerine durmaktadır. Termodinamiğin ikinci kanunu ise niceliğin yanında niteliğinin diğer bir deyişle kalitesinin de önemli olduğunu belirtir. Ayrıca Termodinamiğin ikinci kanunu bize doğada olan termodinamik olayların belirli bir yönde gerçekleşeceğini, ters yönde olamayacağını belirtir. Bir hal değişiminde hem birinci yasa hem de ikinci yasa gerçekleşir.

Termodinamiğin ikinci yasa değişik şekillerde ifade edilmiştir. Bunlardan Kelvin- Planck bildirisi; Bir ısı kaynağından ısı çekip de, buna eşit miktarda iş yapan ve başka hiçbir sonucu olmayan bir döngü elde etmek imkânsızdır. Başka bir deyişle hiçbir ısı makinesinin verimi % 100 değildir. Clausius Bildirisi ise; Soğuk bir cisimden sıcak bir cisme ısı akışı dışında bir etkisi olmayan bir işlem elde etmek imkânsızdır. Yani ısı enerjisi kendiliğinden soğuk bir ortamdan sıcak bir ortama akamaz. Bu bildirimlerden anladığımız kadarıyla daha basit bir ifade ile İşin tamamı ısıya dönüşebilir ama ısı yüzde yüz işe dönüşemez. Şekil 2.1’de İkinci yasanın Kelvin-Planck ve Clausius’un açıklaması verilmiştir (Çengel ve Boles 2008; Çetinkaya 1999).



Şekil 2.1 İkinci yasanın Kelvin-Planck açıklaması (a). Clausius’un ikinci yasa açıklaması (b).

Şekil 2.1 a ve b’deki gibi makine yapılamaz. Termodinamiğin ikinci yasanının Kelvin-Planck ve Clausius açıklamalarının kanıtlanması olanaksızdır. Bugüne kadar da, ikinci yasanın olamayacağını kanıtlayan bir deney yapılamamıştır ve bu da doğruluğunun kanıtı olarak kabul edilmektedir (Çengel ve Boles 2008; Çetinkaya 1999).

2.3 EKSERJİ VE TANIMI

Herhangi bir enerji kaynağı bulunduğu zaman ilk yapılan işlemlerden biri, kaynakta bulunan enerji miktarının yaklaşık olarak belirlemektir. Ancak sadece bu bilgi ile oraya bir güç santrali kurmaya karar vermek doğru değildir. Asıl karar verilmesi gereken kaynağın iş potansiyelini yani enerjinin ne kadarının yararlı işe dönüştürülebileceğinin bilinmesidir. Enerjinin işe dönüştürülemeyen bölümü, atık ısı olarak çevreye verileceğinden dolayı önem taşımayacaktır. Bu bakımdan belirli bir halde ve miktardaki enerjinin yararlı iş potansiyeli gibi bir özelliğın tanımlanması çok doğru olacaktır. Bu özelliğe ekserji yada kullanılabilirlik denebilir (Çengel ve Boles 2008).

Termodinamik bir sistemin sahip olduğı enerjinin yararlı bir işe dönüştürülebilen kısmına ekserji denir. Başka türlü ifade edilmesi gerekirse kullanılabilirlik ya da kullanılabilir enerji diye de tanımlanabilir. Enerjinin kullanılmayan kısmına ya da enerjinin diğeri enerji türlerine dönüştürülemeyen kısmına ise Anerji denir. Bu ifadelerden Eşitlik 2.7 ortaya çıkmaktadır. Ekserji harcadığı zaman yeniden kazanımı mümkün değildir. Ayrıca ekserji çevre ile bağımlı bir değışkendir. Çevre koşullarıyla denge halindeyken ise ekserji sıfırdır. Ekserji Termodinamiğın ikinci kanununun bir çıktısıdır.

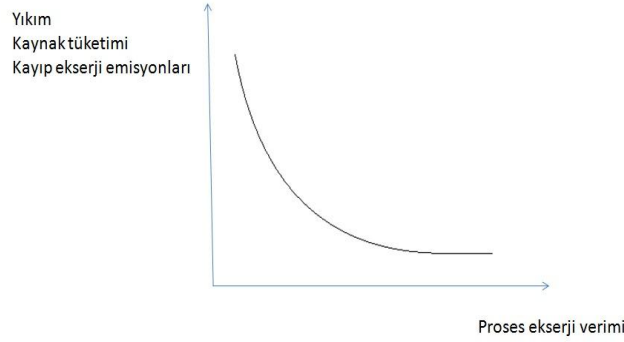
$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji} \quad (2.7)$$

Tablo 2.1 Enerji ve ekserji kavramlarının karşılaştırılması (Çengel vd. 2002).

ENERJİ	EKSERJİ
Sadece madde ya da enerji akış parametrelerine bağılıdır ve çevresel parametreler bağılı değildir.	Madde veya enerji akışı ve çevresel parametrelerin her ikisini de bağılıdır.
Sıfırdan farklı değıerleri vardır. (Einstein'ın bağıntısına göre mc^2 ye eşittir).	Çevreyle dengede iken yani ölü halde iken sıfırdır
Tüm prosesler için Termodinamiğın 1.yasasıyla gösterilir.	Sadece tersinir prosesler için termodinamiğın birinci yasasıyla gösterilir. (Tersinmez proseslerde kısmen veya tamamen yok olur).
Tüm prosesler için termodinamiğın 2. Yasasıyla sınırlıdır.(Tersinir olanlar da dahil).	Termodinamiğın 2. Yasası nedeniyle tersinir prosesler için sınırlı değildir.
Hareket ya da hareket üretme kabiliyetidir.	İş ya da iş üretme kabiliyetidir.
Bir proste her zaman korunur; vardan yok ve yoktan var edilemez.	Tersinir proseslerde her zaman korunur, ama tersinmez proseslerde her zaman tüketilir.
Miktarn (niceliğın) bir ölçüsüdür.	Niceliğın ve entropi nedeniyle niteliğın (kalitenin) bir ölçüsüdür.

2.4 EKSERJİNİN ÖNEMİ

Bugün dünyamızda birincil enerji kaynakları hızla tükenmekte olması ve alternatif enerji kaynaklarının kullanılması için kurulacak sistemlerinde ilk kurulum maliyetinin yüksek olması, öncelikle tasarruf yapılması gerektiği gerçeğini ortaya çıkarmaktadır. Termodinamik sistemlerde tasarruf yapılması ısı kayıplarının en aza indirilmesi ile mümkün olmaktadır. Isıl kayıpların tespit edilmesi ekserji kayıplarının hesaplanması ile mümkündür. Bu yüzden ekserji analizlerinin yapılması büyük önem kazanmaktadır. Ekserji kayıplarının azalması, yani ekserji veriminin artması halinde gerçekleşecek yıkım, kaynak tüketimi ve kayıp ekserji emisyonları ters orantılı olarak azaldığı Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Rosen ve Dinçer 1997).



Şekil 2.2 Bir proses de ekserji verimi ile yıkım, kaynak tüketimi ve kaybolan ekserji emisyonlarının arasındaki ilişki (Rosen ve Dinçer 1997).

Ekserjinin önemini maddeler halinde aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Dinçer 2002):

- ✓ Enerji kaynaklarının kullanımının çevreye olan etkilerinin belirlenmesinde önemli bir araçtır.
- ✓ Enerji sistemlerinin tasarımı ve analizi için termodinamiğin ikinci yasasıyla birlikte kütle ve enerjinin korunumu prensiplerini kullanan etkin bir yöntemdir.
- ✓ Kaynakların daha verimli kullanma amacını destekleyen uygun bir tekniktir. Belirlenmesi gereken atık ve kayıpların yerini, tipini ve gerçek miktarlarını ortaya çıkarır.
- ✓ Mevcut sistemin verimsizliklerini azaltarak, daha verimli sistemlerini tasarlanmanın nasıl mümkün olup olamayacağını gösteren etkin bir yöntemdir.
- ✓ Sürdürülebilir gelişmenin elde edilmesinde anahtar bir bileşendir.
- ✓ Enerji politikaların oluşturulmasında kullanılabilecek önemli bir araçtır. Şeklinde sıralanabilir.

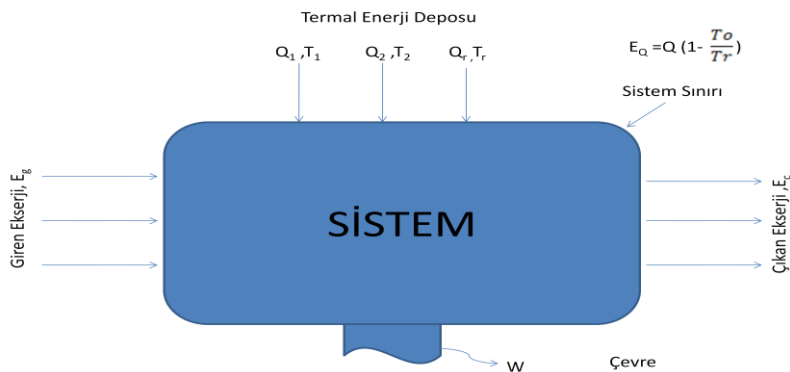
Ekserji, mühendislik biliminde iki temel konuyu kapsamaktadır. Bunlar çevre ve ekonomidir. Ekoteknolojik bakımdan ise ekserji, şu üç temel şekilde ele almaktadır

- ✓ En az çevresel etki, en fazla enerji ve enerji kaynaklarının ideal koşullarda işletileceği teknolojiler.
- ✓ Çevreyi kirletme potansiyelleri yüksek olan maddelerin çevresel davranışları.
- ✓ Çevresel değerlendirme, enerji ve toplum güvenliği.

Yukarıdaki temel ekserji konseptlerine bakarak ekserjinin termodinamik bir potansiyel olduğu, iş yapabilme ve kullanılabilir enerjinin bir ölçütü olduğu söylenebilir. Ekserji, aynı zamanda teknik iş yama kapasitesi olarak da tanımlanabilir. Ekserji sadece faydalı enerji düşüncesinden oluşmayan, aynı zamanda çevreyi kirleten enerji kaynaklarının tüketiminin azalması ve yeni çevre dostu enerji kaynaklarının kullanıma sunulması gibi konuları da kapsayan çok önemli bir mühendislik yaklaşımıdır (Çengel ve Boles 2008).

2.5 EKSERJİNİN ANALİZ METODLARI

Ekserji enerjinin niceliğinin yani kalitesinin bir ölçüsüdür. Termodinamiğin ikinci kanunu termal sistemlerin dizayn ve analizi için ekserji balansını inceler. Sürekli akış halindeki açık bir sistemdeki ekserji balansı şekil yardımı ile açıklanabilir (Apak 2007). Çevre tüm sistem için bir referans olarak göz önünde bulundurulur. Çevrenin parametreleri sistem referansı olarak alınmıştır ve 1988 yılında Szargut tarafından belirtilerek kullanılmıştır. Referans sıcaklığı $T_0 = 298,15$ ve referans basıncı $P_0 = 1$ atm'dir ve sistem değerleri aynı şekilde Kotas tarafından da kullanılmıştır (Wall ve Gong 2001). Şekil 2.3'de sürekli akış halindeki açık bir sistem gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Sürekli akış halindeki açık bir sistem (Hammache ve Shukuya 2002).

$$E_g + E_Q = E_\zeta + W + I \quad (2.8)$$

Eşitlik 2.8'deki E_g Eşitlik 2.9, E_ζ Eşitlik 2.10 ve E_Q ise Eşitlik 2.11'deki gösterilmiştir.

$$E_g = \sum m_g e_g = \sum m_g (h_g + \frac{1}{2} V_g^2 + g z_g) + Q \quad (2.9)$$

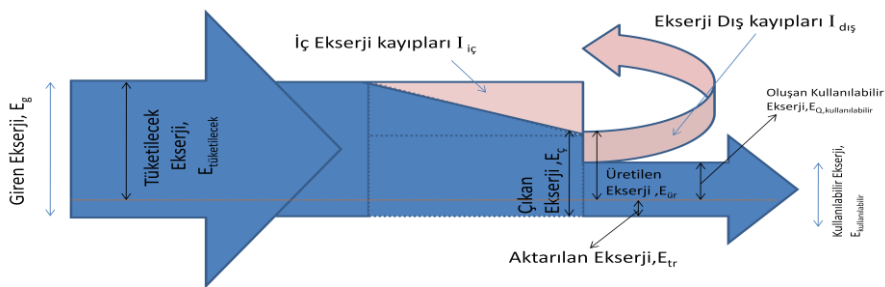
$$E_\zeta = \sum m_\zeta e_\zeta = \sum m_\zeta (h_\zeta + \frac{1}{2} V_\zeta^2 + g z_\zeta) + W \quad (2.10)$$

$$E_Q = \sum Q (1 - \frac{T_0}{T}) \quad (2.11)$$

Buradan Eşitlik 2.12 elde edilir.

$$E = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) + e_{kim} + \left(\frac{V_0^2}{2} \right) + g z_0 \quad (2.12)$$

Kontrol bölgesi girişindeki ekserji daima çıkıştaki ekserji den büyüktür. Aradaki fark ise ekserji kayıplarını oluşturur. Ekserji kayıpları ekserjinin kullanım oranı ile belirlenir. Ekserji kullanımı kayıplarının ayrıntılı gösterimi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Ekserji kullanım kayıpları (Hammache ve Shukuya 2002).

Aktarılan ekserji miktarı " E_{tr} ", oluşan kullanılabilir ekserji " E_{kul} " ve tüketilen ekserji " $E_{tüik}$ " şeklinde ifade edilmiştir. Ekserji geçişindeki oluşan kayıpların toplamı ($I_{iç} + I_{dış}$) kadardır. Ekserji transferi üç şekilde gerçekleşir bunlar; İş etkisi ile ekserji transferi, ısı etkisi ile ekserji transferi ve kütle akışı (madde akışı) ile ekserji transferi şeklindedir.

2.5.1 İş Etkisi İle Ekserji Transferi

Ekserji enerjinin kullanılabilir iş potansiyeldir. İş ile ekserji geçişi sınır işi için Eşitlik 2.13, iş ile ekserji geçişi, işin diğer şekilleri için ise Eşitlik 2.14'deki gibidir.

$$Ex_{i\dot{s}} = W - W_{\text{çevre}} \quad (2.13)$$

$$Ex_{i\dot{s}} = W \quad (2.14)$$

Eşitlik 2.13'deki $W_{\text{çevre}} = P_0(V_2 - V_1)$, P_0 atmosfer basıncı, V_2 ve V_1 ise sistemin ilk ve son hacimleridir. Böylece mil işi ve elektrik işi gibi, iş ile gerçekleşen ekserji geçişi işin kendisine eşittir. Piston silindir düzeneğinde olduğu gibi sınır işi içeren sistemlerde, genişleme sırasında pistonun izlediği yol üzerinde ve atmosfer koşullarında bulunan havanın itilmesi içinde ayrıca bir iş gerekir. Buda kullanılmayacak bir enerjidir. Bu sistemde iş yapılması için silindirin içindeki basıncın atmosfer basıncının üstüne çıkması gerekir (Çengel ve Boles 2008).

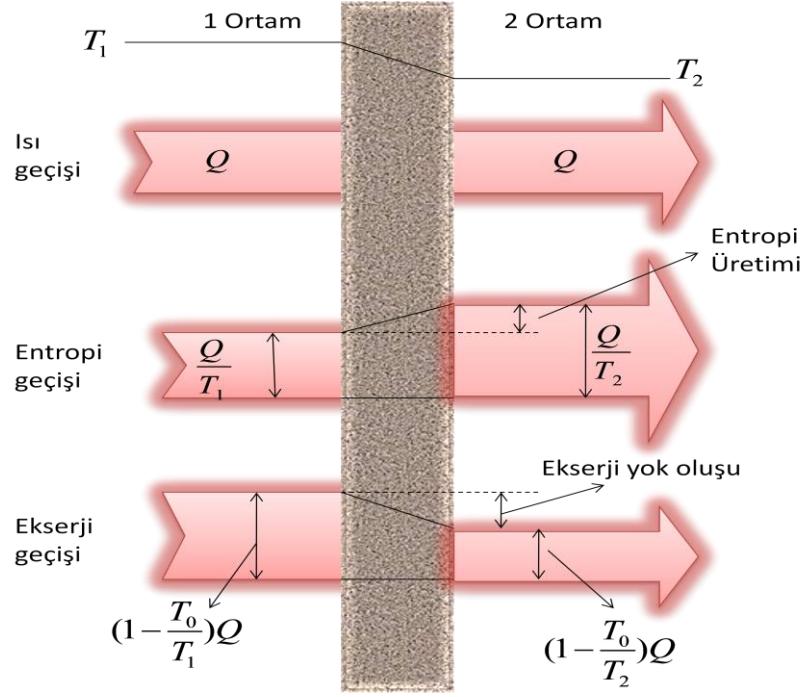
2.5.2 Isı Etkisi İle Ekserji Transferi

Isı enerjinin düzenli olamayan bir şeklidir ve bu yüzden ısının yalnızca bir kısmı işe dönüşebilir. İşe dönüşen bu kısmı ise artık enerjinin düzenli kısmıdır (İkinci yasa). Isıdan çevre sıcaklığının üstünde bir sıcaklıkta, kullanılmış ısıyı çevreye yayan bir ısı makinesine ısı geçirerek iş üretebiliriz. Isı ile ekserji geçişini ise Eşitlik 2.15 ile ifade edilir.

$$Ex_{\text{ısı}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q \quad (\text{kJ}) \quad (2.15)$$

Eşitlik 2.15'den anlaşılacağı gibi T sıcaklığı eğer T_0 'a eşit olursa ekserji sıfır olur çünkü herhangi bir ısı geçişi olmayacağından dolayı aradaki sıcaklık farkını işe çevirecek bir ısı makinesi çalıştırılmaz. Entropi üretimi her zaman ekserji yok oluşuna sebep olur. Bu da Şekil 2.5'de ifade edilmiştir. Eğer Isı geçişinin olduğu sınırdaki sıcaklık sabit değilse, ısı geçişiyle birlikte olan ekserji geçişi Eşitlik 2.16'deki gibi olur.

$$Ex_{\text{ısı}} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\delta Q \quad (2.16)$$



Şekil 2.5 Sonlu bir sıcaklık farkında gerçekleşen ısı geçişi işlemi sırasında ekserjinin geçişi ve yok oluşu (Çengel ve Boles 2008).

2.5.3 Madde Akışı İle Birleştirilmiş Ekserji

Bir sistemin enerjisi, ekserjisi ve entropisi kütlesiyle orantılıdır. Kütle akışı ile sistemden dışarı veya sisteme enerji, ekserji ve entropi transferi olur. Kütlesi m olan bir madde sisteme girdiğinde veya çıktığında sistemden $m\psi$ kadar bir ekserji değişimi olur. Burada “ ψ ” değeri Eşitlik 2.17 ile bulunur. Kütle ile ekserji geçişine karar verirken eğer akışkanın özellikleri değişkenlik gösteriyorsa o zaman da Eşitlik 2.18 kullanılır.

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (2.17)$$

$$\dot{E}x_{k\u00fctle} = \int \psi \rho V_n dA_c \text{ ve } Ex_{k\u00fctle} = \int_{\Delta t} \psi \delta m = \int_{\Delta t} \dot{E}x_{k\u00fctle} dt \quad (2.18)$$

Burada A_c akışkanın kesit alanı ve V_n ise dA_c için normal hızı verir. Adyabatik sistemlerde ısı ile ekserji geçişi ($X_{ısı}$) sıfırdır. Kapalı sistemlerde kütle ile ekserji geçişi ($X_{k\u00fctle}$) sıfırdır.

2.5.3.1 Fiziksel Ekserji

Termodinamik bir sistemin sıcaklık (T) ve basıncının (P), çevrenin sıcaklık (T_0) ve basıncında (P_0) denge haline gelirken sistemden elde edilen maksimum işe fiziksel ekserji denir. Kapalı sistemlerde fiziksel ekserji Eşitlik 2.19 ile hesaplanır. Herhangi iki durum arasındaki ekserji değişimi ise Eşitlik 2.20 ile hesaplanır. Sistem sınırından içeri veya dışarı kütle ile enerji akışı olan, yani açık sistemlerin ekserjisi Eşitlik 2.21 ile hesaplanır. Açık sistemlerde herhangi iki durum arasındaki enerji farkı ise Eşitlik 2.22 ile hesaplanır. İdeal gazdan oluşan bir termodinamik bir sistemin fiziksel ekserjisi Eşitlik 2.23 ile hesaplanır. Katı veya sıvıdan oluşan herhangi bir sistemin fiziksel ekserji Eşitlik 2.24 ile hesaplanır.

$$Ex_f = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (2.19)$$

$$\Delta Ex_f = (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S - S_0) + (E_{k,2} - E_{k,1}) + (E_{p,2} - E_{p,1}) \quad (2.20)$$

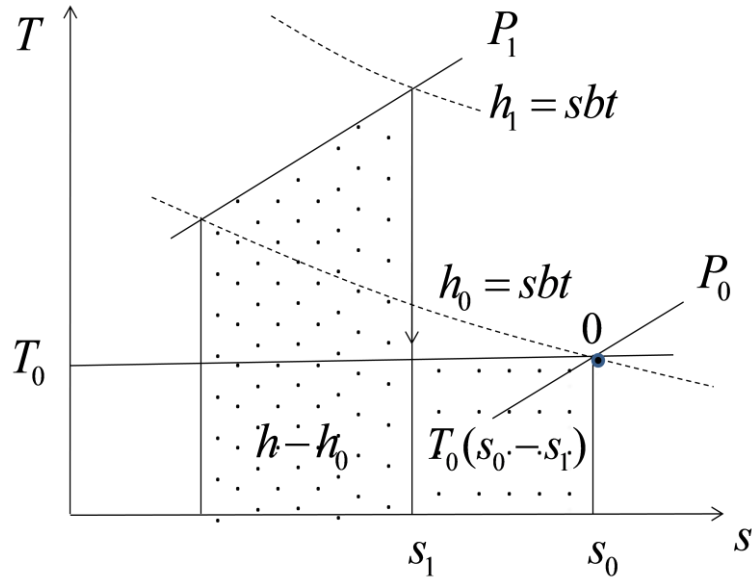
$$Ex_f = (H - H_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (2.21)$$

$$\Delta Ex_f = (H_2 - H_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S - S_0) + m \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1) \quad (2.22)$$

$$Ex_f = c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + RT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.23)$$

$$Ex_f = c_p \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] + v_m (P - P_0) \quad (2.24)$$

Herhangi bir sıcaklıkta ve basınçta bulunan sistemin ekserji farkının, sıcaklık ve entropi grafiği Szargut ve arkadaşları tarafından Şekil 2.6'daki gibi gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Herhangi bir sıcaklık ve basınçta bulunan sistemin ekserji farkı (Szargut vd. 1988).

2.5.3.2 Kimyasal Ekserji

Kimyasal ekserji; sistem çevre ile sıcaklık ve basınç bakımından dengeye ulaştıktan (yarı ölü hale geldikten) sonra, kimyasal dengeye ulaşırken (ölü hale geçerken) elde edilebilecek maksimum yararlı iş olarak tanımlanmaktadır. Daha açık bir şekilde çevre ile aynı sıcaklık ve basınca sahip olan bir sistemin kimyasal bileşiminin, çevre ile dengeye gelirken elde edilebilecek maksimum yararlı iş kimyasal ekserji olarak tanımlanmaktadır (Szargut vd. 1988). Standart kimyasal ekserji, T_0 sıcaklığında ve P_0 basıncındaki çevre koşullarının atmosferik şartlar standartlarında hesaplanmış değerlerdir. Atmosferik koşullar $T_0 = 298,15$ K ve $P_0 = 1$ atm'dir. Referans maddeler genellikle üç grupta toplanır.

- ✓ Atmosferdeki gaz bileşenleri,
- ✓ Litosferdeki katılar
- ✓ Deniz ve okyanuslardaki iyonik ve iyonik olmayan maddeler.

Gaz karışımlarının kimyasal ekserjilerinin bilinmesinin büyük önemi vardır zira çoğu termodinamik sistem gaz karışımından oluşmaktadır. Bu gaz karışımları yanma olaylarında ve kimyasal proseslerde özellikle kullanılmaktadır. Bu yüzden optimum yanma ve yüksek verimin tespiti için kimyasal ekserji yani ikinci yasa verimini bulmak büyük önem arz etmektedir (Topaç 2008).

Tablo 2.2 Bazı maddelerin standart kimyasal ekserjileri (Atalay 2004).

Madde	Faz	Mol Ağırlığı (kg/kmol)	Standart Kimyasal Ekserji (kJ/kmol)
Ag	Katı	107,8	73730
Al ₂ O ₃	Katı	101,9	204270
CO ₂	Gaz	44	20140
H ₂ O	Gaz	18	11710
H ₂ O	Sıvı	18	3120
CH ₄	Gaz	16	836510
C ₈ H ₁₈	Sıvı	114	5440030

Referans gazların kimyasal ekserjilerinin hesaplanmaları için atmosferin referans durumlarını, standart basınçta parçalardan elde edilen iş, referans durumların kısmi basıncı olarak tanımlanmaktadır. Bu durum Eşitlik 2.25 ile bulunur (Kotas 1985).

$$Ex_{kim} = RT_0 \ln \frac{P_0}{P_{00}} \quad (2.25)$$

Bu formül de R gaz sabitidir. Ünlversal gaz sabitinin, molekülün mol sayısına bölünmesi ile bulunur. P_{00} ise referans durumlarda karışımın içindeki molekülün kısmi basıncıdır. Referans olmayan saf bileşenlerin kimyasal ekserjisi Eşitlik 2.26 ile ifade edilir.

$$Ex_{kim} = -\Delta G_0 - \sum_i x_i Ex_{kim,i}^g + \sum_i x_i Ex_{kim,i}^f \quad (2.26)$$

Burada;

ΔG_0 =oluşumun Gibbs fonksiyonudur.

$Ex_{kim,i}^f$ =Ürünlerin standart kimyasal ekserjisi,

$Ex_{kim,i}^g$ =Reaktanların standart kimyasal ekserjisidir.

Karışımların kimyasal enerjisi ise Eşitlik 2.27 ile hesaplanabilir.

$$Ex_{kim,karışım} = m \left(\sum_i x_i ex_{kim,i} + RT_0 \sum_i x_i \ln x_i \right) \quad (2.27)$$

Burada $ex_{kim,i}$ özgül ekserji, x_i kütleli fraksiyon oranıdır. Yakıtların kimyasal ekserjileri yakıtı ihtiva eden bileşenlere bağlı olarak hesaplanmaktadır. Szargut vd. (1988); Yakıtın kimyasal ekserjisinin, yakıtın ısı değeri oranını ifade eden φ değerini geliştirmişlerdir. Buradan katı yakıtın kimyasal ekserjisi Eşitlik 2.28 ile ifade edilebilir.

$$Ex_{kim} = \varphi \cdot (H_u) \quad (2.28)$$

Burada H_u Net kalorifik değeri (NCV). Katı yakıtlar için O/C (oksijen/karbon) oranına bağlı hesaplamalar yapılmaktadır. Yakıtın bileşenlerinin kütle oranlarını içeren ifadeler bu orana göre değişmektedir. Eğer oksijenin karbona oranı 0,667 den düşük ise Eşitlik 2.29 ile hesaplanır.

$$\varphi = 1,0437 + 0,1882 \frac{h}{c} + 0,061 \frac{o}{c} + 0,0404 \frac{n}{c} \quad (2.29)$$

Burada “h” hidrojenin, “o” oksijenin ve “n” ise azotun kütleli oranıdır. Bu ifade kükürt ve su buharı ekserjileri dikkate alınmamaktadır. Eğer oksijenin karbona oranı 0,667 ile 2,67 değerleri arasında olması durumunda ise Eşitlik 2.30 ile hesaplanmaktadır.

$$\varphi = \frac{1,043841,882 \frac{h}{c} - 0,2509(1 + 0,7256 \frac{h}{c}) + 0,0383 \frac{n}{c}}{1 - 0,3035 \frac{o}{c}} \quad (2.30)$$

Eğer kükürt ve su buharı ekserjileri dikkate alınırsa, katı yakıtlar için kimyasal ekserji Eşitlik 2.31 ile hesaplanır.

$$Ex_{0,katı} = \varphi((H_u)_{katı} + w \cdot h_{fg}) + (x_{0,s} - (H_u)_s) s \quad (2.31)$$

Bu denklemden “w” suyun kütleli fraksiyonudur. h_{fg} ise suyun buharlaşma entalpisidir. Sıvı yakıtlar için kimyasal ekserji oranı (φ) ise kükürdün etkisi de dikkate alındığında Eşitlik 2.32’deki gibi hesaplanır. Burada belirtilen “s” entropi olmayıp, yakıt içerisindeki kükürt kütleli oranıdır (Tekel 2006). Sıvı yakıtların kimyasal ekserjisi Eşitlik 2.33 ile hesaplanır.

$$\varphi_{svi} = 1,0401 + 0,1728 \frac{h}{c} + 0,0432 \frac{o}{c} + 0,2169 \frac{s}{c} (1 - 2,0628 \frac{h}{c}) \quad (2.32)$$

$$Ex_{0,svi} = \varphi(H_u)_{svi} \quad (2.33)$$

Tablo 2.3 Bazı yakıtların kimyasal ekserjilerinin alt ve üst ısıl değere oranı (Atalay 2004).

Yakıt	Yakıttaki Kütle Oranı (%)				$\frac{\varphi}{H_a}$	$\frac{\varphi}{H_{ü}}$
	C	H ₂	N ₂ + S	O ₂		
Linyit	70	5	2	23	1,17	1,04
Kök	95	1	2	2	1,06	1,04
Fuel-oil	85	14	1	-	1,07	0,99

Gaz yakıtlarında kimyasal ekserji Eşitlik 2.34'deki gibidir. Yakıtın kimyasal ekserjisinin, ısıl değerine oranını ifade eden φ Eşitlik 2.35'deki gibidir. N_c ise moleküldeki ortalama karbon atomları sayısıdır.

$$Ex_{0,gaz} = \varphi(H_u)_{gaz} \quad (2.34)$$

$$\varphi_{gaz} = 1,0334 + 0,0183 \frac{h}{c} - 0,0693 \frac{1}{N_c} \quad (2.35)$$

2.5.4 Ölü Hal

Ölü hal sistemin çevresiyle termodinamik olarak dengede olması demektir. Termodinamik dengede ise sistemin basıncının ve sıcaklığının çevre basınç ve sıcaklığına eşit olması demektir. Çevre şartları atmosferik koşullarda ise; T_0, P_0 , değerleri $T_0 = 25^\circ C$ (298,15K) ve $P_0 = 1 \text{ atm}$ (101,325kPa) dir. Sıcaklık, basınç, entalpi, iç enerji ve entropi çevre koşullarında sırasıyla T_0, P_0, h_0, u_0 ve s_0 olarak gösterilir. Sistem termodinamik olarak çevresiyle dengede ise sistem herhangi bir iş yapamaz. Bu sebeple ekserjisi sıfırdır. Örneğin herhangi bir gazın bulunduğu bir piston silindir düzeneğindeki gazın ısıtılmasıyla enerji oluşur. Bu enerjinin işe dönüşmesi silindir içinde bulunan gazın dış basıncı aşmasıyla gerçekleşir. Eğer gazın basıncı çevre basınca eşit ise burada piston işi sıfır olur. Gazın sıcaklığı ise çevre sıcaklığına eşit ise, herhangi bir ısı değişimi de olmaz ve burada termodinamik denge durumu, yani ölü hal geçerli olur (Çengel ve Boles 2008).

2.5.5 Tersinmezlik (Ekserji Kaybı)

Sürtünme, karışım, kimyasal tepkimeler, sonlu bir sıcaklık aracılığıyla ısı geçişi, serbest genleşme, sanki dengeli olmayan sıkıştırma veya genleşme gibi tersinmezlikler entropi üretir. Entropi üreten herhangi bir şey ekserjiyi yok eder. Tersinir çevirimlerde ekserji yok oluşu sıfırdır. Yok olan ekserji aynı zamanda kullanılmayan ekserjidir. Ekserjinin kullanılmayan kısmına tersinmezlik de denir. Gerçek hal değişimlerinin hiçbiri tamamen tersinir değildir. Ekserjinin yok oluşu Eşitlik 2.36 ile ifade edilir (Çengel ve Boles 2008).

$$Ex_{yok\ oluşu} = T_0 S_{üretim} \geq 0 \quad (2.36)$$

2.5.5.1 Kısmi Olayından Gelen Ekserji Kaybı

Kısılma olaylarından sonra meydana gelen ekserji kayıpları aşağıda sıvılar için ve ideal gazlar için formülleri verilmiştir. Sıvılar için Eşitlik 2.37 ile hesaplanmaktadır. İdeal gazlar için ise Eşitlik 2.38 ile hesaplanır.

$$I_{kıs,sıvı} = \frac{T_0}{T} v dP \quad (2.37)$$

$$I_{kıs,sıvı} = nRT_0 \frac{P_1}{P_2} \quad (2.38)$$

2.5.5.2 Sürtünmeden Gelen Ekserji Kaybı

Herhangi bir termodinamik sistemde sürtünmeden dolayı enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür. Buda kullanılmayan bir enerjidir. Termodinamik analizlerde bazen ihmal edilebilmektedir. Ancak ihmal edilebilecek büyüklükte olmayan veya hassas hesaplama yapılması gereken analizlerde hesaba katılması gerekmektedir. Bu ekserji kaybı Eşitlik 2.39 ile hesaplanmaktadır.

$$I_{sürtünme} = Q_f \frac{T_0}{T} \quad (2.39)$$

2.5.5.3 Sonlu Sıcaklık Farkındaki Isı Transferindeki Ekserji Kaybı

İki sistem arasındaki sonlu sıcaklık farkından dolayı oluşan ısı transferi sonucu da ekserji kaybı oluşur. Burada ki ekserji farkı ise Eşitlik 2.40 ile ifade edilebilir.

$$I_{ssf} = Q \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right) T_0 \quad (2.40)$$

2.5.6 Ekserjinin Açık ve Kapalı Sistemler Açısından Ele Alınması

Kapalı sistemlere “kontrol kütlesi” kavramı geçerlidir ve bu sistemlerde kütle girişi ve çıkışı yoktur, ancak enerji girişi ve çıkışı vardır. Açık sistemlere de “kontrol hacmi” kavramı kullanılır. Bu sistemlerde ise kütle ve enerji giriş ve çıkışı olmaktadır. Açık veya kapalı sistemlerde yapılan gerçek iş enerjinin korunumu ile hesaplanabilir. Sistemin hacmi değişiyorsa, yapılan işin bir bölümü çevreye karşı yapılmaktadır. Bu durum Eşitlik 2.41 ile ifade edilir.

$$W_y = W_g - W_{\text{çevre}} = W_g - P_0(V_2 - V_1) \quad (2.41)$$

Burada $W_{\text{çevre}}$ sınır işidir. Eğer sistemin sınırları sabit ise yani hacim değişmiyor ise $W_{\text{çevre}}$ 'nin değeri sıfırdır. Tersinir iş W_{tr} ile yararlı iş W_y arasındaki fark hal sırsındaki tersinmezliklerden kaynaklanır. Tersinmezlik Eşitlik 2.42 ile ifade edilebilir. Buradan ikinci yasa verimi, iş üreten makineler için Eşitlik 2.43 ile ifade edilir. Soğutma makineleri, ısı pompaları gibi iş tüketen makineler içinde Eşitlik 2.44 kullanılır.

$$I = X_{\text{yok-olan}} = T_0 S_{\text{üretim}} = W_{tr, \text{çık}} - W_{y, \text{çık}} = W_{y, \text{gir}} - W_{tr, \text{gir}} \quad (2.42)$$

$$\eta_u = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th, tr}} = \frac{W_y}{W_{tr}} \quad (2.43)$$

$$\eta_u = \frac{COP}{COP_{tr}} = \frac{W_{tr}}{W_y} \quad (2.44)$$

Kapalı sistemlerin ekserjisi (ϕ) ise Eşitlik 2.45 ile ifade edilir. Açık sistemlerde yani kütle ve enerji akışı olan sistemlerin ekserjileri ise Eşitlik 2.46 ile ifade edilir. Düzgün akışlı dengeli açık sistemlerde ise Eşitlik 2.47 ile ifade edilir. Eğer T_0 sıcaklığındaki ortamla Q_k miktarında ısı geçişi olduğu kabul edilir ise Eşitlik 2.48'deki biçimi alır.

$$\phi = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (2.45)$$

$$\psi = (H - H_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (2.46)$$

$$\dot{W}_{ir} = \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\varphi \psi_\varphi + (\phi_1 - \phi_2) \quad (2.47)$$

$$\dot{W}_{ir} = \sum \dot{m}_g \psi_g - \sum \dot{m}_\varphi \psi_\varphi + (\phi_1 - \phi_2) - \sum_{k=1}^K Q_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \quad (2.48)$$

2.5.7 Ekserji Verimliliği

Sabit durumlar için ekserji verimliliğinin üç tanımı vardır. Bunlardan biri toplam çıkış ekserji akışının toplam giren ekserji akışına oranıdır. Ekserji verimliliğinin ikinci formu rasyonel verimlilik olarak adlandırılır (Kotas 1995). İstenilen ekserji çıkışının kullanılan ekserjiye oranıdır. Son ekserji verimliliği ise Kostanka tarafından açıklanmış ve Brodyansky tarafından geliştirilmiştir (Sorin vd. 1994).

Bu form toplam çıkan ekserji akışının ekserjinin dönüştürülemeyen parçalardan çıkarılmasının toplam giren ekserji akışının ekserjinin dönüştürülemeyen parçalarından çıkarılmasına oranıdır (Wall ve Gong 2001). İkinci yasa verimi olan ekserji verimliliği iş üreten ve iş tüketen makineler göz önüne alınarak tanımlanmıştır ve bu amaca yönelik olmayan hal değişimlerini de kapsayacak daha genel bir ikinci yasa veriminin tanımlanmasına gerek vardır. Fakat üzerinde görüş birliği sağlanmış genel bir ikinci yasa verimi yoktur (Çengel ve Boles 2008). Ekserji verimliliği verilen bir fabrikadaki farklı proseslerin performansları ya da ne kadar yararlı oldukları karşılaştırılabilir.

2.5.7.1 Basit Verimlilik

İkinci yasa verimini hesaplariken ilk yapılacak işlem hal değişimi sırasında ne kadar ekserjini veya iş potansiyelinin tüketildiğini hesaplamaktır. Basit verimlilik fabrikaların tüm proseslerinde ve ünitelerinde kullanılabilir ve şu şekilde tanımlanmaktadır. Bu eşitlikte Ex_{ζ} toplam çıkış ekserjisi, Ex_g ise giren toplam ekserjidir. Bu ifade Eşitlik 2.49'da verilmiştir.

$$\eta_u = \frac{Ex_{\zeta}}{Ex_g} \quad (2.49)$$

2.5.7.2 Rasyonel Verimlilik

İstenilen ekserji çıkışının kullanılan ekserjiye oranı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Kotas 1995). Bu denklemde ise Ex_r sistemden transfer edilen ekserjinin toplamıdır. Ex_y ise proses için gerekli olan ekserji girişi olarak tanımlanmaktadır. Rasyonel verimlilik her sistem için kullanılabilir. Çünkü elde edilemeyen üretim bu yolla belirlenebilir. Rasyonel verimlilik Eşitlik 2.50 ile ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{Ex_r}{Ex_y} = 1 - \frac{I}{Ex_y} \quad (2.50)$$

2.5.7.3 Geçişli Ekserji İle Verimlilik

Bu verimlilik ise Kostenko tarafından açıklanmıştır ve Brodyansky, Sorin ve Lee Goff tarafından daha da geliştirilmiştir. Basit formun üzerinde bir gelişmedir. Aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (J Wall ve Gong 2001; G Wall 1987). Burada Ex_r geçişli ekserjidir. 1994 yılında Sorin tarafından açıklanmıştır. Geçişli ekserjinin toplam miktarı proseslerin termodinamik verimliliğinde etkin değildir ve ekserji akışlarından çıkartılmaktadır. Geçişli ekserji ile verimlilik Eşitlik 2.51 ile ifade edilebilir.

$$\eta_u = \frac{Ex_{\zeta} - Ex_r}{Ex_g - Ex_r} \quad (2.51)$$

BÖLÜM 3

ÇİMENTO FABRİKASININ ENERJİ KONTROLÜ

3.1 ENERJİ VERİMLİLİĞİ MEVZUATI

Enerji tüketimi verimliliğinin artırılması amacıyla, enerji tüketimi 2.000 Ton eşdeğer petrol (TEP)'e eşit ve ya büyük olan tüm fabrikalar, sanayi kuruluşlarının enerji tüketiminde verimliliğin artırılması için alacakları önlemler hakkında yönetmeliğin yürürlüğe girmesinden itibaren 6 ay ile 1 yıl içerisinde Tablo 3.1'de gösterilen TEP değerlere göre, A kategorisinde gösterilen miktarda ve üzerinde enerji tüketen fabrikalar bir Enerji yöneticisi koordinatörlüğünde Enerji Kontrol Birimi oluşturmalıdırlar, B kategorisinde yer alan fabrikalar ise bir Enerji Yöneticisi görevlendirmelidirler (ETKB 1995).

Fabrikada enerji yönetiminden sorumlu olan kişiler enerji yöneticisi eğitimini alıp Enerji yöneticisi sertifikasına sahip olması gerekir. Çimento fabrikası da enerji yönetiminden sorumlu bir Elektrik mühendisine sahiptir ve iyileştirme çalışmalarına devam etmektedir.

Tablo 3.1 Sanayi enerji kontrol birimi ve enerji yöneticisi şartları fabrika TEP değerleri.

SEKTÖR	A	B
ALT SEKTÖR	ENERJİ KONTROL BİRİMİ	ENERJİ YÖNETİCİSİ
METAL ANA SANAYİİ		
Demir Çelik Sanayii	> 50 000 TEP	50 000 - 2 000 TEP
Alüminyum Sanayii	> 200 000 TEP	200 000 - 2 000 TEP
Bakır Sanayii		≥ 2 000 TEP
Diğer Metal Sanayii	> 20 000 TEP	20 000 - 2 000 TEP
TOPRAK ANA SANAYİİ		
Çimento Sanayii	> 50 000 TEP	50 000 -10 000 TEP
Cam Sanayii	> 20 000 TEP	20 000 - 2 000 TEP
Tuğla Kiremit Sanayii		≥ 2 000 TEP
Seramik Sanayii	> 30 000 TEP	30 000 - 2 000 TEP
Diğer Topraktan Mamul Madde Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP

Tablo 3.1 (devam ediyor).

KİMYA ANA SANAYİİ		
Kimyasal Gübre Sanayii	> 15 000 TEP	15 000 - 2 000 TEP
Petrokimya Sanayii	> 400 000 TEP	
Ana Kimyasal Maddeler Üretim Sanayii	> 15 000 TEP	
Lastik Sanayii		≥ 2 000 TEP
İlaç Sanayii		≥ 2 000 TEP
Temizlik Maddeleri Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP
Boya, Vernik ve Lak Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP
Diğer Kimyasal Maddeler Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP
GIDA ANA SANAYİİ		
Şeker Üretimi ve Tasfiyesi	> 40 000 TEP	40 000 - 2 000 TEP
Bitkisel ve Hayvansal Yağ Üretimi Sanayii	> 20 000 TEP	20 000 - 2 000 TEP
İçki Üretimi Sanayii		≥ 2 000 TEP
Çay Üretimi Sanayii		≥ 2 000 TEP
Un ve Unlu Mamuller Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP
Süt ve Sütten Mamul Maddeler Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP
Diğer Gıda Maddeleri Sanayii		≥ 2 000 TEP
TEKSTİL ANA SANAYİİ		
İplik Dokuma ve Basma Sanayii	> 20 000 TEP	20 000 - 2 000 TEP
Halı ve Kilim Sanayii		≥ 2 000 TEP
Örme ve Konfeksiyon Sanayii		≥ 2 000 TEP
Diğer Tekstil Sanayii	> 50 000 TEP	50 000 - 2 000 TEP
KAĞIT ANA SANAYİİ		
Kağıt ve Selüloz Üretim Sanayii	> 40 000 TEP	40 000 - 2 000 TEP
Karton ve Mukavva Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP
METAL EŞYA ANA SANAYİİ		
Otomotiv Yan Sanayii		≥ 2 000 TEP
Makine İmalat Sanayii		≥ 2 000 TEP
Otomotiv Sanayii	> 50 000 TEP	50 000 - 2 000 TEP
Dayanıklı Tüketim Malları Üretim Sanayii		≥ 2 000 TEP
Diğer Metal Eşya İmalat Sanayii		≥ 2 000 TEP
ORMAN ANA SANAYİİ		
Ağaç Sanayii		≥ 2 000 TEP

3.2 ÇİMENTO FABRİKASININ FAALİYET ALANI

Çimento fabrikası Klinker, CEM I 42,5R Portland Çimento, CEM II/B-M(P-L) 32,5N Portland Kompoze Çimento, CEM II/A-M(P-L) 42,5R ve N Portland Kompoze Çimento, CEM IV/B-P 32,5R Puzolanik Çimento ürün çeşitleri bulunmaktadır. Bunlardan sürekli üretimde olanlar CEM I 42,5R, CEM II/B-M(P-L) 32,5N'dir. Diğer ürünlerde isteğe bağlı olarak üretilmektedir (BarÇim 2010). Klinker ayrıca satılmasına rağmen çimento üretiminde de çimentoya giren hammaddeler arasında bulunmaktadır. Tablo 3.2'de fabrikada üretilen klinker ve çimentonun yıllık toplam üretim miktarını göstermektedir.

Tablo 3.2 Çimento fabrikasının faaliyet alanı ve 2010 yılı üretim miktarları (BarÇim 2010).

Üretim cinsi	Üretim miktarı(Ton)
CEM I 42,5R Portland Çimento	158.957
CEM II/B-M(P-L)32,5N Portland Kompoze Çimento	143.739
CEM II/A-M(P-L)42,5R ve N Portland Kompoze Çimento	27
Toplam çimento	302.723
KLİNKER	232.700
Toplam üretim	535.423

3.3 ENERJİ TARAMASI AŞAMALARI

Enerji taraması yapılması için ilk aşamada enerji tüketimi ve üretim verilerinin toplanır. Ancak öncelikli olarak hangi enerji türleri değerlendirileceği tespit edilmelidir. Daha sonra belirli periyot ile veriler alınmalı, ölçüm süresi belirlenmeli, aylık olarak alınacaksa en az 1 yıllık veriler alınmalıdır.

Ayrıca işletmede her bir proses veya sistem için standart ve hedef değerlerde belirlenmelidir. Bunlardan sonra performansın belirlenmesi için verilerin birbirleriyle düzenli olarak karşılaştırılmalıdır. Bu karşılaştırma spesifik enerji tüketimi (SET) ile yapılabilir. Bu değer birim ürün başına düşen enerji olarak tanımlanabilir. SET değerinin büyümesi fabrikanın performansın azalmanın göstergesidir. Enerji raporlarında gerçek, standart ve hedef SET değerleri verilir. Bu değerler spesifik gerçek değerine bölünerek hesap edilirler. Bu değerleri azaltmak için yapılacak tedbirler araştırılmalıdır.

3.4 ÇİMENTO FABRİKASI ENERJİ TÜKETİM VERİLERİ

Öncelikle sistemde hangi enerji türlerinin değerlendirileceği belirlenmelidir. Bu enerjiler elektrik ve kömür olarak tespit edilmiştir. Bunlar klinker ve çimento üretim proseslerinde kullanılan 2010 yılı enerji tüketimleri Tablo 3.4’de verilmiştir. Fabrikada elektrik, yerli taş kömürü ve ithal linyit kömürü kullanılmaktadır. Kullanılan bu kömürler karıştırılarak klinker üretimine kullanılmaktadır.

Çimento fabrikası elektrik fiyatının en uygun olduğu sanayide çift terimli tarifeyi kullanmaktadır. Puant saatlerde (17:00 - 22:00) kullanımdan kaçınmakta, bununla birlikte puant tarifenin dörtte biri maliyette olan gece tarifesinde de kullanıma yoğunluk verilmektedir. Ancak Döner fırın sürekli çalışan bir sistem olduğu için bu proses hem gündüz, hem puant hem de gece tarifesinde enerji harcamaktadır. Fabrika 24 saat çalıştığında kullandığı elektrik enerjisi maliyeti ortalama olarak 13,8 kr/kWh'dir. Daha öncede belirtildiği gibi fabrika puant tarifede enerji kullanmaktan kaçındığı için elektrik enerjisi maliyeti 12 kr/kWh'e düşmektedir. Fabrikada elektriğe harcanan enerji hesaplanırken, birim enerji maliyeti için 12 kr/kWh alınacaktır (BarÇim 2010). Tablo 3.3’de TEDAŞ’dan alınan, sanayide kullanılan elektriğin maliyet değerleri verilmiştir.

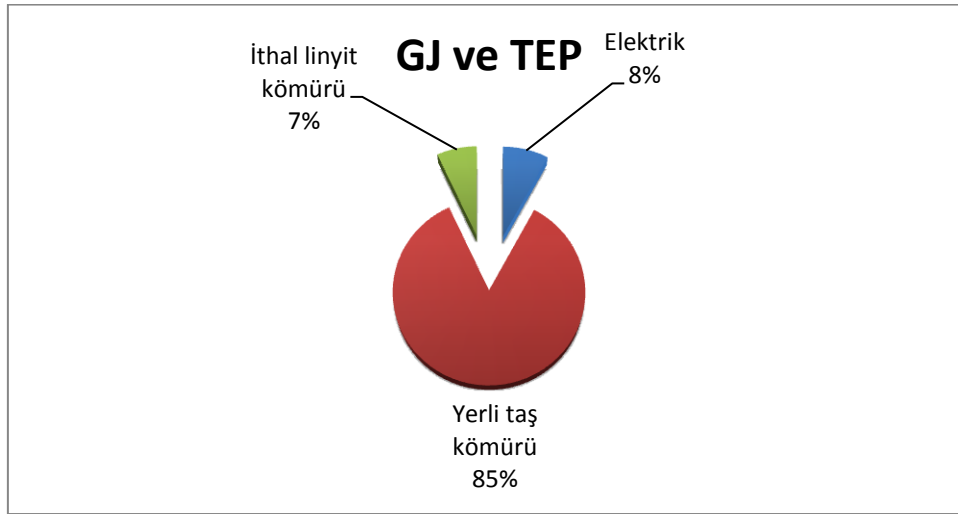
Tablo 3.3 Elektrik birim fiyatları TEDAŞ geneli 2010 yılı tarifesi (URL-8).

Sanayi	Tek Zamanlı (kr/kWh)	Gündüz (kr/kWh)	Puant (kr/kWh)	Gece (kr/kWh)
Saat		06:00-17:00	17:00-22:00	22:00-06:00
Çift Terimli Tarife	14,390	14,289	25,638	6,128
Tek Terimli Tarife	16,990	16,890	28,226	8,738

Tablo 3.4’de kömürlerin kalorileri için karışım ve nem alınmadan önceki değerler alınmıştır. Ancak sistemlere giren enerjiler hesaplanırken nem alındıktan sonraki değer olan 6627 kcal/kg alınacaktır. Tüketim değerleri fabrikadan alınmıştır. Fabrika kömür tüketiminde yerli taş kömürü ve ithal linyit kullanılmaktadır. Tablo 3.5’de gösterildiği gibi yerli taş kömürü ortalama ısıl değeri 5.801 kcal/kg, ithal linyit kömürünün ortalama ısıl değeri 5.857 kcal/kg dir. Ancak fabrikada kullanılan kömür, ithal linyit ve yerli taş kömürü karıştırılarak oluşturulmaktadır. Bu kömür karışımının ısıl değeri içindeki nemin alınmasından sonra 6627 kcal/kg değerlerine ulaşmaktadır. Fabrika tarafından hesaplanan TEP değerinde kömürün kalori değerleri nem alınmadan ve karışmadan önceki değerleri alınmıştır (BarÇim 2010).

Tablo 3.4 Çimento fabrikasının GJ ve TEP cinsinden enerji tüketim değerleri.

TÜKETİLEN ENERJİ			ENERJİ MİKTARLARI					
Cinsi	Miktarı	Birimi	ort. ısıl değ.	Birimi	GJ değeri	(%)	TEP DEĞERİ	(%)
Elektrik	29.849.400	kWh	860	kcal/kWh	107.457,84	8	2567	8
Yerli Taş kömürü	48.665	Ton	5.801	kcal/kg	1.182.018	86	28232	86
İthal linyit kömürü	3.692	Ton	5.857		90.536	7	2162,4	7
Toplam					1.380.011,87		32.961,5	



Şekil 3.1 Fabrikanın enerji tüketim değerlerinin GJ ve TEP cinsinden oranı.

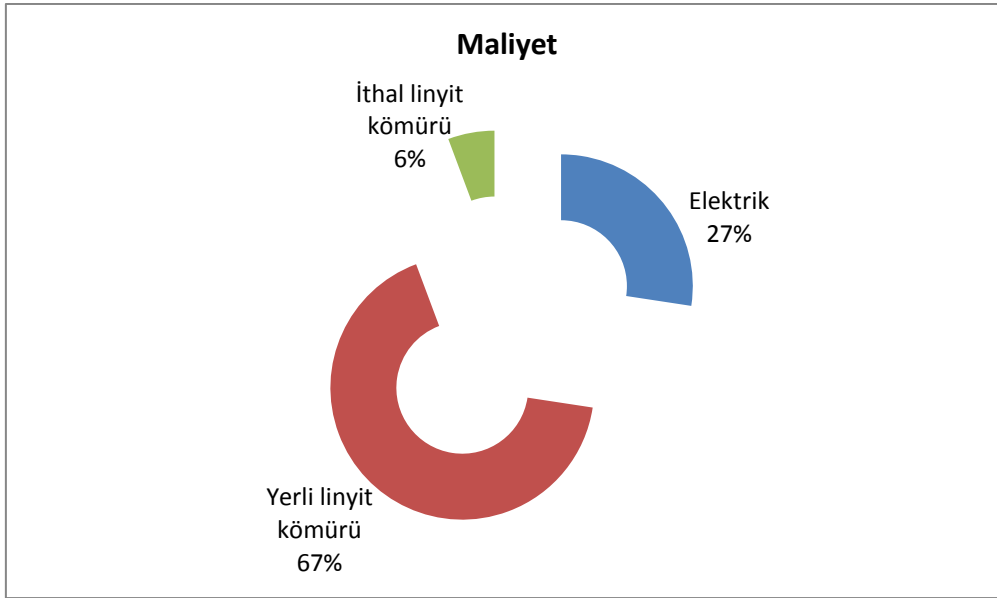
Tablo 3.5’de çimento fabrikasındaki enerji tüketimlerinin GJ ve TEP olarak hesaplanmıştır. Burada toplam fabrikanın tükettiği enerji toplam 32.961,5 TEP çıkmıştır. Buda Tablo 3.1’de verilen Sanayi enerji kontrol birimi ve enerji yöneticisi şartları fabrika TEP değerlerinden, Çimento üretimi için B kategorisine giren bir fabrikadır. Bu sebepten dolayı yalnızca Enerji yöneticisi görevlendirilmesi yeterli olacaktır.

Şekil 3.1’de görüleceği gibi fabrikanın genel enerji tüketiminin % 8’u elektrik, % 7 ithal linyit kömürü, % 85’i de yerli taş kömüründendir. Balıkesir Çimento fabrikasında bu oranlar % 55’i Yerli kömür, % 26 Petrokok ve % 19’u da elektrik tüketimidir (Söğüt 2005). Üretim değerleri tonaj olarak yaklaşık olmasına rağmen, Bartın çimento fabrikasında enerji tüketimindeki yerli kömürün oranının yüksek çıkması, ilk bakışta bu fabrikanın yaş tip üretim yapan bir fabrika olmasından kaynaklandığı kanaatini doğrulamaktadır. Ancak bu değerlendirme yapılırken daha hassas sonuçların elde edilmesi için kullanılan her bir yakıtın kalori değerleri de hesaba katılarak değerlendirilmesi lazımdır. Tablo 3.5’de fabrika maliyetleri verilmiştir.

Tablo 3.5 Çimento fabrikasının enerji tüketim maliyeti.

TÜKETİLEN ENERJİ			ENERJİ MİKTARI			
Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı	Birimi	Maliyet (TL)	(%)
Elektrik	29.849.400	kWh	12	kr/kWh	3.581.928	27,4
Yerli taş kömürü	48.665	ton	18	kr/kg	8.759.700	66,9
İthal linyit kömürü	3.692	ton	20,2	kr/kg	745.784	5,7
TOPLAM					13.087.412	

Burada elektriğe düşen yüzdenin artmasının sebebi elektriğin pahalı olmasındandır. Fabrika yaş üretim yapan bir fabrika olduğu için maliyet değerleri kuru üretim yapan bir fabrikanın iki katına yaklaşmaktadır. Bu yüzden fabrika kuru üretime geçmektedir. Bu hem fabrikanın ton başına düşen maliyet değerini azaltacak, hem de ülkeye enerji kazancı sağlayacaktır. Şekil 3.2’de fabrikanın enerji tüketim maliyeti yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 3.2 Fabrikasının enerji tüketim maliyeti oranları.

Tablo 3.6’da çimento fabrikasının enerji tüketimi ve CO2 emisyonları verilmektedir. Bu veriler Çimento fabrikası enerji yöneticisinin hesapladığı değerlerdir. Bu tabloda verilen TEP değeri ile Tablo 3.4’deki değerler arasında oluşan farkın sebebi, Tablo 3.4’de verilen kömürlerin kalori değerleri bir yıl için alınan ortalama kalori değeri olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 3.6’da fabrikanın CO2 emisyonu ton olarak verilmiştir.

Tablo 3.6 Çimento fabrikasının enerji tüketimi ve CO₂ emisyonu ton olarak (BarÇim 2010).

YIL	Toplam Elektrik Enerjisi (kWh)	Elektrik Enerjisi	Yakıt Enerjisi	Toplam Enerji	CO ₂ Emisyonu (ton)			
		TEP	TEP	TEP	Yakıt Kaynaklı	Kalsinasyon Kaynaklı	Elektrik Enerjisi Kaynaklı	Toplam
2007	31.311.302	2.693	35.001	37.694		121884	16.438	
2008	29.043.000	2.497	34.333	36.830	137.968	120.913	15.248	274.129
2009	31.202.199	2.693	40.083	42.776	160.598	131.885	16.381	308.864
2010	29.849.400	2.567	30.587	33.154	122.915	137.839	15.671	276.425

3.4.1 Çimento Fabrikasının Üretim ve Enerji Tüketim Verileri Dağılımı

Çimento fabrikasının 2010 yılında üretilen çimento ve klinkerin her ay için tonaj gösterimi Tablo 3.7’de gösterilmektedir. 2010 yılının Nisan ayında 50.431 ton ile çimento üretimi en fazla, Şubat ayında ise 11.406 ton ile en az çimento üretimi olmuştur. Şubat ayında üretimin az olmasının sebebi, o ay fabrikada revizyon yapılmasından kaynaklanmaktadır. Klinker ise 21.925 ton ile Ekim ayında en fazla, 4.017 ton ile ise Şubat ayında en az üretim olmuştur.

Tablo 3.7 Çimento fabrikasının 2010 yılı aylık çimento ve klinker üretimi (BarÇim 2010).

Sıra No	Aylar	CEM I 42,5 R (ton)	CEM II B-M (P-L) 32,5 (ton)	CEM II A-M(P-L) 42,5 (ton)	Klinker (ton)
1	Ocak	16.660	3.428	0	20.273
2	Şubat	8.162	3.244	0	4.017
3	Mart	18.849	8.236	0	19.831
4	Nisan	38.914	11.517	0	20.658
5	Mayıs	12.354	13.467	0	21.206
6	Haziran	9.282	14.387	0	20.793
7	Temmuz	10.183	21.289	0	19.666
8	Ağustos	9.135	13.693	0	21.248
9	Eylül	7.892	12.717	0	21.816
10	Ekim	8.176	14.650	27	21.925
11	Kasım	8.989	12.547	0	19.710
12	Aralık	10.361	14.564	0	21.557
Toplam		158.957	143.739	27	232.700

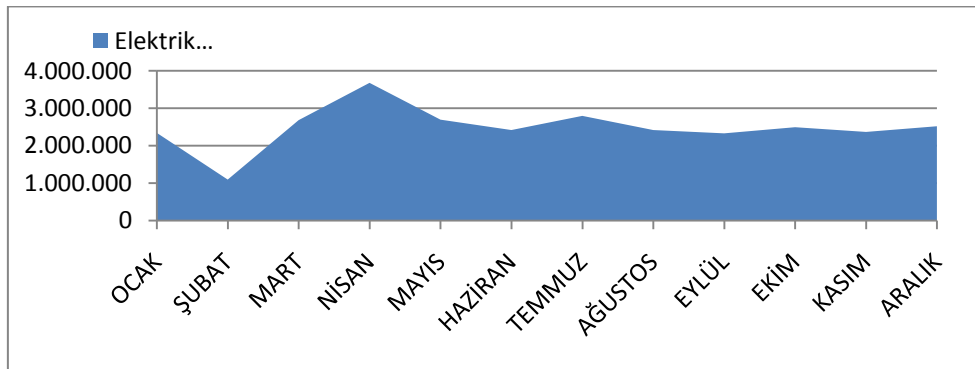
Fabrikanın genel enerji tüketiminde kayıp ve diğer harcama yüzdesi en fazla olan ay % 13,9 ile Şubat ayıdır. Kayıplar ve diğer enerji giderleri tüketimle tam olarak doğru orantılı değildir. Üretimin en fazla olduğu Nisan ayında tüketilen enerji 3.418.569 kWh olmasına rağmen, kayıplara ve diğer harcamalara 260.631 kWh enerji harcanmıştır. Bu açıdan Mart ayına bakıldığında 2.432.352 kWh enerji harcanmış, 251.448 kWh enerji kayıplara ve diğer harcamalara gitmiştir. Bu da kayıplar ve diğer harcamalara giden enerjinin üretime harcanan

enerjiyle doğru orantılı olmadığını göstermektedir. Üretim miktarı yüksek olan aylarda verimi yüksektir. Elektrik enerjisi tüketiminin en fazla olduğu ay olan Nisan ayında 13.245.120 MJ veya 316 TEP enerji harcanmıştır. En az olduğu ay olan Şubat ta ise 3.946.320 MJ veya 94 TEP enerji harcanmıştır. Tablo 3.8’de ise fabrikanın 2010 yılında harcadığı elektrik enerjisi verilmiştir.

Tablo 3.8 Fabrikanın 2010 yılında harcadığı elektrik enerjisi.

No	Aylar	Çimento için toplam enerji giderleri (kWh)	Kayıp ve Diğer enerji giderleri (kWh)	Üretimdeki Toplam Tüketim Miktarı (kWh)	Toplam Enerji miktarı (MJ)	Toplam Enerji miktarı (TEP)	Enerji kayıp ve diğer harcama yüzdesi	Maliyet (TL)
1	Ocak	2.096.578	247.022	2.343.600	8.436.960	202	10,5	281.232
2	Şubat	943.718	152.482	1.096.200	3.946.320	94	13,9	131.544
3	Mart	2.432.352	251.448	2.683.800	9.661.680	231	9,4	322.056
4	Nisan	3.418.569	260.631	3.679.200	13.245.120	316	7,1	441.504
5	Mayıs	2.470.263	226.137	2.696.400	9.707.040	232	8,4	323.568
6	Haziran	2.227.642	191.558	2.419.200	8.709.120	208	7,9	290.304
7	Temmuz	2.625.240	171.960	2.797.200	10.069.920	241	6,1	335.664
8	Ağustos	2.181.518	237.682	2.419.200	8.709.120	208	9,8	290.304
9	Eylül	2.163.540	167.460	2.331.000	8.391.600	200	7,2	279.720
10	Ekim	2.309.785	185.015	2.494.800	8.981.280	215	7,4	299.376
11	Kasım	2.167.006	201.794	2.368.800	8.527.680	204	8,5	284.256
12	Aralık	2.320.043	199.957	2.520.000	9.072.000	217	7,9	302.400
	Toplam	27.356.254	2.493.146	29.849.400	107.457.840	2.567	8,4	3.581.928

Maliyet değerlerinin en fazla olduğu ay ise üretimle doğru orantılı olarak Nisan ayında 441.504 TL'dir. Maliyetin en az olduğu zamanda ise 131.544 TL ile üretimin en az olduğu ay olan Şubat ayındadır. Şekil 3.3’de elektrik tüketimini kWh cinsinden grafiği verilmiştir. Nisan ayına doğru elektrik tüketimi artmıştır. Daha sonraki aylarda ise üretimle doğru orantılı olarak daha düzenli bir eğri elde edilmiştir.

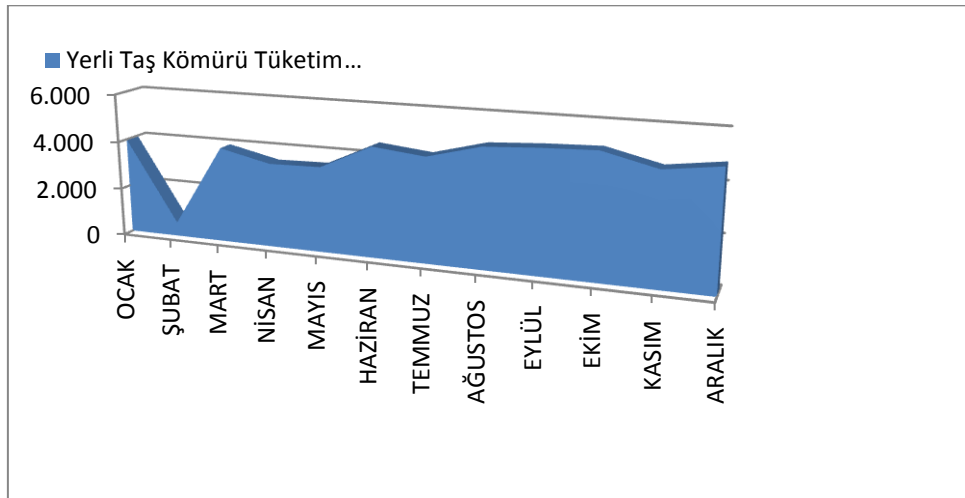


Şekil 3.3 Çimento Fabrikası Elektrik Enerjisi tüketimi (kWh).

Yerli Taş kömürü tüketimi en fazla Ekim ayında olmuştur. Kömür tüketimi çimento üretiminden çok Klinker üretimi ile doğru orantılıdır. Bu bilgi ile ilgili olarak klinker üretiminin en fazla olduğu ay olan Ekim ayında, yerli taş kömürü tüketimi 5.065 ton ile aylık olarak en fazla orana sahiptir. Maliyet Ekim ayında 911.700 TL'yi bulmuştur. Yerli Taş kömürü tüketiminin en az olduğu ay ise 581 Ton ile Şubat ayında olmuştur. Bu ayda yerli taş kömürü 104.580 TL civarındadır. Şubat ayı genel olarak üretimin en az olması dolayısıyla genel tüketimde de en düşük paya sahiptir. Tablo 3.9'da 2010 yılı yerli taş kömürü tüketimi verilmiştir.

Tablo 3.9 Fabrikanın 2010 yılı yerli taş kömürü tüketimi.

Sıra No	Aylar	Yerli Taş kömür tüketimi (Ton)	Enerji Tüketimi (MJ)	Enerji Tüketimi (TEP)	Enerji Maliyeti (TL)
1	Ocak	3.994	97.004.781,4	2316,9194	718.920
2	Şubat	581	14.111.111,2	337,0381	104.580
3	Mart	3.953	96.008.988,7	2293,1353	711.540
4	Nisan	3.478	84.472.366,0	2017,5878	626.040
5	Mayıs	3.526	85.638.172,1	2045,4326	634.680
6	Haziran	4.530	110.022.949,4	2627,853	815.400
7	Temmuz	4.305	104.558.233,4	2497,3305	774.900
8	Ağustos	4.865	118.159.304,4	2822,1865	875.700
9	Eylül	4.991	121.219.545,4	2895,2791	898.380
10	Ekim	5.065	123.016.829,7	2938,2065	911.700
11	Kasım	4.542	110.314.400,9	2634,8142	817.560
12	Aralık	4.835	117.430.675,6	2804,7835	870.300
	Toplam	48.665	1.181.957.358,2	28.230,6	8.759.700

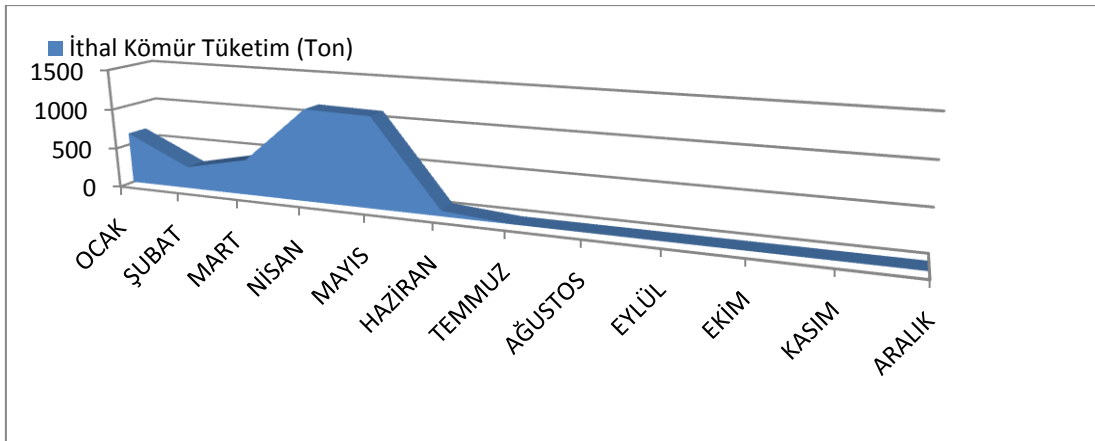


Şekil 3.4 Çimento fabrikasının yerli taş kömürü tüketimi (ton).

Şekil 3.4’de çimento fabrikasının yerli taş kömürü tüketimi ton olarak verilmiştir. Tablo 3.10’da ise fabrikanın 2010 yılı ithal linyit kömürü tüketimi gösterilmiştir. İthal linyit kömürü tüketimi en fazla olan ay Nisan ayı, en az olduğu ay ise Haziran ayıdır. Haziran ayından sonra ithal linyit tüketimi olmamıştır. 2010 yılı ithal linyit kömürü enerji tüketimi olarak 90.535.547,42 MJ veya 2.162,4 TEP değerlerindedir.

Tablo 3.10 Fabrikanın 2010 yılı ithal linyit kömürü tüketimi.

Sıra	Aylar	İthal Kömür Tüketimi (ton)	Enerji Tüketimi (MJ)	Enerji Tüketimi (TEP)	Enerji Maliyeti (TL)
1	Ocak	644	15.792.224,41	377,19	130.088
2	Şubat	275	6.743.574,09	161,07	55.550
3	Mart	445	10.912.328,98	260,64	89.890
4	Nisan	1.141	27.979.701,95	668,28	230.482
5	Mayıs	1.119	27.440.216,02	655,40	226.038
6	Haziran	68	1.667.501,96	39,83	13.736
7	Temmuz	0	0,00	0,00	0
8	Ağustos	0	0,00	0,00	0
9	Eylül	0	0,00	0,00	0
10	Ekim	0	0,00	0,00	0
11	Kasım	0	0,00	0,00	0
12	Aralık	0	0,00	0,00	0
Toplam		3.692	90.535.547,42	2.162,40	745.784



Şekil 3.5 Çimento fabrikasının ithal kömür tüketimi.

Şekil 3.5’de çimento fabrikasının ithal kömür tüketimi grafik olarak, Tablo 3.11’de ise tüm enerjilerin 2010 yılı aylık tüketim değerleri gösterilmiştir. Toplam enerji tüketiminin en çok olduğu ay 131.998.110 MJ enerji tüketimiyle Ekim ayıdır. Toplam enerji tüketiminin en az olduğu ay ise üretimin en az olduğu ay olan Şubat ayıdır. Bu ayda harcanan enerji 24.801.005 MJ dur. Şubat ayında bakım ve onarım olduğu için enerji tüketimi genel olarak azalmıştır.

Tablo 3.11 Çimento fabrikasının 2010 yılı aylık olarak enerji tüketimi toplamı.

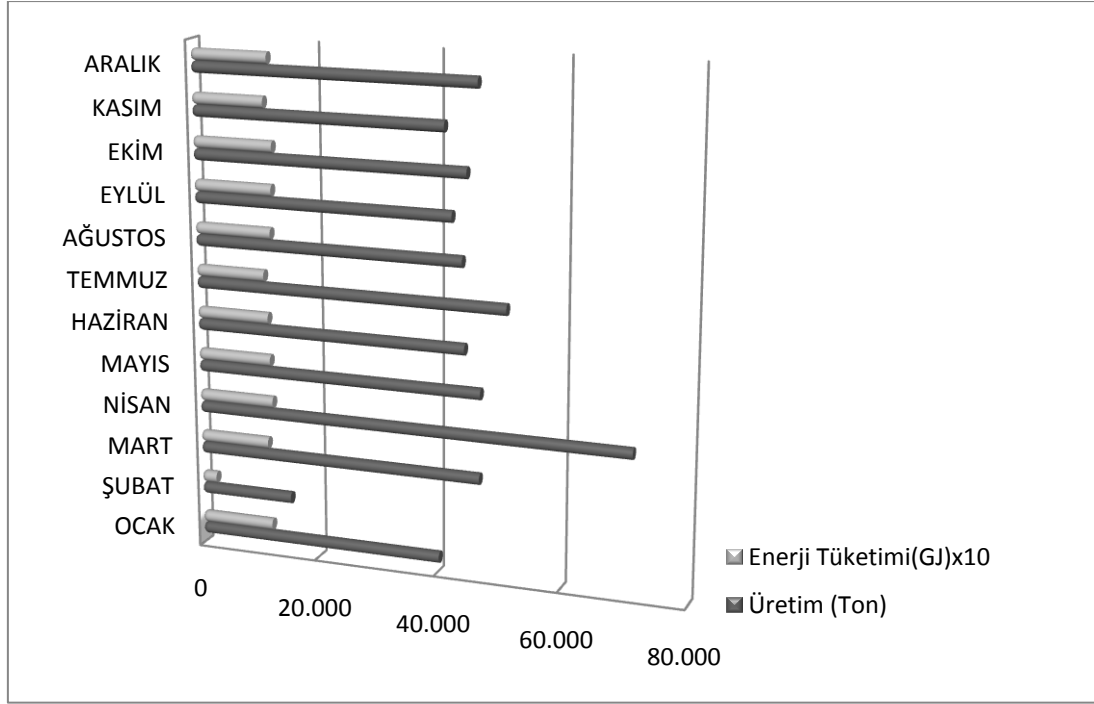
Sıra No	Aylar	Elektrik enerjisi (MJ)	Yerli Taş kömürü (MJ)	İthal linyit kömürü (MJ)	Toplam (MJ)
1	Ocak	8.436.960	97.004.781,44	15.792.224,41	121.233.966
2	Şubat	3.946.320	14.111.111,17	6.743.574,09	24.801.005
3	Mart	9.661.680	96.008.988,74	10.912.328,98	116.582.998
4	Nisan	13.245.120	84.472.366,01	27.979.701,95	125.697.188
5	Mayıs	9.707.040	85.638.172,10	27.440.216,02	122.785.428
6	Haziran	8.709.120	110.022.949,40	1.667.501,96	120.399.571
7	Temmuz	10.069.920	104.558.233,37	0,00	114.628.153
8	Ağustos	8.709.120	118.159.304,38	0,00	126.868.424
9	Eylül	8.391.600	121.219.545,36	0,00	129.611.145
10	Ekim	8.981.280	123.016.829,74	0,00	131.998.110
11	Kasım	8.527.680	110.314.400,93	0,00	118.842.081
12	Aralık	9.072.000	117.430.675,58	0,00	126.502.676
Toplam		107.457.840	1.181.957.358,22	90.535.547,42	1.379.950.746

Tablo 3.12’de çimento fabrikasının 2010 yılı aylık olarak enerji tüketim maliyeti gösterilmiştir. Toplam enerji maliyetinin en fazla olduğu ay 1.979.385 TL ile nisan ayıdır. Enerji maliyetinin en az olduğu ay ise 437.020 TL ile Şubat ayıdır. Ancak fabrikada bu değerlendirmeler yalnızca enerji tüketimi ve bu enerjinin maliyeti esas alınarak yapılmıştır. Ayrıca bu değerler ortalama değerler olduğu için gerçek değerlerden bir miktar sapmalar olması normaldir.

Tablo 3.12 Çimento fabrikasının 2010 yılı aylık olarak enerji tüketimi maliyeti.

Sıra No	Aylar	Elektrik Maliyet (TL)	Yerli Taş Kömürü (TL)	İthal Linyit Kömürü (TL)	Toplam Maliyet (TL)
1	Ocak	281.232	718.920	130.088	1.130.240
2	Şubat	131.544	104.580	55.550	291.674
3	Mart	322.056	711.540	89.890	1.123.486
4	Nisan	441.504	626.040	230.482	1.298.026
5	Mayıs	323.568	634.680	226.038	1.184.286
6	Haziran	290.304	815.400	13.736	1.119.440
7	Temmuz	335.664	774.900	0	1.110.564
8	Ağustos	290.304	875.700	0	1.166.004
9	Eylül	279.720	898.380	0	1.178.100
10	Ekim	299.376	911.700	0	1.211.076
11	Kasım	284.256	817.560	0	1.101.816
12	Aralık	302.400	870.300	0	1.172.700
Toplam		3.581.928	8.759.700	745.784	13.087.412

Şekil 3.6 ise fabrikanın üretim ve enerji tüketimi değerleri karşılaştırılmıştır. En verimli ay ise üretimin en fazla olduğu nisan ayıdır. Bu aydaki enerji harcamaları diğer aylarla yaklaşık olarak aynıdır. Çimento fabrikasının 2010 yılında her ay için birim kütle maliyetleri, birim kütle enerjileri ve birim enerji maliyetleri Tablo 3.13’de daha net görülmektedir.



Şekil 3.6 Fabrikanın genel üretim ve enerji tüketimi oranlarının karşılaştırılması.

Çimento fabrikasının birim kütle enerjisinin en fazla olduğu ay Ocak ayıdır. Bu ayda üretilen çimento ve klinkerin üretilmesi için 2010 yılı için en fazla enerji gitmektedir. Birim kütle için en az enerjinin harcandığı ay ise Şubat ayıdır. Birim kütle maliyetlerinin en fazla olduğu ay ise yine Ocak ayıdır. Bu ayda üretilen çimento için ton başına 42 TL harcanmıştır. Birim kütle maliyetlerinin en az olduğu aylar ise Nisan ve Şubat ayıdır. Bu aylarda birim kütle maliyeti 28 TL’ye kadar düşmüştür. Birim enerji maliyeti ise Şubat ayında en fazladır. Bu ayda enerji maliyeti 0,0185 TL’dir. En az olan ay ise 0,0155 TL ile Eylül ayı olmuştur.

Tablo 3.13’de ise Birim kütle enerjisi, birim kütle maliyeti ve birim enerji maliyetleri her ay için gösterilmektedir. Ocak ayı birim kütle enerjisi ve birim kütle maliyeti en yüksek olan aydır. En düşük olduğu aylar Şubat ve Nisan’dır. Ağustos ayından sonra sapmalarda azalma göstermektedir. Bulunan bu değerler fabrikanın enerji ile ilgili olan durumları için geçerlidir ve bu gerçek değerlere “işçilik giderleri” de katılınca maliyet artacaktır.

Tablo 3.13 Birim kütle enerjisi, birim kütle maliyeti ve birim enerji maliyeti.

No	Aylar	Birim Kütle Enerjisi (MJ/ton)	Birim Kütle maliyeti (TL/ton)	Birim Enerji Maliyeti (TL/MJ)
1	OCAK	3.004	28	0,0093
2	ŞUBAT	1.608	19	0,0118
3	MART	2.485	24	0,0096
4	NİSAN	1.768	18	0,0103
5	MAYIS	2.611	25	0,0096
6	HAZİRAN	2.708	25	0,0093
7	TEMMUZ	2.242	22	0,0097
8	AĞUSTOS	2.878	26	0,0092
9	EYLÜL	3.055	28	0,0091
10	EKİM	2.948	27	0,0092
11	KASIM	2.881	27	0,0093
12	ARALIK	2.722	25	0,0093
ORTALAMA		2.576	25	0,0096

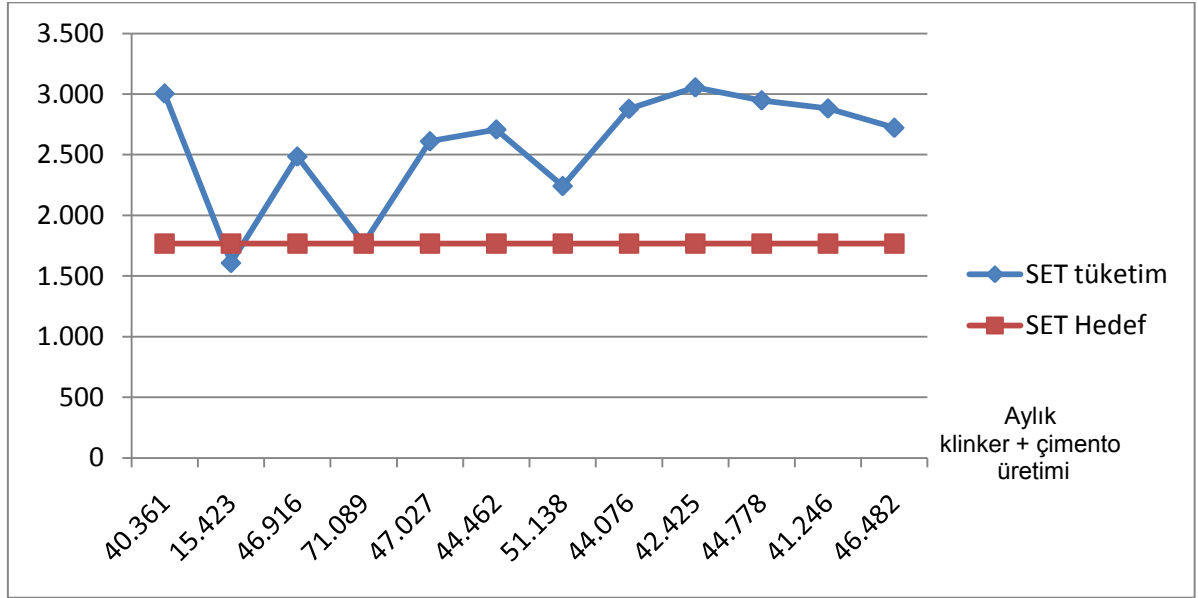
3.4.2 Spesifik Enerji Tüketimi

Spesifik enerji tüketimi (SET) değeri enerji tüketiminin üretim miktarına bölünmesiyle bulunmaktadır. Tablo 3.14’de bu değerler gösterilmektedir. Fabrikalar, proseslerin oluşturulması aşamasında, o proseslerin çalışabileceği maksimum bir kapasite belirlemektedir. Bu değerlere “SET hedef” denmektedir. Fabrikanın aylara göre her proses için SET hedef değerleri vardır. Ancak fabrikanın eskiliği ve kapasitesinin büyük ölçüde değişmesi dolayısıyla, bu değerler gerçek rakamları yansıtmamaktadır. Bu yüzden hedef değerler fabrikanın birim kütle için enerji tüketiminin, birim kütle maliyetinin de en düşük olduğu Nisan ayı alınması en doğru yaklaşımdır. Çin’deki çimento üretiminde yaşam döngüsü analizi gerçekleştiren Lu (2010), tespitlerine göre yaş yöntemde 5,3-7,1 GJ/ton klinker olan spesifik enerji tüketimi kuru sisteme geçilmesiyle 3,2-3,5 değerine ulaşacağını tespit etmiştir. Bartın çimento fabrikasında bulunan ortalama 1,768-3,055 GJ/ton SET değeri ise klinker ve çimentonun toplam üretimi başına düşen spesifik enerji tüketim değeridir. Eğer klinker başına düşen enerji tüketimi hesaplanacak olursa, bu değer ortalama olarak 5,946 GJ/ton klinker çıkmaktadır. Bu da yapılan analizi doğrulamaktadır.

Tablo 3.14 Fabrikanın SET değerleri.

Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran
SET standart	3.004	1.608	2.485	1.768	2.611	2.708
SET Hedef	1.768	1.768	1.768	1.768	1.768	1.768
Aylar	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
SET standart	2.242	2.878	3.055	2.948	2.881	2.722
SET Hedef	1.768	1.768	1.768	1.768	1.768	1.768

Hedef değerleri fabrikanın üretim performansını izlenmesi açısından önemlidir. Bu değerler fabrikanın üretiminde optimum tüketimin sağlanması için verilmiş değerlerdir ve prosesten proseğe değişiklik gösterebilir. Set değerinin büyümesi fabrikanın enerji tüketiminin artmasına ve performansının da düştüğüne işaret etmektedir. Şekil 3.7’de SET değerlerinin grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.7 SET değerleri grafiksel karşılaştırılması.

Burada x ekseninde gösterilen değerler fabrikanın bir yılın her ayı için olan klinker ve çimento toplam üretim değerleridir. Y ekseninde gösterilen değerler ise birim kütle başına düşen enerji tüketimi değerleridir. Genel olarak SET tüketim değerleri SET hedef değerlerine ulaşamamıştır. Buda fabrikada performansın düşük olduğunun bir göstergesidir.

3.5 Kümülatif Toplam Değerler (CUSUM) Grafiğinin Çizilmesi

CUSUM grafikleri bir prosesin kesintisiz olarak kontrolünün sağlanması amacıyla etkili olarak kullanılmaktadır. CUSUM grafikleri genel olarak şu amaçlar için kullanılmaktadır (Bircan 2003).

- ✓ Proseslerin ortalamasında meydana gelen küçük kaymaları tespit ederek, prosesin düzeltilmesi için bilgi sağlamak,
- ✓ Proses ortalamasındaki kaymanın hangi örnekten itibaren başladığını tespit etmek,
- ✓ Geçerli proses ortalamasını tahmin etmek,
- ✓ Proses ortalaması hakkında kısa dönem için ileriye dönük tahminde bulunmak.

CUSUM grafiklerinin düzenlenmesi ve yorumlanması yapılırken hedeflenen değer veya referans değer k ile gösterilmek üzere $(\bar{x}_1 - k)$, $(\bar{x}_2 - k)$,... sapma değerlerine bağlı olarak S_1, S_2, \dots kümülatif değerleri belirlenir. Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3'de kümülatif değerler gösterilmiştir. Eşitlik 3.4'de ise kümülatif değerlerin son elemanı gösterilmiştir.

$$S_1 = \bar{x}_1 - k \quad (3.1)$$

$$S_2 = (\bar{x}_1 - k) + (\bar{x}_2 - k) \quad (3.2)$$

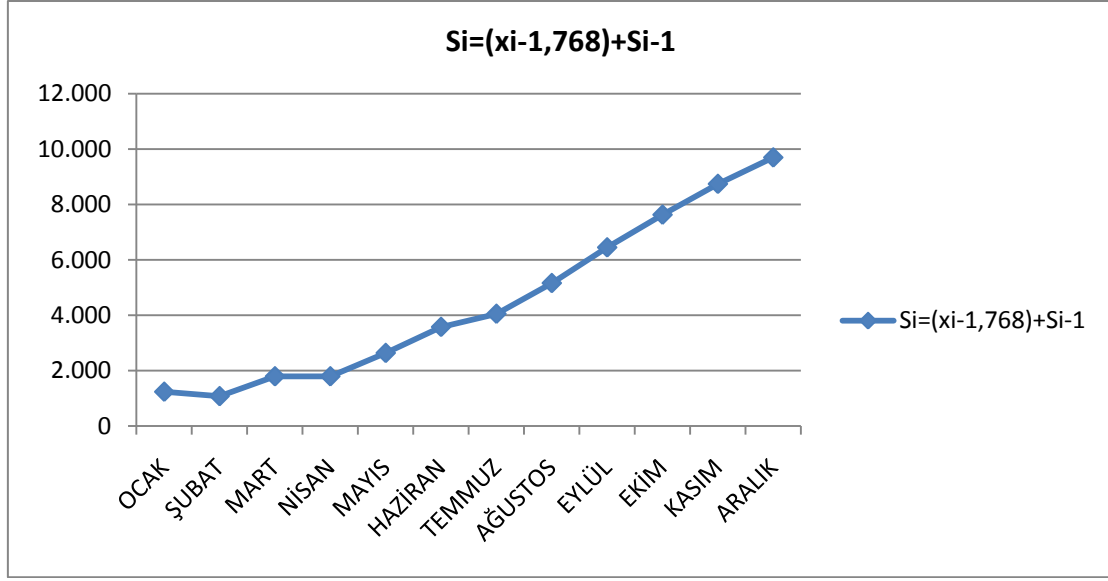
$$S_3 = S_2 + (\bar{x}_3 - k) \quad (3.3)$$

$$S_R = S_{R-1} + (\bar{x}_R - k) = \sum_{i=1}^R (\bar{x}_i - k) \quad (3.4)$$

Burada x değerlerimiz SET standart değerleri olarak alınacaktır. Çoğu kez k yerine ana kütle ortalaması alınmaktadır. Ancak burada SET hedef değeri alınacaktır. Tablo 3.15'de birinci sütunda SET standart değerleri ve ikinci sütunda ise SET standart değerlerin SET hedef değerinden farkı verilmiştir. SET hedef değerimiz daha önceden de tespit edildiği gibi nisan ayı spesifik enerji tüketimi belirlenmişti. Nisan ayında ton klinker ve çimento başına düşen enerji tüketimi değerimiz yani SET hedef değerimiz 1,788'dir. Şekil 3.8'da kümülatif değerler toplamı grafiği gösterilmiştir.

Tablo 3.15 CUSUM grafiği için değerlerin hesaplanması.

x_i	$x_i - k$	$S_i = (x_i - k) + S_{i-1}$
3.004	1.236	1.236
1.608	-160	1.076
2.485	717	1.793
1.768	0	1.793
2.611	843	2.636
2.708	940	3.576
2.242	474	4.050
2.878	1.110	5.160
3.055	1.287	6.447
2.948	1.180	7.627
2.881	1.113	8.740
2.722	954	9.694



Şekil 3.8 Kümülatif değerler toplamı (CUSUM) grafiği.

Bu grafiğin yükselen bir eğim göstermesi grafiğin kontrol altında olmadığını göstermektedir. Ayrıca üretim başında harcanan enerjinin kontrol altında olmadığını göstermektedir. Buradan fabrikanın performansının iyi olmadığını sonucuna varılmaktadır. Eğer SET hedef değerleri yakalanılmış olsaydı grafik eğimi olmayan doğrusal bir çizgi oluşturacaktı ve performansın iyi olduğu sonucuna varılabilecekti. Ancak burada hedef değerlere ulaşamamıştır.

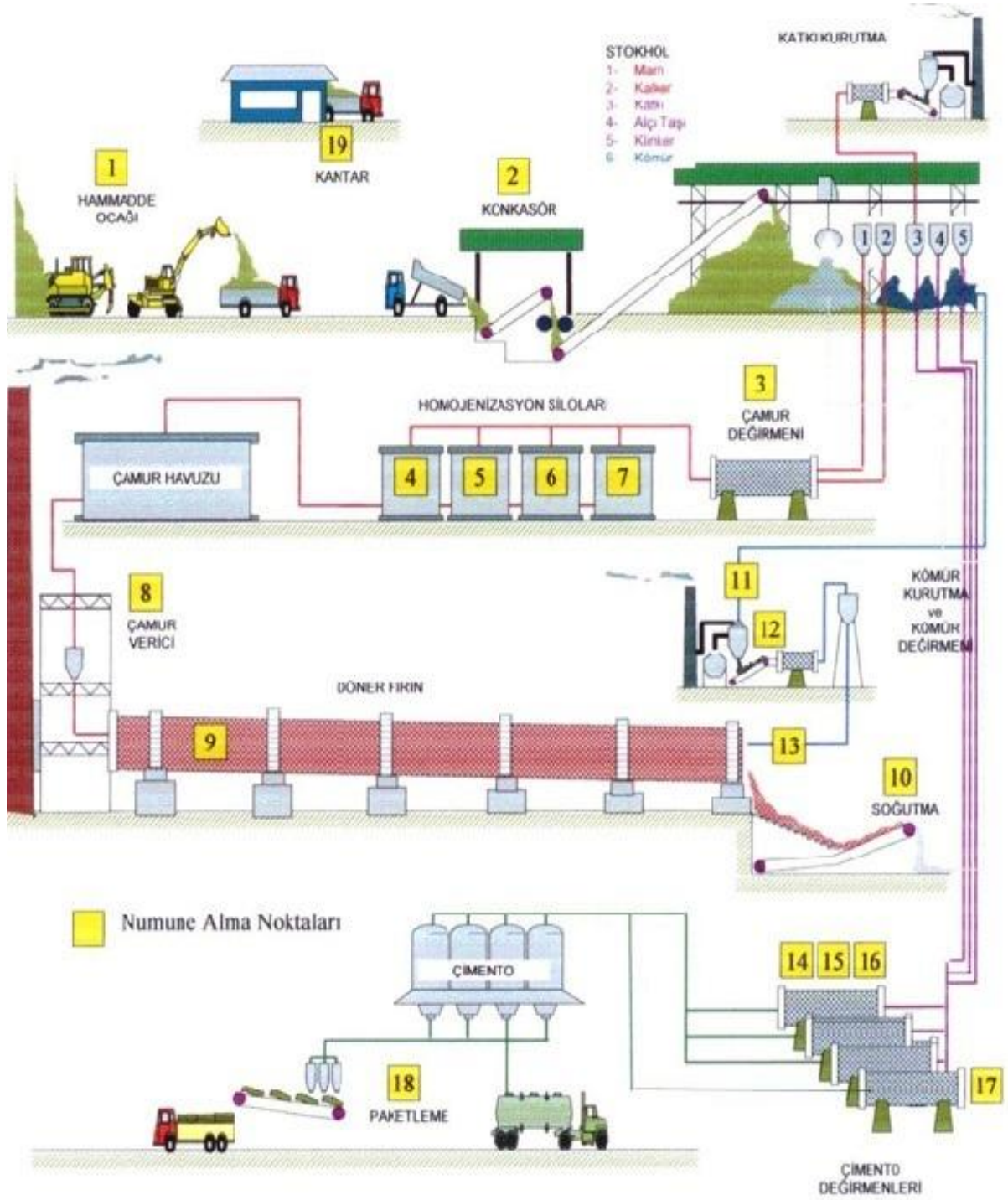
BÖLÜM 4

ÇİMENTO FABRİKASININ ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Ülkemizde sanayi sektöründeki enerji tüketimi genel enerji tüketiminde büyük bir paya sahiptir. Sanayide enerji maliyeti açısından en büyük oranda çimento sektöründedir. Bu yüzden çimento sektöründe yapılacak iyileştirmeler ve önemli oranlarda enerji kazancına dönüşecektir.

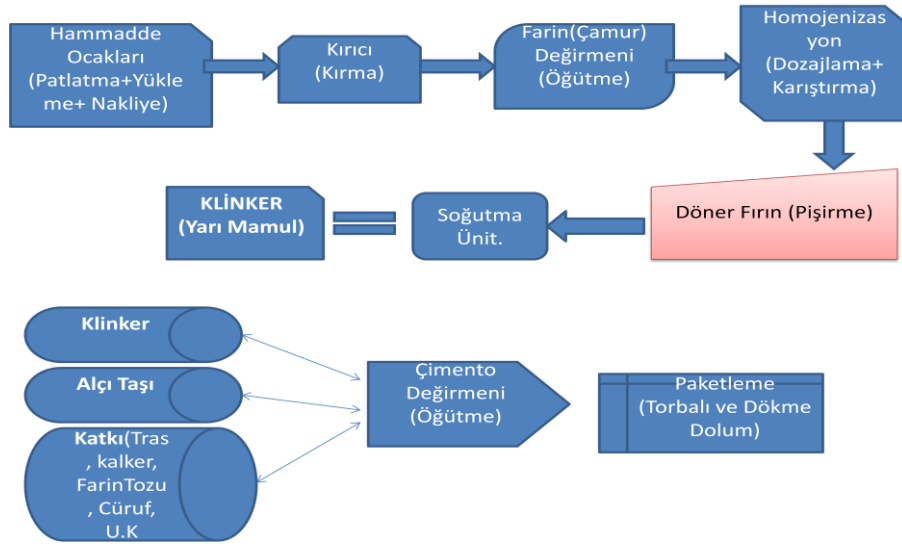
Çimento üretim teknolojileri yaş, yarı yaş (Lepol) ve kuru sistem olmak üzere 3 çeşittir. Bu sistemlerin kronolojik bir şekilde anlatılırsa, önce ham maddelerin homojen karışmasını sağlamakta su kullanıldı, böylece yaş sistem ile üretim başladı. Bu sistemin beslemedeki yaklaşık %33-38 oranındaki suyu buharlaştırmak için yüksek ısı enerjisine gerek duyulması ham maddelerin kuru ortamda daha homojen karıştırılması ve taşınması tekniklerinin geliştirilmesine yol açtı. Böylece 1950'lerden başlayarak döner fırınla üretimde yaş sistemden kuru sisteme geçildi (Kuleli 2010). Analizi yapılan bu fabrika Ülkemizde yaş üretim yapan tek fabrikadır.

Bir Çimento fabrikası belli başlı üniteleri olarak; Ocaklar, Konkasör, Farin Değirmeni, Döner Fırın, Kömür Değirmeni, Tras kurutma, Çimento Değirmenleri, Paketleme ve yardımcı tesisler (kazan dairesi, bakım grupları vb.) sayılabilir. Kuru sistemle üretim yapan fabrikalarda kullanılan farin değirmeninin görevini, yaş sistemle üretim yapan fabrikalarda çamur değirmeni yapmaktadır. Bu çalışmada analizi yapılan fabrika yaş sistemle üretim yapan bir fabrika olduğundan dolayı çamur değirmeni vardır. Kuru sistemde farin değirmenine giren maddeler ısı işlem görmektedir. Yaş sistemlerdeki çamur değirmeninin de kalker ve marn ayrı ayrı su ilave edilerek değirmene girmekte ve burada öğütülmektedir. Ayrıca herhangi bir ısı işlem görmemektedir. Şekil 4.1'de klinker ve çimento üretiminin geçirdiği safhalar gösterilmektedir. Klinker üretimi için kullanılan farin döner fırına gelmeden önce çamur değirmeninden geçmektedir. Burada herhangi bir ısı işlem görmemektedir. Fabrikada kömür kurutma bölümü ve katkı kurutma olan tras kurutma bölümü de yer almaktadır. Şekil 4.2'de ise çimento fabrikası klinker ve çimento üretim safaları şematik olarak verilmiştir.



1-) Hammadde Ocakları	9-) Döner fırın	14-15-16-17) Çimento Değirmenleri
2-) Konkasör	10-) Soğutma	18-) Paketleme
3-) Çamur (Farin) değirmeni	11-) Kömür Kurutma	19-) Kantar
4-5-6-7-) Homojenizasyon siloları	12-) Kömür Değirmeni	
8-) Camur verici	13-) D.Fırın Kömür verici	

Şekil 4.1 Çimento fabrikası imalat akış şeması ve kalite kontrol safaları (BarÇim 2010).



Şekil 4.2 Çimento fabrikası klinker ve çimento üretim safaları şematik olarak (BarÇim 2010).

Çimento fabrikasında 1.yasa ve 2.yasa analizleri için gerekli tüm veriler 15 Haziran 2011 verileridir. Fabrikanın ortam sıcaklığı her sistemin çalıştığı ortama göre değişiklik göstermektedir. Hesaplamalarda sıcaklık birimi Kelvin, enerji birimi joule, basınç birimi pascal alınmıştır. Proseslerde sisteme giren ve çıkan gazlar için kütleli debi kullanılmıştır. Fabrikanın geneli için tek bir sistem gibi düşünerek analiz yapmak yanıltıcı bir işlem olacaktır. Bu yüzden her sistem ayrı değerlendirilecektir. Termodinamiğin birinci ve ikinci kanununun analizleri yapılacak sistemler;

- ✓ Döner fırın ve soğutucu bölümü
- ✓ Kömür kurutma
- ✓ Tras kurutmadır

Bu sistemlerin analizi kütle dengesi, enerji dengesi ve ekserji dengesi olarak yapılacaktır. Döner fırın ve soğutma bölümünde kütle, enerji dengesi verilerin doğrulanması adına önce ayrı ayrı yapılacaktır. Daha sonra bu sistemler döner fırın ve soğutma bölümü bir sistem olarak dikkate alınacaktır. Herhangi bir termodinamik sistemin analizini yapmak için belli kurallara uymak gerekmektedir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir (Midilli 2011).

- ✓ Sistemin çalışmasını ve içeriğini anlamak, uygulanacak tekniği ve materyali belirlenmesi.
- ✓ Uygun çalışma sistemini belirlemek. Sistemin kapalı veya açık sistem olduğunu belirlemek.
- ✓ Açık sistem durumunda sistemin termodinamik türünü belirlemek.

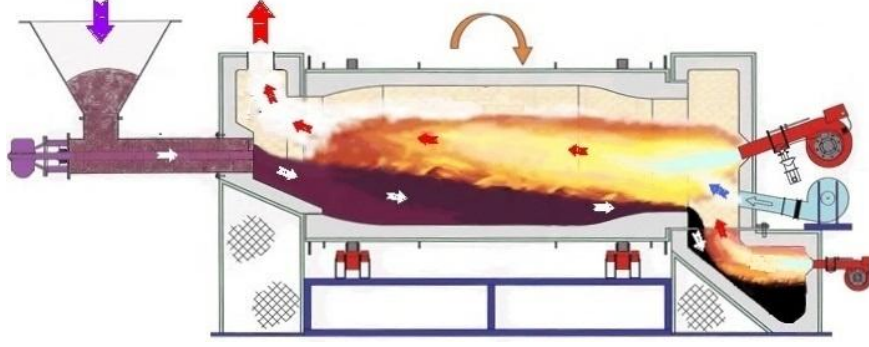
- ✓ Kontrol kütlesini veya hacmini belirlemek, akış diyagramını çizmek.
- ✓ Sistem sınırlarını belirlemek, uygun termodinamik kabuller yapmak.
- ✓ Referans ortamını seçmek ve referans ortamın şartlarını belirlemek.
- ✓ Sistemin çalışma şartlarını belirlemek. Hangi debi veya basınçta olduğunu belirlemek.
- ✓ Sistemde etkili olan parametleri belirlemek ve gruplamak, kullanılacak birim ve tabloları kararlaştırmak.
- ✓ Sistemin iş,ısı ve kütle etkileşimini belirlemek.
- ✓ Genel termodinamik denge bağıntıları, kütle, enerji ve ekserji denkliklerini yazmak.
- ✓ Mümkünse ölçümleri yapmak, kullanılacak tablo ve grafik değerlerini belirlemek.
- ✓ Enerji ve ekserji büyüklüklerini hesaplamak, enerji ve ekserji band diyagramlarını çizmek.
- ✓ Sonuçları kontrol etmek, değerlendirmek, yorumlamak ve uygulamaya koymaktır.

Çimento fabrikasının analizi yapılırken bu adımlara dikkat edilerek yapılmıştır. Her sistem için ayrı ayrı kütle, enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.1 DÖNER FIRIN VE SOĞUTUCU BÖLÜMÜNDE KÜTLE, ENERJİ VE EKSERJİ

Çimento Fabrikalarının üretim hattında en önemlisi döner fırın ve soğutucu bölümüdür. Döner fırın çimentonun klinkerizasyonu, kireç taşı kalsinasyonu, kömürün kalsinasyonu, cevher oksidini indirgeme gibi geniş amaçlı kullanılmaktadır. Döner fırınlar % 3-4 eğime sahiptirler. İç kısmında ateşe dayanıklı refrakter malzeme ile örtülmüştür (BarÇim 2010).

Çamur değirmeninde homojene edilen çamur (farin) döner fırına istenen miktarda pişirilmek üzere girer. Fırın çıkışından pülverize kömür, girişinden ise çamur girer ve ters akım prensibine göre pişirme işlemi gerçekleşir. Döner fırın; çamur havuzlama, zincir bölgesi, kalsinasyon bölgesi, sinter bölgesi ve klinker havuzlama bölgesinden oluşur. Çamur fırın girişinden beslenerek çıkışa doğru ilerler. Önce suyunu kaybeder, sonra kalsinasyon bölgesinde kalsine olur, sinter bölgesinde bileşikler oluşur, havuzlama bölgesinden geçerek soğutma ünitesine dökülür. Burada fanlar vasıtasıyla soğutularak klinker adı verilen yarı mamul oluşur (BarÇim 2010). Şekil 4.3’de döner fırının temel çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 4.3 Döner fırının şematik olarak temel çalışma prensibi (URL-9, 2011).

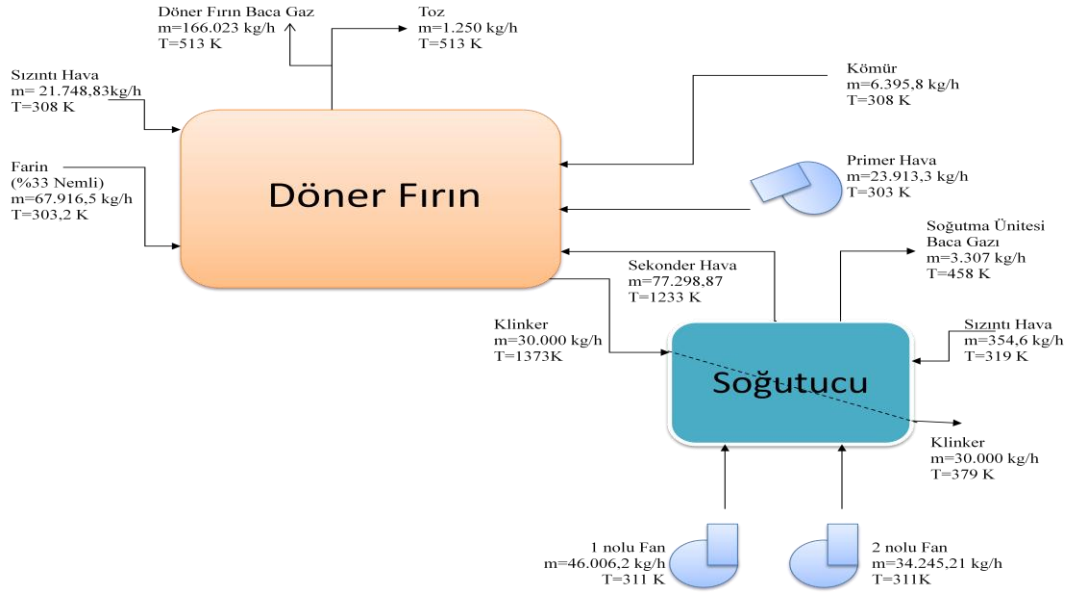
Döner fırın bölümünün sinter bölgesinden geçen klinker yaklaşık 1373 K sıcaklıkta soğutma bölümüne dökülmektedir. Dökülme önce “kedi merdiveni” diye tabir edilen yere gerçekleşir. Buranın yaklaşık yarım metre üzerinde şandel oluşumunda kullanılan patlangaç vardır. Soğutma sistemi klinkeri hava ile hızla soğutan ve güncel teknolojide en çok kullanılan ızgaralı soğutucu kullanılmaktadır.

4.1.1 Döner Fırın ve Soğutma Bölümünde Kütle Analizi

Döner fırın ve soğutma bölümünde kütle dengesi oluşturulurken aşağıdaki denklige göre önce döner fırın ve soğutucu bölümü ayrı olarak incelenmiş daha sonra genel bir kütle denkliği yapılmıştır. Kütle denkliği Eşitlik 4.1’de gösterildiği gibidir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_c \quad (4.1)$$

Döner fırına gelen kömürün yanması sonucu ortaya çıkan %16’lık kül miktarı klinkerin yapısına karıştığı için bu kül miktarı klinker içinde değerlendirilmiştir. Soğutma ünitesinde bacadan çıkan toz döner fırından çıkan toza oranla çok az olduğu için ihmal edilmiştir. Şekil 4.4’de döner fırın ve soğutma bölümüne giren ve çıkan kütle akışları gösterilmiştir. Fabrikadan alınan değerler Nm³/h cinsinde verilmiştir. Ancak hacimsel olarak denklik yapılması mümkün değildir. Bu yüzden sisteme giren gazların kütlesi hesaplanmış ve denklik oluşturulmuştur. Döner fırından çıkan gaz miktarı için yanma ve kalsinasyon sonucu açığa çıkan gaz miktarına, farinden gelen nem miktarının hesaplanması gerekmektedir. Soğutucudaki gaz dengesi içinde fan havalarına ve yanma için gerekli hava miktarına ihtiyaç vardır. Tablo 4.1’de döner fırına giren ve çıkan maddelerin kütledebileri verilmiştir.



Şekil 4.4 Döner fırın ve soğutma bölümü kütle akış şeması.

Tablo 4.1 Döner fırına giren ve çıkan maddelerin kütle dengesi.

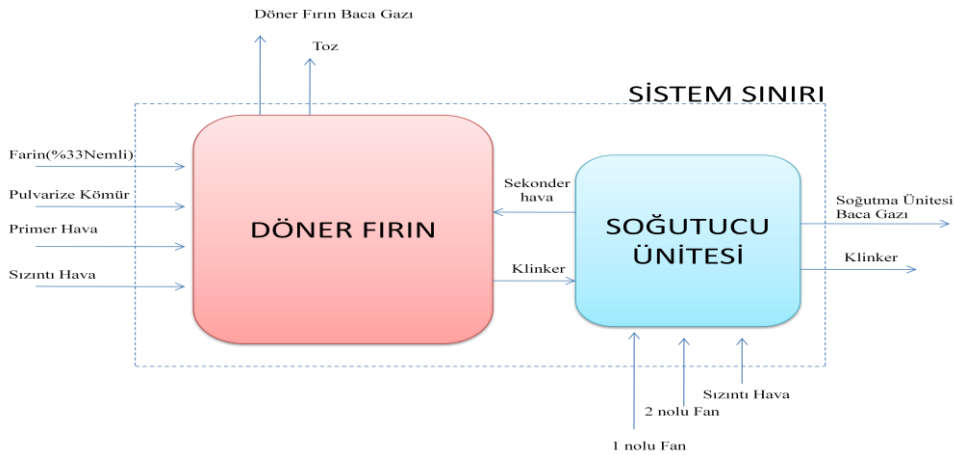
DÖNER FIRIN				
Giren Maddeler			Çıkan Maddeler	
Sıra No	Madde	Kütlesel Debi (kg/h)	Madde	Kütlesel Debi (kg/h)
1	Farin(Kuru)	45.504	Klinker	30.000
2	Farin Nemi	22.412,5	Gaz	166.023
3	Kömür Karışımı	6.395,8	Toz	1.250
4	Primer Hava	23.913		
5	Sekonder Hava	77.298,87		
6	Sızıntı Hava	21.748,83		
Toplam		197.273	Toplam	197.273

Döner fırına giren ve çıkan maddelerin kütle denkliliği hesaplanırken bu sisteme giren sızıntı havalarında hesaplanması gerekmektedir. Döner fırına giren sızıntı hava hesaplanırken sızıntı olan bölgelerdeki hava hızları ölçülmüş daha sonra sızıntı olan yerlerin alanları hesaplanıp döner fırına sızan havanın hacimsel debisi bulunmuştur. Ortam sıcaklığındaki hava yoğunluğuyla çarpılarak kütleli debileri hesaplanmıştır. Sisteme giren nemli farinin, kömür karışımının, primer havanın ve sistemden çıkan klinkerin, gazın ve tozun kütlesi fabrikadan alınan değerlerdir. Ancak daha öncede söylendiği gibi fabrikadan alınan değerlerde sisteme giren hava Nm^3 cinsinden verildiği için, hava yoğunluğunun tespit edilmiş ve verilen hacim değeriyle çarpılıp kütlesi hesaplanmıştır. Sisteme saatte 67.916,5 kg giren farin deki nemin buharlaşması ve kimyasal tepkimeler sonucu saatte 30.000 kg klinkere dönüşmektedir (BarÇim 2010). Döner fırından çıkan klinkerin ısıttığı ve bacadan atılmayacak kadar yüksek bir sıcaklığa sahip olan sekonder hava tekrar 1723 K sıcaklıktaki klinkerin soğutulması için

döner fırın çıkış bölgesine gönderilmektedir. Böylece klinker 1233 K sıcaklığa düşmektedir. Sekonder hava soğutucuya giren klinkerin soğutulması için çalışan 1 ve 2 nolu fanların toplam kütle debisinin soğutucunun bacasından atılan havanın kütle debisinin çıkarılmasıyla bulunmuştur. Soğutucudan çıkan sekonder hava aynı zaman da döner fırına kütle ile giren bir enerjidir. Döner fırın kütle denklığı de sağlanmıştır. Soğutucu bölümünde yer alan 1 ve 2 nolu fanların kütledebileri sızıntı hava ile benzer şekilde fanların çektiği hava hızı ve çektiği alan ile çarpılarak hacimsel debileri bulunmuş ve ortam sıcaklığındaki havanın yoğunluğu ile çarpılarak kütledebileri hesaplanmıştır. Soğutucu bölümünün kütle denklığı Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Döner fırın ve soğutucu bölümünün kütle denklığının ayrı yapılmasının sebebi yapılan denkliklerin doğruluğunun tespiti içindir. Döner fırın ve soğutucu bölümünün sistem sınırları çizilmiş, giren ve çıkan maddeler belirtilmiştir. Bu da Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2 Soğutucuya giren ve çıkan maddelerin kütle dengesi.

SOĞUTUCU BÖLÜMÜ				
Giren Maddeler			Çıkan Maddeler	
Sıra No	Madde	Kütlesel Debi (kg/h)	Madde	Kütlesel Debi (kg/h)
1	Klinker	30.000	Klinker	30.000
2	1 nolu Fan	46.006,20	Soğutma Bacası Gazı	3.307
3	2 nolu Fan	34.245,21	Sekonder Hava	77.298,87
4	Sızıntı Hava	354,6		
TOPLAM		110.606	TOPLAM	110.606



Şekil 4.5 Döner fırın ve soğutucu bölümü kütle denklığı sistem sınırı.

Döner fırın ve soğutma sistemin kütle denklığı Tablo 4.3’de verilmiştir. Bu sisteme saatte toplam 200.580 kg kütle giriş ve çıkışı olmaktadır. Sekonder hava döner fırın ve soğutucu

arasında, yani sistem sınırını geçmeyen, bir kütle olduğu için tüm sistemin kütle denkleğinde yer almamaktadır. Ayrıca bu tabloda sızıntı hava d.f. döner fırına sızan hava, sızıntı hava s. ise soğutma bölümüne sızan havadır.

Tablo 4.3 Döner fırın ve soğutucu bölümü kütle dengesi.

DÖNER FIRIN VE SOĞUTUCU BÖLÜMÜ				
Giren Maddeler			Çıkan Maddeler	
Sıra No	Madde	Kütlesel Debi (kg/h)	Madde	Kütlesel Debi(kg/h)
1	1 nolu Fan	46.006	Klinker	30.000
2	2 nolu Fan	34.245	Toz	1.250
3	Farin (Kuru)	45.504	Döner fırın baca gazı	166.023
4	Farin Nemi	22.412,5	Soğutma baca gazı	3307
5	Primer Hava	23.913		
6	Kömür Karışımı	6.395,8		
7	Sızıntı Hava D.f.	21.748,83		
8	Sızıntı Hava S.	354,6		
TOPLAM		200.580	TOPLAM	200.580

Döner Fırına giren kömürün yanması için gerekli hava miktarı

Döner fırın sistemine 6.395,8 kg/h debi ile kütle girişi olmaktadır. Kömür içinde oksijenle yanma reaksiyonu geçiren C, H ve S vardır. Bu elementlerin kömür içindeki yüzdeleri sırasıyla % 68,8 karbon, % 4 hidrojen ve % 1,2 de kükürttür. Kömürün yakma havasını bulunması için, bu elementlerin yanması için ne kadar O₂ ye ihtiyaç duydukları hesaplanacaktır. Bu da Eşitlik 4.2'deki gibi hesaplanabilir (Kuleli 2010). Burada *c*, *h*, *s* ve *o* kömürdeki C, H, S ve O' nin kömür içindeki kütleli fraksiyonlarıdır. İşlem aşağıdaki gibi gerçekleşir.

$$Yakma\ havası = \frac{m_{kömür} \left(c \cdot \frac{32}{12} + h \cdot \frac{16}{2} + s \cdot \frac{32}{32} - o \right)}{0,23} \quad (4.2)$$

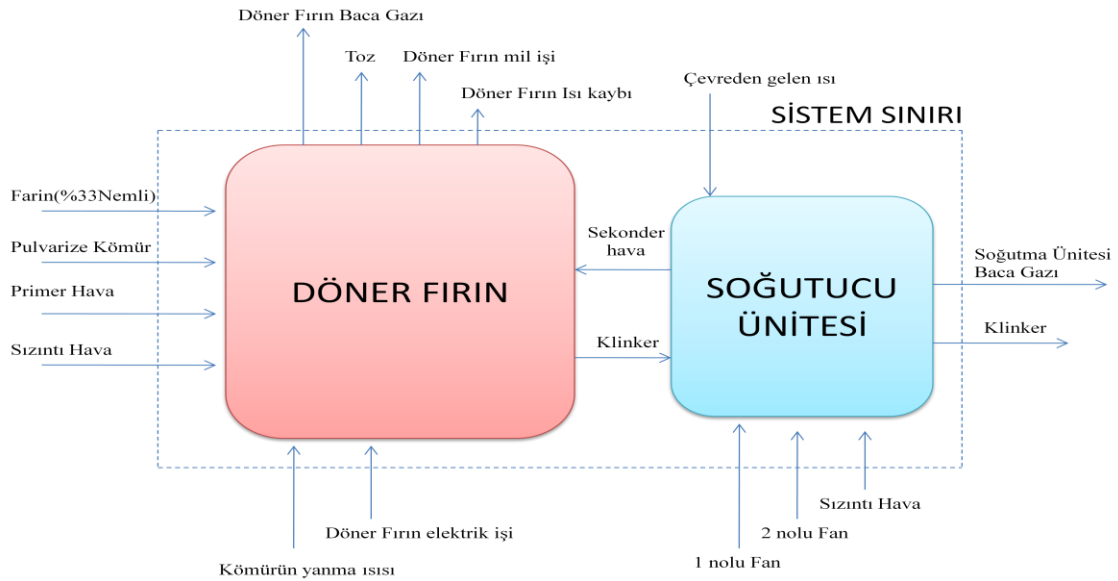
$$Yakma\ havası = \frac{6395,8 \cdot \left(0,688 \cdot \frac{32}{12} + 0,04 \cdot \frac{16}{2} + 0,012 \cdot \frac{32}{32} - 0,09 \right)}{0,23}$$

Sonuçta 6395,8 kg/h debiyle giren yakıtın yanması için gerekli stokiometrik hava miktarı 57.747,58 kg/h olarak bulunur.

4.1.2 Döner Fırın ve Soğutma Bölümünde Enerji Analizi

Bir sistemin termodinamik analizi için belirli bir metot izlenmelidir. Öncelikle sistemin çalışmasını ve içeriğini iyi anlamak gerekmektedir. Döner fırına %33 nemle giren farine zıt yönde ve fırının diğer ucundan, primer hava ile püskürtülen pülverize edilmiş kömür alev borusu yardımıyla yakılarak farini pişirmektedir. Sinter bölgesinde sıcaklığı 1723 K sıcaklığa ulaşan farin bu aşamada klinkere dönüşmektedir. Burada oluşan gaz ve bir miktar toz döner fırının bacasından dışarı atılmaktadır. Döner fırından soğutma bölümüne akan klinker iki fan yardımıyla soğutulmaktadır. Klinkerin soğumasıyla ısınan ve 1233 K'lık bir sıcaklığa sahip hava klinkeri soğutmak için tekrar döner fırına gönderilmektedir. Soğutucu bölümünden 379 K'e kadar soğutulan klinker bu bölümden dışarı çıkmaktadır. Şekil 4.4'de bu akış gösterilmiştir.

Uygulanacak tekniğin ve materyalin belirlenmesinde sistemin analizi yapmak için deneysel bir metod uygulanacaktır. Fabrikada analiz için malzeme sıcaklıkları, debileri ölçülerek veya hesaplanarak bulunmuştur. Uygun çalışma sistemini belirlerken ise Döner Fırın ve Soğutma bölümü devamlı olarak bir kütle giriş çıkışı olduğu için sürekli akışlı açık bir sistem olarak kabul edilmiştir. Sistemin termodinamik türü belirlerken, döner fırın ve soğutma bölümü bir sistem olarak kabul edildiğinde sisteme enerji giriş ve çıkışı; kütle, ısı transferi ve iş şeklinde olmaktadır. Sistemin sınırları Şekil 4.6'daki gibi belirlenmiştir.



Şekil 4.6 Sistem sınırına giren ve çıkan enerji akış şeması.

Fabrikanın kütle ve enerji analizi yapılırken aşağıda sıralanan kabuller yapılmıştır;

- ✓ Döner fırın sistemine dışarıdan bir ısı girişi yoktur. Ancak soğutma bölümünde çok yüksek bir enerji girişi olduğu için bu hesaplamalara katılmıştır.
- ✓ Döner fırının döndürülmesi için gerekli elektrik enerjisi sisteme dahil edilmiştir.
- ✓ Sistemin kinetik ve potansiyel enerji değişimi ile, bağlantı elemanlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir.
- ✓ Referans ortam (çevre sıcaklığı) 25 °C (298 K)'dir. Çevre basıncı 1 atm (101,26 kPa) kabul edilmiştir. Sisteme giren ve çıkan gazlar ideal gaz olarak kabul edilmektedir.

Sisteme giren ve çıkan maddelerin enerjilerinin bulunması için sisteme giren ve çıkan maddelerin sıcaklıkları, kütleli debileri ve özgül ısılarının bilinmesi gerekmektedir. Bilinen bazı maddelerin özgül ısılarının sıcaklığa göre değişimi tablolardan okunmuş, verilmeyen sıcaklıklarda değerler interpolasyon yapılarak bulunmuştur. Ancak bazı maddelerin özgül ısı değerleri normal koşullar için verilmiştir. Özgül ısı değeri sıcaklığa göre değişim gösterdiği için Eşitlik 4.3 ile yaklaşık değerleri bulunmuştur. Sarıkaya (1980) tarafından önerilen Eşitlik 4.3'de sıcaklık değeri Kelvin olarak alınmaktadır. Bu formüldeki a, b, c ve d değerleri özgül ısının bulunmasında kullanılan sabitlerdir. Bu sabitler her madde için ayrıca termodinamik tablolarda verilmiştir (Sarıkaya 1980).

$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^{-2} \quad (4.3)$$

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesine göre, döner fırın ve soğutma bölümü enerji dengesi Eşitlik 4.4 ile sağlanacaktır. Burada Q sisteme giren akışın enerjisidir. W sistemden elde edilen iştir. ΔE ise enerji değişimidir. Bu ifade daha açık bir şekilde Eşitlik 4.5'de gösterilmiştir.

$$Q - W = \sum m_{\dot{c}} e_{\dot{c}} - \sum m_{\dot{g}} e_{\dot{g}} = \Delta E \quad (4.4)$$

$$Q - W = \sum m_{\dot{c}} \left(h_{\dot{c}} + \frac{V_{\dot{c}}^2}{2} + g \cdot z_{\dot{c}} \right) - \sum m_{\dot{g}} \left(h_{\dot{g}} + \frac{V_{\dot{g}}^2}{2} + g \cdot z_{\dot{g}} \right) \quad (4.5)$$

Burada kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmektedir. Bu yüzden enerji denkleminde maddelerin sıcaklıklarından dolayı sahip olduğu enerjiler sisteme giren ve çıkan enerjiler

olarak esas alınacaktır. Mutlak sıfır yani 0 Kelvin entropinin minimum değere ulaştığı teorik bir sıcaklık olup, atomik titreşimlerin minimuma indirildiği noktadır. Bu sıcaklıkta maddelerin enerjileri yok kabul edilmektedir. Bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında maddeler bir enerjiye sahip olmaktadır. Bu yüzden sisteme giren ve çıkan maddelerin enerjileri bulunurken referans sıcaklık 0 K alınacaktır. Döner fırına giren Kuru kömürün ortalama ısıl değeri 6627 kcal/kg'dır. Bu değer 1 kg kömürün yanmasıyla açığa çıkacak olan kalori değeridir. Bu değer 4,1868 kJ/kcal değeri ile çarpılırsa 1 kg kömürün yanması sonucu çıkan ısı değeri joule olarak verilecektir. Döner fırına giren tüm kömürün yanması sonucu çıkan ısı ise giren tüm kömür kütlesiyle, yani 6395,8 kg ile çarpılarak bulunur. Kömürün yanma sonucu ortaya çıkardığı enerji sisteme ısı ile enerji giriştir. Döner fırının dönmesini sağlayan motorun gücü 180 kWh'dir. Bu güç sisteme iş ile giren bir enerjidir. Tablo 4.4 ve Tablo 4.5'da döner fırına giren ve çıkan enerjiler verilmiştir.

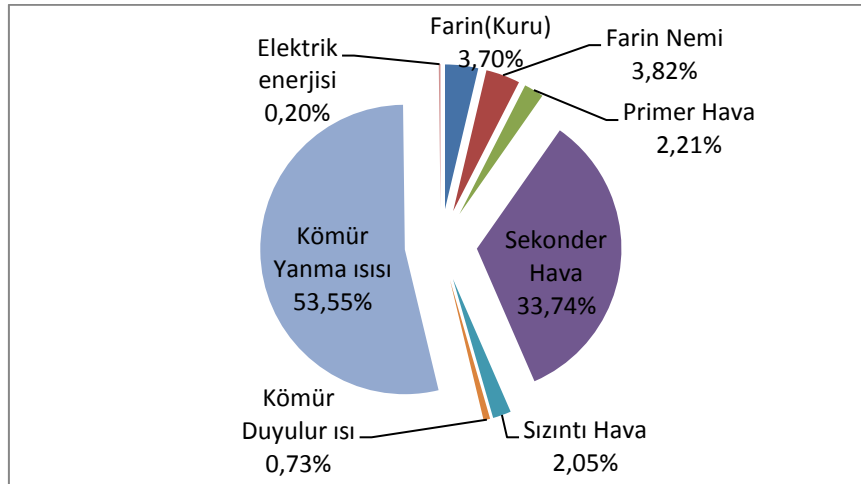
Tablo 4.4 Döner fırına kütle, ısı ve iş ile enerji girişi.

DÖNER FIRINA GİREN ENERJİLER					
Sıra No	Giren Maddeler	Kütlesel debi	Sıcaklık	Cp	Q
Sisteme Kütle ile Enerji Girişi		(kg/h)	(K)	(kJ/kgK)	(kJ/h)
1	Farin(Kuru)	45.504	303,2	0,888	12.251.585,92
2	Farin Nemi	22.412,4	303,2	1,864	12.666.725,00
3	Primer Hava	23.913	303	1,012	7.334.852,38
4	Sekonder Hava	77.298,87	1233	1,173	111.798.051,37
5	Sızıntı Hava	21.748,83	308	1,013	6.782.540,10
7	Kömür Duyulur ısı	6.395,8	308	1,234	2.430.470,52
Sisteme Isı ile Enerji girişi		Kütlesel Debi (kg/h)	KuruKömür Ort.ısıldeğer kcal/kg	1cal=4,1868J	Q (kJ/h)
8	Kömür Yanma ısısı	6.395,8	6627	4,1868	177.457.378,16
Sisteme İş ile Enerji Girişi		Motorun Gücü (kW)		1kWh=3600kJ	Q (kJ/h)
9	Elektrik enerjisi	180		3600	648.000
Toplam=					331.369.603,44

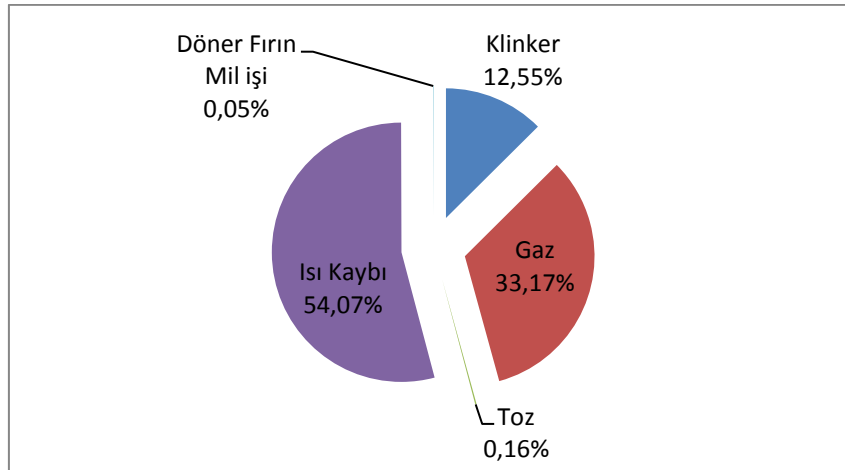
Tablo 4.5 Döner fırından kütle, ısı ve iş ile enerji çıkışı.

DÖNER FIRINDAN ÇIKAN ENERJİLER					
Sıra No	Çıkan Maddeler	Kütlesel debi	Sıcaklık	Cp	Q
Sistemden Kütle ile Enerji Çıkışı		(kg/h)	(K)	(kJ/kgK)	(kJ/h)
1	Klinker	30.000	1373	1,0098	41.593.662
2	Gaz	166.023	550	1,2036	109.905.221,08
3	Toz	1.250	513	0,84515	541.952,438
Sistemden Isı ile Enerji Çıkışı		(kJ/h)			
4	Isı Kaybı	179.178.665,07			
Sistemden İş ile Enerji Çıkışı		2 x π	n(dev/sn)	T(kNm)	1kWh=3600kJ
5	Döner Fırın Mil işi	6,286	0,03333	199	150.102,86
Toplam=					331.369.603,44

Döner fırından taşınım ve ışınlama ısı kaybı olmaktadır. Döner fırındaki ısı kaybı giren enerjilerin çıkan enerjilerin farkından bulunmuştur. Motorun dönmesi için gerekli olan 180 kWh güç, motor çıkış milinin bağlı olduğu redüktör ve devri azaltmak için kullanılan çarklardan sonra oluşan kayıplar yaklaşık olarak 497897 kJ olmaktadır. Engin ve Ari (2005) çalışmalarında 600 ton.klinker/gün kapasiteli kuru tip döner fırında bacadan kaybedilen enerji 25 MW'a yaklaşık olarak 92.307.692 kJ'e tekabül etmektedir. Bu değer yaş sistemle üretim yapan Bartın çimento fabrikasındaki değerlerle yaklaşık olarak aynıdır. Aradaki fark ise Bartın çimento fabrikasının sisteminin yaş üretim olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi sisteme giren enerjilerin yaklaşık % 87,3 ünü kömürün yanma ısı ve sekonder hava teşkil etmektedir. Şekil 4.8'de ise döner fırında çıkan enerjiler gösterilmiştir. Burada ısı kaybı % 54 civarındadır ve döner fırın bacasından atılan ısı konut ısıtmada kullanılmaktadır.



Şekil 4.7 Döner fırın sistemine giren enerji yüzde dağılımları.



Şekil 4.8 Döner fırın sisteminden çıkan enerji yüzde dağılımları.

Soğutucuya kütle, ısı ve iş ile enerji girişi Tablo 4.6'de ve soğutucudan kütle, ısı ve iş ile enerji çıkışı da Tablo 4.7'de verilmiştir. Döner fırından çıkmadan sıcaklığı 1723 K olan klinker önce sekonder hava ile soğutulup sıcaklığı 1233 K e düşürülmekte ve soğutucuya girmektedir. Daha sonra soğutucu bölümünde 1 ve 2 nolu fanlar ile soğutulmaktadır (BarÇim 2010).

Tablo 4.6 Soğutucuya kütle, ısı ve iş ile enerji girişi.

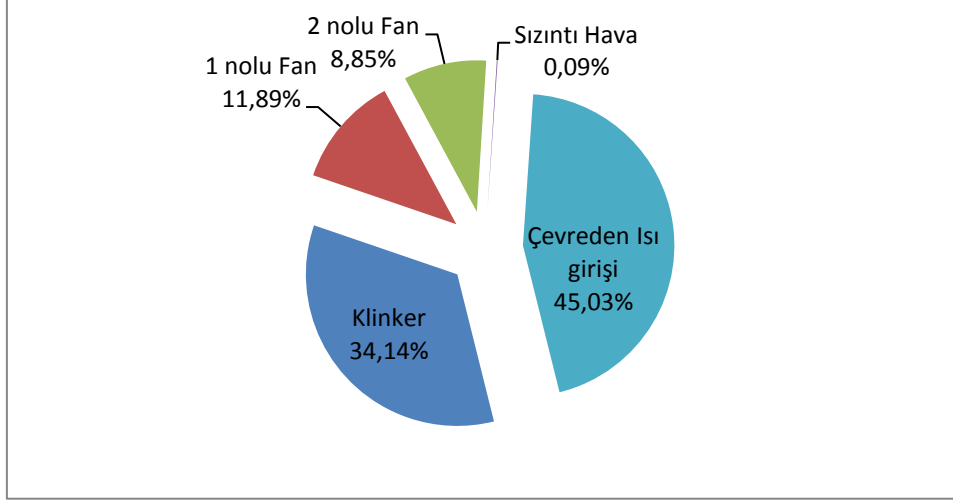
SOĞUTUCUYA GİREN ENERJİLER					
Sıra No	Giren Maddeler	Kütleli debi (kg/h)	Sıcaklık (K)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
Sisteme Kütle ile Enerji Girişi					
1	Klinker	30.000	1373	1,0098	41.593.662
2	1 nolu Fan	46.006	311	1,0126	14.487.635,78
3	2 nolu Fan	34.245	311	1,0126	10.784.027,58
4	Sızıntı Hava	354,6	319	1,0130	114.587,93
Sisteme Isı ile Enerji Girişi					(kJ/h)
5	Çevreden Isı girişi				54.863.252,39
Toplam					121.843.165,67

Tablo 4.7 Soğutucudan kütle, ısı ve iş ile enerji çıkışı.

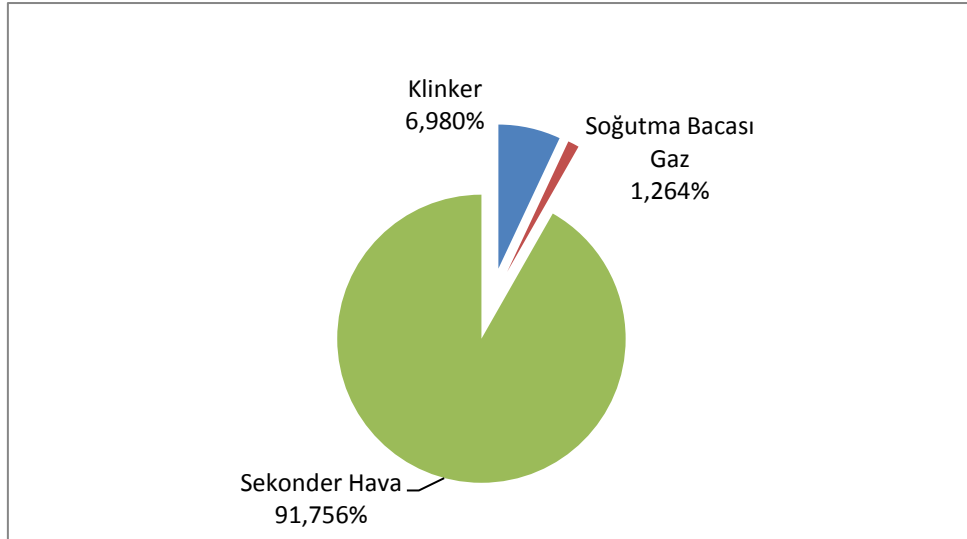
SOĞUTUCUDAN ÇIKAN ENERJİLER					
Sıra No	Çıkan Maddeler	Kütleli Debi (kg/h)	Sıcaklık (K)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
1	Klinker	30.000	379	0,748	8.504.760
2	Soğutma Bacası Gaz	3.307	458	1,017	1.540.354,30
3	Sekonder Hava	77.298,87	1233	1,173	111.798.051,37
Toplam					121.843.165,67

Soğutucu bölümüne çevreden ihmal edilemeyecek kadar büyük bir enerji girişi olmaktadır. Soğutma bacası, sisteme giren havanın fazla olduğu zaman çalıştırılmaktadır. Ölçümün yapıldığı 15.06.2011 tarihinde bacadan çekilen havanın kütleli debisi 3.307 kg/h'dir.

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, soğutucuya çevreden % 45,3 oranında ısı ile ve % 34,14 ile klinker yoluyla enerji girişi olmaktadır. Soğutucudan çıkan enerjiler de Şekil 4.10'da verilmiştir. Buna göre en büyük oran % 91, 76 ile sekonder havadır. Klinker yoluyla da % 6,98 oranında enerji çıkışı gerçekleşmektedir. Döner fırın ve soğutma bölümünün kütle denkliliği ve enerji denkliliği ayrı ayrı oluşturulduktan sonra tüm sistemin enerji denkliliği ve analizi yapılabilir.



Şekil 4.9 Soğutucuya kütle, ısı ve iş ile enerji girişi.



Şekil 4.10 Soğutucudan kütle, ısı ve iş ile enerji çıkışı.

Öncelikli olarak döner fırın ve soğutma bölümünün ayrı olarak kütle denklığı oluşturuldu. Daha sonra tüm sistemin kütle denklığı oluşturuldu. Termodinamiğin birinci kanunu olan enerji korunumundan hareketle döner fırın ve soğutma bölümünün her biri ayrı olarak enerji denklikleri oluşturuldu. Tablo 4.8’de döner fırın ve soğutucu bölümüne giren enerjiler, Tablo 4.9’da ise döner fırın ve soğutma bölümünde çıkan enerjiler verilmiştir.

Sistemden yaklaşık olarak 179.178.665 bir ısı kaybı gerçekleşmektedir. Ayrıca bacadan 109.905.221,08 kJ/h debi ile enerji çıkışı olmaktadır. Buradan toplam 289.083.886,1 kJ/kg ısı kaybı doğmaktadır. Ancak döner fırın yüzeyinden olan ısı kaybı 124.315.412,7 kJ/h olmakta, geri kalan enerji ise soğutma bölümüne aktarılmaktadır. Bu tüm sistemin verimi bulunurken ısı kaybı 124.315.412,7 kJ/h alınacaktır. Kuru sistemle üretim yapan çimento fabrikasında

sadece bacadan atılan enerji 163.384.771,31 kJ/h ayrıca fırın yüzeyinden atılan enerji ise 59.644.472,42 buradan toplam 223.029.243 kJ/h enerji kaybı olmaktadır (Söğüt 2005). Burada yaş sistem döner fırında kaybolan enerjinin yüksek olması fırının boyundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca yaş sistem fırında ön ısıtma döner fırın bölümünde sağlanmaktadır. Ön ısıtmalı kuru sistem fırın olan Balıkesir çimento fabrikasında fırının yaklaşık boyu 60 metre civarında iken, Bartın çimento fabrikasında ise yaklaşık 120 metredir. Bu aradaki uzunluk farkı yüzeyden kaybolan ısının yüksek olmasını doğrular niteliktedir.

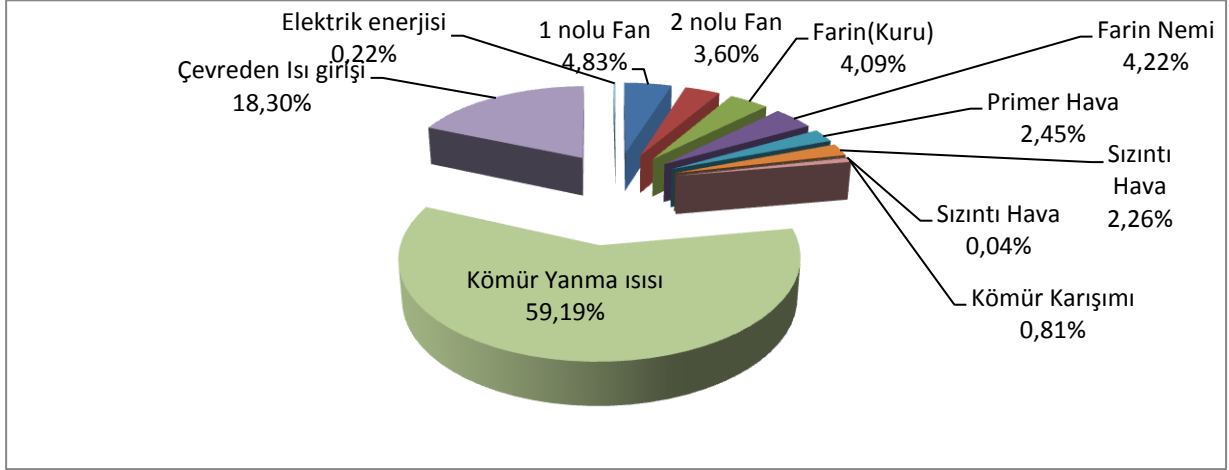
Tablo 4.8 Döner fırın ve soğutucu bölümü sistemine giren enerjiler.

DÖNER FIRIN VE SOĞUTUCU BÖLÜMÜNDEN GİREN ENERJİLER					
Sıra No	Giren Maddeler	Kütlesel debi (kg/h)	Sıcaklık (K)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
Sisteme Kütle ile Enerji Girişi					
1	1 nolu Fan	46.006	311	1,0126	14.487.635,78
2	2 nolu Fan	34.245	311	1,0126	10.784.027,58
3	Farin(Kuru)	45.504	303,2	0,888	12.251.585,92
4	Farin Nemi	22.412,4	303,2	1,864	12.666.725,00
5	Primer Hava	23.913	303	1,012	7.334.852,38
6	Sızıntı Hava	21.748,83	308	1,013	6.782.540,10
7	Sızıntı Hava	354,6	319	1,0130	114.587,93
8	Kömür Karışımı	6.395,8	308	1,234	2.430.470,52
Sisteme Isı ile Enerji girişi		Kütlesel debi (kg/h)	Kuru Kömür ort.ısııl değer kcal/kg	1cal=4,1868J	Q (kJ/h)
9	Kömür Yanma ısısı	6.395,8	6627	4,1868	177.457.378,16
10	Çevreden Isı girişi				54.863.252,39
Sisteme İş ile Enerji Girişi		Motorun Gücü (kW)		1kWh=3600kJ	(kJ/h)
11	Elektrik enerjisi	180		3600	648.000
Toplam		200.580			299.821.055,75

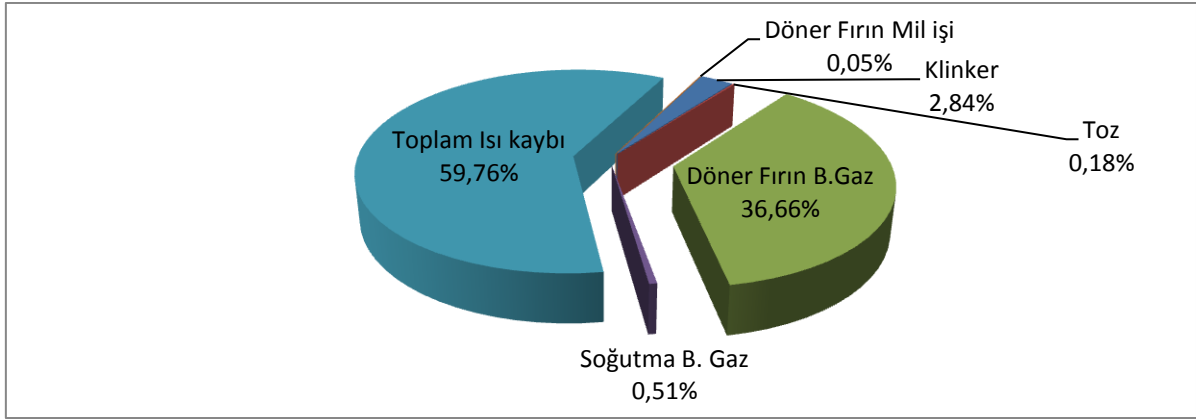
Tablo 4.9 Döner fırın ve soğutucu bölümü sisteminden çıkan enerjiler.

DÖNER FIRIN VE SOĞUTUCU BÖLÜMÜNDEN ÇIKAN ENERJİLER					
Sıra No	Giren Maddeler	Kütlesel debi (kg/h)	Sıcaklık (K)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
Sisteme Kütle ile Enerji Çıkışı					
1	Klinker	30.000	379	0,748	8.504.760
2	Toz	1.250	513	0,84515	541.952,438
3	Döner Fırın B.Gaz	166.023	550	1,2036	109.905.221,08
4	Soğutma B. Gaz	3307	458	1,017	1.540.354,302
Sisteme Isı ile Enerji Çıkışı					Q (kJ/h)
5	Toplam Isı kaybı				179.178.665,07
Sisteme İş ile Enerji Çıkışı					(kJ/h)
6	Döner Fırın Mil işi				150.102,86
Toplam		200.580			299.821.055,75

Şekil 4.11’de döner fırın soğutucu bölümüne giren enerjiler gösterilmiştir. Giren enerji olarak % 59,19 ile kömürün ısı enerjisi önde gelmektedir. Bunu % 18,30 ile çevreden sistemi ısı girişi izlemektedir. Şekil 4.12’de gösterilen döner fırın soğutucu bölümünden çıkan enerjiler incelendiğinde, % 59,76 ile ısı kaybı başta gelmektedir. Bunu % 36,66 ile döner fırın baca gazı yoluyla ısı kaybı takip etmektedir.



Şekil 4.11 Döner fırın ve soğutma bölümüne giren enerjilerin yüzdeleri.



Şekil 4.12 Döner fırın ve soğutma bölümünden çıkan enerjilerin yüzdeleri.

4.1.3 Döner Fırın ve Soğutma Bölümü Enerji Verimliliği

Döner fırın ve soğutma bölümü için önce kütle denkliği oluşturulmuştur. Sisteme giren ve çıkan maddelerin sıcaklıklardaki enerjileri bulunmuştur. Daha sonrada enerji dengesinin de sağlandığı görülmüştür. Verimlilik; hem her sistem için ayrı bulunacak, hem de sistemin genel verimi hesaplanacaktır. Herhangi bir sistemin veriminin en genel tanımı çıkan enerjinin giren enerjiye oranı olarak yapılmaktadır. Bu Eşitlik 4.6’daki gibi hesaplanabilir.

$$\eta_{enerji} = \sum \frac{m_{\xi} e_{\xi}}{m_g e_g} \quad (4.6)$$

Ancak soğutma bölümü için bu formül yerine klinkerin kaybettiği ısının, klinkerdeki toplam ısıya oranı şeklinde hesaplanmaktadır. Bu verim genellikle % 90-95 seviyelerinde çıkmaktadır. Bu soğutma sisteminin enerji veriminin düşük çıkmasının en büyük sebebi sisteme sızdırmazlıklardan giren enerjiden kaynaklanmaktadır. Bu ısı soğutucunun verimini düşürmektedir. Kuleli'ye (2009) göre, soğutma bölümünün verimi de Eşitlik 4.7 kullanılarak, bulunur. Tablo 4.10'da döner fırın ve soğutma bölümünün verimleri verilmiştir.

$$\eta_{soğutucu} = \frac{Klink.Kay.Isı}{Klink.Top.Duyulur.Isı} \quad (4.7)$$

Tablo 4.10 Döner fırın ve soğutma bölümünün verimleri.

Sistem	Giren Enerji(kJ/kg)	Çıkan Enerji(kJ/kg)	Kaybolan enerji (kJ/kg)	Verim (η)
Döner fırın bölümü	331.369.603,44	152.190.938,40	179.178.665,04	0,46
Döner fırın ve soğutma	244.957.803,40	120.642.390,80	124.315.412,6	0,49
	Klink. Toplam Duyulur Isı	Klink.Çıkış enerjisi	Klink.Kaybettiği Isı	η
Soğutma Bölümü	41.593.662	8.504.760	33.088.902	0,7955

Döner fırın bölümünde 179.178.665,04 kJ/h gibi çok büyük bir enerji kaybı gerçekleşmektedir. Buda döner fırın bölümünün verimini oldukça düşürmektedir. Soğutma bölümüne de çevreden 54.863.252.65 kJ/h enerji girişi olmaktadır. Bu da soğutucu bölümünün verimin azaltmaktadır. Genel sistem veriminde bakıldığında % 49 görülmektedir. 2004 yılında Söğüt tarafından yapılan bir çalışmada kuru sistem bir fabrikanın verimi % 61 civarında çıkmıştır. Bartın çimento fabrikasının veriminin düşük çıkmasının en büyük sebebi yaş fırın ile üretim yapan bir fabrika olmasından kaynaklanmaktadır. Fabrika 2011 yılında kuru sisteme geçme çalışmalarına başlamış olup, inşaatlar halen devam etmektedir.

4.1.4 Döner fırın ve soğutucu bölümünün ekserji analizi

Ekserjinin; fiziksel ekserji, kimyasal ekserji, kinetik ekserji, potansiyel ekserji ve radyasyon ekserjisi olmak üzere çeşitleri vardır. Kinetik ve potansiyel enerji doğrudan kullanılabilir işi temsil ettiği için, bunlar doğrudan yararlı iş yani ekserji olarak tanımlanır. Ekserji transferi

enerjide de olduğu gibi kütle, ısı ve işle gerçekleşmektedir. Çimento fabrikasında sistem sınırlarından kütle, ısı ve iş ile ekserji transferi gerçekleşmektedir. Bunlar tablolarda ayrıca belirtilecektir. Sisteme giren gazlar bulunduğu ve yanma reaksiyonları gerçekleştiği için fiziksel ekserjinin yanında kimyasal ekserjilerde hesaplanacaktır. Sistemin ekserji analizi yapılırken kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilecektir. Çevre sıcaklığı 298 K olarak alınmıştır. Referans basıncı ise sıcaklığın 298 K olarak alındığında çıkan basınç değeri (101,26 kPa) alınacaktır. Öncelikle enerji analizinde gerçekleştirildiği gibi her sistem ayrıca incelenecektir. Daha sonra tüm sistem bir incelenecek ve döner fırın ve soğutma sisteminin ekserji verimi bulunacaktır. Maddelerin fiziksel ekserjileri hesaplanırken Eşitlik 4.8 kullanılacaktır. Burada entalpi değeri (h) Eşitlik 4.9 ile hesaplanabilir. Buradaki entropi değeri ise Eşitlik 4.10'daki gibi hesaplanabilir. Sistemin kimyasal ekserjisi ise Eşitlik 4.11 ile bulunacaktır.

$$Ex_{fiziksel} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (4.8)$$

$$\Delta H = \dot{m}(h - h_0) = \dot{m} \int_{T_0}^T c_p \cdot dT \quad (4.9)$$

$$\Delta S = \dot{m} \int_{T_0}^T c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4.10)$$

$$Ex_{kim} = \dot{m} RT_0 \cdot \ln\left(\frac{P_0}{P_{00}}\right) \quad (4.11)$$

Buradaki P_0 referans çevre basıncıdır. P_{00} ideal gazın kısmi basıncıdır. R ise gaz sabitidir. Bir molünün ekserjisi bulunmak isteniyorsa R yerine Üniwersal gaz sabitini (\bar{R}) kullanılmalıdır. Eşitlik 4.11 ideal bir gazın kimyasal ekserjisini bulmak için kullanılmaktadır. Eğer karışımın kimyasal ekserjisi bulunmak isteniyorsa o zaman her bir molekül için ayrıca Eşitlik 4.12 ile hesaplanıp, maddeyi oluşturan tüm moleküllerin kimyasal ekserjileri bulunduktan sonra birbiriyle toplanıp karışımın kimyasal ekserjisi hesaplanır (Kotas 1985).

$$\sum Ex_{kimyasal} = \dot{m} \left(\sum_i x_i ex_{kimyasal} + RT_0 \sum_i x_i \ln(x_i) \right) \quad (4.12)$$

Burada x_i molekülün mol fraksiyonunu yani karışım içindeki mol yüzdesidir. $R.T_0 \sum_i x_i \ln(x_i)$ formülü her zaman negatif bir değer alacağından karışımın ekserjisi moleküllerin toplam ekserjisinden az çıkacaktır. Fosil katı bir yakıtın ekserjisi ise Eşitlik 4.13 ile hesaplanmaktadır.

$$Ex_{kim,Katı,yakıt} = m \varphi (NCV)^\circ \quad (4.13)$$

Bu formüldeki $(NCV)^\circ$ yakıtın net kalorifik değerini vermektedir. Katı ve sıvı yakıtların kimyasal ekserjisi yakıtın net kalorifik değerinden büyüktür. NCV değeri yakıtın alt ısı değeri alınacaktır. φ yakıtın bileşenlerinin kütle oranlarını vermektedir. φ değeri oksijenin kütleli fraksiyonunun karbonun kütleli fraksiyona oranına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Eğer $\frac{O}{C} \leq 0,667$ ise Eşitlik 4.14 kullanılır. Bu formüldeki o,c,h ve n sırasıyla katı yakıt

içindeki oksijen, karbon, hidrojen ve azotun kütleli fraksiyonudur. Eğer $0,667 < \frac{O}{C} < 2,67$

olursa Eşitlik 4.15 kullanılır.

$$\varphi = 1,0437 + 0,1882 \frac{h}{c} + 0,061 \frac{o}{c} + 0,0404 \frac{n}{c} \quad (4.14)$$

$$\varphi = \frac{1,043841,882 \frac{h}{c} - 0,2509(1 + 0,7256 \frac{h}{c}) + 0,0383 \frac{n}{c}}{1 - 0,3035 \frac{o}{c}} \quad (4.15)$$

Çimento fabrikasında kullanılan pülverize kömürün $\frac{O}{C}$ oranı 0,667 den küçük olduğu için

Eşitlik 4.13 kullanılacaktır. Tablo 4.11'de döner fırına giren enerji ve ekserjiler gösterilmektedir. Sisteme giren katı maddelerin içindeki her bir molekülünün standart kimyasal ekserjisinin toplamı katı maddenin kimyasal ekserjisini vermektedir (Savaş 2004). Döner fırın sistemine giren primer, sekonder ve sızıntı havanın kimyasal ekserjisi 0 dır. Buradaki N_2 , O_2 ve Ar gibi elementlerin kimyasal ekserjisi sıfır olduğundan ve diğer moleküllerinde çok düşük yüzdelerinden dolayı havanın kimyasal ekserji 0 alınacaktır (Kotas 1995). Bu yüzden sisteme giren havaların kimyasal ekserjisi Tablo 4.11'de

belirtilmeyecektir. Ancak sisteme giren diğer maddelerden kömürün kimyasal ekserjisi katı yakıtların kimyasal ekserjisi formülünden, farininde içindeki moleküllerin standart kimyasal ekserjisi toplamından bulunacaktır. Kuru farin ve nemi ayrı hesaplanmış ve toplam değeri Tablo 4.11’ de gösterildiği gibi yazılmıştır. Tablo 4.12’de döner fırından çıkan enerji ve ekserjiler gösterilmektedir. Döner fırın sisteminden çıkan gazın ekserjisi hesaplanırken gaz karışımlarının kimyasal ekserji formülünden hesaplanmıştır. Burada bacadan atılan gazın havadan farkı, kömürün yanması ve farinin kimyasal reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan gazlar ile havanın karışması sonucu oluşan gazlardan kaynaklanmaktadır.

Döner fırın sistemine saatte 288.196.735 kJ ekserji girişi olmaktadır. Sistemden çıkan ekserji ise 100.325.810 kJ dür. Burada döner fırın sisteminde giren ve çıkan maddelerin her biri için fiziksel ekserjileri hesaplanmıştır. Kimyasal ekserjileri bulunurken ise havanın kimyasal ekserjisi 0 alınmış, sistemde yakılan kömürün ekserjisi katı yakıtların kimyasal ekserji formülünden hesaplanmış ve katı maddelerde ise maddenin içindeki moleküllerin standart kimyasal ekserjileri toplanarak bulunmuştur. Döner fırın bölümünden baca gazı ile 50.276.611,84 kJ/kg ekserji çıkışı olmaktadır.

Tablo 4.11 Döner fırına giren enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji.

Döner Fırına Giren Enerjiler								Kütle ile ekserji Girişi [Ex.kütle=(m.ex)]		
Madde Adı	Madde Bileşeni	%	Kütleli Debi (kg/h)	Cp kJ/kgK	To (K)	Ts (K)	Q (kJ/h)	Entalpi(kJ/h) H=m.cp.ΔT ΔT=Ts-To	Entropi (kJ/kgK) ΔS=Ss-So ΔS=m.cp.ln(Ts/To)	Fiziksel Ekserji (kJ/h) Ex=ΔH-(To.ΔS)
Primer hava	N ₂	77,37	18501,72	1,041	298	303	5.836.989,30	96.319,96	320,54	799,13
	O ₂	20,76	4964,40	0,926	298	303	1.393.638,79	22.997,34	76,53	190,80
	CO ₂	0,03	7,17	0,833	298	303	1.810,71	29,88	0,10	0,25
	Ar	0,92	220,00	0,520	298	303	34.663,57	572,01	1,90	4,75
	H ₂ O	0,01	2,39	1,865	298	303	1.351,18	22,30	0,07	0,18
	Diğer	0,91	217,61	1,007	298	303	66.397,70	1.095,67	3,65	9,09
TOPLAM		100	23.913,30	1,0123	298	303	7.334.852,38	121.037,17	402,80	1.004,20
Sekonder hava	N ₂	77,37	59.806,14	1,18	298	1233	87.014.339,10	65.984.109,54	100219,07	36.118.827,82
	O ₂	20,76	16.047,25	1,16	298	1233	22.952.054,17	17.404.842,37	26435,11	9.527.180,25
	CO ₂	0,03	23,19	1,25	298	1233	35.741,07	27.102,92	41,16	14.835,78
	Ar	0,92	711,15	0,52	298	1233	455.960,68	345.760,94	525,15	189.264,96
	H ₂ O	0,01	7,73	2,5	298	1233	23.827,38	18.068,61	27,44	9.890,52
	Diğer	0,91	703,42	1,5	298	1233	1.300.974,77	986.546,15	1498,40	540.022,30
TOPLAM		200	77.298,87	1,173	298	1233	111.798.051,37	84.777.922,17	128763,79	46.406.311,99
Sızıntı hava	N ₂	77,37	16827,07	1,0412	298	308	5.396.266,27	175.203,45	578,28	2.875,50
	O ₂	20,76	4515,06	0,9275	298	308	1.289.816,36	41.877,15	138,22	687,30
	CO ₂	0,03	6,52	0,8457	298	308	1.699,51	55,18	0,18	0,91
	Ar	0,92	200,09	0,52	298	308	32.046,29	1.040,46	3,43	17,08
	H ₂ O	0,01	2,17	1,868	298	308	1.251,31	40,63	0,13	0,67
	Diğer	0,91	197,91	1,008	298	308	61.445,28	1.994,98	6,58	32,74
TOPLAM		300	21748,83	1,013	298	308	6.782.540,10	220.212,34	726,84	3.614,21

Tablo 4.11 (devam ediyor).

Madde Adı	Bileşen	%	(kg/h)	C _p kJ/kgK	T _o	T _s	Q (kJ/h)	Entalpi	Entropi	Fiziksel Ekserji					
Kömür	C	68,8	4314,03	0,767	298	308	1.020.059,25	33.118,81	109,31	543,56	Kömürün Yanma ısı kcal/kg	Hu (kJ/kg)	φ=1,0437 +0,1881(h/c) +0,061(o/c) +0,0404(n/c)	Kömürün Kimyasal Ekserjisi Ex.kömür =m.φ.Hu	
	H	4	255,83	10,15	298	308	799.860,79	25.969,51	85,72	426,22					
	N	0,9	57,56	1,04	298	308	18.438,32	598,65	1,98	9,83					
	S	1,2	76,75	0,719	298	308	17.015,26	552,44	1,82	9,07					
	O	9	575,62	0,99	298	308	175.518,66	5.698,66	18,81	93,53					
	KÜL	16,1	1029,72	1,26	298	308	399.615,21	12.974,52	42,82	212,94					
	Toplam	100	6.395,8	1,23	298	308	2.430.470,52	78911,38	260,46	1.295,12	6627	27746	1,06315	188.663.811	
			Kuru Kömür ort.ısııl değeri kcal/kg	Kütlesel debi (kg/h)	Yanma Sıc.(K)	T _o (K)	cal->J	Q(kJ/h)	Döner Fırına Isı ile ekserji Girişi [Ex.ısı=Q x (1-(T _o /T))]		Molekül	Mol Kütle si	kJ/kmol	kJ/kg	Standart Kimyasal ekserji (kJ/h)
Kömür (Yanma ısı)		6627	6.395,8	1473	298	4,19	177.457.378	Kömürün kimyasal ekserjisinde hesaplanmıştır.							
Farin	SiO ₂	12,14	5524,19	0,72	298	303	1.205.953,40	20682,58	68,81	178,38	SiO ₂	60	1900	32	174.932,77
	Al ₂ O ₃	3,65	1660,90	0,75	298	303	377.688,25	6477,50	21,55	55,87	Al ₂ O ₃	102	200400	1.965	3.263.176
	Fe ₂ O ₃	1,51	687,11	0,63	298	303	131.249,25	2250,98	7,49	19,41	Fe ₂ O ₃	160	16500	103	70.858,35
	CaO	43,6	19839,7	1,02	298	303	6.135.726,68	105230,14	350,08	907,57	CaO	56	110200	1.968	39.041.833
	MgO	1,57	714,41	0,94	298	303	203.613,63	3492,05	11,62	30,12	MgO	40	66800	1.670	1.193.070
	SO ₃	0,09	40,95	0,64	298	303	7.946,97	136,29	0,45	1,18	SO ₃	80	301939	3.774	154.568,82
	(KK)CO ₂	36,2	16472,47	0,83	298	303	4.145.395,84	71095,18	236,52	613,17	CO ₂	44	19870	452	7.438.817,58
	Diğer	1,24	564,25	0,35	298	303	59.878,25	1026,94	3,42	8,86	Diğer	50	1000	20	11.285,01
	Toplam	100	45.504	0,888	298	303	12.262.623,4	210308,84	699,65	1813,84	Toplam	592			
F. Nemi	H ₂ O	33	22.412,	1,864	298	303	12.666.725	217239,35	722,70	1873,61	H ₂ O	18	900	50	1.120.622
Nemli Farin	Toplam		67.916		298	303	24.929.348,3	427.548,19	1.422,35	3687,45		610	719509	10033	52.469.165
Elektrik enerjisi							648.000	Elektrik Fiziksel Ekserji		648.000					
Genel toplam enerji							331.380.641	Topla fiziksel ekserji		47.063.913	Toplam kimyasal ekserji		241.132.822		
										Fiziksel ve kimyasal ekserji toplamı		288.196.735			

Tablo 4.12 Döner fırından çıkan enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji.

Madde Adı	Madde Bileşeni	%	Kütleli Debi (kg/h)	Cp kJ/kgK	To (K)	Ts (K)	Q (kJ/h)	Entalpi(kJ/h) H=m.cp.ΔT ΔT=Ts-To	Entropi (kJ/kgK) ΔS=Ss-So ΔS=m.cp.ln(Ts/To)	Fiziksel Ekserji (kJ/h) Ex=ΔH-(To.ΔS)	Mol Kütle	R kJ/K	P _∞	xi	Karışımın Kimyasal ekserjisi m.∑xi(ex+R.To.ln(xi))	
Gaz	N ₂	64,5	107.069	1,076	298	550	63.398.841	29.048.196	70.641	28.884.296	28	0,296	74,77	0,64	0	
	O ₂	2,1	3500	1,1	298	550	2.117.500	970.200	2.359	806.300	32	0,259	2,44	0,02	0	
	CO ₂	18,9	31.333	1,052	298	550	18.142.366	8.312.503	20.215	8.148.602	44	0,188	21,88	0,12	-124.781,7	
	SO ₂	0,09	147,37	0,763	298	550	61.860,03	28.343	69	7.803,16	64	0,129	0,10	0,01	-2,13	
	CO	0,005	8,16	1,09	298	550	4.893,98	2.242	5	617,34	28	0,296	0,01	0,0	0,00	
	H ₂ O	14,0	23.163	2,02	298	550	25.734.231	11.790.957	28.674	11.627.057	18	0,461	16,18	0,22	208.798,6	
	Diğer	0,5	802,03	1,01	298	550	445.527,67	204.133	496	40.232,68	50	0,166	0,56	0,003	-77,01	
Toplam		100,0	166.023	1,203	298	550	109.905.221	50.356.574	122.459	50.192.674	264	0,298	115,94		83.937,84	
											Molekül	Mol K.	kJ/kmol	kJ/kg	Standart Kim.Ex (kJ/h)	
Klinker	C ₃ S	3CaO	37,1	11.117	0,998	298	1373	20.697.687	16.205.399,2	23.029,15	9.342.711	C ₃ S	168	219.800	964	14.561.750
		SiO ₂	13,3	3987,72									60			
	C ₂ S	2CaO	16,2	4861	0,995	298	1373	10.202.980	7.988.495,2	11.352,28	4.605.515	C ₂ S	112	95.700	556	4.154.604
		SiO ₂	8,7	2606									60			
	C ₃ A	3CaO	6,7	2013,2	0,98	298	1373	4.327.257	3.388.056	4.814,70	1.953.277	C ₃ A	168	500.600	1.854	5.962.702
		Al ₂ O ₃	4,0	1202,8									102			
	C ₄ AF	4CaO	4,6	1379	0,9	298	1373	3.688.565	2.887.987,5	4.104,1	1.664.978	C ₄ AF	224	667.000	1.401	4.182.762
		Al ₂ O ₃	2,0	614,9									102			
		Fe ₂ O ₃	3,3	991,1									150			
	MgO	1,4	432	0,82	298	1373	486.371,52	380.808	541	219.543	MgO	40	66.800	1.670	721.440	
SO ₃	0,2	60	1,17	298	1373	96.384,60	75.465	107	43.506	SO ₃	80	301939	3.774	226.454		
Diğer	2,5	735	1,54	298	1373	1.554.098	1.216.793	1.729	701.503	Diğer	50	1.000	20	14.700		
Toplam		100,0	30.000	1,009	298	1373	41.593.662	32.566.050	46.279	18.774.929		1316			29.824.413	

Tablo 4.12 (devam ediyor).

Madde Adı	Madde Bileşeni	%	(kg/h)	C _p kJ/kgK	T _o	T _s	Q (kJ/h)	Entalpi	Entropi	Fiziksel Ekserji	Molekül	Mol K.	kJ/kmol	kJ/kg	Standart Kim. Ex(kJ/h)	
Toz	C ₃ S	3CaO	37,0	463	0,842	298	513	271.694,034	113.867,87	287,68	28.139,48	C ₃ S	168	219.800	964	606.378,07
		SiO ₂	13,3	166								60				
	C ₂ S	2CaO	16,2	202	0,831	298	513	132.580,233	55.564,82	140,38	13.731,40	C ₂ S	112	95.700	556	173.038,95
		SiO ₂	8,7	109								60				
	C ₃ A	3CaO	6,7	84	0,843	298	513	57.949,506	24.286,83	61,36	6.001,86	C ₃ A	168	500.600	1.854	248.445,93
		Al ₂ O ₃	4,0	50								102				
	C ₄ AF	4CaO	4,6	57	0,824	298	513	52.416,288	21.967,84	55,50	5.428,78	C ₄ AF	224	667.000	1.401	173.756,30
		Al ₂ O ₃	2,0	25									102			
		Fe ₂ O ₃	3,4	42									150			
		MgO	1,4	18	1,100	298	513	10.157,40	4.257,00	11	1.052,01	MgO	40	66.800	1.670	30.060,00
	SO ₃	0,2	3	0,827	298	513	1.273,215	533,61	1	131,87	SO ₃	80	301939	3.774	11.322,71	
	Diğer	2,5	31	0,999	298	513	15.881,76	6.656,10	17	1.644,88	Diğer	50	1.000	20	620,00	
	Toplam	100	1250	0,845	298	513	541.952,438	227.134,06	574	56.130,28		1316			1.243.621,96	
Döner Fırın Mil işi							150.102,86	Elektrik Fiziksel Ekserji	150.102,86							
Isı kaybı	Yok Olan Enerji						179.178.665,1									
Genel toplam enerji							331.369.603,45	Toplam fiziksel ekserji	69.173.836,14	Toplam kimyasal ekserji		31.151.972,95				
Fiziksel ve kimyasal ekserji toplamı															100.325.810	

Tablo 4.13 Soğutucuya giren enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji.

Madde Adı	Madde Bileşeni	%	Kütleli Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	To (K)	Ts (K)	Q (kJ/h)	Entalpi(kJ/h) H=m.cp.ΔT ΔT=Ts-To	Entropi (kJ/kgK) ΔS=Ss-So ΔS=m.cp.ln(Ts/To)	Fiziksel Ekserji (kJ/h) Ex=ΔH-(To.ΔS)
1 nolu Fan	N ₂	77,37	35595	1,04087	298	311	11.522.476,75	481.647	1.582,00	10.209,85
	O ₂	20,76	9550,89	0,93	298	311	2.762.403,08	115.470	379,27	2.447,71
	CO ₂	0,03	13,80	0,8553	298	311	3.671,27	153	0,50	3,25
	Ar	0,92	423,26	0,52	298	311	68.449,13	2.861	9,40	60,65
	H ₂ O	0,01	4,60	1,87	298	311	2.675,58	112	0,37	2,37
	Diğer	0,91	418,66	1,008	298	311	131.243,76	5.486	18,02	116,29
TOPLAM		100	46.006	1,01256	298	311	14.487.635,78	605.592	1.989,11	12.837,22
2 nolu Fan	N ₂	77,37	26495,52	1,04087	298	311	8.576.879,55	358.519	1.177,58	7.599,81
	O ₂	20,76	7109,31	0,93	298	311	2.056.224,46	85.952	282,31	1.821,98
	CO ₂	0,03	10,27	0,8553	298	311	2.732,75	114	0,38	2,42
	Ar	0,92	315,06	0,52	298	311	50.950,85	2.130	7,00	45,15
	H ₂ O	0,01	3,42	1,87	298	311	1.991,60	83	0,27	1,76
	Diğer	0,91	311,63	1,008	298	311	97.692,71	4.084	13,41	86,56
TOPLAM		100	34.245,21	1,013	298	311	10.784.027,58	450.779	1.480,62	9.555,52
Sızıntı Hava	N ₂	77,37	274,35	1,041	298	319	91.107,21	5.998	19,45	201,90
	O ₂	20,76	73,61	0,94	298	319	22.074,18	1.453	4,71	48,92
	CO ₂	0,03	0,11	0,86	298	319	29,18	2	0,01	0,06
	Ar	0,92	3,26	0,52	298	319	541,15	36	0,12	1,20
	H ₂ O	0,01	0,04	1,871	298	319	21,16	1	0,005	0,05
	Diğer	0,91	3,23	1,009	298	319	1.038,63	68	0,22	2,30
TOPLAM		100	354,60	1,013	298	319	114.587,93	7.543	24,46	253,93

Tablo 4.13 (devam ediyor).

Madde Adı	Madde Bileşeni	%	(kg/h)	Cp kJ/kgK	To	Ts	Q (kJ/h)	Entalpi	Entropi	Fiziksel Ekserji	Molekül	Mol K.	kJ/kmol	kJ/kg	Standart Kim Ex(kJ/h)	
Klinker	C ₃ S	3CaO	37,05	11117,28	1,00	298	1373	20697686,67	16205399,2	23029,15	9342711,813	C ₃ S	168	219.800	964	14.561.750,00
		SiO ₂	13	3987,72								60				
	C ₂ S	2CaO	16,2	4861	0,995	298	1373	10.202.980,4	7.988.495,2	11.352,28	4.605.514,99	C ₂ S	112	95.700	556	4.154.604,07
		SiO ₂	8,7	2606									60			
	C ₃ A	3CaO	6,7	2013,2	0,98	298	1373	4.327.256,64	3.388.056,	4.814,70	1.953.276,83	C ₃ A	168	500.600	1.854	5.962.702,22
		Al ₂ O ₃	4,0	1202,8									102			
	C ₄ AF	4CaO	4,6	1379	0,9	298	1373	3.688.564,50	2.887.987,5	4.104,06	1.664.978,10	C ₄ AF	224	667.000	1.401	4.182.762,61
		Al ₂ O ₃	2,0	614,9									102			
		Fe ₂ O ₃	3,3	991,1									150			
		MgO	1,4	432	0,82	298	1373	486.371,52	380.808	541,16	219.542,84	MgO	40	66.800	1.670	721.440,00
		SO ₃	0,2	60	1,17	298	1373	96.384,60	75.465	107,24	43.506,97	SO ₃	80	301939	3.774	226.454,25
		Diğer	2,5	735	1,54	298	1373	1.554.098,70	1.216.793	1.729,16	701.503,34	Diğer	50	1.000	20	14.700,00
		Toplam	100,0	30.000,00	1,0098	298	1373	41.593.662	32.566.050	46.278,93	18.774.928,9		1316			29.824.413,15
	Çevreden ısı girişi						54.863.252,3	Isı ile ekserji Girişi=Q x (1-(To/T))		42.955.569,06						
Genel toplam							121.843.165	Toplam fiziksel ekserji		61.713.144,71	Toplam kimyasal ekserji		29.824.413,15			
Fiziksel ve kimyasal ekserji toplamı															91.577.557,85	

Tablo 4.14 Soğutucudan çıkan enerji, fiziksel ekserji ve kimyasal ekserji.

Madde Adı	Madde Bileşeni	%	Kütleli Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	To (K)	Ts (K)	Q (kJ/h)	Entalpi(kJ/h) H=m.cp.ΔT ΔT=Ts-To	Entropi (kJ/kgK) ΔS=Ss-So ΔS=m.cp.ln(Ts/To)	Fiziksel Ekserji (kJ/h) Ex=ΔH-(To.ΔS)
Sekonder hava	N ₂	77,37	59806,14	1,18	298	1233	87.014.339,10	65984109,54	100219,07	36118827,82
	O ₂	20,76	16047,25	1,16	298	1233	22.952.054,17	17404842,37	26435,11	9527180,25
	CO ₂	0,03	23,19	1,25	298	1233	35.741,07	27102,92	41,16	14835,78
	Ar	0,92	711,15	0,52	298	1233	455.960,68	345760,94	525,15	189264,96
	H ₂ O	0,01	7,73	2,5	298	1233	23.827,38	18068,61	27,44	9890,52
	Diğer	0,91	703,42	1,5	298	1233	1.300.974,77	986546,15	1498,40	540022,30
TOPLAM		100	77298,87	1,173	298	1233	111.798.051,37	84777922,17	128763,79	46.406.312
Soğutma Bacası Gazı	N ₂	77,37	2558,63	1,043	298	458	1.222.240,24	426983,49	1146,92	85201,47
	O ₂	20,76	686,53	0,942	298	458	296.195,14	103474,28	277,94	20647,54
	CO ₂	0,03	0,99	1,0054	298	458	456,84	159,59	0,43	31,85
	Ar	0,92	30,42	0,52	298	458	7.245,88	2531,31	6,80	505,10
	H ₂ O	0,01	0,33	1,96	298	458	296,86	103,71	0,28	20,69
	Diğer	0,91	30,09	1,01	298	458	13.920,74	4863,14	13,06	970,40
TOPLAM		100	3.307	1,017	298	458	1.540.354,30	538115,04	1445,43	107.376,96

Tablo 4.14 (devam ediyor).

Madde Adı	Bileşen	%	(kg/h)	Cp kJ/ kgK	To	Ts	Q (kJ/h)	Entalpi	Entropi	Fiziksel Ekserji		Mol K	kJ/kmol	kJ/kg	Standart Kim.Ex(kJ/h)	
Klinker	C ₃ S	3CaO	37,1	11.117,28	0,72	298	379	4.121.852,4	880.923,60	2.614,96	101.665,87	C ₃ S	168	219.800	964	14.561.750
		SiO ₂	13,3	3987,72								60				
	C ₂ S	2CaO	16,2	4861	0,72	298	379	2.057.404,9	439.709,23	1.305,25	50.746,08	C ₂ S	112	95.700	556	4.154.604
		SiO ₂	8,7	2606								60				
	C ₃ A	3CaO	6,7	2013,2	0,73	298	379	897.083,9	191.725,06	569,12	22.126,66	C ₃ A	168	500.600	1.854	5.962.702
		Al ₂ O ₃	4,0	1202,8								102				
	C ₄ AF	4CaO	4,6	1379	0,8	298	379	909.577,26	194.395,14	577,05	22.434,81	C ₄ AF	224	667.000	1.401	4182762,6
		Al ₂ O ₃	2,0	614,9								102				
		Fe ₂ O ₃	3,3	991,1								150				
		MgO	1,4	432	1,02	298	379	167.984,93	35.902	106,57	4.143,36	MgO	40	66.800	1.670	721440
	SO ₃	0,2	60	0,73	298	379	16.600,20	3.548	10,53	409,45	SO ₃	80	301939	3.774	226454,25	
	Diğer	2,5	735	1,2	298	379	334.278,00	71.442	212,07	8.245,00	Diğer	50	1.000	20	14700	
	Toplam	100	30.000,00	0,74	298	379	8.504.760	1.817.644,62	5.395,55	209.771,22		1316	1.852.839	10.240	29.824.413	
Genel toplam enerji							121.843.165	Toplam fiziksel ekserji			46.723.460,1	Toplam kimyasal ekserji			29.824.413,33	
Fiziksel ve kimyasal ekserji toplamı															76.547.873,32	

Tablo 4.13’de soğutucu bölümüne giren enerji ve ekserjiler gösterilmiştir. Tablo 4.14’de ise soğutucu bölümünden çıkan enerji ve ekserjiler gösterilmiştir. Soğutucu bölümüne 1 ve 2 nolu fanlardan ve ayrıca sızıntı olarak hava girişi olmaktadır. Burada sisteme giren havaların kimyasal ekserjisi 0 alınmıştır. Soğutma bölümüne giren bu havaların sadece fiziksel ekserjileri hesaplanmıştır. Döner fırından 1373 K derecede çıkan klinker soğutma bölümüne girmektedir. Burada klinkerin kimyasal ekserjisi de içindeki moleküllerin standart kimyasal ekserjileri toplanarak bulunmuştur.

Soğutma bölümüne de ayrıca çevreden ısı girişi olmaktadır. Bu ısı girişine döner fırının taşınım ve ışıınım ile çevreye yaydığı ısı sebep olmaktadır. Döner fırından gelen ısının ekserjisi hesaplanırken ısının kaynağı olan döner fırının sıcaklığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklık 1273 K civarlarındadır. Böylece soğutma bölümüne giren ekserji, ısı ile ekserji transferi formülünden hesaplanmıştır. Sistemdeki ekserji yıkımı da sisteme giren ve çıkan ekserjiler arasındaki farklardan hesaplanabilir. Buda yaklaşık olarak 15.029.684,85 kJ’dür.

Soğutma bölümünden sekonder hava ve soğutma bacası gazı çıkmaktadır. Bu bölümdeki gazlarda herhangi bir yanma gazı veya tepkime sonrası çıkan gaz olmadığı için doğrudan hava gibi değerlendirilmiştir. Bu yüzden bunlarında kimyasal ekserjileri 0 çıkmaktadır. Tablo 4.14’de sistemden çıkan havaların sadece fiziksel ekserjileri hesaplanmıştır.

Soğutucu bölümüne saatte 91.577.557,85 kJ ekserji girişi olmaktadır. Bu ekserjinin 42.955.569,06 kJ’lü döner fırınından kaynaklanan ekserjidir. Sistemden çıkan ekserjide saatte 76.547.873,32 kJ’dür. Sistemde 15.029.684,85 kJ ekserji yıkımı gerçekleşmektedir. Sistemde kullanılan soğutucu, ızgara tipi soğutucu olması diğer tip soğutucularla karşılaştırıldığında daha verimli olmaktadır. Ancak soğutma bölümüne döner fırından taşınım ve ışıınım ile gelen ısı sistemin verimini azaltmaktadır. Döner fırın ve soğutma bölümü bir sistem kabul edilip Tablo 4.15 ve Tablo 4.16’da sırasıyla sisteme giren ve çıkan, enerji ve ekserjiler gösterilmiştir.

Tablo 4.15 Döner fırın ve soğutma bölümüne giren ekserjiler.

DÖNER FIRIN VE SOĞUTUCU BÖLÜMÜ GİREN ENERJİ VE EKSERJİLER								
Sıra No	Giren Maddeler	Kütlesel debi (kg/h)	Sıcaklık (K)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ex. (kJ/h)	Toplam Ekserji
Sisteme Kütle ile Enerji Girişi								
1	1 nolu Fan	46.006	311	1,0126	14.487.635,78	12.837,22	0	12.837,22
2	2 nolu Fan	34.245	311	1,0126	10.784.027,58	9.555,52	0	9.555,52
3	Farın(Kuru)	45.504	303,2	0,888	12.251.585,92	1812,21	51.348.543,34	51.350.355,55
4	Farın Nemi	22.412,4	303,2	1,864	12.666.725,00	1873,61	1.120.622,25	1.122.495,86
5	Primer Hava	23.913	303	1,012	7.334.852,38	1.004,20	0	1.004,20
6	Sızıntı Hava	21.748,83	308	1,013	6.782.540,10	3.614,21	0	3.614,21
7	Sızıntı Hava	354,6	319	1,0130	114.587,93	253,93	0	253,93
8	Kömür Karışımı	6.395,8	308	1,234	2.430.470,52	1.295,12	188.663.811,59	188.665.106,71
Sisteme Isı ile Enerji girişi		Kütlesel debi(kg/h)	Kömür ort.ısııl değer.kcal/kg	cal-->J	Q (kJ/h)			
9	Kömür Yanma ısısı	6.395,8	6627	4,1868	177.457.378,16			
10	Çevreden Isı girişi				54.863.252,39	42.955.569,06		42.955.569,06
Sisteme İş ile Enerji Girişi		Motorun Gücü (kW)		kWh->kJ	(kJ/h)			
11	Elektrik enerjisi		180	3600	648.000	648.000		648.000,00
TOPLAM		200.580			299.821.055,75	28.608.986	241.330.689	284.768.792

Tablo 4.16 Döner fırın ve soğutma bölümünden çıkan ekserjiler.

DÖNER FIRIN VE SOĞUTUCU BÖLÜMÜ ÇIKAN ENERJİ VE EKSERJİLER								
Sıra No	Çıkan Maddeler	Kütlesel debi(kg/h)	Sıcaklık (K)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)	Fiziksel Ekserji (kJ/h)	Kimyasal Ex. (kJ/h)	Toplam Ekserji
Sisteme Kütle ile Enerji Çıkışı								
1	Klinker	30.000	379	0,748	8.504.760	209.770,69	29.583.258,90	29.793.029,58
2	Toz	1.250	513	0,84515	541.952.438	56.130,28	1.231.679,25	1.287.809,53
3	Döner Fırın B.Gaz	166.023	550	1,2036	109.905.221,08	50.192.674,02	83.927,84	49.429.028,72
4	Soğutma B. Gaz	3307	458	1,017	1.540.354,302	107376,96	0	112.458,53
Sisteme Isı ile Enerji Çıkışı					Q (kJ/h)			
5	Toplam Isı kaybı				179.178.665,07			
Sisteme İş ile Enerji Çıkışı					(kJ/h)			
6	Döner Fırın Mil işi				150.102,86	150.102,86		150.102,86
TOPLAM		200.580			299.821.055,75	50.716.054,81	30.898.866	81.614.920,8

4.1.5 Döner Fırın ve Soğutma Bölümü Ekserji verimi

Döner fırın ve soğutma bölümünün ekserji analizi öncelikle ayrı yapılmış, daha sonra ise tüm sistemin ekserji analizi yapılmıştır. Sisteme giren tüm ekserji saatte 284.768.792 kJ'dür. Ancak bu ekserjinin 42.955.569,06 kJ'ü çevreden gelen ısıdan sağlanmaktadır. Giren ekserji 241.813.223 kJ olacaktır. Sistemden çıkan ekserji ise 81.614.920,8 kJ'dür. Tüm sistemin ekserji verimi ise Eşitlik 4.16 ile hesaplanır.

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex.çıkan}{Ex.giren} \quad (4.16)$$

Eşitlik 4.16 kullanılarak bulunan ekserji verimi aşağıdaki gibidir.

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex.çıkan}{Ex.giren} = \frac{81.614.920,8}{241.813.223} = 0,3375$$

Döner fırın ve soğutma bölümünün verimi % 33,75'dir. Yalnız döner fırın bölümün verimi ayrıca değerlendirilecek olursa aşağıdaki sonuca ulaşılır.

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex.çıkan}{Ex.giren} = \frac{100.325.809,09}{288.196.734,97} = 0,3481$$

Döner fırın bölümün verimide (η_{Ex}) % 34,81 seviyelerinde çıkmaktadır. Genel sistem verimine yakın bir değerdedir. Bunun sebebi sisteme giren ve çıkan ekserjinin büyük bir kısmı bu bölümden gerçekleşmektedir. Soğutma bölümü ekserji verimi için Eşitlik 4.17 kullanılmıştır.

$$\eta_{soğutucu} = \frac{Klink.Kay.Ekserji}{Klink.Top.Eksejisi} \quad (4.17)$$

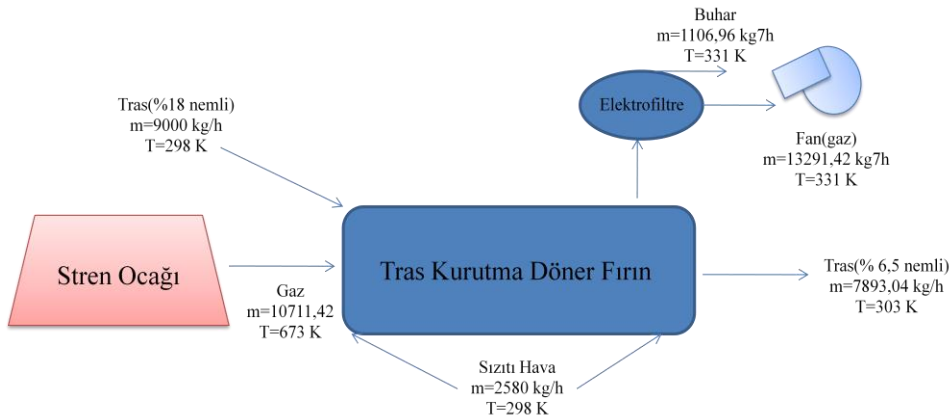
$$= \frac{48.599.342,13 - 30.034.184,37}{48.599.342,13} = 0,382$$

Burada soğutucu bölümünün ekserji verimi % 38,2 çıkmıştır.

4.2 TRAS KURUTMA BÖLÜMÜNÜN KÜTLE, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Çimento eldesinde kullanılan katkı maddelerinde en önemlilerinden biride trasdır. Tras $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkimeye girerek hidrolitik bağlayıcı özelliği olan ürünlerin oluşmasını sağlamaktadır. Kullanılan tras katkısı nemli halde gelmektedir. Bu nemin azaltılması için katkı kurutma sistemi kullanılmaktadır. Döner fırın bölümüne giren farin klinkerleşme (sinter) ve kalsinasyon işlemlerinden sonra klinker adı verilen yarı mamul elde edilir. Daha sonra elde edilen klinker çimento değirmeninde alçı taşı, tras, kalker, farin tozu, cüruf gibi katkı maddeleriyle birlikte öğütülüp çimento elde edilir (BarÇim 2010).

Katkı kurutma sisteminde bir asma fırının yakılmakta ve buradan fan yardımıyla çekilen ve torbalı filtreden geçerek temizlenmekte olan sıcak hava tras kurutma sistemindeki döner fırın bölümüne girmektedir. Bu bölüme % 18 nemle giren tras, döner fırın içinden geçerken asma fırından alınan sıcak hava yardımıyla nem oranı % 6,5 seviyelerine düşürülmektedir. Kullanılan bu fırının boyu 22 metre ve çapı 2 metredir Ocakta yakıt olarak kömür kullanılmaktadır. Tras kurutma bölümüne giren ve çıkan kütleler Şekil 4.13’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.13 Tras kurutma bölümüne giren ve çıkan kütle akış şeması.

4.2.1 Tras Kurutucu Bölümü Kütle Dengesi

Tras kurutma bölümüne çevre sıcaklığında % 18 nemle, 9000 kg/h debi ile giren tras, çıkışta nemi % 6,5 seviyelerine düşürülmektedir. Bu nemi buharlaştırmak için asma fırın tarafından ısıtılan 673 K sıcaklığında, 10711,42 kg/h debi ile gaz girişi olmaktadır. Buharlaşan nem fan yardımıyla çekilip elektro filtreden süzülerek bacadan buhar olarak atılmaktadır. Burada

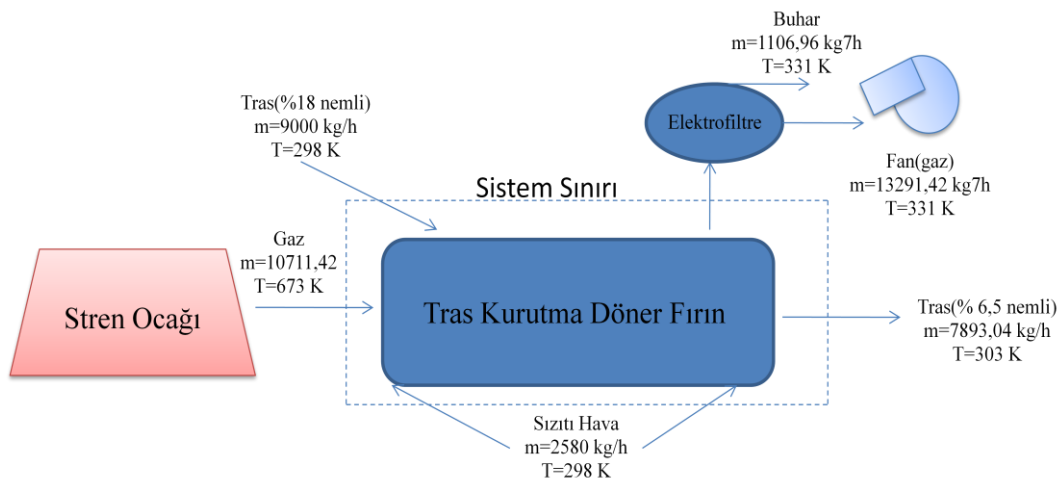
bacadan atılan toz miktarı çok düşük olduğu için ihmal edilmiştir. Tras kurutma baca gazı analiz raporundan çıkan gazın kütleli debisi hesaplanıp ayrıca giren gazın kütleli debisi de bulunmuştur. Sızıntı havalar bulunurken sızıntı olan bölgeler tespit edilmiş daha sonra giren hava hızı ölçülmüştür. Sızıntı bölgesinin alanından sisteme sızan havanın hacimsel debisi hesaplanmıştır. Ayrıca havanın sızıntı olan bölgedeki sıcaklığının yoğunluğu tespit edilip hacimsel debi ile çarpılarak giren sızıntı havanın kütleli debisi hesaplanmıştır. Tablo 4.17’de tras kurutma bölümüne giren ve çıkan maddelerin kütleli debisi gösterilmektedir.

Tablo 4.17 Tras kurutma bölümü kütle denklığı.

Tras Kurutucu							
Sıra No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütleli Debi (kg/h)	Sıra No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütleli Debi (kg/h)
1	Tras	298	7380	1	Tras	303	7380
2	Tras Nem	298	1620	2	Tras Nem	303	513,04
3	Gaz	673	10711,42	3	Gaz	331	13291,4
4	Sızıntı hava	306	2580	4	Buhar	331	1106,96
Toplam			22291,42	Toplam			22291,4

4.2.2 Tras Kurutma Bölümü Enerji Analizi

Herhangi bir termodinamik sistemin analizi için öncelikle sistemin çalışması ve içeriğinin anlaşılması gerekmektedir. Kütle analizi bölümünde sistemin çalışma prensibi anlatılmıştır. Sisteme enerji giriş ve çıkışı kütle, ısı ve iş ile olmaktadır. Şekil 4.14’de sisteme kütle ile giren enerjiler gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Tras kurutma bölümü sisteme giren ve çıkan enerjiler.

Tras kurutma bölümü de devamlı olarak bir kütle giriş ve çıkışı gerçekleştiği için bu sistem sürekli akışlı açık bir sistem olarak kabul edilecektir. Tras kurutma sisteminin enerji analizi için bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar; Sisteme dışarıdan bir ısı girişi yoktur. Sistemin kinetik ve potansiyel enerji değişimi ihmal edilmiştir. Bağlantı elemanlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir. Sisteme giren ve çıkan gazlar ideal gaz olarak kabul edilmektedir. Referans ortam sıcaklığı 25 °C (298 K) ve basıncıda bu sıcaklıktaki basıncı yani 101,26 kPa olarak alınmıştır. Sisteme giren ve çıkan enerjiler bulunurken giren ve çıkan maddelerin enerjilerinin bularken her maddenin sıcaklığına ve o sıcaklıktaki özgül ısısına ihtiyaç vardır. Bu değerler tablolardan bulunmuştur. Trasın özgül ısısı, ihtiva ettiği elementler ve moleküllerin özgül ısılarının kütleli fraksiyonlarıyla çarpımıyla çıkan sonuçların toplamı ile bulunmuştur. Bu işlem enerjinin korunumu ilkesinden hareketle yapılmıştır.

Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesine göre, tras kurutma bölümü enerji dengesi için Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.5 kullanılacaktır. Bu sistemde kinetik ve potansiyel enerjiler ihmal edilmektedir. Bu yüzden enerji denkleminde maddelerin sıcaklıklarından dolayı sahip olduğu enerjiler sisteme giren ve çıkan enerjiler olarak esas alınacaktır.

Sisteme giren ve çıkan enerjiler sırasıyla Tablo 4.18’de ve Tablo 4.19’da gösterildiği gibidir. Burada elektrik işi tras kurutucu bölümü döner fırını döndürmek için harcanan elektrik enerjisi. Mil işi hesaplanırken döner fırını döndüren motorun verimi esas alınarak bulunmuştur. Motor ile döner fırın arasındaki redüktör ve çarklarda oluşan kayıplar ihmal edilmiştir. Şekil 4.15’de tras kurutma bölümüne giren, Şekil 4.16’da ise bu bölümden çıkan enerji yüzdeleri verilmiştir.

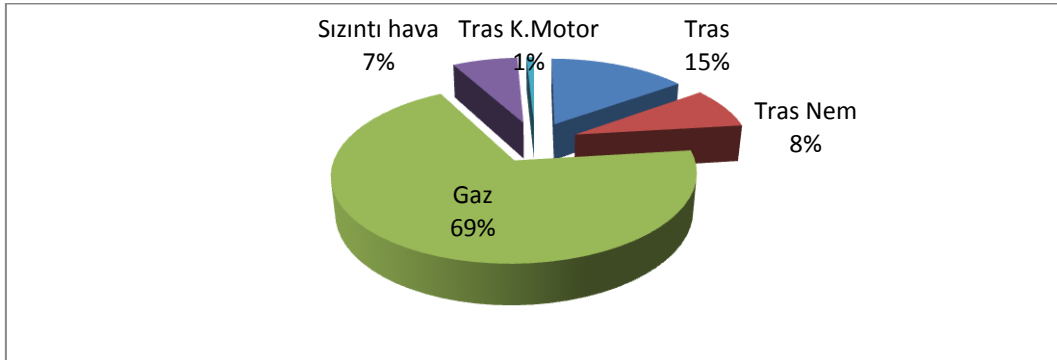
Tablo 4.18 Tras kurutma bölümüne kütle, ısı ve iş olarak giren enerjiler.

Tras Kurutucu Bölümüne Giren Enerjiler					
Sıra No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütleli Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
Sistemden Kütle ile Enerji Çıkışı					Q (kJ/h)
1	Tras	298	7380	0,766	1.684.617,84
2	Tras Nem	298	1620	1,8618	898.802,57
3	Gaz	673	10711,4	1,069	7.706.191,87
4	Sızıntı hava	306	2580	1,0125	799.348,50
Sisteme İş ile Enerji Girişi		Motorun Gücü (kW)		1kWh=3600kJ	Q (kJ/h)
5	Tras K.Motor	26		3600	93600
Toplam					11.182.560,78

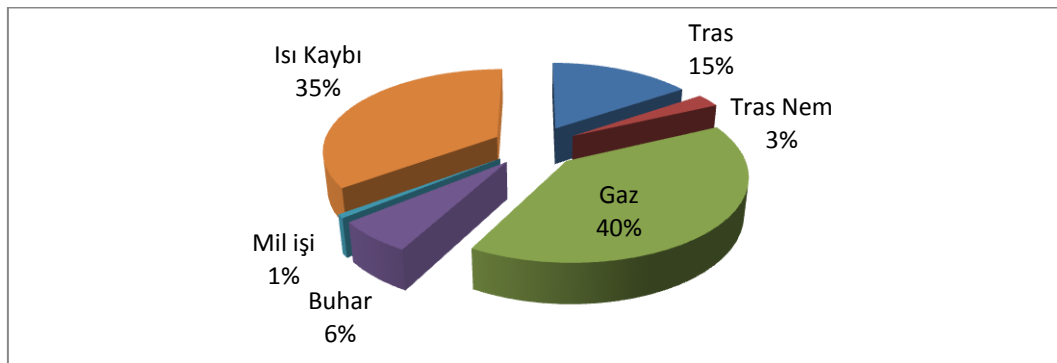
Tablo 4.19 Tras kurutma bölümünden kütle, ısı ve iş olarak çıkan enerjiler.

Tras Kurutucu Bölümünden Çıkan Enerjiler					
Sıra No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütlesel Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
Sistemden Kütle ile Enerji Çıkışı					Q (kJ/h)
1	Tras	303	7380	0,775	1.733.008,50
2	Tras Nem	303	513,04	1,865	289.916,34
3	Gaz	331	13291,4	1,0126	4.454.893,22
4	Buhar	331	1106,96	1,8826	689.791,72
Sistemden İş ile Enerji Çıkışı					(kJ/h)
5	Mil işi				80.964
Sistemden Isı ile Enerji Çıkışı					(kJ/h)
6	Isı Kaybı				3.933.987
Toplam					11.182.560,78

Sisteme giren enerjilerde en büyük paya sahip enerji % 69 ile sıcak gazın sahip olduğu enerjidir. Motorun sağladığı mil işi enerji girdilerinde düşük bir yüzdeye sahiptir. Sistemden çıkan enerji yüzdelerinde en büyük oranda sahip enerji bacadan atılan gazın sahip olduğu enerjidir. Isı kaybı da büyük bir orana sahiptir.



Şekil 4.15 Tras kurutma bölümüne giren enerji yüzdeleri.



Şekil 4.16 Tras kurutma bölümünden çıkan enerji yüzdeleri.

4.2.3 Tras Kurutma Bölümü Enerji Verimi

Tras kurutma bölümü enerji verimliliğini sistemden çıkan enerjinin sisteme giren enerjiye oranı olarak hesaplanabilir. Bunun formüsel ifadesi ise aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Tras kurutma sistemine giren toplam enerji saatte 11.182.560,78 kJ'dür. Tras kurutma döner fırından ise saatte 3.933.987 kJ ısı kaybı vardır. Sistemden ise 7.248.573,77 kJ enerji çıkışı gerçekleşmektedir. Tras kurutma bölümünün verimi Eşitlik 4.6 ile hesaplanılabilir. Buradan tras kurutucu enerji verimi % 64,8 çıkmaktadır.

$$\eta_{enerji} = \sum \frac{m_{\xi} e_{\xi}}{m_g e_g} = \frac{7.248.573,77}{11.182.560,78} = 0,648$$

4.2.4 Tras Kurutma Bölümü Ekserji Analizi

Tras kurutma bölümü sürekli akış halindeki açık bir sistem olarak değerlendirilmiştir. Daha önceki bölümlerde ki analizlerde belirtilen kabuller yapılmıştır. Bunlar; Sisteme dışarıdan bir ısı girişi yoktur. Sistemin kinetik ve potansiyel enerji değişimi, bağlantı elemanlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir. Sisteme giren ve çıkan gazlar ideal gaz olarak kabul edilmektedir. Referans ortam sıcaklığı 25 °C (298 K) ve çevre basıncı 1 atm (101,26 kPa) olarak alınmıştır. Tras kurutma bölümünde amaç yalnızca katkı maddesi olan trasın nem oranını optimum seviyelere indirmektir. Burada tras herhangi bir kimyasal reaksiyon geçirmemektedir. Bu yüzden burada ekserji analizi yapılırken yalnızca fiziksel ekserjinin hesaplanması yeterli olacaktır. Fiziksel ekserjileri Eşitlik 4.8, Eşitlik 4.9 ve Eşitlik 4.10 ile hesaplanılacaktır.

Tablo 4.20 Tras kurutma bölümüne giren ekserjiler.

Sıra No	Giren Maddeler	T _s (K)	To (K)	Kütleli Debi (kg/h)	C _p (kJ/kgK)	Q (kJ/h)	Entalpi (kJ/h) H =m.cp.ΔT	Entropi (kJ/kgK) ΔS=m.cp. n(Ts/To)	Ekserji (kJ/h) Ex=ΔH- (To.ΔS)
1	Tras	298	298	7380	0,94	2.067.285	0	0,00	0,00
2	Tras Nem	298	298	1620	1,8618	898.803	0	0,00	0,00
3	Gaz	673	298	10711	1,069	7.706.192	4.293.940	9.328,18	4.284.612
4	Sızıntı hava	306	298	2580	1,0125	799.349	20898	69,20	20.828,8
5	Tras K.Motor					93600			93.600
Toplam				22291,4		11.471.629	4.314.838	9.397,38	4.399.041

Tablo 4.21 Tras kurutma bölümünden çıkan ekserji.

Sıra No	Çıkan Maddeler	T _s (K)	To (K)	Kütlesel Debi (kg/h)	C _p (kJ/kg K)	Q (kJ/h)	Entalpi (kJ/h) H =m.cp.ΔT	Entropi (kJ/kgK) ΔS=m.cp.ln (Ts/To)	Ekserji (kJ/h) Ex=ΔH-(To.ΔS)
1	Tras	303	298	7380	0,956	2.137.750	35276,4	117,40	35.159
2	Tras Nem	303	298	513	1,865	289.916,3	4784	15,92	4.768,18
3	Gaz	331	298	13291	1,0126	4.454.893	444143,	1.413,52	442.729,9
4	Buhar	331	298	1107	1,8826	689.791,72	68770,7	218,87	68.551,91
5	Mil işi					80.964			80.964,00
6	Isı Kaybı					3.933.987	Ekserji yok oluşu		3.766.868
Toplam				22291,4		11.587.302	552.975	1.765	4.399.041

Tras kurutma bölümüne giren ve bu bölümden çıkan ekserjiler sırasıyla Tablo 4.20 ve Tablo 4.21'de gösterildiği gibidir. Sisteme saatte 4.399.041,11kJ lük bir ekserji girişi olmaktadır. Ayrıca bu sistemden saatte 3.766.868,11 kJ ekserji yok oluşu vardır. Buradan sistemden saatte 632.173 kJ lük bir ekserji çıkışı gerçekleşmektedir.

4.2.5 Tras kurutma Bölümü Ekserji verimliliği

Bu sistemin ekserji verimliliği hesaplanırken sistemden çıkan ekserjinin giren ekserji ye oranı olarak tanımlamak doğru bir yaklaşım olacaktır. Buda Eşitlik 4.16 ile sağlanmaktadır.

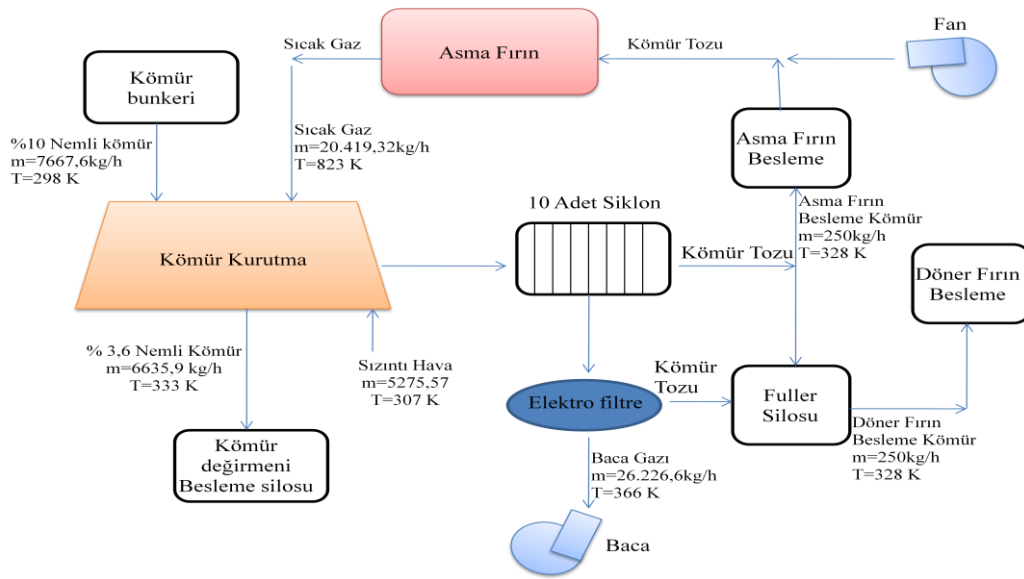
$$\eta_{Ex} = \frac{Ex.çikan}{Ex.giren} = \frac{632.173}{4399041,11} = 0,1437$$

Tras kurutma bölümünün ekserji verimi % 14,37'dir.

4.3 KÖMÜR KURUTMA BÖLÜMÜNÜN KÜTLE, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Fabrikaya değişik yerlerden gelen kömürler laboratuarda analiz edilerek nem, kül, uçucu madde, yanıcı kükürt miktarları ve alt ve üst ısıl değeri belirlenir. Bu gelen kömürler karıştırılarak bir karışım kömür elde edilir. Bu karışım stok deposuna (stokhol) konur. Stok deposundan alınan kömür, bantlar vasıtasıyla kömür deposuna (bunker) beslenir. Kömür kurutma bölümünde, asma ocakta ısıtılan hava bir fan yardımıyla çekilip bu bölüme giren kömürün nemini azaltmak için kullanılır. Buradan çıkan kömür ise döner fırında kullanılacak

hale gelmesi için, kömür değirmenine gönderilir. Kömür değirmeninde kömür öğütülür, ve soğutma bacasından atılan sıcak hava yardımıyla nem oranı biraz daha azaltılır ve döner fırın besleme silosuna gönderilir. Kurutmada kullanılan sıcak hava bacadan atılmadan önce 10 adet siklondan geçer. Bu siklonlarda tutulan biraz daha iri kömür tozları kömür kurutma bölümünde sıcak havanın sağlandığı asma fırına, yakılması için gönderilir. Siklonlarda tutulamayan toz kömürler ve sıcak hava elektro filtreye gelir. Burada kömür tozlarının büyük miktarı tutulur. Tutulan bu kömür tozları fuller silosundan döner fırın kömür besleme silosuna gönderilir. Tutulamayan düşük miktardaki kömür tozları ve sıcak hava bacadan atılır. Şekil 4.17’de kömür kurutma bölümünün akış şeması gösterilmektedir.



Şekil 4.17 Kömür kurutma bölümü akış şeması.

4.3.1 Kömür Kurutma Bölümünün Kütle Denkliği

Kömür kurutma bölümüne saatte 7667,6 kg, % 10,05 nemle kömür girişi olmaktadır. Bu kömür 20.419,32 kg/h debi ile giren sıcak hava ile kurutulmaktadır. Kömür kurutma bölümünden 6635,9 kg/h debi ile çıkan kömür öğütülmek üzere kömür kurutma bölümüne gönderilmektedir. Sıcak gaz, buhar ve bunlarla birlikte bir miktar kömür önce siklonlardan geçmektedir. Burada saatte, tutulan 250 kg kömür asma fırında yanması için asma fırın beslemeye gönderilmektedir. Sıcak gaz, buhar ve geriye kalan toz kömür elektro filtreye ulaşır. Burada geri kalan toz kömür tutulur ve fuller yardımıyla döner fırın beslemeye gönderilir. Sıcak gaz ve buhar 26.226,6 kg/h debi ile bacadan çıkmaktadır. Kömür kurutma bölümünde sisteme giren ve sistemden çıkan kütleler sırasıyla Tablo 4.22 ve Tablo 4.23’de

gösterilmiştir. Kurutma sisteminde gerçekleşen olay nemli kömürün nemini azaltmaktır. Kömürün nem oranı arttıkça döner fırın alev borusundan çıkan alev uzar ancak sıcaklığı düşer. Kömürün içindeki nem aynı zamanda yanma şartlarında ve alev formunda zayıflıkları oluşturur. Fakat kömürün içinde ilk tutuşturma için %0,5-1,5 oranında nem olmalıdır. Bu optimum seviyeyi yakalamak için kömür kurutma ve kömür değirmeni sistemleri kullanılmaktadır.

Tablo 4.22 Kömür kurutma bölümüne giren maddeler.

Kömür Kurutma Bölümü			
Sıra No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütlesel Debi (kg/h)
1	Kömür	298	6897
2	Kömür Nemi	298	770,59
3	Gaz(Sıcak Hava)	823	20419,325
4	Sızıntı Hava	307	5275,57
Toplam			33362,485

Tablo 4.23 Kömür kurutma bölümünden çıkan maddeler.

Sıra No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütlesel Debi (kg/h)
1	Kömür	333	6397
2	Kömür Nemi	333	238,892
3	Baca gazı	366	25694,895
4	Asma Fırına Beslenen Kömür	328	250
5	Döner Fırına Beslenen Kömür	328	250
6	Buhar	366	531,698
Toplam			33362,485

4.3.2 Kömür Kurutma Bölümünün Enerji Denkliği

Kömür kurutma bölümünün enerji denkliği yapılırken öncelikle sistemin çalışması ve içeriğinin iyice anlaşılması gerekmektedir. Bu bölümünün çalışma sistemi ve içeriğine daha önceki bölümlerde değinildi. Sisteme giren ve çıkan maddelerin sıcaklıkları ölçülerek bulundu. Uygun çalışma sistemini belirlerken devamlı bir kütle giriş olduğu için sürekli akışlı açık bir sistem olarak kabul edilmiştir. Sisteme enerji giriş yalnızca kütle ile olmaktadır. Sisteme giren elektrik işinde ısıya dönüşen enerji az olduğu için kayıplar az olacaktır. Bu yüzden ihmal edilmiştir. Sisteme dışarıdan bir ısı girişi olmadığı kabul edilmiştir. Sistemin kinetik ve potansiyel enerji değişimi ihmal edilmiştir. Bağlantı elemanlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir. Sisteme giren ve çıkan gazlar ideal gaz olarak kabul edilmektedir. Referans ortam sıcaklığı 25 °C (298 K) ve çevre basıncı ise bu

sıcaklıktaki havanın basıncı olan 101,26 kPa alınmıştır. Özgül ısılar tablolardan ve daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi hesaplanmıştır. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesine göre, kömür kurutma bölümü enerji dengesi aşağıdaki formül ile sağlanacaktır. Burada Q sisteme giren akışın enerjisidir. W sistemden elde edilen iştir. ΔE ise enerji değişimidir. Termodinamiğin birinci yasası, enerjinin korunumu ilkesine göre, tras kurutma bölümü enerji dengesi için Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.5 kullanılacaktır. Kömür kurutma bölümü giren ve çıkan enerjiler Tablo 4.24 ve 4.25’de gösterilmektedir.

Tablo 4.24 Kömür kurutma bölümüne giren enerjiler.

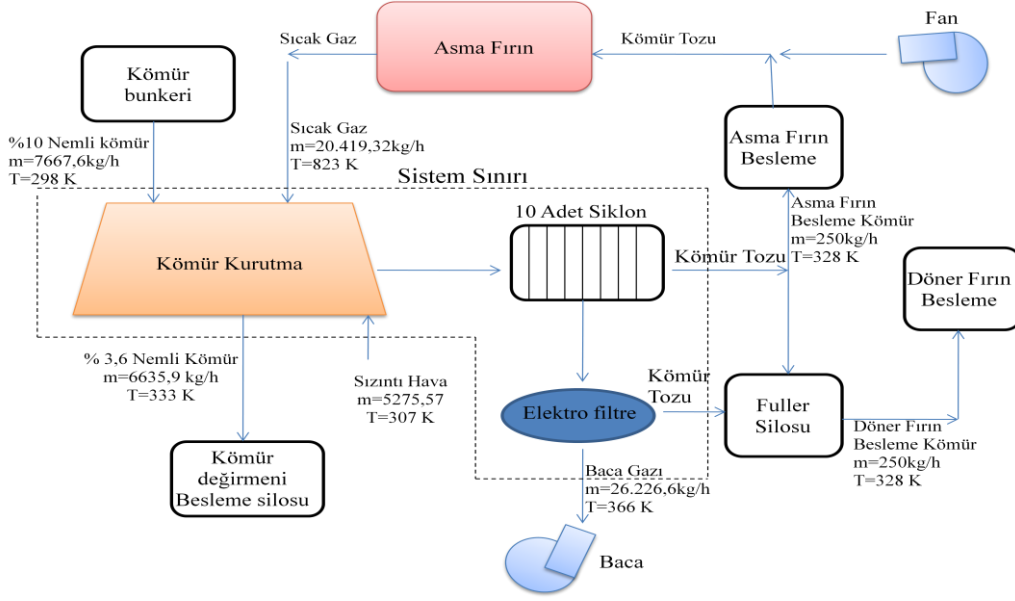
Kömür Kurutma Bölümüne Giren Enerjiler					
Sıra No	Giren Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütleli Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
1	Kömür	298	6897	1,284	2.639.012,90
2	Kömür Nemi	298	770,59	1,8618	427.535,97
3	Gaz(Sıcak Hava)	823	20.419,33	1,104	18.552.835,34
4	Sızıntı Hava	307	5.275,57	1,0125	1.639.844,99
Toplam			33362,485		23.259.229,20

Tablo 4.25 Kömür kurutma bölümünden çıkan enerjiler.

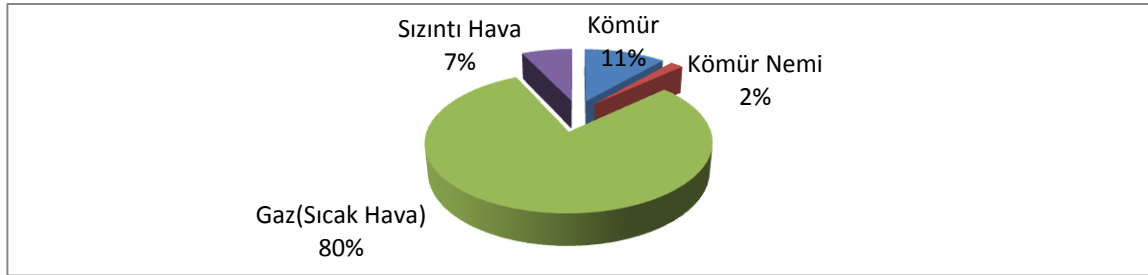
Sıra No	Çıkan Maddeler	Sıcaklık (K)	Kütleli Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)
1	Kömür	333	6397	1,328	2.828.906,93
2	Kömür Nemi	333	238,89	1,8838	149.858,24
3	Baca gazı	366	25.694,90	0,964	9.065.775,63
4	Asma Fırın Bes.Kömür	328	250	1,298	106.436,00
5	Döner F.Bes.Kömür	328	250	1,298	106.436,00
6	Buhar	366	531,698	1,9046	370.637,96
7	Isı kaybı				10.631.178,44
Toplam			33362,485		23.259.229,20

Kömür kurutma bölümüne saatte 23.259.229,2 kJ enerji girişi olmaktadır. Sistemin kaybettiği ısı miktarı ise saatte 10.631.178 kJ olmaktadır. Burada sistemden çıkan enerji miktarı ise 12.628.050,76 kJ olmaktadır. Şekil 4.18 de kömür kurutma bölümünün sistem sınırı belirlenmiştir. Ayrıca sisteme kütle ile giren enerjiler gösterilmiştir.

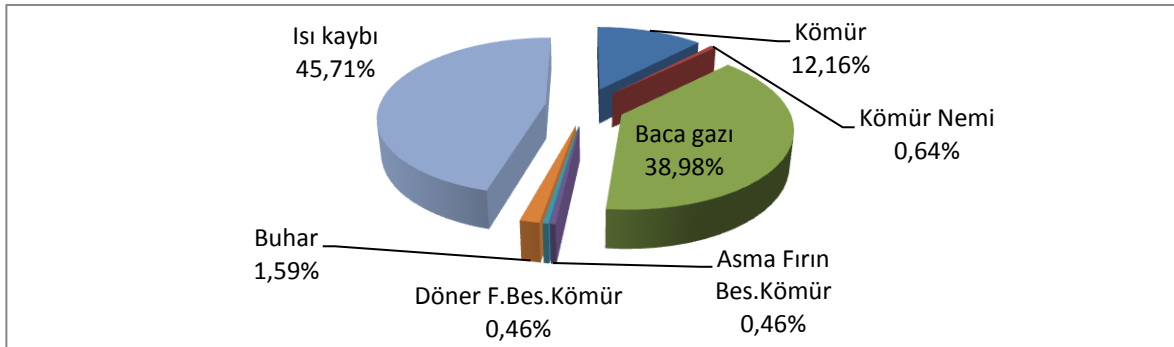
Şekil 4.19 ve 4.20’de sırasıyla kömür kurutma bölümüne giren ve çıkan enerjilerin yüzde dağılımları verilmiştir. Sisteme %80 civarlarında giren sıcak hava çıkarken enerjisinin büyük bir kısmını kaybetmektedir. Kaybedilen ısı çıkan enerjiler arasında % 45,71 bir orana sahiptir.



Şekil 4.18 Kömür kurutma bölümünün enerji akışı ve sistem sınırı.



Şekil 4.19 Kömür kurutma bölümüne giren enerji yüzdeleri.



Şekil 4.20 Kömür kurutma bölümünden çıkan enerji yüzdeleri.

4.3.3 Kömür Kurutma Bölümü Enerji Verimi

Kömür kurutma bölümü enerji verimliliğini sistemden çıkan enerjinin sisteme giren enerjiye oranı olarak hesaplanabilir. Bunun formüsel ifadesi ise aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Tras kurutma sistemine giren toplam enerji saatte 23.259.229,2 kJ dür. Sistemden ise

12.628.050,76 kJ enerji çıkışı gerçekleşmektedir. Verim Eşitlik 4.6 ile bulunur. Buradan Kömür kurutucu enerji verimi % 54,29 çıkmaktadır.

$$\eta_{enerji} = \frac{\sum m_{\xi} e_{\xi}}{m_g e_g} = \frac{12.628.050,76}{23.259.229,2} = 0,5429$$

4.3.4 Kömür Kurutma Bölümü Ekserji Analizi

Kömür kurutma bölümünde sisteme yalnızca kütle ile ekserji girişi olmaktadır. Bu sistem sınırından sürekli bir kütle ve enerji geçişi olduğu için sürekli akış halindeki açık bir sistem olarak değerlendirilmiştir. Daha önceki bölümlerde ki analizlerde belirtilen kabuller yapılmıştır. Bunlar; Sisteme dışarıdan bir ısı girişi yoktur. Sistemin kinetik ve potansiyel enerji değişimi ihmal edilmiştir. Bağlantı elemanlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir. Sisteme giren ve çıkan gazlar ideal gaz olarak kabul edilmektedir. Referans ortam sıcaklığı 25 °C (298 K) ve çevre basıncı 1 atm (101,26 kPa) olarak alınmıştır. Sisteme giren kömürde herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmemektedir. Bu yüzden bu bölümün ekserji analizi yapılırken yalnızca fiziksel ekserjinin hesaplanması yeterli olacaktır. Fiziksel ekserjileri hesaplanırken Eşitlik 4.18 kullanılacaktır. Burada entalpi değeri (h) Eşitlik 4.19, entropi değeri ise Eşitlik 4.20 ile hesaplanabilir.

$$Ex_{fiziksel} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (4.18)$$

$$\Delta H = \dot{m}(h - h_0) = \dot{m} \int_{T_0}^T c_p \cdot dT \quad (4.19)$$

$$\Delta S = \dot{m} \int_{T_0}^T c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4.20)$$

Kömür kurutma sisteme saatte 5.011.395,4 kJ ekserji girişi olmuştur. Sisteme giren nemli kömürün sıcaklığı referans çevre sıcaklığı ile aynı olduğu için ekserjisi sıfırdır. Sistemden çıkan ekserji ise saatte 191.990,66 kJ dur. Tablo 4.26 ve Tablo 4.27'de sırasıyla kömür kurutma bölümüne giren ve çıkan ekserjiler gösterilmektedir. Kömür kurutma bölümünde herhangi bir kimyasal değişim gerçekleştiği için yalnızca fiziksel ekserji hesaplanacaktır.

Tablo 4.26 Kömür kurutma sistemine giren ekserjiler.

Kömür Kurutma Bölümü Sisteme Giren ve Çıkan Ekserji									
Sıra No	Giren Maddeler	To (K)	Sıcaklık (K)	Kütleli Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)	Entalpi(kJ/h) $H=m \cdot c_p \cdot \Delta T$ $\Delta T=T_s-T_o$	Entropi (kJ/kgK) $\Delta S=S_s-S_o$ $\Delta S=m \cdot c_p \cdot \ln(T_s/T_o)$	Ekserji (kJ/h) $Ex=\Delta H-(T_o \cdot \Delta S)$
1	Kömür	298	298	6897	1,284	2.639.012,90	0,00	0,00	0,00
2	Kömür Nemi	298	298	770,59	1,8618	427.535,97	0,00	0,00	0,00
3	Gaz (Sıcak Hava)	298	823	20.419,3	1,104	18.552.835,3	11.835.040,7	22.900,53	5.010.683,74
4	Sızıntı Hava	298	307	5.275,5	1,0125	1.639.844,99	48.073,63	158,93	711,65
Toplam				33362,48		23.259.229,2	11.883.114,4	23.059,46	5.011.395,40

95

Tablo 4.27 Kömür kurutma sisteminden çıkan ekserjiler.

Sıra No	Çıkan Maddeler	To (K)	Sıcaklık (K)	Kütleli Debi (kg/h)	Cp (kJ/kgK)	Q (kJ/h)	Entalpi(kJ/h) $H=m \cdot c_p \cdot \Delta T$ $\Delta T=T_s-T_o$	Entropi (kJ/kgK) $\Delta S=S_s-S_o$ $\Delta S=m \cdot c_p \cdot \ln(T_s/T_o)$	Ekserji (kJ/h) $Ex=\Delta H-(T_o \cdot \Delta S)$
1	Kömür	298	333	6397	1,328	2.828.906,93	297.332,56	943,39	16.203,75
2	Kömür Nemi	298	333	238,89	1,8838	149.858,24	15.750,87	49,97	858,38
3	Baca gazı	298	366	25.694,9	0,964	9.065.775,6	1.684.351,7	5.091,20	167.175,02
4	Asma Fırın Bes. Kömür	298	328	250	1,298	106.436	9.735	31,13	459,43
5	Döner F.Bes. Kömür	298	328	250	1,298	106.436	9.735	31,13	459,43
6	Buhar	298	366	531,698	1,9046	370.637,9	68.861,7	208,14	6.834,65
7	Isı kaybı					10.631.178,4			
Toplam				33362,485		23.259.229,20	2.085.766,88	6.354,95	191.990,66

4.3.5 Kömür Kurutma Bölümü Ekserji Verimi

Bu sistemin ekserji verimliliği hesaplanırken sistemden çıkan ekserjinin giren ekserji ye oranı olarak tanımlamak doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu işlemin formüsel ifadesi Eşitlik 4.15 ile sağlanmaktadır.

$$\eta_{Ex} = \frac{Ex.çıkan}{Ex.giren} = \frac{191.990,66}{5.011.395,4} = 0,0383$$

Kömür kurutma bölümünün ekserji verimi % 3,83'dir.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1 SONUÇLAR

Türkiye de yaş sistemle üretim yapan tek çimento fabrikası olan Bartın çimento fabrikasında enerji taraması yapılmış, ayrıca çimento üretiminde kullanılan ısıtıl proseslerden döner fırın ve soğutma bölümü, tras kurutma ve kömür kurutma bölümlerinin enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiş ve her bir sistemin enerji ve ekserji verimleri bulunmuştur. Bu bölümde her sistemin değerlendirilmesi yapılacak ve öneriler sunulacaktır.

5.2 ÇİMENTO FABRİKASININ ENERJİ TÜKETİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Fabrikanın enerji maliyetini düşürmek için yaptığı en büyük ve en önemli çalışma yaş sistemle üretimden kuru sistemle üretime geçmektir. Bu çalışma yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasının tasarruf çalışmalarına katkıda bulunmak ve fabrikanın gerçek veriminin tespiti için yapılmıştır. Ayrıca kuru sistemle üretim yapan fabrikaya göre verimleri karşılaştırılmıştır.

Enerji taraması yapılan fabrikada çok büyük miktarlarda kömür ve elektrik tüketimi vardır. Bu yüzden sistemde yapılacak bir iyileştirme çalışması büyük oranda tasarruf sağlayacaktır. Fabrikanın 2010 yılı enerji tüketim ve çimento ve klinker üretim miktarları tespit edilmiştir. Ayrıca standart enerji tüketimi değerleri hedef ve tüketilen olarak tespit edilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Buradan kümülatif değerler toplamı (CUSUM) grafiği çizilmiştir. Bu grafikte çıkan eğimin yönünün yukarı doğru ya da düz bir şekilde olmaması enerji tüketiminin kontrol altında olmadığını göstermektedir.

Fabrikanın enerji tüketiminin % 86'sı yerli taş kömüründen, % 8'i ise elektrikten sağlanmaktadır. Ancak bu maliyet olarak değerlendirildiğinde yerli taş kömürü % 66,9'atrrtrt

gerilemekte, elektrik ise % 27,4 seviyelerine yükselmektedir. Toplam kömür tüketiminde ise 1.272.554 kJ seviyelerindeki bu enerjinin büyük bir kısmı kullanılmadan atık ısı olarak çıkmaktadır. Bu enerjinin maliyeti yıllık olarak 9.505.484 TL gibi çok büyük bir miktardır.

Çin'deki çimento üretiminde yaşam döngüsü analizi gerçekleştiren Lu (2010), tespitlerine göre yaş yönteminde 5,3 - 7,1 GJ/ton klinker olan spesifik enerji tüketimi kuru sisteme geçilmesiyle 3,2 - 3,5 değerine düşeceğini tespit etmiştir. Bartın çimento fabrikasında ortalama 1,768 - 3,055 GJ/ton SET değeri ise klinker ve çimentonun toplam üretimi başına düşen spesifik enerji tüketim değeridir. Eğer klinker başına düşen enerji tüketimi hesaplanacak olursa bu değer ortalama olarak 5,946 GJ/ton klinker çıkmaktadır. Buda yapılan analizi doğrulamaktadır.

Fabrikanın genel performans analizi için çizilmiş olan kümülatif değerler toplamı (CUSUM) grafiğinden anlaşılacağı gibi fabrikanın performansı düşük çıkmıştır. Eğim düzlemsel bir şekilde olmadığı için grafik kontrol altında değildir sonucu ortaya çıkmaktadır. Buradan eğer SET hedef değerlerinin verildiği aya uygun şekilde üretim yapılırsa birim kütle başına harcanan enerji miktarı azalacak, fabrikanın performansı artacaktır. Sisteme kurulacak kojenerasyonlu bir sistemle sistemden kaybolan atık ısının geri dönüşümü sağlanarak büyük bir enerji tasarrufu sağlanacaktır. Böylece enerji maliyeti düşürülerek tasarruf sağlanacaktır. Ayrıca fabrikadan atılan 276.425 ton CO₂ emisyonu azalacaktır. Buda ülkemizin attığı karbon emisyonu miktarını azaltacak ve Kyoto protokolüne uyum sağlanacaktır.

5.3 FABRİKANIN ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çimento fabrikasında enerji tüketen ısı sistemlerinden olan Döner fırın ve soğutma bölümü, tras kurutma ve kömür kurutma bölümlerinin termodinamiğinin birinci kanunu olan enerjinin korunumu ve termodinamiğin ikinci kanunu olan enerjinin niteliği ya da kullanılabilirliğinin analizleri yapıp verimleri bulunmuştur. Bu sistemlerin enerji ve kullanılabilirlik yani ekserji verimleri aşağıda tablo halinde verilmişti. Çimento fabrikasında ısı sistemlerinin verimlerinin değerlendirilmesi Tablo 5.1'de gösterilmektedir. Ayrıca yaş sistemle üretim yapan bu fabrika, kuru sistemle üretim yapan bir fabrikayla karşılaştırılması Tablo 5.2'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1 Çimento fabrikası ısııl proseslerin enerji ve ekserji verimi.

Sistem	Enerji verimi	Ekserji Verimi
Döner Fırın Bölümü	45,93	34,81
Soğutma Bölümü	79,55	38,2
Döner Fırın ve Soğutma Bölümü	49,25	33,75
Tras Kurutma Bölümü	64,8	14,37
Kömür Kurutma Bölümü	54,29	3,83

Tablo 5.2 Yaş sistem, kuru sistem verimlerini karşılaştırılması

Sistem	Yaş sistem verimleri		Kuru sistem verimleri (Söğüt 2004)	
	Enerji verimi (%)	Ekserji Verimi (%)	Enerji verimi (%)	Ekserji Verimi (%)
Döner Fırın Bölümü	45,9	34,8	83	49
Soğutma Bölümü	79,6	38,2	89	49
Döner Fırın ve soğutma Bölümü	49,2	33,7	61	49
Tras Kurutma Bölümü	64,8	14,3	74	9,4
Kömür Kurutma Bölümü	54,2	3,83	74	18,3

Yaş sistemle kuru sistem farkı döner fırından kaynaklanmaktadır. Yaş sistemle üretim yapan Bartın çimento fabrikasında ön ısıtıcı siklonlar yoktur. Bunun yerine fırının boyu çok daha uzundur ve fırının bir kısmında bu ön ısıtma gerçekleşmektedir. Bu yüzden döner fırının manto yüzeyinden daha fazla enerji kaybolmaktadır. Ayrıca yaş sistemlerde farin % 33 nemli bir halde girmekte ve bunu buharlaştırmak içinde ayrıca enerji harcanmaktadır.

Tras kurutma bölümündeki verim farkı tamamen her fabrikanın sahip olduğu sistemde yalıtımsızlıktan veya sızdırmazlılığın olmamasından kaynaklanmaktadır. Burada kömür kurutma bölümünde öğütme yapılmamaktadır. Ancak kuru sistemle üretim yapan fabrikanın sahip olduğu kömür değirmeni hem kurutma hem de öğütme yapmaktadır. Bu yüzden direk karşılaştırmak objektif olmayacaktır. Ancak genel olarak değerlendirildiğinde yaş sistemle üretim yapan fabrikalarda verimde düşük çıkmaktadır. Bunun sebebi hem nemli farinin

suyunu buharlaştırmak için harcanan enerjiden hem de döner fırının yüzeyinden ışınlım ve taşınımla olan ısı kaybının döner fırının uzunluğundan dolayı fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

5.3.1 Döner Fırın ve Soğutma Bölümü

Döner fırın ve soğutma bölümü kombine çalışan iki ayrı sistemdir. Bu sistemlerin değerlendirilmesi sırasıyla yapılacak daha sonra tüm sistem değerlendirilecektir. Öncelikli olarak sanayide çalışan sistemler arasında en büyük boyutlara sahip olan ve çimento fabrikasında sıcaklık olarak en yüksek ısıl işlemlerin gerçekleştiği ve en büyük ısıl kapasiteye sahip olan döner fırın değerlendirilecektir.

Yaş sistemle üretim yapan bu fabrikada kullanılan 120 metre boyunda, 3,4 m çapında, % 4 eğimle ve dakikada 2 devirle çalışan döner fırının, dış manto sıcaklığı ortalama 509 K sıcaklığa ulaşmaktadır. Bu uzunluktaki devasa sistemin yüzeyinden çok büyük miktarlarda ısı kaybı kaçınılmazdır. Döner Fırın sisteminin analizi sonucunda enerji veriminin % 45,9 olması sisteme giren enerjilerin yarısından fazlasının kayıp enerji olarak atıldığına bir göstergesidir. Kuru sistemle üretim yapan fabrikalarda verimler yaklaşık % 80 civarlarında çıkmaktadır (Söğüt 2004). Bu büyük farkın sebebi ise homojenleştirmek için %33 seviyelerinde su kullanılan yaş sistemle üretim yapan fabrikalarda bu suyu buharlaştırmak için kullanılan çok büyük miktarlardaki enerji harcanmasıdır. Ancak yaş sistemle üretim yapan bu fabrikada sistemin ekserji verimi ise % 34,5 civarındadır. Söğüt'e (2004) göre kuru sistemle üretim yapan fabrikalardaki ekserji verimi ise % 49 civarındadır. Sonuçta sistemin enerji verimi diğer kuru sistemle üretim yapan döner fırınlara göre çok verimsiz olsa da bu enerjinin kullanılabilirliği açısından değerlendirildiğinde, enerji verimindeki gibi büyük bir fark yoktur. Ancak yapılacak % 1'lik bir iyileştirme bile büyük kazançlar sağlayacaktır.

Döner fırından ısı kaybı ve bacadan atılan enerji yaklaşık olarak 289.083.886,1 kJ/h kadardır. Söğüt'ün (2004) yaptığı çalışmada ise, Balıkesir çimento fabrikasının döner fırının ısı kaybı ve bacadan atılan enerji yaklaşık olarak 223.029.243,7 kJ/h civarındadır. Bu aradaki fark yaş sistemin daha verimsiz olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca Bartın çimentoda döner fırının ısı kaybı, diğer fabrikaya göre çok fazladır. Bunu sebebi de kullanılan döner fırının boyunun uzunluğudur.

Döner fırın sisteminin ısı kayıplarının azaltılması için sisteme giren madde miktarları ve sıcaklıkları kontrol edilmelidir. Döner fırın sistemine büyük miktarlarda sızıntı hava girişi olmaktadır. Bu sızıntı havanın büyük bir kısmı alev borusu çevresindeki ve bu borunun olduğu baş kısmındaki aralıklardan girmektedir. Sisteme giren farinin klinkerleşmesinin sağlanması için gerekli ısının bir kısmında bu sızıntı havayı ısıtmak için harcanmaktadır. Bu da sistemin iç sıcaklığının kontrolünü zorlaştırmakta, verimi düşürmekte ve gereksiz enerji harcanmaktadır.

Ayrıca döner fırın bölümüne giren kömür yaklaşık % 2,2 neme sahiptir. Kömür içindeki nem oranı arttıkça yanan kömürün ısısının bir kısmı bu nemi buharlaştırmak için harcanacaktır. Bu hem yanma şartlarında ve alev formunda zayıflıklar oluşturur, hem de gereğinden fazla enerji tüketimine yol açar. Ancak kömürün ilk tutuşması için % 0,5-1,5 civarlarında neme ihtiyaç duyulmaktadır.

Kömürün yakılması için gerekli hava miktarı 57.747,58 kg/h'dir. Yanmanın tam olması için bir miktar hava fazlası ile çalışmak gereklidir. Bu miktar bacadan atılması gerekli olan optimum baca gazı miktarının % 3-4 ü O₂ olacak şekilde ayarlanması ile yapılır. Ancak sisteme yanmanın gerçekleşmesi için gerekli miktarın iki katından fazla hava girişi olmaktadır. Bu fazla hava yanma verimini düşürmektedir. Ayrıca gerekli ısıyı elde edebilmek için daha fazla kömür harcanmasına yol açacaktır.

Döner fırın yüzeyinden 179.178.665,07 kJ/h gibi çok büyük miktarlarda ısı kaybı olmaktadır. Bunun $Q \cdot (1 - (T_0/T_s))$ kadarı bu ısının kullanılabilir kısmını teşkil etmektedir ve bu miktar 92.874.274,73 kJ/h kadardır. Bu enerji saatte yaklaşık 25,8 M' a eşittir. Bu büyük enerji bu sistem çevresine uygun şekilde kurulacak bir ısı makinesi ile işe veya güce çevrilebilir. Ancak bu sadece teoride geçerli bir durumdur. Bunu pratikte uygulaması çok zor ve maliyetlidir. Ayrıca döner fırın çevresinde ışınlam ile kaybolan enerjiyi ışınlam toplayıcı yardımıyla sıcak su olarak konut ısıtmada kullanılacak bir sistemde yapılabilir. Ancak bu iki alternatif çözüm pratikte kurulması zordur ve bu sistemde günümüz şartlarında maliyeti çok fazla olacaktır. Bu yüzden en uygun çözüm fırının manto kısmından yayılan bu enerjinin iyi bir yalıtımla yayılmasının engellenmesi ile olacaktır. Böylece sistem için harcanması gerekli enerji miktarı azalacaktır. Bu yalıtım döner fırının iç kısmından yapılmalıdır.

Döner fırın bacasından 109.905.221,08 kJ/h debi ile gönderilen sıcak gazın enerjisi çok yüksektir. Bu gazın ekserjisi 49.429.028,72 kJ/h civarlarındadır. Bu gaz lojman ısıtmada kullanılmaktadır. Bu da fabrikanın lojmanlarında ısınma maliyetini sıfıra düşürmektedir.

Soğutma bölümünde çevreden bir ısı girişi vardır. Bu ısı girişi soğutma bölümü enerji denkliği hesaplanırken elde edilmiştir. Bu enerji saatte 54.863.252,4 kJ dır. Bunun büyük bir kısmı döner fırından atılan ısıdan kaynaklanmaktadır. Buda soğutucunun performansını düşürmektedir. Ayrıca sistemin enerji verimi % 79,6 çıkmasına rağmen ekserji verimi % 38,2 seviyelerinde çıkmaktadır. Buradan soğutucunun gerçek manada verimsiz olduğu söylenebilir. Soğutucu bölümünde verimin artırılması için öncelikle sisteme dışarıdan gelen ısıyı engellemek gerekmektedir.

Soğutucu bölümüne gelen klinkerin soğutulması için, fanların sisteme gönderdiği ve klinkeri soğutup, ısınıp alıp 1233 K sıcaklığa ulaşan ve döner fırına yakma havası olarak gönderilen soğutma havası olan sekonder hava tekrar kullanılması sisteme verim anlamında büyük kazanç sağlamaktadır.

Genel sistemin verimi değerlendirildiğinde ise enerji verimi % 49,2, ekserji verimi ise % 33,3 civarlarındadır. Kuru sistemle üretim yapan fabrikalarda enerji verim % 61, ekserji verimi ise % 49'dur (Söğüt 2004). Bu fark yaş sistemle üretim yapan Bartın çimento fabrikasında sisteme giren farinin %33 nemli oluşundan kaynaklanmaktadır. Farinin homojenleştirilmesi için kullanılan su, kuru sistemlerde kullanılmamaktadır. Ayrıca kuru sistemlerde kullanılan ön ısıtıcı siklonların vazifesini, yaş sistemde 120 metre uzunluğundaki döner fırın görmektedir. Bunların hepsi yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasında enerji tüketimini ve maliyetini arttırmaktadır.

5.3.2 Tras Kurutma Bölümü

Bartın çimento fabrikasının katkı kurutma bölümünde yalnızca tras kurutma işlemi yapılmaktadır. Bu yüzden tras kurutma olarak adlandırılabilir. Sisteme %18 nemle giren tras sıcak hava ile nem oranı azaltılarak % 6,5 seviyelerine düşürülmektedir. Bu sistemin enerji verimi % 64,8 ve ekserji verimi ise % 14,37 çıkmaktadır. Buda sistemin veriminin çok düşük olduğu göstermektedir. Bu sistemden saatte 3.933.987 kJ enerji ve 3.766.868,11 kJ ekserji çıkışı olmaktadır. Bu enerji döner fırın sisteminde kaybolan enerji yanında çok düşük

miktarda bir enerjidir. Bu sistemin kaybettiği enerjiyi kullanma düşüncesi döner fırında sonraki sıralarda yer almalıdır. Öncelik döner fırın sistemindeki enerjiyi geri dönüştürebilmeye verilmelidir. Ancak ne olursa olsun her sistemin verimli çalışması enerji tasarrufu açısından çok önemlidir.

Burada tras değirmeni yüzeyinde hissedilir bir enerji kaybı görülmemektedir. Burada bacadan atılan gaz saatte 5.144.684,93 kJ enerji veya ikinci yasa diliyle 511.281,82 kJ ekserji olarak bulunmuştur. Ayrıca bu sistemde yeniden kullanılabilir en uygun enerji baca gazıdır.

5.3.3 Kömür Kurutma Bölümü

Döner fırına yakılması için gönderilecek olan kömürün kurutma işlemi burada gerçekleşmektedir. Kömür kurutma bölümüne % 10,05 nemle kömür girişi olmaktadır. Aynı zamanda sistemden % 3,6 nemle çıkmaktadır. Sistem sadece giren kömürü kurutmak için kullanılmaktadır. Bu sisteme giren enerji saatte 23.259.229,2 kJ ve çıkan enerji ise 12.628.050,76 kJ dır. Bu sistemin enerji verimi % 54,3 çıkmaktadır. Kömür kurutma bölümünün ikinci yasa verimi olan ekserji verimi analiz edilirken sisteme giren ekserji 5.011.395,4 kJ ve çıkan ekserji ise 191.990,66 kJ çıkmaktadır. Buradan sistemin ekserji verimi % 3,8 gibi çok düşük seviyelerde çıkmaktadır. Bu sistem ikinci yasa açısından bakıldığında çok verimsiz bir sistem olarak değerlendirilmektedir. Kurutma bölümüne genel açıdan bakıldığında herhangi bir kömür israfı olmamaktadır. Ancak 4.819.404,74 kJ gibi bir ekserji yok olmaktadır. Bu ekserji kaybı sistemin yalıtımsızlığından kaynaklanmaktadır. Bunun en iyi çözümü iyi bir yalıtım ile sağlanacaktır. Ayrıca sisteme saatte 5.275,6 kg hava girişi olmaktadır. Asma fırın tarafından ısıtılıp bir fan yardımıyla çekilen sıcak hava ayrıca bu sızıntı havayı ısıtmak içinde bir ayrıca enerji harcayacaktır. Bu yüzden kömürü kurutmak için gerekli enerjinin elde edilebilmesi için gereğinden fazla kömür yakılmasına sebep olacaktır. Bu yüzden sızıntı olarak giren havanın sisteme girmesini engellemek için yapılabilecek en iyi çözüm, sızdırmazlığın sağlanmasıdır.

Bacadan atılan sıcak gazın ekserjisi 174.009,67 kJ dır. Bu tekrar kullanılabilir en uygun enerjidir. Ancak tras değirmeninde olduğu gibi buda döner fırında kaybolan ekseri yanında önemsiz kalmaktadır. Öncelik döner fırında uygun yalıtımın yapılması ve döner fırından kaybolan enerjinin geri dönüşümünü sağlanması olmalıdır.

5.4 ÖNERİLER

Bu çalışmada Bartın çimento fabrikasında ısıl işlem yapan döner fırın ve soğutma bölümü, tras kurutma bölüm ve kömür kurutma bölümünün enerji ve ekserji analizleri yapılmış ve verimleri bulunmuştur. Ayrıca her sistemin değerlendirilmesi yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların sonucunda Türkiye de ve Dünyada, sanayide enerji tüketiminde çok büyük yer tutan çimento sektörünün analizlerinden çıkan sonuç; yalnız termodinamiğin birinci yasası ile değerlendirme yapılmasının bizi doğru sonuca götürmeyeceğidir. Eğer enerji analizine göre maliyet hesabı yapılırsa büyük hatalar doğar. Bu yüzden gerçek bir maliyet hesaplanmak isteniyorsa ekserji analizi dikkate alınmalıdır. Bu değerlendirmeler Bartın çimento fabrikası için yapılan çalışmada kanıtlanmıştır.

Ayrıca Bartın çimento fabrikası yaş üretimle yapan sistem olduğu için daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi verimin düşük olması ve bu sistemlerde çok daha fazla enerji tüketimi olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden Bartın çimento fabrikası kuru sisteme geçmek için yatırıma başlamıştır.

Sonuç olarak bu analizler büyük enerji tüketimi yoğunluğa sahip çimento sektöründe fabrikaya ışık tutacaktır. Ayrıca yenilenme büyük katkılar sağlanacaktır. Bu analizler yeni sistem içinde yapılarak genel enerji ve gerçek verim olan ekserji verimi ile durumun tespiti yapılarak iyileştirmeler uygulanmalıdır. Şu anda inşaatı süren sistemlerden olan döner fırın sisteminde yalıtımın en iyi şekilde yapılarak sızdırmazlığın en uygun şekilde sağlanması gerekmektedir. Ayrıca kojenerasyonlu sistemler sayılan bu sistemleri trijenerasyonlu sistemlere çevrilmesi için çalışmalar yapılmalıdır. Döner fırının yalıtımının en iyi şekilde yapılmasının dışında, sistem kurulurken eklenmesi çok daha kolay olan ve enerjide geri kazanım sağlayacak bir sistem eklenmesi hem ülkemiz için hem de fabrikanın enerji ve para tasarrufu için büyük karlar sağlayacaktır. Ayrıca sistemin olarak eksergoekonomik analizinin yapılması fabrikaya ekserji maliyetinin hesaplanması adına ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

- Akçaylı S İ** (2003) Çimento sektör araştırma raporu, İstanbul Ticaret Odası, Mayıs 2003, İstanbul.
- Apak E** (2007) Bir seramik fabrikasındaki enerji ve ekserji analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Kütahya 112s.
- Atalay Ö** (2004) Jeotermal sistemlerin ekserji analizi: Kızıldere örneği, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 92s.
- BarÇim** (2010) Bartın Çimento Fabrikası Teknik Verileri, Nisan 2011, Bartın.
- Bashmakov I** (2009) Resource of energy efficiency in Russia: scale, costs and benefits, *Energy Efficiency* 2:369–386.
- Bircan H ve Özcan S** (2003) *Excel Uygulamalı Kalite Kontrol*, Yargı Matbaası, Sivas
- Bohan R P** (2008) Labor and energy issues in cement manufacturing from the 1st cement industry technical conference to the 50th, *Proceeding of IEEE – IAS / PCA Cement Industry Technical Conference*, 18 – 22 May 2008, Miami, FL.
- Cembureau** (2008) Sürdürülebilir Çimento Üretimi; Avrupa Çimento Sanayinde Alternatif Yakıt ve Hammaddelerin Birlikte İşlenmesi. *Cembureau - Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayını*, 2008. Ankara.
- Çamdalı Ü** (2001) Termodinamik Analizlerde çevre Sıcaklığının Değişiminin Etkisi ve Endüstriyel Uygulamalar, *Turkish Journal of Engineering and Environment Science*, 25 (2001), 537 - 544.
- Çamdalı Ü, Erişen A ve Çelen F** (2004) Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production, *Energy Conversion and Management* 45: 3017–3031.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Çengel Y A ve Boles A B (2008) *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik*, 5.baskı,Güven Bilimsel, İzmir, 946s.

Çengel Y A, Wood B ve Dincer I (2002) Is Bigger Thermodynamically Better?.
Exergy, an International Journal, Vol. 2: 62-68.

Çetinkaya S (1999) *Termodinamik Yasalar İşlemler Uygulamalar*, Nobel Yayınları, Ankara.

Dutrow E, Boyd G, Worrell E ve Dodendorf L (2010) Shifting Energy Performance in U.S.cement production, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05469767> (10.05.2011)

Engin T ve Ari V (2005) Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems - A case study, *Energy Conversion and Management* 46, 551–562.

ETKB (1995) Sanayi Kuruluşlarının Enerji Tüketiminde Verimliliğin Arttırılması İçin Alacakları Önlemler Hakkında Yönetmelik,3.kısım, Madde 10.

Göçer C (2009) *Çimento Kimyası I, Hammadeler*, 1. basım, Nuh Çimento Eğitim ve Sağlık Vakfı Yayını, No. 1, Globus dünya basımevi, Bağcılar, İstanbul, 275 s.

Hammache A ve Shukuya M (2002) Introduction to the concept of exergy, *Vtt Research Notes* 2158, 22–29.

Hanle L J, Jayaraman K R ve Smith J S (2004) CO₂ Emissions Profile of the U.S. Cement Industry, *13th International Emission Inventory Conference Working for Clean Air in Clearwater*" Clearwater, FL, June 8 - 10, 2004.

Hasanbeigi A, Menke C ve Therdyothin A (2010) Technical and cost assessment of energy efficiency improvement and greenhouse gas emission reduction potentials in thai cement industry, *Energy Efficiency* (2011) 4:93–113.

Kabir G, Abubakar A I ve El-Nafaty U A (2010) Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant, *Energy*, 35, 1237–1243.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kolip A, Savas A F ve Bahat M** (2004) Energy saving technology of cement manufacturing, <http://www.science.az/physics/PowerEng/2004/v2article/art20.pdf>
- Kolip A ve Savaş A F** (2008) Dört Kademeli Paralel Akışlı Önısıtıcı Siklonlu Çimento Fabrikasında Kütle ve Enerji Denkliklerinin Matematik Modellenmesi, *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, 12. Cilt, 1. Sayı, s. 49-60.
- Koroneos C, Nanaki E A ve Xydis G A** (2011) Exergy analysis of the energy use in Greece. *Energy Policy* 39, 2475–2481.
- Koroneos C, Vasilakis N, Theodosiou ve Moussiopoulos N** (2003) Exergy Analysis of Cement and Concrete Production, International Exergy, *Energy and Environment Symposium*, İzmir, Temmuz 2003.
- Kotas T J** (1995) The exergy method of thermal plant analysis. Kriger publishing,
- Kotas T J** (1985) *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Anchor Brendon Ltd, London.
- Kuleli Ö** (2010) *Çimento Mühendisliği El Kitabı*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Genişletilmiş ikinci baskı, Ankara.
- Lu H** (2010) Evaluation of Life-Cycle Assessment Studies of Chinese Cement Production: Challenges and Opportunities, Lawrence Berkeley National Laboratory, May 2009. <http://escholarship.org/uc/item/6w97z7vp>
- Masanet E ve Worrell E** (2007) Promoting Energy Efficiency in Cement Making: The ENERGY STAR(R) for Industry Program, *Lawrence Berkeley National Laboratory*, <http://escholarship.org/uc/item/2gd549fv>
- Midilli A** (2011) Ekserji ve Uygulamaları Yaz Kursu Sunum, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu.
- Narin M ve Akdemir S** (2006) Enerji Verimliliği ve Türkiye, UEK - TEK 2006 Uluslararası Ekonomi Konferansı, Türkiye Ekonomi Kurumu, Ankara, Türkiye.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Platonova A** (2006) Energy saving adjustable AC drives for the cement Industry equipment, Master's thesis, Lappeenranta University of Technology, *Department of Electrical Engineering, Lappeenranta*, Finland.
- Rosen M A ve Dincer İ** (1997) On Exergy and Environmental Impact. *International Journal of Energy Research*, Vol. 21: 643-654.
- Sarıkaya Y** (1980) *Kimya Mühendisliğinde Birim Sistemler Termodinamik Tablolar, Termodinamik diyagramlar ve nomogramlar*, Gaye Matbaacılık, Ankara
- Sathaye J** (2011) Bottom-up Representation of Industrial Energy Efficiency Technologies in Integrated Assessment Models for the Cement Sector, Lawrence *Berkeley National Laboratory*, <http://escholarship.org/uc/item/0xt5x113>
- Savaş A F** (2004) Paralel Akışlı Önkalsinasyonlu Çimento Modellemesi Fabrikasında Enerji ve Ekserji Analizi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (yayımlanmamış), Sakarya, 206 s.
- Sogut Z, Oktay Z ve Hepbaşlı A** (2009) Energetic and exergetic assessment of a trass mill process in a cement plant, *Energy Conversion and Management* 50, 2316–2323.
- Sorin M V, Le Goff T J A, Brodyansky V M ve Pilavachi P A** (1994) The efficiency of industrial processes: Exergy analysis and optimization, *Elsevier*, Amsterdam and New York.
- Söğüt Z, Oktay Z, Karakoç H ve Yörü Y** (2010) Kuru tip çimento üretiminde farin değirmeninin termoekonomik analizi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30, 1, 59-72, J. of Thermal Science and Technology.
- Söğüt M Z** (2005) Çimento Fabrikasında Enerji Taraması ve Üretim Hattı Isı Proseslerinde Enerji ve Ekserji Analizi. Yüksek lisans tezi (yayımlanmamış), Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, 187 s.
- Sussman M V** (1979) The Standart Chemical Availability : A Useful Concept and a New Property Table, *American Institute of Chemical Engineers Meeting*, Houston, Texas.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Szargut J, Morris D R ve Steward F R** (1988) Exergy Analysis Of Thermal, Chemical And Metallurgical Processes, *Hemisphere Publishing Corporal Kin*, NewYork.
- Tekel E** (2006) Termik santrallerin Enerji ve Ekserji analizi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 99s.
- Topaç B** (2008) Kimyasal ekserji hesaplama yöntemlerinin petrol türevi hafif yakıtlara uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 87s.
- URL-1** (2011) <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=53>, Çimento Tarihi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 16 Haziran 2011.
- URL-2** (2011) http://hun.pau.edu.tr/ders_notlari/yapi_malzemesi/Yapi_Malzemesi_2_baglayici-kirec-dogal_puzolan.pdf, Bağlayıcı maddeler, Yapı Malzemesi 2, 2007 Bahar yarıyılı ders sunum belgesi, Hayri Ün, Pamukkale Üniversitesi – Mühendislik Fakültesi, Denizli.
- URL-3** (2011) <http://www.thbb.org/Content.aspx?ID=23>, Türkiye Hazır Beton Birliği, Çimento, 28 Mayıs 2011.
- URL-4** (2011) <http://www.ormela.tr.gg/Aydinlanma-Cagi-ve-Sanayi-inkilabi.htm>, Aydınlanma çağı ve sanayi inkilâbı, Orhan Yıldız, 17 Haziran 2011.
- URL-5** (2006) The European Cement Association, Cement & Lime Bref Revision, Cembureau Contribution, Specific Energy Consumption, 31 May 2006.
- URL-6** (2011) <http://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87imento> Çimento, 23 Mayıs 2011.
- URL-7** (2011) <http://www.sanko.com.tr/sirket/bartincimento.asp>, SANKO Bartın Çimento A. Ş. Tanıtımı, 14 Mayıs 2011.
- URL-8** (2010) <http://www.teknikyayincilik.com> Elektrik Birim Fiyatları TEDAŞ geneli 2010 Yılı Tarifesi.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

URL 9 (2011) <http://d4avp.blogspot.com/2011/03/kiln-diagrams.html> (10.04.2011).

Utlu Z, Sogut Z, Hepbash A ve Oktay Z (2006) Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 2479–2489.

Wall J ve Gong M (2001) Un exergy and sustainable development- Part 2; Indicators and methods. Exergy Int. J , 217-233, 2001.

Wall G (1987) Exergy conversion in teh Swedish society.Resource Energy.

Worrell E ve Galitsky C (2004) Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making, An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers, Environmental Energy Technologies Division, Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency, January 2004.

Worrell E ve Galitsky C (2004) Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making, Lawrence Berkeley National Laboratory, January 2004.

Worrell E, Galitsky C ve Price L (2008) Energy Efficiency Improvement Opportunities for the Cement Industry, Environmental Energy Technologies Division, Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, January 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Abid USTAOĞLU 1987 yılında Ankara’da doğdu; ilk ve orta öğretimini aynı şehirde tamamladı, Prof. Dr. Şevket Raşit Hatipoğlu Lisesinden mezun olduktan sonra 2005 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Uşak Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne girdi; 2009 yılında mezun olduktan sonra Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı; halen Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Barın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
 Ağdacı köyü mevki
 74100 BARTIN

Tel: (507) 679 19 11

Faks: (378) 223 52 58

E-posta: austaoglu@bartin.edu.tr