



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ÖN ISITICI VE KALSİNATÖRLÜ ÇİMENTO  
FABRİKASINA AİT DÖNER FIRIN PROSESİ ÜZERİNDE  
ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZLERİNİN UYGULANMASI**

**Onurhan UĞUR  
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Hasan YAMIK**

**İkinci Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Emin AÇIKKALP**

**BİLECİK, 2018  
Ref.No:10203144**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ÖN ISITICI VE KALSİNATÖRLÜ ÇİMENTO  
FABRİKASINA AİT DÖNER FIRIN PROSESİ ÜZERİNDE  
ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZLERİNİN UYGULANMASI**

**Onurhan UĞUR  
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Hasan YAMIK**

**İkinci Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Emin AÇIKKALP**

**BİLECİK, 2018**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Science  
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

**ENERGY AND EXERGY ANALYSIS ON ROTARY KILN  
PROCESS IN A CEMENT FACTORY EQUIPPED WITH  
PREHEATER AND CALCINATOR**

**Onurhan UGUR  
Master Thesis**

**Thesis Advisor  
Assoc. Dr. Hasan YAMIK**

**Thesis Co-Advisor  
Assoc. Dr. Emin AÇIKKALP**

**BİLECİK, 2018**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun  
.....tarılı ve ..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından  
.....tarilinde tez savunma sınavı Omurtan UĞUR' un "*Ön Isıtıcı ve  
Kalsinatörlü Çimento Fabrikasına Alt Döner Fırın Prosesi Üzerinde Enerji ve Ekserji  
Analizlerinin Uygulanması*" başlıklı tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim  
Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Hasan YAMIK

ÜYE: Doç. Dr. Önder AÇUNTAS

ÜYE: Doç. Dr. Armağan Fırat SAKAL

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun

.....tarılı ve ..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

## TEŐEKKÖR

Tez çalışmalarım sırasında bana yol gösteren ve yardımlarını hiç esirgemeyen danışman hocalarım Doç. Dr. Hasan YAMIK ve Doç. Dr. Emin AÇIKKALP' e en içten duygularımla teőekk r ederim.

Tez alışması için gerekli olan verilerin sağlanmasında bana yardımcı olan Ahmet Cevdet CANBOLAT ve Beyt llah T RKDAY' a teőekk r ederim.

Ayrıca bu süreçte ve hayatım boyunca daima arkamda olan ve beni teővik eden ailem Sevim UğUR, Sahra DANDIL, Emre DANDIL ve biricik yeğenim Doğa DANDIL' a teőekkürü bir borç bilirim.

## ÖZET

Enerji tüketiminde en büyük pay, yüksek enerji maliyetleri ile sanayi sektörüne aittir. En çok enerji tüketen sektörlerden biri çimento endüstrisidir. Hızla gelişen dünyada hızla artan sanayileşmenin doğal bir sonucu olarak çimento sektörüne yönelik artan talep, bu sektörde kullanılan enerjinin de artmasına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra, enerjinin etkin kullanımı daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle çimento sektöründe üretilen ve üretime karşılık tüketilen enerjinin takibi büyük önem taşımaktadır. Dünyadaki diğer ülkelerde olduğu gibi, Türkiye'de de çimento sektöründe büyük miktarda enerji kullanılmaktadır. Toplam sisteme giren enerjinin ne kadar etkin kullanıldığının belirlenmesi söz konusu olduğunda enerji verimliliği büyük önem taşımaktadır. Enerji verimliliğinin belirlenmesi, daha kontrollü ve bilinçli enerji kullanımını sağlayacaktır. Enerjiyi etkin bir şekilde tasarruf etmek için enerji kayıplarının yaşandığı aşamanın tespiti ile, bu kayıp enerjilerin geri kazanımı için alternatif yöntemler sunulabilecektir.

Bu çalışmada, bir çimento fabrikasında döner fırının enerji ve ekserji analizi dahil olmak üzere termodinamik analizler yapılmıştır. Bu nedenle çimento üretim prosesi için kütle ve enerji dengeleri hesaplanmıştır. Tüm veriler temel olarak saat alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalara göre, enerji verimi % 62, ekserji verimi ise % 36 olarak bulunmuştur. Ayrıca enerji ve ekserji sonuçları kullanılarak yakıt enerjisi tükenme oranı, verimlilik eksikliği oranı, iyileştirme potansiyeli değerleri hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çimento; Enerji; Ekserji; Döner Fırın, Termodinamik

## ABSTRACT

The biggest share of energy consumption belongs to the industrial sector with higher energy costs. One of the most energy-consuming industries is the cement industry. Increasing demand for cement industry in the rapidly developing world as a natural result, the energy used in this sector also increases. In addition, the effective use of energy is becoming more important. For this reason, it is important to follow the energy produced and consumed in the cement sector. The cement sector in Turkey as well as in other countries of the world uses large amounts of energy. Energy efficiency has great importance in determining how much of the energy entering the total system is being used effectively. If energy efficiency is determined, more controlled and conscious energy use will be achieved. In order to save energy effectively, the phase in which the energy losses has to be determined, so alternative proposals will be presented for the recovery of these lost energies.

This study focuses on making thermodynamic analysis including energy and exergy analysis of a rotary kiln in a cement factory. For this reason mass and energy balances of the cement production process were calculated. All data evaluated for per hour basis. According to the calculations, energy yield % 62, exergy yield %36 was found. In addition, energy and exergy results are used to calculate the fuel consumption rate, efficiency loss ratio and improvement potential values.

**Keywords:** Cement; Energy; Exergy; Rotary Klin, Thermodynamic

## İÇİNDEKİLER

### JÜRİ ONAY SAYFASI

### TEŞEKKÜR

### ÖZET.....I

### ABSTRACT ..... II

### İÇİNDEKİLER ..... III

### ÇİZELGELER DİZİNİ ..... V

### ŞEKİLLER DİZİNİ .....VI

### 1.GİRİŞ ..... 1

### 2. ÇİMENTO TEKNOLOJİSİ..... 3

#### 2.1. Çimentonun Tanımı Ve Tarihsel Gelişimi ..... 3

#### 2.2. Dünyada Ve Türkiye'de Çimento ..... 6

##### 2.2.3. Dünyada çimento ..... 6

##### 2.2.4. Türkiye' de çimento ..... 7

#### 2.3. Çimento Üretim Teknolojisi ..... 10

##### 2.3.1. Çimento hammaddeleri ..... 10

###### 2.3.1.1. Ana hammaddeler ..... 11

###### 2.3.1.2. Katkı maddeleri ..... 11

##### 2.3.2. Çimento üretim aşamaları ..... 12

###### 2.3.2.1. Hammadde temini..... 13

###### 2.3.2.2. Hammadde hazırlama ve depolama ..... 13

###### 2.3.2.3. Farin hazırlama ve depolama ..... 13

###### 2.3.2.4. Yakıt hazırlama ve depolama ..... 14

###### 2.3.2.6. Çimento öğütme ve depolama ..... 21

###### 2.3.2.7. Ambalajlama ve sevk..... 22

##### 2.3.3. Çimento üretim teknolojisi ..... 22

##### 2.3.4. Çimento çeşitleri..... 25

###### 2.3.4.1. Türk standartlarına göre çimento çeşitleri ..... 26

##### 2.3.5. Çimentonun kullanım alanları ..... 27

### 3.TERMODİNAMİK KAVRAMLAR ..... 29

#### 3.1. Termodinamiğin Birinci Kanunu ..... 29

#### 3.2. Termodinamiğin İkinci Kanunu ..... 30



|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3. Ekserji ve Tanımı .....                           | 31        |
| 3.3.1. Ekserjinin önemi.....                           | 32        |
| 3.3.2. Ekserji analiz metodu .....                     | 33        |
| 3.3.2.1. İş etkisi ile ekserji transferi.....          | 35        |
| 3.3.2.2. Isı etkisi ile ekserji transferi.....         | 35        |
| 3.3.2.3. Madde akışı ile birleştirilmiş ekserji .....  | 36        |
| 3.3.3. Tersinirlik .....                               | 39        |
| 3.3.4. Tersinmezlik (Ekserji kaybı) .....              | 40        |
| 3.3.5. Ekserji verimliliği.....                        | 41        |
| 3.3.5.1. Basit verimlilik .....                        | 42        |
| 3.3.5.2. Rasyonel verimlilik.....                      | 42        |
| 3.3.5.3. Geçişli ekserji ile verimlilik.....           | 43        |
| <b>4. LİTERATÜR ÖZETİ .....</b>                        | <b>44</b> |
| <b>5.MATERYAL VE METOTLAR.....</b>                     | <b>52</b> |
| 5.1. Döner Fırın Kütle, Enerji ve Ekserji Analizi..... | 52        |
| 5.1.1. Döner fırın kütle analizi.....                  | 53        |
| 5.1.2. Döner fırın enerji analizi .....                | 53        |
| 5.1.3. Döner fırın enerji verimliliği .....            | 54        |
| 5.1.4. Döner fırın ekserji analizi.....                | 54        |
| 5.1.5. Döner fırın ekserji verimliliği.....            | 55        |
| <b>6.BULGULAR .....</b>                                | <b>57</b> |
| 6.1. Döner Fırın Kütle Analizi.....                    | 57        |
| 6.2. Döner Fırın Enerji Analizi.....                   | 58        |
| 6.3. Döner Fırın Enerji Verimliliği.....               | 61        |
| 6.4. Döner Fırın Ekserji Analizi .....                 | 61        |
| 6.5. Döner Fırın Ekserji Verimliliği .....             | 64        |
| <b>7.TARTIŞMA .....</b>                                | <b>65</b> |
| <b>8.SONUÇ.....</b>                                    | <b>66</b> |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                 | <b>69</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                   | <b>74</b> |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa No

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Çimento sektörünün dünyadaki büyüme durumu.....                                    | 6  |
| Çizelge 2.2. Yıllara göre Türk çimento sektörü çimento üretim ve tüketim miktarları....         | 8  |
| Çizelge 2.3. Çimentonun 2017-2023 yılları arasındaki tahmini üretim ve tüketim miktarları ..... | 9  |
| Çizelge 2.4. Klinkeri oluşturan bileşikler ve temel kaynakları.....                             | 10 |
| Çizelge 2.5. Döner fırınlarda maksimum kapasite-spesifik ısı tüketimi tablosu. ....             | 19 |
| Çizelge 2.6. TS EN 197- 1 standardına göre bazı çimento tipleri. ....                           | 27 |
| Çizelge 6.1. Döner fırına giren kütle tablosu. ....                                             | 57 |
| Çizelge 6.2. Döner fırından çıkan kütle tablosu. ....                                           | 57 |
| Çizelge 6.3. Döner fırına ait giriş enerjileri. ....                                            | 59 |
| Çizelge 6.4. Döner fırına ait çıkış enerjileri.....                                             | 60 |
| Çizelge 6.5. Döner fırına giren ekserji. ....                                                   | 62 |
| Çizelge 6.6. Döner fırından çıkan ekserji. ....                                                 | 63 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. Çimento sektörünün gelecek yıllardaki tahmini artışları.....               | 7  |
| Şekil 2.2. Çimento üretim aşamaları.....                                              | 12 |
| Şekil 2.3. Döner fırının genel görüntüsü.....                                         | 17 |
| Şekil 2.4. Döner fırının ters akış prensibi. ....                                     | 18 |
| Şekil 2.5. Yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri.....      | 23 |
| Şekil 2.6. Yarı yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri..... | 24 |
| Şekil 2.7. Kuru sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri.....     | 25 |
| Şekil 3.1. Isı Makinası. ....                                                         | 30 |
| Şekil 3.2. Soğutma Makinası. ....                                                     | 31 |
| Şekil 3.3. Sürekli akış halinde açık bir sistemin ekserji analizi.....                | 33 |
| Şekil 3.4. Ekserji kullanım kayıpları.....                                            | 34 |
| Şekil 3.5. Isı, entropi ve ekserji geçişinin gösterimi. ....                          | 36 |
| Şekil 3.6. Sistemin fiziksel ekserji farkı. ....                                      | 37 |
| Şekil 3.7. Elektrik motoruna giren ve çıkan enerji gösterimi. ....                    | 40 |
| Şekil 5.1. Döner fırın akış şeması. ....                                              | 53 |
| Şekil 8.1. Döner fırın enerji verimliliği. ....                                       | 66 |
| Şekil 8.2. Döner fırın ekserji verimliliği.....                                       | 66 |

## 1.GİRİŞ

Çimento, yapı malzemesi olarak dünya çapında üretilen ve kullanılan önemli bir malzemedir (Shodhganga, 2018). Genel bir tanım olarak, su ile reaksiyona girdiğinde sert bir kimyasal mineral yapısı oluşturan ince gri bir toz formudur denilebilir. Çimento, betonu bir arada tutan yapıştırıcı olarak da belirtilebilir ve betona yüksek mukavemet kazandırmaktadır. Keşfi Romalıları kadar dayanmaktadır. Romalıların kireç ( $\text{CaCO}_3$ ) ile volkanik külü karıştırıp, bu karışımı Colosseum gibi etkileyici yapıtların yapımında çimento harcı olarak kullanıldıkları bilinmektedir (Nzic, 2018).

Çimento üretimi, büyük miktarlarda hammadde, enerji, emek ve sermaye gibi yoğun kaynak gerektiren bir uygulamadır. Çimento, kalker, kireçtaşı, şist, kil ve kum gibi ham maddelerden üretilmektedir. Bu hammaddeler taş ocağından çıkarılmış, ezilmiş, ince öğütülmüş ve doğru kimyasal bileşim için harmanlanmışlardır. Hammadde kompozisyonunu ayarlamak için az miktarlarda demir cevheri, alümina ve diğer mineraller eklenebilir (Ifc 2017). Çimento üretim prosesi, proses hammaddelerinin madenciliği, bu malzemelerin ezilmesi, harmanlanması, 1500 °C sıcaklıklara kadar ısıtılması ve son olarak, çimento tozu oluşturmak için ateşlenen ürünün toz haline getirilmesi aşamalarında oluşmaktadır (Berry, Cross, and Stephens 2009). Bu adımların her birinin, belirli enerji gereksinimleri ve tüketim modelleri vardır. Çimento fabrikalarında diğer enerji tüketimleri, nihai ürün paketleme, aydınlatma ve inşaat hizmetleri için olmaktadır. Bunlar genellikle ana işlem adımlarındaki ana elektrik ve yakıt tüketimine kıyasla daha az elektrik kullanımlarını içermektedirler (Ifc 2017). Büyük miktarda enerji tüketiminin yanı sıra, çimento üretimin de önemli miktarda  $\text{CO}_2$  emisyonu ve diğer sera gazları salınımı da meydana gelmektedir (Berry, vd., 2009). Çimento endüstrisi üzerine yapılan çalışmalarda, çimento endüstrisinin, kalıcı organik kirleticilerin yanı sıra civa, karbon monoksit, partikül madde gibi diğer emisyonlar arasında, çok sayıda hava toksisitesinin ana kaynağı olduğu belirtilmektedir (Price 2012).

Dünyada nüfus artışının hızı ve sanayi sektörünün ilerleyişi beraberinde enerjiye olan ihtiyacı da giderek artırmaktadır. Bu nedenle kaynakların daha verimli kullanımı ve tasarrufu konuları öne çıkmaktadır (Kandilci, 2013). Çimento üretimi en yoğun enerji

gerektiren süreçlerden biridir ve önemli kirletici emisyonlarından sorumludur. Artan enerji maliyetleri, paydaşları ve araştırmacıları enerji performansını iyileştirmek ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmak için alternatif seçenekler aramaya zorlamaktadır (Rahman, vd., 2017). Çimento endüstrisindeki toplam üretim maliyetlerinin arasında enerji maliyeti tipik olarak işletim maliyetlerinin % 20 ila 40 'ı kadardır (Worrell, vd., 2013). Termodinamik anlamda tasarruf ısı kayıplarının azaltılması ile sağlanabilir. Bu aşamada ekserji analizleri devreye girmektedir (Kandilci, 2013).

Termodinamik sistemlerde enerjinin işe dönüştürülebilen kısmına enerji açısından kullanılabilirlik yani "ekserji" denir. Termodinamiğin birinci yasasına göre bir termodinamik proseste enerji yani ekserji ve enerjinin toplamı sabittir. Termodinamiğin ikinci yasasına göre ise, ekserji tersinir süreçlerde sabit kalır fakat tersinmez süreçlerde tüketilir ve bir kısmı veya tamamı enerjiye dönüşür (Kandilci, 2013).

Yapılan çalışmada, bir çimento fabrikasında en çok enerji tüketen bölüm yani döner fırın bölümü incelenmiştir. Bu bölümün incelenmesi işlemi, fabrikadan alınan değerler sonucunda kütle, enerji ve ekserji analizini içermektedir. Bu analizler sonucunda ise incelenen döner fırının enerji verimi % 62, ekserji verimi ise % 36 olarak hesaplanmıştır.

## 2. ÇİMENTO TEKNOLOJİSİ

### 2.1. Çimentonun Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Çimento, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcıdır. Hidrolik bağlayıcılar, su ile reaksiyona girdikten sonra sert bir kütle oluşturur ve su içerisinde sertlik ve mukavemet değerlerini korur veya arttırır (Dogaka, 2015).

Çimento esas olarak ince kum ve iri taneli kütleleri betonda birleştirmek için kullanılan ince, yumuşak, toz tipi bir maddedir. Çimento, hidrolik bağlayıcı görevi gören bir yapıştırıcı bir maddedir, yani su eklendiğinde sertleşir. Çimento kelimesi yaygın olarak kullanılmasına rağmen, genellikle beton veya harç ile karıştırılır. Çimento, hem beton hem de harç için kullanılan anahtar bir bileşen konumundadır. Bunun yanı sıra, her zaman kullanılmadan önce diğer malzemelerle karıştırılır (Cembureau, 2018):

- Çimentonun en yaygın kullanımı genellikle su, kum ve çakılla karıştırılarak oluşturulan beton halidir.
- Çimentonun su, kireç ve kum ile karıştırılmasıyla ise harç elde edilir.

Çimento çok eski zamanlardan beri önemini hiç kaybetmeden kullanılan, sürekli üzerine araştırmalar yapılan ve geliştirilen önemli bir yapı malzemesidir (Karakaş, 2006). "Çimento" kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamında ki Latince "caementum" dan türemiştir (TCMA, 2009).

Çimento ve beton yüzyıllardır dayanıklı yapıların inşasında kullanılmaktadır. MS 80 yılında tamamlanan Roma'daki Coliseum, beton yapıların zamana karşı dayanıklılığına iyi bir örnektir. Romalılar yerel olarak mevcut hammaddeleri, tebeşiri ve volkanik külleri açık ateşlerde ısıtarak çimentoyu üretmişlerdir. Portland çimentosu adı verilen çimento modern hali, 19. yüzyılın başlarında geliştirilmiş ve o zamandan beri geliştirilme çalışmalarına devam edilmektedir (Cembureau, 2018).

M.Ö. 70 - 25 yılları arasında Mimar Vitruvius "On Architecture" (Mimarlık üzerine) adlı kitabında puzolan ve kireç karışımlarının hidrolik özelliklerinden bahsetmiştir. Hatta nehir ve deniz kıyısında yapılacak olan yapılarda kullanılacak harç

için karışım oranını vermiştir. Anadolu'da Çatalhöyük'teki yapılan araştırmalarda kullanılan sıvanın 7000 yıl önce yapıldığı saptanmıştır (Ustaoglu, 2011).

Tarihte, Çin Seddi, Mısır Piramitleri ve farklı zamanlarda yapılan yapıtlarda çeşitli bağlayıcı maddeler kullanılmıştır. Örneğin; Romalılar sönmüş kireç ile volkanik kütlelerle ve sonraları, pişirilmiş tuğladan elde edilen tozlarla karıştırmışlardır. Eski Yunanlılar ise volkanik tüflerle kireç taşıyı karıştırmışlardır (TCMA, 2009).

1800 yılından sonra İngiltere'nin Leeds kentinde yaşayan Joseph Aspdin bir yandan duvarcı ustalığı yaparken, bir yandan da bir bağlayıcı (çimento) üretebilmek için kendi çapında çalışmalarını sürdürmekteydi. O zamanlar da yollar kalker taşları ile kaplıydı. Joseph Aspdin, bu yollardan geçen araçların ortaya çıkardığı taş tozlarını toplayarak, kil ile birleştirmiş ve bir fırında pişirerek çimento üretmeye çalışmıştır (Yollardan topladığı taş tozlarından dolayı ceza bile almıştır). 1811 yılından sonra istediği bağlayıcıyı üretmeyi başarmıştır. Ürettiği bağlayıcı Portland Adasından çıkarılan yapı taşlarına benzediğinden dolayı bu bağlayıcıya “Portland Çimentosu” adını vermiştir (As-beton, 2018).

Joseph Aspdin tarafından üretilen çimento yüksek sıcaklıklarda pişirilmediğinden dolayı bugünkü portland çimentosu özelliklerine sahip olamamıştır. Daha yüksek sıcaklıklarda pişirme işlemini ise 1845 yılında Isaac Johnson isimli bir İngiliz tarafından gerçekleştirilmiştir (Karçimsa, 2018).

Dünya'da çimento üretim ve satışına 1878 yılında başlanmıştır. Türkiye de ise 1912 yılında başlanmıştır. Türkiye'deki geç kalmanın sebebi su kireci imalinin yeteri kadar olmaması ve Osmanlı İmparatorluğunun çöküş döneminde olmasıdır (TCMA, 2009). Modern haliyle, yaygın yirmi yedi tür çimento, beş genel grupta (CEM I Portland çimentosu, CEM II Portland-kompozit çimentosu, CEM III Yüksek fırın çimentosu, CEM IV Pozzolanik çimento ve CEM V Kompozit çimento) ve üç mukavemet sınıfında (sıradan, yüksek ve çok yüksek) toplanabilir (Cembureau, 2018).

Dünya’ da üretilen çimentonun çoğu beton yapmak için kullanılır. Bu nedenle, herhangi bir çimento üretim prosesi son ürün olan betonu da dikkate alarak işletilmelidir. Bu durumun özellikle önemli olmasının sebebi, sürekli yeni çimento türleri geliştirildiği için beton yapımında kullanılan çimento miktarı değişiklik

gösterebilir. Çimento ürünlerinin ve betonun etkili bir şekilde kullanımı ve bunların kullanım ömürleri betonun sürdürülebilirliği açısından direkt etki göstermektedir. Bu şekilde, beton yapı elemanlarının ve bileşenlerinin yeniden kullanılmasına imkan verecek yenilikçi inşaat yöntemlerine de yol gösterilebilmektedir (Cembureau, 2018).





## 2.2. Dünyada ve Türkiye'de Çimento

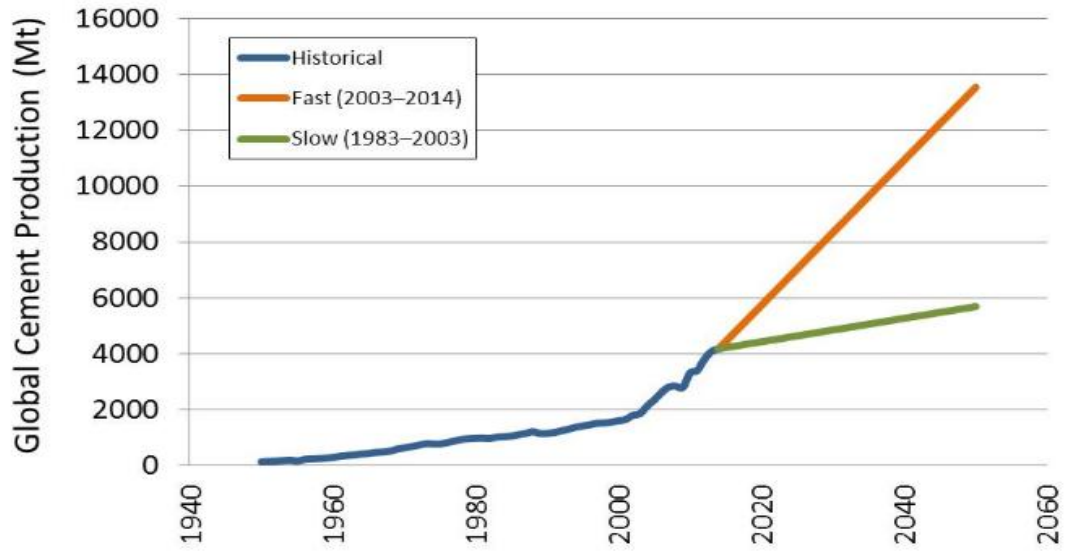
### 2.2.3. Dünyada çimento

Dünyada, çimento üretimi konusunda ilk patent 1824 yılında İngiltere' nin Leeds kentinde yaşayan Joseph Aspdin tarafından alınmıştır. Bu tarihten itibaren Fransa ve Almanya' da çimento fabrikaları kurulmuştur. Fransa' da A. Pavin de Lafarge ve J. Bied tarafından 1830 yılında Portland çimento fabrikası kurulmuştur. 1870 yılından itibaren ABD' de çimento endüstriyel büyüklükte üretilmeye başlanmıştır. 1877 yılında döner fırınlar İngiltere' de kullanılmaya başlanmış ancak bu sistem yararlı olarak görülmemiştir. Daha sonra bu sistem geliştirilerek Avrupa' da ve ABD' de kullanılmaya başlanmıştır. Sonra ki yıllarda sektör giderek gelişmiş, 2000 yılında çimento üretimi dünyada 1.23 milyar tona ulaşmıştır. Çin ise üretim miktarı ile diğer ülkeleri geçerek birinci sırada yer almıştır. (Kocakaya, 2016)

Çimento sektörünün dünyadaki büyüme durumu ve gelecek yıllardaki tahmini artışları aşağıda yer alan Çizelge 2.1 ve Şekil 2.1 ile verilmiştir (TCMA, 2009).

**Çizelge 2.1.** Çimento sektörünün dünyadaki büyüme durumu (TCMA, 2009).

| Dünya Çimento Tüketimi (milyon ton) | Gerçekleşen |      | Tahmin | Yıllık Ortalama Büyüme (%) |                    |
|-------------------------------------|-------------|------|--------|----------------------------|--------------------|
|                                     | 2009        | 2014 |        | 2009 - 2014                | 2014-2019 (tahmin) |
| Dünya                               | 3009        | 4160 | 5190   | 6,7                        | 4,5                |
| Kuzey Amerika                       | 115         | 136  | 168    | 3,4                        | 4,3                |
| Batı Avrupa                         | 163         | 126  | 142    | -5,0                       | 2,4                |
| Asya / Pasifik                      | 2149        | 3158 | 3940   | 8,0                        | 4,5                |
| Orta ve Güney Amerika               | 119         | 153  | 190    | 5,2                        | 4,4                |
| Doğu Avrupa                         | 105         | 120  | 139    | 2,7                        | 3,0                |
| Afrika / Orta Doğu                  | 358         | 467  | 611    | 5,5                        | 5,5                |
| Türkiye                             | 56          | 74   | 98     | 5,7                        | 5,7                |



**Şekil 2.1.** Çimento sektörünün gelecek yıllardaki tahmini artışları (TCMA, 2009).

#### 2.2.4. Türkiye' de çimento

Türkiye' de çimento sektörünün başlangıcı 1911 yılına dayanır. 1911 yılında Eskişehir ve Darıca' da çimento fabrikaları kurulmuştur. Bu fabrikaların üretim kapasitesi 20.000 ton/yıl dır. (Özdenkoş, 2010) Daha sonra 1926 yılında Bakırköy Çimento fabrikası 14.000 ton/yıl, 1928 yılında Ankara Çimento Fabrikası 40.000 ton/yıl, Zeytinburnu Çimento Fabrikası 40.000 ton/yıl kapasitede kurulmaya devam etmiştir (Kocakaya, 2016). Devlet ilk çimento fabrikasını 1943 yılında Sivas' ta kurmuştur. Bu yıllarda Türkiye' de üretilen toplam çimento kapasitesi 370.000 ton/yıl' a ulaşmıştır. (Özdenkoş, 2010) 1950 - 1960' lı yıllara gelindiğinde Türkiye' de çimento sektörü önemli gelişmeler gösterip, çimento üretimi yıllık 515.000 ton/yıl' dan 2.1 milyon ton/yıl' a yükselmiştir. Ayrıca fabrika adedi de 5' ten 13' e yükselirken, mevcut fabrikalarda gelişmiştir. Türkiye' de çimento üretimi daha sonralarda 1965 yılında 3.85 mt/yıl, 1967 yılında 4.5 mt/yıl, 1972 yılında 7.3 mt/yıl , 1977 yılında 12.9 mt/yıl' a ulaşmıştır. 1978 yılında ise çimentoya olan talep maksimum değerine ulaşp 14.2 mt/yıl olurken, ekonomik bunalımdan dolayı çimento üretimi gerileyerek 11.6 mt/yıl olmuştur (Kocakaya, 2016). İlerleyen zamanlarda da sanayileşmenin ve modern hayatın gelişimi ile çimento üretim ve tüketim miktarı artış göstermektedir. Bu artış 1980 yılından itibaren aşağıda yer alan Çizelge 2.2' de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Yıllara göre Türk çimento sektörü çimento üretim ve tüketim miktarları (sgm, 2018).

| <b>Yıllar</b> | <b>Üretim<br/>(milyon ton)</b> | <b>Tüketim<br/>(milyon ton)</b> |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------|
| <b>1980</b>   | 12,98                          | 12,08                           |
| <b>1990</b>   | 24,42                          | 22,65                           |
| <b>2000</b>   | 35,95                          | 31,51                           |
| <b>2001</b>   | 29,96                          | 25,08                           |
| <b>2002</b>   | 32,76                          | 26,81                           |
| <b>2003</b>   | 35,10                          | 28,11                           |
| <b>2004</b>   | 38,80                          | 30,67                           |
| <b>2005</b>   | 42,79                          | 35,08                           |
| <b>2006</b>   | 47,40                          | 41,61                           |
| <b>2007</b>   | 49,26                          | 42,46                           |
| <b>2008</b>   | 51,43                          | 40,57                           |
| <b>2009</b>   | 58,00                          | 39,96                           |
| <b>2010</b>   | 62,70                          | 62,53                           |
| <b>2011</b>   | 63,40                          | 62,90                           |
| <b>2012</b>   | 60,30                          | 62,30                           |
| <b>2013</b>   | 70,40                          | 70,10                           |
| <b>2014</b>   | 69,7                           | 61,8                            |
| <b>2015</b>   | 71,2                           | 63,4                            |
| <b>2016</b>   | 74,8                           | 66,3                            |

Günümüzde Türkiye kendi çimento ihtiyacını karşılayabilmekte ve hammadde konusunda tamamen kendi kaynaklarını kullanmaktadır. 2016 yılında çimento üretimi 74.8 mt/yıl iken tüketim 66.3 mt/yıl olmuştur (Sgm, 2018).

2017-2023 projeksiyonuna göre çimento sektörünün 2023 yılında üretim değerinin 99,8 milyon tona, tüketimin ise 78,9 milyon tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Çizelge 2.3).

**Çizelge 2.3.** Çimentonun 2017-2023 yılları arasındaki tahmini üretim ve tüketim miktarları (Sgm, 2018)

| <b>Milyon ton</b> | <b>Çimento<br/>üretim</b> | <b>Çimento İç<br/>satış</b> |
|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
| <b>2017</b>       | 83,5                      | 66,1                        |
| <b>2018</b>       | 86,1                      | 68,1                        |
| <b>2019</b>       | 88,6                      | 70,1                        |
| <b>2020</b>       | 91,3                      | 72,2                        |
| <b>2021</b>       | 94,1                      | 74,4                        |
| <b>2022</b>       | 96,8                      | 76,6                        |
| <b>2023</b>       | 99,8                      | 78,9                        |

Dünya çimento sektöründe önemli bir yere sahip olan Türk çimento sektörü, kaliteli üretim ve iyi bir gelişim anlayışıyla Ar-Ge çalışmalarını sürdürmekte, insana ve çevreye duyarlılığı ön planda tutmakta ve gelişmeye devam etmektedir (Sgm, 2018).

### 2.3. Çimento Üretim Teknolojisi

#### 2.3.1. Çimento hammaddeleri

Çimento ve çimentolu ürünler, insanoğlunun çok eski zamanlardan beri kullandığı ve günümüzdeki çimento sanayinin ilerleyişine göre gelecekte de en fazla kullanılacağı açık olan önemli yapı malzemeleridir. Çimento temelinde, yüksek sıcaklıklarda doğal kalker taşları ve kil karışımının ısıtılıp daha sonra öğütülmesi ile meydana gelen hidrolik bağlayıcı bir malzemedir. Burada sözü geçen hidrolik bağlayıcı malzeme, su ile reaksiyona girerek meydana gelen sert bir yapı formudur. Bu yapı su içerisine girdiğinde dağılmadan kalan, sertliğini koruyan ve hatta su içerisindeyken sertliğini ve mukavemetini artıran bir oluşumdur. Çimentolar diğer bağlayıcı malzemelere benzer şekilde  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  gibi alkalın ve  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gibi hidrolik öğeler içermektedirler. Bu alkalın ve hidrolik öğelerin miktarları bağlayıcı malzemenin özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir (Özdenkoş, 2010).

Çimento kireçtaşı, kil, şist, marn, alçıtaşı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, puzzolanik malzemeler, demir mineralleri gibi maddelerden oluşmaktadır (Karakaş, 2006). Çimento, başlıca hammaddeleri olan kireç, silisyum dioksit, alumina ve demir oksit bileşiklerinin homojen ve belirli miktarlarda karıştırılıp, sinterleşme sıcaklığına kadar pişirilmesi ile elde edilen klinkerin eklenen çeşitli katkılarla birlikte öğütülmesiyle elde edilen bir malzemedir. Klinkeri oluşturan temel bileşikler, kimyasal formülleri ve elde edildikleri ana kaynaklar Çizelge 2.4 'de gösterilmiştir (CSGB, 2016).

**Çizelge 2.4.** Klinkeri oluşturan bileşikler ve temel kaynakları (CSGB, 2016).

| BİLEŞİK          | FORMÜL                  | ANA KAYNAK                                 |
|------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| Kireç            | $\text{CaO}$            | Kalker (kireçtaşı), marn                   |
| Silisyum dioksit | $\text{SiO}_2$          | Kil, kum, kumtaşı, çakıl                   |
| Alumina          | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | Kil, boksit, kum, şeyl                     |
| Demir oksit      | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | Hematit, limonit, pirit külü, demir cürufu |

Çevreye karşı zararlı etkileri ve maliyetleri azaltmak amacıyla yüksek fırın cürufları, termik santral uçucu külleri, demir cevherleri, doğal puzzolanik maddeler de çimento üretimi sırasında ek olarak kullanılabilir (Karakaş, 2006).

### **2.3.1.1. Ana hammaddeler**

**Kireçtaşı:** Doğada bol miktarlarda bulunan ve kimyasal kompozisyonunda en az % 90 oranında kalsiyum karbonat bulunduran kayalar kalker ya da kireçtaşı olarak tanımlanmaktadır. Mineral içeriği bakımından en az % 90 kalsit bulunan kayalara da kalker denmektedir. Çimento üretim proseslerinde kullanılacak kalkerin öncelikle kimyasal yapısının üretilecek çimentoya uygunluğu belirlenmelidir. Daha sonra, üretim yapılan tesise yakın bir yerden sağlanması, işlenmesinin (kıрма, öğütme, pişirme) kolay olması, homojen olması ve nem içeriğinin az olması gibi durumların uygunluğu sağlanmalıdır (Söğüt, 2009).

**Kil:** Mineralojik olarak % 90'a kadar kil minerali içeriği bulunan kayalar *kil* olarak adlandırılmaktadır. Kimyasal içeriklerinde ise silisyum, alüminyum ve su mevcuttur. Çimento sektöründe aşınma ürünü metal oksitlerin taşınıp depolanma havzasında yığılmasından oluşmuş, çoğu killi ve kireçli topraklar olan killer kullanılmaktadır (Karakaş, 2006).

**Marn:** Doğada % 50-70 oranında kalker ve % 30-50 oranında kil karışımından oluşmuş kayalar *marn* olarak bilinmektedir. Klinker ise, % 70 kireçtaşı ve % 30 kil içeren hammadde karışımının öğütülüp daha sonra yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sonucu elde edilmektedir. Bu bileşim benzerliği sebebiyle marn, çimento üretiminde ana hammaddelerden biri olma özelliğini taşımaktadır. Bunun yanı sıra, kalkere kıyasla daha yumuşak yapıda olması sebebiyle üretimi kolay ve kıрма, öğütme işlemlerde harcanan enerji miktarı düşük olmaktadır (Kocakaya, 2016).

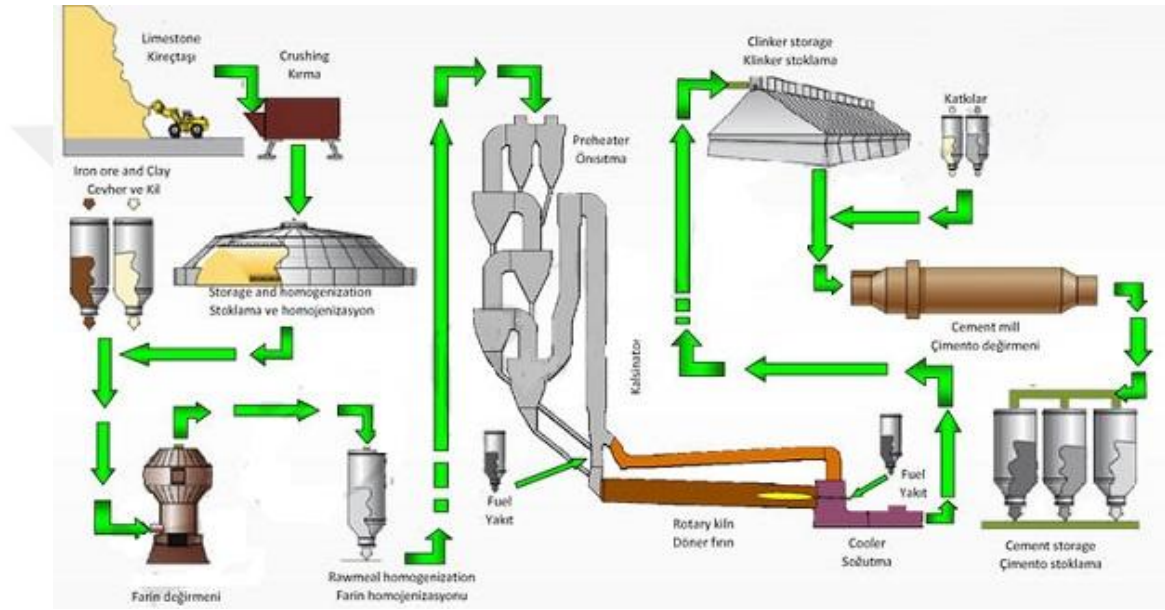
### **2.3.1.2. Katkı maddeleri**

Doğada yaygın bir şekilde bulunan bir mineral olan alçıtaşı çimentonun önemli katkı maddelerinden biridir. 2 mol su içeriğine sahip olduğunda jips, su içermediğinde ise anhidrit olarak adlandırılmaktadır. Çimentonun bileşimine katılan yaklaşık %5 oranında alçıtaşı, priz süresinin ayarlanmasını sağlamaktadır. Alçının taşının dışında, bağlayıcılık özelliği taşımadıkları halde kireç hidrat ile birleştiklerinde bağlayıcı görevi üstlenen puzolanlar (kil, şist, uçucu küller, öğütülmüş tuğla, kiremit ve bazı cürufur) da çimento katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, demir üretimi esnasında CaO tarafından SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ' ün bağlanmasıyla oluşan yüksek fırın cürufu,

$\text{CaCO}_3$  içeriği en az % 75 olan kireç taşı, silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında elde silis dumanı, pulverize kömür kullanan termik santrallerin baca filtrelerinde toplanan ve bağlayıcılık özelliği olan uçucu küller ve 800 °C’de pişirildikleri zaman puzolanik ve bağlayıcılık özellik kazanan pişmiş şistler de çimento üretiminde kullanılan diğer katkı maddeleri olarak sıralanabilir (Karakaş, 2006)

### 2.3.2. Çimento üretim aşamaları

Çimento üretim aşamaları aşağıdaki Şekil 2.2’ de verilmiştir (Nkfu, 2018).



Şekil 2.2. Çimento üretim aşamaları (Nkfu, 2018).

Çimento üretim aşamaları aşağıda verilmiştir.

- Hammadde temini
- Hammadde hazırlama ve depolama
- Farin hazırlama ve depolama
- Yakıt hazırlama ve depolama
- Klinker üretimi ve depolama
- Çimento öğütme ve depolama
- Ambalajlama ve sevk

### **2.3.2.1. Hammadde temini**

Çimento tesisleri genellikle kalsiyum karbonat sağlayan kalker, marn ve kireç taşının doğal olarak bulunabildiği taş ocaklarına yakın yerlere kurulurlar. Demir cevheri, boksit, şist, kil ve kum gibi malzemeler fazladan mineral içeriği sağlamak için çok az miktarlarda gerekli olabilir, demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve silika ( $\text{SiO}_2$ ) istenilen klinkeri elde etmek için gereklidir (Cembureau, 2018).

Kalker, kum, kil, marn, boksit, silis vs. ocaklardan kaya delme, kazıma, patlatma veya kırma işlemleriyle çıkartılır. Hammaddelerin çıkarma işlemi gerçekleşikten sonra depolanmak ve hazırlanmak üzere çimento fabrikalarına taşınır.

### **2.3.2.2. Hammadde hazırlama ve depolama**

Çimento fabrikasına gelen hammaddelerin kalker, marn v.s. öncelikle kırıcıdan geçirilerek tane boyutlarının küçültülmesi gerekir. Aksi takdirde iş gücü, kalite ve enerjide büyük kayıplara yol açar. Aynı zamanda ocaklardan getirilen hammaddeler içlerinde belli miktarda rutubet barındırdığından tane boyutunun küçültülmesi bu rutubeti de giderir. Kırıcı da tane boyutu küçültülen hammadde lastik bant vb. taşıyıcı sistemlerle stok hole taşınır (Bilgin ve Koç, 2013).

Kırma işleminden sonra, ham malzemeler “ham kaba taneli karışım” oluşturmak için karıştırılır ve öğütülür. Yüksek çimento kalitesinin sağlanması için, hammaddelerin kimyası ve sonrasında oluşan ham karışımın çok dikkatli bir şekilde izlenmeli ve kontrol edilmelidir (Cembureau, 2018).

Hammadde hazırlığı, genellikle yaklaşık olarak 1 ton hammadde için 25-35 kWh enerji gerektiren elektrik-yoğun bir üretim aşamasıdır (Worrell, vd., 2013).

### **2.3.2.3. Farin hazırlama ve depolama**

Belirli bir yapıda olan kil, kalker, demir cevheri v.s. malzemeler öğütülerek toz haline getirilir. Bu toz halinde ki yapıya "farin" adı verilir (Baticim, 2018).

Farin hazırlama bölümü, çimentonun kalitesini direk olarak etkiler. Farin hazırlama bölümü ile ilgili yapılan araştırmalar farinin hazırlanması ne kadar iyiye çimentonun o kadar az değişkene sahip olduğunu göstermektedir. (Kandilci, 2013)



Stok holde yer alan tane boyutu küçültülmüş hammaddeler yapılacak olan çimentonun formülüne göre belirli oranlar da farin değirmenine taşınarak burada öğütme işlemleri gerçekleştirilir (Altınkaynak, 2013).

Farin değirmenleri iki tiptir. Bunlar ;

- Dik Değirmen (valsli)
- Bilyeli Değirmen

#### **i) Dik değirmen (valsli)**

En yaygın olarak kullanılan değirmen türüdür. Ayrıca daha yüksek tonaj kapasitesine sahiptir ve enerji tasarrufu yönünden daha uygundur.

Dik değirmenin çalışma sistemi; alt kısmında yer alan döner tabla üzerine hammadde karışımı dökülür. Döner tabla merkez kaç kuvveti ile hammaddeyi tabla dışına doğru savurur. Döner tabla kenarlarında yer alan valsler sayesinde dışa doğru savrulan hammadde ezilerek daha küçük tane boyutları oluşur. Tane boyutu daha da küçülen malzeme sıcak gaz ile seperatöre taşınır. Öğütülen malzeme depo edilmek üzere farin silolarına taşınırken, öğütülememiş malzeme tekrar döner tablaya dökülür (Daloğlu, 2007).

#### **ii) Bilyeli değirmen**

Bilyeli değirmen çalışma sistemi ; yatay konumda bulunan bu değirmenin içerisi bölmelere ayrılmıştır. Bölmelerin içerisinde kalın çaplı bilyelerden ince çaplı bilyelere hammaddenin geçmesi ile öğütme işlemi gerçekleştirilir. Öğütülen malzeme ise dik değirmende olduğu gibi farin silolarına taşınır (Altınkaynak, 2013).

Değirmenlerde elde edilen farin, farin silolarına gönderilerek burada depolanır.

#### **2.3.2.4. Yakıt hazırlama ve depolama**

Çimento fabrikalarında genel olarak fosil yakıt olarak linyit kömür, ithal kömür ve petro-kokun kullanıldığı gözlemlenmektedir. Bir de yakıt olarak endüstriyel atıklarda kullanılır. Bunlar da yağ, boya, lastik v.b. maddeler kullanılır. (Kandilci, 2012) Doğalgaz yüksek maliyetten dolayı zorunlu kalınmadıkça tercih edilmemektedir (Ünlü, 2002).

Kömürün yakılmak için hazırlanması işlemi kurutma ve öğütme amacı ile kömür değirmenlerinde gerçekleştirilir. Bu değirmenler tıpkı hammaddenin farine dönüştürüldüğü değirmenler gibi farklı değirmenler olabilir.

Tüm yakıtların homojenizasyonu amacı ile çeşitli depolar ve silolar kullanılır (Ünlü, 2002).

### **2.3.2.5. Klinker üretimi ve depolama**

Çimento fabrikalarında klinker üretimi en önemli aşamadır. Bu aşama da hazırlanan farinin silolardan alınarak önce pişirilmesi daha sonra soğutulmasıyla sonuçlanır. Öncelikle farinin ön kalsinasyon işlemi için ön ısıtıcıya sonra pişirme işlemi için çimento fabrikalarında yer alan en önemli noktada yani döner fırında gerçekleştirilir. Daha sonra klinker soğutma da soğutma işleminin yapılmasıyla bu üretim sonuçlandırılır. Bu prosese ait ekipmanların genel özellikleri ve prosese ait adımlar sırası ile verilecektir (Söğüt, 2005).

#### **i) Farin ön ısıtıcıları**

Farinin pişirilme evresinde öncelikle farin silolarından ön ısıtıcıya farin gönderilir. Farinin ön ısıtıcıya gelme işlemi çeşitli taşıyıcılarla (lastik bant, havalı bant, elevatör vb.) gerçekleştirilir (Baticim, 2018).

Fırından çıkan sıcak egzoz gazları, fırına girmeden önce toz haline getirilmiş ham karışımı önceden ısıtır. Bir ön ısıtıcı, ham karışımın ve buna ters yönünde dönerek giren sıcak baca gazlarının bir araya getirildiği bir dizi siklondan oluşur. Bu siklonlarda, sıcak baca gazlarından termal enerji (ısı) geri kazanılır, bu da ham karışımın ön ısıtılmasında kullanılır. Bu şekilde prosesin verimliliği artırılır ve daha az yakıt kullanılır. Hammadde nem içeriğine ve ısı geri kazanım gereksinimlerine bağlı olarak, bir fırın her bir ek aşamada artan ısı geri kazanımı sağlayan altı aşamalı siklona sahip olabilir

Döner fırın prosesinden hemen önce ham karışıma ön kalsinasyon işlemi uygulanır. Kalsinasyon kireç taşının kireçe dönüşümüdür. Modern tesislerdeki yüksek sıcaklık tepkimesinin bir kısmı, bir "ön-kalsinatör" de gerçekleşir. Burası fırının üzerindeki ön ısıtıcının tabanında ve kısmen fırında bulunan bir yanma odasıdır.

Burada, kireçtaşının kimyasal ayrışması, çimento üretim sürecinin toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının tipik olarak % 60'ını oluşturur (Cembureau, 2018).

## ii) Döner fırınlar

Döner fırın tarihçesi: İlk çimento fırınları hammadde ve kömürün birlikte bulunduğu, bugünkü kireç fırınlarına benzeyen, dikey ve kesikli çalışan tepkime kapları idi. F.Ransome' un 1885'te patentini aldığı ilk döner fırın yakmayı denetlemeyi, ısıнын malzemeye daha homojen aktarılmasını ve üretimi sürekli sağladığı için endüstriyel olarak kabul görüp hızla yaygınlaştı. Önce ham maddelerin homojen karışmasını sağlamakta su kullanıldı, böylece döner fırında yaş sistem ile üretim dönemi başladı. Bu sistemin fırın beslemedeki yaklaşık % 36-38 suyu buharlaştırmak için yüksek ısı enerjisine gerek duyması 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. Gelişimi özetlemek için üretim süreci türlerini kısaca tanıyalım:

Yaş süreç : Ham madde çamuru doğrudan kurutma ve ön-ısıtma bölümlerini içeren uzun döner fırına beslenir ; daha sonraları çamuru önceden kurutan bir bölüm eklenip fırın kısaltılmıştır ,

Yarı-Yaş süreç : Çamur önce filtre preste susuzlaştırılır , üretilen kek taneler haline getirilip ızgaralı bir ön-ısıtıcıya beslenir , ya da bir kek kurutucusunda kurutulup ön-ısıtıcı / ön-kalsinatörlü fırına beslenir ,

Yarı - Kuru süreç : Kuru ham madde su ile tane haline getirilip hareketli bir ızgara ön-ısıtıcıdan geçirilip fırına beslenir . Bu süreç Lepol sistemi olarak bilinir.

Kuru süreç : Kuru ham madde karışımı siklonlardan oluşan bir süspansiyon ön-ısıtıcıdan, istenirse bir ön-kalsinatörden de , geçerek döner fırına beslenir (Kuleli 2010).

Döner fırın hakkında genel bilgi: Dünyada endüstri tesislerinde yer alan en büyük üretim elemanı olarak döner fırınlar gösterilmektedir. Döner fırın sisteminde; kurutma, ön ısıtma, ön kalsinasyon ve sinterleme işlemleri meydana gelir (Söğüt, 2009).

Döner fırınlar yatay olarak % 3 - 4 eğime sahiptirler. Bu eğimden dolayı içerisinde yer alan farinin aşağıya doğru akması sağlanır. Çevre hızları yaklaşık olarak

0,15 - 0,30 m/s arasındadır. İç kısımları ateşe dayanıklı malzeme olan refrakterle örülüdür (Savaş, 2004).

Döner fırının üst kısmında ön ısıtıcı, alt kısmında ise klinker soğutma bölgeleri yer alır. Döner fırına ön ısıtıcı bölgesinden giren farin klinker soğutma bölgesinde yani alt kısmında yer alan alev borusundan da kömür, doğalgaz veya fuel oil yakılmasıyla ters akış prensibine göre pişirilerek klinker oluşturulur. Daha sonra oluşan klinker alt kısımdan klinker soğutmaya dökülür (Altınkaynak, 2013).

Döner fırının genel görüntüsü aşağıdaki Şekil 2.3' de gösterilmiştir.



**Şekil 2.3.** Döner fırının genel görüntüsü.

Döner fırının ters akış prensibini gösteren Şekil 2.4' de aşağıda mevcuttur (Altınkaynak, 2013).



**Şekil 2.4.** Döner fırının ters akış prensibi (Altınkaynak, 2013).

Döner fırınlar; farin beslemene türü, üretim teknolojisi ve üretim koşullarına göre farklı uygulama türlerine sahiptirler. Bu döner fırın tipleri aşağıdaki gibi gruplanmaktadır:

- Uzun döner fırınlar
- Lepöllü döner fırınlar
- Ön ısıtıcılı döner fırınlar
- Dört kademeli ön ısıtıcılı döner fırınlar
- Dört - altı kademeli ön kalsinatörlü ve ön ısıtıcılı siklonlu döner fırınlar (Söğüt, 2009).

Çimento talep miktarının artması ile birlikte son yıllarda en çok kullanılan hacimi yüksek olan döner fırın yani ön kalsinatörlü ve ön ısıtıcılı döner fırın kullanımı artmıştır. Döner fırınların sistem tasarımlarının gelişmesi ile birlikte, kapasite ve yanma verimliliği artarken, ısı tüketimi azalmıştır. Aşağıdaki Çizelge 2.5’de de bu durum gösterilmiştir (Şahin, 2017).

**Çizelge 2.5.** Döner fırınlarda maksimum kapasite-spesifik ısı tüketimi tablosu (Şahin, 2017).

|                                                 | <b>Maksimum<br/>Kapasite (tpd)</b> | <b>Spesifik Isı<br/>Tüketimi (kcal/kg<br/>Klinker)</b> | <b>L/D<br/>(Boy/Çap)<br/>Oranı</b> |
|-------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <b>Uzun Yaş Fırın</b>                           | 2000                               | 1250 - 1500                                            | 32 - 38                            |
| <b>Uzun Kuru Fırın</b>                          | 2000                               | 900 - 1200                                             | 32 - 38                            |
| <b>Lepol Fırın</b>                              | 2000                               | 800 - 900                                              | 14 - 16                            |
| <b>Ön Isıtıcı Sklonlu Fırın</b>                 | 2000                               | 800 - 900                                              | 14 - 16                            |
| <b>Ön Kalsinatörlü ve Ön<br/>Isıtmalı Fırın</b> | 12000                              | 700 - 850                                              | 15 - 16                            |

Döner fırında gerçekleşen reaksiyonlar: Döner fırın temel olarak 5 ana bölmeye ayrılmaktadırlar. Bunlar;

- Kalsinasyon Bölgesi: Sıcaklığın 1150 °C'ye kadar çıktığı fırının giriş bölgesidir.
- Emniyet Bölgesi: Sıcaklığın 1250 °C'ye ulaştığı fırın çapının 2 katı kadar olan bölgedir.
- Geçiş Bölgesi: Fırın içindeki maddenin likitleşmeye başladığı bölümdür.
- Sinter Bölgesi: Döner fırında kimyasal reaksiyonların meydana geldiği yani klinker bileşiklerinin oluştuğu bölgedir. Bu bölgede sıcaklık ortalama 1450-1500 °C civarındadır. Bu bölümün içine kaplı olan anzast maddesi çok önemlidir. Bu madde sayesinde fırın içine örülmüş tuğla yüksek sıcaklıktan korunur ve ömrü uzar. Ancak anzast kaplama kalınlığı da çok önemlidir. Kalın anzast kaplaması enerji israfı yaparken ince olan kaplamalarda tuğlalar fırın içinden kopabilmekte ve fırının durmasına sebep olabilmektedirler. Ayrıca sinter bölgesinin uzunluğu da çimento fabrikasının yarı mamullerinden biri olan klinkerin kalitesinde büyük rol oynamaktadır. Bu kısım ne kadar uzun olursa kimyasal reaksiyon uzun süreceğinden oluşan klinkerin kalitesi bozulur ve öğütülmesi güçleşir.

Havuzlama bölgesi: Döner fırının son bölümüdür. Bu kısımda alev tesiri biter ve oluşan klinker 1450-1500 °C' den 1300-1200 °C' ye kadar düşer. Buradan sonra tam soğuma için klinker soğutmaya gönderilir (Bilgin ve Koç, 2013).

Klinker üretimi, çimento üretimindeki en enerji yoğun aşamadır, toplam endüstri enerjisi kullanımının % 90'ından fazlasını ve neredeyse tüm yakıt kullanımlarını içerir (Worrell, vd., 2013).

### **iii) Klinker soğutucular**

Döner fırın sisteminden sonra olmazsa olmaz bir sistem olan klinker soğutma sistemi, ısı ile işletme tesisinin performansı ve ekonomisi üzerinde önemli bir yere sahiptir (Tosun, 2006).

Sıcak klinker bir kısmı yanma havası olarak da kullanılabilen havadan bol miktarlarda kullanılarak soğutulur. Soğutucular, çimentonun performansını tanımlayan klinker minerallerinin oluşturulması için gereklidir. Bu işlemde yanma havası önceden ısıtılır, böylece sistemden genel enerji kaybı en aza indirilir (Cembureau, 2018).

Klinker soğutucuların bu sistemde üç farklı görevi bulunmaktadır. Bunlar :

- 150-1550 °C sıcaklıkta döner fırından dökülen klinkerin soğutulması ve ısının geri kazanılması
- Klinkerin kristal yapısının düzenlenmesi
- Sonraki ekipmanlar için klinkeri uygun sıcaklığa getirmek (Söğüt, 2005)

Klinker soğutucular bu görevlerini soğutma fanlarından gelen yüksek debili hava yardımı ile gerçekleştirirler. Klinker soğutucular döner fırın tiplerine ve üretim teknolojilerine göre farklı tiplere sahiptir. Bunlar :

- Döner tip klinker soğutucular
- Izgaralı tip klinker soğutucular
- Dikey tip klinker soğutucular
- Planet tip klinker soğutucular (Savaş, 2004)

Klinker genellikle sahada kullanılır ancak kamyon, tren veya gemi ile diğer öğütme tesislerine taşınabilir (Cembureau, 2018)

### iii) Klinkerin depolanması

Klinker soğutucudan çıkan klinker çimento üretiminde bir ara üründür. Bu ara ürünün depolama sistemleri aşağıdaki gibidir.

- Ağırlık boşaltmalı uzunlamasına depo (ömürü sınırlı stoklar)
- Ağırlık boşaltmalı yuvarlak depo (sınırlı ömürlü stoklar)
- Klinker depolama silosu (ömürü uzun stoklar, bazı silo seviyelerinde klinker silodan çıkartılırken zemin titreşimleri olabilir)
- Klinker depolama kubbesi (sınırlı ömürlü stoklar) (Tosun, 2006)

Depolanan klinker bulunduğu çimento fabrikasında işlenerek çimento elde edilir ya da bu haliyle satılabilir.

### **2.3.2.6. Çimento öğütme ve depolama**

Çimento, klinkerin ve kalsiyum sülfatın (alçı taşı tozu) öğütülmesi ile elde edilir. Kalsiyum sülfat klinkerin ağırlıkça % 3 - 5 arası katılır. Kalsiyum sülfat haricinde öğütmeyi kolaylaştırmak amacı ile bazı kimyasallarda bu aşamada klinkere katılmaktadır. Mineral katkılarında farklı oranlarda katılıp değişik tipli çimentoların üretilmesi de yaygınlaşmıştır.

Çimento öğütme sistemi: Klinkerin çapı yaklaşık 2 cm dir. Çimento tane boyutları ise genellikle 40 mikronun altında, ortalama 15 -20 mikron (0,0015 - 0,002 cm) olduğuna göre, öğütme işlemi sırasında klinker tane boyutunun yaklaşık 1000 kere küçültülmüş olması gerekmektedir (Daloğlu, 2007).

Geleneksel öğütme yöntemi olarak, bilyalı değirmenler öğütme için kullanılmıştır, ancak günümüzde birçok modern tesiste silindir presleri ve dikey değirmenler veya bunların kombinasyonları gibi daha verimli teknolojiler kullanılmaktadır. Çimento ayrıca önemli miktarda cüruf, uçucu kül, kireç taşı veya klinkerin yerini alacak farklı malzemeler gibi diğer ince öğütülmüş mineral bileşenlerle de karıştırılabilir ve böylece CO<sub>2</sub> emisyonlarının önemli ölçüde azaltılması sağlanır (Cembureau, 2018).

Öğütme için güç tüketimi, son ürün için gerekli yüzey alanına ve kullanılan katkı maddelerine bağlıdır. Ham öğütme ve son öğütme için elektrik kullanımı, malzemenin



sertliğine (kireçtaşı, klinker, puzolan uzatıcılar) ve çimentonun istenilen inceliğine ve katkı maddelerinin miktarına bağlıdır (Worrell, vd., 2013).

### **2.3.2.7. Ambalajlama ve sevk**

Bütün işlem aşamaları tamamlanmış çimento silolarda depolanır, test edilir ve torbalara doldurulur veya çimento kamyonları, vagonlar veya gemiler ile nakledilir. Taşıyıcı bantlar ve çimento paketleme için ek güç tüketilir. Bu amaçlar için toplam tüketim genellikle düşüktür ve toplam güç kullanımının % 5' inden fazla değildir. Paketleme için güç tüketimi torbalarda paketlenmiş olan çimento payına bağlıdır (Worrell, vd., 2013).

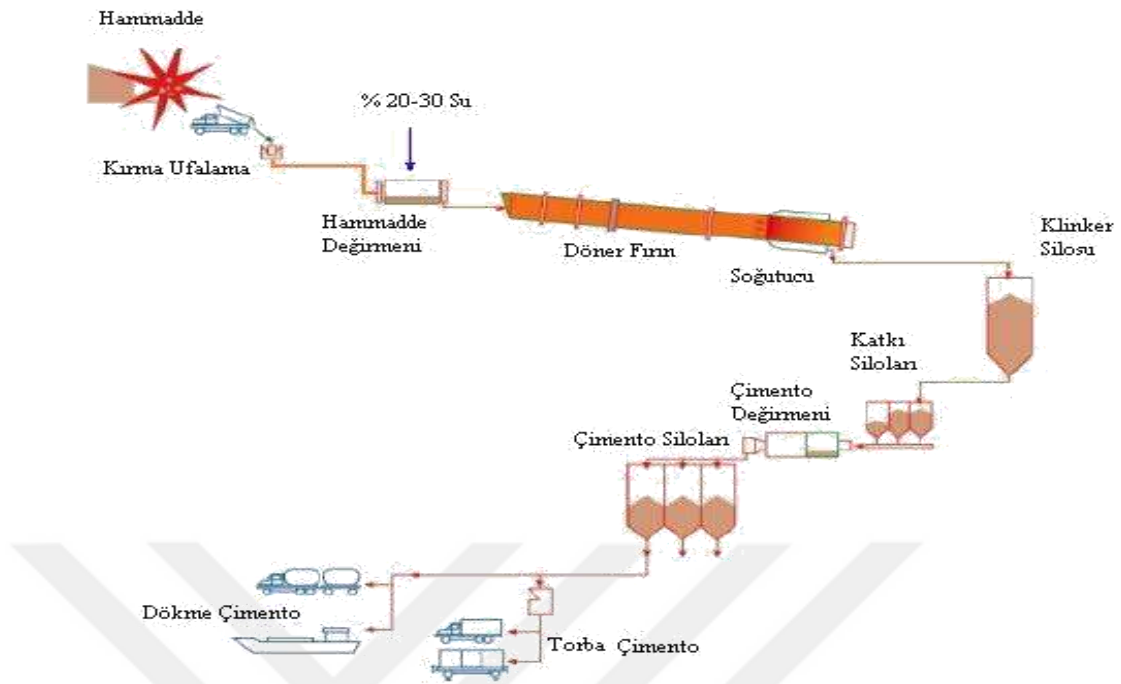
### **2.3.3. Çimento üretim teknolojisi**

Çimento üretimi için 3 farklı proses söz konusudur. Bunlar; yaş sistem, yarı yaş sistem, kuru sistem olarak adlandırılır.

Yaş sistemle üretim: İlk çimento fırınları, yaş sistem olarak tasarlanmıştır. Yaş sistemde, kalker ve kil karışımına % 20-30 oranında su ilavesi yapılmaktadır. Daha sonra değirmende öğütme işlemi yapılarak çamur halini alan karışım pişirilmektedir (Ustaoglu, 2011). Kurutma, ön ısıtma, kalsinasyon ve diğer ısı işlemler fırında gerçekleştirildiğinden yaş yöntemle üretim sürecinde uzun fırınlar kullanılmıştır (Yıldız, 2015).

İlk çimento fırınlarında yaş sistemin kullanılmasının nedeni; toz yapıda bulunan hammaddelerin karıştırılmasından kaynaklanan zorluktur. Dolayısıyla yaş halde bulunan hammaddenin karıştırılması daha kolay ve tozsuz olacağından dolayı bu şekilde tercih edilmiştir (Ustaoglu, 2011). Ancak bu yöntemde tesis kapasiteleri düşük kalmış, soğutma bölgesinden geri kazanılabilecek olan ısıdan istenildiği şekilde yararlanılamamış ve üretim maliyetleri oldukça yüksek çıkmıştır (Yıldız, 2015).

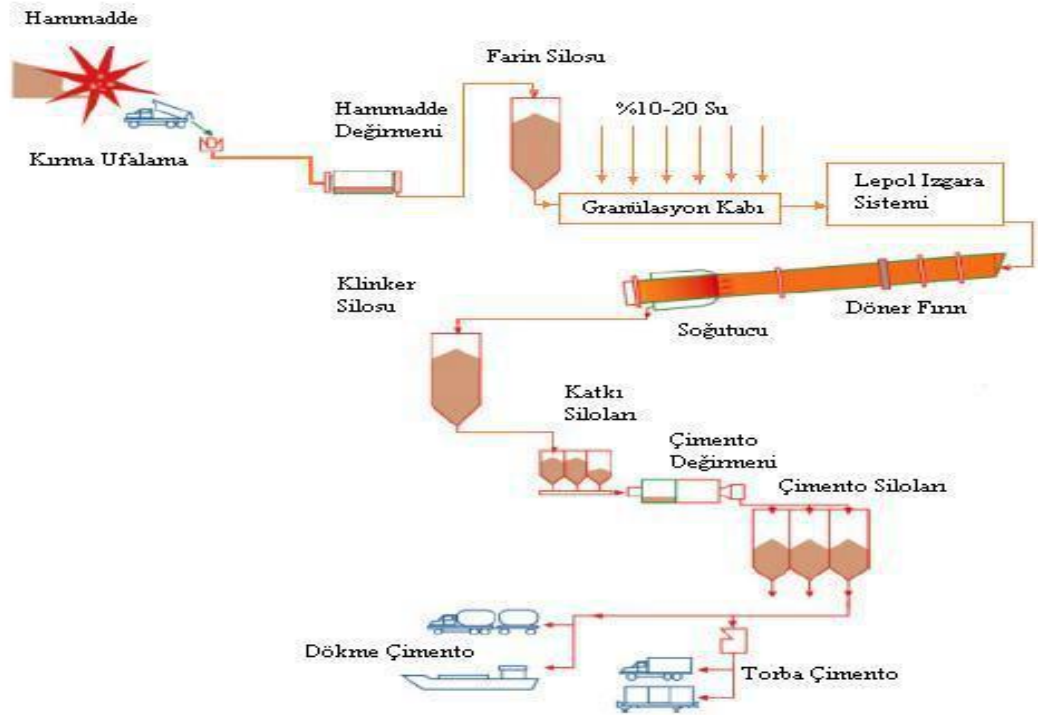
Aşağıdaki Şekil 2.5'de yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri gösterilmiştir (Savaş, 2004).



**Şekil 2.5.** Yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri (Savaş, 2004).

Yarı yaş sistemle üretim: Yarı yaş sistemde, fırın girişine bir ön ısıtıcı ızgara ilave edilerek daha kısa fırınlarda daha az ısı sarfiyatıyla klinker üretimi gerçekleştirilmektedir (Ustaoğlu, 2011). Yarı yaş sistemde hammadde kuru olarak öğütülmektedir. Daha sonra öğütülmüş olan kuru hammaddeye % 10 oranında su püskürtülmesi ile granüle hale getirilerek fırına gönderilmektedir. Fırın öncesinde yer alan ızgara % 10 oranındaki suyu ortamdan uzaklaştırmaktadır (Yıldız, 2015).

Aşağıdaki Şekil 2.6’ da yarı yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri gösterilmiştir (Ustaoğlu, 2011).

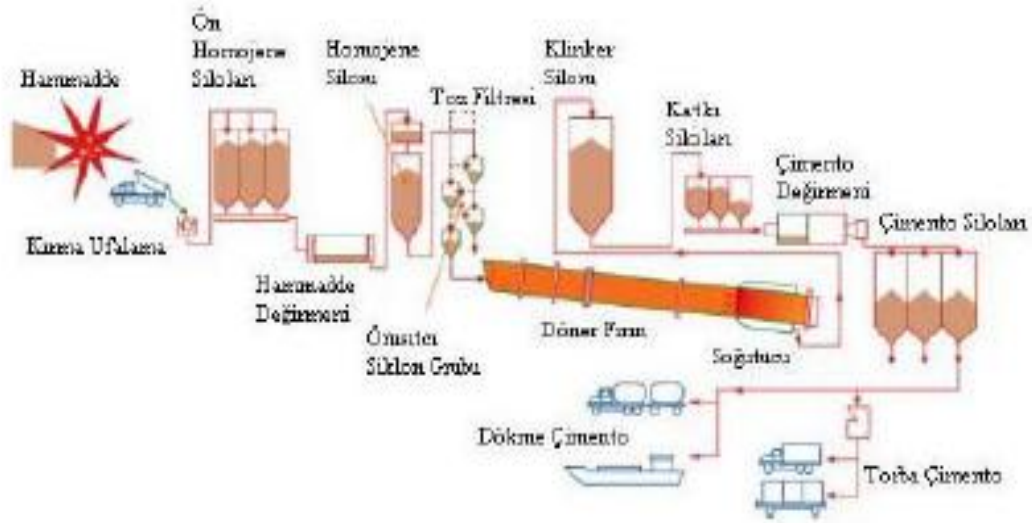


**Şekil 2.6.** Yarı yaş sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri (Ustaoglu, 2011).

Kuru sistemle üretim: Kuru sistem, Almanların geliştirdikleri Waermeaustauscher sistemine göre uygulanmaktadır. Bu sistemde kalsinasyon işlemi fırında değil de ön ısıtıcıda olmaktadır (Kocakaya, 2016). Ön ısıtıcılarda siklonlar bulunmaktadır. Burada gerçekleşen olay, ön ısıtıcı da bulunan siklonlardan farinin yukarıdan aşağıya doğru inerken, aşağıdan çıkan sıcak gazla kalsine olup fırına girmesidir. Bu sayede bu sistemde daha küçük fırınlar kullanılmaktadır.

Şu an Dünyada var olan fabrikaların çoğu kuru prosese uygun olarak çalışmaktadır ve yeni kurulmakta olan fabrikaların da hepsi kuru prosese uygun olarak tasarlanmaktadır. Kuru proses, daha fazla enerji tasarrufu sağladığı için tercih edilmektedir (Karakaş, 2006).

Aşağıdaki Şekil 2.7' de kuru sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri gösterilmiştir (Savaş, 2004).



**Şekil 2.7.** Kuru sistemle üretim yapan çimento fabrikasının üretim kademeleri (Savaş, 2004).

#### 2.3.4. Çimento çeşitleri

Dünya üzerinde üretilen çimento türleri; portland çimentosu, traslı çimentolar, yüksek fırın cüruf çimentosu, katkılı çimentolar ve diğer çimento türleri olarak beş grupta incelenebilir (Kandilci, 2013).

**Portland çimentosu:** Portland çimentosunun üretimi için, belirli oranlarda birleştirilen kalker taşı ( $\text{CaCO}_3$ ) ve kil ( $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) içeren hammadde karışımının bir döner fırında  $1450^\circ \text{C}$ 'de pişirilerek klinker elde edilir. Ardından klinker soğutulur ve %3-6 oranında eklenen alçı taşı ile öğütülür. Betonarme yapılarda en çok kullanılan çimento türü Portland çimentolarıdır (Kocakaya, 2016).

**Traslı çimentolar:** Tek başına kullanıldığında bağlayıcılık özelliği taşımayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığında su ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanan maddelere *puzolan* adı verilmektedir. Birçok ülkede ve ülkemizde puzolanlar *tras* olarak belirtilmektedir. Puzolan katkılı çimentolara ise diğer bir deyişle traslı çimentolar denilmektedir (Kaplan ve Binici, 1995). Bu tür çimentolar imalat aşamasında portland çimentosu klinkerine aktif volkanik tüfler veya benzeri traslar katılarak, bunların öğütülmesiyle elde edilir (Kandilci, 2013).

Yüksek fırın cüruf çimentosu: Klinkerle kütlece % 20-80 arasında cürufun az miktarda alçı taşı ile öğütülmesiyle Cürufllu çimento elde edilmektedir (Kocakaya, 2016). Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi esas olarak  $\text{CaO-SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  'den oluşur (MTA, 2013).

Katkılı çimentolar: Klinkere en fazla %19 puzolanik madde eklenerek alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile katkılı çimentolar elde edilmektedir (Kocakaya 2016). Traşlı çimentolara benzer özellikler taşımakta olup puzolan miktarları traşlı çimentoya göre daha fazladır (Kandilci, 2013).

Diğer çimento türleri: Yukarıda sıralanan çimento türlerine ek olarak uçucu küllü çimento, süper sülfat çimentosu, sülfata dayanıklı çimento, erken dayanımı yüksek çimento, düşük hidratasyon ısıllı çimento şeklinde çeşitli çimento türleri de mevcuttur (Kandilci, 2013).

#### **2.3.4.1. Türk standartlarına göre çimento çeşitleri**

Portland çimentolar, portland kompoze çimento, yüksek fırın cürufllu çimento, puzolanik çimento ve kompoze çimento Türkiye’de standardı olan çimento tipleridir. Ayrıca mineral katkıları ile elde edilen özel kullanım amaçlı çimento türleri ise sülfatlara dayanıklı çimentolar, beyaz portland çimentosu, harç çimentosu, yüksek fırın cürufu katkılı, düşük erken dayanımlı çimentolar, çok düşük hidratasyon ısıllı özel çimentolardır (Sgm, 2018).

TS EN 197 serilerinde beton için kullanılan çimento tipleri ve uygunluk durumları standartlaştırılmıştır. TS EN 197-1, çimentoları CEM I’den (portland çimentosu) CEM V’e (kompoze çimento) kadar beş ana tip halinde işaretlendirmektedir. İşaretleme metodunda; ana çimento tipi; Portland çimento klinkeri oranı; ikinci ana bileşen; standart (28 günlük, vb.) dayanım sınıfı ve erken dayanım kazanma hızı gösterilmektedir. Örnek olarak CEM II/A-S 42,5 N şeklinde gösterilen bir çimento tipinde ‘N’ normal erken dayanımı, ‘R’ hızlı erken dayanımı ifade etmektedir. Standart dayanım sınıfları açısından; alt-tip, ikinci ana bileşeni (örnekte yüksek fırın cürufunu) belirtmektedir. Portland çimentosunun içerdiği klinker oranı ‘A’ yüksek, ‘B’ orta ve ‘C’ düşük şeklinde gösterilmektedir. Çizelge 2.6, bazı çimento tiplerini TS EN 197-1 standardına göre göstermektedir (Kandilci, 2013).

**Çizelge 2.6.** TS EN 197- 1 standardına göre bazı çimento tipleri (Kandilci, 2013).

| Çimento Tipi                 | TS EN 197-1'e göre İşaretleme | Klinker Oranı (%)                                            |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Portland çimento             | CEM-I                         | % 95-100 klinker                                             |
| Portland-cürüflu çimento     | CEM II/A-S                    | % 80-94 klinker + % 20-6 cüruf                               |
| Portland-puzolanlı çimento   | CEM II/A-P                    | % 80-94 klinker + % 20-6 doğal puzolan                       |
| Yüksek fırın cürüflu çimento | CEM III/A                     | % 35-64 klinker + % 65-36 cüruf                              |
| Puzolanik çimento            | CEM IV/B                      | % 45-64 klinker + % 55-36 silis dumanı, puzolan, uçucu kül   |
| Kompoze çimento              | CEM V/A                       | % 40-64 klinker + % 30-18 cüruf + % 30-18 puzolan, uçucu kül |

### 2.3.5. Çimentonun kullanım alanları

Çimento hayatımızda önemli, ancak fark edilmeyen bir rol oynar. Çimento esas olarak konut, yollar, okullar, hastaneler, barajlar ve limanların yanı sıra dekoratif uygulamalar (verandalar, zeminler, merdivenler, garajlar), tablolar, heykeller veya kitaplıklar da dahil olmak üzere her türlü inşaat için temel bir malzeme olan betonda bir bağlayıcı olarak kullanılır. Beton çok farklı uygulamalara sahip çok yönlü ve güvenilir bir yapı malzemesidir (Cembureau, 2018). Türkiye’de çimento en çok özel konut inşaatlarında talep edilmektedir (Sgm, 2018). Ayrıca kullanım alanları ve bu alanlardaki amaçları aşağıdaki gibi örneklendirilebilir (Maukit, 2018)

- Bina (zemin, giriş, kolon, çatı, kazık, tuğla, harç, panel, sıva)
- Ulaşım (yollar, yollar, geçitler, köprüler, viyadükler, tüneller, otoparklar vb.)
- Su (borular, kanalizasyonlar, kanallar, barajlar, tanklar, havuzlar vb.)
- Sivil (iskeleler, rıhtımlar, istinat duvarları, silolar, depolama, direk, direk, eskrim)
- Tarım (binalar, işleme, konut, sulama)

Çimento çoğunlukla lokal olarak üretilir ve tüketilir. Bununla birlikte, deniz, nehir ve kara yoluyla uzun mesafeler boyunca nakledilebilir. Kara taşımacılığı maliyeti oldukça yüksektir. Deniz taşımacılığı karaya göre daha uygun fiyatlıdır (Cembureau, 2018).

Çimento tüketimi, yerel bölge veya ülkede ekonomik kalkınma ile yakından ilişkilidir. Kişi başı çimento tüketiminin bir ülkeden diğerine önemli ölçüde değiştiği Avrupa gibi olgun pazarlarda, çimento satışları inşaat sektöründeki faaliyetlere bağlı olarak değişmektedir (Cembureau, 2018).

Çimento endüstrisi CO<sub>2</sub>, enerji ve malzeme yoğun bir sektördür. Enerji tüketimini azaltmak ve kaynak verimliliğini artırmak için alınan tedbirler, fiili olarak CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltacak, dolayısıyla CO<sub>2</sub> emisyonlarına odaklanacaktır. Proses emisyonlarının (üretim süreci sırasında kireçtaşının kirece dönüştüğü zaman oluşur) ve gerekli termal enerjiden kaynaklanan emisyonların kombinasyonu, 1990 yılında her bir klinker tonu için 912 kg olduğu belirlenmiştir. 20 yıl içinde, Avrupa çimento endüstrisi, 1990 yılında 719 kg'dan ton çimento başına CO<sub>2</sub> emisyonunu 2010 yılında 660 kg'a düşürmüştür. CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılması, birçok paralel çalışmanın uyumlu bir şekilde yürütülmesi ile sağlanabilir. Gerçek bir fark yaratacak teknolojilerin, yatırımların ve süreçlerin birleşimi doğru tanımlanmalıdır (Cembureau, 2018).

### 3.TERMODİNAMİK KAVRAMLAR

#### 3.1. Termodinamiğin Birinci Kanunu

Termodinamiğin birinci kanunu, var olan bir enerjinin yok edilemeyeceği aynı şekilde yok olan bir enerjinin de var edilemeyeceğini anlatır. Ancak enerjinin herhangi bir biçimden başka bir biçime dönüşebileceğini anlatır. Bu kanunu matematiksel olarak kanıtlamak mümkün değildir, ancak doğada yaşanan bütün hal değişimlerinin bu kanuna uyduğu bilinmektedir, bu da kanıt olarak yeterlidir (Çengel ve Boles, 2008).

Enerjinin korunumu Eşitlik 3.1’ de verilmiştir. Burada  $\Delta E_{sistem}$  enerji değişimi,  $E_1$  giren enerji,  $E_2$  çıkan enerjiyi gösterir. Eşitlik 3.2’ de sistemdeki enerji değişimi, kinetik, potansiyel ve iç enerji toplamına eşit olduğu verilmiştir. Eşitlik 3.3 iç enerji değişimi, Eşitlik 3.4 kinetik enerji değişimi, Eşitlik 3.5 potansiyel enerji değişimini verir (Ustaoglu, 2011). Eşitlik 3.6’ da ise enerji geçişinin ısı, iş ve kütle biçiminde olduğunu ve geçiş miktarının giren ve çıkan enerji miktarlarının farkına eşit olduğu verilmiştir (Altınkaynak, 2013).

$$\Delta E_{sistem} = E_2 - E_1 \quad (3.1)$$

$$\Delta E_{sistem} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (3.2)$$

$$\Delta U = m (u_2 - u_1) \quad (3.3)$$

$$\Delta E_k = m (V_2 - V_1) / 2 \quad (3.4)$$

$$\Delta E_p = mg (z_2 - z_1) \quad (3.5)$$

$$\Delta E_{sistem} = E_2 - E_1 = (Q_2 - Q_1) + (W_2 - W_1) + (E_{kütle,2} - E_{kütle,1}) \quad (3.6)$$



### 3.2. Termodinamiğin İkinci Kanunu

Bir hal değişiminin gerçekleşebilmesi için birinci yasanın sağlanması zorunludur. Ancak birinci yasanın sağlanması hal değişiminin gerçekleşebilmesi için yeterli değildir. Örneğin; ortamda bırakılan bir fincan sıcak kahvenin soğuması birinci yasaya uygundur. Çünkü bir fincan kahve sıcaklığını ortama verir. Fakat bunun tersi yani bir fincan sıcak kahvenin ortamdaki alacağı enerjiyle ısınması mümkün değildir. Birinci yasanın bu konudaki eksikliğini termodinamiğin ikinci yasası kapatır. Yani bir hal değişimi termodinamiğin birinci ve ikinci yasasını sağlamıyorsa, gerçekleşmez. Termodinamiğin ikinci yasası sadece hal değişimlerinin yönünü belirlemez. Aynı zamanda enerjinin niceliği yanında niteliğini de ön plana çıkarır (Çengel ve Boles, 2008).

Termodinamiğin ikinci yasası farklı şekillerde tanımlanmıştır. Bunlar;

**Kelvin-Planck bildirisi :** Hiçbir ısı makinesi sadece bir ısı deposuyla ısı alışverişinde bulunup net iş üretmez (Çengel ve Boles, 2008). Burada anlatılmak istenen hiçbir ısı makinesinden % 100 verim beklenemeyeceğidir (Ustaoğlu, 2011) (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Isı Makinası (Ustaoğlu, 2011).

**Clausius bildirisi :** Soğuk bir cisimden daha sıcak bir cisme çevreden iş almadan ısı enerji aktaran bir makine yapılamaz (Çengel ve Boles, 2008). Burada anlatılmak istenen ısı enerjisinin soğuk bir ortamdan sıcak bir ortama akamayacağıdır (Ustaoğlu, 2011) (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Soğutma Makinası (Ustaoğlu, 2011).

### 3.3. Ekserji ve Tanımı

Dünya enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması, asit yağmurları, ozon tabakasının delinmesi, küresel ısınma ve iklim değişiklikleri, bilim insanlarını sürdürülebilir ve verimli enerji kaynaklarını araştırmaya zorlamıştır. Bu araştırmalarda enerjinin sürdürülebilirliği ve verimliliğini değerlendirmede en önemli yöntem ekserji analizleridir (Söğüt, 2009).

Herhangi bir enerji kaynağını kullanabilmek için öncelikle kaynağın enerji miktarı yaklaşık olarak belirlenir. Ancak belirlenen kaynağın enerji miktarı bu kaynağın kullanılıp kullanılmayacağı konusunda kesin bir bilgi veremez. Çünkü asıl karar verilecek olan husus kaynağın enerji miktarı değil, enerji miktarının ne kadarının iş potansiyeline yani yararlı işe dönüştürülebileceğidir. Bu enerji miktarlarının yararlı işe dönüştürülmesi ekserji analizleriyle incelemektedir (Ustaoğlu, 2011).

Ekserji, ilk olarak 1956 yılında Zoran Rant tarafından kullanılan bir terimdir. Aynı zamanda kullanılabilirlik, kullanılabilir enerji, kullanılabilir iş, üstünlük gibi

kavramlar arasında en çok kabul gören terim oluşmuştur. Ekserji analizi, enerji analizinin yaptığı gibi, sadece enerjinin kaybedildiği noktayı (verimsizlikleri) belirlemekle kalmayıp, aynı zamanda mevcut süreç üzerinde gelişme potansiyeli olan yerleri de belirleme potansiyeline sahiptir. Ekserji, enerjinin miktarının ve kalitesinin bir ölçüsüdür. Ayrıca, çevreye karşı tersinir etkileşimlerle çevreyle dengeye getirildiğinde termodinamik sistemden elde edilebilecek maksimum iş miktarı olarak ifade edilebilir (Norman, 2013).

Belirli bir halde ve belirli bir miktardaki enerjiden elde edilebilecek yararlı işi veren özelliğe kullanılabilirlik yada ekserji adı verilir. Enerjinin kullanılmayan kısmına yada başka bir tabir ile enerjinin diğer enerji türlerine dönüştürülemeyen kısmına anerji denilir. Buna göre enerji aşağıda yer alan eşitlik ile ifade edilebilir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\text{Enerji} = \text{Ekserji} + \text{Anerji} \quad (3.7)$$

İki hal arasında sistem tarafından yapılan en çok iş, hal değişiminin tersinir olması durumunda gerçekleşir. Bu nedenle sistemden elde edilebilecek en çok işi belirlerken tersinmezlikler gözönüne alınmaz. Son olarak, sistemden en çok işi elde edebilmek için, hal değişimi sonunda sistemin ölü halde olması gerekir. Bir sistemin ölü halde olması, çevresiyle termodinamik dengede bulunması anlamına gelir. Ölü haldeyken sistem çevre sıcaklığı ve basıncındadır. Ayrıca kinetik ve potansiyel enerjileri sıfırdır. Bir sistemin ölü haldeki kullanılabilirliği de sıfırdır. Dolayısıyla verilen bir sistemin ekserjisi (kullanılabilirlik)ölü hale bağlıdır (Çengel ve Boles, 2008).

### 3.3.1. Ekserjinin önemi

Termodinamik sistemlerde tasarruf yapılması ısı kayıplarının en aza indirilmesi ile mümkün olmaktadır. Isıl kayıplarının belirlenmesinde de ekserji kullanıldığından dolayı ekserjinin önemi büyüktür.

Ekserji analizlerinin önemini maddeler halinde inceleyecek olursak :

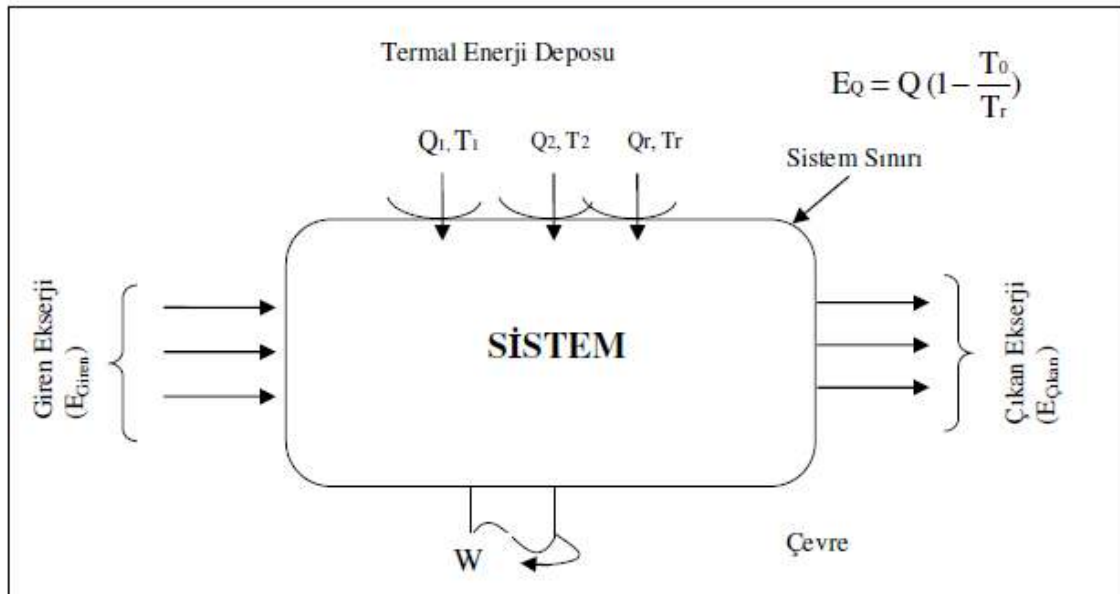
- Enerji kaynaklarının kullanımının çevreye olan etkilerinin belirlenmesinde önemli bir araçtır.

- 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 tasarlamının nasıl mümkün olup olmayacağını gösteren etkin bir yöntemdir.
- Sürdürülebilir gelişmenin elde edilmesinde anahtar bir bileşendir.
- Enerji politikaların oluşturulmasında kullanılabilecek önemli bir araçtır (Kandilci, 2013).

### 3.3.2. Ekserji analiz metodu

Geleneksel metotlarda, termal sistem analizlerinin temelini termodinamiğin birinci kanunu oluşturur. Bu metotlar ile sistem ve çevre arasındaki ısı geçişini ve sistemin enerji balansı belirlenir. Enerji balansı, enerji geçişleri ve iç kayıpları belirler.

Ekserji, enerjinin niceliğinin bir ölçüsüdür. Termal sistemlerin tasarımı ve analizi için termodinamiğin ikinci kanunu ekserji balansını inceler. Sürekli akış halinde açık bir sistemin ekserji analizi aşağıda yer alan Şekil 3.3 yardımı ile açıklanabilir.



**Şekil 3.3.** Sürekli akış halinde açık bir sistemin ekserji analizi.

$$E_g + E_Q = E_{\dot{c}} + W + I \quad (3.8)$$

Eşitliğinde yer alan  $E_g$  Eşitlik 3.9 da  $E_{\dot{c}}$  Eşitlik 3.10' da  $E_Q$  ise Eşitlik 3.11' de gösterilmiştir.

$$E_g = \sum m_g e_g = \sum m_g (h_g + \frac{1}{2} V_g^2 + g z_g) + Q \quad (3.9)$$

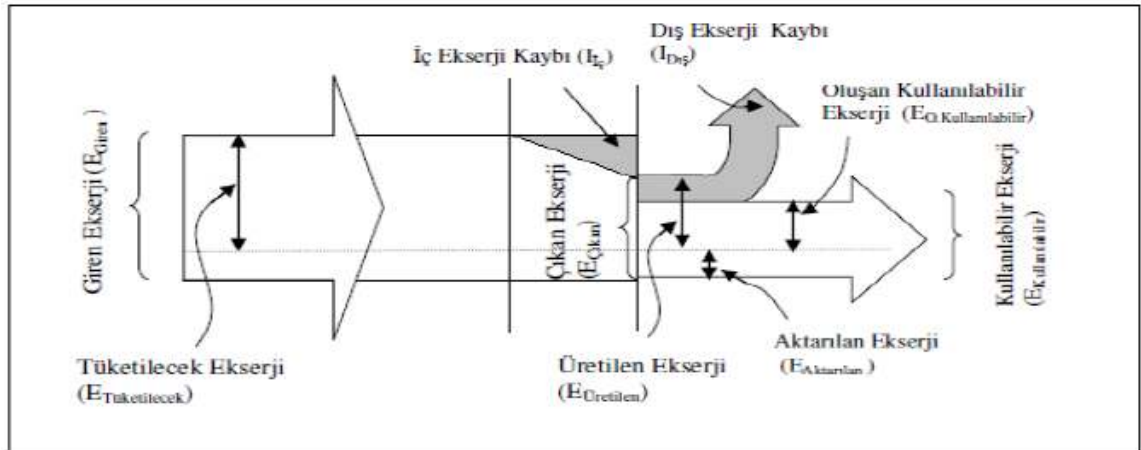
$$E_{\dot{c}} = \sum m_{\dot{c}} e_{\dot{c}} = \sum m_{\dot{c}} (h_{\dot{c}} + \frac{1}{2} V_{\dot{c}}^2 + g z_{\dot{c}}) + W \quad (3.10)$$

$$E_Q = \sum Q (1 - \frac{T_0}{T}) \quad (3.11)$$

Buradan Eşitlik 3.12 elde edilir.

$$E = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + e_{kim} + \left(\frac{V_0^2}{2}\right) + g z_0 \quad (3.12)$$

Kontrol bölgesinin girişinde yer alan ekserji her zaman çıkışta yer alan ekserjiden büyüktür. Girişte yer alan ekserji ile çıkışta yer alan ekserji arasındaki fark da ekserji kayıplarıdır. Ekserji kayıpları ekserji kullanım oranı ile belirlenir. Ekserji kullanım kayıpları yani ekserji balansı aşağıda yer alan Şekil 3.4' de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Ekserji kullanım kayıpları.

Bu veriler sistem performans değişimini ve ekserji iletiminin azalmasını gösterir. Enerji türlerinin ekserji transferi; iş, ısı ve madde akışı olarak üç şekilde gerçekleşir (Şahin, 2014)

### **3.3.2.1. İş etkisi ile ekserji transferi**

Enerjinin kullanılabilir iş potansiyeline ekserji denir. İş ile ekserji geçişi sınır işi için Eşitlik 3.13, işin diğer şekilleri için ise Eşitlik 3.14'teki gibidir.

$$Ex_{i\dot{s}} = W - W_{\text{çevre}} \quad (3.13)$$

$$Ex_{i\dot{s}} = W \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.13'teki  $W_{\text{çevre}} = P_0(V_2 - V_1)$ ,  $P_0$  atmosfer basıncı,  $V_2$  ve  $V_1$  ise sistemin ilk ve son hacimleridir. İş ile birlikte gerçekleşen ekserji geçişi, hacim değişikliği geçiren kapalı sistemler dışında, işin kendisine eşittir. Sınır işi içeren kapalı sistemlerde, atmosfer koşullarında bulunan havanın itilmesi içinde ayrıca bir iş gerekir. Bu da kullanılamayacak bir enerjidir. Bu kapalı sistemlerde iş yapılması için kapalı sistem içerisindeki basıncın atmosfer basıncının üstüne çıkması gerekir (Çengel ve Boles, 2008).

### **3.3.2.2. Isı etkisi ile ekserji transferi**

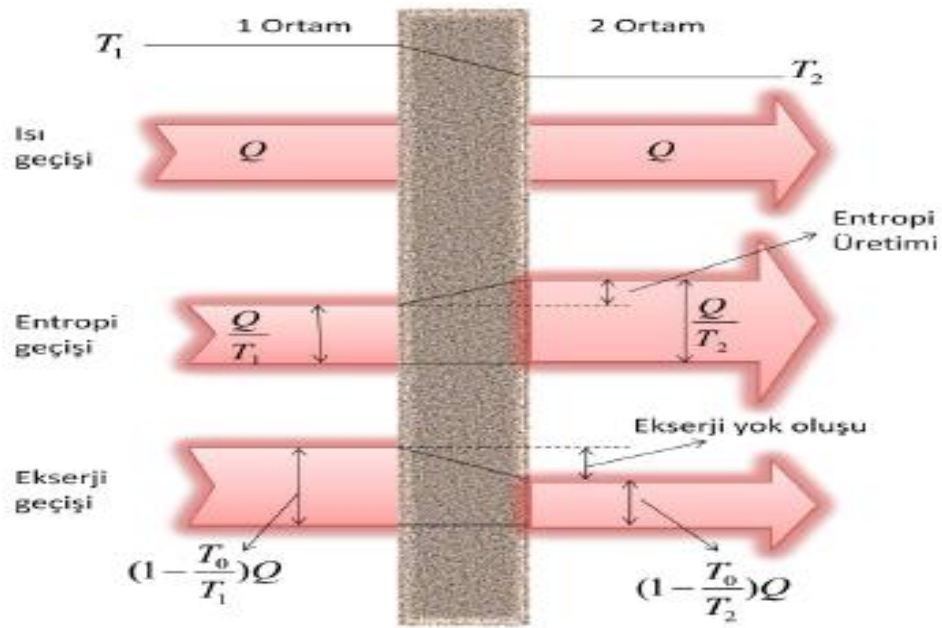
Isı düzensiz bir enerjidir. Isı düzensiz bir enerji olduğundan bir bölümü işe dönüşebilir. Isının işe dönüşen bölümü artık düzenli enerjidir. Isıdan çevre sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta, kullanılmış ısıyı çevreye yayan bir ısı makinesine ısı geçirerek iş üretilebilir. Isı ile ekserji geçişi Eşitlik 3.15 ile ifade edilmiştir.

$$Ex_{i\dot{s}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (3.15)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $T$  sıcaklığı  $T_0$  'a eşit olursa ekserji sıfır olur. Çünkü bu iki sıcaklığın eşit olması durumunda herhangi bir ısı geçişi olmayacaktır. Dolayısıyla iş çevirilecek herhangi bir ısı makinesi çalıştırılmayacaktır.

Entropi üretimi her zaman ekserjinin yok olmasına sebep olur. Bu durum aşağıdaki Şekil 3.5' de verilmiştir. Eğer ısı geçişinin olduğu sınırdaki sıcaklık değişken ise, ısı geçişi ile beraber ekserji geçişi Eşitlik 3.16' daki gibi olur (Ustaoglu, 2011).

$$Ex_{ısı} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \partial Q \quad (3.16)$$



Şekil 3.5. Isı, entropi ve ekserji geçişinin gösterimi.

### 3.3.2.3. Madde akışı ile birleştirilmiş ekserji

Sistemin enerjisi, o sistemin kütlesi, ekserjisi ve entropisi ile orantılıdır. Bir sistemden dışarı veya sisteme ekserji, entropi ve enerji transferi kütle akışı ile gerçekleşir. Sisteme kütlesi  $m$  olan bir madde girdiğinde veya çıktığında o sistemde  $m\psi$  kadar ekserji değişimi olur. " $\psi$ " değeri aşağıda bulunan Eşitlik 3.17' de verilmiştir.

$$\psi = (h - h_0) + T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (3.17)$$

Eğer akışkanın özellikleri değişkenlik gösteriyorsa Eşitlik 3.18 kullanılır.

$$\dot{Ex}_{küt} = \int \psi \rho V_n dA_c \text{ ve } Ex_{küt} = \int \psi \partial m = \int_{\Delta t} \dot{Ex}_{küt} dt \quad (3.18)$$

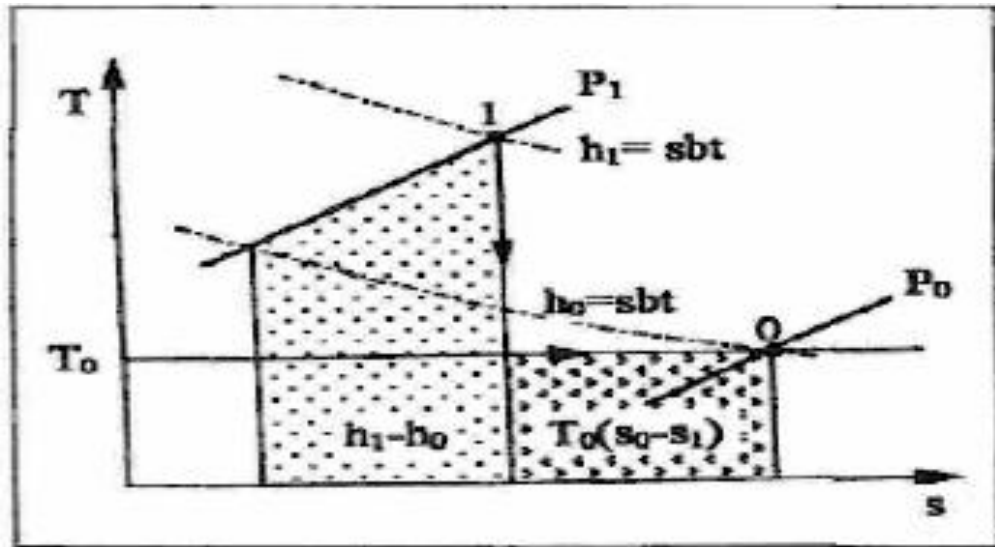
Eşitlik 3.18’ de yer alan  $A_c$  akışkanın kesit alanı ve  $V_n$  ise  $dA_c$  için normal hızı verir. Kapalı sistemlerde kütle ile ekserji geçişi, adyabatik sistemlerde ise ısı ile enerji geçişi sıfırdır (Ustaoğlu, 2011).

### i) Fiziksel ekserji

Fiziksel ekserji, çevresi ile etkileşim içinde,  $P$  basıncında ve  $T$  sıcaklığında, çevre basıncı ( $P_0$ ) ve ( $T_0$ ) sıcaklığından ölü hale ulaşmaya kadar akışa etki eden maddelerden elde edilen faydalı iş olarak ifade edilmektedir. Proses akışını gerçekleştiren bir sistemin fiziksel ekserjisi eşitlik 3.19’ da gösterilmiştir.

$$\dot{E}x_{fiz.} = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (3.19)$$

Burada  $H$ ,  $H_0$ ; başlangıç ve bitiş entalpilerini,  $S$ ,  $S_0$ ; başlangıç ve bitiş entropilerini ve  $T_0$  çevre sıcaklığını ifade etmektedir. Fiziksel ekserji prodesteki basınç ve sıcaklık farkından açığa çıkan ekserjinin tanımlanmasını sağlamaktadır ve yararlı iş olarak ifade edilmektedir. Aşağıdaki Şekil 3.6’ da verilen bir durumda sistemin fiziksel ekserji farkı gösterilmiştir (Şahin, 2017).



Şekil 3.6. Sistemin fiziksel ekserji farkı.

$$\dot{E}x_{fiz.} = \dot{E}x_{\Delta T} + \dot{E}x_{\Delta P} \quad (3.20)$$



Eşitlik 3.20 'de  $\dot{E}x_{\Delta T}$  , fiziksel ekserjinin proseste elde edilen ürün ve çevresi arasındaki sıcaklık farkının integrasyonu olarak ifade edilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{E}x_{\Delta T} = \left[ - \int_T^{T_0} \frac{T-T_0}{T} \right] dh \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.21 'de  $\dot{E}x_{\Delta P}$  ise, basınç parametresi olup proseste elde edilen ürün ve çevresi arasındaki basınç farkından dolayı oluşmaktadır. Basınç parametresi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{E}x_{\Delta P} = T_0(s_0 - s_1) - (h_0 - h_1) \quad (3.22)$$

İdeal gazlarda fiziksel ekserji hesaplanırken mükemmel gaz kanunları ve sabit özgül ısıları ele alınır. Herhangi bir durumda ideal gaz için fiziksel ekserji aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\dot{E}x_{fiz.} = C_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (3.23)$$

Burada  $C_p$  gazın sabit özgül ısı kapasitesi,  $R$  gaz sabitidir. Sabit özgül ısılar için katı ve sıvıların fiziksel ekserjileri aşağıdaki Eşitlik 3.24'de tanımlanmıştır;

$$\dot{E}x_{fiz.} = C_p \left[ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right] + v_m(P - P_0) \quad (3.24)$$

Burada  $v_m$  özgül hacim ve  $T_0$  referans sıcaklığıdır (Şahin 2017)

## ii) Kimyasal ekserji

Kimyasal ekserji; bir maddenin çevresiyle kimyasal dengeye geldiğinde ısı transferi ve madde alışverişi sonucu ortaya çıkan maksimum iş olarak tanımlanmaktadır (Filiz, 2012).

İdeal gazların molar kimyasal ekserjisi :

$$\dot{E}x_{kim} = RT_0 \sum y_i \ln \left( \frac{y_i}{y} \right) = \sum_i y_i \dot{E}x_{kim,i} + RT_0 \sum_i y_i \ln y_i \quad (3.25)$$

Suyun molar kimyasal ekserjisi :

$$(\dot{E}x_{kim})_{H_2O} = RT_0 \ln \left( \frac{P_{doyma}}{P_{00}} \right) \quad (3.26)$$

Gaz yakıtlarının kimyasal ekserjisi :

$$\omega = \frac{\dot{E}x_{kim}}{\dot{H}_u} \quad (3.27)$$

### 3.3.3. Tersinirlik

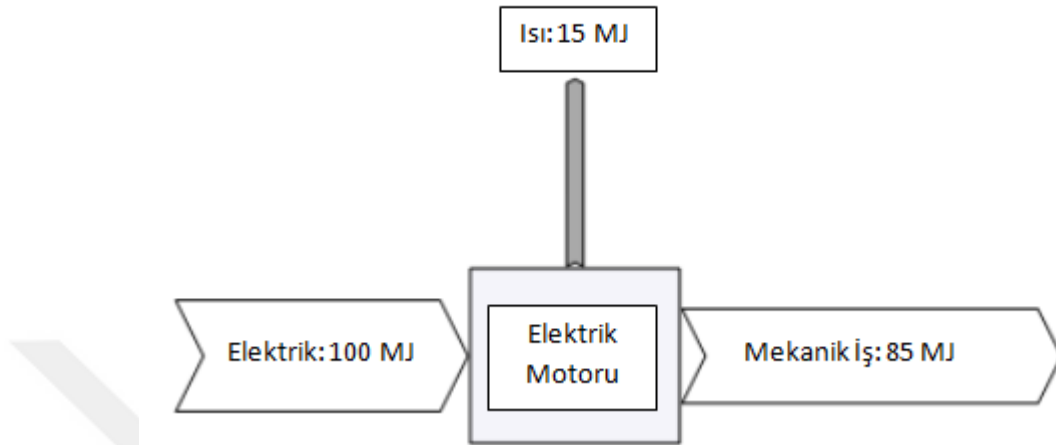
Tersinir bir proses, işlem tamamlandıktan sonra sistem ve çevrenin ilk duruma tam olarak geri dönebileceği bir prosestir. Tersinmezlik söz konusu olduğunda ise, sistem başlangıç durumuna geri getirilebilir, ancak çevresi getirilemez. Tersinir bir proses çoğu zaman ideal durumu temsil eder, ancak gerçek dünyadaki tersinmezlikler bu yasanın gerçekleşmesini engelleyen etkileri temsil ederler. Tersinmezlikler proseste verimsizliğe yol açarlar.

Bir süreci tersinmez hale getiren sekiz etki şu şekilde tanımlanmaktadır:

- Sonlu bir sıcaklık farkı ile ısı transferi.
- Bir sıvı veya gazın daha düşük bir basınca sınırsız genişmesi.
- Kendiliğinden gerçekleşen kimyasal reaksiyon.
- Maddenin farklı bileşimlerde veya durumlarda karıştırılması.
- Sürtünme - hem kayma hem de akışkan akışında.
- Bir direnç boyunca geçen elektrik akımı
- Elastik olmayan deformasyon.
- Manyetikleşme veya histerezis ile polarizasyon (yani manyetik gücün çıkarılmasından sonra sistemin eski durumuna geri dönmemesi).

Bir proseste bu etkilerden bir veya daha fazlasının varlığı prosesi tersinmez hale getirir. Bu tersinmezlikler ortadan kaldırılamaz. Proseslerin gelişmeleri incelerken, verimliliği iyileştirmek için tersinmezliklere yol açan koşullar önlenirse de, tersinmezliklerin kendisi tam olarak önlenemez (Norman, 2013).

Aşağıda bir elektrik motorundan örnek verilmiştir (Şekil 3.7).



**Şekil 3.7.** Elektrik motoruna giren ve çıkan enerji gösterimi.

100MJ elektrik motora girer, bunun 85MJ'u mekanik işe dönüştürülürken, 15MJ sürtünme ile ısıya dönüştürülür. Burada, termodinamiğin birinci yasası sağlanır; girdilerin (elektrik) toplamı, çıktıların toplamına (mekanik iş ve ısı) eşittir. Ancak, sadece 85MJ' lük mekanik iş yararlıdır, 15MJ' lük ısı sistemden istenen bir çıktı değildir. Bu ısının başka bir işlemde kullanımı mümkün olsa da, sadece motor sistemi için ele alındığında bu ısı atık olarak tanımlanır (Norman, 2013).

### 3.3.4. Tersinmezlik (Ekserji kaybı)

Termodinamik bir sistemde etkilenen moleküllerin, başka bir termodinamik sisteme aktarımı sırasında kaybedilen iş potansiyelidir (Yılbası, 2007).

Ekserji kaybının başlıca nedenlerinden ikisi yanma ve ısı transferidir. Bunlar, doğrudan doğruya enerji üretiminde olmasa bile, imalat sektöründe neredeyse tüm enerji kullanımında yer alırlar. Yanmada yakıttaki ekserji yaklaşık üçte bir oranında yok edilir. İç ısı transferinin tersinmezlikleri yanma sıcaklığının en aza indirilmesiyle azaltılabilir. Harici ısı transferi de ekserji tahribatına neden olur. Isı, iki ortam arasında aktarıldığında, daha yüksek sıcaklığa sahip ortam, düşük sıcaklıktaki ortamdan daha yüksek bir termodinamik kaliteye sahip olacaktır. Isı aktarımı yüksek sıcaklıktan daha düşük bir sıcaklığa doğru gerçekleştiğinden, bu ısı transferi ile termodinamik kalitenin

kaybına işaret eder. Bu nedenle, % 100'lük bir ilk yasa verimliliği ile bile bir ekserji imhası olacaktır. Bu ekserji tahribatları, ısı transferinin meydana geldiği sıcaklık gradyanını azaltarak asgariye indirilebilir, ancak bu genellikle pratik değildir (Norman, 2013).

Tersinmezlik diğer adıyla ekserji kaybı, ekserji balansı kullanılarak hesaplanır."I" ile gösterilir. Aşağıda yer alan Eşitlik 3.28 ile hesaplanır.

$$\dot{I} = \sum_g \dot{E}x_g - \sum_{\dot{c}} \dot{E}x_{\dot{c}} \quad (3.28)$$

Tersinmezlikleri hesaplamada kullanılan diğer bir yöntem de “Gouy-Stodola” tarafından yapılmıştır. Burada, entropi artışları çevresel sıcaklığa bağlı olarak arttığı vurgulanmıştır.

$$\dot{I} = T_0 \sum_{\dot{c}} S_{\dot{c}} - T_0 \sum_g S_g = T_0 \Delta_s \quad (3.29)$$

Burada  $T_0$  çevre sıcaklığı,  $\Delta_s$  entropi değişimini ifade eder (Vatandaş, 2016).

### 3.3.5. Ekserji verimliliği

Termodinamik sistemler veya araçlar çalışmaları ile alakalı tersinmezlik ve kayıplara sahip olmaktadır. Yani ideal şartlardaki değerlere sahip olduğu kabul edilen ve hesaplanan maksimum teorik değer in sadece bir kısmına denk gelen iş üretilmektedir. Termodinamik bir sistemdeki verimsizlik ekserji kaybı ve yıkımı ile ilgilidir. Ekserji analizi bu ekserji kayıpları ve yıkımına nenden olan etkenleri tanımlamaktadır. Bu etkenler belirlense bile bu ekserji kayıp ve yıkımlarının sadece bir bölümü engellenebilir. Toplam ve kaçınılmayan ekserji yıkımı arasındaki fark kaçınılabılır ekserji yıkımını ifade etmektedir. Buda bir bileşenin termodinamik verimliliğini geliştirmede daha gerçekçi bir ölçüm sağlamaktadır (Sencan, 2014).

Ekserji verimliklerini üç başlık altında inceleyebiliriz. Bunlar;

- Basit verimlilik
- Rasyonel verimlilik
- Geçişli ekserji ile verimlilik

### **3.3.5.1. Basit verimlilik**

Bir termodinamik sistemde, sisteme giren ve çıkan ürünler arasında bir denge oluşturularak hesaplanır. Ekserji verimliliğinin temelidir. Aşağıdaki eşitlik 3.30 da verilmiştir.

$$\eta_u = \frac{\dot{E}x_c}{\dot{E}x_g} \quad (3.30)$$

Termodinamik bir sistemde yapılacak olan hesaplamaların her adımında kullanılmaktadır. Bir prosesin ekserji verimliliği basit verimlilik hesaplamaları sonucu açığa çıkan verilerin değerlendirilmesi ile oldukça önem kazanır. Enerji kullanımının yüksek olduğu sektörler de ise prosesin verimlilik resmini ortaya koyma açısından oldukça önemlidir (Şahin, 2017).

### **3.3.5.2. Rasyonel verimlilik**

Rasyonel verimlilik, istenilen ekserji çıkışının kullanılan ekserjiye oranıdır. Aşağıda bulunan Eşitlik 3.31 de gösterilmiştir.

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{istenilen\ çıkış}}{\dot{E}x_{kullanılan}} \quad (3.31)$$

$\dot{E}x_{istenilen\ çıkış}$  sistemden transfer edilen ve istenilen çıktıyı oluşturan ekserjilerin toplamıdır. İstenilen ekserji çıkışı, sistem fonksiyonlarının denemeleri yolu ile belirlenmiştir. Eğer  $\dot{E}x_{istenilen\ çıkış}$  ve  $\dot{E}x_{kullanılan}$  bir kontrol yüzeyinde herhangi bir yanlışlık yapılmadan tanımlanırsa, meydana gelen tersinmezlikler göz önüne alınarak Eşitlik 3.32 yazılır.

$$\dot{E}x_{kullanılan} = \dot{E}x_{istenilen} + I \quad (3.32)$$

Yukarıdaki eşitlikler birleştirildiğinde, alternatif bir eşitlik elde edilebilir. Aynı zamanda bu eşitlik ekserjinin istenilen çıkışı için kullanılabilir.

$$\psi = 1 - \left( \frac{I}{\dot{E}x_{kullanılan}} \right) \quad (3.33)$$

Rasyonel verimlilik tamamen yutucu olmayan her sistem için kullanılabilir (Vatandaş, 2016).

### **3.3.5.3. Geçişli ekserji ile verimlilik**

Geçişli ekserjinin toplam miktarı proseslerin termodinamik verimliliğinde etkin değildir ve ekserji akışlarından çıkartılmaktadır. Geçişli ekserji ile verimlilik Eşitlik 3.34' de verilmiştir (Kandilci, 2013).

$$\eta_{II} = \frac{Ex_{\dot{c}} - Ex_{tr}}{Ex_{\dot{g}} - Ex_{tr}} \quad (3.34)$$

#### 4. LİTERATÜR ÖZETİ

Song ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tipik bir çimento üretim hattında hedeflenen ekserji etkisi ve karbondioksit emisyonu, önemli azaltma faktörleri ile tanımlanmıştır. Ayrıca, gelecekteki emisyon eğilimleri, mevcut azaltım hedefleri açısından farklı optimizasyon senaryoları ile dinamik tahminlere dayanarak simüle edilmiştir. Çalışmada, çimento üretim sürecinde enerji tasarrufu ve emisyon azaltımı hedeflenmiş, genelleştirilmiş fiziksel model oluşturulurken sistem sınırları ve ana süreçler belirlemiştir. Bu sistemde tüketilen malzemeler kireçtaşı, kumtaşı, uçucu kül, sülfürik asit kalıntısı, alçıtaşı ve karışımları; ve tüketilen enerji şunları: kömür ve elektrik gibi harici sistemlerden enerji girişini kapsamaktadır. İç enerji tüketimi, emisyon azaltımının temel faktörünü tanımlamak için genişletilmiş ekserji analizi kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışma, çimento üretim projesinin ekserji analizi için bir ön çerçeve sağlamıştır. Önerilen senaryolarla karşılaştırıldığında, gelecekte çimento sektörünün sürdürülebilir gelişiminin optimize edilmiş bir yolunun anlaşılmasını sağlamıştır. Çalışmanın kapsamının, çevresel etkiyi en aza indirme ve çimento üretimi için enerji verimliliğinin optimize edilmesinin koordinasyonuna ışık tutabileceği belirtilmiştir (Song ve Chen, 2016).

Madloul ve arkadaşları, ön ısıtıcı ve soğutucu ızgaradan çıkan atık çıkış gazlarını kullanarak elektrik üretiminde atık ısı geri kazanımını belirlemek ve ayrıca maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çimento fabrikasındaki atık ısı kaynaklarının, ön ısıtıcı ve klinker soğutucusu sıcak havasından çıkış gazları olduğu belirtilmiştir. Kojenerasyon gücü için, farklı sıcaklık derecesine sahip olan bu kaynakların ayrı ayrı veya birlikte kullanılabileceği vurgulanmıştır. Soğutucudan çıkan sıcak havanın sıcaklığı 220 ° C ve süspansiyon ön ısıtıcısından çıkan gazların sıcaklığı 325 ° C olarak verilmiştir. Bu iki kaynağı kullanarak üretilen buhar, bir buhar türbini çalıştırmak için kullanılmıştır. Buhar türbini elektrik üretmek için elektrik jeneratörünü devreye almıştır. Bu, şekilde atık ısı enerjiye dönüştürülmüştür. Net güç çıkışı 834.12 kJ / kg olarak hesaplanmıştır.  $6.673 \times 10^3$  MWh / yıl elektrik üretimi sağlanmıştır. Maliyet tasarrufu, 20 ayda 467.110.00 USD / yıl olarak hesaplanmıştır (Madloul, vd., 2012).

Karakaş'ın yapmış olduğu çalışmada, çimento üretiminde öğütme işlemlerinde yapılacak bazı değişimlerin, harcanan enerji üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel

alışmalar 2 farklı öğütme kademesi göz önüne alınarak, 3 farklı aşamada yapılmıştır. Çalışmanın temeli,enerji tasarrufu için optimum besleme boyutu, bilya yüklemesi ve bilya kompozisyonunun belirlenmesine dayanan deneysel çalışmalardan oluşmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda, bilya yükü %38-40'a yükseltildiğinde, öğütmede kullanılan enerjide önemli bir tasarrufun sağlanacağı ortaya konulmuştur. Ayrıca Standart Bond değirmeninde, -9 mm, -5,6 mm, -3,36 ve -1,68 mm besleme boyutlarında yapılan çalışmalar sonucunda en uygun boyutun -3,36 mm olduğu saptanmıştır. (Karakaş, 2006).

şahin, bir imento fabrikasında ayrıntılı bir enerji çalışması gerçekleştirmiş ve elektrik enerjisi verimliliğini artırmayı hedeflemiştir. Prosesin enerji tüketimini incelemiş, enerji verimliliği potansiyelini belirleyerek bu verimliliğin artırılması için projeler geliştirmiştir. Çalışma kapsamında fırın 1 ve fırın 2 bacalarında atık ısı potansiyeli, konkasör, farin değirmeni, kömür değirmeni, imento değirmeni, soğutma suyu tesisatı, hidrofor tesisatı, basınçlı hava kompresörleri ve tesisatında inceleme, ölçüm ve analizler yapmış, tasarruf potansiyelleri tespit etmiş, tespit edilen potansiyelin ne şekilde değerlendirilebileceğine ilişkin öneriler sunmuştur. Çalışmanın sonucunda, mevcut yakıtların kullanımının azaltılarak lastikler ve yağlar gibi farklı alternatif yakıtlar kullanılabileceği, bu şekilde daha yüksek klinker üretimine, daha düşük elektrik tüketimine ve daha düşük sera gazı emisyonuna neden olunacağı belirtilmiştir. Ayrıca kojenerasyon santrallerinin, ön ısıtıcı egzoz ve klinker soğutucu egzoz gazlarından açığa çıkan atık ısıyı geri kazanabileceği ve klinker üretim sürecine müdahale etmeden sürekli bir şekilde elektrik retilabileceği önerilmiştir. Öğütme için kullanılan sistemlerin farklılaştırılmasıyla da enerji tasarrufu sağlanabileceğini vurgulamıştır (şahin, 2017).

Kandilci yapmış olduğu çalışmada, bir imento fabrikası için enerji ve ekserji analizini yapmış ve enerji verimliliğini hesaplamıştır. alışmalar farin değirmeni, kömür değirmeni ve imento değirmeninin bir yıllık gerçek verileri ile yürütülmüştür. Her bir birim için ortalama aylık veriler (toplam 12 ay) kullanılarak her bir aya enerji ve ekserji analizleri uygulanmıştır. Ortalama enerji verimi ve ortalama ekserji verimi farin değirmeni için % 74 ve % 12, kömür değirmeni için % 97 ve % 65, imento değirmeni için % 73 ve % 87 olarak bulunmuştur (Kandilci, 2013).



Rahman ve arkadaşları, çimento endüstrisinde alternatif yakıtlar kullanılarak enerji performansı ve emisyon kontrolünün bir süreç modeli ile değerlendirilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma, beş alternatif yakıtın kirletici emisyonları ve enerji performansı üzerindeki etkisini simüle etmek için Aspen Plus yazılımı kullanılarak çimento endüstrisinde bir ön kalsinasyon fırın sisteminin proses modelini geliştirilmesini içermektedir. Kullanılan yakıtlar, lastik, belediyeye ait katı atıklar (MSW), et ve kemik (MBM), plastik atıklar ve şeker kamışı küspesi olarak belirtilmiştir. Model, sistemin enerji ve kütle dengesi temel alınarak geliştirilmiş ve referans çimento fabrikasından elde edilen verilere karşı doğrulanmıştır. Bu çalışma aynı zamanda bu alternatif yakıtların klinker kalitesine etkisini de araştırmıştır. Sonuçlar, bu alternatif yakıtların kömürle % 20'lik karışımının CO<sub>2</sub> emisyonlarında % 4.4'e varan bir düşüşün ve termal enerji ihtiyacında % 6.4'e kadar azalmanın sağlandığını göstermiştir. Ayrıca, MSW dışındaki alternatif yakıtların klinker kalitesi üzerinde minimum etkili olduğu da bulunmuştur. Genel olarak, MBM'nin enerji ihtiyacını ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmada diğerlerinden daha fazla etkili olduğu bulunmuştur (Rahman, vd., 2017).

Worrell ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, çimento üretiminde enerji verimliliğinin iyileştirilmesi ve maliyet düşürme olasılıkları üzerinde durulmuştur. Burada, Amerika Birleşik Devletleri için çimento sektöründeki enerji verimliliği ve yakın gelecekte elde edilebilecek düşük maliyetli enerji ve karbondioksit tasarrufu için tarihi eğilimler incelenmiştir. Çalışma, enerji kullanımı ve karbondioksit emisyonlarının detaylı analizi, spesifik enerji verimliliği teknolojileri, enerji kullanımını ve karbondioksit emisyonlarını azaltma önlemlerini, çimento üretimi için enerji verimliliği ve karbondioksit emisyonları azaltma potansiyelini ele almaktadır. 50'den fazla enerji tasarruflu teknoloji ve önlemler ile tahmini enerji tasarrufu, karbondioksit tasarrufu, yatırım maliyetleri ve işletme ve bakım maliyetleri incelenmiştir. Sonuç olarak, tarihi ilerlemelere rağmen, enerji verimliliğinin iyileştirmesi için hala alanlar bulunmakta olduğunu vurgulamışlardır. Genel çimento endüstrisinde ve tek tek tesislerde enerji verimliliği artışı için önemli potansiyel olduğunu belirlemişlerdir. Ancak, bu potansiyelin bir kısmının sadece hisse devirlerinin bir parçası olarak ve mevcut tesislerin genişletilmesiyle sağlanabileceği belirtilse de yine de, geliştirilmiş enerji

yönetimi uygulamaları için nispeten büyük bir potansiyel olduğu anlatılmıştır (Worrell, vd., 2013).

Mian ve arkadaşları, çimento üretiminin enerji verimliliğini optimize etmek için Pinch Analysis ve Process Integration tekniklerinin kullanımını incelemişlerdir. Amaç, atık yakıt kullanımı da dahil olmak üzere gaz-katı ısı değişimlerine odaklanarak, işlemin soğutma ve ısıtma gereksinimlerini karakterize etmek için proses modellemesi kullanmaktır. Isı kademeli model, proste ısı geri kazanımını hesaplamak için kullanılan gaz-katı ve gaz-gaz ısı geri kazanımını hesaba katmak üzere uyarlanmıştır. Mevcut sıcaklığın entegrasyonunu hesaplamak için karışık tamsayı doğrusal programlama problemi çözümlü; bu model, farklı yakıtlar, ısı geri kazanım seçenekleri ve proses çalışma koşullarını dikkate alınarak ısı geri kazanımı ve enerji dönüşüm verimliliği optimize edilmiştir. Çalışılan tesisin akış şeması kullanılarak, birincil enerji tüketimi 3600 MJ / ton klinker olarak hesaplanmıştır. Bu değerin, tipik Avrupa tesisleri için rapor edilen ortalama termal enerji tüketimiyle tutarlıdır. Süreç entegrasyon modelinin uygulanmasıyla, termal enerji talebi hedefi, yaklaşık % 30'luk bir azalmaya karşılık gelen 2515 MJ / ton klinker olarak hesaplanmıştır. Carnot Grand Kompozit Eğrisi analiz edilerek atık ısı değerlendirme potansiyeli belirlenmiştir. Bu değer, 218 MJ / tonluk bir ekserji değerine karşılık gelen 311 MJ / ton klinker atık ısı mevcudiyetini göstermektedir. Rankine döngüleri için % 50 ekserji verimliliği varsayarsak, ortaya çıkan elektrik üretim potansiyeli 109 MJ / ton klinker olarak bulunmuştur (Mian, vd., 2013).

Antoni yaptığı çalışmada, yüksek miktarda kalsine edilmiş kil ve kireç taşı eklenerek Portland çimentosu üzerine etkileri araştırmıştır. Böyle üçlü karışımların, daha ekolojik ve ekonomik bağlayıcılar haline gelebileceği vurgulanmıştır. Bu yeni karışımların dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. STADIUM ® multi iyonik taşınım modeli, materyallerin özelliklerine başarıyla uyarlanmıştır. 7 ve 28 günlerde elde edilen iyi basınç dayanımları, karboalüminat fazlarının sinerjik oluşumu ve gözenek arıtımı ile açıklanmıştır. Metakaolinden gelen alüminatlar kireçtaşı ve kalsiyum hidroksitten karbonatlarla birlikte reaksiyona girdiği ve bu durumun termodinamik hesaplamalar ile doğrulanabileceği açıklanmıştır. Sinerjetik reaksiyonun, sülfat içeriğini dikkatli bir şekilde ayarlayarak ve çimentonun alkali içeriğini kontrol ederek optimize edilebileceği

de belirtilmiştir. Çimento % 60'a varan oranlarda saf metakaolin ve kireçtaşı gibi katkıların eklenmesiyle, kabul edilebilir basınç dayanımları olan yapılar elde edilebileceği belirtilmiştir. Yaklaşık % 50 kaolinit içeriğine sahip doğal killeri ile, çimento mukavemeti önemli ölçüde değiştirilmeden yeni ürünler elde edilebileceği söylenmiştir (Antoni, 2013).

Kol ve arkadaşları, Birla çimento fabrikası Satna için ekserji analizi, ekserji dengesi ve ekserji verimliliği çalışmışlardır. Burada, sistem performansında verim kaybına neden olacak tersinmezlikler ve kayıpların dağılımını değerlendirmek için çimento fabrikasının ayrıntılı bir ekserji analizi yapılmıştır. Birla çimento fabrikası, yıllık toplam çalışma saatlerinin 8760 saatini 1.49 Mt klinker üretmek için harcamaktadır. Sürecin ortalama gerçek çalışma verilerine dayanarak, ön ısıtıcı, döner fırın, döner soğutucu ve tüm süreç etrafında ekserji dengeleri kurulmuştur. Temel enerji tüketiminin ön ısıtıcı ve döner soğutucuda gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu ekipmanlardan yüksek sıcaklıkta ve yoğun miktarda ısı çıkışı olduğu belirlenmiştir. Atık ısı geri kazanımı ve türbin çalışmalarındaki ekserji, akış sıcaklığına göre, entalpi 2778.1 kJ / kg ve 2643.7 kJ / kg olarak hesaplanmıştır. İki ana kaybı engellemek için atık ısı geri dönüşüm sistemleri önerilmiştir. Bu öneriye göre yapılan hesaplamalar, 22.65 MW / gün şeklinde elektrik talebinin azaldığını göstermiştir (Kol ve Chaube, 2013).

Koroneos ve arkadaşları, Yunanistan'daki çimento üretimini ekserji analiz metodolojisi kullanılarak incelemişlerdir. Analiz, çimento üretim sürecinin her aşamasında enerji ve ekserji girdilerinin değerlendirilmesini içermektedir. Burada sunulan çalışmada Yunanistan'ın Selanik kentinde bulunan Yunan çimento üretim tesisinin bir üretim modeli oluşturulmuştur. Büyük miktarda atık ısının geri kazanılmasına rağmen ekserji miktarının % 50'sinin kaybedildiği tespit edilmiştir (Koroneos, vd., 2005)

Jijesh ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada amaç, enerji geri kazanımı için olasılıkları belirlemek ve gerekli olan ayrıntılı bilgileri ortaya çıkarmak için farklı bileşenlerin enerji tüketimini ve enerji analizini doğru bir şekilde sağlamaktır. İşlemin ortalama fiili çalışma verilerine dayanarak, ön ısıtıcı, döner fırın ve soğutucunun etrafında enerji ve ekserji dengeleri ele alınmıştır. Ekserji verimliliğinin her zaman enerji verimliliğinden daha az olacağı ve burada sistemdeki tersinmezlikler nedeniyle

azalmanın yaklaşık % 16.25 olduğu belirtilmiştir. Ön ısıtıcı çıkış gazlarının ve soğutucu çıkış gazlarının enerjisinin kullanılması ile, proses performansını arttırmak için iyi bir potansiyel oluşturulacağı söylenmiştir (Jijesh, 2015).

Fidan, yeni tipteki öğütme sistemlerinden COMFLEX® öğütme sistemi, Roller Press ve HOROMILL®'in aynı çimento üretim tesisi ve bu tesisin hammaddelerini kullanarak karşılaştırmalı değerlendirmelerinin yapılmasını amaçlamıştır. Burada ekonomik yönden de öğütme sistemleri kıyaslanmıştır. Bu kapsamda, CEM I 42,5 R tipi çimentonun sabit 3600 ( $\pm 100$ ) cm<sup>2</sup>/gram yüzey alanı değeri ile üç farklı öğütme sistemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Kırma ve tane boyu küçültmede Roller Press sisteminin etkinliği ve bilyalı değirmenin yüksek öğütme performansı sonucunda kapasitenin artması ve düşük özgül enerji sarfıyatı COMFLEX® öğütme sisteminin başarısını göstermiştir. Enerji tüketimin azaltılması ile elde edilen erken dayanım etkinliği için Roller Press devresinin daha başarılı olduğu belirtilmiştir. Fakat bu devre yüksek oranda suya ihtiyaç duyması ve erken priz süreleri ile dezavantajlarını ortaya koymuştur. Yüksek sirkülasyon ve verimli separasyon sistemi ile HOROMILL®, ürün separasyonu ve ayırım keskinliği açısından öne çıkmıştır. Fakat yüksek birim enerji sarfıyatı ve düşük öğütme kapasitesi dezavantajları olarak belirtilmiştir (Fidan, 2011).

Söğüt ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, bir kuru tip üretim yapan çimento prosesi için farin değirmeni üzerinde termoekonomik analizler açıklanmıştır. Isıl sistemler için geliştirilen bir eksergoekonomik yöntem bir çimento prosesine uygulanmıştır. Burada değirmene giren ve çıkan madde miktarları, sıcaklıklar, ısı kapasiteleri, kütleli akış hızları gibi değerler kullanılmıştır. Çimento üretim prosesinin bir haftalık verileri kullanılarak yapılan çalışmada, enerji ve ekserji verimleri sırasıyla ortalama olarak %82.9 ve %18.44 olarak belirlenmiştir. Farinin maliyeti 0.00708-0.01078 \$/kg olarak hesaplanmıştır (Söğüt, vd., 2010).

Price, Çin' de bir çimento fabrikasında bir yeni süspansiyon ön ısıtıcı döner fırın veya dikey şaft fırını kullanan klinker üretim sisteminde ana enerji kullanımı veya kaybı için detay analizi yapmıştır. Bu değerlendirme sırasında toplanan verilerin analizine dayanarak, kömür kullanımında azalmaya ve gaz kirleticilerinin sistemden yayılmasında azalmaya yol açabilecek öneriler de yapılmıştır. Buradaki temel eylemler; kömür yakıcılarında aşırı hava kullanımını azaltmak, sistemdeki hava sızıntısını, basıncın

kontrol edilmesi ve / veya havanın sisteme sızdığı açıklıkların veya boşlukların ortadan kaldırılması yoluyla azaltılmak ve fırında geliştirilmiş yalıtım ve refrakter kullanımı olarak belirlenmiştir. Bu eylemler gerçekleştirildiğinde net kömür tüketiminin 119 kg / ton kg klinker' den 103 kg / ton klinkere düşeceği diğer bir ifadeyle kömür kullanımında % 13.4'lük bir azalma oldacağı belirtilmiştir. Kullanılan kömürün maliyeti açısından yapılan hesaplamalarda ise yılda 11.52 million RMB tasarruf edileceği belirlenmiştir (Price, 2012).

Ashrafizadeh ve arkadaşları, çimento üretim prosesinin çevresel ve ekserjetik fonksiyonlarının üzerinde sekonder bir brülörün yardımıyla sıcaklık gradyen dağılımının etkisini araştırmışlardır. Bu nedenle, çimento üretiminin yakma sistemi (fırın ve ön ısıtıcı) dört termal alanda simüle edilmiştir. 2.000, 2.300 ve 2.600 ton / gün kapasiteli üç çimento üretim hattı araştırılmıştır. Yakıt enjeksiyonu oranı ikincil brülöre, her bir hat için yüzde 10 ila 40 arasında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, siklon ön ısıtıcıları için, sekonder brülöre yakıt enjeksiyonunun, fırın yakma bölgesinde alit oluşumu (2.200 oC) için gerekli minimum sıcaklığa ulaşan bir orana kadar yakıt enjeksiyonunun uygun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, şaft ön ısıtıcıları için, sekonder brülöre % 15 ila 20 enjeksiyon yakıtı için optimum bir oran mevcuttur. Son olarak, sekonder brülör uygulamasının ekserji kayıplarını yaklaşık % 25 azaltabileceği, bu da klinker üretiminin her tonu için yılda yaklaşık 35000 metreküp sera gazlarının miktarının azalmasına yol açabileceği gösterilmiştir (Ashrafizadeh, vd., 2012).

Zhang' ın yaptığı çalışmada, çimento üretiminde fosil yakıtlar yerine alternatif yakıtların kullanımının enerji, çevre ve sera gazı üzerine etkilerinin enerjinin kantitatif analizi ile gösterilmesidir. Bu çalışmalar Amerika Birleşik Devletleri ve Meksika' da bulunan iki tesis içi yapılmıştır. Sonuçlar alternatif yakıtların kullanımının çevresel ve enerji yönünden alternatifler sağlandığını göstermiştir. ABD çimento endüstrisinde alternatif yakıtların kullanımı, 1993 yılında 28 milyon GJ'den 2011 yılında 58 milyon GJ'ye çıktığı belirtilmiştir. Çimento endüstrisinde kullanılan alternatif yakıtlardan birinin, parçalanmış geri dönüştürülmemiş plastik ve kağıt karışımı olduğu ve "Engineered Fuel" (EF) olarak adlandırıldığından söz edilmiştir. EF, biyogenik malzemeler içerdiğinden, kullanımı çimento üretiminden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmaya yardımcı olduğu söylenmiştir. EF' nin toplam atıktan-enerji

kapasitesini artırdığı da vurgulanmıştır. Bu nedenlerden dolayı, ABD çimento endüstrisinde kullanılabilir maksimum EF miktarı (67 milyon ton çimento) 14,6 milyon ton olarak tahmin edilmiştir. Çimento fırınlarında bu miktarda EF üretilcek ve kullanılacaksa, ABD'nin atıktan-enerji kapasitesi, 29.2 ton kadar etkili bir şekilde artacağı, yani, şu anki ABD atıktan-enerji kapasitesinin % 110'u, 26.6 milyon ton kadar artırılacağı belirtilmiştir (Zhang ve Themelis, 2013).



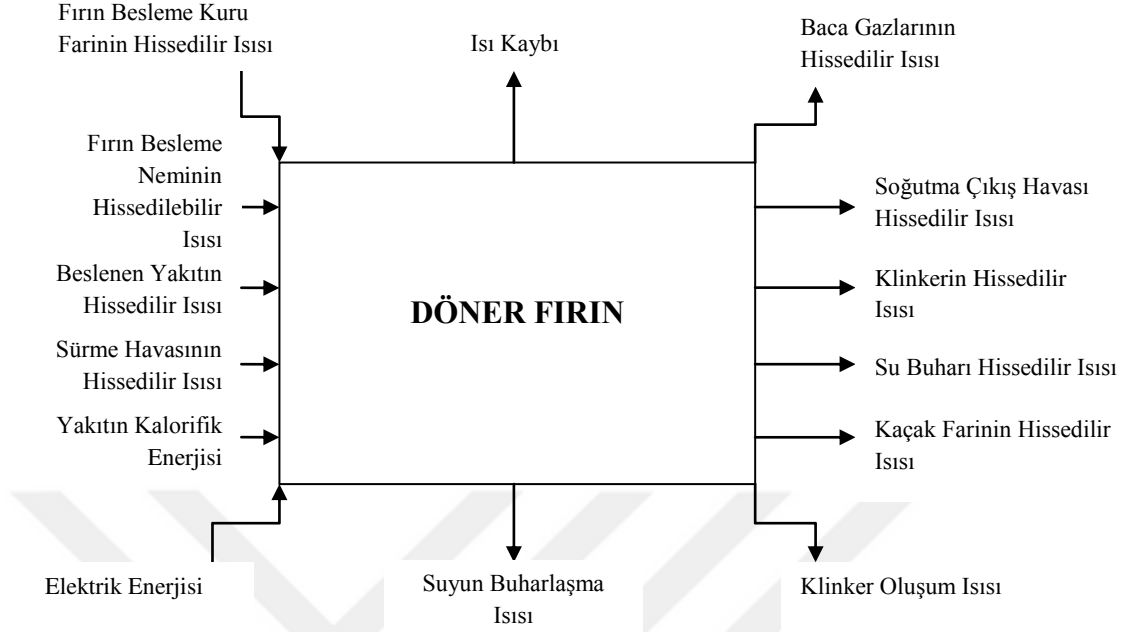
## 5.MATERYAL VE METOTLAR

Çalışma kapsamında bir çimento fabrikasının döner fırın ünitesine ait kütle, sıcaklık ve güç gibi verileri ile döner fırın üzerinde kütle, enerji ve ekserji çalışmaları yapılmıştır.

### 5.1. Döner Fırın Kütle, Enerji, Ekserji ve Performans Analizi

Bir termodinamik sistemin analizini yapmak için belli kurallara uymak gerekmektedir. Bu kurallar aşağıda verilmiştir.

- Öncelikle sistemin içeriğini ve çalışma prensibini anlamak ve buna göre uygulanacak olan materyali ve yöntemi belirlemek.
- Uygun çalışma sistemini yani sistemin açık veya kapalı olduğunu belirlemek.
- Eğer sistem açık bir sistem ise sistemin termodinamik çeşidini belirlemek.
- Kontrol hacmini veya kütlelerini belirlemek.
- Akış diyagramını çizmek.
- Sistemin sınırlarını belirleyip, uygun kabuller yapmak.
- Referans ortamını belirlemek.
- Sistemin çalışma şartlarını belirlemek.
- Sisteme etkisi olan parametreleri belirlemek.
- Sistemde kullanılacak olan tablo ve birimleri belirlemek.
- Sistemin kütle, iş ve ısı etkileşimini belirlemek.
- Genel termodinamik denge bağıntıları, kütle, enerji ve ekserji denkliklerini yazmak.
- Mümkünse ölçümleri yapıp, kullanılacak grafik ve tablo değerlerini belirlemek.
- Sistemin ekserji ve enerji büyüklüklerini hesaplayıp, ekserji ve enerji bant diyagramlarını çizmek.
- Sonuçları kontrol etmek, değerlendirmek, yorumlamak ve uygulamaya koymaktır (Ustaoglu, 2011).



Şekil 5.1. Döner fırın akış şeması.

#### 5.1.1. Döner fırın kütle analizi

Üzerinde çalışılan döner fırına giren maddeler ve çıkan maddeler için kütle dengesi incelenmiştir. Giren ve çıkan maddeler için fabrikadan alınan değerler hacimsel akış hızı olarak  $\text{Nm}^3/\text{h}$  birimindedir. Bu değerler için belirli dönüşümler yapılarak gerçek kütle debileri elde edilmiştir.

#### 5.1.2. Döner fırın enerji analizi

Termodinamiğin birinci yasasına göre, incelediğimiz döner fırın sistemi sürekli akış halindeki kapalı bir sistem olarak değerlendirilmiştir. Bu durumda enerjinin korunumu ilkesi; birim zamanda ısı veya iş olarak döner fırın bölümünün sınırlarını geçen toplam enerji ile birim zamanda kütle ile birlikte döner fırın bölümünden çıkan toplam enerji arasındaki fark birim zamanda kütle ile birlikte döner fırın bölümüne giren toplam enerjiye eşittir şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadenin matematiksel hali (Eşitlik 5.1):

$$Q - W = \sum m_{\dot{c}} Q_{\dot{c}} - \sum m_{\dot{g}} Q_{\dot{g}} \quad (5.1)$$



Burada  $Q$  akış işini de içeren akışkanın toplam enerjisidir. Toplam enerji entalpi, kinetik enerji ve potansiyel enerjinin toplamı olduğundan, bu;

$$Q = h + ke + pe \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilir. Böylece enerjinin korunumu ilkesi;

$$Q - W = \sum m_{\dot{c}}(h_{\dot{c}} + v_{\dot{c}}/2 + gz_{\dot{c}}) - \sum m_g(h_g + v_g/2 + gz_g) \quad (5.3)$$

şeklini alır. Döner fırın için yapılan enerji dengesinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Sisteme dışarıdan ısı verilmemektedir.
- Döner fırın bölümü sürekli akış halindedir. Bölüme giren ve çıkan maddelerin kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.
- Döner fırının dönmesini sağlayan elektrik enerjisi analize iş olarak dahil edilmiştir.
- Bölümü oluşturan diğer ünitelerin bağlantı ve boru hatlarındaki kayıplar ihmal edilmiştir (Söğüt 2005).

Bu koşullarda sistemin enerji dengesi için aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$\sum m_g h_g + W = \sum m_{\dot{c}} h_{\dot{c}} + \sum Q_{kayıp} \quad (5.4)$$

### 5.1.3. Döner fırın enerji verimliliği

Döner fırın enerji verimi, çıkan maddelerin toplam enerjisinin giren maddelerin toplam enerjisine oranı olarak tanımlamak mümkündür. Bunun formülse ifadesi;

$$\eta_I = \sum \frac{m_{\dot{c}} \cdot Q_{\dot{c}}}{m_g \cdot Q_g} \quad (5.5)$$

### 5.1.4. Döner fırın ekserji analizi

Döner fırın bölümünün ekserji analizi fiziksel ve kimyasal ekserjiden oluşmaktadır. Kimyasal ekserji hesaplamalarda ihmal edilmiştir ve oluşan fiziksel

ekserji transferinde üç yol vardır. Ekserji transferinde iş, ısı ilişkisi ve kütle akışı ile ortak ekserji belirlenmektedir. Döner fırın bölümü ekserji transferinde potansiyel ve kinetik ekserjiler önemsizdir. Bu durumda ekserji dengesi;

$$E_{giren} = E_{çıkan} + E_{kayıp} \quad (5.6)$$

$$E_{gph} = E_{çph} + E_{kayıp} \quad (5.7)$$

$E_{ph}$  = Fiziksel ekserji

$$E_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5.8)$$

$(h - h_0)$  = Maddelerin çevreye bağlı entalpi farkı

$(s - s_0)$  = Maddelerin çevreye bağlı entropi farkı

$T_0$  = Çevre sıcaklığı

Döner fırını sürekli akış halindeki kapalı bir sistem olarak değerlendirdiğimizde termodinamiğin ikinci yasasına göre ekserji verimliliği için öncelikle çevrenin tanımlanması gerekir. Bu bölüm için çevre parametreleri  $T_0 = 283$  K ve referans basıncı  $P_0 = 1$  atm' dir.

#### 5.1.5. Döner fırın ekserji verimliliği

Döner fırın ekserji verimi, çıkan maddelerin toplam ekserjisinin giren maddelerin toplam ekserjisine oranı olarak tanımlamak mümkündür. Bunun formüsel ifadesi;

$$\eta = \sum \frac{E_c}{E_g} \quad (5.9)$$

#### 5.1.6. Döner fırın performans parametreleri

Yapılan hesaplamalar ile elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki performans parametreleri hesaplanmıştır.

Ekserji verilerine göre yakıt ekserjisi tükenme oranı, verimlilik eksillliği oranı ve ekserjik iyileştirme potansiyeli hesaplanmıştır.

Yakıt ekserjisi tükenme oranı, bileşenin ekserji tüketiminin yakıt ekserjisi girişine oranı olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\alpha_k = \frac{Ex_{C,k}}{Ex_{TF}} \quad (5.10)$$

Verimlilik eksikliği oranı, bileşenin ekserji tüketiminin çıktıların toplam ekserjisine oranı şeklinde belirtilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$X_k = \frac{Ex_{C,k}}{Ex_{UP}} \quad (5.11)$$

Ekserji tüketimi en az olduğunda ekserji verimliliğinde maksimum iyileştirme sağlanabilir. Ekserjik iyileştirme potansiyeli aşağıdaki formülle verilir:

$$ExIP_k = (1 - \psi)Ex_{C,k} \quad (5.12)$$

Yukarıdaki ekserjik performans parametrelerine benzer şekilde enerji terimleri ile de bu parametreler ifade edilebilir. Enerji verilerine göre yakıt enerjisi tükenme oranı, verimlilik eksikliği oranı ve enerji iyileştirme potansiyeli hesaplanmıştır.

Yakıt enerjisi tükenme oranı :

$$\Phi_k = \frac{E_{L,k}}{E_{TF}} \quad (5.13)$$

Verimlilik eksikliği oranı :

$$\Omega_k = \frac{E_{L,k}}{E_{UP}} \quad (5.14)$$

Enerji iyileştirme potansiyeli :

$$EIP_k = (1 - \eta)E_{L,k} \quad (5.15)$$

## 6.BULGULAR

### 6.1. Döner Fırın Kütle Analizi

Döner fırına giren maddelerin kütle dengesi aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.1).

**Çizelge 6.1.** Döner fırına giren kütle tablosu.

| <b><u>GİREN KÜTLE</u></b>  |                 |                |             |
|----------------------------|-----------------|----------------|-------------|
| Fırın Besleme (Kuru Farin) | $m_{kurufarin}$ | 232.650        | kg/h        |
| Farin İçindeki Nem         | $m_{fnem}$      | 2.350          | kg/h        |
| Kömür                      | $m_{kömür}$     | 17.820         | kg/h        |
| Kömür Nemi                 | $m_{knem}$      | 180            | kg/h        |
| Sürme Havası               | $m_{sürme}$     | 24.594         | kg/h        |
| Yakma Havası               | $m_{yakma}$     | 349.749        | kg/h        |
| Kaçak Hava                 | $m_{khava}$     | 17.695         | kg/h        |
| <b>TOPLAM</b>              |                 | <b>645.037</b> | <b>kg/h</b> |

Döner fırında elde edilen, çıkan maddelerin kütle dengesi aşağıda verilmiştir (Çizelge 6.2).

**Çizelge 6.2.** Döner fırından çıkan kütle tablosu.

| <b><u>ÇIKAN KÜTLE</u></b>            |                  |                |             |
|--------------------------------------|------------------|----------------|-------------|
| Kaçak Farin (kuru)                   | $m_{kaçakfarin}$ | 9.213          | kg/h        |
| Buharlaştan Su (Kömür+Farin)         | $m_{buhar}$      | 2.530          | kg/h        |
| Üretilen Klinker                     | $m_{klinker}$    | 144.453        | kg/h        |
| Elektrofiltreye ve Kömüre Giden Hava | $m_{sçıkış}$     | 180.046        | kg/h        |
| Kömür Külü                           | $m_{kül}$        | 2.205          | kg/h        |
| Yanma Gazları                        | $m_{yanma}$      | 306.591        | kg/h        |
| <b>TOPLAM</b>                        |                  | <b>645.037</b> | <b>kg/h</b> |

|                                    |          |             |
|------------------------------------|----------|-------------|
| <b>GİREN KÜTLE - ÇIKAN KÜTLE =</b> | <b>0</b> | <b>kg/h</b> |
|------------------------------------|----------|-------------|

## 6.2. Döner Fırın Enerji Analizi

Döner fırına giren kütlelere ve sıcaklık değerlerine elde edilen giriş enerjileri Çizelge 6.3' te verilmiştir



**Çizelge 6.3.** Döner fırına ait giriş enerjileri.

| DÖNER FIRINA GİREN ENERJİLER    |                                             |                      |                |                                 |           |                           |
|---------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|----------------|---------------------------------|-----------|---------------------------|
| Sıra No                         | Madde Adı                                   | Kütlesel Debi (kg/h) | $C_P$ (Kj/kgK) | $T_0$ (K)                       | $T_s$ (K) | $Q = mC_P\Delta T$ (kJ/h) |
| 1                               | Fırın Besleme Kuru Farinin Hissedilir Isısı | 235.000              | 0,2320         | 283                             | 333       | 2.726.000                 |
| 2                               | Fırın Besleme Neminin Hissedilebilir Isısı  | 2.350                | 0,2120         | 283                             | 333       | 24.910                    |
| 3                               | Beslenen Yakıtın Hissedilir Isısı           | 18.000               | 0,2815         | 283                             | 323       | 202.680                   |
| 4                               | Sürme Havaasının Hissedilir Isısı           | 24.594               | 0,2375         | 283                             | 293       | 58.411                    |
| Sisteme Yakıt İle Enerji Geçışı |                                             | Kütlesel Debi (kg/h) |                | Yakıt Kalorifik Değeri(kcal/kg) |           | $Q$ (kJ/h)                |
| 5                               | Yakıtın Kalorifik Enerjisi                  | 18.000               |                | 6.456                           |           | 486.330.480               |
| Sisteme İş İle Enerji Girişi    |                                             | Motorun Gücü (kW)    |                | kW x 3.600 = kJ/h               |           | $Q$ (kJ/h)                |
| 6                               | Elektrik Enerjisi                           | 190                  |                | 3.600                           |           | 684.000                   |
| TOPLAM                          |                                             | 490.026.481          |                |                                 |           |                           |

Döner fırından çıkan enerji değerleri Çizelge 6.4' te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Döner fırına ait çıkış enerjileri.

| DÖNER FIRINDAN ÇIKAN ENERJİLER  |                                        |                                |                      |                                  |           |             |                           |
|---------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------|-------------|---------------------------|
| Sıra No                         | Madde Adı                              | Madde Bileşeni                 | Kütlesel Debi (kg/h) | $C_p$ (Kj/kgK)                   | $T_0$ (K) | $T_s$ (K)   | $Q = mC_p\Delta T$ (kJ/h) |
| 1                               | Baca Gazlarının Hissedilir Isısı       | CO <sub>2</sub>                | 130.464              | 0,2310                           | 283       | 613         | 9.945.299                 |
|                                 |                                        | H <sub>2</sub> O               | 8.100                | 0,4590                           | 283       | 613         | 1.226.907                 |
|                                 |                                        | SO <sub>2</sub>                | 180                  | 0,1660                           | 283       | 613         | 9.860                     |
|                                 |                                        | NO <sub>2</sub>                | 591                  | 0,2410                           | 283       | 613         | 47.036                    |
|                                 |                                        | N <sub>2</sub>                 | 162.598              | 0,2510                           | 283       | 613         | 13.467.956                |
|                                 |                                        | O <sub>2</sub>                 | 4.658                | 0,2290                           | 283       | 613         | 351.976                   |
|                                 |                                        | TOPLAM                         |                      |                                  |           |             | 25.049.035                |
| 2                               | Soğutma Çıkış Havaısı Hissedilir Isısı | N <sub>2</sub>                 | 138.095              | 0,2510                           | 283       | 604         | 11.126.452                |
|                                 |                                        | O <sub>2</sub>                 | 41.951               | 0,2290                           | 283       | 604         | 3.083.776                 |
|                                 |                                        | TOPLAM                         |                      |                                  |           |             | 14.210.228                |
| 3                               | Klinkerin Hissedilir Isısı             |                                | 146.658              | 0,1900                           | 283       | 400         | 3.260.207                 |
| 4                               | Su Buharı Hissedilir Isısı             |                                | 2.530                | 0,4590                           | 283       | 613         | 383.219                   |
| 5                               | Kaçak Farinin Hissedilir Isısı         |                                | 9.213                | 0,2360                           | 283       | 613         | 717.508                   |
| Klinker Oluşum Isısı            |                                        | Kütlesel Debi (kg/h)           |                      | $Q_{oluşum}$ (kJ/kg)             |           | $Q$ (kJ/h)  |                           |
| 6                               | Klinker Oluşum Isısı                   | 146.658                        |                      | 1.749,4                          |           | 256.563.505 |                           |
| Suyun Buharlaşma Isısı          |                                        | Kütlesel Debi (kg/h)           |                      | Suyun Buharlaşma Isısı (kcal/kg) |           | $Q$ (kJ/h)  |                           |
| 7                               | Suyun Buharlaşma Isısı                 | 2530                           |                      | 540                              |           | 5.717.547   |                           |
| Sistemden Isı İle Enerji Çıkışı |                                        | $Q_{giren} - Q_{çıkan}$ (kJ/h) |                      |                                  |           |             | $Q$ (kJ/h)                |
| 8                               | Isı Kaybı                              |                                |                      |                                  |           |             | 184.125.231               |
| TOPLAM                          |                                        | 490.026.481                    |                      |                                  |           |             |                           |

### 6.3. Döner Fırın Enerji Verimliliği

Enerji analiz değerlerine göre döner fırın enerji verimi;

Döner fırın giren enerji değeri : 490.026.481 kJ / h

Döner fırın çıkan enerji değeri : 305.901.250 kJ / h

$$\eta_1 = \sum \frac{m_{\zeta} \cdot Q_{\zeta}}{m_g \cdot Q_g} = \frac{305.901.250}{490.026.481} = 0,62 \quad (6.1)$$

### 6.4. Döner Fırın Ekserji Analizi

Döner fırına giren ekserji değerleri Çizelge 6.5' te verilmiştir.



Çizelge 6.5. Döner fırına giren ekserji.

| DÖNER FIRINA GİREN EKSERJİ |                                             |                                        |                                          |           |           |                                             |                                                   |                                                   |
|----------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|-----------|-----------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Sıra No                    | Madde Adı                                   | Kütleli Debi (kg/h)                    | $C_p$ (Kj/kgK)                           | $T_0$ (K) | $T_s$ (K) | Entalpi (kJ/h)<br>$\Delta H = mC_p\Delta T$ | Entropi (kJ/kgK)<br>$\Delta S = mC_p\ln(T_s/T_0)$ | Ekserji (kJ/h)<br>$Ex = \Delta H - (T_0\Delta S)$ |
| 1                          | Fırın Besleme Kuru Farinin Hissedilir Isısı | 235.000                                | 0,2320                                   | 283       | 333       | 2.726.000                                   | 8.870,16                                          | 215.743,67                                        |
| 2                          | Fırın Besleme Neminin Hissedilebilir Isısı  | 2.350                                  | 0,2120                                   | 283       | 333       | 24.910                                      | 81,05                                             | 1.971,45                                          |
| 3                          | Beslenen Yakıtın Hissedilir Isısı           | 18.000                                 | 0,2815                                   | 283       | 323       | 202.680                                     | 669,88                                            | 13.102,58                                         |
| 4                          | Sürme Havaının Hissedilir Isısı             | 24.594                                 | 0,2375                                   | 283       | 293       | 58.410,75                                   | 202,84                                            | 1.008,31                                          |
| 5                          | Yakıtın Ekserjisi                           | 18.000                                 | $E_y = mH_u\omega = 18000*27746*1,06315$ |           |           |                                             |                                                   | 530.966.878,20                                    |
| 6                          | Elektrik Ekserjisi                          | Elektrik Ekserjisi = Elektrik Enerjisi |                                          |           |           |                                             |                                                   | 684.000,00                                        |
| TOPLAM                     |                                             | 531.882.704,21                         |                                          |           |           |                                             |                                                   |                                                   |

Döner fırından çıkan ekserji değerleri Çizelge 6.6' da verilmiştir.

**Çizelge 6.6.** Döner fırından çıkan ekserji.

| DÖNER FIRINDAN ÇIKAN EKSERJİ |                                        |                                                                        |                     |                |           |           |                                             |                                                    |                                                   |
|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------|-----------|-----------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Sıra No                      | Madde Adı                              | Madde Bileşeni                                                         | Kütleli Debi (kg/h) | $C_p$ (Kj/kgK) | $T_0$ (K) | $T_s$ (K) | Entalpi (kJ/h)<br>$\Delta H = mC_p\Delta T$ | Entropi (kJ/kgK)<br>$\Delta S = mC_p \ln(T_s/T_0)$ | Ekserji (kJ/h)<br>$Ex = \Delta H - (T_0\Delta S)$ |
| 1                            | Baca Gazlarının Hissedilir Isısı       | CO <sub>2</sub>                                                        | 130.464             | 0,2310         | 283       | 613       | 9.945.298,53                                | 23.293,64                                          | 3.353.198,90                                      |
|                              |                                        | H <sub>2</sub> O                                                       | 8.100               | 0,4590         | 283       | 613       | 1.226.907,00                                | 2.873,63                                           | 413.669,15                                        |
|                              |                                        | SO <sub>2</sub>                                                        | 180                 | 0,1660         | 283       | 613       | 9.860,40                                    | 23,09                                              | 3.324,57                                          |
|                              |                                        | NO <sub>2</sub>                                                        | 591                 | 0,2410         | 283       | 613       | 47.036,31                                   | 110,17                                             | 15.858,96                                         |
|                              |                                        | N <sub>2</sub>                                                         | 162.598             | 0,2510         | 283       | 613       | 13.467.956,30                               | 31.544,32                                          | 4.540.913,08                                      |
|                              |                                        | O <sub>2</sub>                                                         | 4.658               | 0,2290         | 283       | 613       | 351.976,08                                  | 824,39                                             | 118.673,74                                        |
|                              |                                        | TOPLAM                                                                 |                     |                |           |           |                                             |                                                    | 8.445.638,42                                      |
| 2                            | Soğutma Çıkış Havaısı Hissedilir Isısı | N <sub>2</sub>                                                         | 138.095             | 0,2510         | 283       | 604       | 11.126.452,25                               | 26.278,09                                          | 3.689.752,50                                      |
|                              |                                        | O <sub>2</sub>                                                         | 41.951              | 0,2290         | 283       | 604       | 3.083.776,06                                | 7.283,16                                           | 1.022.641,37                                      |
|                              |                                        | TOPLAM                                                                 |                     |                |           |           |                                             |                                                    | 4.712.393,87                                      |
| 3                            | Klinkerin Hissedilir Isısı             |                                                                        | 146.658             | 0,1900         | 283       | 400       | 3.260.207,34                                | 9.641,79                                           | 531.581,13                                        |
| 4                            | Su Buharı Hissedilir Isısı             |                                                                        | 2.530               | 0,4590         | 283       | 613       | 383.219,10                                  | 897,57                                             | 129.207,77                                        |
| 5                            | Kaçak Farinin Hissedilir Isısı         |                                                                        | 9.213               | 0,2360         | 283       | 613       | 717.508,44                                  | 1.680,53                                           | 241.918,18                                        |
| 6                            | Klinker Oluşum Isısı                   | $Ex_{loss} = Q_{loss}(1 - T_0/T_{loss}) = 256.563.505 (1 - 283 / 400)$ |                     |                |           |           |                                             |                                                    | 76.969.051,50                                     |
| 7                            | Isı Kaybı                              | $Ex_{loss} = Q_{loss}(1 - T_0/T_{loss}) = 184.125.231 (1 - 283 / 613)$ |                     |                |           |           |                                             |                                                    | 99.427.624,74                                     |
| 8                            | Suyun Buharlaşıma Isısı                | $Ex_{loss} = Q_{loss}(1 - T_0/T_{loss}) = 5.717.547 (1 - 283 / 373)$   |                     |                |           |           |                                             |                                                    | 1.372.211,28                                      |
| TOPLAM                       |                                        |                                                                        |                     |                |           |           |                                             |                                                    | 191.829.626,89                                    |

### 6.5. Döner Fırın Ekserji Verimliliği

Ekserji analiz değerlerine göre döner fırın ekserji verimi;

$$\eta = \sum \frac{E_c}{E_g} = \frac{191.829.626,89}{531.882.704,21} = 0,36 \quad (6.2)$$

### 6.6. Döner Fırın Performans Parametreleri

Ekserji verilerine göre ;

Yakıt ekserjisi tükenme oranı :

$$\alpha_k = \frac{Ex_{C,k}}{Ex_{TF}} = \frac{531.882.704,21 - 191.829.626,89}{530.966.878,20} = 0,64 \quad (6.3)$$

Verimlilik eksikliği oranı :

$$X_k = \frac{Ex_{C,k}}{Ex_{UP}} = \frac{531.882.704,21 - 191.829.626,89}{191.829.626,89} = 1,77 \quad (6.4)$$

Ekserjik iyileştirme potansiyeli :

$$E_x IP_k = (1 - \psi) Ex_{C,k} = ((1 - 0,36) \times (531.882.704,21 - 191.829.626,89)) / 3600 = 60,453.88 \text{ kW} \quad (6.5)$$

Enerji verilerine göre ;

Yakıt enerjisi tükenme oranı :

$$\Phi_k = \frac{E_{L,k}}{E_{TF}} = \frac{184.125.231}{486.330.480} = 0,38 \quad (6.6)$$

Verimlilik eksikliği oranı :

$$\Omega_k = \frac{E_{L,k}}{E_{UP}} = \frac{184.125.231}{490.026.481} = 0,37 \quad (6.7)$$

Enerji iyileştirme potansiyeli :

$$EIP_k = (1 - \eta) E_{L,k} = ((1 - 0,62) \times 184.125.231) / 3600 = 19.435,44 \text{ kW} \quad (6.8)$$

## 7.TARTIŞMA

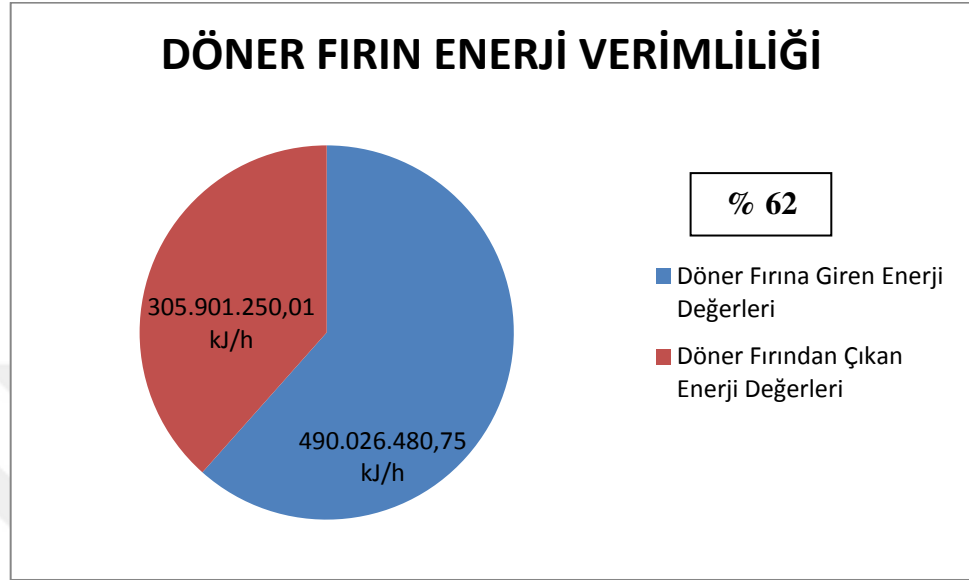
Enerji tüketimi konusunda en büyük pay sanayi sektörüne aittir. Sanayi sektöründe de en çok enerji tüketen sektörlerin başında çimento sektörü gelmektedir. Ayrıca hızla gelişen sanayileşmeden dolayı çimento sektörüne artan talep, bu sektördeki enerji tüketiminin daha da artmasına sebep olmuştur. Bu kadar fazla enerji tüketiminin olduğu çimento sektöründe haliyle enerjinin etkin kullanımı büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle bu çalışmada bir çimento fabrikasında yer alan ve çimento fabrikasında tüketilen enerjinin en büyük sebebi olan döner fırın bölümü incelenmiştir.

Döner fırının enerjii ne kadar etkin kullanıp, kullanmadığı da enerji ve ekserji analizleriyle hesaplanmıştır. Döner fırın enerji analizi sonucunda, enerji verimi % 62, ekserji analizi sonucunda, ekserji verimi % 36 olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlar göz önüne alınarak enerjinin ne kadar verimli kullanıldığı hakkında bilgi sahibi olunabilir ve verimi arttırmak amacı ile sistemde düzenlemeler yapılmasına olanak sağlanabilir. Bu nedenle enerjinin yoğun olarak kullanıldığı bu proseste termodinamik analizlerin yapılması oldukça büyük bir önem arz etmektedir.

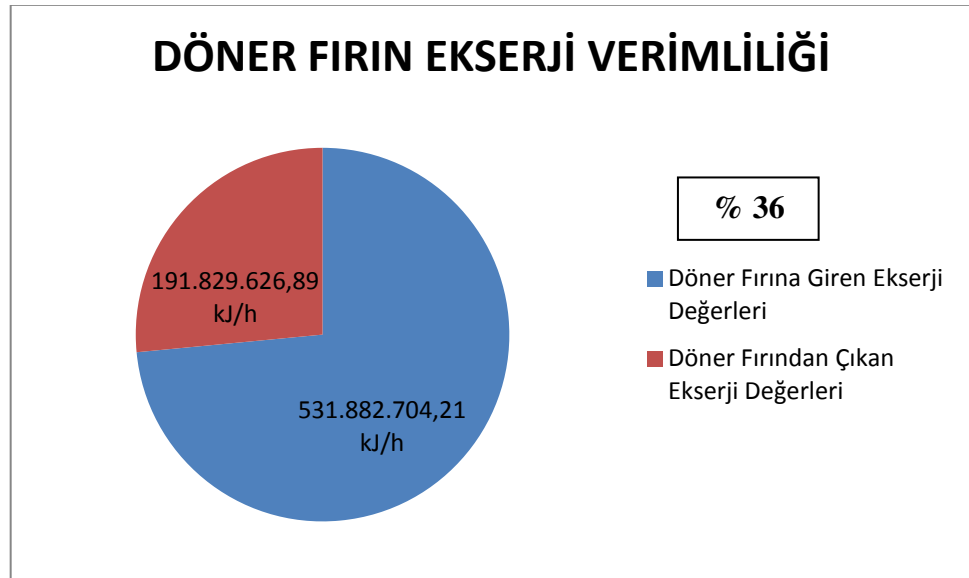
## 8.SONUÇ

Bu çalışmada çimento fabrikalarında yer alan döner fırının enerji analizleri yapılmış olup, bu analizler sonucunda;



**Şekil 8.1.** Döner fırın enerji verimliliği.

Bu çalışmada çimento fabrikalarında yer alan döner fırının ekserji analizleri yapılmış olup, bu analizler sonucunda;



**Şekil 8.2.** Döner fırın ekserji verimliliği.

Yapılan enerji hesaplamaları sonucunda ilgili döner fırın için;

- Yakıt enerjisi tükenme oranı 0,38,
- Verimlilik eksikliği oranı 0,37,
- Enerji iyileştirme potansiyeli 19.435,44 kW

olarak hesaplanmıştır.

Ekserji hesaplamaları sonucunda ise bu değerler;

- Yakıt ekserjisi tükenme oranı 0,64,
- Verimlilik eksikliği oranı 1,77,
- Ekserjik iyileştirme potansiyeli 60.453,88 kW

olarak bulunmuştur.

Bu sonuçlar ve fabrikanın durumu göz önüne alındığında enerji ve ekserji verimlerinin artırılabilmesi için :

- Çimento fabrikalarında görülen en büyük sıkıntı olan sızdırmazlığın tam anlamıyla sağlanması gerekmektedir. Çünkü sızdırmazlık tam anlamıyla sağlanmadığı takdirde dışarı sürekli olarak kaçak hava ve farin sızıntısı gerçekleşmekte bu da verimi düşürmektedir.
- Döner fırın içerisine beslenen farin ve kömürün formüllerde belirtilen oranlarda beslenmesi için farin ve kömür besleme sistemlerinin kalibrasyon ayarları sürekli olarak kontrol etmek gerekir. Aksi takdirde enerji düzenliliği sağlanamaz.
- Döner fırın içerisine beslenen kömürün özelliklerine dikkat edilip, yanma verimliliği yüksek kömürler tercih edilmelidir.

Bu çalışma ve genel olarak çimento fabrikaları değerlendirildiğinde aşağıdaki öneriler yapılmıştır.

- Enerjinin bu kadar fazla kullanılıp, maliyetin bu kadar yüksek olduğu çimento sektöründe, enerji kullanımını azaltmak ve maliyeti düşürmek amacı ile öncelikle etkin bir enerji yönetimi oluşturulmalıdır.
- Enerji yönetimi, verimlilik analizlerini sürekli yapmalıdır. Bu analizlere göre sistem kontrol edilip enerji ve ekserji verimini artırabilmek için sürekli olarak gerekli olan onarım işlemleri ve üretim geliştirme işlemleri yapılmalıdır.



## KAYNAKLAR

- Altinkaynak, M., "Çimento fabrikalarında kullanılan döner fırının termodinamik analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta (2013).
- Antoni, M., "Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone", Doktora Tezi, *École polytechnique fédérale de lausanne*, Suisse, (2013).
- As-beton. Portland Çimentosunun Joseph Aspdin Tarafından İcadı ve Çimento Üretiminde Aspdin Ailesinin Rolü. 2017. As-beton Intl.: [www.as-beton.com/pdf/portland\\_cimentosunun\\_icadi.pdf](http://www.as-beton.com/pdf/portland_cimentosunun_icadi.pdf), (Erişim Tarihi:14.12.2017).
- Ashrafizadeh, S. A., Amidpour, M., and Allahverdi, A., "Exergetic and environmental performance improvement in cement production process by driving force distribution", *Korean Journal of Chemical Engineering*, 29: 606-13 (2012).
- Baticim. Çimento Bilgileri. 2018. Baticim Intl.: [http://www.baticim.com.tr/?page=sizin\\_icin\\_bilgiler&sp=cimento\\_bilgileri&id=3](http://www.baticim.com.tr/?page=sizin_icin_bilgiler&sp=cimento_bilgileri&id=3), (Erişim Tarihi:5.04.2018).
- Berry, M., Cross, D. and Stephens, J., "Changing the environment: an alternative "Green" concrete produced without Portland cement", *Proc., World of Coal Ash Conf.*, Lexington, KY, USA (2009).
- Cembureau. The role of cement in the 2050 low carbon economy. 2018. Cembureau Intl.: [https://cembureau.eu/media/1500/cembureau\\_2050roadmap\\_lowcarboneconomy\\_2013-09-01.pdf](https://cembureau.eu/media/1500/cembureau_2050roadmap_lowcarboneconomy_2013-09-01.pdf), (Erişim Tarihi:22.02.2018).
- CSGB. "Çimento Üretim Süreçlerindeki İş Sağlığı ve Güvenliği Risklerinin Tespiti ve Çözüm Önerileri." 2016. CSGB Intl.: <https://www.cs.gb.gov.tr/media/5006/arifeduygutopcu.pdf>, (Erişim Tarihi:19.04.2018).
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., "Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik", Taner Derbentli, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul (2008).
- Daloğlu, Ş., "Endüstriyel enerji verimliliği metodolojisi ve çimento sektöründe uygulaması ", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2007.
- Dogaka. "TR63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu 2015. Dogaka Intl.:" [http://www.dogaka.gov.tr/Icerik/Dosya/www.dogaka.gov.tr\\_626\\_KN2F58CG\\_cimento-Sektor-Raporu-2015.pdf](http://www.dogaka.gov.tr/Icerik/Dosya/www.dogaka.gov.tr_626_KN2F58CG_cimento-Sektor-Raporu-2015.pdf), (Erişim Tarihi:20.12.2017).
- Fidan, B., "A comparative analysis of the recent cement grinding systems with particle-based influences on cement properties", Yüksek Lisans Tezi, *Middle East Technical University The Graduate School Of Natural And Applied Sciences*, Ankara (2011).



- Filiz, Ç., "Bir buhar kazanının enerji ve ekserji analizi yoluyla performansının değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük (2012).
- Ifc. "Improving thermal and electric energy efficiency at cement plants: International Best Practice. 2017." Ifc Intl.: [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/51b456cd-1460-4f64-860a-ab4db6b87602/Elect\\_Engry\\_Effic\\_Cement\\_05+23.pdf?MOD=AJPERES](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/51b456cd-1460-4f64-860a-ab4db6b87602/Elect_Engry_Effic_Cement_05+23.pdf?MOD=AJPERES), (Erişim Tarihi:16.03.2018).
- Jijesh, V. P., Shifin, Y., Jithin, K. J., Rahul, C. R., Jeshin, J. P and Leo, A. J., "Energy and exergy analysis in a cement plant", **International Journal of Science, Engineering and Technology Research**, 4:677-679 (2015).
- Kandilci, H. G., "Çimento sektöründe ekserji analizi yaparak enerji verimliliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2013).
- Kaplan, H. and Binici, H., "Tras ve trasli çimentolar", **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 1: 121-27 (1995).
- Karakaş, F., "Çimento hammaddelerinin öğütülmesinde enerji optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2006).
- Karçimsa. Çimentonun Tarihçesi. 2018. Karçimsa Intl.: [www.karcimsa.com.tr/Bilgi-Bankasi/Cimentonun-Tarihcesi](http://www.karcimsa.com.tr/Bilgi-Bankasi/Cimentonun-Tarihcesi), (Erişim Tarihi:10.12.2017).
- Kocakaya, F., "Karo fabrikası atığının çimento üretiminde kullanılabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2016).
- Kol, S. and Chaube. A., "Exergy analysis of Birla cement plant Satna: A case study", **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 4: 312-20 (2013).
- Koroneos, C., Roumbas, G. and Moussiopoulos, N., "Exergy analysis of cement production", **International Journal of Exergy**, 2: 55-68 (2005).
- Kuleli, Ö., "Çimento Mühendisliği El Kitabı", **Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği**, Ankara (2010).
- Madloul, N. A., Saidur, R. and Rahim, N. A., "Investigation of Waste Heat Recovery in Cement Industry: A Case Study", **International Journal of Engineering and Technology**, 4: 665 (2012).
- Maukit, S. and Murillo, M. Cement. 2018. Intl.: <http://slideplayer.com/slide/3919309/> (Erişim Tarihi:30.03.2018).
- Mian, A., Bendig, M., Piazzesi, G., Manente, G., Lazzaretto, A. and Maréchal, F., "Energy Integration in the cement industry", **Computer Aided Chemical Engineering**, Lappeenranta, Finland (2013).

- MTA. Çimento Çeşitleri, Özellikleri, Hammaddeleri ve Üretim Aşamaları. 2018. MTA Intl.: [http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/kutuphane/ekonomi-bultenleri/2013\\_16/223.pdf](http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/kutuphane/ekonomi-bultenleri/2013_16/223.pdf), (Erişim Tarihi:17.03.2018).
- Nkfu. Çimento Nasıl Elde Edilir? Üretim Aşamaları. 2018. Nkfu Intl.: <http://www.nkfu.com/cimento-elde-edilir-uretim-asamaları/>, (04.06.2018).
- Norman, J. B., " Industrial energy use and improvement potential", Doktora Tezi, *University of Bath Department of Mechanical Engineering*, Bath, İngiltere (2013).
- Nzic. ChemProcesses. 2018. Nzic Intl.: <https://nzic.org.nz/ChemProcesses/inorganic/9B.pdf>, (Erişim Tarihi:12.03.2018).
- Bilgin, Ö., Koç, E., "Çimento üretim teknolojisinde kullanılan ana ekipmanlar", *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 4: 31-40 (2013).
- Özdenkoş, O., "Çimento fabrikalarında kalite ve çevre yönetimi sistemleri: Sektörde bir uygulama", *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2010).
- Price, L., Hasanbeigi, A. and Zhou, N., "Increasing Energy Efficiency and Reducing Emissions from China's Cement Kilns: Audit Report of Two Cement Plants in Shandong Province, China", *Berkeley Lab LBNL-5583E, USA* (2011).
- Rahman, A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K. and Sharma, S. C., "Assessment of Energy Performance and Emission Control Using Alternative Fuels in Cement Industry through a Process Model", *Energies*, 10: 1996 (2017).
- Savaş, A. F., "Paralel akışlı ön kalsinasyonlu çimento fabrikasında enerji ve ekserji analizi modellenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2004).
- Sencan, M., "850 Mw doğal gaz kobine çevrim santralinde ekserji ve enerji analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Düzce (2014).
- Sgm. 2018. Intl.: <https://sgm.sanayi.gov.tr/DokumanGetHandler.ashx?dokumanId=812cc0ae-08b8-4d18-83f2-171e7760555f> (Erişim Tarihi:30.03.2018).
- Shodhganga. Division of Safety and Fire Engineering, School of Engineering. 2018. Shodhganga Intl.: [http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/26269/11/11\\_chapter%201.pdf](http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/26269/11/11_chapter%201.pdf), (Erişim Tarihi:17.03.2018).
- Song, D. and Chen, B., "Extended Exergy Accounting For Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions of Cement Industry—A Basic Framework", *Energy Procedia*, 88: 305-08 (2016).
- Söğüt, M. Z., "Çimento sektöründe döner fırın prosesinin eksergoekonomik optimizasyonu", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir (2009).

- Söğüt, Z., "Çimento fabrikasında enerji taraması ve üretim hattı ısı proseslerinde enerji ve ekserji analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir (2005).
- Söğüt, Z., Oktay, Z., Karakoç, H. and Yörü Y., "Kuru Tip Çimento Üretiminde Farin Değirmeninin Termoekonomik Analizi", **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, 30: 59-72 (2010).
- Şahin, A., "Gümüşhane meyve suyu fabrikası'nın enerji ve ekserji analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Erzurum (2014).
- Şahin, H., "Çimento üretiminde döner fırın prosesinin enerji, ekserji ve eksegoekonomik analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Van (2017).
- Şahin, M. H., "Çimento fabrikalarında elektrik enerjisi verimliliğinin artırılması: Konya Çimento Fabrikası örneği", Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya (2017).
- TCMA. Çimento Üretiminin Tarihçesi. 2009. TCMA Intl.: <http://www.tcma.org.tr/index.php?page=icerikgoster&menuID=50>, (Erişim Tarihi:08.12.2017).
- Tosun, F., "Çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak katı atıkların kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul (2006).
- Ustaoğlu, A., "Yaş yöntemle üretim yapan çimento fabrikasında enerji ve ekserji analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bartın (2011).
- Ünlü, N., "Tipik bir çimento fabrikası için enerji ve kullanılabilirlik analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü**, Gebze (2002).
- Vatandaş, S., "Sanayi fırınlarında enerji ve ekserji verimliliği; örnek çalışma emaye pişirme fırını verimlilik projesi enerji ve ekserji analizlerinin gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Düzce (2016).
- Worrell, E., Kermeli, K. and Galitsky, C., "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers.", **EPA-United States Environmental Protection Agency 430-R-13-009, USA** (2013).
- Yılbaş, Z., "Bir dizel motorun performansının ekserji analizi ile belirlenmesi", Bilim Uzmanlığı Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Zonguldak (2007).
- Yıldız, N. Klinker Üretimi. 2015. Intl.: <http://www.madencilik-turkiye.com/pdfler/mak-1436451207.pdf> (Erişim Tarihi:14.12.2017).

Zhang, J., "Energy, environmental and greenhouse gas effects of using alternative fuels in cement production", Yüksek Lisans Tezi, *Columbia University*, USA (2013).



## ÖZGEÇMİŞ



### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Onurhan UĞUR  
Doğum Yeri ve Tarihi : Altındağ 21.10.1991

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyetleri : Uğur, O., Yamık, H. “Investigation of Energy Usage in Cement Production Process by Performing Exergy Analysis”, International Congress on Engineering And Life Science, 26-29 Nisan 2018, Kastamonu.

### İş Deneyimi

Stajlar : 1. Ankara Makine Fabrikası, 30 Gün Atölye Stajı, 2012, Ankara.  
2. Makine Kimya Enstitüsü, 20 Gün İşletme Stajı, 2013, Ankara.

Projeler : -

Çalıştığı Kurumlar : -EMS Makine İnşaat ve Dış Tic. LTD.ŞTİ., 2016, Ankara.  
-Altınordu Treyler San. Tic. LTD.ŞTİ., 2016, Ankara.  
-VİBA Teknik Kalıp İnşaat Sanayi ve Ticaret LTD.ŞTİ., 2016-2018, Ankara.

### İletişim

Adres : Şehit Mesut Bilir Cad. Cici Apt. 13/4, Merkez/Bilecik  
E-Posta Adresi : onurhan05@hotmail.com

### Akademik Çalışmaları

Uğur, O., Yamık, H. “Investigation of Energy Usage in Cement Production Process by Performing Exergy Analysis”, International Congress on Engineering And Life Science, 26-29 Nisan 2018, Kastamonu.

**Yabancı Dil Bilgisi:** İngilizce