

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATIK ISI GERİ KAZANIM**  
**(WHR) SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK İNCELEMESİ**

**Gökhan TÜTÜNCÜ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Önder ÖZGENER**

**Güneş Enerjisi Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 625.05.01**

**Sunuş Tarihi : 05 Nisan 2012**

**Bornova-İZMİR**  
**2012**



Sayın Gökhan TÜTÜNCÜ tarafından YÜKSEK LİSANS tezi olarak sunulan “Çimento sektöründe atık ısı geri kazanım (WHR) sisteminin termodinamik incelemesi ” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 5/4/2012 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı**

: Doç. Dr. İnder Özener

**Raportör Üye**

: Doç. Dr. Erol Seker

**Üye**

: Prof. Dr. Nezzet Özbalta



**ÖZET****ÇİMENTO SEKTÖRÜNDE ATIK ISI GERİ KAZANIM ( WHR )  
SİSTEMİNİN TERMODİNAMİK İNCELEMESİ**

TÜTÜNCÜ, Gökhan

Yüksek Lisans Tezi, Güneş Enerjisi Enstitüsü Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Önder ÖZGENER

Nisan 2012, 78 sayfa

Son yıllarda enerji ve ekserji analizinin yeni projelerde uygulanması, sistemlerin ilk dizaynı ve ekonomik analizlerinin yapılması açısından önemli veriler sunmaktadır. Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi ve getirilen yorumlarla enerji kayıplarının yeri, büyüklüğü ve nedenleri saptanabilmekte, dolayısıyla sistemlerin verimleri arttırılabilmektedir.

Bu tezde çimento fabrikalarının bacalarından atılan ısı ile elektrik enerjisi üreten tesisin kullanılmasının sanayide enerji verimliliğine olan etkisinin değerlendirilmiştir. Bu proje ile çimento fabrikalarında WHR sisteminin enerji verimliliği üzerine olan etkisi ve bu sistemin termodinamik olarak incelenmesi, geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler atık ısı geri kazanım santrallerin kurulmasında ve işletilmesinde dizayn ve ekonomik açıdan önemli bir veri teşkil edecektir. Böylece günümüzde çok büyük önem teşkil eden enerji tasarrufu ve enerjinin en verimli şekilde kullanılması sağlanabilecektir.

**Anahtar sözcükler:** Sanayide enerji yönetimi, Atık ısı, WHR, Çimento endüstrisi



**ABSTRACT**

**THERMODYNAMICS ANALYSIS FOR WASTE HEAT  
RECOVERY (WHR) SYSTEMS IN A CEMENT INDUSTRY**

TÜTÜNCÜ, Gökhan

M.Sc in Solar Energy Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Önder ÖZGENER

April 2012, 78 pages

Recent years, energy and exergy analysis executed in a new project presents important data for construction primary design of plants and economical analysis. Results of analysis evaluate and interpretation of lost energy point, greatness and what for arranged due to system efficiencies can be increased.

In this thesis, chimneys of factories producing cement plant with the heat energy to evaluate the effect of the use of energy efficiency in cement industry. With this project, thermodynamic analysis of WHR system and the effect of energy efficiency aimed to be developed in a cement plant.

The results and evaluations are organized important data of design and economical for waste heat recovery plants construction and operation. Nowadays, energy saving and using high efficiently seams will be usually that is important.

**Keywords:** Energy efficiency for industry, Waste heat, WHR, Cement industry,



## **TEŞEKKÜR**

Bu çalışma süresince değerli görüşlerini ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Önder ÖZGENER'e, gerekli verilerin sağlanmasında kolaylık gösteren SİNOMA Enerji Ltd. şirketi çalışanlarına, özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen Batisöke Söke çimento TAŞ ye, tezin şekil almasında yardımlarını esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET .....	V
ABSTRACT .....	VI
TEŞEKKÜR .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	XII
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	3
3. DURUM ÇALIŞMASI .....	17
3.1. Çimento Üretim Sürecinde Enerji Kayıpları .....	17
3.2. WHR ile Çimento Üretim Proses İlişkisi .....	20
3.3 WHR Sisteminin Çalışma Prensipleri .....	23
3.4 WHR Sisteminin Ana Ekipmanları .....	27
3.4.1 Süspansiyonlu ön ısıtıcı (SP ) kazanı .....	27
3.4.2 Hava soğutmalı soğutucu (AQC) kazanı .....	31
3.4.3 Buhar türbini ve jeneratör .....	34
3.4.4 Kazan besleme suyu ve kimyasal su şartlandırma .....	36
3.4.5 Soğutma kulesi .....	38
4. ANALİZ .....	40
4.1 Sistemin Fizibilite Analizi .....	40
4.1.1 Genel ölçüm içeriği .....	41

**İÇİNDEKİLER (Devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.1.2 Debi ölçüm eşitlikleri .....	44
4.2 Enerji ve Ekserji Analizi .....	44
4.2.1 Analizde yapılan kabuller .....	45
4.2.2 Kütle, enerji, ekserji denge eşitlikleri .....	45
4.2.3 WHR sistemine termodinamik yaklaşım .....	49
4.3.3 Ölü hal .....	52
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....	53
5.1 Fizibilite Analizi ve Hammadde Rutubetine Göre Değişimi .....	53
5.2 Enerji ve Ekserji Analiz Sonuçları .....	62
5.3 Referans Sıcaklığın Etkisi .....	67
5.4 WHR Sisteminin Çevresel Sonuçları .....	70
6. DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER .....	72
7. KAYNAKLAR DİZİNİ .....	74

**ŞEKİLLER DİZİNİ**

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>3.1</b> WHR sisteminin çimento fabrikasına entegrasyonu .....	21
<b>3.2</b> Çimento fabrikası sistem kontrol görüntüsü .....	22
<b>3.3</b> WHR sisteminin şematik gösterimi .....	24
<b>3.4</b> WHR sistemi su-buhar döngüsü .....	25
<b>3.5</b> WHR sistemi sıcaklık entropi değişimi .....	26
<b>3.6</b> SP kazan serpantin boruları .....	29
<b>3.7</b> SP kazanı yapısal genel görünümü .....	30
<b>3.8</b> AQC kazanı montaj görünümü .....	33
<b>3.9</b> AQC kazanı yapısal görünümü .....	33
<b>3.10</b> Örnek türbin kanatları .....	34
<b>3.11</b> Su Akış Diyagramı .....	37
<b>3.12</b> İnşai tip soğutma kule dizaynı .....	39
<b>4.1</b> 1.Numune Alma Hatları 2. Numune Alma Düzlemi 3. Giriş Deliği 4. Akış 5.Baca Tepesi .....	41
<b>4.2</b> Çimento Fabrikası Farin Değirmeni Ölçüm Noktaları .....	42
<b>4.3</b> Klinker soğutma Bölgesi .....	43
<b>5.1</b> Döner fırın sıcak gaz dağılım şeması .....	60

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Şekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
5.2 Yaz mevsiminde gaz debisinin WHR sistemine etkisi .....	61
5.3 Kış mevsiminde gaz debisinin WHR sistemine etkisi .....	61
5.4 Referans sıcaklığın enerji verimliliğine etkisi .....	67
5.5 Referans sıcaklığın ekserji verimliliğine etkisi .....	68
5.6 SP kazanı giriş sıcaklığının ekserji kaybı ve verimine etkisi .....	69

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Türlerine Göre Atık Isı Enerji-Ekserji Değerleri .....	3
2.2 Sıcaklık Aralıklarına Göre Enerji-Ekserji Değerleri .....	4
2.3 Lengfurt-Almanya ‘da kurulu sistemin özellikleri .....	5
3.1 Örnek Çimento Fabrikası Enerji Tüketimi Bilgileri .....	18
3.2 Çimento fabrikasına ait ısıl verim örneği .....	19
3.3 SP kazanının teknik özellikleri .....	28
3.4 AQC Kazanının Teknik Özellikleri .....	32
3.5 Batisöke çimento WHR türbin ve kondenser özellikleri .....	35
4.1 Sistem ve elemanları için genel denge eşitlikleri, ilgili verim eşitlikleri ve diğer termodinamik açıklamalar .....	51
5.1 Abgaz fanı emiş borusunda yapılan ölçümler .....	53
5.2 Farin Değirmeni Sıcak Gaz Borusunda Yapılan Ölçümler .....	54
5.3 Kömür Değirmeni Sıcak Gaz Borusunda Yapılan Ölçümler .....	54
5.4 Klinker Soğutma Giriş Borusunda Yapılan Ölçümler .....	55
5.5 Soğutma bölgesi elektrofiltre girişi sıcak gaz değerleri .....	55
5.6 Abgaz fan emiş borusundaki gaz değerleri .....	56
5.7 Abgaz fan emiş borusundaki sıcak gazın bileşenleri .....	56
5.8 Farin değirmeni sıcak gaz borusundaki gaz değerleri .....	57

**ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>5.9</b> Çimento Hattı Sıcak Gaz Kurutma Gazı Paylaşımı .....	58
<b>5.10</b> En iyi çalışma durumu ile üretilen buhar ve elde edilen güç tablosu .....	59
<b>5.11</b> WHR sisteminin enerji akış diyagramı .....	63
<b>5.12</b> WHR sisteminin ekserji akış diyagramı .....	63
<b>5.13</b> WHR' nin ekserji analiz sonuçları .....	64
<b>5.14</b> WHR sıcak gaz ekserji analiz sonuçları .....	65
<b>5.15</b> Enerji, ekserji ve termodinamik faktör değerleri .....	66

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
C	özgül ısı (kJ/kgK)
$\dot{E}$	Enerji Akımı (kW)
$\dot{E}_x$	ekserji akımı (kW)
f	faktör (-)
F	Boru kesit alanı (m <sup>2</sup> )
h	özgül entalpi (kJ/kg)
IP	iyileştirme potansiyeli akımı (kW)
$\dot{I}$	tersinmezlik akımı (kW)
$\dot{m}$	kütleli debi (kg/s)
n	Ölçüm Sayısı (-)
$K_d$	Pitot Tüpü Katsayısı (-)
$P_0$	Ortam Basıncı (Pa)
$\Delta P_{PJ}$	Ortalama Dinamik Basınç (Pa)
$\Delta P_n$	Dinamik Basınç (Pa)
Q	ısı miktarı (kJ/kg)
$\dot{Q}$	ısı akımı (kW)
$\rho_t$	Gaz yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
s	özgül entropi (kJ/kgK)
T	Gaz sıcaklığı (K)
$T_0$	ortam sıcaklığı (K)
V	Gerçek gaz debisi (m <sup>3</sup> /h)
$V_0$	Standart gaz debisi (Nm <sup>3</sup> /h)
$\dot{w}$	güç (kW)

**SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)****Simgeler****Açıklamalar****Yunan harfleri**

$\eta$	verim (-)
$\psi$	özgül ekserji (kJ/kg)
$\varepsilon$	ekserji verimi (-)
$\xi$	verimsizlik oranı (-)
$\chi$	bağıl tersinmezlik (-)
$\omega_{pj}$	Ortalama Hız (m/s)

**Alt indis**

0	ölü hal
bp	besleme pompası
ç	çıkış
çg	çıkan gaz
eks	ekserji kaybı
g	giriş
kar	karışım
kond	kondenser
kp	kondenser pompası
min	minimum
maks	maksimum
pmp	pompa
sg	soğutucu gazı
sgk	soğuk
sis	sistem
tür	türbin

**SİMGELER VE KISALTMALAR (devam)****Simgeler****Açıklamalar**

mk

mekanik

ik

izentropik

p

basınç

**Üst indis**

Fİ

fiziksel

Kİ

kimyasal

KN

kinetik

PT

potansiyel

**Kısaltmalar**

WHR

Atık ısı geri kazanımı (waste heat recovery)

kts

Düzeltilme katsayısı

kl

Klinker

NCB

Uluslararası çimento ve yapı malzemeleri birliği

ORÇ

Organik rankin çevrimi

NSP

Yeni süspansiyonlu ön ısıtıcı

SP

Süspansiyonlu ön ısıtıcı

AQC

Hava soğutmalı soğutucu



## 1-GİRİŞ

Günümüzde global rekabet, ekonomik ve sosyal gelişmelere paralel olarak toplumların enerji ihtiyacı da sürekli olarak artmaktadır. Artan enerji ihtiyacı ve enerji maliyetlerinin gün geçtikçe yükselişi, toplumların alternatif enerji kaynaklarına yönelmesine yol açmıştır.

Atık ısıdan elektrik üretim santrali (kısaca WHR) sistemi yakıt olarak bacadan atmosfere salınan sıcak gazları kullanan diğer bir deyişle ücretsiz yakıtı olan son derece ekonomik bir elektrik üretim yöntemidir (Karrahe, 2009). Türkiye için çok yeni olan bu sistemin uygulanması ile ilgili ilk somut adım, 2009 yılı sonunda atılmış ve bir çimento fabrikasında uygulamaya yönelik çalışma fiilen başlatılmıştır.

Bu çalışmada ağır sanayi içinde belki de en yoğun enerji tüketimine sahip olan çimento fabrikalarının mevcut sistemindeki bacalardan atılan sıcak gaz kullanılarak bazı özel ekipmanlarla bu gazdan elektrik üretimi gerçekleştirilen sistemlerin termodinamik verimlerini değerlendirildi. Ayrıca çimento üretim sisteminden çok WHR sistemine odaklanıldı ve sistemin termodinamik verimliliğinin değerlendirilmesi yapıldı.

Literatürde çimento sektörüne yönelik çok sayıda çalışmayla karşılaşılmasına rağmen atık ısıdan elektrik üretimi üzerine sınırlı sayıda çalışma vardır.

Bu tezde, literatürden farklı olarak çimento fabrikalarında kurulan veya kurulması düşünülen atık ısı enerji santrallerinin termodinamik performanslarının değerlendirmeye yönelik örnek bir durum çalışması ele alınmıştır.

Ele alınan durum çalışması, Çin devlet firmalarından SINOMA enerji şirketi tarafından Ege bölgesi çimento üreticilerinden BATISÖKE Çimento T.A.Ş nin ikinci klinker üretim hattına uygulanması planlanmaktadır. Uygulanacak olan bu projenin dizayn bilgileri doğrultusunda enerji ve ekserji analizleri hakkında değerlendirmeler yapıldı ve sistemin en uygun çalışma koşulları enerji ve ekserji analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

Ülkemizdeki mevcut çimento fabrikaları göz önünde bulundurulduğunda WHR sistemlerinin kullanımıyla toplam 420 MW elektriksel güç üretilmesinin ön görülmektedir. Bu sistemlerin devreye girmesiyle birlikte işletme enerji verimliliğinin iyileştirilmesi yanı sıra, CO<sub>2</sub> salınımlarının azalmasından dolayı yoldan katkıda bulunabilecektir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Lopez et al.(1998), yayınladıkları teorik çalışmada İspanya'nın Bask bölgesindeki sanayi kuruluşlarından elde ettiği dataları kullanarak çeşitli sektörlerdeki atık ısıya ait enerji ve ekserji analizi uygulamışlardır. Makalede, enerji ve ekserji arasındaki farklılığının çok önemli olduğunu ve sistem verimliliğinde artış potansiyelinin maksimum değeri üzerinde durmuşlar, ekserji analizin ile sistemin maksimum verimlilik değerini teorik olarak hesaplanabileceğini dile getirmişlerdir.

Lopez'e göre çalışma için Bask bölgesinde enerji tüketimi açısından önemli bir paya sahip olan bir çimento fabrikasına yer vermişler ve çimento fabrikasında yaklaşık enerji tüketiminin %80' ini sıvı yakıt, geri kalan %20' sini de katı yakıt ve elektrik kaynaklı olduğundan bahsetmişlerdir. Yayınladıkları teorik çalışmada öncelikle üretimdeki kütle analizini yapmışlar örneğin; analizde 1 tonluk çimento üretimi için içinde %10' u su olan 1335 kg'lık ham maddenin sisteme girdiğini öğütme ve kurutma işleminden sonra 1226 kg' a düştüğünü, kalsinasyon prosesinden sonra ise 930 kg lık klinker (yarı mamül) üretildiğini şekillendirmişler bu safhalarda çimento ton başına 133 kWh elektrik, 3908,3 GJ' lük yakıtın harcandığını ve atık ısı olarak klinker, soğutma havası, sıcak gaz, su buharının sırasıyla, 0,221 GJ; 0,501 GJ; 0,184 GJ; 0,342 GJ enerji ürettiğini tespit etmişlerdir.

**Çizelge 2.1** Türlerine Göre Atık Isı Enerji-Ekserji Değerleri (L.Lopez et al.,1997)

TİPİ	ENERJİ		EKSERJİ	
	GJ	%	GJ	%
Duyulur Isı	231 614	15	68 970	13
Gaz	636 154	40	236 128	47
Hava	280 436	18	109 683	22
Su Buharı	433 800	27	89 619	18
Toplam	1 582 004	100	504 400	100

**Çizelge 2.2** Sıcaklık Aralıklarına Göre Enerji-Ekserji Değerleri (L.Lopez et al.,1997)

SICAKLIK ARALIKLARI	ENERJİ		EKSERJİ	
	GJ	%	GJ	%
473 < T < 673	61 195	4	33 774	7
393 < T < 473	916 590	58	345 811	68
353 < T < 393	604 219	38	124 815	25
<b>Toplam</b>	1 582 004	100	504 400	100

Yapılan çalışmada çimento sektörü ile ilgili Çizelge2.1 de hesaplanan atık ısının, düşük sıcaklık uygulamaları ile bu sektörün enerji ihtiyaçlarına cevap verebileceği sonucuna varmışlardır ( Lopez et al.,1997).

Akgün vd., (2000), TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği ile birlikte yapılan çalışmada optimize edilmiş bir çimento fabrikasında dahi ısı kayıplarının soğutma bacasında meydana geldiğinden, fabrikalarda atık ısı kazanımlarının farinin, kömürün veya hammaddenin kurutulmasında kullanıldığını fakat örnek verilen günlük 2000 ton kapasiteli fabrikada atılan ısı miktarının 262 kcal/kg klinker olarak tespit ettiklerini ve eğer kömürün kalorifik değerinin 5700 kcal olduğunu kabul edilirse atılan ısının ekonomik değerinin yıllık 1 ile 1,6 milyon dolar arasında değiştiğinin üzerinde durmuşlardır.

Yapılan çalışmada klasik buhar üretimi metotları ile atık ısıdan fayda sağlayan sistemlerin işletilmesinin zorluklarından bahsedilmiş bu konuda sıcaklığı ve debisi zamana bağlı değişkenlik gösteren sıcak gazın buhar türbinin işletilmesinde zorluklar göstereceğini açıklamışlar bu konuda ekonomizer kullanılmasını önermişlerdir.

Çalışmada kararlılığın sağlanamamasından dolayı düşük verimli küçük buhar türbinlerinin uygulanarak birim maliyetinin yükselmesi, sistemden sorumlu

personel maliyetleri, sistemin olası duruşlarda hızla devre dışına çıkarılması zorlukları, gibi nedenlerden dolayı klinker soğutucudaki atık ısıyı kullanan organik rankin çevrimi tasarlanmakta ve kullanılmaktadır.

**Çizelge 2.3** Lengfurt-Almanya 'da kurulu sistemin özellikleri ( Akgün vd., 2000)

<b>Tesis Verileri</b>	
Klinker Üretimi	1 000 000 Ton/yıl
Soğutma gazı debisi	150.000 Nm <sup>3</sup> /h
Soğutma gazı giriş/çıkış sıcaklığı	275/125 °C
<b>Kızgın Yağ Çevrimi</b>	
Debi	85 Ton/h
Giriş/Çıkış sıcaklığı	230/85 °C
<b>ORÇ Verileri</b>	
Elektrik üretim kapasitesi	1,5 MW
Buharlaştırıcı tipi	Borulu ve ceketli tip
Malzeme	Karbon çeliği
<b>Soğutma</b>	
Soğutucu Akışkan	Ortam havası
<b>Türbin</b>	
Üretici	Ormat
Tipi	Darbeli yüke uygun özel dizayn
Devir Sayısı	3015 rpm
<b>Jeneratör</b>	
Güç	1,5 MW
Gerilim	690 Volt / 50 Hz / 3 faz
Devir sayısı	3015 rpm
Akışkan	Hidrokarbon (Pentane)
İşletme	Gözetimsiz, Tam otomasyon
İlave Faydaları	CO <sub>2</sub> emisyonda yıllık 7000 ton azaltma
Teslim süresi	25 hafta
Devreye Alma	3 hafta
<b>Maliyet</b>	1 800 000 USD
<b>Üretilen Elektrik Maliyeti</b>	2-4 cent/kWh

Verilen değerler (Bkz. Çizelge 2.4) organik rankin çevrimine aittir. Bu sistemin haricinde Japon Sumimoto çimento fabrikası dört tip atık gazdan güç üretim sistemi geliştirmiştir.

Bunlar;

- 1) NSP : Yeni süspansiyon şeklinde ön ısıtmalı,
- 2) AQC : Hava soğutmalı soğutucu,
- 3) AQC : Çift geçişli güç üretim sistemi,
- 4) NSP : Kömür yanmalı güç üretim sistemi,

Sonuç olarak, atık gaz güç üretim sistemleri Sumimoto çimento fabrikasında başarıyla uygulanmakta ve şirket raporlarına göre bu sistemlerin enerji tasarrufuna etkisi umulanın çok üstünde gerçekleşmektedir (Akgün vd., 2000).

NCB (Uluslararası Çimento ve Yapı Malzemeleri Birliği 2000), tarafından Hindistan'da konu ile ilgili teknik rapor yayınlamıştır. Bu raporda kuru tip çimento üretim hatlarında toplam giren ısının yaklaşık %40' ı atık ısı olarak ön ısıtıcı ve klinker soğutucudan atılmakta olduğundan bahsedilmiştir. Bu atık ısının kojenerasyon teknolojisi, tesisin elektrik harcamasının yaklaşık %25-30 unu karşılayacağını ayrıca CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasında önemli rol oynayacağı açıklamıştır. Çalışmada NCB yaklaşık yirmi çimento fabrikasında 3,0 ile 5,5 MW güçteki farklı enerji santrallerinden bir tablo oluşturmuşlardır. Bu tabloda okuyucular farklı tipteki ön ısıtıcı ve soğutuculardan çıkan, dolayısıyla sıcaklık-debi özellikleri farklı olan atık gazların bu tesis ile ne kadar enerji üretebildiklerini rahatça görebilmektedir.

NCB' ye göre karbondioksit salınımı ile ilgili olarak 1 ton kalsiyum karbonatın, kalsiyum oksit ve karbondioksite dönüşmesinden 0,44 ton karbondioksitin buna ek olarak kullanılan kömüre bağlı olarak bir ton kömürün yanmasıyla 2,2 ton karbondioksit salınımı yapıldığının üzerinde durmuşlardır. Bu nedenle Hindistan çimento endüstrisinde 160 MW' lık bir kojenerasyon tesis kapasitesinin olduğunu düşünürsek yaklaşık yıllık 1,5 milyon ton CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltacağı öngörülmüştür.

Çalışmada sistemin ana ekipmanları olan buhar jeneratörlerine, kondenser çeşitlerine değinilmiştir. Çimento fabrikasının zor koşullarına ve ısı kaynağı olarak kullanılan sıcak gazın içeriğinde bulunan yapışkan, aşındırıcı özellikteki toz yüzünden sistem üreticileri zaman içinde ekipmanlar üzerinde verim artırıcı çalışmalarda bulunmuş ve bu konuda çalışmaların sürekliliğinin altı çizilmiştir.

NCB günümüzde atık ısı santral çeşitleri olarak su-amonyak karışımının kullanıldığı sistemler olan Kalina çevriminden ve Organik Rankin çevrimlerinden kısaca bahsetmiştir. Bu sistemlerin çeşidine bağlı olarak geri ödeme süreleri yaklaşık 3 yıl olarak belirlenmiştir (NCB, 2000).

Khurana et al. (2002), teknoloji enstitüsünden araştırmacılar yayınladıkları makalede Hindistan sanayisinde toplam enerji harcamalarının %26' sını çimento endüstrisinin oluşturduğunu ve çimento sanayisinde kullanılan enerjinin %25' inin elektrik kalan kısmın ısı enerjisi olduğu vurgulanarak çalışmaya başlanmıştır. Hindistan'da enerji tüketimi açısından en iyi fabrikada 3,06 GJ/t çimento harcadığına dikkat çekmişler, bu yüksek enerji tüketim farklılıklarını; sert ham maddeye ve kötü kalitedeki yakıt kullanılmasına bağlamışlardır.

Khurana çalışmalarında, örnek tesisin enerji analizini gerçekleştirmek ve atık ısı santrali kapasite öngörüsünde bulunmak istemişlerdir. Bunun için Mahiar çimento fabrikasının sistem tanıtımı ve veri kaynakları ile çalışmaya başlamışlardır. Kömür ve klinker gibi maddelerin içeriklerini araştırmışlar, kimyasal reaksiyonlarını ve enerji analizini Sankey diyagramını çizerek göstermişlerdir. Çalışmanın son safhasında mevcut sisteme ek olarak atık ısı santralini tasarlamışlardır. Sonuç olarak; yıllık 1 Mt çimento üretim kapasiteli tesiste Sankey diyagramına göre ön ısıtıcı ve kalsinasyon birimlerindeki verimlilik yüksek çıkmıştır. Tesisin ortalama termal verimliliği % 50 ve giren ısının % 35 i atık ısı olarak bulunmuştur. Atık ısı kaynağından yaklaşık 4,4 MW gücünde enerji üretilebildiğini ki bu enerjinin tesisin toplan enerji ihtiyacının % 30' u olduğunu halen Hindistan'da yaklaşık 450 MW lık bir potansiyel bulunduğuna dikkat çekmişlerdir (Khurana et al.,2001).

Engin and Arı (2005), yayınladıkları çalışmalarında çimento fabrikalarında üretilen nihai ürün (çimento) için ton başına 4 GJ enerji harcadığını, teorik olarak baktığımızda ton başına yarı mamül (klinker olarak adlandırılır) üretimi için minimum 1,6 GJ' lük bir ısıya gerek duyulduğunu bununla birlikte teknolojik açıdan yeni kurulan fabrikalarda ton başına ortalama özgül enerji tüketiminin 2,95

GJ civarında iken bazı ülkelerdeki çimento fabrikalarında bu tüketiminin 5 GJ/ton değerine ulaştığına dikkat çekmiştir.

Araştırmacılar teorik çalışmalarının yanında Türkiye'nin doğusunda yer alan Van çimento fabrikasında döner fırın ve sistemlerini incelemiş ve hesaplarında kullanmak üzere bazı verilerden faydalanmıştır.

Van çimento fırın çapı 3,6 metre, uzunluğu 50 metre, günlük kapasitesi 600 ton klinker olan döner fırını olan fabrikada ton klinker başına 3,68 GJ enerji tüketilmekte olduğunu dile getirmişler ve sistemi kontrol hacimde termodinamik olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar fiziksel özellikler ve eşitlikler için, Peray'ın el kitabından faydalanmışlar referans sıcaklıklarını 0 °C almışlardır.

Çalışmanın WHR ile ilgili kısmında;

➤ **Ön ısıtıcı gaz içeriği**

% 70,8 N<sub>2</sub> , %27,4 CO<sub>2</sub> ve %1,8 O<sub>2</sub>kabul edilmiş ,

➤ **Fırın çıkış gaz debisi;**

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\zeta g} c_{\zeta g} T_{\zeta g} \quad (1)$$

➤ **Soğutucu çıkış gaz debisi;**

$$\dot{Q} = \dot{m}_{sg} h_{sg} \quad (2)$$

➤ **Klinker çıkışı gaz debisi;**

$$\dot{Q} = \dot{m}_{kl} h_{kl-110^{\circ}C} \quad (3)$$

gaz debi hesaplamalarında yukarıdaki eşitlikleri kullanmışlardır.

Van çimento fabrikasından alınan değerler;

- i. Ortalama fırın çıkış gaz sıcaklığı 315 °C;
- ii. Klinker soğutucu çıkış gaz sıcaklığı 215 °C;

Bu değerleri göz önünde bulundurularak WHRGS jeneratörün kullanılabilir enerjisini;

$$\dot{Q}_{kullanull} = \left[ \dot{m}_{\zeta g} (h_{\zeta g1} - h_{\zeta g2}) + \dot{m}_{hava} (h_{sg1} - h_{sg2}) \right] \times m_{kl} \quad (4)$$

formülünden hesapladıktan sonra jeneratör verimini % 85 olduğunu kabul etmişlerdir.

Sonuç olarak; yıllık  $8 \times 10^6$  kWh enerji üreteceklerini ekonomik yönden bakıldığında yıllık 560 000 dolar tasarruf edilebileceğini, yıllık bakım ve işçilik masrafları dahil projenin 17 ayda amortismanının tamamlanacağını öngörmüşlerdir (Engin and Arı, 2004).

Rasul et al., (2005), yayınladıkları çalışmada klinker üretimini dört farklı ana konuya ayırmışlar bunlar;

- a) Ön ısıtma,
- b) Ön kalsinasyon,
- c) Kalsinasyon
- d) Soğutma olarak belirlemişlerdir.

Çalışmalarında çimento üretim proses aşamalarının detaylarına değinmişlerdir. Endonezya ülkesindeki örnek çimento üretim tesisinde, klinker üretim sisteminin şematik olarak gösterilmesi ve bu şemaya bağlı olarak kütle ve enerji denge denklemleriyle sistemin termodinamik verimliliğini hesaplamışlardır. Maksimum kullanılabilir iş tayininde ekserji analizine başvurmuşlardır.

Örnek alınan çimento fabrikası için yapılan deneysel çalışmalarda tesisin kararlı bir durumda çalıştığını, sistem sınırı olarak fırın, ön ısıtıcı ve klinker soğutucunun alındığını, klinker üretiminin zamanla değişkenlik göstermediğini ve ısı dengesinin kabul edilebilir modifikasyonlar ile analiz edildiği kabul etmişlerdir.

Araştırmacılara göre birinci kanun ve ikinci kanun verimliliklerinin sırasıyla % 52,07 ve %57,02 olduğunu ve klinker soğutucu verimliliğinin ve ısı geri kazanım verimliliğinin sırasıyla %47,75 ve %51,2 olduğu hesaplanmıştır. Sistem tersinmezliklerin yaklaşık olarak % 20 olduğunu ve bu tersinmezliklerin kömürün termal enerjiye dönüşümü sırasında gerçekleştiğinin altını çizmişlerdir.

Çalışmalarında sonuç olarak; atık ısı enerji santralının yeni tesislere uygulanması ile enerji tüketimin, üretim maliyetlerinin azalacağını ve üretim kalitesinin gelişeceğini belirtmişlerdir (Rasul et al., 2005).

Mirolli (2007), makalesinde çimento üretim prosesinde sıcak gazın genel olarak iki kaynaktan sağlandığını bunların ön ısıtıcı (SP) ve klinker soğutucu (CC) olduğunu, atık ısı santrallerinde genellikle bu ısı kaynaklarından yararlandığını belirtmiştir. Bu iki ısı kaynağının sıcaklıklarının ve içeriğinin birbirinden farklı olduğunu ve genellikle SP kazanının farin kurutulması için gerekli olan sıcak gaz ile birebir ilişkide olduğunu, elektrik üretiminin ve farin kurutma işlemlerinin iyi bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini açıklamıştır. Çalışmasında atık ısı çevrimlerinden temel olarak su-amonyak karışımı ile çalışan çevrim çeşidinden diğer bir adıyla Kalina çevriminin üzerinde durmuştur. Çevrimde amonyak karışımli sıvı kullanmanın çevresel etkileri ile diğer sistemler arasındaki avantaj ve dezavantaj konularını ele almıştır (Mirolli\*, 2007).

Wang et al.,(2009), yayınladıkları teorik ve deneysel çalışmada, çimento fabrikasında giren enerjinin yaklaşık %40' nın klinker soğutucu , ön ısıtıcı bacası ve fırın mantosundan çevreye atılmakta olduğunu tespit etmişlerdir. Bu tespite göre bir çok çimento fabrikasında kullanılan dört farklı atık ısı değerlendirme sistemin çalışma koşullarını, sistem akış şemalarını üzerinde farklılıklarını dile getirmişlerdir.

Bu sistemleri ;

- a) Flaş Buharlı Sabit Basıncılı Çevrim
- b) Çift-basıncılı Buhar Çevrimi,
- c) Organik Rankin Çevrimi,
- d) Kalina Çevrimi olarak sınıflandırmışlardır.

Termodinamik hesaplamalarda sistem için aşağıdaki durumları kabul etmişlerdir.

Bunlar;

- i. Sistem kararlı bir durumda çalışmaktadır, borulardaki basınç düşümü ve ısı kaybı ihmal edilmiştir.
- ii. Sadece atık gaz ve buhar akışı için fiziksel ekserji kullanılmıştır

- iii. Sistem ana ekipmanlarının kimyasal ekserjisi ihmal edilmiştir.
- iv. Sistem ana ekipmanlarının kinetik ve potansiyel ekserjileri ihmal edilmiştir.

Ekserji verimliliğini,

$$\eta_{ex} = \left( \dot{E} x_g - \sum m_g \dot{I}_g \right) / \dot{E} x_g \quad (5)$$

Fiziksel ekserjisini,

$$\dot{E}_x = m \times \left[ (h_g - h_0) - T_0 (s_g - s_0) \right] \quad (6)$$

formüllerinden hesaplamışlardır.

Bu formüllerde  $T_0$ ,  $h_0$ ,  $s_0$  ifadeleri ölü durum (dead state) olarak referans parametreleri,  $\dot{E} x_g$ : giren ekserjiyi,  $\sum m_g \dot{I}_g$ : toplam ekserji kaybını ifade etmektedir. Bu sistemlerin her biri için yukarıdaki formüller ışığında ekserji verimlilik sonuçları elde edilmiştir.

Bu birbirinden farklı sistemlerin ekserji sonuçları genetik algoritma yöntemiyle değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Bilindiği gibi genetik algoritmalar problemlere tek bir çözüm üretmek yerine farklı çözümlerden oluşan bir çözüm kümesi üretir. Böylelikle, arama uzayında aynı anda birçok nokta değerlendirilmekte ve sonuçta bütünsel çözüme ulaşma olasılığı yükselmektedir. Çözüm kümesindeki çözümler birbirinden tamamen bağımsızdır. Her biri çok boyutlu uzay üzerinde bir vektördür.

**Çizelge 2.3** Farklı atık ısı sistemlerinin karşılaştırılması (Wang et al., 2008)

	<b>Flaş Buharlı Çevrim</b>	<b>Çift Buhar Basınçlı Çevrim</b>	<b>Organik Rankin Çevrimi</b>	<b>Kalina Çevrimi</b>
<b>Net Güç Çıkışı ( kW)</b>	10320	9982,8	8931,2	10957
<b>Ekserji Verimliliği ( % )</b>	42,3	40,9	36,6	44,9

Çizelge 2.3'de görüldüğü gibi, optimum parametrelerde yapılan değerlendirmelerde Kalina çevrimin diğer çevrimlere göre en iyi ekserji verimliliğine sahip olduğu ve buna ek olarak Kalina en iyi performansa sahip olduğu Organik Rankin Çevrimi (ORC) sisteminin en düşük ekserji sistemine sahip olduğu gösterilmiştir. ORC sisteminin düşük sınıftaki atık ısılarda kullanabileceğini bir çimento fabrikasında kullanılmasının uygun olmadığı görüşü sunulmuştur. Kalina çevrimi ise diğer çevrimlere oranla çimento fabrikalarında uygulandığında daha fazla elektrik üretilebileceği sonucuna varmışlardır.

Bu çalışma ile sistemlerin sadece termodinamik analizini değerlendirmesini yapmışlardır. Sonuç kısmında ise ekonomik olarak Kalina çevriminin kurulum maliyetinin diğer sistemlere göre fazla olduğunu fakat üreteceğiniz fazladan elektrik ve sistemin çalışma ömrünü dikkate aldığımızda, bu farkın dikkate alınmaması sonucunavarmışlardır (Wang et al., 2008).

Kabir et al.,(2010), yayınladıkları teorik çalışmada, çimento sektöründe enerji harcamalarının önemli bir yer tuttuğunu ve sektördeki enerji etüdü çalışmalarında bacalardan ve fırın mantosundan atılan ısının önemine değinmişlerdir. Çalışmada atık sıcak gazın ve döner fırın mantosundan atılan ısının toplam üretim için verilmesi gereken ısının sırasıyla % 27,9 ve % 11,97' sini kapsadığı belirtilmiş ve WHR sistemi ve ikincil fırın mantosu çalışmasıyla güç ve termal enerji tasarrufunun sırasıyla 42.88 MWh/yıl ve 5.30 MW olacağını hesaplamışlardır. Bu sistemlerin ekonomik yönlerinin yanında çevresel etkisinin öneminden bahsedilmiş, %14.10 sera gazlarının emisyonunun azalacağını üzerinde durmuşlardır.

Kabir et al.'a göre son zamanlarda kuru tip çimento üretim tesislerinde enerji dönüşüm proseslerinden en çok geliştirilen çok kademeli siklon ile düşük basınçlı yüksek verimlilikte ön ısıtıcılar, düşük havalı alev boruları, modern fırın hava kaçaklarını önleyici sızdırmazlıklar, alternatif yakıtlar, yeni refrakter malzemeler, ve buna ek olarak atık ısıdan yararlanılan sistemler olduğunu açıklamışlardır.

Yapılan çalışmalarda kuzeydoğu Nijerya'da 5 kademeli ön ısıtıcısı, tüp klinker soğutuculu ve yıllık 800000 tonluk üretim kapasitesi olan bir çimento

fabrikasını örnek almışlardır. Çalışmalarında fabrikanın kontrol hacmini oluşturmuşlar ve bu kontrol hacmine göre enerji analizini gerçekleştirmişlerdir.

Yapılan hesaplamalarda;

- i. Fabrika çalışmasının kararlı bir durumda çalıştığını,
- ii. Çalışma esnasında ortam sıcaklığının sabit olduğunu,
- iii. Döner fırında sızıntı havaların hesaplara dahil edilmeyeceğini,
- iv. Öğütülmüş malzemenin, yakıtın ve klinkerin kimyasal bileşimlerinin sabit olduğunu,
- v. Fırın, ön ısıtıcı ve klinker soğutucu biriminin yüzey ortalama sıcaklığının sabit olduğunu,

kabul etmişlerdir.

Hesaplar sonucunda klinkerleşme süreci dahilinde toplan ısı girdisinin 4361 kJ/kg<sub>kl</sub> olduğunu, yapılan enerji analiziyle ve ısı dengesine göre ısının kontrol hacimden çıkan fırın atık gaz ve fırın yüzeyinden atılan ısı sırasıyla %27,90 ve %11,81' i oluşturduğunu hesaplamışlardır. Nijerya'da bulunan çimento fabrikasında yapılan uygulamada WHRSG sistemi ile 4,4 MW elektrik üretimi ve fırın mantosundan 5,30 MW gücünde enerji tasarruf çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu tasarruf çalışmalarıyla yıllık 2318,18 dolar ve bunun yanında faydalı çevresel etki olarak %14 oranında CO<sub>2</sub> emisyonunun azalımı sağlanmıştır (Kabir et al., 2009).

Bundela and Chawla (2010), yayınladıkları çalışmada Hindistan' ın dünyada Çin'den sonra ikinci büyük çimento üreticisi olduğunu çimento üretim santrallerinin çevreye olan etkilerine değinerek çalışmalarına başlamışlardır. Araştırmacılar çevresel etki olarak CO<sub>2</sub> salınımı ile klinker üretimi arasında %50' lik bir oran saptamışlardır. Yani kilogram klinker başına 0,5 kilogramlık bir CO<sub>2</sub> salınımı gerçekleşmekte olduğuna değinmişlerdir. Bu nedenle emisyon azaltımı ile ilgili olarak atık ısı santrallerinin özelliklerinden herhangi bir fosil yakıt kullanmadan enerji üretmenin avantajlarından bahsetmişler, örnek olarak günlük

4800 ton klinker kapasiteli bir çimento fabrikasının 4 MW lık enerji üretebildiğini dile getirmişlerdir. Yapılan çalışmada atık ısı santrallerini buhar rankin çevrimi ve organik rankin çevrimi olarak ikiye ayırmışlar ve birbirlerine göre çevresel ve ekonomik olarak avantajlarını incelemişlerdir (Bundela and Chawla, 2010).

Dalkılıç vd. (2010), teorik analizde atık ısının kullanabileceği yerleri tespit etmek ve uygulanabilecek sistemlerin ekonomik değerlendirmesini yapmak amacıyla atık ısının sıcaklığına göre sınıflandırmasını sunmuşlardır. Araştırmacılar atık ısıdan yararlanma sistemleri üzerinde açıklamalarından sonra bir enerji tesisinde atık ısı geri kazanımında kullanılan endüstriyel ısı değiştiricilerin özelliklerini ve kullanım alanlarını incelemiştir.

Ayrıca örnek bir fabrikada baca giriş ve çıkış sıcaklığı, baca gazının kütleli debisini ve özgül ısını kullanarak ısı kapasitesini, eşanjör boruları içindeki akışkanın hızını, boru sayısını hesaplamış ve baca çekiş kontrolü üzerinde durmuştur. Sonuç olarak baca çekişinde ısı değiştiriciden dolayı bir problem oluşmayacağına ve atık ısıdan elde edilen sıcak suyun mahal ısıtmasında kullanabileceğine karar vermişlerdir (Dalkılıç vd.,2010).

Hepbaşlı (2010), enerji verimliliği ve yönetim sistemi isimli yayınında kütle ve enerji denkliği ile Sankey diyagramlarının öneminden bahsetmiştir. Bu konuda enerji ve ekserji bağıntılarını ve ekserji hesaplama tablolarından çeşitli örnekler vermiştir. Ayrıca bir buhar kazanına ait Sankey diyagramını örnek olarak göstermiştir. Yayının 13. bölümünde ısı denkleğinin sanayi sektöründe enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için gerekli olan, önemli bir konu başlığı olduğunu vurgulamıştır (Hepbaşlı, 2010).

Ino, (2010), Kawasaki tesis sistemi hakkında yayınlamış olduğu teorik ve deneysel çalışmasında, artan yakıt maliyetlerinin birçok şirketin yeni enerji kaynaklarının araştırılmasına yönelttiğini ayrıca Japon ağır sanayinin en büyük şirketlerinden olan Kawasaki şirketince geliştirilen proses ısısından faydalanma sisteminin tüm dünyadaki çimento endüstrisinin dikkatini çektiğini günümüzde genellikle Asya’ da fabrikalarda uygulanan bu sistemin dünyanın çeşitli yerlerinde kurulmaya başlandığının üzerinde durmuştur.

Ino’ya göre, 1978’ de patlak veren petrol krizi Japon endüstrisinde, yüksek verimlilik ile enerjiden daha fazla yararlanma düşüncesi ile çimento fabrikalarında

büyük miktardaki atık ısının elektrik enerjisine dönüştürme fikri doğurmuştur. Kawasaki, tesis ismi K Plant olarak özelleştirmiş ve ilk olarak dünyada 1980 yılında başarılı olarak devreye almıştır. Bu tarihten itibaren, Japonya çimento endüstrisi içindeki toplam çimento fabrikalarının yarısına uygulamıştır. Bundan sonra gerçekleşen aşama deniz aşırı ülkelere örneğin Çin, Hindistan, Vietnam ve Kore de çeşitli uygulamalar yapılmıştır.

Yapılan çalışmada çimento üretim prosesinin öğütme, kalsinasyon gibi önemli proseslerin toplam enerjinin %93' üne yakın bir değerini harcadığına değinilmiştir. Ayrıca ısıl verimlilik, proseste ön ısıtıcı siklon kademesinin önemli bir yer tuttuğunu, fırın içinden çekilen sıcak gazların farin kurutulmasında kullanıldığını ki buna rağmen % 40 civarında gazın kullanılmadan atmosfere atıldığından bahsetmişlerdir.

Araştırmacı yayınladığı bu çalışmayla WHR sisteminin temel elemanları olan buhar kazanları, buhar türbinlerinden ve kondenserden bahsetmiş, su tedarigi konusunda sıkıntı yaşayan firmalar su soğutmalı sistem yerine hava soğutmalı sistemin kullanılabileceğini dile getirmiştir. WHR sisteminin kapasitesi belirlenmesi konusunda ise fabrika kapasitesine bağlı olarak yaklaşık olarak ton klinker başına 36 kW güç üreteceğini, bu da toplam fabrika enerji ihtiyacının %30-%35' i arasında olduğunu dile getirmiştir.

Atık gazdan elde edilen bu enerjinin hiçbir şekilde CO<sub>2</sub> emisyonuna etki etmeyeceğini çünkü herhangi bir fosil yakıt kullanılmadan elde edilen bu enerjinin çevre dostu olduğunu ve bu sistemin kapasitesinin belirlenmesinde ön ısıtıcı kademesinin, hammadde nem oranı ve klinker soğutma sisteminin etkili olduğunu açıklamıştır.

Yazar, Kawasaki şirketinin diğer WHR kurulum yapan firmalardan bazı üstünlüklerini olduğunu bunlardan en önemlisi; ön ısıtıcı atık gazından buhar üreten (PH) buhar kazanının dikey buhar kazanı yerine dizaynı değiştirilerek yatay konumda buhar kazanı elde edildiğini böylelikle ön ısıtıcıdaki gazın içindeki 10 mikrondan küçük olan fakat yoğunluğu 100 g/m<sup>3</sup> ü bulan tozun, çekiçleme sistemi ile eşanjörlerde tutunmadığını, vibrasyonun dikey konumdaki kazana göre daha etkili olduğundan, tozun alt bölgede rahatça toplandığına

değınilmiştir. Böylelikle yatay PH kazanının dikey kazana göre daha uzun süre sorunsuz çalışacağını deneysel yöntemler sonucu kanıtlamıştır (Kawasaki, 2008).

Bu konuda;

- i. Buhar kazanlarının iki kademeli buhar üretimi (buhar ve kızgın buhar) yapabilecek şekilde geliştirildiğini bu çalışmanın güç üretimini tek kademeli buhar kazanlarına göre %10 arttırdığına değınilmiştir.
- ii. İki kademeli veya çift basınçlı buhar kazanlarının yanında flaş buhardan yararlanan flaşör ekipmanı ile düşük basınçlı buhar üretiminin artırılarak elde edilen gücün artırılması konularına değınilmiştir.

Sonuç olarak, çimento fabrikalarında önce fizibilite ölçüm çalışması ile sistemin kapasitesinin belirlenmesi gerektiğini ki bunun sonucunda kapasitenin fabrikaya göre değişiklik göstereceğini vurgulamış, projenin çevresel olarak CO<sub>2</sub> emisyon azaltışını destekleyen çevre dostu bir proje olduğunu, ekonomik olarak amortismanı konusunda birim elektrik fiyatları ülkelere göre değişiklik gösterdiğinden dolayı ülkelere göre değiştiğini fakat ortalama 4 yıl içinde amortismanının sağlandığına dikkat çekmişlerdir (T.Ino, 2010).

### 3. DURUM ÇALIŞMASI

Ağır sanayinin önemli oyuncularından olan çimento fabrikalarında, enerji yönetimi ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılması en öncelikli konudur. Bu projenin uluslararası adı atık ısı geri kazanımı (waste heat recovery) olarak geçmektedir.

WHR sistemi çimento üretim hattından doğaya bırakılan atık ısının değerlendirilmesine olanak vermektedir (Sintek, 2010). Enerji konusunda çimento fabrikalarında akla ilk gelen enerji kaynakları kömür ve elektriktir. Kömürün ısı verimliliğinin dışındaki geri kalan bölüm sıcak gaz olarak atılmaktadır. Ayrıca Çizelge 3.1' de gösterildiği gibi ton başına ortalama 70 kW elektrik harcanması göz önünde bulundurulması gereken faktörlerdir.

#### 3.1 Çimento Üretim Sürecinde Enerji Kayıpları

Endüstriyel bir tesis olarak, bir çimento fabrikasında enerji verimliliği; çimento üretiminin hammadde sağlama ve hazırlamadan klinker üretimine, klinkere katkı maddeleri karıştırılıp çimento üretimine, üretilen çimentonun paketlenip veya dökme biçimde kullanım noktalarına ulaştırılıncaya kadar tüm enerji kullanım noktalarının belirlenmesi, bu noktalarda enerji kullanım verimliliğini optimum düzeye çıkaracak enerji kayıplarının günümüz ekonomik koşullarına göre minimuma indirilecek tüm önlemlerin alınmasını kapsar (Utlü, 2006).

Ağır sanayi içerisinde 1 800 000 ton/yıl klinker (yarı mamul) üretim kapasitesi olan bir çimento fabrikasının enerji özeti (Bkz. Çizelge 3.1) zaman göz önünde bulundurularak açıklanmaya çalışılmıştır.

Örnek çimento fabrikası sürekli çalışan bir fabrikadır, ancak üretim pek çok kesintiye uğrayan, sürekli ısıtılan ve soğutulan süreçlerin toplamıdır. Bu süreç enerjinin önemli ölçüde kaybedilmesini sağlar.

**Çizelge 3.1** Örnek Çimento Fabrikası Enerji Tüketimi Bilgileri

<b>Enerji Türü</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
<b>Elektrik (kWh)</b>	274.681.857	230.914.406	217.044.732	238.540.262	229.439.470
<b>Kömür (kmilyon/kcal)</b>	1.650.287	1.596.436	1.590.946	1.651.956	1.563.078
<b>Toplam Enerji Tüketimi</b>					
<b>Toplam Enerji Tüketimi (TEP)</b>	232.578	214.723	212.096	223.145	212.616
<b>Özgül Enerji Tüketimi (kWh/t klinker)</b>	75,19	77,72	75,95	73,93	74,65
<b>Özgül Enerji Tüketimi (kCal/kg klinker)</b>	867	856	869	868	865

Kullanılan elektrik enerjisinin %70' i ham madde, çimento ve kömür öğütmek için kullanılır. Bütün boyut küçültme işlemleri gibi öğütme süreci de enerjiyi işe çevirmekte çok düşük verimle, yaklaşık %15 çalışır.

Çizelge 3.2 Çimento fabrikasına ait ısı verim örneği

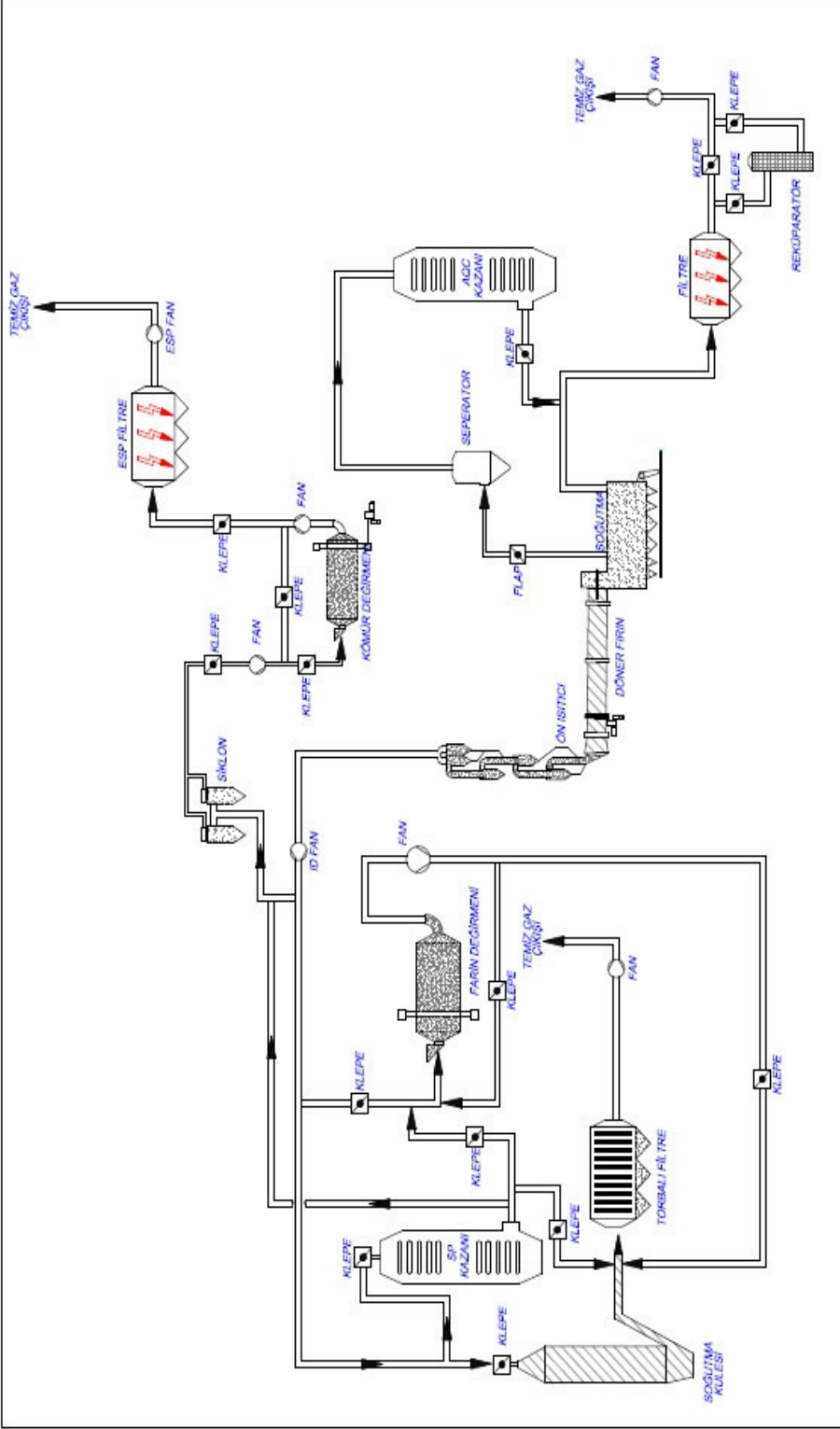
<b>KLİNKER YAPIMINDA ISIL VERİM ÖRNEĞİ</b>				
<b>Isı Kaynağı</b>	<b>Değer kCal/kg</b>	<b>Ara Toplam</b>	<b>%</b>	<b>Sonuç</b>
<b>1 Değişmeyen Isı</b>				
Kuramsal klinker oluşum ısısı	415			
Kule çıkış gazındaki toz	3	423	56,4	Gerçek yakıt kullanım verimi
Su buharlaşma ısısı	5			
<b>2 Döner Fırından Isı Kaybı</b>				
Işıma	37	37	5%	Isı kaybı
<b>3 Ön ısıtıcıdan Isı Kaybı</b>				
Işıma	25			
Çıkış gazı	150	175	23,3%	Isı kaybı
<b>4 Soğutucudan Isı Kaybı</b>				
Çıkış Gazı	78			
Klinker	34	115	15,3%	Isı kaybı
Işıma	3			
<b>Toplam</b>		<b>750</b>	<b>100</b>	<b>43,6%</b>

Klinkerleştirme sürecinde dört kademeli bir ön ısıtıcı, fırın, soğutucu gibi önemli sistemlerin ısı verimliliği Çizelge 3.2 de görülebilir.

### 3.2 WHR ile Çimento Üretim Proses İlişkisi

Öncelikle sanayi işletmeleri bu tip atık gazın değerlendirilmesi konusunda bazı tespitler yapmak zorundadır (Tarakçıoğlu, 2006). Klinker üretimi; hammaddeye ve üretilen teknolojiye bağlı olarak ÷lkemizin farklı yerlerinde farklı kalitede üretilmektedir. Bu farklılık dolaylı olarak WHR sisteminde de bazı farklılıklara yol açması beklenen bir durumdur. WHR sistemi genel olarak kullanacağı gaz debisine ve gazın içeriğine göre değişim gösterir böylece klinker üretimine entegrasyonu sağlanabilen bir sistemdir.

## BATISÖKE BATISÖKE KLİNKER ÜRETİM HATTINA WHR SİSTEMİNİN YERLEŞİMİ



Şekil 3.1 WHR sisteminin çimento fabrikasına entegrasyonu (Batisöke, 2011)



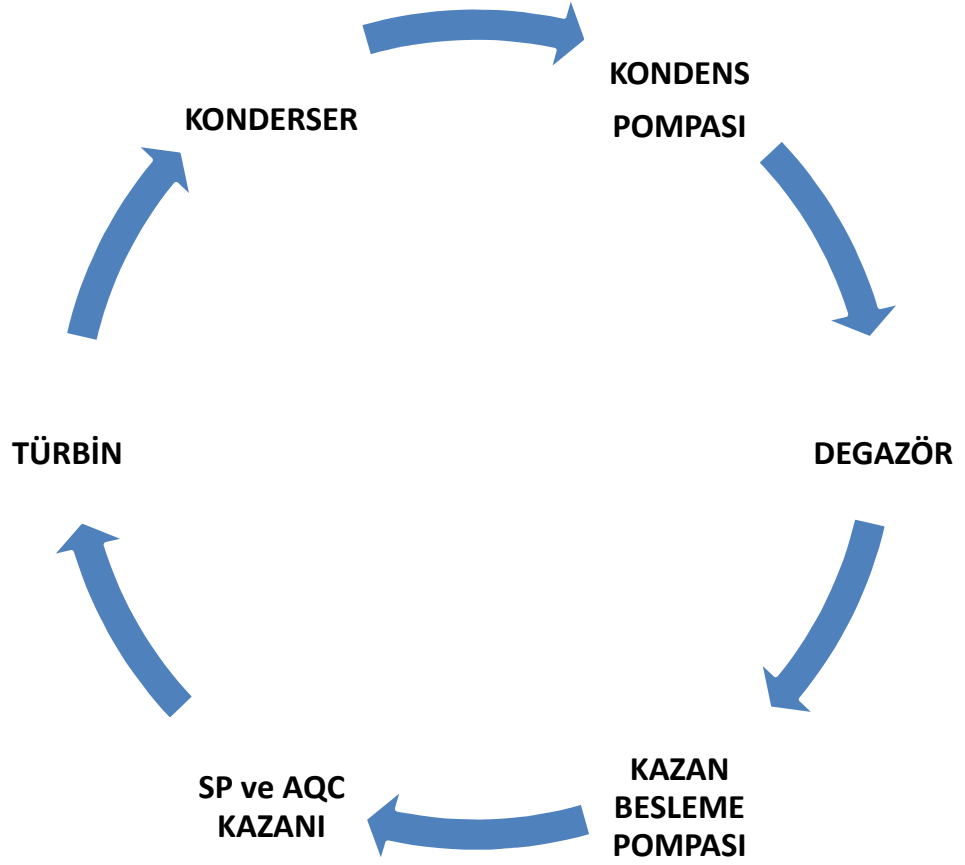
### 3.3 WHR Sisteminin Çalışma Prensibi

WHR sistem akış diyagramında açıkça görüldüğü gibi(Bkz.Şekil3.3); AQC (soğutma kazanı) ve SP (ön ısıtıcı kazanı) buhar kazanları, buhar türbini ve jeneratörü, yoğuşturucu sistemin ana ekipmanlarıdır (Sinoma, 2009).

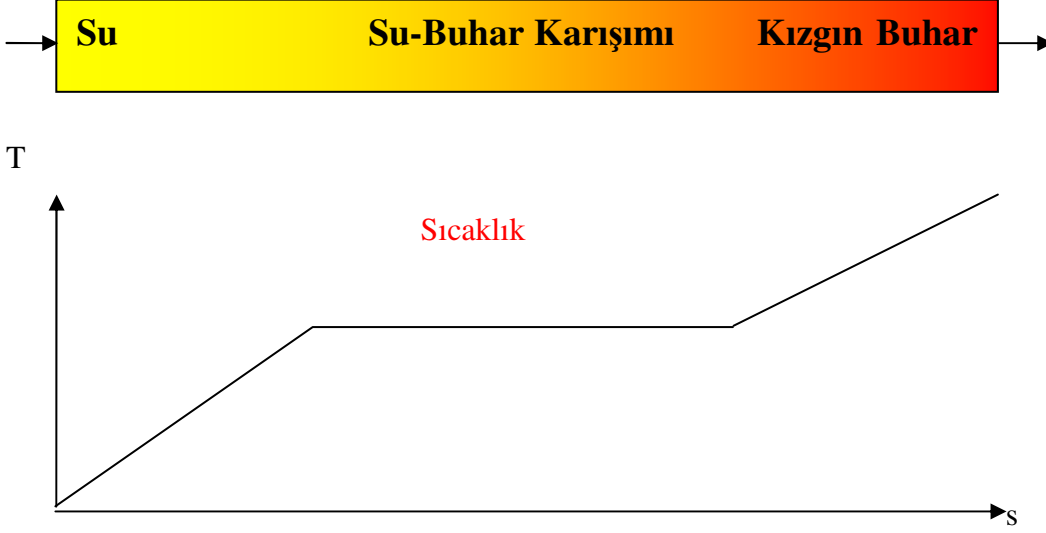
Ayrıca yardımcı ekipmanlar olarak kazanlara beslenen suyun kalitesini belirleyen kimyasal su şartlandırma sistemi ve kondensere giren türbin çıkış buharının yoğunlaşp kapalı çevrim ilkesiyle sistemin çalışmasını sağlayan soğutma kulesi ile bütün bir sistem olarak görülebilir (Selbaş, 1992).



WHR sistemi, su-buhar çevrimli sistemlerinin etkin bir örneğidir. Buhar sistemlerinde kullanılan suyun kimyasal yapısı sistem ömrü için en önemli etken olmasından dolayı ilk olarak artlandırılan su (ki bu su artık saf su formuna dönüşmüştür ) kondenser ekipmanına verilerek kondens pompaları vasıtasıyla degazör tankına alınır.



Şekil3.4 WHR sistemi su-buhar döngüsü



Şekil 3.5 WHR sistemi sıcaklık entropi değişimi (Sinoma, 2009)

Degaze (havası alınmış) edilmiş su kazan sesleme pompaları vasıtasıyla AQC kazanının ikinci ve üçüncü kademesine ve aynı anda SP kazanının ikinci kademesine pompalanmaktadır.

AQC kazanının üçüncü kademesinde üretilen sıcak su, yine aynı kazanın ikinci kademesine ve SP kazanının ilk kademesinde kızgın buhar üretimi amacıyla kullanılmaktadır.

AQC ve SP kazanlarının ilk kademelerinden elde edilen kızgın buhar türbinin yüksek basınçlı buhar girişine gönderilir. Bu işlem esnasında AQC ve SP kazanlarının ikinci kademesinde üretilen buhar da türbinin ikinci giriş kademesine yani düşük basınçlı buhar girişine gönderilir.

Yüksek basınçlı buhar ile düşük basınçlı buhar türbinini döndürmeye başlamasıyla türbine direk akuple bağlı olan jeneratör mili dönmeye başlaması ile enerji üretilmeye başlanır. Türbin devreye alındıktan sonra türbin çıkışındaki atık buhar suya dönüşür ve tekrar degazöre pompalanarak termodinamik çevrim tamamlanmış olur. Böylelikle kazanlara beslenen yüksek kalitedeki su tekrar sisteme kazandırılarak değerlendirilmiş olur. Buhar-su karışımının kondenserde ısını verebilmesi ve suya dönüşebilmesi için kondenser soğutulması gerekmektedir ve bu da su soğutma kulesine ihtiyacı doğurmaktadır.

### 3.4 WHR Sisteminin Ana Ekipmanları

Çimento fabrikalarının klinker üretim sistemine entegre edilen bu sistem; SP veya PH adı verilen buhar kazanı, AQC adı verilen buhar kazanı, buhar türbini-jeneratör, su şartlandırma ünitesi ve soğutma kulesinden oluşmaktadır. Klinker üretim hattının yapısına ve sayısına göre bu ana ekipmanların sayısı ve kapasitesi değişim göstermektedir.

#### 3.4.1 SuspensionPreheater (SP ) Kazanı

SP kazanı ismini; kullandığı atık sıcak gazın kaynağı olan ve klinker üretim hattında ön ısıtıcı diye adlandırılan ekipmanından almıştır. Ön ısıtıcı döner fırın öncesinde malzemenin ön ısıtılmasını veya kalsinasyonunu gerçekleştiren yapıdır.

WHR sistemindeki SP buhar kazanının Çizelge 3.3' de ki genel özelliklerini dikkate alırsak SP buhar kazanı sınıflandırılması aşağıdaki gibi yapılabilir.

- i. Yapısına göre .....Su borulu kazan
- ii. Kullanım alanına göre.....Santral kazanı
- iii. Basınç sınıfına göre.....Düşük ve orta basınçlı kazan
- iv. Kazan içindeki su dolaşımına göre.....Doğal sirkülasyonlu, çift dramlı olarak sınıflandırabiliriz

Çizelge 3.3 SP kazanının teknik özellikleri

<b>SP Kazanının Teknik Özellikleri</b>	
Giriş gaz sıcaklığı	360 °C
Giriş gaz debisi	135 000 Nm <sup>3</sup> /h
Çıkış gaz sıcaklığı	170 °C
Giriş gazı toz içeriği	80 g/ Nm <sup>3</sup>
Sirkülasyon Tipi	Doğal Sirkülasyon
<b>Ana Buhar Kademesi Parametreleri</b>	
Yüksek basınçlı buhar miktarı	13,4 t/h
Üretilen buhar basıncı	1,25 MPa
Üretilen buhar sıcaklığı	345 °C
Besleme suyu sıcaklığı	125 °C
<b>Düşük Basınçlı Buhar Kademesi</b>	
Düşük basınçlı buhar miktarı	1,8 t/h
Üretilen buhar basıncı	0,25 MPa
Üretilen buhar sıcaklığı	170 °C
Besleme suyu sıcaklığı	39 °C
Büyük dram çalışma basıncı	1,49 MPa
Küçük dram çalışma basıncı	0,4 MPa



**Şekil 3.6** SP Kazan Serpantin Boruları

SP kazanı Çizelge 3.3' de görüleceği gibi yüksek basınçlı ve düşük basınçlı buhar üretebilir. Kazanın farklı kademelerine farklı sıcaklıktaki buhar besleme suyunun girişi ile iki farklı buhar elde edilir. SP kazanının bir diğer fonksiyonu da içindeki serpantin borularının çevresinden geçentozlu gazın içindeki toz, az da olsa filtrasyonunu sağlar. Serpantinin üstünde tutulan bu tozlar çekiçleme sistemi ile kazan alt bölümdeki toz bunkerinde biriktirilir. Buradan bir taşıma sistemi ile tozlar nakil edilebilir.



Şekil3.7 SP Kazanı Yapısal Genel Görünümü

### 3.4.2 Hava Soğutmalı Soğutucu (AQC) Kazanı

WHR sistemindeki AQC kazanı ismini; “hava soğutmalı soğutucu” anlamına gelen genellikle çimento fabrikalarında pişmiş klinkeri fanlar yardımıyla hızlı bir şekilde soğutulmasını sağlayan ekipmandan almıştır. AQC kazanı kullandığı sıcak gazın kaynağı bu ekipmanın fanları tarafından üretilmektedir.

AQC kazanında iki farklı buhar türünden ayrı olarak sıcak su üretimine olanak veren ekonomizer bulunmaktadır. Su ısıtıcısı yani diğer bir adı ile ekonomizer, temel olarak bir ısı değiştiricisidir. Ekonomizerler gazlarının ısısından yararlanarak kazan besleme suyunu ısıtır. Çizelge 3.4 de gösterildiği gibi kazan besleme su sıcaklığını 125 °C ye yükselterek SP kazan verimliliğini artırarak kızgın buhar kapasitesini artırır.

AQC kazanını daha önce açıkladığımız kriterlere göre sınıflandırılabilir.

- i. Yapısına göre .....Su borulu kazan
- ii. Kullanım alanına göre.....Santral kazanı
- iii. Basınç sınıfına göre.....Düşük ve orta basınçlı kazan
- iv. Kazan içindeki su dolaşımına göre.....Doğal sirkülasyonlu, çift dramlı olarak tanımlanır.

Çizelge 3.4 AQC Kazanının Teknik Özellikleri

<b>AQC Kazanının Teknik Özellikleri</b>	
Giriş gaz sıcaklığı	380 °C
Giriş gaz debisi	106,400 Nm <sup>3</sup> /h
Çıkış gaz sıcaklığı	80 °C
Giriş gazı toz içeriği	15 g/Nm <sup>3</sup>
Sirkülasyon Tipi	Doğal Sirkülasyon
<b>Ana Buhar Kademesi Parametreleri</b>	
Yüksek basınçlı buhar miktarı	10,50 t/h
Üretilen buhar basıncı	1,35 MPa
Üretilen buhar sıcaklığı	365 °C
Besleme suyu sıcaklığı	130 °C
<b>Düşük Basınçlı Buhar Kademesi</b>	
Düşük basınçlı buhar miktarı	1,8 t/h
Üretilen buhar basıncı	0,35 MPa
Üretilen buhar sıcaklığı	170 °C
Besleme suyu sıcaklığı	39 °C
Büyük dram çalışma basıncı	1,49 MPa
Küçük dram çalışma basıncı	0,4 MPa
<b>Sıcak Su Kademesi</b>	
Besleme suyu sıcaklığı	39 °C
Çıkan su sıcaklığı	140 °C
Çıkan su debisi	32,54 t/h



Şekil3.8 AQC Kazanı Montaj Görünümü



Şekil3.9 AQC Kazanı Yapısal Görünümü

### 3.4.3 Buhar Türbini ve Jeneratör

Buhar türbini genel yatay eksenli etrafında dönebilen bir türbin rotoru bu rotor üzerine monte edilmiş olan ve rotorla beraber dönen hareketli kanatlar türbin gövdesi bu gövde içerisinde bulunan iç gövde sabit kanat taşıyıcıları ve sabit kanatlardan meydana gelir.

Rotor her iki taraftan radyal yataklarla yataklanmışlardır. Eksenel yatak rotoru eksenel yönde sabitleştirir (Küçükşahin, 2007).



Şekil 3.10 Örnek türbin kanatları (Küçükşahin, 2007).

Türbin girişindeki buharın, basınç ve sıcaklığına bağlı olarak bir entalpisi vardır. Buhar türbin içerisinde genişleyerek akarken basınç enerjisi, türbin gövdesine yerleştirilmiş olan bir sabit kanat diskinde kinetik enerjiye dönüşür. Bu kinetik enerji, buharın türbin rotoru üzerinde bulunan bir hareketli kanat diskinde yön değiştirmesi sırasında ise mekanik işi meydana getirir. Birbiri ardına

sıralanmış olan, sabit ve hareketli kanat disklerinde aynı işlemi tekrarlanması ile, buharın türbin giriş ve türbin çıkış entalpileri arasındaki fark mekanik işe dönüşmüş ve bu iş rotora verilmiş olur. Bir sabit kanat diski ile bir hareketli kanat diski bir türbin basamağını meydana getirir. Buhar türbinleri genellikle birçok basamaklardan meydana gelirler.

**Çizelge 3.5** Batsöke çimento WHR projesi türbin ve kondenser özellikleri

<b>BUHAR TÜRBİNİ</b>		
<b>Özellikleri</b>	<b>Birim</b>	<b>Miktar</b>
Tipi		BN5,5-1,25/0,25
Güç Miktarı	kW	5,500
Dönüş Hızı	d/dk	3000
Dönüş Yönü	Buharın girişine göre saat yönünde	
Birinci Kademe Buhar Basıncı	MPa	1,25
Birinci Kademe Buhar Sıcaklığı	°C	348
İkinci Kademe Buhar Basıncı	MPa	0,25
İkinci Kademe Buhar Sıcaklığı	°C	160
Çıkış Buhar Basıncı	MPa	0,007
<b>KONDENSER</b>		
<b>Özellikleri</b>	<b>Birim</b>	<b>Miktar</b>
Tipi		N-800
Soğutma Yüzeyi	m <sup>2</sup>	800
Ekzos Buhar Basıncı	MPa	0,007
Giriş Su Sıcaklığı	°C	27
Giriş Su Basıncı	MPa	≤0,3

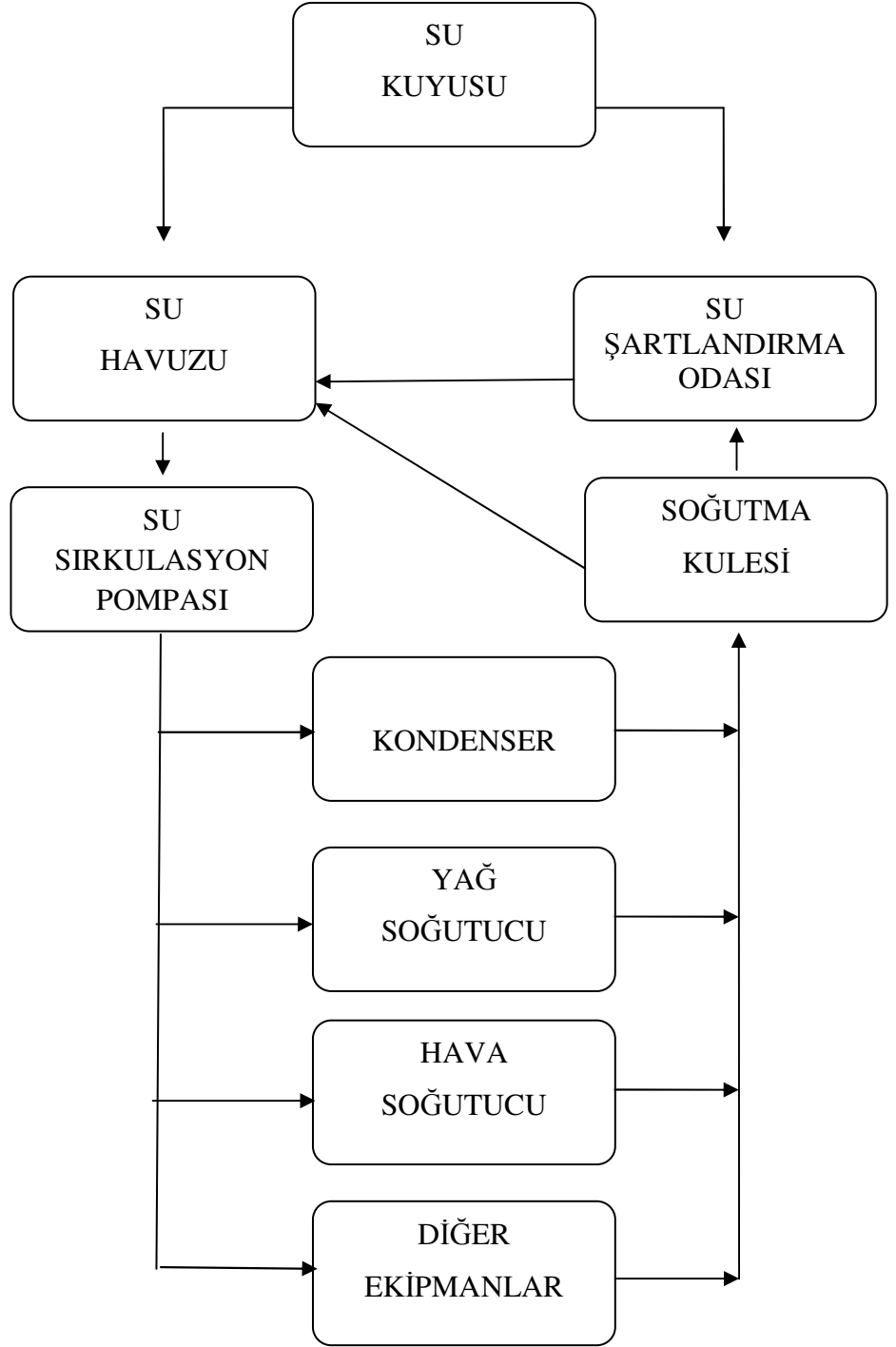
### **3.4.4 Kazan Besleme Suyu ve Kimyasal Su Şartlandırma**

Kazandan çıkan doymuş veya kızgın buharın, ısıtılmış yoğuşum suyu şeklinde yeniden kazana dönünceye kadar geçtiği devrelere “buhar besleme suyu” adı verilir (Burkut, 1999). Enerji tesislerinde en basit besleme suyu sistemi türbinden çıkan buharın kondenserde yoğuşum suyu haline getirildikten sonra, bir pompa vasıtasıyla kazan veya kazanlara verildiği sistemdir.

#### **3.4.4.1 Kazan Besleme Suyu**

Buhar kazanı satın alınırken kazanın kalitesine ve verimine dikkat edilir. Genellikle, besi suyu hazırlayacak sistem üzerinde aynı titizlikle durulmaz. Bu nedenle ısı verimi çok yüksek olan bir buhar kazanı dahi yüksek iletkenlikte bir su ile beslendiğinde yapılan blöflerden dolayı işletme verimi düşük olur.

Batısöke çimento atık ısı güç santralinde atık ısı buhar kazanları buhar basıncı 1,25 MPa olduğundan düşük basınçlı buhar kazanı sınıfına girer. Kazanın aynı zamanda sistemin, normal çalışma düzenini sağlamak için kazan besleme su indeksinin düşük basınçlı kazanlar için oluşturulan standartları ( Endüstriyel kazan besleme suyu kalitesi GB1576-2001) sağlaması gerekir (Burkut, 1997).



Şekil 3.11 Su Akış Diyagramı (Batisöke Söke çimento sanayi, 2010)

### 3.4.4.2 Su Şartlandırma Prosesi

Kullanılan suyun niteliğinden dolayı kazanlarda çalışmayı zorlaştırıcı, kazan verimini düşürücü ve sistemin imal edildiği metali aşındırıcı bir takım problemlerle karşılaşılır (Yalçın, 2006).

Kazanlar ve buhar sistemlerinde karşılaşılan suyla ilgili problemleri hafifletmek, kullanılan suyun şartlandırılması ile mümkündür. Örneğin Batısöke Söke çimento sanayinin uygulayacağı projede, ön su şartlandırma ve ters osmos su şartlandırma sistemleri kullanılacaktır.

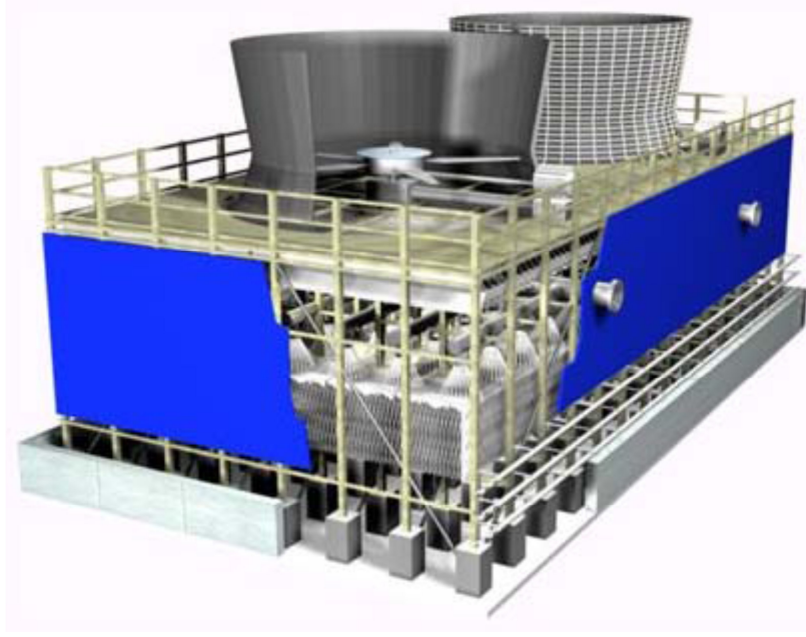
### 3.4.5 Soğutma Kulesi

Su soğutma kuleleri, sistemden gelen sıcak suyun dolgu üzerine püskürtülmesi ile ısının atmosfere verilerek ortamdaki uzaklaşması ile soğuma sağlayan sistemlerdir.

Su soğutmalı kondenserlerde kapalı çevrim su kullanılması durumunda su soğutma kulesinin kullanılması gerektirir.

Su soğutma kuleleri çalışma prensiplerine göre karşıt akışlı ve çapraz akışlı kuleler olmak üzere ikiye ayrılır. Karşıt akışlı su soğutma kulelerinde su yukarıdan aşağı süzülürken hava aşağıdan yukarı hareket eder. Çapraz akışlı su soğutma kulelerinde su yukarıdan aşağı inerken hava akımı yataydır. Karşıt akışlı kuleler, diğerlerine oranla daha etkilidir.

WHR santralinde tercih edilen teknoloji olan karşıt akışlı kulelerin çalışma prensibini ayrıntılı olarak incelemekte fayda vardır (Kılıç, 2006).



**Şekil 3.12** İnşai tip soğutma kule dizaynı

Karşıt akışlı cebri çekişli tip su soğutma kulelerinde, sistemde ısınan su kule içerisine alındıktan sonra, yukarıdan aşağıya doğru fiskiyeler yardımı ile tüm kule oturma alanına üniform olarak püskürtülür. Bu sırada, hava, fan yardımı ile cebri olarak dolgular içerisinden yukarı doğru emilir. Püskürtülen su kütlesinin kule dolguları üzerinde süzülürken parçalanması ve emilen hava ile karşılaşarak bir kısmının buharlaşması ile soğuması sağlanır (Duruk, 1994).

Buharlaşmanın gerçekleşmesi ile nemi artan hava, kulenin en üstünde yer alan fan yardımı ile atmosfere atılır (Çengel, 2007). Soğutma kulesinin ısı performansı giren hava yaş termometre sıcaklığına bağlıdır. Giren havanın kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nem, mekanik taslak soğutma kulelerinin ısı performansı üzerinde önemsiz bir etkiye sahiptir ve bu da soğutma kulesi içindeki su buharlaşma oranını etkiler.

## 4.ANALİZ

Atık ısı geri kazanım sistemi ile ilgili yapısal özelliklere, ekipmanlarına ve çalışma prensiplerine değinildikten sonra çimento üretim prosesiyle entegre çalışacak olan bu sistem hakkında; sistemin fizibilite çalışmasına, enerji ve ekserji analizlerine ve çevresel etkisine değinilecektir.

### 4.1 Sistemin Fizibilite Analizi

WHR sistemi, genel olarak klinker üretim hattında pişirme işleminin ana elemanlarından olan sistem fanı (abgaz fanı olarak bilinir) tarafından emilen sıcak gazdan ve klinker üretiminde son evre olan soğutma evresinden elde edilen atık gazlardan faydalanmaktadır. Elektrik enerjisi elde etmek için öncelikle bu kaynaklardaki ısı kapasitelerinin belirlenmesi gerekir.

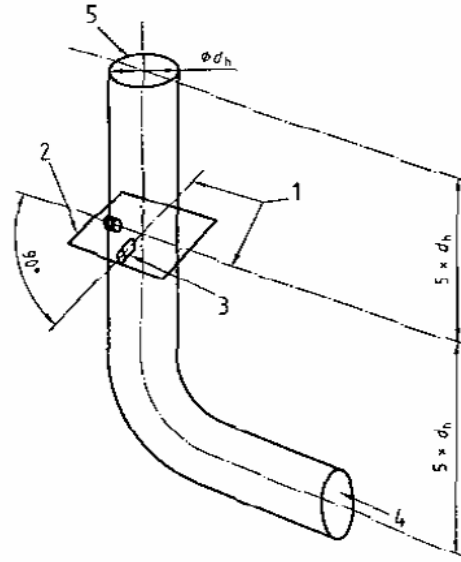
Bu bölümde Batisöke Söke çimento fabrikasına ait 2100 ton/gün kapasitedeki döner fırınında yapılan ölçümler ve hesaplamalar ele alınmıştır. Döner fırının çalışma şartları anlık değişiklik gösterdiğinden, ölçüm anında üretim verileri kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçları ile üretim verileri karşılaştırılmış ve ortalama bir değer bulunmuştur. Baca gazı emisyon ölçümlerine benzer olarak doğrudan ölçüm yöntemi (pitot tüpü) kullanılmıştır (Hai, 2010).

Bu ölçümler esnasında sağlıklı bir ölçümün gerçekleşmesi için aşağıdaki ayrıntılara özen gösterilmiştir.

- a) Ölçüm öncesi ölçüm yapılacak tesis gezilmiş, tesiste yapılması düşünülen deney çalışmalarına ait numune alma planı üzerinde tesis yetkilileri ile görüşülmüş, ölçüm adetleri ve ölçüm noktaları konusunda son mutabakat sağlanmıştır.
- b) Çalışmalara başlamadan önce, tesiste yürütülen iş güvenliği ve işçi sağlığı uygulamaları ile varsa patlayıcı, yanıcı, parlayıcı maddeler hakkında bilgi alınmıştır.

- c) Deneyler sırasında çevresel faktörlerde gözlenerek, ölçüm sonuçları üzerinde etkisi olabilecek durumlar kayıt altına alınmıştır.
- d) Ölçüme etkisi olabilecek alanlar içerisinde, her türlü insan ve makine faaliyetlerine karşı gerekli önlemler alınmıştır (Hepbaşı, 2010).

Literatürdeki ölçüm tekniği uygulamalarına göre: düz baca veya kanalın uzunluğu yedi hidrolik çap kadar olmalı, numune alma düzlemi beş hidrolik çap mesafede tayin edilmelidir. Eğer, baca veya kanal sözkonusu düz hat sonunda açık havaya açılıyorsa, baca çıkışına olan mesafenin beş hidrolik çap kadar olması gerekmektedir (Genceli, 2010).

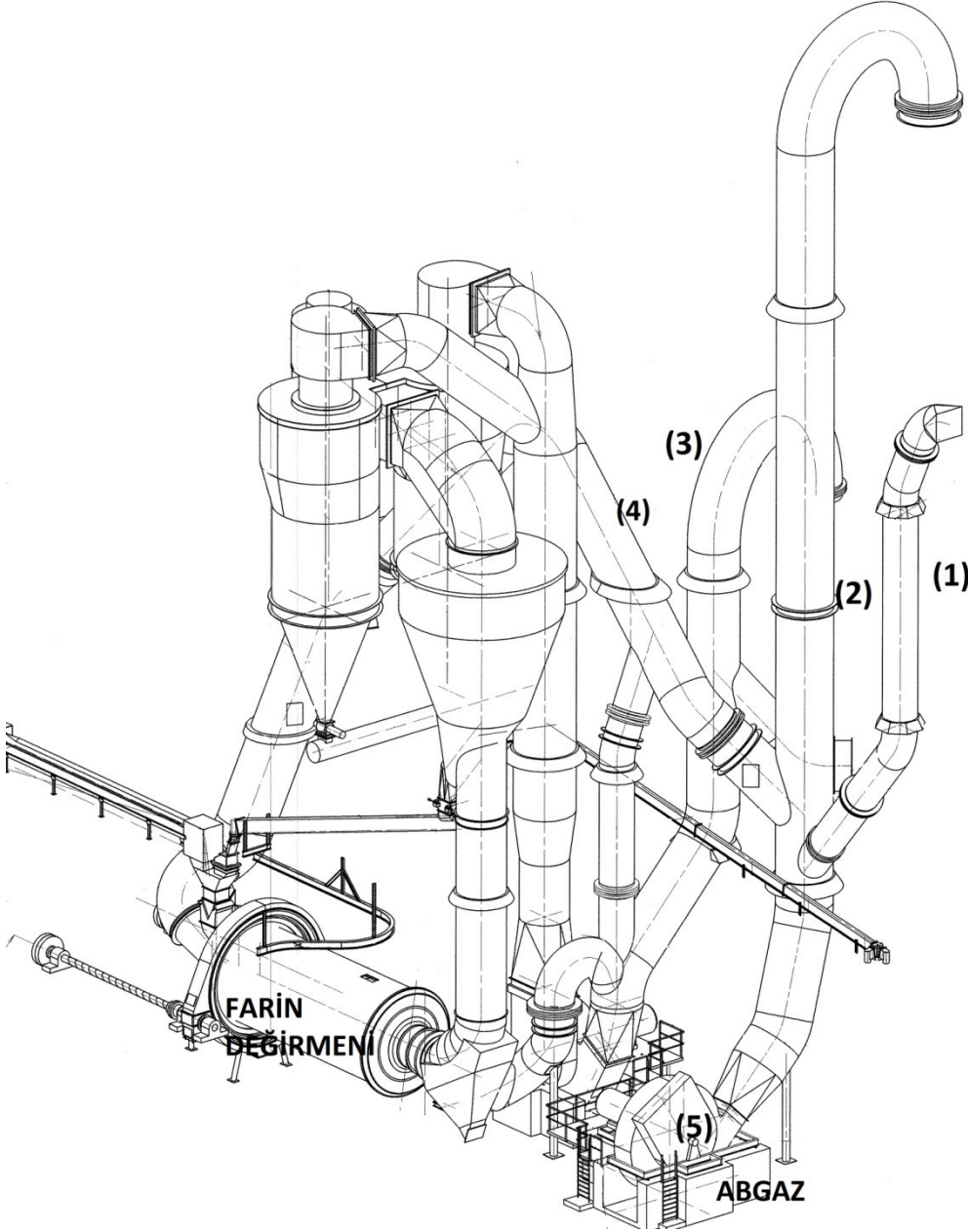


**Şekil4.1** 1.Numune Alma Hatları 2. Numune Alma Düzlemi 3. Giriş Deliği 4. Akış 5.Baca Tepesi

#### 4.1.1 Genel Ölçüm İçeriği

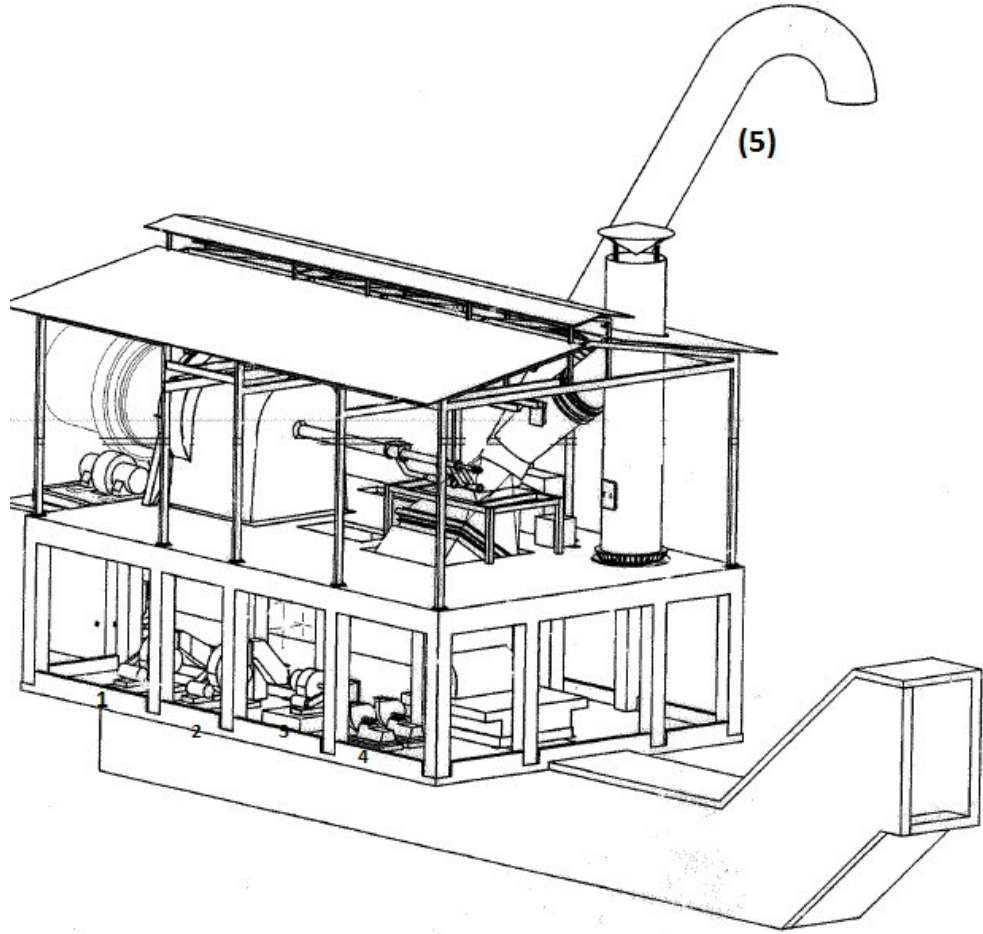
- (1) Klinker soğutucudan çıkan gazın sıcaklığını, dinamik ve statik basıncı
- (2) Farin değirmenine giden gazın sıcaklığını, dinamik ve statik basıncı
- (3) Kömür değirmenine giden gazın parametreleri
- (4) Ön ısıtıcıdan çıkan gazın parametreleri

Ölçüm yerlerinin detayları ; (2), (3), (4) numaralı ölçüm yerleri Şekil 4.2’de, (1) numaralı ölçüm yeri ise Şekil 4.3 ‘de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



**Şekil 4.2** Çimento fabrikası farin değirmeni ölçüm noktaları (5) Abgaz fanı emiş borusu (4) Farin değirmeni girişi sıcak gaz borusu (3) Elektrofiltre giriş borusu (2) Soğutma kulesi giriş borusu (1) Kömür değirmeni Sıcak gaz borusu (Batisöke Söke çimento, 1996)

Şekil4.2' de açıkça görünen abgaz fanı (döner fırın sistem fanı olarak adlandırılabilir) sistemin kalbidir. Döner fırın içindeki sıcak gazı ön ısıtıcı sisteminin içinden emerek; farin değirmenine, kömür değirmenine malzemeyi kurutma amaçlı gaz sevk eder iken arta kalan sıcak gazı da soğutma kulesine sevk etmektedir. Numaralandırılan borulardan, kalibrasyonları kontrol edilmiş S tipi pitot tüpü ile basınç, termoelement ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır (Sinoma, 2009).



**Şekil4.3** Klinker soğutma Bölgesi (5) Soğutma elektrofiltre giriş borusu (1,2,3,4) Soğutma fanları (Battsöke çimento, 1996)

Şekil4.3’de gösterilen klinker soğutucu resminde (5) numaralı elektrofiltre borusundan, kalibrasyonları kontrol edilmiş S tipi pitot tüpü ile basınç, termoelement ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

#### 4.1.2 Debi Ölçüm Eşitlikleri

Aşağıdaki formüllerde görüleceği gibi dinamik basınç debi hesabının en önemli parametresidir. Ölçüm işlemine başlamadan önce çevre şartlarını (atmosfer basıncını, hava sıcaklığını vb. ) bilmek bize hesaplarımızda zaman kazandırır (Genceli, 2010).

$$\sqrt{\Delta P_{PJ}} = \frac{\sqrt{\Delta P_1} + \sqrt{\Delta P_2} + \dots + \sqrt{\Delta P_n}}{n} \quad (1)$$

$$V = 3600 \times F \times \omega_{PJ} = 3600 \times F \times K_d \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta P_{PJ}}{\rho_t}} \quad (2)$$

$$V_0 = V \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \quad (3)$$

#### 4.2 Enerji ve Ekserji Analizi

Enerji ve ekserji analizi, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarını birlikte ele alan enerjinin maksimum kullanımını veya kullanılabilirliğini ifade eden bir analiz şeklidir.

WHR sisteminde buhar türbini, buhar kazanları ve pompa gibi ekipmanlar için literatüre bakıldığında enerji verimliliği ön plana çıkmaktadır. Batısöke Söke çimento fabrikasında uygulaması başlatılan projedeki temel ekipmanlarının enerji ve ekserji verimlilikleri incelenecektir.

Böylece, WHR sistemi kendi içinde enerji tasarrufuna yönelik bir sistem olsa da bu sistemin ekipmanlarının enerji ve ekserji analizi yapılarak maksimum fayda veya kullanılabilirliklerinin hesaplanması amaçlanmıştır.

#### 4.2.1 Analizde Yapılan Kabuller

- a) Sürekli akışlı açık sistem: Atık ısı geri kazanım tesisinde kullanılacak SP ve AQC kazanları, buhar türbini, kondenser ve pompa, sürekli akışlı açık sistem kabulüyle incelenecektir. Açık literatüre göre sürekli akışlı açık sistemde, akışkanın kontrol hacminde sürekli bir akışı vardır. Akışkanın özellikleri, kontrol hacmi içinde bir noktadan diğerine farklılıklar gösterebilir fakat verilen bir noktada zamanla değişmez (Çengel ve Boles, 2008).
- b) Akışkanın birim kütesinin kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edildi.
- c) WHR sistem ekipmanları yalıtılmış olacağından dolayı sistem adyabatik olarak kabul edildi.
- d) SP ve AQC kazanlarında kullanılan sıcak gaz için hava ideal gaz olarak kabul edildi.
- e) Dış hava sıcaklık değişimleri ihmal edildi.

#### 4.2.2 Kütle, Enerji, Ekserji Denge Eşitlikleri

WHR sisteminde pompa haricinde diğer temel ekipmanların birden fazla giriş veya çıkışı olduğundan, genel bir sürekli akış sistemi için kütle korunumu ,

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (4)$$

şeklindedir.

Burada m indisi; kütleli debiyi, g indisi; girişi, ç indisi ise çıkışı ifade etmektedir (Ozgener, 2005).

Sürekli akışlı açık sistemlerde, kontrol hacmindeki toplam enerji sabittir. Kontrol hacmine giren enerji miktarı, kontrol hacminden çıkan enerji miktarına eşit olmalıdır. Böylece enerji korunumu

$$\dot{E}_g - \dot{E}_\phi = dE_{sistem} / dt \rightarrow 0 \text{ (sürekli sistem)} \quad (5)$$

veya

$$\dot{E}_g = \dot{E}_\phi \quad (6)$$

yazılır.  $E_g$ ; indisi birim zamanda ısı, iş ve kütle ile kontrol hacmine giren enerjiyi,  $E_\phi$ ; birim zamanda ısı, iş ve kütle ile kontrol hacminden çıkan enerjiyi ifade etmektedir.

Akışkanın birim külesinin enerjisinden göz önüne alarak, kinetik ve potansiyel enerji değişimlerini ihmal edilirse enerji korunum denklemi;

$$\dot{Q}_{KH} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{KH} + \sum \dot{m}_\phi h_\phi \quad (7)$$

yazılabilir.

Burada  $\dot{Q} = \dot{Q}_{net,g} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_\phi$  net ısı girişi,  $\dot{W} = \dot{W}_{net,\phi} = \dot{W}_\phi - \dot{W}_g$  net yapılan iş, h ise birim kütle için entalpisini ifade etmektedir. Abyabatik sistemler için  $Q = 0$  olur.  $\dot{W}$  ise birim zamanda yapılan iş biçimlerini kapsar. WHR sisteminde bulunan türbin, pompa gibi sürekli akışlı sistemler, gücü bir mil aracılığı ile iletirler. Bu makineler için  $\dot{W}$ , birim zamanda yapılan mil işidir (Çengel ve Boles, 2008). Bu ifadelerin ışığında her bir sistem bileşenin çıkışındaki enerji miktarının girişindeki enerji miktarına oranına 'enerji verimi' denir. Genel sistemin enerji verimi;

$$\eta_k = \frac{\dot{E}_{\phi,k}}{\dot{E}_{g,k}} \quad (8)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Eşitlikte k'ıncı sistem ekipmanı için  $\eta$  verimliliği simgeler iken alt indisler  $\zeta$  ve  $g$  sırasıyla çıkış, giriş anlamında kullanılmıştır.

WHR sisteminde kullanılan besleme ve kondens pompalar için;

$$\eta_{pompa} = \frac{\dot{E}_{\zeta} - \dot{E}_g}{\dot{W}_{pompa}} \quad (9)$$

Diğer bir bileşen türbin için ;

$$\eta_{tür} = \frac{\dot{W}_{türbin}}{\dot{E}_g - \dot{E}_{\zeta}} \quad (10)$$

Son olarak kondenser bileşeni için;

$$\eta_{kond} = \frac{\dot{E}_{\zeta,sgk} - \dot{E}_{g,sgk}}{\dot{E}_{\zeta,sc} - \dot{E}_{g,sc}} \quad (11)$$

bağıntıları ile enerji verimliliği hesaplanabilir (Çengel ve Boles, 2008).

Ekserji, enerjiden farklı olarak, sistemin hali kadar çevrenin de haline bağlıdır. Daha açıklayıcı bir ifade ile, ekserji her hangi gerçek bir süreçte tüketilir veya tahrip olur. Ekserji tüketimi proses boyunca prosesdeki tersinmezlikler sebebiyle yaratılan entropi ile orantılıdır (Özgener, 2005).

Sistemin toplam ekserjisi ( $\dot{E}_x$ ), dört ayrı bileşenden oluşur. Bunlar fiziksel, kimyasal, kinetik ve potansiyel ekserjilerdir.

$$\dot{E}_x = \dot{E}_x^{FI} + \dot{E}_x^{KN} + \dot{E}_x^{PT} + \dot{E}_x^{KI} \quad (12)$$

bağıntısıyla ifade edilir.

Fiziksel ekserji, sistem başlangıç halinden  $P_0$  ve  $T_0$  ile ifade edilen çevre haline gelinceye kadar ve sadece çevre ile ısıl ilişki olması durumunda elde edilen en büyük iş miktarını ifade eder .

WHR sisteminin ağırlığı fiziksel ekserjidir. Bu bakımdan bu çalışmada kinetik ekserji, potansiyel ekserji ve kimyasal ekserji ihmal edilmiştir. Bir kontrol hacmi için genel ekserji dengesi;

$$\dot{E}x_g - \dot{E}x_\zeta = \dot{E}x_{kaybi} \quad (13)$$

$$\dot{E}x_{ısı} - \dot{E}x_{iş} + \dot{E}x_{kütle,g} - \dot{E}x_{kütle,\zeta} = \dot{E}x_{kaybi} \quad (14)$$

ifadeleri ile hesaplanabilir. (Özgener, 2005)

WHR sistemindeki ana ekipmanlar türbin, pompa gibi sürekli akışlı sistemler için;

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_g \dot{m}\psi - \sum_\zeta \dot{m}\psi - \dot{X}_{yokolan} = 0 \quad (15)$$

eşitliği yazılabilir (Çengel ve Boles 2008).

Özgül fiziksel ekserji ise;

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (16)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada  $Q_k$ ; ısı tranfer akımını,  $W$  işi,  $\Psi$ ; akışın özgül ekserjisini;  $s$ ; entropi,  $h$ ; entalpi, alt indisler g:giriş, ç:çıkış, sırasıyla  $P_0$  ve  $T_0$  sınırlı ölü halindeki basınç ve sıcaklık özellikleri göstermektedir (Özgener, 2005).

Özgül ekserji eşitliği, kütleli debi ile çarpılması halinde ekserji akımını verir:

$$\dot{E}_x = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (17)$$

Entropi oluşumu ( $S_{üre}$  veya tersinmezlik  $I$ , ekserji yok oluşu ile eşdeğerdir ve aşağıda verildiği gibi ifade edilir.

$$\dot{I} = \dot{E}x_{dest} = T_0 \times \dot{S}_{üre} = \dot{W}_{tr,\zeta k} - \dot{W}_{y,\zeta k} = \dot{W}_{y,gir} - \dot{W}_{y,\zeta k} \quad (18)$$

Genel olarak ikinci yasa verimi ;

$$\eta_u = \frac{E x_{,g} - E x_{kaybı}}{E x_{,g}} \quad (19)$$

eşitliği ile ifade edilir.

#### 4.2.3 WHR Sistemine Termodinamik Yaklaşım

Atık ısı geri kazanım sistemi basit olarak atık sıcak gazdan elde ettiği enerjiyi suyun buhar fazına dönüşümünde kullanır. Bunun için SP ve AQC adında iki farklı atık ısı kazanı kullanılır. Öncelikle bu kazanlarda yakıt yerine kullanılan sıcak gaz besleme pompalarıyla kazanlara gönderilen suyu ısı transferi yüzey alanı artırılmış kanatçıklı kazanlarda buhar fazına dönüştürür ardından bu buharın enerjisiyle buhar türbini ve buna bağlı jeneratör yardımıyla elektrik üretilmesi amaçlanmaktadır. Buhar, türbinden yoğuşturucuya (kondensere) sevk edilir. Kondenserde kapalı sistem soğutma devresindeki soğutma görevini, soğutma kulesi yerine getirir. Buharın yoğuşmasını sağlar. Buhar ısıısının büyük kısmını yoğuşturucuda bırakıp, sıvı fazına geçer ve buradan tekrar kazan besleme pompalarına sevk edilir.

Çevrimde aşağıdaki kabuller yapılarak hesaplamalar yapıldı;

- (i) Çevrim boyunca tüm ana ekipmanlar adyabatik olarak kabul edildi,
- (ii) SP ve AQC kazanlarına giren sıcak gaz ideal gaz kabul edildi,
- (iii) Sistem kararlı bir durumda çalışmakta, borulardaki basınç düşümü ve ısı kaybı ihmal edildi (Kaya, 2008).
- (iv) Sıcak gazın ve buhar akışının kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserjileri ihmal edilmiş, sadece fiziksel ekserjileri kullanıldı (Hasanbeigi, 2010).

SP ve AQC kazanları için yapılan enerji ve ekserji analizinde kazanların girişinde ve çıkışındaki Şekil 3.1 e uygun olarak her bir durum için 1-38 numaralı eşitliklerinden yararlanılmıştır. Eşitliklerdeki  $h_0$ ,  $s_0$ ,  $T_0$  ölü hali belirtmektedir.

Kondenser tarafından atılan ısı akımı :

$$\dot{Q}_{kond} = \dot{m}_{sa} (h_{12} - h_{11}) \quad (20)$$

Besleme ve yoğuşturucu pompalarının için ekserji eşitlikleri ;

$$\dot{E}_{x,kyp,bp} = \dot{W}_{bp} - \dot{m}(\psi_{1a} - \psi_1) \quad (21)$$

$$\dot{E}_{x,kyp,kp} = \dot{W}_{kp} - \dot{m}(\psi_{12a} - \psi_{12}) \quad (22)$$

Kondens pompasına verilen güç :

$$\dot{W}_{pompa} = \frac{\dot{m}(h_{12a} - h_{12})}{\eta_{mk}\eta_{ik}} \quad (23)$$

Besleme pompasına verilen güç :

$$\dot{W}_{pompa} = \frac{\dot{m}(h_{1a} - h_1)}{\eta_{mk}\eta_{ik}} \quad (24)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.

WHR sistemi akış şemasında verilen referans noktaların; entalpi, entropi, giren enerji ve varsa üretilen iş değerlerinden yola çıkarak SP ve AQC kazanlarının yakıtı olan sıcak gazın kütleli debisi ve entalpisinin ilgili sıcaklıklarda bilinmesi gerekir.

Sıcak gazın; havanın ideal gaz kabul edildiğinde gazın özgül ekserjisi ;

$$\psi_{gaz} = c_p \left( T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_0} \right) + RT_0 \ln \frac{P_1}{P_0} \quad (25)$$

Webfer eşitliği ile hesaplanabilir.

**Çizelge 4.1**Sistem ve elemanları için genel denge eşitlikleri, ilgili verim eşitlikleri ve diğer termodinamik açıklamalar

No	Eşitlikler	Açıklamalar
26	$\dot{E}_x = \dot{m}_{trb} (\Psi_{11} - \Psi_{12}) + \dot{m}_{su} (\Psi_{13a} - \Psi_{14})$	Kondenser ekserji kayıp akımı
27	$\dot{E}_{x,kay1} = \dot{W}_{p1} - \dot{m}(\psi_{1a} - \Psi_1)$	I nolu pompanın ekserji kayıp akımı
28	$\dot{E}_{x,kay2} = \dot{W}_{p2} - \dot{m}(\psi_{12a} - \Psi_{12})$	II nolu pompanın ekserji kayıp akımı
29	$\dot{E}_{x,kay3} = \dot{W}_{p3} - \dot{m}(\psi_{13a} - \Psi_{13})$	III nolu pompanın ekserji kayıp akımı
30	$\dot{E}_{xSP_g} - \dot{E}_{xSP_\zeta} = \dot{E}_{xSP,kayb1}$	SP kazanı ekserji kayıp akımı
31	$\dot{E}_{xAQC_g} - \dot{E}_{xAQC_\zeta} = \dot{E}_{xAQC,kayb1}$	AQC kazanı ekserji kayıp akımı
32	$\dot{E}_{x_{türbn}} = \dot{E}_g - \dot{E}_\zeta - \dot{W}_{trb}$	Buhar türbini ekserji kayıp akımı
33	$\epsilon_{pompa} = \frac{\dot{E}_{x_\zeta} - \dot{E}_{x_g}}{\dot{W}_{pomp}}$	Pompanın ekserji verimi
34	$\epsilon_{kond} = \frac{\dot{m}_{su} (\psi_{13a} - \Psi_{14})}{\dot{m}_{kar} (\Psi_{11} - \Psi_{12})}$	Kondenserin ekserji verimi
35	$\epsilon_{türbin} = \frac{\dot{W}_{trb}}{\dot{E}_{x_g} - \dot{E}_{x_\zeta}}$	Türbinin ekserji verimi
36	$\epsilon_{sis} = 1 - \frac{\dot{E}_{x_{kayb1}}}{\dot{E}_{x_g}}$	WHR 'nin ekserji verimi
37	$IP = (1 - \epsilon)(\dot{E}_{x_g} - \dot{E}_{x_\zeta})$	İyileştirme potansiyeli
38	$\chi_i = \frac{I_i}{I_{Top}}$	Bağıl tersinmezlik

### 4.3.3 Ölü Hal

Ekserji, referans bir çevreyle dengeye gelinceye kadar bir sistem, bir madde akımı veya enerji akımı tarafından üretilebilecek maksimum iş olarak tanımlanabilir. Bu tanımdan yola çıkarak ekserji değerlerinin hesaplamasında ve analizinden önce referans bir çevrenin belirlenmesi gerekir. Hesaplamalarda çoğunlukla çevrenin  $T_0$  sıcaklığında ve  $P_0$  basıncın sırasıyla 25 °C ve 1 atm alınır. Fakat bu çalışmada, bölgenin yaz ve kış ayları sıcaklık ortalamaları dikkate alınarak referans sıcaklık 15 °C ve sistem atmosferik havada kullanıldığı için 1 atm basınç değerleri referans hal olarak seçilmiştir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, WHR olarak adlandırdığımız atık ısı geri kazanım sistemin örnek çimento fabrikasına entegrasyonu irdelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve çimento üretim prosesine olan etkisi üç ayrı ana başlık altında verilmektedir.

- i. Sistemin fizibilite analizi ve sistem kapasitesinin hammadde rutubetine göre değişimi,
- ii. Enerji ve ekserji analizi,
- iii. Söz konusu çalışmanın karbondioksit emisyonuna yönelik çevresel sonuçları.

### 5.1 Fizibilite Analizi ve Analizin Hammadde Nem İçeriğine Göre Değişimi

BATISÖKE Söke çimento fabrikası, klinker üretim hattında kurulacak olan WHR sistemi için 01 Ekim 2010-30 Ağustos 2011 yapılan ölçümlerin sonuçları yer almaktadır. Günün farklı saatlerinde üretim reaksiyonları değişkenlik gösterdiğinden, toplam altı farklı ölçüm yapılmıştır. Bu sonuçlar ortalama değerleri alınabilmesi ve daha doğru bir sonuca varılması için ölçüm aletlerinin kalibrasyonları akredite bir kuruluş tarafından yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre;

**Çizelge 5.1** Abgaz fanı emiş borusunda yapılan ölçümler

Ölçüm No	Statik Basınç (kPa)	Dinamik Basınç (kPa)	Ölçülen Sıcaklık (°C)	Basınç (kPa)	Boru Çapı (m)	Boru Kesit Alanı (m <sup>2</sup> )	Pitot Tüpü kts
1	5,001	0,235	356	100,74	2,28	4,08	0,8245
2	4,90	0,245	358	100,74	2,28	4,08	0,8245
3	5,001	0,225	354	100,74	2,28	4,08	0,8245
4	5,05	0,284	360	100,74	2,28	4,08	0,8245
5	5,09	0,313	362	100,74	2,28	4,08	0,8245
6	5,09	0,294	355	100,74	2,28	4,08	0,8245

**Çizelge 5.2** Farin Değirmeni Sıcak Gaz Borusunda Yapılan Ölçümler

<b>Ölçüm No</b>	<b>Statik Basınç (kPa)</b>	<b>Dinamik Basınç (kPa)</b>	<b>Ölçülen Sıcaklık (°C)</b>	<b>Atm basınç (kPa)</b>	<b>Boru Çapı (m)</b>	<b>Boru Kesit Alanı (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Pitot Tüpü kts</b>
1	0,176	0,107	351	100,74	2,1	3,46	0,8245
2	0,186	0,127	355	100,74	2,1	3,46	0,8245
3	0,186	0,107	352	100,74	2,1	3,46	0,8245
4	0,176	0,08	352	100,74	2,1	3,46	0,8245
5	0,156	0,07	350	100,74	2,1	3,46	0,8245
6	0,235	0,07	351	100,74	2,1	3,46	0,8245

**Çizelge 5.3** Kömür Değirmeni Sıcak Gaz Borusunda Yapılan Ölçümler

<b>Ölçüm No</b>	<b>Statik Basınç (kPa)</b>	<b>Dinamik Basınç (kPa)</b>	<b>Ölçülen Sıcaklık (°C)</b>	<b>Basınç (kPa)</b>	<b>Boru Çapı (m)</b>	<b>Boru Kesit Alanı (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Pitot Tüpükts</b>
1	0,166	0,025	349	100,74	1,38	1,49	0,8245
2	0,127	0,034	351	100,74	1,38	1,49	0,8245
3	0,156	0,029	350	100,74	1,38	1,49	0,8245
4	0,147	0,029	350	100,74	1,38	1,49	0,8245
5	0,137	0,029	350	100,74	1,38	1,49	0,8245
6	0,156	0,034	352	100,74	1,38	1,49	0,8245

**Çizelge 5.4** Klinker Soğutma Giriş Borusunda Yapılan Ölçümler

<b>Ölçüm No</b>	<b>Statik Basınç (kPa)</b>	<b>Dinamik Basınç (kPa)</b>	<b>Ölçülen Sıcaklık (°C)</b>	<b>Atm basınç (kPa)</b>	<b>Boru Çapı (m)</b>	<b>Boru Kesit Alanı (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Pitot Tüpü kts</b>
1	0,33	0,26	407	100,74	1,9	2,83	0,8245
2	0,39	0,24	406	100,74	1,9	2,83	0,8245
3	0,37	0,24	405	100,74	1,9	2,83	0,8245
4	0,29	0,22	403	100,74	1,9	2,83	0,8245
5	0,30	0,22	404	100,74	1,9	2,83	0,8245
6	0,25	0,22	402	100,74	1,9	2,83	0,8245

Yukarıda günün farklı zamanlarında yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu ölçüm sonuçları fizibilite çalışmasında verilen (1,2,3) numaralı eşitliklerden yararlanılarak atık gaz noktalarındaki gerçek ve standart gaz debileri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda altı farklı ölçüm sonucunun ortalama değerleri alınmıştır.

**Çizelge 5.5** Soğutma bölgesi elektrofiltre girişi sıcak gaz değerleri

<b>Ölçüm Tarihi</b>	<b>Ölçüm Sayısı</b>	<b>Sıcaklık (°C)</b>	<b>Basınç (Pa)</b>	<b>Gerçek Gaz Debisi (m<sup>3</sup> / h)</b>	<b>Standart Gaz Debisi (Nm<sup>3</sup> / h)</b>
03 – 04	1	390	-300	254332	104447
Ekim	2	387	-350	262698	108289
2010	Ortalama	389	-325	258515	106368

**Çizelge 5.6** Abgaz fan emiş borusundaki gaz değerleri

<b>Ölçüm Tarihi</b>	<b>Ölçüm Sayısı</b>	<b>Sıcaklık ( °C )</b>	<b>Basınç ( Pa )</b>	<b>Gerçek Gaz Debisi (m<sup>3</sup> / h)</b>	<b>Standart Gaz Debisi (Nm<sup>3</sup> / h)</b>
04 Ekim 2010	1	364	-4800	370749	151257
/	2	369	-4700	367011	148713
30 Ağustos 2011	Ortalama	367	-4750	368880	149985

**Çizelge 5.7** Abgaz fan emiş borusundaki sıcak gazın bileşenleri

<b>Ölçüm Tarihi</b>	<b>Numune Sayısı</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO (%)</b>
	1	30,10	3,54	0,04
04Ekim 2010	2	30,00	3,58	0,04
/	3	30,00	3,53	0,04
30 Ağustos 2011	4	29,90	3,60	0,04
	Ortalama	30,00	3,56	0,04

Çizelge 5.7' de görüldüğü gibi çalışma koşulları altında abgaz fan borusundaki gaz %30.00 karbondioksit, %3.56 oksijen, %0.04 karbon monoksit içeriğine sahiptir.

**Çizelge 5.8** Farin değirmeni sıcak gaz borusundaki gaz değerleri

Ölçüm Tarihi	Ölçüm Sayısı	Sıcaklık ( °C )	Basınç ( Pa )	Gerçek Gaz Debisi (m <sup>3</sup> / h)	Standart Gaz Debisi (Nm <sup>3</sup> / h)
04 Ekim					
2010	1	364	-200	185818	79454
/					
30	2	371	-100	184073	77907
Ağustos					
2011	Ortalama	368	-150	184946	78681

Yapılan ölçümlere göre atık ısı klinker soğutucu ve ön ısıtıcıdan elde edilmektedir. Elde edilen atık ısının parametreleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

- (i) Klinker soğutma çıkışı atık gaz : 106 400 Nm<sup>3</sup>/h – 389 °C
- (ii) C1 siklonu çıkışı atık gaz : 150 000 Nm<sup>3</sup>/h – 367 °C

AQC buhar kazanında kullanılan atık ısı, klinker soğutucu çıkışından alınır. SP buhar kazanında kullanılan atık ısı ise farin ve kömür değirmenleri girişine de gönderilen ön ısıtıcı çıkışından alınır. Mevsimlerin değişmesiyle değişen sıcaklık ve nem, farinin nemini de değiştirecek(kış aylarında %6,9 yaz aylarında % 5,5 ) farini kurutmak için gereken ısı değişecektir.

Farin (hammadenin pişirilmeden önceki hali) değirmeninin günde yaklaşık beş saat durduğunu (ülkemizdeki enerji birim fiyatının gün içindeki değişiminden dolayı) göz önüne alarak, bu durumu adapte için ki en iyi atık ısı elde edilen ve enerji üretilen zamandır.

**Çizelge 5.9** Çimento Hattı Sıcak Gaz Kurutma Gazı Paylaşımı

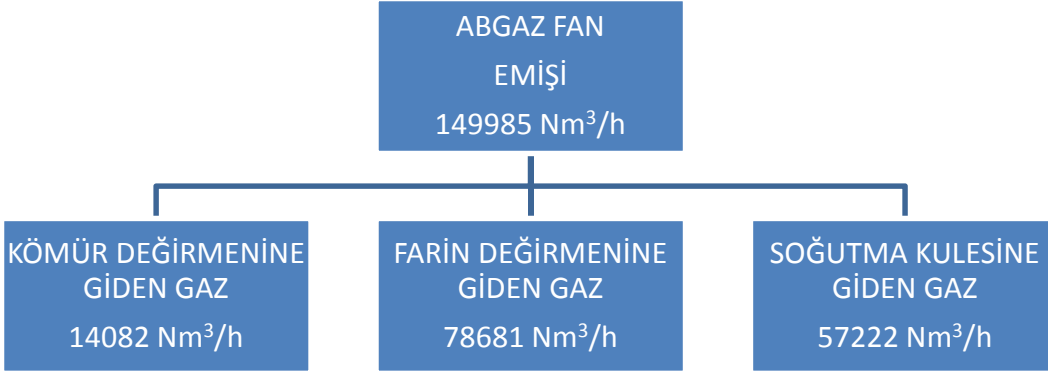
<b>Sıcak Gaz Kullanılan Yerler</b>	<b>Isı Kaynağı</b>	<b>Ölçülen Değerler</b>
<b>Kömür Değirmeni</b>	ID Fan	21 000 Nm <sup>3</sup> /h-367 °C
	SP Kazanı	10 500 Nm <sup>3</sup> /h -170°C
<b>Farin Değirmeni (Yaz)</b>	ID Fan	45 000 Nm <sup>3</sup> /h -367°C
	SP Kazanı	55 000 Nm <sup>3</sup> /h -167°C
<b>Farin Değirmeni (Kış)</b>	ID Fan	92 000 Nm <sup>3</sup> /h -367°C
	SP Kazanı	8 000 Nm <sup>3</sup> /h -165°C

Aşağıdaki tablolarda BATISÖKE Söke çimento fabrikasında fizibilitesi yapılan bu sistemin, en iyi çalışma durumu için hazırlanan, kazanlardan ne kadar buhar üreteceği ve buhardan ne kadar enerji elde edeceğimiz hesaplanmış ve tablolarda gösterilmiştir.

**Çizelge 5.10** En iyi çalışma durumu üretilen buhar ve elde edilen güç tablosu

Çalışma Durumu	Ekipman İsmi	Gaz Debisi/ Buhar Parametreleri	Çıkış Gaz Sıcaklığı	Buhar Çıkışı
5	AQC	106,400 Nm <sup>3</sup> /h 389 °C	73 °C	M:10,5 t/h-1,35 MPa 370°C L:1,47 t/h-0,35 MPa-170°C
	SP	150,000 Nm <sup>3</sup> /h 367 °C	168 °C	M:15,08 t/h 1,35 MPa350°C L:2,27 t/h-0,35 MPa-170°C
	TÜRBİN	25,58 t/h-1,25 MPa-348°C 3,74 t/h-0,25 MPa-170°C	<b>Güç Üretimi</b>	<b>5050 kW</b>

Ölçüm sonuçlarına göre abgaz sistem fanı, döner fırın ve ön ısıtıcıdan çektiği sıcak gazı kömür ve farin hammaddelerinin kurutulması için kömür ve farin değirmenlerine belli oranlarda sevk etmektedir. Soğutma kulesine giden gaz filtrasyon edilmeden önce sıcaklığının düşürülmesi amacıyla soğutma kulesine yönlendirilmekte daha sonra bu gaz döner fırın elektrofiltre ekipmanında filtre edildikten sonra bacalardan atılmaktadır.



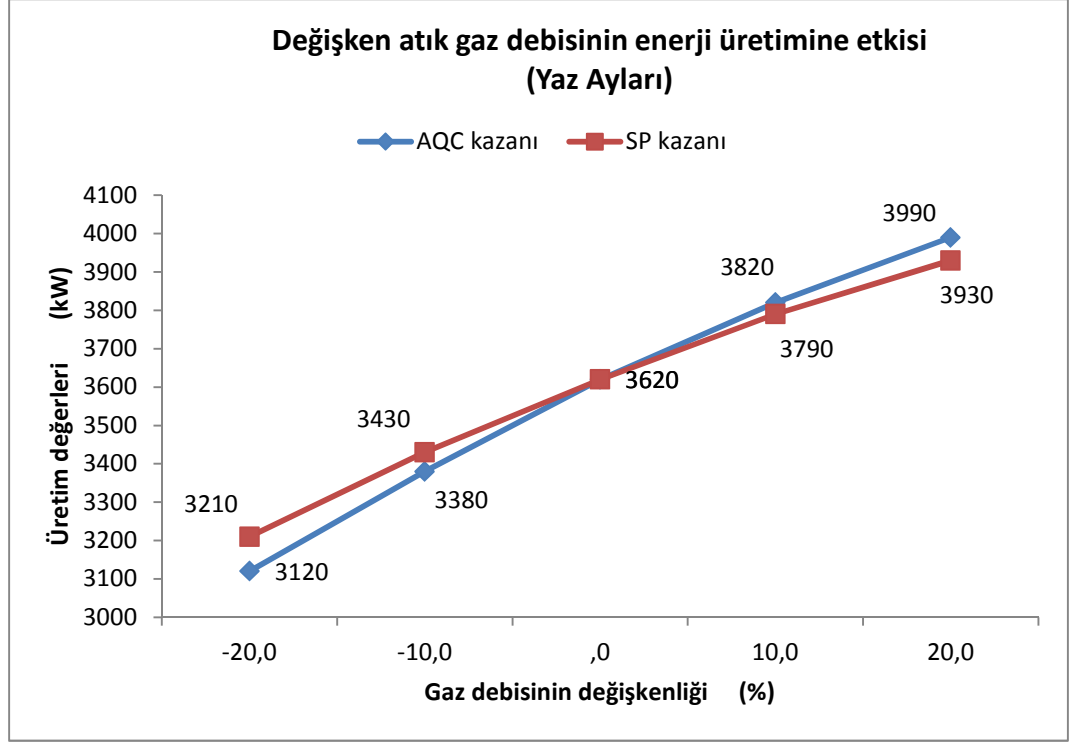
**Şekil 5.1** Döner fırın sıcak gaz dağılım şeması

Farin değirmeninde olduğu gibi kömür değirmeninde de yaz ve kış aylarındaki hammaddenin nem içeriğinin farklılaşması gerekli olan kurutma gaz debisinin yaz ve kış aylarına göre değişimine neden olmaktadır. Farin değirmen kapasiteside 170-175 ton/saat arasında değişmektedir. Buna göre ihtiyaç olan kurutma gazı ;

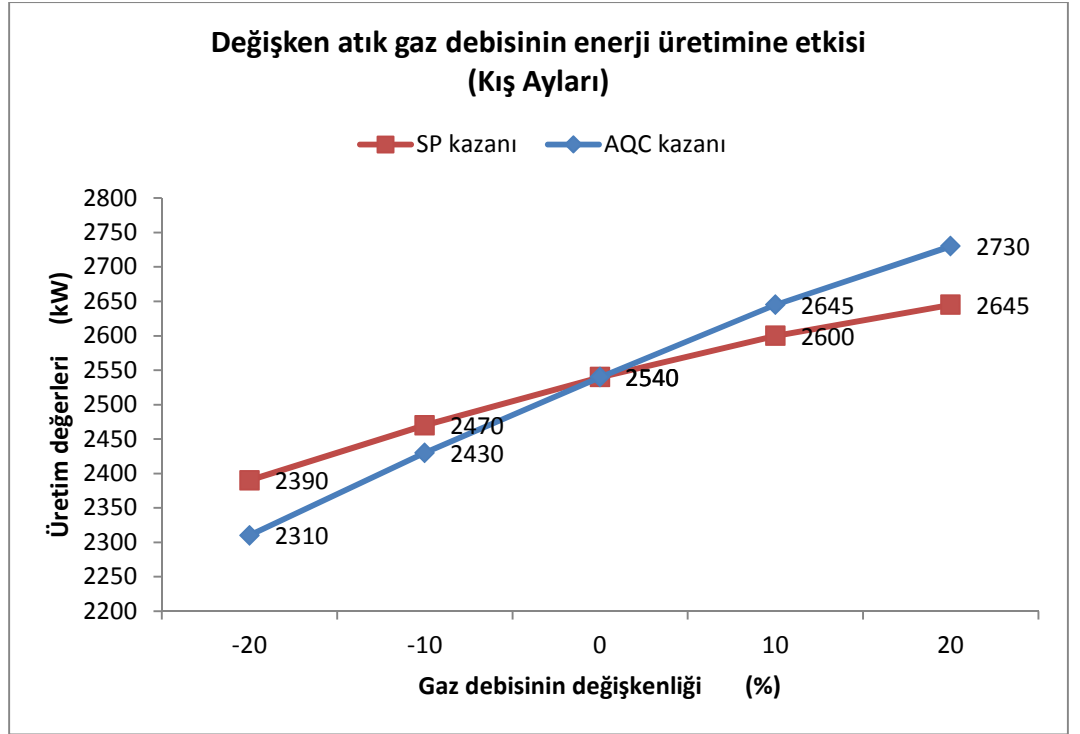
- 0.3 – 0.5 Nm<sup>3</sup>/kg Klinker
- 0.6 – 0,8 Nm<sup>3</sup>/kg Farindir (Kuleli, 2009).

Sonuç olarak; yukarıdaki bilgilerden yola çıkarak 170-175 ton/saat kapasitede farin değirmeni kurutma işlemi için yaklaşık olarak 100 000 N m<sup>3</sup>/saat sıcak gaza ihtiyaç duymaktadır. Aynı şekilde kömür değirmenimizde yaklaşık olarak 11 000 Nm<sup>3</sup>/saat sıcak gaza ihtiyaç duymaktadır.

En iyi çalışma durumu yaz aylarında hammadde nem değerlerinin en düşük olduğu dönemler denilebilir. Ayrıca değirmen duruş saatlerinde kurutma gazına ihtiyaç olmayacağı için maksimum elektrik enerjisine bu saatler arasında ulaşılır. Değirmenlere gönderilen gazın debisi; değirmene giren öğütülecek malzemenin rutubet oranına ve miktarına doğrudan bağlıdır.



Şekil 5.2 Yaz mevsiminde gaz debisinin WHR sistem üretim değerlerine etkisi



Şekil 5.3 Kış mevsiminde gaz debisinin WHR sistem üretim değerlerine etkisi

## 5.2 Enerji ve Ekserji Analiz Sonuçları

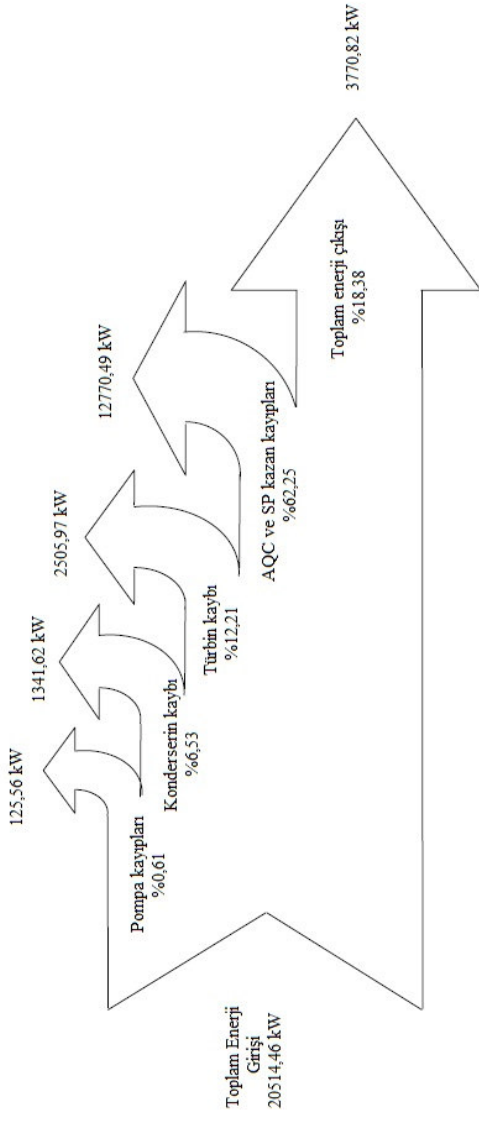
WHR sistemlerinde teorik ve öngörülen bilgiler ışığında sistemin ekserji analizi Çizelge 5.13, 5.14 ve 5.15' de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bu verilere göre; sistemin toplam ekserji kaybı akımı 5038,61 kW ve toplam ekserji verimliliği %55,69 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada incelenen düğüm noktalarında ekserji kaybına neden olan temel noktalar ısı transferi, gazların genişmesi ve sürtünme olarak tanımlanabilir. Çalışmada seçilen ölü hal değeri, ölçülen meteorolojik verilerden yararlanarak 15 °C ve 101,325 kPa belirlenmiştir. Bu referans değerlerine göre yapılan hesaplamalarda sistem ekipmanlarının ekserji kayıp akımları, verimliliklerinin yanı sıra her bir ekipmanın iyileştirme potansiyelleri Çizelge 5.15 ' de açıkça gösterilmiştir.

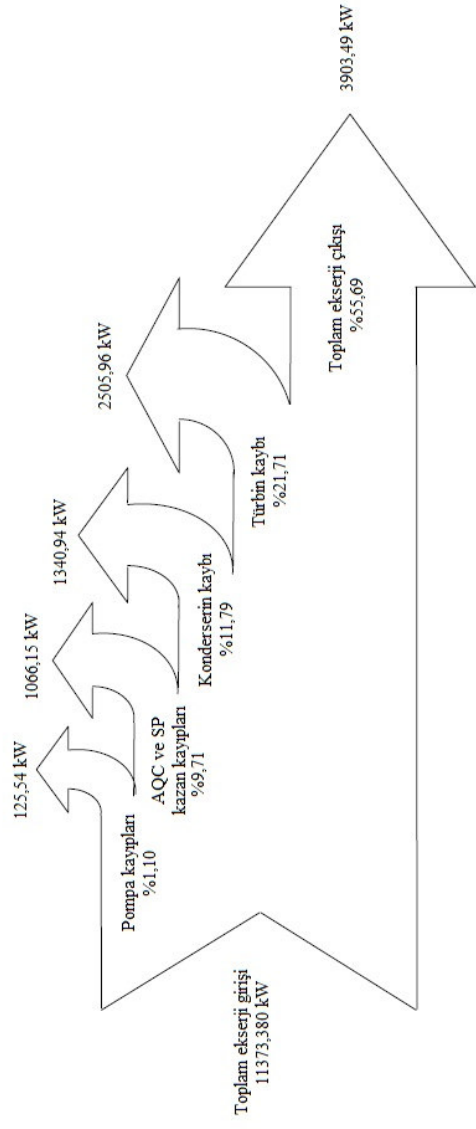
Sistemin yakıt kaynağı olan sıcak gazı ideal gaz olarak kabulü yapılmış ve ideal gazların sıcaklık ve basınç değerleri ile özgül akış ekserjisi Çizelge 5.14'de açıkça gösterilmiştir. Özellikle AQC kazanındaki giriş suyu sıcaklığının üretilen buhar ve sıcak suya nazaran düşük olması bu ekipmandaki tersinmezliklerin temel nedenidir.

Temel olarak ısı alış verişinde bulunan akımların ısı akış kapasiteleri arasındaki fark nedeniyle sistemdeki atık ısı kazanları büyük ölçüde ekserji kaybı akımına neden olmaktadır.

Çizelge 5.11 WHR sisteminin enerji akış diyagramı



Çizelge 5.12 WHR sisteminin ekserji akış diyagramı



Çizelge 5.13 WHR 'min ekserji analiz sonuçlar

No	Elemanın ismi	Akışkan	Faz	Sıcaklık T(°C)	Basınç P(kPa)	Özgül entalpi h(kj/kg)	Özgül entropi s(kj/kgK)	Kütleli debi ṁ(kg/s)	Özgül akış ekserji ψ (kj/kg)	Ekserji Ėx=ṁψ (kW)
0		Su	Ölü hal	15	101,325	62,95	0,2244		0,000	0,000
1	Degazör çıkışı/Pompa girişi	Su	Sıvı	38	600	159,028	0,5452	7,638	3,639	27,798
1a	Besleme pompa çıkışı	Su	Sıvı	39	2400	163,202	0,5586	7,638	3,952	30,187
2	SP kazan besleme suyu girişi	Su	Sıvı	39	2400	163,202	0,5586	0,5	3,952	1,976
3	AQC kazan çıkışı/SP kazan girişi	Su	Sıvı	125	2100	524,754	1,58	3,722	71,188	264,961
4	SP kazan düşük basınçlı buhar çıkışı	Su	Doymuş buhar	170	250	2767,216	6,662	0,5	849,272	424,636
5	SP kazan yüksek basınçlı buhar çıkışı	Su	Kızgın buhar	345	1250	3141,52	7,174	3,722	1076,043	4005,031
6	AQC kazanı besleme su girişi girişi	Su	Sıvı	39	2400	163,2	0,558	7,138	4,123	29,431
7	AQC kazanı yüksek basınçlı buhar çıkışı	Su	Kızgın buhar	360	1250	3173,582	7,225	2,916	1093,409	3188,381
8	AQC kazanı düşük basınçlı kazan çıkışı	Su	Doymuş buhar	170	250	2767,216	6,662	0,5	849,272	424,636
9	Türbin 2. kademe buhar girişi	Su	Doymuş buhar	160	200	2756,88	6,747	1	814,443	814,443
10	Türbin 1. kademe buhar girişi	Su	Kızgın Buhar	340	1150	3132,89	7,197	6,638	1060,785	7041,493
11	Türbin çıkışı/Kondenser girişi	Su	Su-Buhar karışımı	39	7	2572,6	8,2767	7,638	189,380	1446,483
12	Kondenser çıkışı / pompa girişi	Su	Sıvı	38	7	159,028	0,5452	7,638	3,639	27,798
12a	Pompa çıkışı/Degazör girişi	Su	Sıvı	39	600	163,202	0,5586	7,638	3,952	30,187
13	SK çıkışı/Pompa VII girişi	Su	Sıvı	26,5	30	111,019	0,3881	33	0,899	29,662
13a	Pompa VII çıkışı/Kond girişi	Su	Sıvı	27	250	113,107	0,3951	33	0,970	32,003
14	Kond çıkışı/ SK girişi	Su	Sıvı	37	250	154,853	0,5318	33	3,326	109,748

Çizelge 5.14 WHR sıcak gaz ekserji analiz sonuçları

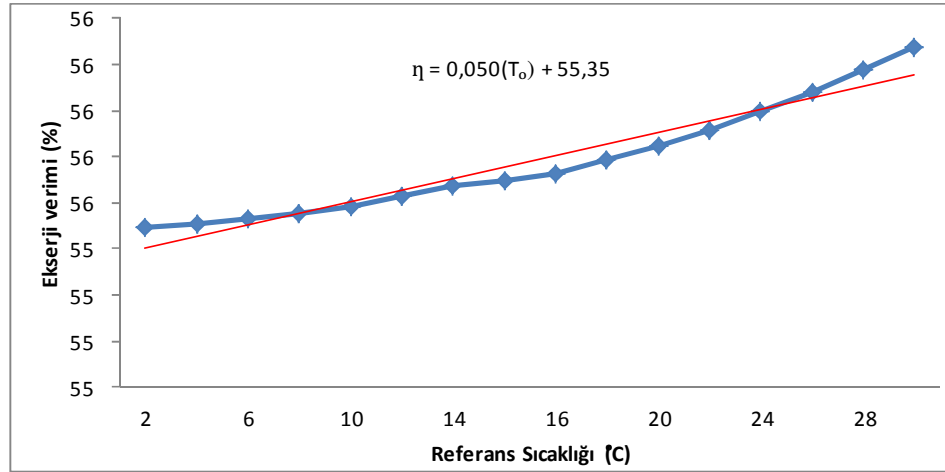
No	Elemanın ismi	Akışkan	Faz	Sıcaklık T(K)	Basınç P(bar)	Kütleli debi $\dot{m}$ (kg/s)	Özgül akış ekserji $\psi$ (kj/kg)	Ekserji $\dot{E}_x=\dot{m}\psi$ (kW)
	Sıcak gaz için dış ortam özellikleri	Hava	Gaz	288,15	1,01325		0,000	0,000
15	SP atık gaz girişi	Hava	Gaz	633,15	1,01325	56,77	118,161	6707,987
16	SP atık gaz çıkışı	Hava	Gaz	458,15	1,01325	56,77	36,380	2065,315
17	AQC atık gaz girişi	Hava	Gaz	653,15	1,01325	36,11	129,199	4665,393
18	AQC atık gaz çıkışı	Hava	Gaz	353,15	1,01325	36,11	6,387	230,631

Çizelge 5.15 Enerji, ekserji ve termodinamik faktör değerleri

No	Ekipman	Ekserji kaybı akımı (kW)	Ekserji verimi $\epsilon$ (%)	Bağıl tersinmezlik $\chi$ (%)	İyileştirme potansiyeli IP(kW)	Enerji Verimliliği (%)
I	SP kazanı	479,94	92,85	9,53	332,17	28,9
II	AQC kazanı	586,21	87,43	11,63	557,24	37,8
III	Türbin	2505,968	60,90	49,74	2505,97	60,90
IV	Kondenser	1340,940	9,30	26,61	1216,19	
V	Pompa I	29,492	7,49	0,59	2,21	7,49
VI	Pompa II	29,492	7,49	0,59	2,21	7,49
VII	Pompa III	66,563	3,40	1,32	2,26	3,40
VIII	Tüm sistem	5038,61	55,698	100,00	4618,25	18,38

### 5.3 Referans Sıcaklığın Etkisi

Enerji ve ekserji analizinde WHR sistemi için referans sıcaklık daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi 15°C olarak alınmıştır. Enerji ve ekserji verimlilik değerleri önceki bölümlerde (Bkz. Çizelge 5.12) de verilmiştir. Bu çalışmada WHR sisteminin çalışma ortamı yaz ve kış aylarına bağlı olarak referans sıcaklığı değişiminin sistemin enerji verimliliğine olan etkisi Şekil 5.6'da aynı zamanda referans sıcaklık değişiminin sistemin ekserji verimliliğine olan etkisi Şekil 5.5'de verilmiştir.

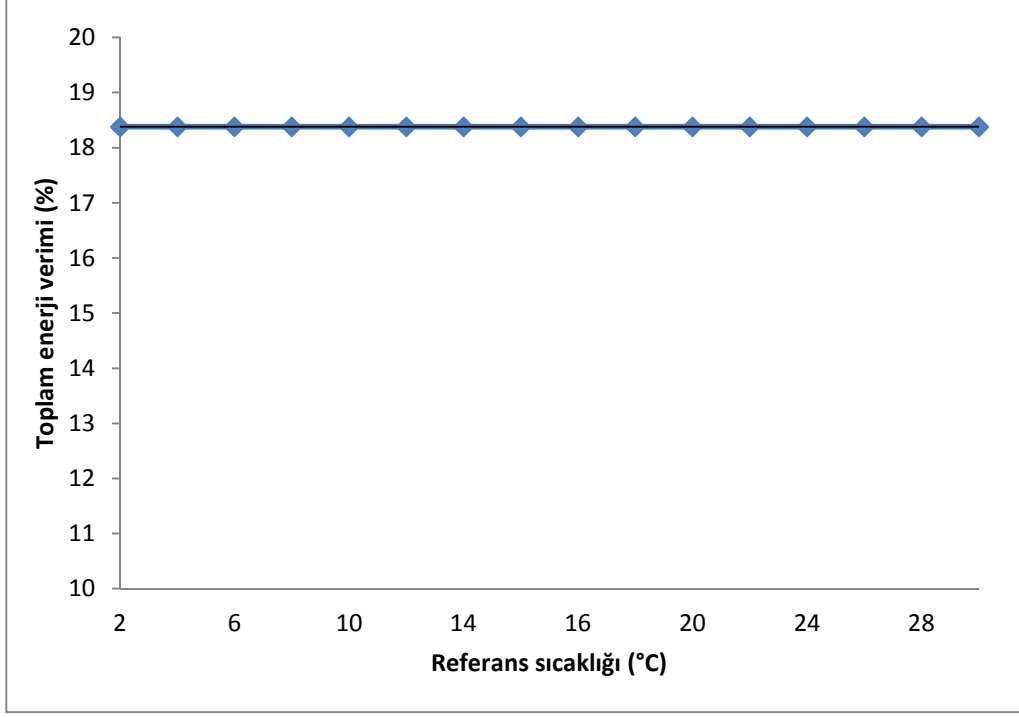


Şekil 5.4 Referans sıcaklığın ekserji verimliliğine etkisi

Referans sıcaklık değeri ile sistemin ekserji verimliliğine olan etkisi ile ilgili aşağıdaki korelasyon tanımlanmıştır.

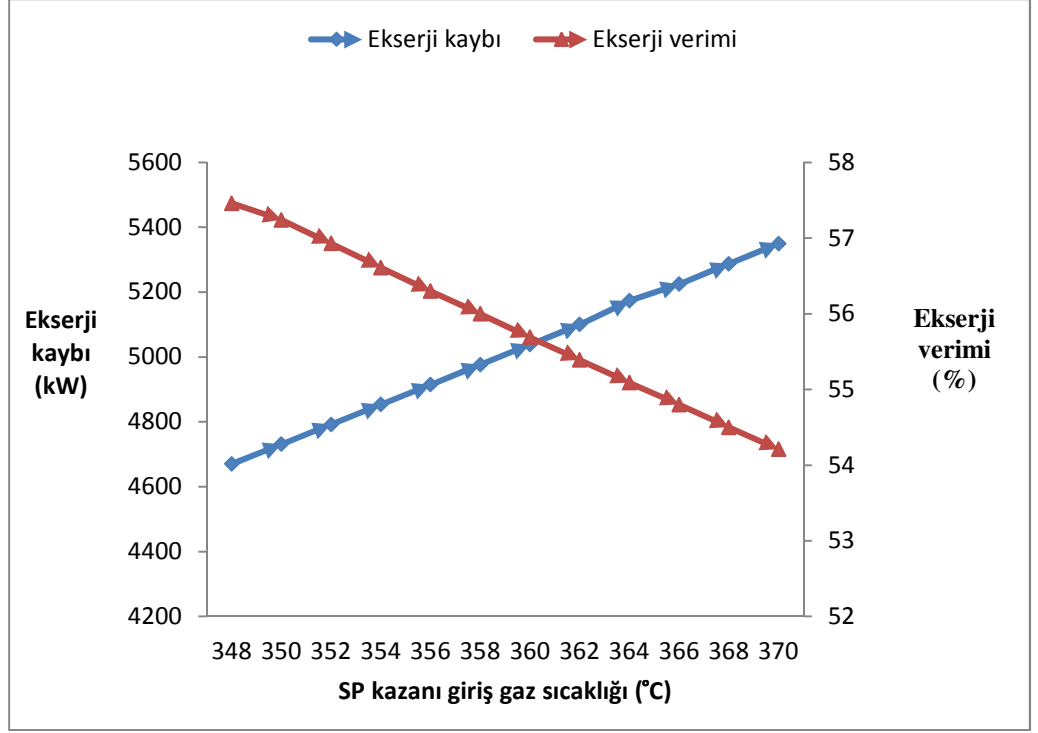
$$\eta = 0,050(T_0) + 55,35 \quad (39)$$

Şekil 5.4 'te görüldüğü gibi, referans sıcaklığı arttıkça sistemin ekserji verimliliği artmaktadır ayrıca Şekil 5.5'te referans sıcaklığın enerji verimliliğine etkisi olmadığını göstergesidir.



Şekil 5.5 Referans sıcaklığın enerji verimliliğine etkisi

Bu sonuçlardan yola çıkarak sistemin ekserji verimlilik kaybı, referans sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Referans sıcaklık değeri 15 ° C alındığında % 55,69 olan ekserji değeri, sıcaklık 2 ° C ye kadar düştüğünde %55,49 değerine düşmektedir. Aynı şekilde referans değeri 30 °C ye çıktığında ekserji verimliliği %56,27 değerine çıkmaktadır.



Şekil 5.6 SP kazanı giriş sıcaklığının ekserji kaybı ve verimine etkisi

SP kazanı giriş sıcaklığının ekserji kaybı ve verimliliğine olan etkisi yukarıdaki Şekil 5.7' de açıkça görüldüğü gibi sıcaklığın yükselmesinin sonucu sistemin toplam ekserji kaybını arttırarak, ekserji verimini azaltacaktır. Yapılan hesaplamalarda gaz giriş sıcaklığı minimum değer olarak 348 ° C baz alınmış ve bu değerde ekserji verimi %57,46 olarak elde edildi. Maksimum sıcaklık değeri 370 °C olarak alınmış bu değerde ekserji verimi %54,21 olarak hesaplanmıştır.

#### 5.4 WHR Sisteminin Çevresel Sonuçları

Projenin sebep olabileceği çevresel etkiler göz önünde bulundurmak gerekirse; çevresel sonuçları; (i) atmosfer, (ii) ses düzeyi, (iii) su kaynakları (iv) katı atıklar ve (v) ekolojik etkiler olarak sıralamak mümkündür. Proje faaliyeti, atık ısıyı elektrik üretimi için kullanacağından, çevreye yararı olacak şekilde ısıl kirliliğin etkilerinin azalmasına yol açacaktır. Projede üretilen elektrik proje yokluğunda şebekeden alınan elektriğin yerine geçecek, dolayısıyla sera gazı emisyonlarının büyük oranda azalmasını sağlayacaktır. Çevre ve Orman Bakanlığına göre, proje için ÇED raporu hazırlanmasına gerek yoktur belgesi alınmıştır. Türkiye’de ilk kez Batısöke Söke çimento fabrikası atık ısıdan elektrik enerjisi üretimi projesi için, karbon azaltımı akredite bir kuruluş tarafından doğrulanmış bulunmaktadır.

**(i) Atmosfere olan Etkileri:** Atık ısı geri dönüşüm boylerleri çimento üretimi süresince oluşan toz parçacıklarını yakalayarak, ortamdaki hava kalitesine katkıda bulunacaktır. Isıl kirlilik çimento fabrikasında herhangi bir yerde kullanılmadan direk olarak atmosfere verilen ısı düşünüldüğünde ciddi oranlardadır. Proje faaliyeti, enerji üretimi için atık ısıyı kullanacağından ısıl kirliliğin etkilerini azaltarak çalışanlara olumlu bir etki yaratacaktır.

**(ii) Ses Düzeyine olan Etkiler:** Türbin, soğutma kulesi, fanlar ve elektrik motorları gibi ekipmanlardan dolayı oluşan sesler ölçümler yapılarak izin verilen seviyenin altında tutulacaktır. Ayrıca fabrikanın mesafesi en yakında bulunan yerleşim biriminden belirlenen yasal uzaklıkta olduğundan ses ölçümleriyle ilgili olarak proje yasal sınırlarda bulunmaktadır.

**(iii) Suya olan Etkiler:** Projeden kaynaklanan herhangi bir zehirli veya zararlı madde atık suya karışmamaktadır. Atık su, kanalizasyon standartlarına göre işlem gördükten sonra drenaj sistemine boşaltılacaktır. Böylece, projenin su kalitesine büyük bir etkisi olmayacaktır.

**(iv) Katı atıklar üzerine Etkiler:** Projeden kaynaklanacak ana katı atıklar projenin inşaatı süresince ortaya çıkacak evsel atıklardır. İnşaat atıkları gerekli yerlere ulaştırılacaktır. İnşaat alanındaki evsel atıkların toplanması için

öp tenekeleri koyulacaktır. Evsel atıklar zamanında atık toplama merkezlerine nakledilecektir.

(v) **Ekolojik Etkiler:** Proje var olan imento fabrikasının içerisine inşaa edileceğinden ötürü, herhangi bir bitki dokusuna zarar vermeyecektir. Projenin ekolojik etkileri dolayısıyla sıfır olacaktır.

**Çizelge 5.14** Seçilen kredilendirme periyodu süresince yaklaşık emisyon azaltımları

<b>Yıllar</b>	<b>CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı (ton/yıl)</b>
01/06/2011-31/12/2012	11.329
01/01/2012-31/12/2013	16.993
01/01/2013-31/12/2014	16.993
01/01/2014-31/12/2015	16.993
01/01/2015-31/12/2016	16.993
01/01/2016-31/12/2017	16.993
01/01/2017-31/12/2018	16.993
01/01/2018-31/12/2019	16.993
01/01/2019-31/12/2020	16.993
01/01/2021 ile 31/05/2022	5.664
<b>Toplam beklenen azatlım (ton)</b>	<b>169.930</b>
<b>Toplam kredilendirme yılı</b>	<b>10</b>
<b>Kredilendirme süresince yıllık ortalama emisyon azaltımları (ton)</b>	<b>16.993</b>

## 6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, WHR sisteminin çimento fabrikasında uygulanabilirliği araştırıldı ve sistemin enerji ve ekserji analizleri yapıldı. Sistemin çevresel etkileri veya olabilecek etkileri üzerinde duruldu. Ayrıca çevre sıcaklığının sistemin enerji ve ekserji verimliliklerine olan etkisi incelenmiştir. Genel olarak sistem ile ilgili değerlendirmeler ve önerilere aşağıda yer verilmiştir.

- i. Çizelge 5.15 te açıkça görünen türbin genişmesi ve kondenserdeki ısı transferi ekserji kaybında en büyük etkendir. Bu kayıpları azaltmak türbin ve kondenser ekipmanlarında kojenerasyonun tamamlanması ile mümkün olabilir.
- ii. Buhar türbininden çıkan buharın kondens haline dönüşmesi nedeniyle çıkan ekserji kaybı, ısı transferini sağlayan soğutma suyu ile sıcaklık farklarını düşürülerek azaltılabilir. Türbin çıkışındaki genişmeden kaynaklanan ekserji kaybı türbin dizayn kriterleri ve izentropik verimiyle ilgilidir.
- iii. Sistemin diğer ekipmanlarından, AQC ve SP kazanları majör ekserji kayıplarına neden olmaktadır. Bu ekipmanlar öncelikle çıkış ekserjilerinin hammadde kurutmasında kullanılmasından dolayı bu kazanların çıkış ekserji kayıpları tam anlamıyla kayıp olmaktan çıkmaktadır.
- iv. SP ve AQC kazanlarındaki ekserji kayıplarını minimize etmek ancak giren besleme suyu ile sıcak gazın sıcaklık farklılıklarını yani ısı transferi gerçekleştirenlerin sıcaklık farklılıklarını minimize etmek gerekir.
- v. SP kazanı AQC kazanından yapısal farklılığı içindeki boru demetlerinde kanatçık olmamasıdır. Bu da ısı transfer yüzey alanını etkilediğinden SP kazanında ekserji kaybına sebep olmaktadır. Bu yüzden SP boru demetlerinin yüzey alanını arttırmak ekserji verimliliği için pozitif olsa da bu dizayn değişikliğinin parasal yönünün de değerlendirilmesi gerekir.

- vi. SP ve AQC kazanlarında ekserji kaybı besleme suyunun ön ısıtmaya tabi tutulmasıyla düşürülebilir. Bu gibi dizayn değişiklikleri ve bu değişiklikler doğal olarak mali yönler birlikte incelenmeye alınmalıdır.

Üretilen bu güç, çimento üretim hattında kullanılabilir ki bu sadece üretim safhasında enerji kaynaklarının çok daha verimli kullanılması konusunda değil çevreye yararlı etkilerin büyük oranda artışına ve şirketin ekonomik alanda üretim gücünün iyileştirilmesi ile pazar payının artışını da etkilemektedir.

Düşük sıcaklık teknolojisi ile atık ısı üretimi, yeni kuru tip çimento üretim hatlarında bunların ön hazırlık altında çimento üretim prosesinde enerji tüketiminin azaltmanın haricinde bazı avantajları vardır ki örneğin üretim esnasındaki verimlilik ile sıcak enerjiyi hızlıca geliştirebilir, arttırabilir. Bunun anlamı, çimento üretimindeki işçilik dağılımı haricinde eğer iki sistem aynı anda dizayn edilirse bir büyük sistem ile birleştirilebilir. Bu nedenle düşük sıcaklıklı atık ısı üretim teknolojisinin kullanımı çimento üretim hatları için geniş bir yelpaze ve perspektif sağlar.

Sonuç olarak; Batisöke çimento WHR projesi için yıllık 17 bin, on yıllık yaklaşık 170 bin ton karbondioksit azaltımı yaptığı üçüncü taraf bağımsız bir kuruluş (tuev-sued) tarafından doğrulanmış bulunmaktadır. Elektrik üretimi ile emisyon azaltımı arasında 1,7 kg/kWh birim azalma esas alındığında, yıllık sera gazı salınımında sağlanacak azalma, 3.876.000 ton olarak ümit edilmektedir.

Bir ağacın yılda ortalama 20 ton civarında CO<sub>2</sub> emdiği dikkate alınırsa, hayata geçirilmesi planlanan bu proje ile sera gazı salınımında sağlanan azalma, 193.800 ağaçtan oluşan bir ormanın sağladığı fayda ile eşdeğer olduğu görülür.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akgün, F., ve Atakül H.**, 2010, Çimento üretiminde enerji verimliliği, Tübitak Türkiye bilimsel ve teknik araştırma kurumu Marmara araştırma merkezi seminer notları, cilt III, T.Ç.M.B, Kocaeli
- Burkut, E.**, 1999, Su tesisatı tesisat projesini etkiler çünkü su tesisatın kanıdır IV. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi.
- Burkut, E.**, 1997, Buhar kazanı besisi suyu hazırlama teknikleri içinde ters osmos cihazının ekonomik yeri , III. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi.
- Bundela, P.S. and Chawla V.**, 2010 Sustainable Development through Waste Heat Recovery ,Madhya Pradesh Pollution Control Board, Vijay Nagar Jabalpur Madhya Pradesh, India, Associated Cement Corporation Kymore, Katni Madhya Pradesh, India. *American Journal of Environmental Sciences* 6, 83-89.
- Çengel, Y. ve Cimbala, J.M.**, 2007, Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları, Güven Bilimsel Yayınevi .
- Çengel, Y.,Boles, M.A.**, 2008, Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik, Güven Bilimsel Yayınevi.
- Dalkılıç A., Kürekçi N., Demir H.**, 2008 Bir fırına ait bacadan ısı değiştirici yardımıyla atık ısı geri kazanımı, Tesisat Mühendisliği, 5-11.
- Duruk, A.M.**, 1994, Soğutma kulesi ve soğutma devre elemanlarının tanıtım ve bakımı, Frigo soğutma San. Tic. Aş.
- Engin T. and Ari, V.**, 2005, Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study, Department of Mechanical Engineering, University of Sakarya, Energy Conversion and Management 46, 551–562.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Genceli, O.**, 2008, Ölçme tekniği (Boyut, basınç, akış ve sıcaklık ölçmeleri), İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Birsen Yayınevi.
- Hai, H.D.**, 2010, Tender for whr Project in BATISÖKE Söke cement plant technical part “thermal power deparment in Sinoma energy conversation
- Hepbaşlı, A.**, 2010, “Enerji verimliliği ve yönetim sistemi yaklaşım ve uygulamalar” Schneider Electric enerji verimliliği serisi 1, Ege üniversitesi
- Hasanbeigi, A., Menke, C., and Therdyothin, A.**, 2010, The use of conservation supply curves in energy policy and economic analysis: The case study of Thai cement industry, *Energy Policy* 38, 392–405.
- Hasanbeigi, A., Price L., Lu, H., and Lan, W.**, 2010, “ Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants “ *Energy* 35, 3461-3473.
- Kılıç, R.**, 2006, Sanayide buhar kullanımı ve teknolojik gelişmeler” Trakya Üniversitesi yüksek lisans tezi
- Kuleli, Ö.**, 2009, Çimento mühendisliği el kitabı” ODTÜ çimento mühendisliği programı öğretim üyesi, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği ar-ge enstitüsü, Ankara
- Küçükşahin, F.**, 2007, “Buhar ve gaz türbinleri ” İTÜ denizcilik fakültesi, Birsen Yayınevi İstanbul
- Kaya, M.**, 2008, ”Buharlı güç çevrim veriminin ekserji analiziyle belirlenmesi” CBÜ Teknik bilimler dergisi, cilt 1.
- Khurana, B., Banerjee, R. and Gaitonde, U.**, 2002, Energy balance and cogeneration for a cement plant “ Indian Institute of Technology, Energy Systems Engineering IIT Bombay, Powai, Mumbai 400076, India. *Applied Thermal Engineering* 22, 485–494

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karrahe, A.**, 2009, ‘‘Waste heat recovery system snow an integral part of FLSmidth’s offerings’’Group Leader of Alternative Fuels&Waste Heat Recovery Systems at FLSmidth, India.
- Kabir, G.,Abubakar, A.I., El-Nafaty, U.A.**, 2010 ‘‘Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant’’ *Energy* 35, 1237–1243
- Lopez, L.,Blanco, J. M., Bonilla, J. J.,Baezat, S. and J. M. Salat**, 1998, Determination of energy and exergy of waste heat in the industry of thebasquecountry ‘‘ *Applied Thermal Engineering* Vol. 18, Nos 3 4, pp. 187 197.
- Mirolli, M.D.**, 2000, Ammonia-Water Based Thermal Conversion Technology: Applications in Waste Heat Recovery for the Cement Industry, Chief Technology Officer Recurrent Engineering, LLC
- Mirolli\*, M.D.**, 2000, The Kalina cycle® for cement kiln waste heat recovery power plants’’ , Chief Technology Officer Recurrent Engineering, LLC
- International Seminar on Cement and Building Materials**, 2000 Cogeneration of Power Utilising Waste Heat in Cement Manufacture: Technological Perspectives’’, New Delhi
- Özgener, Ö.**, 2005, Sera ısıtması için güneş enerjisi destekli toprak kaynaklı bir ısı pompası sisteminin tasarımı ile enerji, ekserji ve eksergoekonomik analiz yöntemleri kullanarak performansının değerlendirilmesi, Ege Üniversitesi .
- Özgener, L.**, 2011, A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 9, Pages 4483-4490.
- Rasul, M.G.,Widianto, W. andMohanty, B.**, 2005, Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia, *Applied Thermal Engineering* 25, 2950–2965.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sintek Endüstri**, 2010, Waste heat recovery (WHR) power regeneration for cement industry’
- Scope Kawasaki Heavy Industries Newsletter**, 2008, ”The first generation technology for pure low-temperature WHR power generations for cement kilns” Kawasaki plant systems, Japan
- Selbaş, R.**, 1992 “Atık ısı enerjisinden yararlanma yöntemleri ve uygulamaları” Akdeniz Üniversitesi yüksek lisans tezi
- Ino, T.**, 2010, Kawasaki plant systems, Waste heat recovery power generation (WHRPG) for cement plants , *Cement international* vol (8) Tokyo, Japan
- Tarakcioğlu, A.**, 2006, Sanayide atık ısıdan yararlanma yöntemleri, Yıldız Teknik Üniversitesi yüksek lisans tezi, İstanbul
- Technical department of Sinoma**, 2009, Brief introduction and basic knowledge of power generating system, Sinoma energy conversationltd.
- Technical department of Sinoma**, 2009, Working principle and structure of boilers, Sinoma energy conversationltd.
- Technical department of Sinoma**, 2009, The Principle and System of Auxiliary Devices of Power Station” Sinoma energy conversation Ltd.
- Utlu, Z., Sogut, Z., Hepbasli, A., and Oktay Z.**, 2006, Energy and exergy analyses of a raw mill in a cement production, *Applied Thermal Engineering* 26, 2479–2489
- Wang J., Dai, Y., Gao L.**, 2009, Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry, *Applied Energy* 86, 941–948
- Yalçın, S.E.**, 2006, Buhar kazanlarının eksergoekonomik çözümlemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi yüksek lisans tezi, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 01.12.1983 tarihinde Aydın'ın Söke ilçesinde doğmuştur. İlk, orta ve lise eğitimini Söke Lisesi'nde dereceyle tamamlamıştır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü 2007 yılında başarıyla bitirmiştir.

Kırklareli 33. Mknz Tugayında 2008 yılında askerlik vazifesini yerine getirmiştir. Yazar, 2008 ve 2009 yıllarında İstanbul Okset çelik kalıp AŞ de araştırma ve geliştirme ağırlıklı olarak, üretim mühendisliği görevinde çalışmıştır.

ISO 9000, ISO 9001 ve OHSAS 18001 kalite sistemleri iç tetkikçi belgelerine sahiptir.

2009 yılından buyana Batı Anadolu Grup şirketlerine bağlı olarak, Makine Bakım departmanında başladığı görevine, Yatırım ve Proje Mühendisi olarak devam etmektedir. Mevcut görevinde çimento fabrikalarında enerji verimliliği ile ilgili uygulama projeleri üzerine çalışmaları mevcuttur, İngilizce bilmektedir.