



DÖRT KADEMELİ PARALEL AKIŞLI ÖNKALSİNATÖRLÜ ÇİMENTO FABRİKASINDA ENERJİ AKIMLARI DENKLİKLERİNİN MODELLENMESİ

Ahmet Fevzi SAVAŞ*

* Dumlupınar Üniversitesi, Osmaneli Meslek Yüksekokulu, 11500, Osmaneli, Bilecik, TÜRKİYE,
savasafevzi@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, paralel akışlı önkalsinatörlü dört kademeli çimento üretim sistemlerinde enerji akımı denklıkları kurulmuştur. Çimento üretim prosesinde enerji akımı denklığı bir bütün olarak ele alınabileceği gibi bu çalışmada olduğu gibi önisıtıcı, kalsinatör, döner fırın ve soğutucu ünite için ayrı ayrı denklik oluşturulabilir. Bu modelin temeli, fabrika üniteleri önisıtıcı, önkalsinatör, döner fırın ve ızgaralı soğutucu enerji dengesine dayanmaktadır. Bu modelleme ile döner fırın, önkalsinatör ve paralel akışlı önisıtıcı siklonların her birinin giriş ve çıkışlarındaki katı ve gaz kütlelerin enerji miktarları hesaplanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Paralel akış, Önkalsinatör, Enerji, Modelleme

MODELING OF ENERGY FLOW BALANCES AT A FOUR LEVELLED PARALLEL FLOW PRECALCINER CEMENT PLANT

ABSTRACT

In this present study, energy flow balances of parallel flow precalciner four levelled cement production systems were generated. At cement production systems, energy flow balances can be considered as either integrated or separately for preheater, calcinator, rotary kiln and cooler unit. Fundamental of this modelling is energy balance of plant units such as precalciner, calcinator, rotary kiln and grate coolers. Amount of energy of solid and gases at the input and output of rotary kiln, calcinator and parallel flow preheater cyclones, can be calculated with this modeling.

Keywords: Parallel flow, Precalciner, Energy, Modelling

1. GİRİŞ

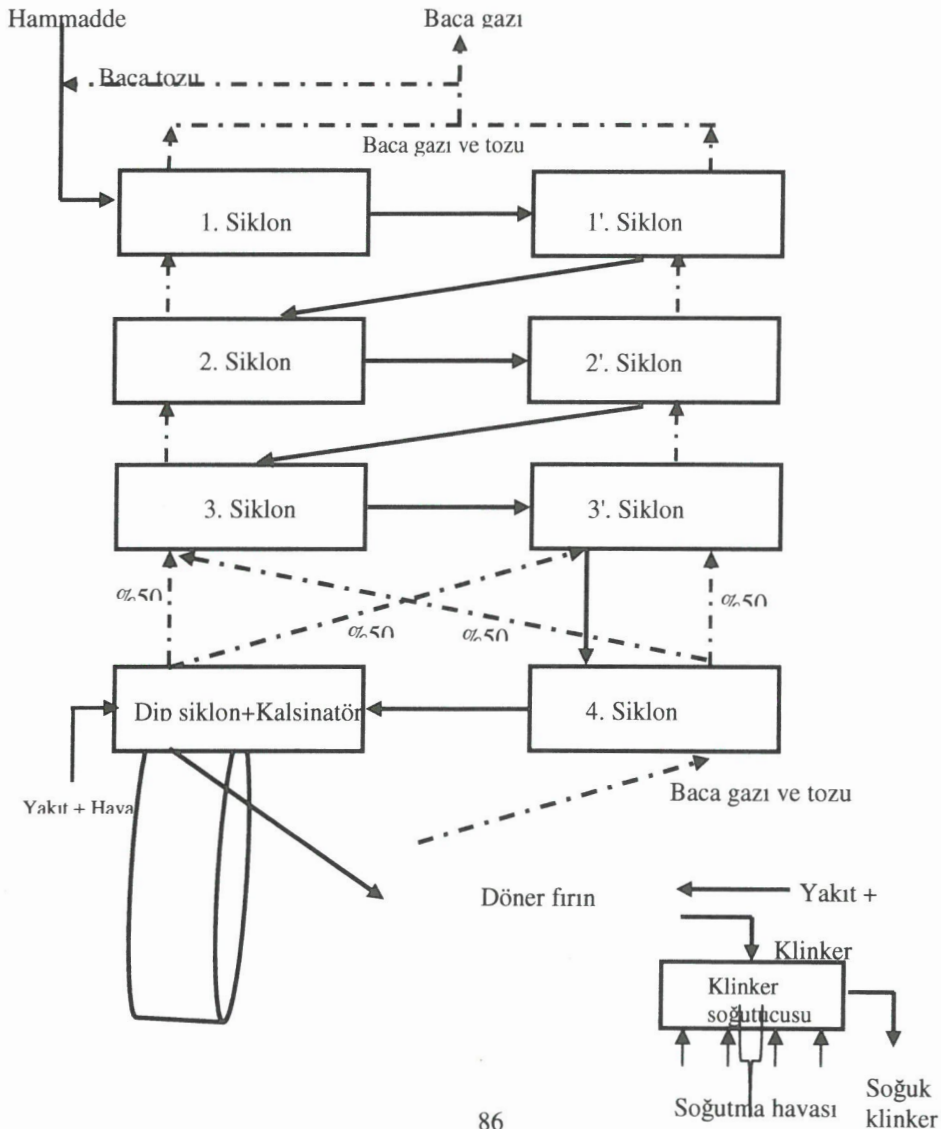
Dünya enerji kaynaklarının gün geçtikçe azalması bir çok ülkeyi enerji politikalarını yeniden gözden geçirmelerine ve verimli enerji kullanımı konusunda etkili tedbirler almalarına yöneltmiştir. Petrol, doğal gaz ve kömür gibi enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanan enerji sistemlerinin geliştirilmesi çok önemlidir. Çimento klinkeri üretimi sırasında, ham karışımın sisteme siklonlu önisıtıcıdan beslenmesi ile başlayan ve klinkerin soğutucudan çıkması ile tamamlanan işlemler sırasında oluşan ısı ve kütle taşınım olaylarını formülize etmek için çimento fabrikasında matematiksel modelleme yapılması mümkündür [1, 2]. Bunun için enerji ve kütle denklıkları esas alınarak her bir ünite için (önisıtıcı, kalsinatör, döner fırın ve soğutucu gibi) ayrı modeller geliştirilir. Modellerin her biri, hammadde beslemesi, gaz ve toz akışı şeklinde matematiksel olarak bir birine bağlıdır ve tüm proses ünitesi içinde kararlı hal koşulunu hesaplamak mümkündür [3].

Bu çalışmadan önce kütle ve enerji denklıkları ile ilgili yapılmış modelleme çalışmalarında ELKJAER [4] sadece ön ısıtıcı siklonlarda ısıl analiz için modelleme yapmıştır. LOCHER [5] Çimento üretim sistemlerinde kalsinatör, döner fırın ve soğutucu üniteleri ile yanma üzerine ayrı ayrı çalışmalar yapmıştır. KOLİP [6] ise seri akışlı önisıtıcı siklonlu ve kalsinatörlü çimento fabrikalarında enerji ve ekserji analizi isimli doktora çalışmasında bu konuda ilk olarak kütle, enerji ve ekserji modellemelerinin üçünü birlikte yapmıştır. SAVAŞ [7] ise paralel akışlı kalsinatörlü çimento üretim sisteminde kütle denklığı üzerine modelleme çalışması yapmıştır. Bu çalışmada ise enerji denklığı üzerine modelleme yapılmıştır.

Paralel akışlı önkalsinatörlü çimento üretim sistemlerinde hammadde ve gaz akışı şöyle olmaktadır. Döner fırından çıkan baca gazları, paralel siklon grubun en altında yer alan dip siklona girerken dip siklondan çıkan hammadde önkalsinatöre girmektedir ve önkalsinatörden çıkan büyük oranda kalsine olmuş hammadde döner fırına girmektedir. Önkalsinatörden çıkan baca gazları ile dip siklondan çıkan baca gazları bir damper sistemi vasıtasıyla arzu edilen oranlarda (çoğunlukla eşit miktarda) paralel akışlı siklon grubunun her birine paylaşılır. Baca gazları, paralel siklon gruplarında eşit olarak yukarıya doğru çıkarken hammaddenin tamamı 1 nolu siklondan beslenir. Tüm hammadde önısıtıcı siklon grubunun bir tarafından diğer tarafına geçmek suretiyle bütün siklonlardan seri bir şekilde geçer. Bu sistemin ana özelliği, seri hammadde akımının her iki paralel gaz akımından geçmesidir. Yani gaz miktarının sadece yarısı hammaddenin tamamı ile temas eder (Şekil.1.).

2. ÇİMENTO FABRİKALARINDA ENERJİ DENKLİKLERİNİN KURULMASI

Isının büyük oranda önemli olduğu çimento üretim proseslerinde kütle ve enerji denkliklerinin çıkarılması üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır. Bunlardan en önemlileri [1, 8, 9, 10, 11, 12, 13] dir. Yaş sistem çimento üretiminde birim klinker başına enerji tüketimi 4500 kJ/kg.klinker iken bu değer klasik önısıtıcı siklonlu sistem çimento üretiminde 3300 kJ/kg.klinker, geliştirilmiş önkalsinatörlü sistemlerde ise 3070 kJ/kg.klinker değerine kadar düşürülebilmektedir. Özgül ısı tüketimi, çimento üretiminde maliyeti doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Özgül ısı tüketimi; kullanılan yakıt kalitesinden, hammaddenin pişebilirlik kabiliyetinden ve fabrikanın sahip olduğu teknolojik imkânlarından etkilenmektedir. Minimum çimento maliyeti için kütle ve enerji denkliklerinin iyi yapılması ve takip edilmesi gerekir [14, 15].



2.1. Katı ve Gaz Maddelerin Entalpileri

Çimento üretim proseslerinde hammadde, baca tozu ve klinker katı akımları; kaçak hava, soğutma havası, kalsinasyondan açığa çıkan CO₂ ve yakıtın yanmasından oluşan yanma gazları da gaz akımlarını meydana getirirler. Katı ve gaz madde akımlarının entalpileri, özgül ısı kapasite (cp) ifadesinden faydalanılarak hesaplanır. Bu özgül ısı kapasite ifadeleri katı ve gaz madde akımları için Tablo 2.1 ve Tablo 2.2' te verilmektedir.

Tablo 2. 1. Katı akımların özgül ısı fonksiyonları [15,16, 17]

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

Özgül ısı kapasite cp ifadesinden faydalanılarak entalpi ifadesi,

$$dh = cp \cdot dt \quad [1]$$

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

$$H_{sbuh} = M_{su} \cdot \left[cp_{sv}(373 - T_0) + \Delta H_{buh}(373) + \int_{373}^T cp_{buh} \cdot dT \right] \quad [2]$$

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

Tablo 2. 2. Gaz akımların özgül ısı fonksiyonları [18, 19].

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

2.2. Kalsinatör ve Kalsinatör Üstü Siklonlardaki Reaksiyon Enerjileri

Hammadde fırına girmeden önce bir kalsinatörde miktar kalsine olmaktadır. Bu oran, paralel akışlı önkalsinatörlü sistemlerde döner fırına beslenen hammadde de % 90-95' e ulaşmaktadır [20].

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

$$Q_{Rk} = 3200.[CaO, K_A + Yk.Ash.CaO, y] + 2175.[Yk.Ash.MgO, y] \quad [3]$$

Kalsinatörün hemen üzerindeki siklonda da hammadde bir miktar kalsine olmaktadır. Bu reaksiyon enerjisi kalsinatördeki benzer olup aşağıdaki şekilde hesaplanır (NI=8);

$$Q_R = 3200.CaO, (NI-2) + 2175.MgO, (NI-2) \quad [4]$$

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

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

$$YKE = 3200.CaO, y_{kar} \quad [5]$$

$$YKE, (2) = 3200.CaO, y_{kar} + 2175.MgO, y_{kar} \quad [6]$$

ifadeleri ile hesaplanır.

2. 3. Döner Fırında Klinker Oluşum Entalpisi

Çimento klinkeri döner fırınlarda pişirilmektedir. Klinker oluşum entalpisi çeşitli yollarla hesaplanabilmektedir. Burada kullanılan oluşum entalpisinin hesaplanması, H. ZUR STRASSEN' in vermiş olduğu faktörlerle klinkerin kimyasal analizlerinin çarpılıp toplanmasıyla yapılmaktadır [21].

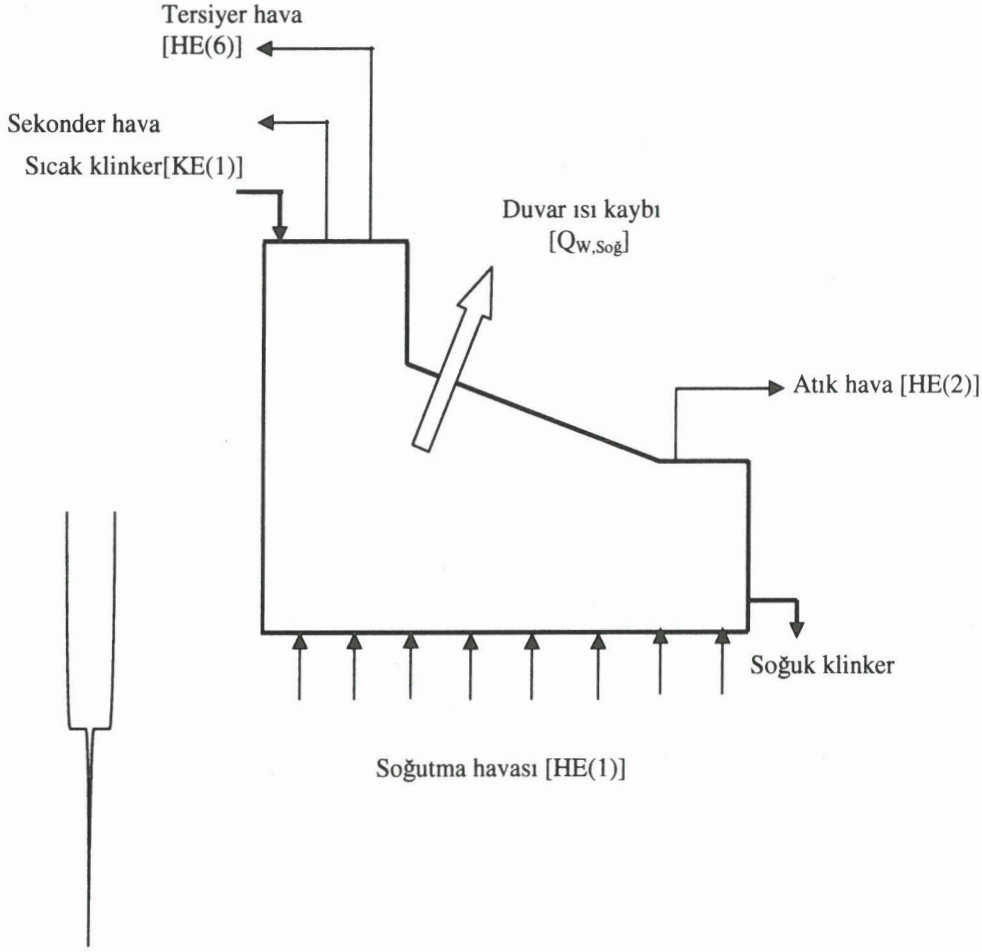
$$HK = \%CaO, k \cdot 3200 + \%MgO, k \cdot 2175 + \%Al_2O_3, k \cdot 1721 - [\%Fe_2O_3, k \cdot 247 + \%SiO_2, k \cdot 2142] \quad [7]$$

2. 4. Klinker Soğutucu Ünitesinde Enerji Denkliği

Farklı tiplerdeki klinker soğutucularını termal verimliliklerine göre proses mühendisliği sınırları içinde karşılaştırmak önemli bir sorun teşkil etmektedir. Bunlar yakıt enerjisi tüketimi, hava fazlası, döner fırında önsoğutma bölgesi uzunluğu ve klinker granülometrisi gibi hammadde ve yakıtın özelliklerinden etkilenen unsurlardır [22].

Klinker soğutucularının termal etkinliğini değerlendirmek için deneyler yapılarak soğutucu etrafındaki kütle ve enerji denklikleri kurulmuştur. Bu denkliklerden her hangi birini temel alarak elde edilebilen karakteristik kriterler ile hem soğutucunun tüm prosese etkisini belirlemek, hem de soğutucuyu optimize etmek için gerekli yöntemleri tahmin etmek mümkündür. Klinker soğutucularında kütle ve enerji denkleğinin kurulmasına yönelik çalışmaların en önemlileri [8, 21, 22, 23,] dir.

Klinker soğutucuları, basit olarak, entalpi akışı halindeki enerji akışının pişme prosesi için geri kazanılamayan kısmından ileri gelen enerji kayıplarını göz önüne alarak değerlendirilebilir. Bunlarla birlikte, soğutucunun işletmesini optimize etmek veya enerji geri kazanımını maksimum hale getirmek için spesifik belirlemeler sağlayamaması yüzünden enerji kaybı, yalnız başına, zayıf bir termal etkinliğin sebebinin açıklamak için yeterli değildir. Bu nedenle soğutucunun tipine, proses içinde yerleştirilmesine, soğutucu etrafındaki kütle ve enerji denklikleri kurulabilmesine uygun olarak verimlilik terimi tanımlanır Şekil 2.1 ve Tablo 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2. 1. Soğutucu ünite giren-çıkan enerji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 2. 3. Soğutucu ünite giren-çıkan enerjiler

Giren Enerjiler	Çıkan Enerjiler
- Sıcak klinker ile [KE(1)]	- Soğuk klinker ile [KE(2)]
- Soğutma havası ile [HE(1)]	- Soğutucudan atılan atık hava ile [HE(2)]
	- Tersiyer hava ile [HE(6)]
	- Sekonder hava ile [HE(3)]
	- Duvar ısı kaybı ile [Q _{w, soğ}]

Çimento üretim sisteminde genel olarak Izgaralı, Döner ve planet olmak üzere üç tip soğutucu kullanılmaktadır. Izgaralı soğutucu için duvardan kaybolan ısı konveksiyon ve radyasyon yoluyla olmak üzere [22].

$$Q_{kon} = \alpha_{kon} \cdot A_w \cdot (T_w - T_0) \quad [8]$$

$$Q_{rad} = \epsilon w \cdot \sigma \cdot A_w \cdot (T_w^4 - T_0^4) \quad [9]$$

Burada; A_w soğutucunun duvar yüzey alanını, ε_w duvar yüzeyinden yayılma katsayısını ($\varepsilon_w=0,9$), σ^B Stefan-Boltzman sabitini ($\sigma^B=5,67.10^{-8}W/m^2.K^4$ ve α_{kon} konvektif ısı iletim katsayısını ($\alpha_{kon} = 7W/m^2.K$) göstermektedir.

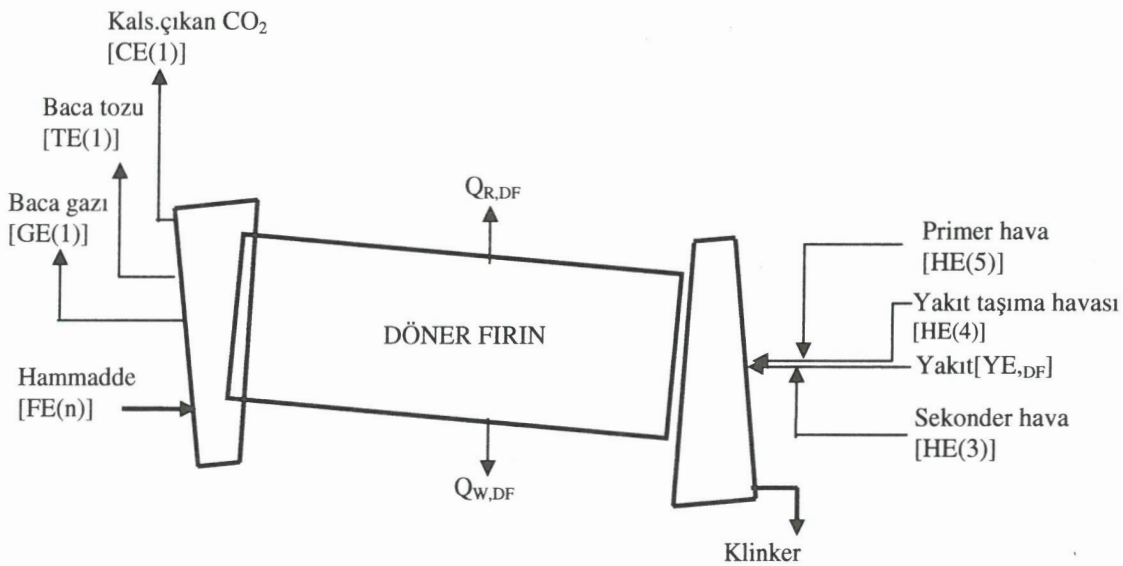
Federal Almanya’ da çimento araştırma enstitüsünde klinker soğutucuları üzerinde çalışan bir grup tarafından klinkeri temel olarak enerji kaybı ile ilgili yapılan çalışma sonuçları Tablo 2. 4’ da verilmektedir [22].

Tablo 2. 4. Klinker temel alınarak soğutucuların enerji kayıpları

Soğutucu Tipi	Kayıp Enerji (kJ/kg.klin.)	Ölçüm Sayısı
Döner soğutucu	440	2
Planet soğutucu	555	2
Izgaralı soğutucu	480–570	7

2. 5. Döner Fırın Ünitesinde Enerji Denkliği

Çimento fabrikalarında döner fırın ünitesinde enerji denkleğinin kurulması yanmanın yanında diğer faktörlerin de bilinmesini gerektirmektedir [25, 26]. Çimento üretim sistemlerinin tümünde hammaddenin pişirilerek klinker haline getirilmesi döner fırın ünitesinde gerçekleşmektedir. Döner fırın ünitesi, bütün üretim metotlarında aynıdır ve ters akım prensibine göre çalışan bir ısı değıştiricisi (ısı eşanjörü) gibidir. Yaş, yarı yaş ve kuru önısıtıcılı siklonlu sistemlerde yakıtın tamamı döner fırında yakılır. Önkalsinatörlü sistemlerde ise yakıtın bir kısmı kalsinatör ünitesinde yakılmaktadır. Döner fırında enerji akışı, yakıtın her iki ünite de yakılabilme hali göz önünde bulundurularak bütün sistemler için geçerli olan durum Şekil 2. 3’ de gösterilmektedir.



Şekil 2. 3. Döner fırın ünitesinde giren-çıkran enerji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 2. 5. Döner fırın ünitesine giren-çıkan enerji akımları

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

2. 6. Döner Fırınlarda Duvar Isı Kayıplarının Hesaplanması

Döner fırınların duvarından ısı kaybı radyasyon ve konveksiyon ile olmaktadır. Fırın enerji dengliği için döner fırınların duvar ısı kayıplarını kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalan yaklaşımlarla hesaplamak yeterli olmaktadır [27, 28]. GARDEIK ve arkadaşları döner fırın duvar ısı kayıplarını veren deneysel ifadeleri yayınlamışlardır [10, 11, 12, 22]. Bu çalışma döner fırında ısı dengesi yapılmasında çok kolaylık sağlamaktadır ve burada ısı transferi katsayılarının belirlenmesi için yaklaşık eşitlikler verilmiştir.

Döner fırın duvarından kayıp olan ısı $\Delta x=1m'$ lik fırın uzunluğu için GARDEIK ve arkadaşlarının çalışmaları dikkate alınarak şöyle hesaplanır.

Fırından çevreye kondüksiyon ile olan ısı transferi:

$$\Delta Q_{kon} = \alpha_{kon} \cdot (T_w - T_0) \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x \quad [10]$$

Fırından çevreye radyasyonla olan ısı transferi:

$$Q_{rad} = \alpha_{rad} \cdot (T_w - T_0) \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x \quad [11]$$

Fırından çevreye olan toplam ısı transferi aşağıdaki ifade ile hesaplanır.

$$Q_{W,DF} = \Delta Q_{kon} + \Delta Q_{rad} \quad [12]$$

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

$$q_{W,DF} = \frac{Q_{W,DF}}{m_{klinker}} \quad [13]$$

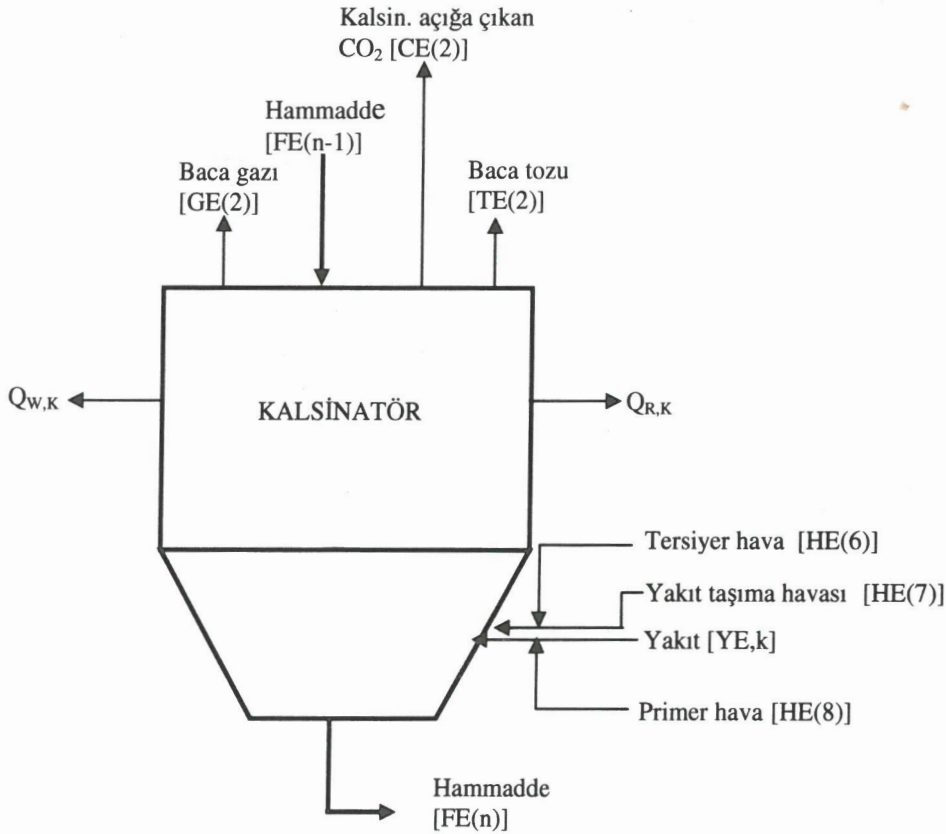
denkliği ile hesaplanır.

2.7. Kalsinatör Ünitesinde Enerji Denkliği

Enerji tasarrufu sağlamak ve fırınların kapasitesini arttırmak amacıyla kalsinasyon işleminin döner fırın bünyesinden alınarak, dip siklonda ikinci bir yakıt yakıldığında bu siklon kalsinatör adını almaktadır [29, 30]. Esasen dip siklonda yakıt yanmasından başka da önisitici siklonlu sistemden farkı yoktur. Kalsinatör içinde genel olarak gerçekleşen proses uygun toz farin (hammadde) besleme akımıyla birlikte tersiyer havanın, döner fırın çıkış toz ve gazları ile kalsinatördeki yanma sisteminden oluşan yanma gazlarının karışması esasına dayanmaktadır. Ancak burada incelenen paralel akışlı önkalsinatörlü sistemde döner fırından çıkan toz ve gazlar kalsinatör ünitesine değil, bir üst siklona yönlendirilmektedir. Klinker formasyonuna karışan ardışık reaksiyonlar, basitleştirme için üç grupta incelenir [31];

- 1- Kaolinit'in dehidratasyonu ve $MgCO_3$ ' in dekarbonasyonu sadece kalsinatörde ve kalsinatör üstü siklonda oluşmaktadır,
- 2- Kalsinasyonun önemli bir kısmı kalsinatörde meydana gelmektedir. Kalsinasyon reaksiyon enerjisinin bir kısmı klinker faz oluşumunda geri alınmaktadır,
- 3- C_3S , C_3A ve C_4AF' nin oluşumu sadece döner fırında olur ve bu reaksiyon ekzotermiktir.

Kalsinatör çıkışında yanma gazları içindeki tozların sıcaklığının gaz sıcaklığına eşit olduğu kabul edilir. Kalsinatör ünitesinde reaksiyon entalpisini belirlemek için toplam reaksiyon entalpisinin kalsinatör ve döner fırın arasında doğru paylaşılması gerekir. Bundan başka, $CaCO_3$ ' in dekarbonasyonu ile C_2S oluşumunun aynı zamanda meydana geldiği varsayılır. Paralel akışlı önkalsinasyonlu sistemlerde kalsinasyon; hammaddenin özelliklerine, işletme koşullarına ve kalsinatörün tasarımına bağlıdır. İkincil yakıcıya verilen yakıt; kimyasal kompozisyon, partikül boyut dağılımı, yanma ve kalsinasyon sonundaki CO_2 ' nin kısmi basıncı, materyal sıcaklığı, ve kalsinatördeki tutulma zamanına bağlıdır [9], (Şekil 2.4 ve Tablo 2.6).



Şekil 2.4. Kalsinatörde giren-çıkran enerjilerin şematik gösterilişi

Tablo 2. 6. Kalsinatör ünitesinde giren-çıkan enerjiler

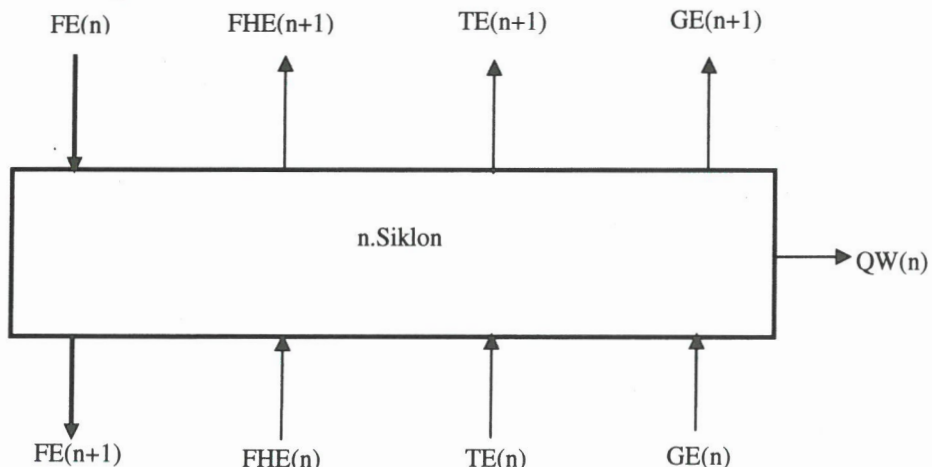
Giren Enerjiler	Çıkan Enerjiler
- Hammadde ile [FE(n-1)]	- Baca tozu ile [TE(2)]
- Tersiyer hava ile [HE(6)]	- Baca gazı ile [GE(2)]
- Yakıt taşıma havası ile [HE(7)]	- Hammadde ile [FE(n)]
- Primer hava ile [HE(8)]	- Kalsinasyondan açığa çıkan CO ₂ ile [CE(2)]
- Yakıt ile [YE,k]	- Kalsinasyon reaksiyon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

2. 8. Önısıtıcı Siklon Kademelerinde Enerji Denkliği

Isı mühendisliği bakımından en önemli nokta tozun ve gazın birbirine karıştırılmasıdır. Prensipde toz ve gaz arasında bütün olarak sıcaklık eşitlemesinden bahsedilemez. Bu durum maksimum ısı değişimine karşılık gelmektedir. Isı değişiminin, dolayısıyla da termal verimlilik siklonun tasarımına bağlıdır. Spesifik örneklerdeki termal verim, ayrı ayrı siklonlardaki enerji dengesinin ve operasyonel ölçümlerin yardımıyla belirlenebilir. Ancak bu ölçümler karmaşıktır ve önısıtıcının aşağı bölgeleri için kullanışlı değildir. Bu yüzden önısıtıcı siklon kademelerinde enerji denkliği akışkan maddelere dayanan hesaplamalarla mümkün olmaktadır [9].

Her siklon kademesinde enerji denkliği yapılırken hammaddenin, baca gazının, yakma havasının, fırın giriş-çıkış sızdırmazlıklarından giren kaçak havanın, kalsinasyondan meydana gelen CO₂' nin ısı yükleri ele alınır. Ayrıca, hammadde nemi ve kristal suyunun buharlaşma enerjisi ve teorik reaksiyon enerjisi (MgCO₃, CaCO₃ ve kil minerallerinin ilgili kademelerde ayrışmaları için verilen) ısı yüklerde dikkate alınır [6, 32].

Önısıtıcı siklonların her bir kademesi için ısı olaylar şu şekilde gerçekleşmektedir. Birinci siklon kademesinde; hammaddenin, hammadde transfer havasının ısıtılması, hammadde nemi ve kristal suyunun buharlaştırılması, baca gazı, baca tozu ve kaçak havanın soğutulması ile radyasyon ve konveksiyon ısı kaybı olmaktadır. Ara siklon kademelerinde; hammaddenin ısıtılması, baca gazlarının, baca tozlarının ve kaçak havanın soğutulması, radyasyon ve konveksiyon kaybı meydana gelmektedir. Kalsinatörün hemen üstündeki siklonlarda hammaddenin ve fırın giriş-çıkış sızdırmazlıklarından giren kaçak havanın ısıtılması, hammaddedeki CaCO₃' in kısmen kalsinasyonu, fırından gelen gazların ve baca tozlarının soğutulması, radyasyon ve konveksiyon kaybı olmaktadır. İlave olarak kalsinatör ve hemen üzerindeki siklon gurubundan sonraki siklonlara gelen baca tozları içindeki MgO' in tamamı ve CaO' in bir kısmı yeniden karbonatlaşmaktadır. (Şekil 2.5 ve Tablo 2.7).



Şekil 2. 5. Genel halde önısıtıcı siklon kademesinde enerji akımlarının şematik gösterilişi

Tablo 2. 7. Genel halde ısıtıcı siklon kademesinde giren-çıkan enerjiler

Giren Enerjiler	Çıkan Enerjiler
- Hammadde ile [FE(n)]	- Hammadde ile [FE(n+1)]
- Baca gazı ile [GE(n)]	- Baca gazı ile [GE(n+1)]
- Baca tozu ile [TE(n)]	- Baca tozları ile [TE(n+1)]
- Kaçak hava ile [FHE(n)]	- Kaçak hava ile [FHE(n+1)]
	- Radyasyon ve konveksiyon kaybı [Q _w (n)]

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Paralel akışlı önkalsinatörlü dört ısıtıcı siklon kademeli sistem için detaylı olarak yapılan modellemede toplam serbestlik derecesi belirlenerek, atanan değişkenlerle çözüme gidilir. Değişkenlerin sayısı ısıtıcı siklon ünitelerinin sayısına bağlı olarak değişir. Paralel akışlı önkalsinatörlü dört ön ısıtıcı siklon kademeli çimento üretim sisteminde enerji akımları denkliği ile her bir ünite giriş ve çıkışta enerji değişimleri hesaplanabilir. Bu hesaplama döner fırın çıkış sıcaklığı sabit parametre ve önkalsinatör yakıtı için minimum ve maksimum değerler belirlenerek hedef parametre seçilerek yapılır.

Çimento üretim sistemlerinde standart parametreler değiştirilerek her bir ünite için hammadde, baca gazı, baca tozu sıcaklık değişimleri bulunmaktadır. Ayrıca tüm sistemin özgül yakıt enerjisi tüketimi, döner fırın duvar ısı kaybı ve soğutucunun toplam ısı kaybı, hesaplanabilmektedir. Yukarıda saydığımız bütün bu hesaplamalar enerji ve kütle dengelerinin birlikte kullanılan bir modelle elde edilmektedir. Kütle ve enerji dengeleri bu çalışmanın hacmini arttıracığından bu çalışmada sadece paralel akışlı önkalsinatörlü çimento fabrikasında her bir üniteye ait enerji akımları ünite şekilleriyle birlikte çıkarılmıştır. Burada sunulan bu çalışma ile şu anda kullanılan üretim sistemleriyle sadece belli kabuller için gerçekçi sonuçlar vermektedir. Prensipite, ölçme ile bir çok model varsayımların kontrolünü yapmak mümkündür. Yüksek sıcaklık bölgelerinde yüksek doğrulukta ölçmelere ihtiyaç vardır.

Semboller:

- Ash : Kül (%)
- CE : Kalsinasyondan çıkan enerji (kJ)
- FE : Hammadde enerjisi (kJ)
- GE : Baca gazı enerjisi (kJ)
- HE : Hava enerjisi (kJ)
- HK : Döner fırındaki klinker oluşum entalpisi (kJ)
- NI : Siklon sayısı (adet)
- Q_{k_{on}} : Konveksiyon ısı kaybı (kJ)
- Q_{rad} : Radyasyon yoluyla ısı kaybı (kJ)
- Q_R : Kalsinatör üzerindeki siklonda reaksiyon enerjisi (kJ)
- Q_{R-DF} : Döner fırında reaksiyon ısı (kJ)
- Q_{Rk} : Kalsinatördeki reaksiyon enerjisi (kJ)
- Q_w : Duvar ısı kaybı (kJ)
- Q_{w,DF} : Döner fırında radyasyon ve konveksiyon ile ısı kaybı (kJ)
- TE : Baca tozu enerjisi (kJ)
- YE : Yakıt enerjisi (kJ)
- YKE : Yeniden karbonatlaşma enerjisi (kJ)
- Yk : Yakıt kalsinasyonu (%)

İndisler

DF	: Döner fırın
F	: Hammadde
K	: Klinker
KS	: Klinker soğutucusu
KA	: Kalsinatör
Y	: Yakıt
ykr	: Yeniden karbonatlaşma

KAYNAKLAR

- [1] LOCHER, G., "Mathematical Models for the Cement Clinker Burning Process Part I:Reactions and Unit Operations", ZKG INTERNATİONAL, Vol.55, No:1, pp. 29-37, 2002
- [2] KHURANA, S., BANERJEE, GAİTONDE, U.", Energy Balance and Cogeneration for a Cement Plant", Aplied Thermal Engineering, Vol.22, pp.485-494, 2002.
- [3] ERKOVAN, İ., "Çimento Üretiminde Enerji Tasarrufu", TÇMB, No:230, 1986
- [4] ELKJAER, H.P.,Çeviren OKBAŞ, Y., "Matematiksel Model Uygulayarak Dört Kademeli Siklonlu Önısıtıcıda Isı Harcamasının Tayini", TÇMB, No:241, 1987
- [5] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 3:Rotary Kiln", ZKG INTERNATİONAL, Vol. 55, No:3, pp.68-80, 2002
- [6] KOLİP, A., "Çimento Üretiminde Enerji ve Ekserji Analizi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen. Bil. Enstitüsü, 1993
- [7] SAVAS, A.F. "Mathematical modelling of mass balance of different proportion in a cement factory" Enerjetikanın Problemleri, No:2, pp.91-101, 2004
- [8] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 4: Great Cooler" ,ZKG INTERNATİONAL, Vol. 55, No:2, pp.46-58, 2002
- [9] LOCHER, G."Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 2:Preheater, Calciner and Bypass", ZKG INTERNATİONAL, Vol. 55, No:1, pp.39-50, 2002
- [10] LOCHER, G., "Mathematical Models for The Cement Clinker Burning Process Part 3:Rotary Kiln", ZKG INTERNATİONAL, Vol. 55, No:3, pp.68-80, 2002
- [11] GARDEİK, H.O., LUDWIG, H. And STEINBIB, E., "Calculation of Heat Loss Trough the Walls of Rotary Kiln and Mills:Part I", ZKG, No:2, 1980
- [12] GARDEİK, H.O., LUDWIG, H. "Calculation of Heat Loss Trough the Walls of Rotary Kiln and Mills:Part II", ZKG, No:5, 1985
- [13] ONISSI, T.R., "Some Considerations on Heat Transfer in The Rotary Kiln", ZKG, No:8, 1970
- [14] SCHEUER, A., ELLERBROCK, H.,G., "Possible ways of saving energy in cement production", ZKG, No:7, pp.175-182, 1992
- [15] MİROLLİ, M.D., "The Kalına Cycle For Cement Kılın Waste Heat Recovery Pover Plants", IEEE, pp. 330-336, 2005
- [16] GARDEİK, H.O., "Fuel Energy Consumption in Cement Burning With Precalcining", ZKG, No:12, pp.611-617, 1981
- [17] LABAHN, O., "Cement Engineers Handbook", Fourth Ediation , 1983
- [18] CENGEL, Y., A., "Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer", 1997
- [19] BÜYÜKTÜRK, A., R., "Termodinamik Cilt I Termodinamiğin Temel Yasaları", Uludağ Üniv. Basım Evi, 1982
- [20] BEKER, H., HAMILTOM, M., Çev. KATNAS, F., " Önkalsinatör ve Fırınlar", TÇMB, Cilt.9, Sayı 96, s. 41-44, 1997
- [21] PERAY, E., K., "Cement Manufacturers Handbook", Chemical publishing Co. Inc., 1979, USA
- [22] GARDEİK, H.O., ROSEMAN, H. And STEINBACH, V., Çeviren TÜRKER, P., "Klinker Soğutucularının Termal Olarak Değerlendirilmesi", TÇMA, Cilt.25, Sayı.253, ss.13-31, 1988

- [23] STEINBACH, V., MUJUMDAR, K.S., GANESH, K.V., KULKARNİ, S.B., RADANE, Vivek V. "Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated Modeling of Pre-heater, Calciner, Kiln and Clinker Cooler ", Chemical Engineering Science, Vol.62, pp.2590-2607, 2007
- [24] KREFT, W., GÜNNEWIG, L. "Possibilities for Energy Saving in the Clinker Burning Process by Optimization of rotary Coolers and Planetary Coolers", ZKG, No:1, pp.12-1989
- [25] GOCER, C., "Döner Fırın Mühendisliği", Adana Çimento Sanayii T.A.Ş. Yayınları, No.2, Ocak-2001
- [26] CARVALHO, M., MODIVATE, De O. "Theoretical Energy Requirement for Burning Clinker", Cement and Concrete Research , Vol.29, pp.695-698, 1999
- [27] CHAKRABARTİ, B.K., "Investigations on Heat Loss Trough the Kiln Shell in Magnesite Dead Burning Process: A Case Study", Applied Thermal Engineering, Vol.22, pp.1339-1345, 2002
- [28] MRATINS, M.A., OLIVEIRA, L.S., FRANCA, A.S., "Modelling and Simulation of Limestone Calcination in Rotary Kilns Part 1: pilot kiln", ZKG INTERNATIONAL, Vol. 55, No:4, pp.76-85, 2002
- [29] FİDAROS, D.K., BAXEVANOU, C.A., VLACHOS Dritselis and N.S., "Numerical Modelling of Flow and Transport Processes in a Calciner for Cement Production ", Powder Technology, Vol.171, No.2, pp.81-95, 2007
- [30] HARDER, J., "Development of Precalcining Technology in the Cement Industry", ZKG INTERNATIONAL , Vol.55, No:10, pp.34-39, 2002
- [31] GARDEİK, H.O., and ROSEMANN, H., "Fuel Energy Consumption and Fuel Energy Apportionment in the Precalcining Process", ZKG, No:9, pp.435-444, 1981
- [32] OKBAŞ, Y., "Klinker Üretim Prosesinde Hava Kaçakları ve Bedeli", Çimento Sanayiinde Enerji Tasarrufu Semineri Tebliği, 1989