

BİR ÇİMENTO FABRİKASINDA DÖNER FIRIN PROSESİNİN ENERJİ ANALİZİ

Mehmet ALTINKAYNAK*, Ahmet KABUL, Önder KIZILKAN

Özet

Çimento fabrikaları, enerji sarfiyatı bakımından yüksek değerlere sahip sektörlerin başında yer almaktadır. Döner fırın ise, çimento fabrikalarında enerji tüketimi açısından önemli bir yere sahiptir. Dolayısıyla, tasarruf yöntemlerinin araştırılması ve uygulanabilirliği üzerine çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada klinker üretimi başına yaklaşık 75kW/ton enerji sarfiyatı olan bir fabrikanın döner fırın ünitesinin termodinamik analizi yapılmıştır. Bu maksatla işletme verileri göz önünde bulundurularak döner fırın ünitesine ait kütle ve enerji denklileri oluşturulmuştur. Analizler sonucu ünitenin enerji verimi %58.6 olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler kayıpların fırın yüzeyinden, bacadan ve sızıntı havalardan kaynaklandığını göstermiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak klinker üretiminde enerji verimliliğinin artırılabilmesi için tavsiyelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji Analizi, Çimento Üretimi, Döner Fırın, Klinker oluşumu.

ENERGY ANALYSIS OF A CEMENT PLANT ROTARY KILN PROCESS

Abstract

Cement sector is one of the most energy consumer sectors which have got higher energy costs. Thus, it is being most important to investigate and utilize the energy saving methods. In this study, thermodynamic analysis using energy and mass balance of equations of a rotary kiln unit of a cement factory which has got an energy consumption of 75 kW/ton per clinker production is investigated. The energy efficiency is found to be 58.6 %. The analysis also shows that loses mostly occurs from the rotary kiln surfaces, from chimney and leakage air. Also some suggestions are made according to the results to improve the energy efficiency.

Keywords: Energy Analysis, Cement Production, Rotary kiln, Clinker Formation.

* Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Isparta

E-posta: mehmetaltinkaynak@sdu.edu.tr

1. Giriş

Enerji sektörü ülkelerin sürdürülebilir gelişmesini ve ekonomik kalkınmasını sağlama da en önemli rolü oynamaktadır. Dolayısıyla fosil yakıtların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Tabii ki bu artış, hem fosil yakıtların tükenmesine hem de çevrenin kirlenmesine sebep olmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların yanması sonucu çıkan gazlar insan sağlığını da tehdit etmektedir. İçinde bulunduğumuz dünyada özellikle karbondioksitten (CO₂) kaynaklanan sera etkisi sonucunda iklim değişimleri yaşanmakta ve doğal afetler oluşmaktadır. Bunun yanında yerüstü ve yer altı kaynakların kirlenmesi, radyasyon ve radyoaktif kirlilik, hava kirliliği, ozon tabakasının zarar görmesi, asit yağmurları vb. olaylar çevresel etkiler olarak sıralanabilir (Dinçer, 2002).

Ülkemizde ve dünyada enerjinin en çok kullanıldığı sektörlerin başında çimento üretimi yer almaktadır. Çimento sektöründe enerji tüketiminin yüksek olmasının nedeni, yüksek miktarlar da hammadde girişinin olmasıdır. Bu süreç öncelikle hammaddelerin ocaktan çıkartılması, kırıcıda değirmen öncesi kırılması ve değirmende öğütülmesinden ve daha sonra bu öğütülen hammadde (Farin) kömür veya doğalgaz ile ısı enerjinin sağlandığı döner fırına gönderilmesinden oluşmaktadır. Fırında pişirilerek klinker oluşumu sağlanmaktadır.

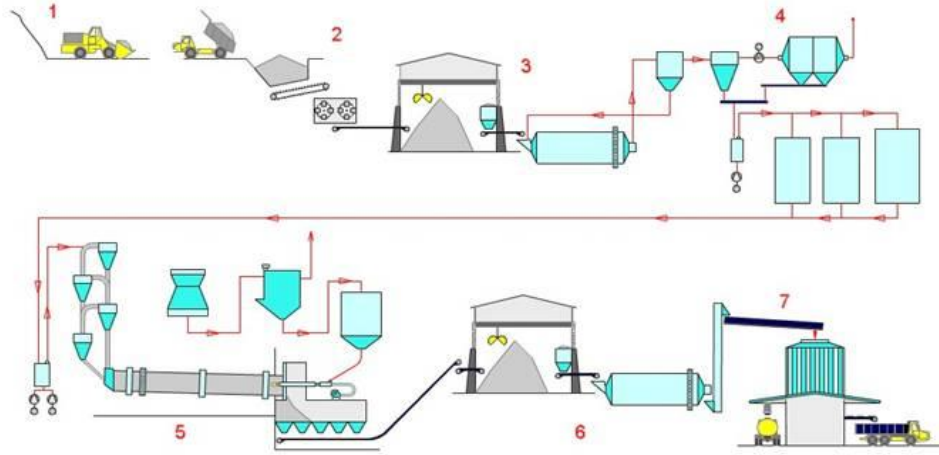
Enerji sarfiyatının ve hammadde başına maliyetin yüksek olduğu bu sektörde, enerji maliyetlerinin en aza indirilmesi amacıyla yapılan çalışmalar 1990 yılından bugüne hızla artmaktadır. Söğüt (2009), Çimento sektöründe döner fırın prosesinin eksergoekonomik optimizasyonu isimli tezinde, Balıkesir’de bir çimento fabrikasının döner fırın bölümünün termodinamiğin birinci ve ikinci yasasına göre enerji ve ekserji analizlerini yapmış ve enerji verimliliğini % 58.79 ve ekserji verimliliğini de % 44.8 olarak bulmuştur. Kolip ve Savaş (2008) yılındaki çalışmalarında, paralel akışlı dört önısıtıcı çimento fabrikası için kütle ve enerji denklemlerini çıkarmış, enerji maliyetlerinin, toplam işletme giderlerinin %55 olduğunu ifade etmiştir. Koroneos vd., (2005), Yunanistan’da bir çimento fabrikasında termodinamiğin birinci ve ikinci yasa analizini uygulamış ve enerji verimini % 68, ekserji verimini ise de % 50 olarak hesaplamıştır. Utlu ve Hepbaşlı (2005), yaptıkları makalede enerji ve ekserji verimlerini üzerine analizler yapmışlardır. Bu incelemelerin neticesinde enerji verimini % 63.45 ve ekserji verimini ise % 70.11 olarak hesaplamıştır. Çamdalı vd. (2004), Türkiye’de bir çimento fabrikasının klinker üretim bölümünde bulunan siklonların ve döner fırının enerji ve ekserji analizlerini yapmışlar, döner fırının enerji verimini % 85 ve ekserji verimini % 65

olarak bulmuşlardır. Ünlü (2002), bir çimento fabrikasının verilerini kullanarak enerji verimliliğini % 79.32 ve kullanılabilirlik verimini % 51.78 olarak hesaplamıştır. Sheinbaum ve Ozawa (1998), 1982 ve 1994 yılları arasında Meksika çimento sektöründeki enerji kullanım seviyelerini ve emisyon değerlerini incelemiştir. Çalışmalarında, atık ısı geri kazanımı ile sisteme ait bulunan baca ve filtrelerdeki iyileştirmeler sonucunda azaltmalar yapılabileceğini ifade etmişlerdir. Yaptıkları inceleme sonucunda atık ısının tekrar sisteme gönderilmesi ile % 28'lik bir enerji iyileştirmesi, emisyon değerlerinde de % 17.2 lik bir azalma olabileceğini göstermişlerdir. Engin (1997), çalışmasında çimento fabrikalarındaki döner fırın sistemlerinin ısı analizini yapmış ve ısı verimi % 45.2 olarak hesaplamıştır. Ayrıca fırın yüzeyindeki ısının kullanılabilmesi ile bu değerin % 40 seviyesine kadar indirilebileceğini ifade etmiştir.

Bu çalışmada; Akdeniz Bölgesinde faaliyette bulunan bir çimento fabrikasında kurulu 2000 ton/gün klinker kapasiteli bir döner fırına, termodinamiğin birinci yasası uygulanarak kütle ve enerji analizleri yapılmıştır. Kullanılan veriler, ünitenin çalışması esnasında eşzamanlı olarak alınmıştır. Enerji kayıplarının yoğun olduğu noktalar tablo ve diyagram halinde verilmiştir. Çalışmanın sonunda ise yüksek hammadde ve enerji girdisi olan döner fırının daha verimli üretim yapabilmesi için tavsiyelerde bulunulmuştur.

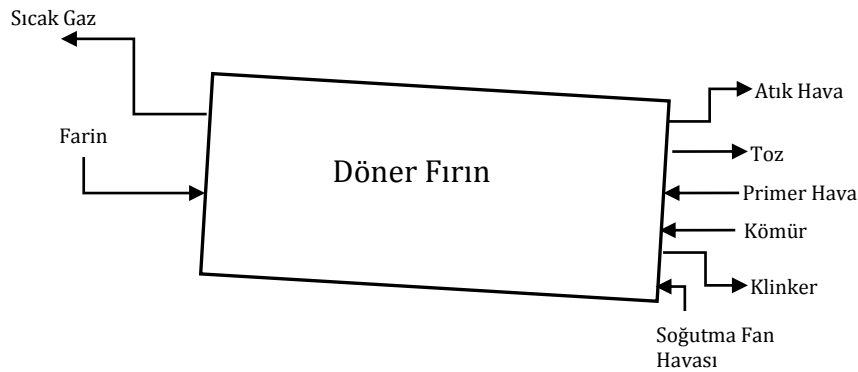
2. ÇİMENTO ÜRETİMİ VE DÖNER FIRIN

Çimento fabrikasında, çimento üretimi şu aşamalardan oluşur. Hammadde (marn, kalker), ocaklardan patlayıcı maddeler yardımıyla çıkarılır ve iş makineleri ile nakil araçlarına yüklenerek kırılmak üzere konkasörlere (kırıncı) taşınır (1. proses). Hammaddeler, konkasörlerde kırıldıktan sonra stok holde stoklanır (2. proses). Gezer vinçler yardımıyla stok holden alınan hammaddeler belli oranlarda karıştırılarak farin değirmenlerine alınarak öğütülürler (3. proses). Öğütüldükten sonra farin adını alan karışım farin silolarında stoklanır (4. proses). Silolardan ön ısıtıcılara gönderilen farin burada ısıtılarak döner fırına sevk edilir. Burada farin yaklaşık 1400-1450 derece sıcaklıkta pişirilir (5. proses). Döner fırından klinker olarak çıkan yarı mamul ürün soğutucuda soğutularak klinker stok holünde stoklanır. Alçıtaşı ve üretilecek çimento cinsine uygun katkılarla çimento değirmenlerinde öğütülür (6. proses). Tiplerine göre ayrı ayrı silolarda stoklanan çimento, torbalı veya dökme çimento olarak paketleme ünitesinde hazırlanır (7. proses). Çimento üretiminde hammaddenin ocaktan alınması ve paketlemeye kadar olan sürecin belirtildiği üretim hattı genel şeması Şekil 1'de verilmiştir (Kuleli, 2009).



Şekil 1. Çimento Üretim Hattı Genel Şeması (Göлтаş, 2013).

Bu çalışmada incelenen döner fırın prosesine giren farin 100-400°C sıcaklıkları arasında ısıtılarak neminden arındırılır. Yaklaşık 650°C' de kil kristal suyunu yitirmeye başlar ve kaolinit dehidrasyona uğrar, Metakaolin yüksek sıcaklıklarda bozunarak SiO₂ ve Al₂O₃ gibi çok etkin oksitlere dönüşür. Magnezyum karbonat ve çimento hammaddelerinin % 74 – 79'unu oluşturan CaCO₃ bozunmaya başlar. 900°C sıcaklıkta ise ayrışma basıncı 1 Bar'dan büyük olduğu için CaCO₃ hızla CaO ve CaO₂ ayrışır ve diğer oksitlerle tepkimeye girer. Serbest CaO anhidrid oluşturmak üzere SO₃ ile tepkimeye girerek alkali sülfatları oluşturur. 1200°C sıcaklıkta ise klinkerleşme başlar ve Belit C₂S oluşur. 1450°C' ye çıkıldığında belit serbest kireçle birleşerek C₃S (Alit)'e dönüşür. C₃S klinkerin ana ve en değerli bileşenidir, çimentonun dayanım kazanmasını sağlar. 1450-1250°C sıcaklığında ise soğutma bölgesinde kristalleşme meydana gelir. Klinker üretimi tamamlanmış olur (Kuleli, 2009). Döner fırına giren ve çıkan hammaddeler Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 2. Döner Fırın Kütle Akışı

3. TERMODİNAMİK ANALİZ

Kütlenin korunumu prensibine göre; bir kontrol hacmine giren ve çıkan madde miktarları eşit olmak zorundadır ve aşağıdaki eşitlikle verilir (Bejan,1998).

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_ç \quad (1)$$

$$\dot{m}_{\text{farin}} + \dot{m}_{\text{kömür}} + \dot{m}_{\text{primer hava}} + \dot{m}_{\text{fan hava}} = \dot{m}_{\text{gaz}} + \dot{m}_{\text{klinker}} + \dot{m}_{\text{toz}} + \dot{m}_{\text{atık hava}} \quad (2)$$

Termodinamiğin birinci kanununa göre enerjinin korunumu aşağıdaki eşitlikle belirlenir. Eşitliğin sol tarafı; ısı, iş ve kütle yoluyla enerji transfer oranındaki değişimi, sağ tarafı ise; kinetik, potansiyel ve iç enerjideki değişim miktarını ifade etmektedir.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_ç \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum \dot{m}_g \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (3)$$

Döner fırın enerji analizinde, fırının döndürülmesi için kullanılan elektrik motorunun harcamış olduğu enerji ve ayrıca kinetik ve potansiyel enerjiler, diğer enerjiler göz önüne alındığında ihmal edilebilir seviyede olduğu için ihmal edilmiştir. Bu durumda enerji denkliği aşağıdaki hale dönüşür:

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

şeklinde yazılmıştır. Eşitlik (4)'te verilen enerji denkliği döner fırına giren ve çıkan tüm maddeler dikkate alınarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} \sum \dot{m}_{\text{Farin}} h_{\text{Farin}} + \sum \dot{m}_{\text{Kömür}} h_{\text{Kömür}} + \sum \dot{m}_{\text{Primer hava}} h_{\text{primer hava}} + \\ \sum \dot{m}_{\text{Soğutma havası}} h_{\text{Soğutma havası}} = \sum \dot{m}_{\text{Klinker}} h_{\text{Klinker}} + \\ \sum \dot{m}_{\text{Sıcak gaz}} h_{\text{Sıcak gaz}} + \sum \dot{m}_{\text{Toz}} h_{\text{Toz}} + \sum \dot{m}_{\text{Atık hava}} h_{\text{Atık hava}} \end{aligned} \quad (5)$$

Termodinamiğin birinci yasası dikkate alınarak enerji verimi; çıkan maddelerin toplam enerjisinin, giren maddelerin toplam enerjisine oranı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\eta_1 = \frac{\sum E_{\text{yaranan}}}{\sum E_{\text{giren}}} \quad (6)$$

Günlük 2000 ton klinker kapasiteli döner fırına saatte 11270 kg kömür giren bir fabrika incelenmiştir. Döner fırına giren kömürün laboratuvar analizlerinde Karbon miktarı %70 olarak saptanmıştır. Kömürün tam yanması için gerekli yakma havası eşitlik (7) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Kuleli, 2009).

$$\text{Yakma havası} = \frac{m_{\text{kömür}} \left(c \frac{32}{12} + h \frac{16}{2} + s \frac{32}{32} - o \right)}{0.23} \quad (7)$$

Burada c, h, s ve o kömürün bileşenleri içinde bulunan C, H, S ve O' nin kömür içindeki kütle oranlarıdır.

Klinker oluşumundaki maddelerin entalpi değerleri, her madde için sıcaklığa bağlı değişim formülü aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. Döner fırına giren ve çıkan bazı maddelerin C_p değerlerinin hesaplanmasında kullanılan sabitler Tablo 1' de verilmiştir. C_p değeri kJ/kgK ve T değeri K cinsindedir (Elliot, 2001; Şahin, 2007; Smith, 1981; Weast, 1976).

$$\int c_p dT = \int dh \quad (8)$$

$$C_p = a + bT + cT^{-2} \quad (9)$$

Tablo 1. Denklem (9)'daki katsayılar

Madde	a	b	c
CaO	10.00	0.00484	108000
CO ₂	10.34	0.00274	195500
SiO ₂	10.87	0.008712	241200

4. ARAŞTIRMA BULUGULARI

Döner fırına ortalama 837°C sıcaklıkta saatte 130 ton farin girmekte ve döner fırında farinin pişirilebilmesi için 11270 kg/h kömür yakılmaktadır. Kömür öğütme tesisinde toz olarak öğütülmüş olan kömür, kömür silolarına sevk edilmektedir. Silolardan, döner fırın çıkışında bulunan alev borusuna basılan toz kömür burada yakılmaktadır. Döner fırına giren ve çıkan maddelerin kütle denklilikleri sağlanmış ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Döner fırın kütle denkleği

Döner Fırına Giren Maddeler		Döner Fırından Çıkan Maddeler	
Madde	Kütle debisi (kg/h)	Madde	Kütle debisi (kg/h)
Farin	130000	Sıcak Gaz	90196.82
Kömür	11270	Klinker	78787.88
Primer Hava	29868	Toz	6758
Soğ. Fan Hava	112569	Atık Hava	107964.29
Toplam	283707	Toplam	283707

Döner fırın yaklaşık 4 dev/dak hızla dönmektedir. % 3 eğimle dönen döner fırından akan farin kömür yanma ısı ile pişirilir ve döner fırının çıkışında bulunan soğutma bölgesine dökülür. Soğutma ünitesinde yüksek debili fanlar yardımıyla farin soğutulur ve klinker oluşumu tamamlanmış olur. Elde edilen klinker soğutma ünitesinden çelik kovalı taşıyıcılar ile klinker stok holüne alınır. Döner fırına giren maddelerin birinci yasası analizi eşitlik 3 kullanılarak yapılmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablodan da görüleceği üzere Döner fırına giren enerjinin en büyük kısmı kömürün yanma ısısından gelmektedir. Döner fırına giren kömürün ısı değeri laboratuvar analizlerinde 27034.16 kJ/kg olarak tespit edilmiştir. Bir saatte kazana gönderilen 11270 kg kömürden gelen yanma ısı yaklaşık olarak 305 Milyon kJ değerindedir. Döner fırına giren farinin bünyesinde bulunan suyun buharlaştırılması ve klinkerin pişirilmesinde kullanılan bu enerjinin yarısından fazlası sistemde ön ısıtma siklonlarında kullanılan sıcak gazın enerjisini temsil etmektedir.

Tablo 3. Döner fırına giren maddelerin enerji denkleği

Giren Madde	Mol Kütle gr/mol	C _p kJ/KgK	R kJ/KgK	P (Pa)	T (K)	m (%)	\dot{m} (kg/h)	H (kJ/h)	
Farin	CaO	56.08	1.14	0.15	7000	1110	0.44	56758	71896160.39
	CO ₂	44.01	1.26	0.19	7000	1110	0.36	46202	64511280.10
	SiO ₂	60.08	1.42	0.14	7000	1110	0.13	17485	27514411.23
	Al ₂ O ₃	101.96	1.30	0.08	7000	1110	0.03	3952	5694608.65
	Fe ₂ O ₃	159.69	1.11	0.05	7000	1110	0.02	2639	3239524.39
	MgO	40.30	1.25	0.21	7000	1110	0.01	1625	2252107.00
	K ₂ O	94.20	3.48	0.09	7000	1110	0.01	715	2758014.95
	SO ₃	80.06	8.98	0.10	7000	1110	0.00	364	3628266.72
	Na ₂ O	61.98	5.09	0.13	7000	1110	0.00	260	1470275.12
	Toplam						1	130000	182964648.57
Kömür	C	12.01	0.88	0.69	40000	338	0.70	7900.27	2359011.88
	S	32.07	0.76	0.26	40000	338	0.04	442.91	113237.20
	N ₂	28.01	1.02	0.30	40000	338	0.02	203.99	70463.37
	H ₂	2.02	14.32	4.12	40000	338	0.05	521.80	2525204.57
	O ₂	32.00	0.88	0.26	40000	338	0.05	510.53	151594.52
	CaO	56.08	0.80	0.15	40000	338	0.02	25.70	6932.20
	SiO ₂	60.08	0.82	0.14	40000	338	0.07	114.62	31593.25
	Al ₂ O ₃	101.96	0.84	0.08	40000	338	0.03	44.12	12577.41
	Fe ₂ O ₃	159.69	0.69	0.05	40000	338	0.03	45.14	10573.89
	MgO	40.30	0.98	0.21	40000	338	0.00	7.44	2464.82
K ₂ O	94.20	3.11	0.09	40000	338	0.00	4.90	5155.25	
SO ₃	80.06	0.82	0.10	40000	338	0.01	11.66	3232.85	

		Toplam		1	11270	5292041.21			
Kömür Yanma Isısı							304616852.50		
Hava	N ₂ *(Primer)	28.01	1.02	0.30	99300	298	0.79	23595.72	7144194.22
	O ₂ *(Primer)	32.00	0.82	0.26	99300	298	0.21	6272.28	1524408.61
	N ₂ ***(Soğ. Fan)	28.01	1.15	0.30	3280	1173	0.79	88929.51	119627686.50
	O ₂ ***(Soğ. Fan)	32.00	1.10	0.26	3280	1173	0.21	23639.49	30607627.71
					Toplam	1	142437	158903917.04	
GENEL TOPLAM								283707.00	651777459.32

Döner fırından çıkan maddelerin birinci yasa analizi Tablo 4’ te verilmiştir. Döner fırından çıkan maddelerin enerji denkleğine bakıldığında, sisteme giren 650 Milyon kJ enerjinin 200 Milyon kJ’lük kısmının ısı kayıplarından oluştuğu görülmektedir. Bu kayıpların büyük kısmı fırın yüzeyinden ve sızıntı havalardan kaynaklanmaktadır.

Tablo 4. Döner fırından çıkan maddelerin enerji denkliği

Çıkan Madde		Mol Kütlesi gr/mol	C _p kJ/KgK	R kJ/KgK	P (Pa)	T (K)	m (%)	\dot{m} (kg/h)	H (kJ/h)
Sıcak Gazı	N ₂	28.013	1.177	0.297	3476	1374	0.096	8676.934	14030191.349
	O ₂	31.999	1.115	0.260	3476	1374	0.030	2714.924	4160934.074
	CO ₂	44.010	1.332	0.189	3476	1374	0.801	72238.633	132207907.510
	CO	28.0104	1.233	0.297	3476	1374	0.009	829.811	1405786.812
	H ₂ O	18.015	1.958	0.462	3476	1374	0.056	5060.042	13614928.916
	SO ₂	64.065	0.877	0.130	3476	1374	0.008	676.476	814891.515
					Toplam	1	90196.82	166234640.2	
Klinker	CaO	56.077	1.319	0.148	99300	1592	0.661	52039.394	109251907.697
	SiO ₂	60.084	1.717	0.138	99300	1592	0.204	16104.242	44027483.341
	Al ₂ O ₃	101.961	1.485	0.082	99300	1592	0.052	4089.091	9664834.479
	Fe ₂ O ₃	159.69	1.313	0.052	99300	1592	0.039	3064.848	6407603.941
	MgO	40.304	1.318	0.206	99300	1592	0.019	1481.212	3106890.434
	K ₂ O	94.196	3.655	0.088	99300	1592	0.008	638.182	3713742.864
	SO ₃	80.064	12.443	0.104	99300	1592	0.016	1260.606	24972008.286
	Na ₂ O	61.979	5.523	0.134	99300	1592	0.001	110.303	969862.914
					Toplam	1	78787.88	202114333.95	
Toz	CaO	56.077	1.239	0.148	99300	1374	0.668	4513.668	7683062.900
	SiO ₂	60.084	1.583	0.138	99300	1374	0.200	1350.924	2937679.072
	Al ₂ O ₃	101.961	1.401	0.082	99300	1374	0.051	342.631	659763.572
	Fe ₂ O ₃	159.690	1.220	0.052	99300	1374	0.038	256.804	430497.758
	MgO	40.304	1.287	0.206	99300	1374	0.018	124.347	219972.587
	K ₂ O	94.196	3.574	0.088	99300	1374	0.008	54.064	265517.519
	SO ₃	80.064	10.877	0.104	99300	1374	0.016	106.101	1585647.851
	Na ₂ O	61.969	5.336	0.134	99300	1374	0.001	9.461	69368.407
					Toplam	1	6758	13851509.67	
Atık Hava	N ₂	28.013	1.048	0.297	1300	515	0.79	85291.797	46052935.875
	O ₂	31.999	1.007	0.260	1300	515	0.21	22672.503	11756373.693
					Toplam	1	107964.3	57809309.57	
Isı Kaybı									211767665.95
GENEL TOPLAM								283707.00	651777459.32

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çimento fabrikalarının enerji açısından en önemli elemanı olan döner fırının prosesinin termodinamik analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde fabrika verileri kullanılarak tüm maddeler için kütle denklilikleri oluşturulmuş, bu kütle denkliliklerinin yanı sıra giriş

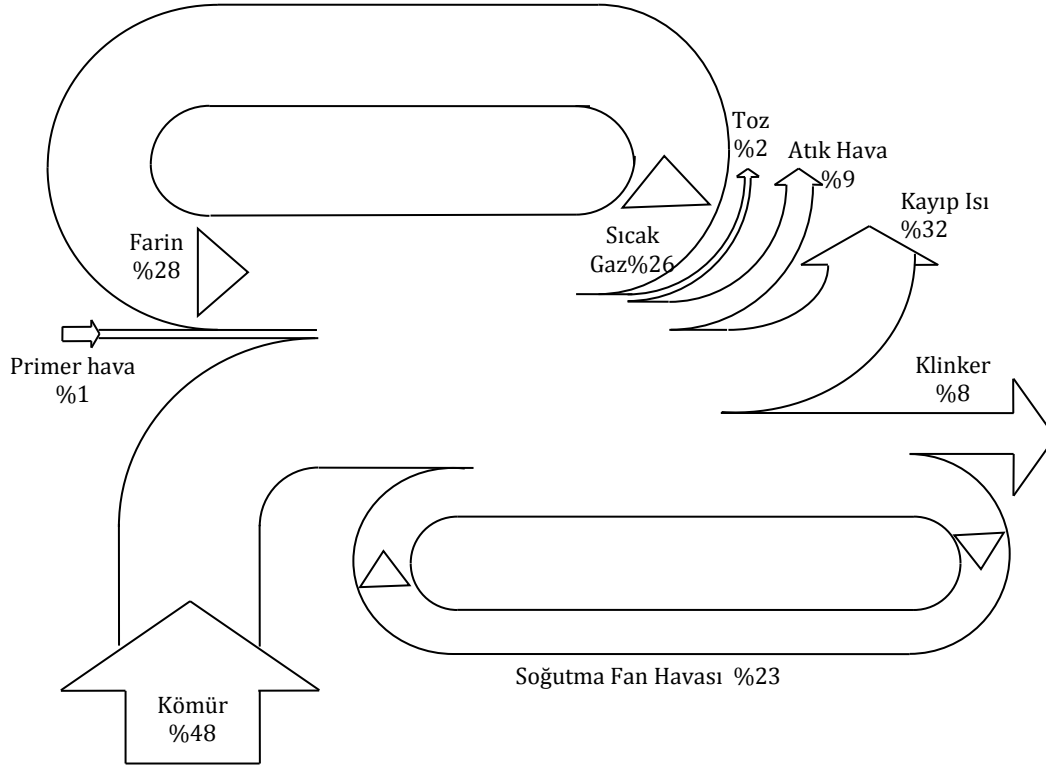
basıncı, çıkış basıncı, giriş sıcaklıkları ve çıkış sıcaklıkları da dikkate alınarak termodinamiğin birinci yasa analizi yapılmıştır. Termodinamiğin birinci yasasına göre ünitenin enerji verimi % 58.6 olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler ışığında ünitenin enerji dengesi oransal olarak Şekil 3'deki Sankey diyagramında verilmiştir.

Sankey diyagramında da görüldüğü gibi en büyük girdinin % 48 ile kömür ve daha sonra % 28 ile farinden oluştuğu görülmektedir. Burada farinin enerjisi döner fırından abgaz fanı ile çekilen sıcak gazdan kaynaklanmaktadır.

Ayrıca Sankey diyagramdan görüldüğü gibi klinkerin soğutulmasında kullanılan ve döner fırına giren soğutma havalarının da enerjisi, % 31' lik kısım % 23' ü soğutma havasından geriye kalan kısmı ise klinkerin enerjisinden gelmektedir. Klinker enerjisini soğutma havasına aktardıktan sonra % 8 olarak çıkmaktadır.

Sankey diyagramında da görüleceği üzere sistemden çıkan toplam enerjinin % 9'luk kısmı atık hava olarak elektro filtre ünitesi bacasından dışarıya atılmaktadır. Bacadan atılan 300°C civarında atık havanın enerjisinin tekrar kullanılabilmesi mümkündür. Baca içerisine eşanjör konularak, sıcak havanın eşanjörden geçirilmek suretiyle atık havadan yaklaşık saatte 5 ton'a yakın buhar ve ayrıca yine bacadaki atık havadan elektrik enerjisi üretilebilir. Aynı zamanda absorpsiyonlu soğutma yapılarak ünitelerde bulunan kontrol odalarının da soğutulması sağlanabilir.

Döner fırın içerisinden, ön ısıtma siklonlarına abgaz fanı tarafından çekilen sıcak gazın, siklon yapısının geliştirilmesi ve ilave siklonların konulması ile daha fazla farin üzerinden geçirilmesiyle fırına giren hammadde miktarı arttırılabilir. Bu durumda, hem sıcak gaz daha verimli kullanılmış olur hem de atık hava'dan geriye gaz çekmek suretiyle de yararlanılmış olacaktır.



Şekil 3. Döner fırın sankey diyagramı

Elde edilen sonuçlara göre, döner fırın yüzeyinden kaybolan ısı dikkat çekmektedir. Bu konuyla ilgili daha önce ki çalışmalar incelendiğinde bu ısının tekrar kullanılabilmesi teorik olarak yapılabilir olmasına rağmen gerçekte uygulanmasında sıkıntılarla karşılaşılabilir. Çünkü fırın yüzeyine sarılacak bir eşanjör sistemi fırın yüzeyindeki manto sıcaklığını arttıracak ve bu yüzeyde deformasyona sebep olacaktır. Ancak bir miktar ısının geri kazanılabilmesi için fırın giriş kısmına yani hammaddenin fırına ilk alındığı nokta olan döner fırın tahrik grubunun yakınlıklarına bir eşanjör sistemi yerleştirmek mümkündür. Fakat bu eşanjör sistemi fırın çıkışına yakın bir yere yerleştirilmesi önerilmez. Çünkü alev borusunun fırın içindeki konumu ve yanmanın fırın çıkışında başlamasından dolayı sıcaklık fırın çıkışına doğru artmaktadır. Buradan alınan ısı enerjisi ısıtma merkezinde sıcak su ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir.

Isı kayıpların azaltılabilmesi için diğer bir yol, fırına giren kaçak havanın yani sızıntı havasının engellenmesidir. Çünkü sızıntı havası fırın içerisine soğuk havanın girmesine ve bir miktar enerjinin bu havanın ısıtılmasında kullanılacağından enerji kaybına sebep olacaktır.

Sızıntı havalarının döner fırına girişlerini önlemek için, fırın giriş ve çıkışında bulunan sızdırmazlık elemanlarının kontrol ve bakımlarının düzenli olarak yapılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

Bejan A., *Advanced Engineering Thermodynamics*, Wiley&Sons., New York, A.B.D, 1998.

Çamdali, Ü, Erişen, A., Çelen, F., 2004. Energy and exergy analyses in a rotary burner with pre-calcinations in cement production. *Energy Conversion and Management*, 45, 3017-3031.

Çetin, G., 2012, <http://www.guvenctin.com/Cimento/index2.htm>, (03.10.2012).

Dinçer, I., 2002. The Role Of Exergy in Energy Policy Making. *EnergyPolicy*, 30, 2, 137-149.

Doğan, S., “ Çukurova’da çimento sektörü”, 1. Çukurova’da sanayileşme ve çevre sempozyumu bildirileri, *MMO yayınları*, 2007.

Engin, T., 1997. Çimento Fabrikasındaki Döner Fırın Sistemlerinin Isıl Analizi. İTÜ Makine Fakültesi I. *Makine Mühendisliği Kongresi*.

Göлтаş, 2013, <http://goltas.com.tr/index.asp?pid=23>, (11.10.2013)

J.M. Smith. H.C. Van Ness. *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. third ed., Mc Graw Hill. 1981.

J.R. Elliott. C.T. Lira. *Introductory chemical engineering thermodynamics*. Prentice Hall PTR. 2001.

Kuleli, Ö., 2009. *Çimento Mühendisliği El Kitabı*. TÇMB/AR-GE Enstitüsü, 286s. Ankara.

Kolip, A., Fevzi, A.F., 2008. Dört Kademeli Paralel Akışlı Ön Isıtıcı Siklonlu Çimento Fabrikasında Kütle ve Enerji Denkliklerinin Matematiksel Modellenmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12, 1, 49-60.

Koroneos, C.,Roumbas, G., Moussiopoulos, N., 2005. Exergy Analysis Cement Production. *Int. J. Exergy*, 2, 1.

R.C. Weast. *Handbook of chemistry and physics*. 56th ed.. Cleveland. CRC Press. 1976.

Sheinbaum, C.,Ozawa, L., 1998. Energy use and CO2 emissions for Mexico’s cement industry. *Energy*, 23, 9, 725-732.

Söğüt, Z, 2009, *Çimento sektöründe döner fırın prosesinin eksergo ekonomik optimizasyonu*. Balıkesir üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, 240, Balıkesir.

- Şahin, H.M., Acır, A., Baysal, E., Koçyiğit, E., 2007. Enerji ve ekserji analiz metoduyla Kayseri şeker fabrikasında enerji verimliliğinin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 1, 111-119.
- Utlu, Z., Hepbaşı, A., 2005. A review and assessment of the energy utilization efficiency in the turkish industrial sector using energy and exergy analysis method. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11, 1438-1459.
- Ünlü, N., 2002, *Tipik Bir Çimento Fabrikası İçin Enerji ve Kullanılabilirlik Analizi*, Gebze İleri Teknoloji Enstitüsü Müh. Ve Fen Bilimleri enstitüsü, Gebze .