

Makale Gönderim Tarihi: 16.12.2020
Yayına Kabul Tarihi: 05.01.2021

Hammadde Rutubetinin Çimento Üretim Prosesine Etkisinin Araştırılması *Investigation of the Effect of Raw Material Moisture on Cement Production Process*

Abdul Vahap Korkmaz*

¹ Afyon Kocatepe Üniversitesi İncehisar MYO, İnşaat Bölümü, 03100 Afyonkarahisar,
e-posta: avkorkmaz@aku.edu.tr

Özet

Çimento üretim sürecinde gerek ana ham madde olarak gerekse katkı maddesi olarak çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Çimento üretiminde kullanılan bu ham maddeler aynı zamanda çimentonun kalitesini belirleyen temel unsurlardandır. Çimento üreticileri çimento ham maddelerinin kimyasal yapısına ve mineralojisine odaklanırken ham maddelerin rutubet kaynaklı yaratabilecekleri problemleri çoğu zaman gözden kaçırmaktadırlar. Halbuki bir çimento üretim tesisi dizayn edilirken en önemli etken olarak ham maddelerin rutubet özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada çimento üretiminde kullanılan ana ve yardımcı ham maddelerin rutubet özellikleri tespit edilmiştir. Farklı ham maddeleri kullanılarak üretilen çimento proses aşamalarında yüksek rutubet özelliklerinin gerek kırma ve gerekse öğütme proseslerinde meydana getirdikleri problemler ve çözümleri araştırılmıştır. Ocaklardan üretim esnasında ve kırma ve öğütme aşamalarında yapılacak bir takım değişiklikler sayesinde rutubet kaynaklı problemlerin nasıl en aza indirilebileceği açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çimento, rutubet, ham madde, kırma, öğütme

Abstract

Various materials are used both as the main raw material and as additives in the cement production process. These raw materials used in cement production are also among the basic elements that determine the quality of cement. While cement manufacturers focus on the chemical structure and mineralogy of cement raw materials, they often overlook the problems that raw materials can cause due to moisture. However, when designing a cement production facility, the most important factor is the moisture characteristics of the raw materials. In this study, moisture properties of the main and auxiliary raw materials used in cement production were determined. Problems and solutions caused by high moisture properties in both crushing and grinding processes in cement process stages produced by using different raw materials were investigated. It has been explained how the problems caused by moisture can be minimized thanks to some changes to be made during production from the quarries and at the crushing and grinding stages.

Keywords: Cement, moisture, raw material, crushing, grinding

1. Giriş

Doğada bulunan her madde yeraltı ve yerüstü iklim şartlarına göre belirli miktarlarda az veya çok su içerir. Bu suya rutubet, maddenin birim ağırlığında bulunan suyun birim miktarına ise rutubet oranı denir. Çimento ve klinker girdilerinin hepsinde rutubet vardır. Bu su oranı çimento prosesinde maliyeti artırıcı bir etkidir. Prosesin her aşamasında prosesi olumsuz yönden etkilediği için söz konusu suyun her halükarda ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu da belirli bir enerji tüketimi demektir.

Başta kalker ve kil olmak üzere farklı sayıda değişik hammadde karışımlarının homojen hale getirilmesi için önceleri bunlara su eklenerek bir çamur yapılmakta ve bu çamur fırında önce ısıtılıp sonra pişirilmekteydi. Ancak sürece su katılması, daha sonra da bu suyun tekrar buharlaştırılarak süreçten ayrılmasının yol açtığı büyük enerji kaybı bu 'Yaş Sistem' üretiminin terkedilerek ham madde karışımını tamamem kuru sistem üretimine geçmesine yol açmıştır (Kuleli, 2010).

Kırıcıların çoğu %15' e kadar malzeme nemi ile sorunsuz olarak çalışabilmektedir. Fakat kil ve kil türevli plastik özelliklere sahip çok nemli yapışkan özelliklere sahip ham maddeler asıl sorunu yaratmaktadır. Kil grubu kayaçların kalitelerinin tam anlamıyla tespit edilebilmesi için mineralojik ve kimyasal analizlerinin bilinmesi gerekmektedir. Yüksek plastisite özelliklerine sahip kil taşları çimento sektörü için pek tercih edilmezler. Bunun en temel sebebi ise özellikle kışın ve bahar aylarında rutubet sonucu kırıcı ekipmanlarında sarma ve yapışma problemleri yaşatmasıdır. Bu sebeple plastisite özellikleri kil taşlarının çimento sektöründe kullanılabilirliği için en temel ayırt edici özelliklerden biridir.

Çimento üretim proses aşamalarında üretilecek çimento cins ve özelliklerine göre değişik katkı maddeleri kullanılabilir. Aynı üretimde bir çeşit katkı malzemesi kullanılabildiği gibi birden fazla katkı malzemesi de kullanılabilir. Genel olarak kullanılan katkılar; tras, yüksek fırın cürufu, silika füme, uçucu kül, ponza gibi doğal ve yapay puzolanlardır. Katkı oranına karar verilirken çimentonun dayanımları, inceliği ve maliyeti göz önünde bulundurulmaktadır. Programlanan katkılı çimento üretim (ton) x katkı faktörü işlemi neticesinde hesaplanan kuru katkı miktarı, rutubet oranı göz önünde bulundurularak satın alım işlemine esas yaş katkı miktarı hesaplanmaktadır.

Çimento üretiminde puzolanik katkı malzemesi olarak en fazla tras kullanılmaktadır. Türkiye'de yaygın olarak kullanılan tras kelimesinin uluslararası literatürdeki karşılığı puzolandır. Tras, TS 25'e göre kendisinin bağlayıcılık özelliği olmayan ancak normal ortam sıcaklığında ve uygun rutubet şartlarında mikron boyutunda öğütülen kalker veya klinker yapısında malzemelerle yaş olarak karıştırıldığında tepkimeye girip bağlayıcı özellik kazanan silisli veya alüminalı malzemeler içeren ince toz haline getirilmiş ham maddeler olarak adlandırılmaktadır (Altun, 1999). Birçok çimento fabrikası özellikle çimento değirmenleri katkı malzemelerinden olan tras, pomza gibi puzolanik malzemelerin kışın yüksek rutubet içermesinden dolayı milyon liralık kurutma ünitesi yatırımları yaptığı gibi binlerce m³ lük doğalgaz veya fuel oil harcamaları da kaçınılmaz olmaktadır (Kavas, 1997).

Hammaddelerdeki nem sorunu her tür boyut küçültme işlemi için problem teşkil etmektedir. Kırıcı ve öğütücü ekipmanlardaki aşınma problemlerini nemli malzemelerle yaşanan tıkanma ve sarma problemlerinin de takip etmesi yüksek enerji ve bakım maliyetlerini arttıran en önemli nedenlerdendir. Kırma ve öğütme aşamalarında nemli malzemelerin sıcak gazlar vasıtasıyla

kurutulması üretim verimliliğini arttırmakta ve üretimin kesintisiz akmasına katkı sağlamaktadır. Sıcak gaz temini klinker soğutma çıkışından, fırın gazından yada kırıcıların/değirmenlerin yanına kurulan sıcak gaz ocaklarından sağlanmaktadır (Kuleli, 2010).

Çimento fabrikaları için farin pişirme kalorisi, yani 1 kg klinkeri pişirebilmek için kaç Kcal'lık ısıya ihtiyaç duyulacağı çimento üretim maliyetini etkileyen önemli parametrelerdendir. Genelde proses ekipman üretici firma pişirme ısısı değerini vermektedir. Ya da geçmiş yılların ortalama değeri göz önüne alınarak da saptanabilmektedir. Birden fazla yakıt kullanılacaksa (ki genellikle tercih edilir), kullanılacak yakıt cinsleri, karışım oranları, kalorifik değerleri ve rutubet oranlarının bilinmesi gerekmektedir. Yakıtların kalorifik değerleri ile paçal oranları bilindiğinden kuru bazda yakıt miktarları hesaplanabilmektedir. Ayrıca bu malzemelerin rutubet oranları göz önünde bulundurularak satın alım için yaş miktarları ayrıca hesaplanmaktadır.

2. Materyal Ve Metot

2.1. Deneyselde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneysel çalışmalarda, Karadeniz Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir çimento fabrikasının ham maddeleri kullanılmıştır. Söz konusu fabrikada kalker, metaşist ve kil taşı ile Portland Cem I 42,5 R ve Cem IV 32,5R/B çimentosu üretimleri gerçekleştirilmektedir. Çimento ham karışımlarının oluşturulması için kırıcıdan saf kalker, kalker+kil ve kalker + metaşist olmak üzere 3 farklı şekilde hammadde karışımları ile çalışılmıştır. Çalışma kapsamında farklı zamanlarda kırıcıya beslenen saf kalker, kil ve metaşist karışımlarına ilaveten kalker+kil ve kalker+metaşist beslemelerinin yaratmış olduğu rutubet kaynaklı problemler hem kırıcı bazında hem de değirmenler bazında sahip oldukları rutubetlerin etkileri incelenmiştir.

Cem IV 32,5R/B çimentosu üretiminde alçıtaşı ve puzolanik katkı malzemesi olarak tras kullanılmıştır. Gerek alçıtaşı ve gerekse tras numunelerinin bunkerlerde ve çimento değirmenlerinde rutubet kaynaklı yaratmış oldukları problemler ham maddelerin rutubet miktarları hesaplanarak incelenmiştir.



Şekil 1: Metaşist ve kil taşı numuneleri görüntüleri

Çalışmalarda kullanılan kalker, kil taşı ve metaşist numunesi, Karadeniz Bölgesinde faaliyet göstermekte olan bir çimento fabrikasına ait ham madde ocaklarından temin edilmiştir. Tras numunesi Yozgat ili Saraykent ilçesinden Alçıtaşı numunesi ise Sivas ili Yıldızeli ilçesi Bedirli mevkiinde bulunan alçıtaşı ocaklarından temin edilmiştir. Numuneler ocak zonlarından konileme dörtleme yöntemi ile alınarak, çimento fabrikası kalite kontrol laboratuvarında XRF (Atomika teknik panalytical axios modeli) metoduyla kimyasal analizi yapılmış ve deneyselde bu numuneler kullanılmıştır (Şekil 1).

2.1.1. Rutubet tayini

Takriben 25 gram rutubeti tayin edilecek malzeme etüvde 105 °C de sabit ağırlığa kadar bekletilir, tartılır (b gr), olur.

$$\% \text{ Rutubet} = \frac{25-b}{25} \times 100 \quad (1)$$

Malzemenin içerdiği su yüzdesi olarak ifade edilen rutubet proseste yapışma ve tıkanmalara meydan verecek kadar yüksek olmamalıdır. Ayrıca rutubetin yüksek olması, taşıma enerjisini, pişirmede yakıt tüketimini artırmaktadır.

2.2. Endüstriyel Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar ve Özellikleri

2.2.1. Konkasör ünitesi (kırıcılar)

Ocaktan çıkarılan değişik boyuttaki ham maddeler, bir adet 600 t/sa üretim kapasitesine sahip çekiçli kırıcıya beslenmektedir. Kırıcı ünitesi, darbeli çekiçli, çift rotorlu ve kovalı çelik bantlı besleyicilere sahiptir (Şekil 2). Kırıcı bunkerine 100 cm boyutundan küçük patlamış kalker malzemeleri veya büyük boyutlu patar malzemeler rahatlıkla beslenebilmektedir. Kırıcıya ham madde ocaklarından beslenen malzemeler, darbeli çekiçler ve ızgara plakalar vasıtasıyla 100×100 mm boyutlarına kadar küçültülmektedir. Kırıcıdan çıkan malzemeyi boyutlandırmak amacı ile rotorların altında yaklaşık 100 mm açıklıklara sahip karşılıklı ızgaralar bulunmaktadır. ızgara açıklıklarından dökülen malzeme hemen kırıcı altındaki lastik toplama bandına dökülmekte ve oradan da nakil batlar vasıtasıyla ön homejene stok sahasına taşınmaktadır.



Şekil 2. Çift rotorlu çekiçli kırıcı

2.2.2. Farin değirmen ünitesi

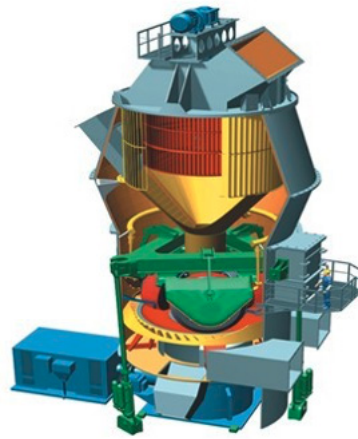
Çimento fabrikasında farin değirmeni beslemesi; kireç taşı için 60-300 ton/sa, kil beslemesi için 15-70 t/sa, demir cevheri 0,5-15 t/sa kapasiteli bant kantarları mevcuttur. Besleme kantarlarından toplama bantlarıyla değirmene gelen ham madde karışımı 320 ton/sa kapasiteli 1 adet dikey valsli değirmende öğütülür.

Döner fırınlarda optimum sürede klinker oluşturabilmek için çimento ham maddelerin kimyasal yapılarında var olan; SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO ve MgO gibi oksitlerin en düşük sıcaklıkta kendi aralarında tepkimeye girmeleri gerekmektedir (klinkerleşme veya sinterleşme reaksiyonları). Klinkerleşme sürecinde farin ham maddelerinin çok ince öğütülmesi (90 µm elek üstü %10-15) ve ham madde karışımının iyi derecede homojenleştirilmesi gerekir. Aksi durumda klinkerleşme için gerekli reaksiyonları yüksek tepkime sıcaklıklarında ve uzun bir zaman diliminde gerçekleşecek (Kuleli, 2010).

Çimento üretim maliyetleri ve ekonomisi açısından bu durum şöyle açıklanabilir; Klinker üretim maliyetlerinin ve ekonomisinin daha düşük olabilmesi için homojen ham madde karışımı gerekli ve klinkerin belirli bir değere kadar ince öğütülmesi gerekir. Ham maddenin öğütülerek büyük yüzeye sahip ürün elde edilmesi, döner fırına beslenen bu ürünlerdeki bileşenler arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonların hızlarını arttırmak için gerekmektedir (Khalil vd., 2014). Çimento teknolojisinde ham maddelerin öğütülmesinin nedeni budur. Farin öğütmede yaş ya da kuru sistem kullanılabilmesine karşın dünyadaki enerji maliyetindeki artışlar nedeniyle son yıllarda yaş öğütme hemen hemen terk edilmiştir (Korkmaz, 2017).

Çimento öğütme teknolojisinde bilyalı tüp yatay değirmenler ve valsli dik değirmenler kullanılmaktadır. Valsli dik değirmenlerdeki elektrik enerjisi tüketimi bilyalı yatay değirmenlere göre %30 daha düşüktür. Son yıllarda ham madde öğütülmesinde dikey valsli değirmenlerin kullanımı oldukça artmıştır. Çimento fabrikasında 320 t/sa kapasiteli 1 adet dikey valsli ve 2 adet bilyalı değirmen mevcuttur (Şekil 3). Ham madde öğütme ünitesinde oluşacak toz partiküllerini tutmak için, üniteye 8.200 m³/dk. kapasiteli ve 110 °C sıcaklığı olan elektrofiltre konulmuştur.

Sıcaklığın 110 °C üzerinde olması durumunda soğutma kulesinde gaz karışımını soğutularak elektro filtreye gönderilir. Ön ısıtıcıdan sağlanan sıcak gazlar değirmenden geçirilerek ham maddenin kuruması sağlanır. Değirmende verimliliği arttırmak için, yüksek performanslı seperatörler kullanılmaktadır (Korkmaz, 2017).



Şekil 3. Dik valsli farin değirmeni

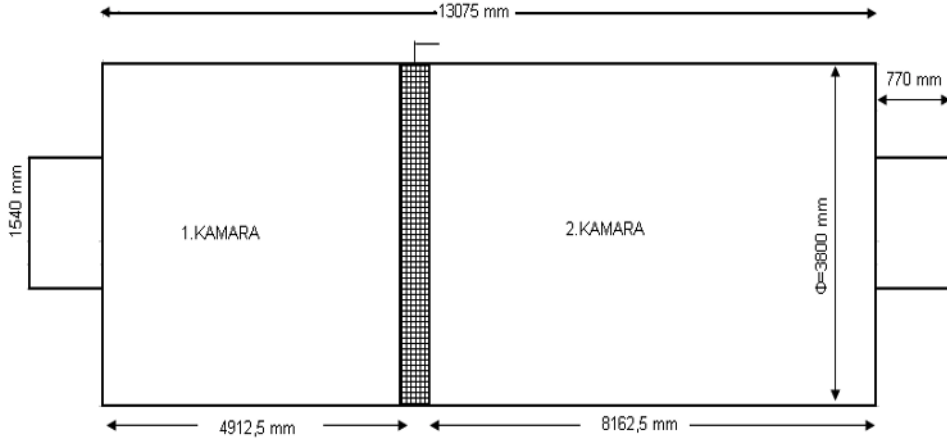
2.2.3. Endüstriyel öğütme testlerinde kullanılan çimento değirmeni

Endüstriyel değirmenler genellikle kritik hızlarının %68-75'i arasında çalıştırılmaktadırlar ve bu sayede değirmen içerisinde özellikle iri tanelerin kırılması için gerekli darbe etkisi sağlanmış olmaktadır (Rolf, 1993). Yapılan çalışmalar sonucunda küçük bilyaların ince öğütmede büyük bilyaların ise iri öğütmede kullanılmaları gerektiği belirlenmiştir (Klimpel, 1997).

Endüstriyel ölçekli öğütme deney çalışmaları çimento fabrikası 1 ve 2 nolu bilyalı çimento değirmeninde gerçekleştirilmiştir ve değirmenin özellikleri Şekil 4.'de verilmiştir.

Seperatör cinsi: Dinamik Seperatör;
Değirmen kapasitesi: 75 t/sa;

Değirmen devir hızı: 16,6 d/dk
Değirmen Ana tahrik motor gücü: 2800 kWsa



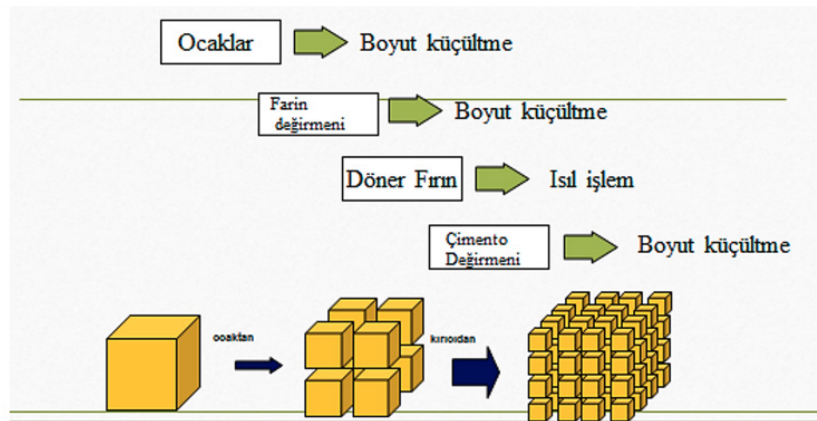
Şekil 4. Endüstriyel çimento değirmeni kesiti

Tablo 1. Endüstriyel çimento değirmeni şarj miktarları

1. KAMARA			2. KAMARA		
Bilya Çapı	Miktar	Oran	Bilya Çapı	Miktar	Oran
mm	Kg	%	(mm)	Kg	%
90	10000	14,29	50	9500	8,64
80	24000	34,29	40	9500	8,64
70	24000	34,29	30	12000	10,91
60	12000	17,14	25	15000	13,64
Toplam	70.000	100	20	34000	30,91
			17	30000	27,27
			Toplam	110.000	100

3. Bulgular

Çimento fabrikalarında üretim, fabrikaların teknik güçlerine göre 5 safhada gerçekleştirilmektedir. Bunlar ocaklar ve konkasör, farın (hammadde öğütme), pişirme ve öğütme safhalarıdır. Üretim safhalarında ocaktan hammaddelerin çıkartılarak prosese kazandırılması ve çimento mamul (nihai) ürün haline gelene kadar geçen süreçte karşılaşılan rutubet kaynaklı endüstriyel proses ve kalite problemleri değerlendirilerek bazı karşılaştırmalar yapılmış ve aşağıda başlıklar halinde açıklanmıştır.



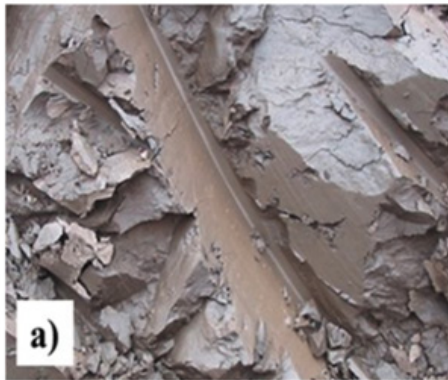
Şekil 5. Temel çimento üretim süreci

3.1. Konkasör Ünitesi (Kırıcılar)

Çimento ve klinker girdilerinin hepsinde rutubet vardır ve maliyeti artırıcı bir etkidir. Prosesin her aşamasında prosesi olumsuz yönden etkilediği için söz konusu suyun her halükarda ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu da belirli bir enerji tüketimi demektir. Çimento fabrikalarında kullanılan kırıcı rotorlarının altında sabit aralıklı ızgaralar mevcut olup ızgaraya gelen rutubetli malzemeler (özellikle kil taşı ve benzer kayaçlar) tıkanmalara ve üretim kayıplarına sebep olmaktadır. Çalışmanın yapıldığı çimento fabrikasında çekiçli tip kırıcı mevcut olup, kırılacak malzemenin sertliğine ve içeriğine göre çekiçlerin çabuk aşınmasına ilave olarak malzemenin aşırı rutubetinden dolayı ızgaraların tıkanması ve rutubetli malzemenin rotorlara sarması gibi sorunlarla sıklıkla karşılaşmaktadır. Kil malzemesinin rutubetinin yüksek olması bu ızgaraları ve kırıcı besleme şutu ve besleme bantlarını sararak haftada birkaç kez blokaja ve üretim kayıplarına neden olmaktadır. Kil malzemesine alternatif olarak düşük rutubet içeriğine sahip metaşist malzemesi sayesinde kırıcılarda sadece çok yoğun yağış şartlarında yıl içerisinde az sayıda kırıcı sarma problemi ile karşılaşmıştır. Ocaklardan kırıcıya kalker, metaşist ve kiltası beslemesi esnasında duruş sayıları aşağıda tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Çimento ham maddeleri rutubet kaynaklı duruş miktarları

Ham madde Türü	Nisan	Mayıs	Temmuz	Eylül	Kasım	Aralık
	Adet	Adet	Adet	Adet	Adet	Adet
Kil taşı	9	2	-	-	5	7
Metaşist	2	-	-	-	2	1
Kalker	2	-	-	-	-	1



Şekil 6. Kırıcıya yüksek rutubetli malzeme beslenmesi sonucu ortaya çıkan problemler

Çalışma kapsamında ham madde karışım oranına göre hazırlanan kalker, kil taşı ve metaşist birlikte ve ayrı olmak üzere farklı biçimlerde kırıcıya beslenmektedir. Beslenen malzemeler kırıldıktan sonra ön homojene ünitesinde şekil 7'de görüldüğü gibi harmanlanarak yığınlar halinde stoklanmaktadır.



Şekil 7. Kırıcıya malzeme beslemesi sonucu oluşturulan yığınlar



Şekil 8. Farin ham madde bunkerleri

Ön homojene stok sahasında hazırlanan yığınlar farin değirmenine beslenilmeden önce farin bunkerlerine sevk edilmektedir. Yüksek rutubet içeriğine sahip olduğu takdirde kil yada demir cevheri farin bunkerlerinden akma zorluğu yaşatmakta ve özellikle kış aylarında donarak bunker cidarlarına yapışmaktadır. Hazırlanan karışım reçetesine göre malzeme kompozisyonu oluşturulmak istense de hammaddelerin akışlarında yaşanan problemler nedeniyle düzenli bir malzeme beslemesi yapılamamaktadır. Bunker çevresine malzemenin akışının sağlanabilmesi için patlaç denilen ekipmanlar konulsa da malzemenin sürekli akışı yerine ara ara kesikli olarak malzemenin sevkiyatını sağlamaktadır. Bu da oluşturulmak istenen farin malzemesinin kimyasal kompozisyonunu, homojenliğini olumsuz etkilemektedir. Farin silolarında her ne kadar farin homojene edilmek istense de fırına düzensiz kalite de mal girişi olacağından klinkerin pişirilmesi için gerekli olan yakıt tüketiminin artmasına neden olacaktır. Farin rutubeti ne kadar düşük olursa, homojene olma özelliği artacağından dolayı pişme daha kolay gerçekleşecek ve yakıt tüketimi de düşecektir. Çimento üretiminde farin rutubeti %1'in altında olması istenmektedir. Farin rutubetinin yüksek olması, farinin akışkanlığını zorlaştıracak, rutubeti oluşturan suyun buharlaştırılmasında ekstra yakıt kullanılacak ve bu suyun taşınmasında fazladan enerji tüketileceğinden üretim maliyeti artacaktır. Farinin oluşturan ana ham maddelerden kil taşı, özellikle kış aylarında metaşist mineraline göre % 4-5 daha fazla rutubet içermektedir. Kil taşı mineralinin içerdiği su yüzdesi olarak ifade edilen rutubet, proseste yapışma ve tıkanmalara yol açacak kadar yüksektir. Ayrıca kil taşı mineralinin rutubetinin yüksek olması, üretim enerji maliyetini ve pişirmede yakıt tüketimini arttırmaktadır. Ham maddeleri 6 aylık rutubet oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Ham madde rutubet miktarları

Ham madde Türü	Nisan	Mayıs	Temmuz	Eylül	Kasım	Aralık
	%	%	%	%	%	%
Kil taşı	11,7	6,5	3,2	5,5	8,4	8,4
Metaşist	3,4	4,4	3	3,5	4,7	4,7
Kalker	1,4	0,5	0,2	0,7	1,2	1,2
Demir Cevheri	12,5	5,5	1,2	0,8	8,6	9,40

Rutubeti yüksek hammaddelerle çalışılması işletme verimliliğini yüksek derecede düşürdüğü gibi işletme maliyetlerini de yüksek oranlarda arttırmaktadırlar. Üretim kademelerinde meydana getirdikleri sarma, blokaj bazı zamanlarda motor yanmalarına kadar gitmekte, üretimde zaman kaybına neden olduğu gibi bir de ekipman bakım ve yeni yatırım maliyet kalemlerinin de artmasına sebep olmaktadır. Çalışmanın yapıldığı çimento fabrikasında rutubeti yüksek olan kil taşı minerali yerine düşük rutubet içeriğine sahip metaşist mineralinin kullanılmaya başlanması ile malzeme sarması, üretim duruş kaynaklı zaman kaybı, blokaj v.s gibi sorunlarla çok daha az karşılaşılmış olup rutubet kaynaklı üretim maliyetlerinde yaklaşık %60 azalma görülmüştür.

Çimento fabrikalarında kırma esnasında oluşan toz partiküllerini tutmak için pulvarize sistemler kurulmaktadır. Pulvarize sistemin amacı ocak kamyonlarından kırıcı bunkerine malzeme boşaltılması esnasında ve beslenen malzemenin kırılması esnasında ince toz partiküllerin yoğunluğunu suyla arttırarak toz oluşumunun engellenmesidir. Fakat bu sistemde toz partiküllerinin fazla su ile temas edildiği taktirde kırıcıda ıslak malzemenin cidarlara sarmasına ve yapışmasına neden olarak istemsiz kırıcı duruşlarına sebep olmaktadır (Kuleli, 2012). Yine kırıcıya rutubetli kalker ya da kil taşı beslendiğinde benzer problemlerle karşılaşmaktadır.

3.2. Farin Değirmeni

Genellikle kuru üretim sürecinde, çimento hammaddelerinin nem içeriği öğütmeden önce kurutmayı gerektirir. Kireçtaşının nem içeriği yaklaşık % 8'e kadar, marnınki %15 'e kadar ve kil, % 20'ye kadar nem içeriğine sahiptir; yaş granüle edilmiş yüksek fırın cürufu %35 'e kadar nem içermektedir. Kömür ayrıca genellikle kurutmayı gerektirmektedir. Çimento hammaddelerinin içerdiği nem şu şekilde görünebilir:

1. Serbest nem, yani malzeme parçacıklarının yüzeyinde görünen su.
2. Kılcal su, örneğin malzeme parçacıklarının doku boşluklarını dolduran su.
3. Adsorpsiyon-nem, malzemenin yüzeyinde emilen su (cement equipment, 2020).

Kaolinitte olduğu gibi kil minerallerinde görünen kimyasal olarak bağlı su, nem olarak tanımlanmaz. Bu suyun uzaklaştırılması, belirli mineralin yapısında bir değişikliğe neden olmaktadır. Bu belirli nem türlerinin her biri, kurutma için belirli bir ısı tüketimi ve farklı bir kurutma süresi gerektirir; bu her durumda kurutma testleri ile belirlenmelidir.

Farin değirmenini optimize etmek için hammadde seçimi ve kimyasal ve fiziksel özelliklerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Malzemelerin kalite açısından; farin değirmenlerinin performansı öncelikle şunlara bağlıdır:

- A) hammadde boyutu
- B) hammadde rutubeti
- C) hammadde sertliği / öğütülebilirlik
- D) farin modülleri ayarı (LSF, SM ve ALM) / hammaddelerin kimyasal parametreleri (Nohman, 2020).

Bilyalı değirmen, % 12'ye (maksimum) kadar giriş rutubet seviyesini barındırabilmekte; dikey valsli değirmen ise maksimum % 20' ye kadar rutubet seviyesini barındırabilmektedir. Farin değirmenlerindeki aşırı yüksek nem seviyesi değirmen verimini düşürse de, yatağı stabilize

etmek ve dikey valsli değirmen durumunda titreşimleri önlemek için yine de belirli bir miktar neme ihtiyaç duyulmaktadır (Mahmud, 2020). Hammaddeler en yüksek rutubete bahar aylarında sahip olmaktadır. Farin değirmenine beslenmek istenen bir hammadde kompozisyonunun değirmen giriş rutubet oranını hesaplayacak olursak;

Farin reçetemiz;

% 74 kalker, % 24 kil ve % 2 demir cevheri olsun. Hammaddelerin sahip oldukları nisan ayı rutubet oranları ile hammaddelerin karışım oranlarını çarparsak;

$\%74 \text{ kalker} \times \%1,4 \text{ rutubet} + 24 \text{ kil} \times \%11,7 \text{ rutubet} + \%2 \text{ demir cevheri} \times \%12,5 \text{ rutubet}$

Farin değirmeni giriş rutubeti = % 4,10.

Kil yerine rutubeti daha düşük metaşist hammaddesi ile değirmen giriş rutubetini hesap edecek olursak,

Reçetemiz % 74 kalker, % 24 metaşist ve % 2 demir cevheri olsun. Hammaddelerin sahip oldukları rutubet oranları ile hammaddelerin karışım oranlarını çarparsak;

$\%74 \text{ kalker} \times \%1,4 \text{ rutubet} + 24 \text{ metaşist} \times \%3,4 \text{ rutubet} + \%2 \text{ demir cevheri} \times \%12,5 \text{ rutubet}$

Farin değirmeni giriş rutubeti = % 2,10

Dolayısıyla değirmene ne kadar düşük rutubetli hammaddeler seçilirse değirmen giriş rutubeti o kadar düşük olacaktır. Dolayısıyla farin değirmenine giren malzemenin kurutulması için gerekli sıcaklık daha düşük olacak ve daha az enerji harcanacaktır.

Değirmen giriş rutubetinin yüksek olması sadece enerji maliyetini arttıran ve kaliteyi düşüren bir unsur değildir. Değirmene beslenen malzemenin rutubetinin yüksek olması demek bunkerlerden yüksek rutubetli malzeme sevkiyatı demektir. Yani bunkerlerde yüksek rutubet nedeniyle malzemenin yapışması ve akmaması değirmene istenilen kompozisyonda malın beslenemeyeceği anlamına gelmektedir. Buda değirmende istenildiği kadar malzeme üretilmiş olunursa olunsun kaliteli ve istikrarlı bir farin ürünü elde edilemeyeceği demektir. Bunun yanısıra farin değirmenlerinde en çok karşılaşılan problemlerden biri de yaş malzemeye bağlı olarak besleme hücre tekeri, helezon yâda elavator geçişlerinde tıkanma problemlerinin ortaya çıkmasıdır. Bu tür problemler kalitenin bozulması ile kalmayıp saatlerce üretimin durmasına hatta değirmen blokajlarına kadar gitmektedir.



Şekil 9. Yüksek rutubetli malzeme beslenilmesi sonucu silo ve klapelerin bloke olması

Hammaddelerin giriş nemi, klinker pişirme prosesinden çıkan sıcak gazlar kullanılarak kuru-tulmaktadır; bu nedenle, ham maddelerdeki nem seviyesi, Atık ısı geri kazanımlı enerji santra-linin tasarlanmasının yanı sıra, pyroproses aşamalarının (5./6. aşama) sayısının tasarlanmasında normal olarak sınırlayıcı bir noktadır; ayrıca fırının ısı verimi ile de ilgilidir. Bazı tesisler ayrıca özel sıcak gaz üreten ekipmanlar (brülör vb.) kullanmakta (ek üretim maliyetine rağmen); özel-likle fırın kapalıyken ve üretim hedeflerine ulaşılması gerektiğinde kullanılmaktadır. Ayrıca, ana tahrikten üretilen ısı, ham madde neminin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır.

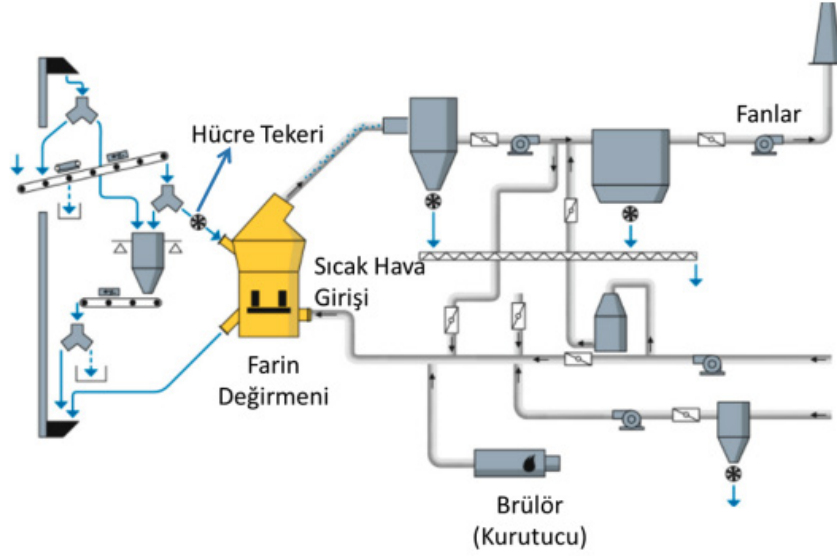
Farin öğütmede genellikle yüksek öğütme kapasitesine sahip valsli dik değirmenler tercih edil-mektedir. Valsli değirmenler, kötü valsli tabla durumu, yanlış set halkası yüksekliği veya kötü su enjeksiyonu nedeniyle, hepsi dengesiz öğütme yatağına yol açan titreşime eğilimlidir. Yatak kararsızlığının önemli bir nedeni, genellikle doğrudan yatağa su püskürtülerek hafifletilebilen ince, kuru değirmen beslemesidir. Çiğ farin hedef neminin normalde % 0,25 - 1,0 arasında tutulmasının nedeni budur; ayrıca, maksimum çiğ farin nemi, yani <% 1,0, ham farinin akış-kanlığını sağlamak için tutulmaktadır.

Normalde, yeni bir çimento fabrikası tasarlarırken daha yüksek nemli hammaddelerin işlenmesi için, bir sıcak gaz jeneratörünün kullanılmasını önlemek için gaz devresi tasarımı optimize edilmektedir. Kanıtlanmış teknikler, soğutucu egzoz gazlarının ham öğütme devresine yön-lendirilmesini ve bu ön ısıtıcı çıkış gazı sıcaklığını artırmak için bazı hammaddelerin siklon aşamalarından birini atlmasına izin vermeyi içermektedir.

% 2 ila 3 nem oranına sahip kuru malzemeler, ısı verimi 730 ila 700 Kcal / Kg Klinker olan 5 veya 6 aşamalı siklon ön kireçleme fırını kullanırken, % 17 ham besleme nemine sahip aşırı ıslak malzemeler yalnızca 3 siklon aşaması ve 850 ila 890 Kcal / Kg klinker; bu nedenle, ön ısıtıcı aşamalarının tasarımı, sayısı ve sonuçta ortaya çıkan ön işlemenin termal verimliliği, ağırlıklı olarak ham maddelerdeki nem seviyesine bağlıdır. Hammaddelerdeki nem seviyesi çok yüksek olduğunda; genellikle daha yüksek kapasiteli bir farin değirmeni fanı ve büyük bir ayırıcı / sınıflandırıcı gerekmektedir.

Son zamanlardaki farin değirmeni tasarımlarının gözden geçirilmesi, maksimum tasarım ham-madde neminin % 4'ten % 17'ye çıkarılmasının, kurulu fan kapasitesinin iki katına çıkmasına neden olacağını göstermektedir. Ayırıcı boyutu, ayırıcı kafesi boyunca yaklaşık 4 m/s civarında tipik bir gaz hızı değerine uymak için artmalıdır.

Yüksek basınçlı merdaneleri değirmenlerin tek başına (bilyalı değirmen olmaksızın) kulla-nılması son öğütme olarak tanımlanmaktadır. Özetle değişik uygulamaları var olan yüksek basınçlı merdaneleri değirmenlerin, yüksek kapasite ve daha düşük enerji tüketimi gibi avan-tajlarının yanında merdanelerin aşınma problemleri, öğütülen malzemenin tane büyüklüğü, rutubeti ve sıcaklığı gibi sınırlamalar dezavantajları olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 10. Farin Değirmeni sıcak gaz prosesi

Herhangi bir farin değirmeni, özellikle dikey valsli değirmeni optimize ederken, değirmen ayırıcısı ve fandan yeterli gaz akışının olduğundan emin olmanın, değirmen öğütme verimliliğini optimize etmek için eşit derecede önemli olabileceği kabul edilmelidir. Mevcut en iyi bilyalı değirmeni veya dikey valsli değirmeni öğütme ünitesi kurabilir, ancak iyi boyutlandırılmış ve verimli bir ayırıcı ve bununla birlikte gelen bir fana sahip olunamazsa asla optimum sistem verimliliğini elde edilemez.

3.3. Çimento Değirmenleri

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda hammaddelerin öğütme işlemlerinin kurutma sistemleri ile entegre edilmiş hibrit değirmenlerde gerçekleştirilmesi boyut küçültme işlemleri için harcanan enerjinin diğer kurutmasız değirmen sistemlerinden daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca rutubeti yüksek klinkerlerin öğütülmesi sırasında, nem içeriği öğütme verimini olumsuz yönde etkilediği yapılan bilimsel ve pratik çalışmalar sonucu bilinmektedir.

Çimento üretiminde puzolanik çimento üretimi için genellikle tras malzemesi kullanılmaktadır. Cem IV/B 32,5 R puzolanik çimentosu üretmek için %36-55 arasında tras gibi puzolanik malzeme kullanımına standartlar izin vermektedir. Tras özellikle kış aylarında yüksek rutubete sahiptir bu nedenle yüksek nem trasların belli bir katkı oranına kadar kullanımına olanak tanır. Bunun en büyük nedeni özellikle kış ve bahar aylarında yüksek rutubet nedeniyle tras malzemesinin bunkerlere sarması ve akışta yarrattığı güçlükler, havalı bantlarda akışlarda yarattığı problemler ve özellikle de değirmen bilya ve plakalarında yapışma yaparak değirmen üretimlerini bloke ederek uzun duruşlara neden olmasıdır. Yüksek rutubet değirmen sıcaklığını düşürerek değirmen hava akışını ve malzeme sirkülasyonunu azaltmaktadır. Bu nedenle değirmen sıcaklığını arttırmak ve hava akışını sağlamak için yüksek sıcaklıklar (genellikle klinker soğutma ünitesinden hava hattı çekilir) yada değirmen öncesi kurutucu sistemler kurmak gerekir ki buda maliyetli bir iştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği çimento fabrikasının kullandığı çimento katkı malzemelerin rutubet miktarları tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. Çimento katkı malzemeleri rutubet miktarları

Ham madde Türü	Nisan	Mayıs	Temmuz	Eylül	Kasım	Aralık
	%	%	%	%	%	%
Alçı taşı	4,1	1,0	0,5	0,8	3,4	3,7
Tras	8,2	1,80	1,50	1,60	6,7	6,5
Klinker	0,25	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28

Çimento değirmeni ürün reçetesine göre değirmen giriş rutubetini hesap edecek olursak; % 59 klinker, % 36 tras ve % 5 alçı taşı olsun. Hammaddelerin sahip oldukları rutubet oranları ile hammaddelerin karışım oranlarını çarparsak;

$$\%59 \text{ klinker} \times \% 0,28 \text{ rutubet} + \%36 \text{ tras} \times \% 8,2 \text{ rutubet} + \%5 \text{ alçıtaşı} \times \%4,1 \text{ rutubet}$$

Çimento değirmeni giriş rutubeti = % 3,31.

Fakat standartların izin verdiği ölçüde maksimum tras beslenmiş olsaydı;

$$\%40 \text{ klinker} \times \% 0,28 \text{ rutubet} + \%55 \text{ tras} \times \% 8,2 \text{ rutubet} + \%5 \text{ alçıtaşı} \times \% 4,1 \text{ rutubet}$$

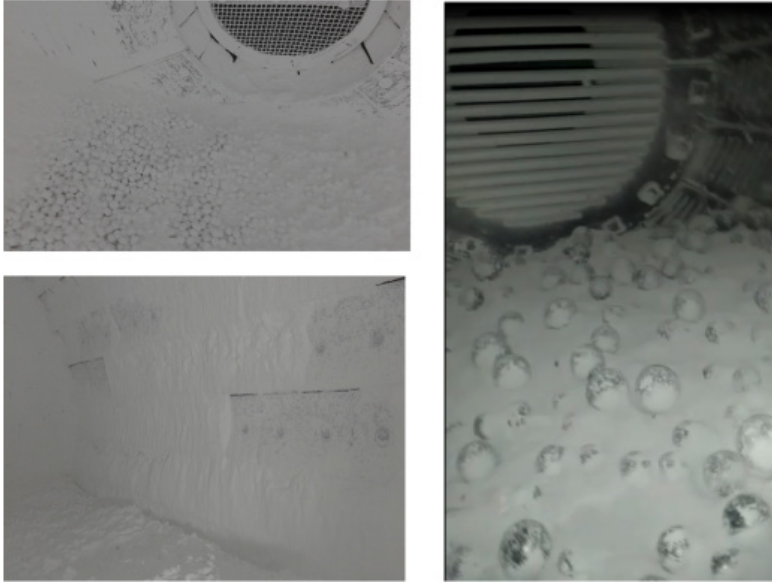
Çimento değirmeni giriş rutubet oranı= % 4,78 fakat yüksek rutubet nedeniyle bu orana çıkılamamaktadır.

Ayrıca % 8,5 tras rutubetinde % 20 tras oranında Cem IV/B 32,5 R puzolanik çimento üretimi saatte 80 ton iken %36 tras kullanımında üretim kapasitesi saatte 65 tona düşmüştür. Burada yüksek rutubet içeriğine sahip tras oranını % 16 kullanım oranının artması ile %18,75 üretim kapasitesi azalmıştır.

Su, öğütme verimini etkileyen ana faktördür. Bilyalı değirmenlerde malzemenin kurutulması amaçlandığı gibi çıkan ürünün, özellikle öğütülen çimento ise, çıkış sıcaklığının denetimi de çok önemlidir. Klinkere katılan alçının bozulmaması için değirmen çıkış sıcaklığı 100 °C' nin altında tutulmalıdır. Bazı çimento üreticileri öğütme sıcaklığını düşürmek ve öğütme kapasitesini arttırmak için, malzemeye öğütme bandından yâda değirmen çıkış diyaframından su püskürtmektedirler. Öğütme verimliliği için su ne kadar düşük olursa, kuru çimento değirmeni üretiminde teorik olarak malzeme suyu ihtiyacı ne kadar düşükse öğütme verimi o kadar iyi olmaktadır. Öğütmeyi olumsuz etkileyen malzeme nemini azaltmak için alınabilecek bir takım önlemler vardır. Bunlardan birincisi; malzeme ile birlikte, onun akışı ile birlikte eş yönde, değirmene sıcak gaz verilmesi, B) Nemli malzemeye bir miktar kuru ve ince malzeme eklenmesi gibi. Değirmen içerisindeki malzemenin nemini azaltmak, yöntem olarak, malzemenin kurummasını arttırmak, değirmene giren sıcak havayı iyileştirmek ve kuruma kapasitesini arttırmak seçenek olarak düşünülebilir. Kaldı ki, değirmen içerisindeki hava sıcaklığını 10 °C arttırmak, öğütme verimliliğini etkili bir şekilde % 1 oranında arttırmaktadır. Sıcak havayla kurutmanın nem gereksinimleri arttıkça değirmen besleme kapasitesi de artmaktadır.



Şekil 11. Endüstriyel tip bilyalı çimento değirmeni



Şekil 12. Yüksek rutubetli malzemelerin değirmen içerisindeki sarma ve yapışma görüntüleri

Hammadde belirli bir su oranına ulaştığında, malzemenin kolayca öğütülmesi ve üretim kapasitesinin istikrarının korunması için, gerek fabrika bünyesinde ve gerekse tedarikçiler tarafından temin edilen hammaddelerin orijinal nem içerikleri kontrol edilmelidir. İşletmelerin üretimlerini daha iyi yönlendirebilmeleri için malzeme stok durumunu (hammadde, farin ve klin-ker), iklim değişikliğini ve üretim ve hava koşullarını, üretim parametrelerini günlük olarak takip etmelidirler. Özellikle malzemenin kapsamlı nem içeriği yüksekse, gerek fırın kapasitesi gerekse değirmenlerin üretimleri düşecektir.

Orta deşarjlı bir kurutma değirmenini örnek alırsak, değirmenin kapsamlı nem içeriği % 2'nin üzerine çıktığında, silolarda tıkanma, bilyaların yapışması ve değirmende yetersiz havalandırma meydana gelecektir. Malzemenin öğütme sıcaklığına yükseltilmesi için kurutma odasında nemin buharlaşmasının olabildiğince artırması, son sıcaklığın çok yüksek olması, çok fazla su, öğütülen malzemenin ince bir toz halinde bilyalara ve astar yüzeylere yapışmasını sağlayacak ve burada bir "yastık tabakası" oluşturacaktır. Böylece öğütme ortamının malzemeyi öğütme performansı azalacak, aşındırıcılık artarak bilya ve levhaların aşınması hız

kazanacak, değirmen üretim verimi düşecektir. Belli bir sıcaklık altında nemli bir malzemenin değirmen içerisindeki davranışları tablo 5 'de verilmiştir.

Tablo 5. Çimentonun sıcaklık ile nem arasındaki davranışları (Rotary kiln factory, 2020).

Sıcaklık	Nem İçerik	Hammadde Yapışma Miktarı	Çimento Yapışma
100	1	-	85
100	2	97,5	95,5
100	3,3	114	126,5
100	4,6	117	136
100	6	117,5	-

Çimentonun nemden korunması ve depolanması, beton mukavemeti ve diğer özelliklerini olumlu veya olumsuz yönde etkiler. Çimento, havanın rutubetini alarak topaklanabilir. Topakların parmakla kolaylıkla ezilebilmesi, katılaşma, sertleşme ve dayanım kazanmasının bu topaklanmadan etkilenmeyeceğini gösterir. Sert topaklar bozulmanın azami belirtisidir. Bu nedenle çimentonun depolanmasında, su ile temasından veya rutubetli havada kalmamasına özen gösterilmelidir.

Torba halinde depolanıyor ise ahşap ızgara üzerinde 10 sıradan fazla olmamasına ve sıralar ile duvar arasında 5-10 cm boşluk kalmasına, sıraların birbiri arasında hiç boşluk kalmayacak şekilde depo edilmesine özen gösterilmelidir. Çimento üzeri rutubet ve hava geçirmeyen örtülerle örtülmelidir. Örtü, ızgara altına kadar kıvrılmalı ve üzerinde suyun göllenmesine engel olunmalıdır. Çimentoların torbalı halde depolama süresinin en fazla 2 ay olması önerilmektedir. Uzun süre bekleyen Portland çimentoları mukavemetinden kaybetmeye başlar (Rotary kiln factory, 2020).

4. Sonuç

Çimento hammaddeleri belli bir rutubete sahiptir. Özellikle kil taşı ve trasin rutubet miktarları kış aylarında hayli fazladır. Artan rutubet miktarı ile birlikte kil taşı kırıcılarında çelik bant paletlerine ve ızgaralara sararak nisan ayında toplam 32 saat kırıcı ünitesinin duruşuna sebep olmuştur ki buda yaklaşık 1,5 güne tekabül etmektedir. Kil taşına göre daha düşük rutubet içeriğine sahip metaşist malzemesinin beslenmesi ile nisan ayında kırıcılarında toplam 5 saatlik bir duruş yaşanmıştır. Her iki malzeme birbirleri ile kıyaslanacak olursa düşük rutubetli bir malzeme ile çalışmanın üretimin sürekliliği bakımından ne kadar önemli olduğu aşikardır.

Kiltaşının ve demir cevherinin farin bunkerlerine saf beslenilmesi ile birlikte özellikle aralık, ocak ve şubat aylarında gece -28 °C' de soğukta donduğu ve bunker cidarlarına yapıştığı görülmüştür. Bu nedenle farin beslemelerinde problemler yaşanarak kesikli üretim gerçekleştirilmiştir. Yine aynı zamanda kiltaşı ve demir cevherinin içerdiği yüksek rutubet nedeniyle farin değirmeni hücre tekerine malzeme pres yaparak üretim akışını durdurmuştur. Tüm bu dar boğazlar kil taşları ve demir cevherleri önce kapalı stokta belli bir süre bekletilip rutubeti düşürülmüş ve daha sonra kuru kalker malzemesi ile karıştırılarak farin bunkerlerine beslenilerek aşılmıştır. Bunker çevresine patlaç denilen hava şok ekipmanları kurulsa da her ne şartta olursa olsun rutubetin düşürülmesi gerektiği aksi taktirde patlaçların da verimli görev yapmadığı görülmüştür.

Farin değirmenine her ne kadar klinker soğutma hattından yada ön ısıtıcıdan kurutma amaçlı sıcak gaz verilse de yüksek rutubetli ham madde kompozisyonunun beslenmesi farin değirmeni üretimini 320t/h'den 290t/h'lere kadar düşürdüğü ve değirmen sıcak gaz derecesini düşürerek değirmen verimini olumsuz etkilediği görülmüştür.

Çimento değirmenlerinde maliyeti düşürmek amaçlı katkı malzemesi olarak tras kullanılarak Cem IV/B 32,5 R çimentosu üretilmektedir. Standartlar % 55'e kadar tras kullanımına izin vermiş olsa dahi gerek endüstriyel çalışmanın yapıldığı fabrikada gerekse ülkemizdeki diğer çimento fabrikalarında saf olarak en fazla %35'lere kadar tras beslenebilmektedir. Bunun en büyük nedeni kış aylarında yüksek rutubete sahip olan trasın değirmen çıkış sıcaklığını düşürerek gerek değirmen plakalarına gerek bilyalara gerek havalı bantlarda gerekse torbalı filtrelerde yapışarak üretimi olumsuz etkilemesidir. Bu nedenle katkı malzemesi olarak tras kullanarak üretim maliyeti düşürülmek istenirken diğer taraftan 80t/h çalışan bir değirmenin üretim kapasitesi olumsuz değirmen şartları nedeniyle 65 t/h hatta 60t/h'lere kadar düşmektedir.

Tüm bu problemler için en iyi çözüm ocaktan malzeme istihraç edilirken nem kontrolü çok iyi yapılmalıdır. Kapalı stok sahaları yapılarak rutubetli malzeme buralarda bir süreliğine kurumaya bırakılmalı prosese olabildiğince kuru malzeme beslenmelidir. Bunkerler izole edilmeli ve gerekirse sıcak hava kanalları ile sarılmalıdır. Değirmenlerde yapılacak üretimler için gerek sisteme ait sıcak gazlardan gerek tali sıcak hava ocaklarından maksimum düzeyde yararlanılmalıdır. Özellikle son zamanlarda gelişen hızlı kurutucu sistemler ham maddelerin rutubetlerinin düşürülmesinde iyi bir alternatif olarak görünmektedir.

Kaynaklar

Altun, S., 1999, Çimento üretim teknolojisi, Bitirme projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Cement equipment, 2020, <https://www.cementequipment.org/home/drying-raw-materials/> (Erişim Tarihi: 01.12.2020).

Kavas, T., 1997, Seydişehir Kırmızı Çamuru ve Kırka Bor Atıkları Kullanılarak Kaliteli Yapı Malzemesi Üretim İmkânlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Kaya, G., 2010, Farklı Konsantrasyonlarda Uçucu Kül Kullanımının Çimento Özellikleri Üzerine Etkileri, Yüksek lisans tezi, Gazi Osman Paşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Khalil, N.M., Hassan, E. M., Shakhofa, M.M.E., ve Farahat, M., 2014, Portland çimentosu için katkı maddesi olarak uçucu kömür küllerinin yanı sıra arpa ve pirinç kabuğunun büyük atık miktarlarından yararlanılması. Endüstri ve Mühendislik Kimyası Dergisi, 20 (5), 2998-3008.

Klimpel, R.R., 1997, Introduction to the principles of size reduction of particles by mechanical means, Engineering research center at the university of Florida, 1-41.

Korkmaz, A., 2017, Çimento Üretiminde Kil Ham Maddesine Alternatif Olarak Metaşistin Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kuleli, Ö., 2010, Çimento Mühendisliği el kitabı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.

Mahmud, N., 2020, <https://www.linkedin.com/pulse/optimizing-raw-mills-performance-materials-way-nohman-mahmud/> (Erişim Tarihi: 11.11.2020)

Rolf L., 1993, *Motional and Stressing Phenomena in Ball Mills*.

Rotary kiln factory, 2020, <http://www.rotarykilnfactory.com/how-does-moisture-in-cement-clinker-influence-cement-manufacture/> (Erişim tarihi: 15.11.2020).