



# Çimento Klinker Fazları ve Öğütme Parametreleri Arasındaki İlişkiler

**Çimsa Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi**

Mayıs, 2017

## Çimento Üretimi ve Enerji Kullanımı

---

- Çimento üretimi, enerji kullanımının yoğun olduğu bir proses olup, bir ton çimentoyu üretmek için gerekli olan enerjinin yaklaşık üçte biri klinker ve katkı maddelerinin öğütülmesinde kullanılır.
- Çimento endüstrisi, dünya enerjisinin yaklaşık % 3,5'unu kullanan en büyük endüstrilerden birisidir. Çimento endüstrilerinde, üretim prosesinde harcanan toplam enerjinin % 40'ı öğütmede harcanmaktadır

## Çimento Üretimi ve Enerji Kullanımı

---

- Çimento üretiminde öğütülebilirlik iki önemli faktörden dolayı önemlidir.
- Birincisi; çimentonun özellikleri kimyasal ve mineralojik bileşiminden başka çimentonun inceliğine ve tane boyutu dağılımına bağlıdır.
- İkincisi; çimentonun maliyetinde enerji harcamasının 1/3'ü öğütmede sarf edilmektedir.
- Sert klinkerin öğütülmesinde yumuşak klinkere göre % 80 daha fazla enerji harcanabilir.

## Kimyasal ve Mineralojik Bileşim ve Öğütülebilirlik

---

- Klinkerin öğütülebilirliğinde kimyasal ve mineralojik bileşim önemli rol oynar.
- SM (silikat modülü) arttıkça öğütülebilirliğin azaldığı,  $Al_2O_3$  ve serbest CaO miktarının yükselmesiyle yine öğütülebilirliğin azaldığı gözlenmiştir.
- $(C_3S / C_2S)$  oranı veya silikatların ara fazlara oranı,  $(C_3S + C_2S) / (C_3A + C_4AF)$ , azaldığında öğünme zorlaşır ve enerji harcaması artar.

## Klinker Mikro Yapısı ve Öğütülebilirlik

- Öğütülebilirliğe kimyasal ve mineralojik bileşenlerin yanında mikro yapının da etkisi vardır.
- Mikro yapının oluşumunda ısıtma ve soğutma hızları ve fırın tipide etkilidir
- İnce kristalli yapı, özellikle küçük kalsiyum silikat kristalleri öğütmeyi iyileştirir.
- İri kristaller yalnız parçalanmayı zorlaştırmaz, aynı zamanda kırılma alanlarının sayısını artırır.



## Klinker Bileşenleri

---

Tipik bir portland çimentosu klinkerinde bileşimin % 90'ından fazlasını karma oksit formundaki dört ana bileşen oluşturur. Döner fırındaki reaksiyon ifadelerinden de görüleceği gibi bunlar:

- $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = (\text{C}_4\text{AF})$
- $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = (\text{C}_3\text{A})$
- $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (\text{C}_2\text{S})$  (belit) ve
- $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = (\text{C}_3\text{S})$  (alit) olmaktadır.

## Klinker Eriyiğinin Oluşumu

---

- İlk eriyik fazı yaklaşık 1260-1310 °C'de oluşur. Klinker eriğin oranı sıcaklık arttıkça yükselir ve 1450°C' de kimyasal bileşime bağlı olarak yaklaşık ağırlıkça %20-30' a ulaşır.
- Portland çimentonun esas içeriği olan  $C_3S$  oluşumunu bu sıcaklıklar sağlar.
- Sinterleşmenin başladığı anda  $C_2S$  yanında yüksek miktarda bağlı olmayan CaO ortaya çıkar. Eriyik faz ile CaO ve  $C_2S$  katı çözeltiye geçer.

## Klinkerin Soğutulmasının Mikro Yapıya Etkisi

---

- Çimento klinkeri sinterleşme sıcaklığından öyle hızlı soğutulmalıdır ki  $C_3S$  miktarı mümkün olduğu kadar korunabilsin.
- Yavaş soğutmada klinker eriyiğinin  $C_3S$ ' in belirli oranıyla reaksiyona girmesi sonucu  $C_2S$  ve  $C_3A$  oluşur.
- Ayrıca  $1250\text{ }^\circ\text{C}$ ' nin altında  $C_3S$  kararlı olmayıp  $C_2S$  ve serbest  $\text{CaO}$ ' ya ayrışma eğilimi vardır.



## Klinkerin Soğutulmasının Mikro Yapıya Etkisi

---

- $C_3S$  kristal kafesinin içindeki iki değerlikli demir bu ayrışmayı destekler.
- Dolayısıyla klinker bu reaksiyonların olamayacağı kadar hızlı soğutulma gerektirir.
- Ayrıca  $C_3A'$ 'nin reaksiyon kabiliyetini (çimentonun katılma hızını) uygun şekilde etkileyebilmek için de hızlı soğutulmalıdır.

## Klinkerin Soğutulmasının Mikro Yapıya Etkisi

---

Yüksek soğutma hızının etkileri şunlardır :

- Klinkerdeki gerilme çatlaklarından dolayı öğütme iyileşir.
- Alit çözülmesi yoktur ve bu fazın miktarı yüksektir.
- Klinkerin şok soğutulması ile oluşan ince kristalli alüminat ve ferrit fazlarının çimento katılaşması yavaşlar.

# Klinker Fazları

---

Klinker fazları silikat ve katı eriyik fazları olarak iki gruba ayrılabilir

Silikat fazları

- $C_3S$  (Alit)
- $C_2S$  (Belit)

Katı eriyik fazlar

- $C_3A$  (Tri kalsiyum alüminat)
- $C_4AF$  (tetrakalsiyum alüminaferrit)

## Klinker Fazları (Alit) $C_3S$

---

- Alit (trikalsiyum silikat,  $C_3S$ ) klinker kütlesinin % 40-70'i arasında olabilir.
- Su ile hızlı reaksiyona girer ve çimento dayanımı ile hidratasyon ısısını kontrol eden fazdır.
- 1250 °C'nin altında soğutma hızı çok yavaş değilse, normal sıcaklıklara kadar stabilitesini korur.
- Çok yavaş soğutma hızlarında ise alitin bir kısmı çözünür ve belit oluşur

## Klinker Fazları (Alit) $C_3S$

---

- Renksiz kristaller halindeki hidrotasyon kabiliyeti yüksek ve klinkerde ilk yüksek mukavemet veren komponenttir.
- Çimentonun kalitesi Alit konsantrasyonu ile ölçülür.
- Klinkerin  $C_3S$  oranı soğutma derecelerine göre;  
Yavaş soğutmada % 59,8 ,  
Hızlı soğutmada % 65,2 ,  
Süratli soğutmada % 70 değerine ulaşmaktadır.

## Klinker Fazları (Belit) $C_2S$

---

- Belit (dikalsiyum silikat,  $C_2S$ ) klinker kütlesinin %15-45'i arasında olabilir.
- Dairesel kesitli kristal yapısına sahiptir. Kristal boyutu 5-40  $\mu m$  arasındadır.
- Belit alite kıyasla daha az reaktif olup ileriki yaşlarda dayanıma katkı yapar.
- $C_2S$  yavaş sertleşen hidrolik bağlayıcıdır.

## Klinker Fazları (Belit) C<sub>3</sub>A

---

- Klinker kütlesinin % 1-15'i arasında olabilir.
- Kübik veya ortorombik formdadır. Kristal boyutu 1-60  $\mu\text{m}$  arasında değişir.
- Su ile reaksiyonu çok hızlıdır ve amorf yapılıdır.
- Hidratasyon ısısı çok yüksektir. Su ile hemen sertleşir.

## Klinker Fazları (Belit) $C_4AF$

---

- Klinker kütlesinin % 0-18'i arasında olabilir.
- Kristal yapısı dendritik ve prizmatiktir.
- Parlak kesitte kılıç formunda ince uzun görüntü verir.



## Klinker Fazları ve Kristal Yapı

---

- Klinker silikat kristallerinin tane boyutları eşdeğer çapları hesaplanarak ortaya konulabilir.
- Eşdeğer çap bir kristal kesitinde kesit alanının ağırlık merkezinden geçen en uzun ve en kısa iki uzunluğun ortalaması alınarak belirlenir.
- 15-20  $\mu\text{m}$  eşdeğer çaplı alit kristalleri, klinkerin kolay öğütülmesinde ve çimentonun erken mukavemetinde olumlu etki sağlar.

## Klinker Fazları ve Kristal Yapı

---

- Eşdeğer kristal çapı 25-60  $\mu\text{m}$  olan belit kristalleri, ham karışımdaki kuvars tanelerinin yeterli öğütülmemesinin ya da ısıtma soğutma rejiminin bir sonucu olarak oluşabilir.
- Özet olarak, silikat kristallerinin tane boyut dağılımlarının polarizan optik mikroskop ve görüntü işleme programları ile incelenmesi, hammadde seçimi ve ısıtma-soğutma rejiminin optimizasyonu için üreticiye yol gösterir

## Klinker Fazları ve Kristal Yapı

---

- Hızlı soğutulmuş klinkerde: hegzagonal kristal yapısında  $C_3S$  kristalleri üzerinde süratli soğutmada termal presleme neticesinde meydana gelmiş çatlaklar mevcuttur.
- Bu çatlaklar hidrolik aktiviteyi ve öğütme kabiliyetini artırır.
- İyi soğutulmuş bir klinkerde kristal uçlar keskindir.

## Klinker Fazları ve Kristal Yapı

---

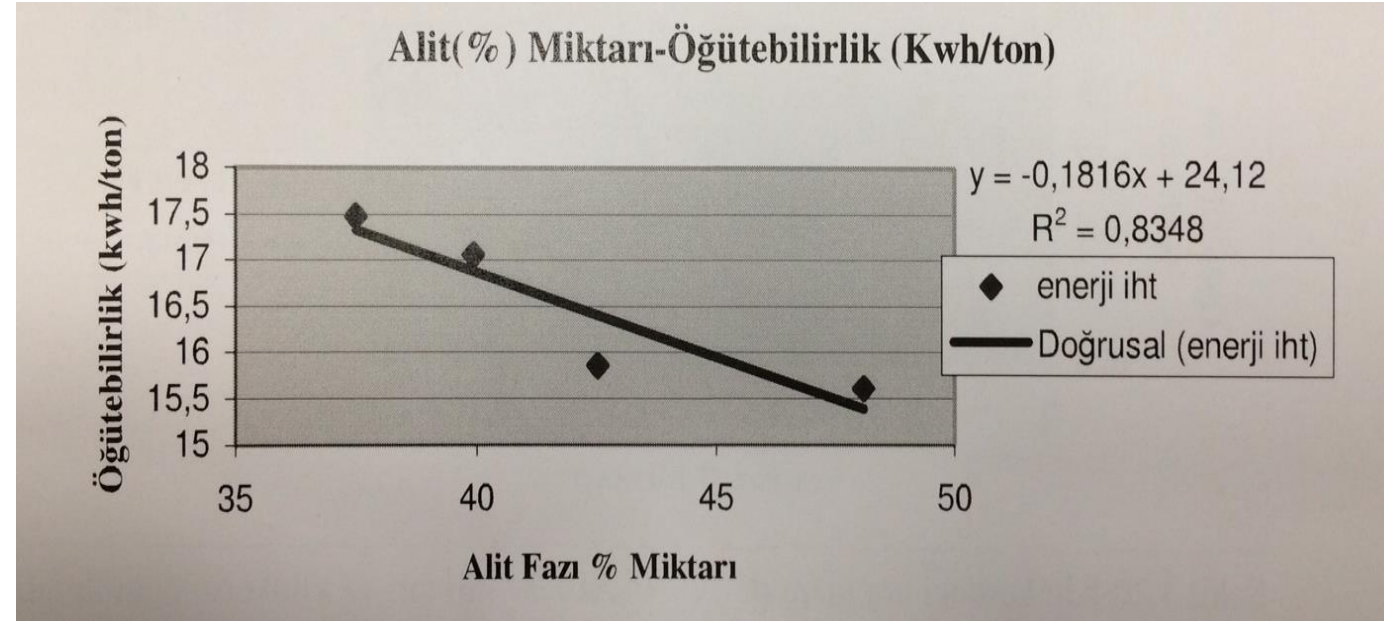
- Hızlı Soğutulmuş Klinkerde: Hekzagonal kristal yapısında  $C_3S$  kristalleri üzerinde süratli soğutmada termal presleme neticesinde meydana gelmiş çatlaklar mevcuttur.
- Bu çatlaklar hidrolik aktiviteyi ve öğütme kabiliyetini artırır.
- İyi soğutulmuş bir klinkerde kristal uçlar keskindir.

## Klinker Fazları ve Kristal Yapı

---

- Klinkerin mikroskopik incelemelerinde gözeneklerin (porozite) büyüklüğü ve şekli sinterleşme koşulları hakkında bilgi verir.
- Yüksek porozite ile büyük, uzun ve birbiriyle birleşen gözenekler klinkerin yeterli sinterleşmediğini gösterebilir.
- Küçük ve yuvarlak gözenekler ise iyi sinterleşmenin işaretidir.

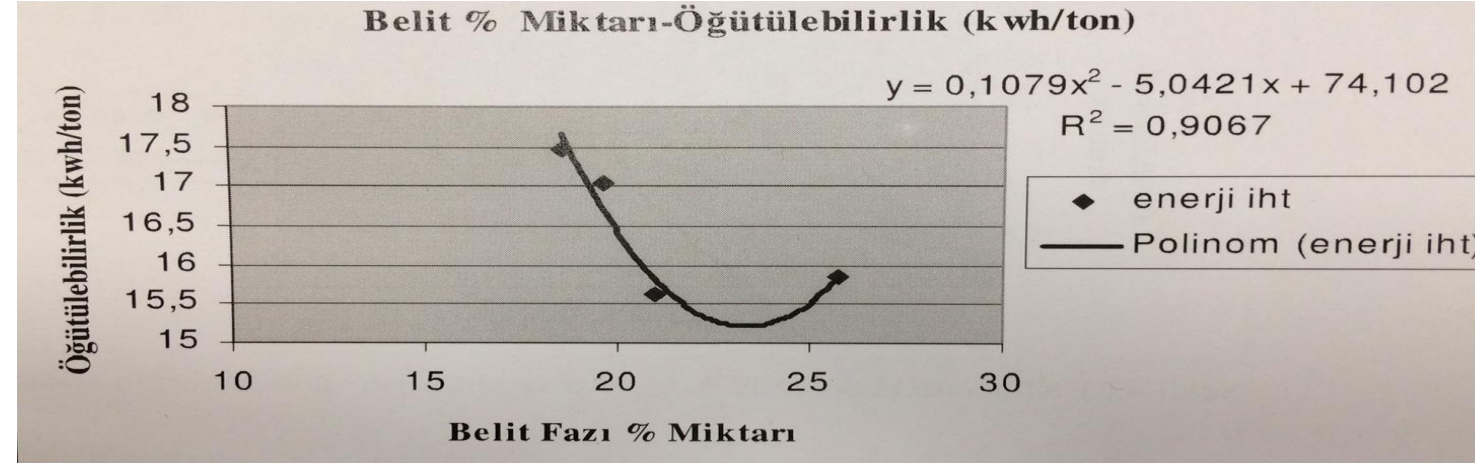
# Alit Fazı Miktarı ve Öğütülebilirlik



Klinkerdeki alit fazının (C3S) % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

- Klinkerdeki alit % miktarının artmasıyla iş endeks değeri (kwh/ton) düşmektedir.
- Bu da bize, öğütme için gerekli enerji miktarının azaldığını gösterir.

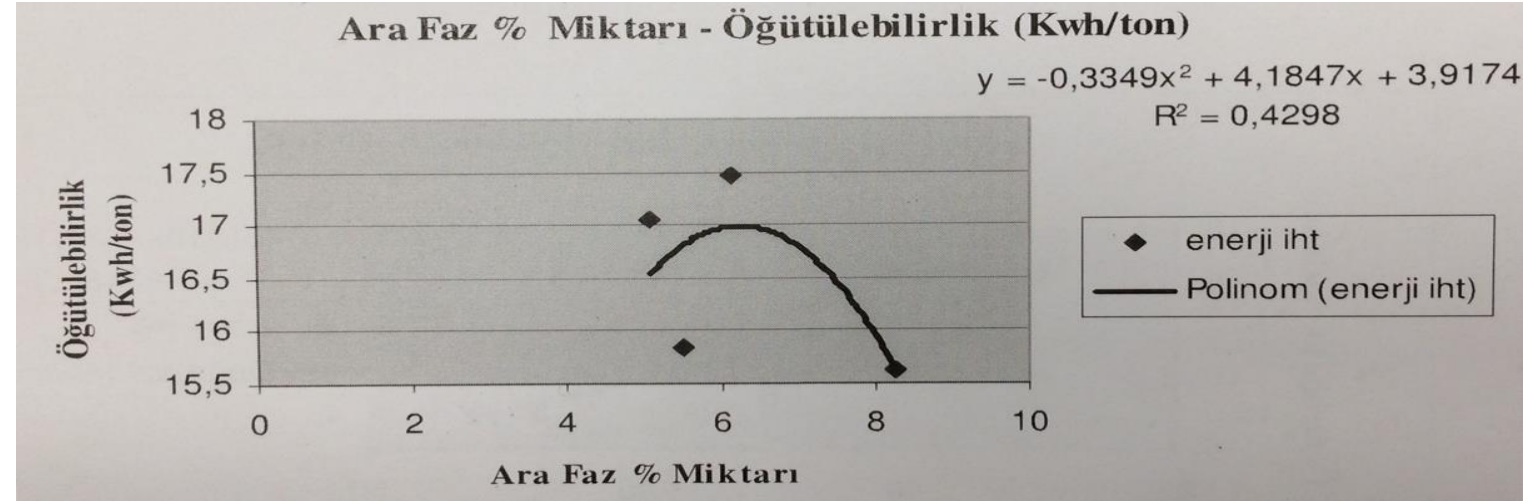
# Belit Fazı Miktarı ve Öğütülebilirlik



Klinkerdeki belit fazının (C2S) % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

- Klinkerdeki belit miktarı % 20'nin altında iken öğütülebilirlik için gerekli enerji ihtiyacı belit %'sinin artışıyla azalmaktadır.
- Ancak belit miktarının belli bir oranda bulunması durumunda (%22 civarında) öğütme enerjisi ihtiyacı tekrar yükselmektedir.

# Ara Faz Miktarı ve Öğütülebilirlik

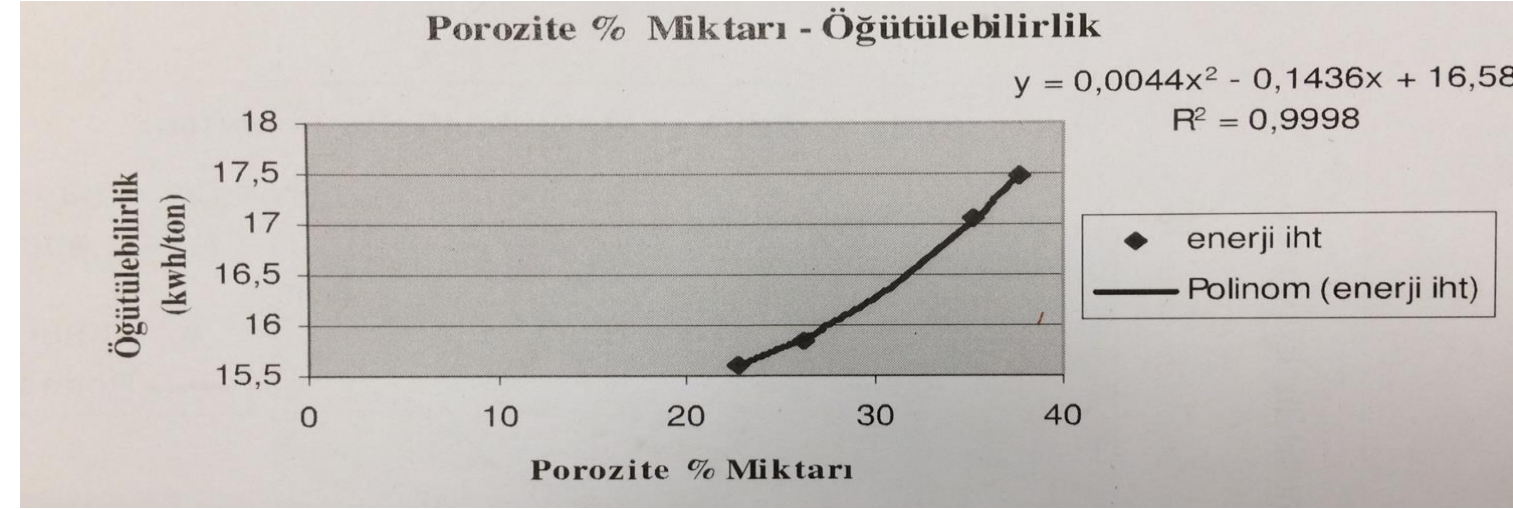


Klinkerdeki ara fazın (C3A + C4AF) % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

- Klinkerdeki ara faz miktarı yaklaşık % 6 - 6,5 değerinin üstünde ara faz miktarının artmasıyla öğütülebilirlik için gerekli enerji gereksinimi (kwh/ton) düşmekte olduğu görülmektedir.



# Porozite ve Öğütülebilirlik



Klinkerdeki porozite % miktarı ve klinkerin öğütülebilirliği arasındaki ilişki

- Literatürlerdekinin tersine klinkerdeki porozite miktarının artmasıyla öğütülebilirlik için gerekli enerji ihtiyacı da buna paralel olarak artmıştır.
- Bunun nedeni porozitenin incelik modülü incelendiğinde görülecektir.

## Porozite ve Öğütülebilirlik

- Literatürlerdekinin tersine klinkerdeki porozite miktarının artmasıyla öğütülebilirlik için gerekli enerji ihtiyacı da buna paralel olarak artmıştır.
- Bunun nedeni porozitenin incelik modülü incelendiğinde görülecektir.

Klinker Örnekleri	Alit Kristalinin İncelik Modülü	Belit Kristalinin İncelik Modülü	Porozitenin İncelik Modülü	Bond İş Endeksi (kwh/ton)
A1	1,06	2,79	2,8	17,47
A2	1,18	2,23	2,33	17,05
B1	1,27	2,40	2,63	15,85
B2	2,27	2,48	3,4	15,61

## Porozite ve Öğütülebilirlik

- Klinkerin yüksek  $C_3S$  içeriğinin sonucunda öğütülebilirlik kolaylaşır.
- Oysa; yüksek  $C_2S$  içeriği öğütülebilirliği zorlaştırmaktadır.
- Sıvı fazın fazlalığı, klinkerin öğütülebilirliğini kolaylaştırır.
- Ayrıca, klinkerdeki silikatların ( $C_3S + C_2S$ ) eriyik faza ( $C_3A + C_4AF$ , ara faza) oranının artmasıyla İş Endeksi artar. (öğütülebilirlik zorlaşır)

# TEŞEKKÜRLER...

**Her türlü soru ve bilgi için..**

**Çimsa Çimento Araştırma ve Uygulama Merkezi**

**Toroslar Mah. Tekke Cad.**

**33013 Yenitaşkent/MERSİN**

**T: 00.90.324 241 23 37 / 241 23 44**

**C: 00.90.505 462 00 52**

**F: 00.90.324 454 00 52**