



SteelRadar / Metal-Expo (İstanbul) 24.09.2025 (Çrş)

Konferansının konusu;

Demir ve çelik endüstrisinde kullanılan kireci enerji kullanımı ve çevreye etkileri açısından kritik etmek. Kimyasal parametreleri, enerji maliyetleri ile kıyaslamak ve demir-çelik üretiminde doğru kirecin kullanılmasının kazanımlarını vurgulamak.

Kireç; demir-çelik üretiminin vazgeçilmez bir hammaddesidir. Ana olarak YÜKSEK FIRIN ve ÇELİKHANE aşamalarında temel tüketim malzemesi olarak istenmeyen safsızlıkların curuf olarak uzaklaştırılmasında kullanılır.

Kirecin Demir-Çelik Endüstrisinde Diğer Kullanım Alanları

Bunun yanı sıra kireç, ana tüketim amaçları dışında aşağıda belirtilen sahalarda da kullanılır:

- 1) Çelik döküm kalıplarının metale yapışmasını önlemek için kalıp yüzeylerinin kireç sütüyle muamelesi,
- 2) Çelik tel çekiminde hadde aşınmasını azaltmak amacıyla filmaşın yüzeyinin kireç sütü (%5-20 sirkeci solüsyon) muamelesi,
- 3) Çelik tel çekiminde hadde aşınmasına karşı kullanılan toz hadde sabunu imali,
- 4) Çelik tel kangal yüzeylerinde dekopaj sonucu kalan asidin suyla ön uzaklaştırılmasından sonra kalan asidin ve sonraki yağlama işleminde uygun zeminin oluşturulması için kangalların kireç sütüyle kaynatılması,
- 5) Kok fırınının yan ürünü olan amonyak ve benzolün geri kazanılması,
- 6) Bazik refrakter üretimi (kum, kil, magnezit: $MgCO_3$, dolomitik kireç...),
- 7) Atık suların arıtılması (asitli dekopaj suları, hadde soğutma emülsiyon suları v.b.),
- 8) Kazan sularının yumuşatılması (soda-kireç prosesi).

10'a yakın sahada kullanılan ideal kireç nasıl olmalı?

Çelikhane Kirecinin Kalite Özellikleri:

A. Kireç Üretim prosesinin çeliğin safsızlaştırılması üzerine etkisi

Kullanılan kireç taşının:

- a) Saflık derecesi (CaO muhteviyatı) ve
- b) Kireç fırınlarında optimal şartlarda kalsine edilmiş olması, onun ark ocaklarındaki kullanım performansı yani çelikteki kükürt ve fosfor gibi safsızlıklarla en hızlı ve en etkili bir biçimde reaksiyona girme kabiliyeti açısından çok önemlidir. Kirecin normal kalsinasyon sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda (örneğin $1200\text{ }^{\circ}C$ 'nin üzerinde) pişirilmesi durumunda kireç, sinterleşerek gözenekleri kapanır, reaksiyon yüzeyi azalır, küçülür ve ağırlaşır. Çekirdekteki kireçleşmemiş kısmın çok azalmış, dolayısıyla serbest CaO miktarının çok yüksek bulunmasına rağmen kirecin ark ocağında curufla reaksiyona girebilme (reaktivite) kabiliyeti düşer, kireç

sarfiyatı ve tüketilen elektrik enerjisi miktarı artar. **Aşırı pişmiş bu tip kirece “sert pişmiş kireç” denir (overburnt lime = hard burnt lime).** Bu tip bir kirecin bir avantajı nakliye, stoklama ve kullanım esnasında ufalanıp tozlaşmasının az olmasıdır.

Kirecin normal kalsinasyon sıcaklıklarının alt diliminde homojen bir ısı etkisinde pişirilmesiyle (900-1000 °C) bol gözenekli geniş bir reaksiyon yüzeyi meydana gelir, hafif, kızdırma kaybı düşük (%1-3) ve ark ocağında kısa zamanda eriyik içinde çözünebilen **yüksek yumuşak pişmiş kireç (soft burnt lime) elde edilir. Bu nedenle modern kireç fırınlarında yumuşak pişmiş kirecin üretimi yaygındır.** Aşırı pişmiş (sert pişmiş) kirecin aksine, yumuşak pişmiş kireç ocakta kısa zamanda curuf içinde çözünür, reaksiyonları hızlandırır, çelikhanelerde desülfürizasyon ve defosforizasyon randımanını artırır. Ancak saklanma/taşınma sırasında ufalanma tozlaşma riski sert pişmiş kirece göre daha fazladır. Diğer olumsuzluk, kirecin havadaki CO₂ ile temasında tekrar CaCO₃'e dönüşme ihtimalidir ki bu da kızdırma kaybının yükselmesine neden olabilir.

Isı dağılımının iyi kontrol edilmediği kireç üretim proseslerinde bazen iyi pişmiş kireçle karışık yumuşak pişmemiş kireç parçaları (underburnt lime) fırın çıkışında birlikte bulunur. Bu karışım kirecin ocak performansını olumsuz etkiler.

Optimal çelikhane kireci, çekirdeğinde %1-3 oranında CO₂ (kızdırma kaybı) ihtiva eden, serbest CaO oranı ve reaktivitesi mümkün olduğu kadar yüksek yumuşak bir kireçtir.

Tüm bu bahsedilen nedenlerden ötürü kirecin, yakma prosesine tamamen hakim olunabilen modern teknolojinin uygulandığı kireç fırınlarında üretilmiş olması ark ve pota ocaklarında desülfürizasyon aracı olarak randımanlı bir şekilde kullanılabilmesi açısından büyük önem taşır.

B. Kirecin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin çeliğin safsızlaştırılması üzerine etkisi

Toplam ve serbest CaO: Kireçteki toplam CaO; bağlı, yani reaksiyona hemen giremeyen CaO bileşikleriyle (kalsiyum silikat vb.) bağlı olmayan, reaksiyona hemen girebilen serbest (aktif) CaO'nun toplamını ifade eder. Kirecin çelikhane ortam kabiliyeti, toplam CaO oranından çok daha düşük olan serbest CaO miktarıyla ölçülür. Bu oran yükseldikçe (sert pişmemişse) kireç, kükürt ve fosforla daha kısa sürede reaksiyona girer ve kullanılan kireç miktarı daha az olur. Normal değerler %85-95 arasındadır.

Magnezyum oksit (MgO):

Dolomitik kireç kullanımıyla refrakter ömrünün %35-100 oranında uzadığı bilinmektedir. Dolomitik kirecin akışkanlaştırma (flux) kabiliyeti yüksek kalsiyumlu kirece nazaran daha azdır. MgO, kireçte her zaman istenmeyen bir safsızlık değildir. Uygulamanın türüne göre kritik bir dezavantaja dönüşebileceği gibi (geç sönme riski), aranan bir özellik de olabilir (**beyazlık ve refrakter dayanımı açısından**) Kullanılan refrakterin cinsine göre kirecin içerisindeki MgO'nun % seviyesi kritik önem taşıyabilir. Refrakter ömrüne olumlu katkı veren MgO %si belli seviyede (MgO %10-12) tutulursa cüruf akışkanlığına zarar vermeden “**optimal**” seviyede fayda sağlayabilir. 2/3 yüksek kalsiyumlu yumuşak kireç ve 1/3 dolomitik kireç birlikte karıştırılarak ocağa verilebilir.

Silisyum dioksit : Silisyum dioksit, kalsiyumla kirecin fırında çözülmesini engelleyen silikat yapısında bir bileşik oluşturduğundan çelikhane kireci için pek arzu edilmez. Normal değerleri

%1-2.5 arasındadır.

Alüminyum ve Demir oksitler: (Al_2O_3 ve Fe_2O_3) eriyik-curuf reaksiyonunu olumlu yönde etkilemezler. Normal değerleri %0.1-0.2 civarındadır.

Kükürt: Çelikteki kükürt miktarı, ocağa giren hammaddelerin (sönmemiş kireç, hurda, karbon, refrakter malzeme) içindeki kükürt miktarıyla doğru orantılıdır. Kireçten kaynaklanan kükürt miktarı diğer kaynaklara oranla nispeten düşüktür. Kirecin kullanım amacı, çelikte kükürt gidermek olduğundan içinde ayrıyeten kükürt bulunması istenmez. Kireçteki kükürt kaynağı hammadde (kireçtaşı) ve yakıttır. Sönmemiş kireçte ince tane fraksiyonunun (örneğin 0-3 mm) elenmesiyle kükürt miktarı biraz aşağıya çekilebilir. Petrokok ile çalışan döner veya çift şaftlı fırınlarda kükürtün %97 oranında yakıttan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ark ocakları için kullanılan sönmemiş kireçte kabul edilebilir kükürt aralığı yaklaşık %0.05-0.10 arasındadır.

Kızdırma kaybı (KK): Kızdırma kaybı genellikle kirecin içinde kirece dönüşmemiş $CaCO_3$ oranındaki CO_2 oranını gösterir. Normal değerler yumuşak pişmiş kireçte %1-3 arasındadır.

Reaktivite: Reaktivite, sönmemiş kirecin içindeki serbest CaO miktarının **kimyasal reaksiyona girebilme kabiliyetiyle** ölçülür ve pişme şartlarına büyük ölçüde bağlıdır. Örneğin bir kireç, içindeki serbest CaO oranı yüksek olmasına rağmen aşırı pişmişse reaktivitesi düşük olur.

Tane büyüklüğü (gradasyon) : Tane ebadı serbest bırakılan sönmemiş kirecin pişme oranlarındaki ve bileşimindeki farklılıklar nedeniyle çelik desülfürizasyonunda yarattığı sorunlar, kireç tane gradasyonuna bazı sınırlar getirmiştir. Homojen dağılımlı kireç ebadı, çelik ocaklarının ısı dengesine olumlu yönde katkı sağlayarak daha fazla hurda/cevher kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Tavsiye edilen tane ebadı 8-40 mm arasında olmakla birlikte pnömatik olarak 6 atu basınçla püskürtülen 0 - 3 mm ebatlarındaki sönmemiş kirecin de randımanı arttırdığı tespit edilmiştir.

C. Yumuşak pişmiş kirecin avantajları

Ark ocağında seri bir desülfürizasyon ve defosforizasyon işlemi için bir an önce yüksek alkaliteli ince bir curuf oluşumu gereklidir.

Bunun için ise kirecin yüksek derecede çözünbilme kabiliyeti (hızlı/yüksek reaktivite) olması şarttır. İyi çözünmeyen düşük reaktiviteli kireç, curuf miktarını çoğalttığı gibi ısı iletimini azaltır, viskoziteyi artırır.

Ocağa dökülen kireç, curufla aşağıdaki sıraya göre reaksiyona girer:

- 1) Kirecin ısınması
- 2) Kirecin curufa nüfuzu
- 3) Kirecin curufla çözülmesi
- 4) Curufun kirece doyması (nüfuz hızının azalması ve demir-kireç kristallerinin oluşması)
- 5) Kirecin curuf-eriyik yüzeyinde çözülmesi (sert pişmiş kireçte çözünme hızı daha yavaştır)

Çözünme, büyük oranda kireçteki gözenek miktarına bağlıdır.

Sert pişmiş kirecin (yoğunluk: 2.6-3.0 kg/cm³) yumuşak pişmiş kirece göre (yoğunluk: 1.5-1.8 kg/cm³) az miktardaki gözeneklerinin çözünmeye zaman kalmadan curuf tarafından doldurulduğu ve bunun da reaksiyon hızını yavaşlattığı tespit edilmiştir.

Bir araştırma sonucuna göre yumuşak pişmiş kireç, curufa 8 dakikada %24 oranında CaO verirken, sert pişmiş kireç aynı oranda CaO'yu curufa ancak 17 dakikada verebilmektedir.

Çelik üretiminde Karbondioksit emisyonu açısından düşük kalite kireç kaynaklı iki ayrı emisyon oluşur; Enerji kökenli ve taş kaynaklı

Enerji Kökenli : Düşük kaliteli kireç içindeki kireç taşının potada elektrik harcanarak kirece dönüştürülmesi sırasında üretilen CO2 :

Türkiye’de elektrik üretimi yapan ve farklı yakıt (kömür, doğalgaz, HES, RES) kullanan santrallerin ortalama CO2 (karbondioksit) üretimi Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı veri tabanında 0,442 TCO2/ Mw-h olarak verilmiş. Buna göre fazla elektrik sarfı nedeniyle yılda 8,352 ton fazladan CO2 üretiliyor.

Extra CO2 emisyon hesabı	
Yıllık Extra Kalkerin Enerji İhtiyacı (kWh/ton)	(A) 18,895,349
Yıllık extra kalkerin kirece dönüşüm kaynaklı CO2 ton/yıl	13.000 x 0.44 = 5,720
1 Mw.h üretimi için ortaya çıkan CO2 TCO2/Mw.h (*)	(B) 0.442
Extra kalkeri kirece dönüştürmek için elektrik kaynaklı CO2 emisyonu ton/yıl	(A x B) = 8,352

(*) Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı yayın 09.12.2024 yayını

Taş kaynaklı : Düşük kaliteli kireç içindeki taşın kirece dönüştürülmesi sürecinden kaynaklı açığa çıkan CO2:

Çelik işletmelerinde düşük kaliteli kirecin içindeki CaCO3 (kalsiyum karbonatın) kirece dönüştürülmesi ile yılda (**13.000 ton x 0.44 =**) **5.720 ton CO2** emisyonu oluşmaktadır. Burada şöyle bir soru akla gelebilir. Bu emisyon iyi bir kireç kullanımı ile çelik tesisinde oluşmayabilir. Ancak aynı emisyon yüksek kaliteli kireç üretimi nedeniyle kireç üretim tesisinde oluşacak ve toplamda oluşan emisyon değişmeyecek. Gelişmiş kireç fırın teknolojileri üreten firmalar karbondioksiti kireç fırını bacasında (amin bazlı solvent kullanarak) yüksek CO2 konsantrasyonu haline getirerek ayrıştırma ve depolanması üzerine (CCUS : Carbon Capture Utilisation & Storage) çalışmalar yürütüyorlar. Yüksek maliyetli olmasına rağmen Danimarka, Norveç, Hollanda, İngiltere, Belçika ve Almanya’da bu konuda önemli adımlar atılmaktadır. (SLB Capturi UK Co.; 100 k ton to 400+ k ton per annum) *En büyük kapasiteli tesisin satışı 500 mio EUR seviyesindedir. Alternatif olarak BIOMASS yakıt kullanımı başlamıştır ancak sürdürülebilirlik açısından riskler taşımaktadır.*

Sönmemiş Kireç kalitesinin çelik üretim ekonomisine etkisi :

Kalitesiz kireç kullanımının çelikhanelere işletmesine getirdiği mali kayıplar ve tüm parametreler ekrandaki/aşağıdaki tabloda yer almaktadır:

1 Milyon Ton Çelik Üretimi İçin Enerji Maliyeti	
FX (USD/TRL)	41.5
Elektrik Fiyatı (kWh)	\$ 0.11
Enerji ihtiyacı (kWh/ton)	545
Enerji Maliyeti (USD/ton)	\$ 59.95
1 Ton Çelik Üretmek İçin Gerekli Kireç	
Kaliteli Kireç Oranı - Aktif CaO %90 (kg)	45
Kalitesiz Kireç Oranı - Aktif CaO %70 (kg)	58
CaCO ₃ 'ün CaO ya dönüşme enerjisi (Kcal/kg)	1,250
1 kWh (elde edilen Kcal)	860
Çelik Fiyatı (USD/ton)	\$ 650.00
Kalitesiz Kirecin Getirdiği Yıllık Fazla Kireç Sarfiyatı	
Yıllık Çelik Üretimi (mt)	1,000,000
Kaliteli Kireç (mt)	45,000
Kalitesiz Kireç (mt)	58,000
Yıllık Extra Kireç Sarfiyatı (MT) (CaO) (= kalker)	13,000
Extra Kalkerin Enerji İhtiyacı (Kcal)	16,250,000
Extra Kalkerin Enerji İhtiyacı (kWh/ton)	18,895,349
Extra Kalkerin Enerji Maliyeti (USD/yıl)	\$ 2,078,488
Çelik üretimi enerji kaybı (kWh/ton)	18.90
Fazladan harcanan enerji (%)	3.47%
Extra CO ₂ emisyon hesabı	
Yıllık Extra Kalkerin Enerji İhtiyacı (kWh/ton)	(A) 18,895,349
Yıllık extra kalkerin kirece dönüşüm kaynaklı CO ₂ ton/yıl	13.000 x 0.44 = 5,720
1 Mw.h üretimi için ortaya çıkan CO ₂ TCO ₂ /Mw.h (*)	(B) 0.442
Extra kalker kirece dönüştürmek için elektrik kaynaklı CO ₂ emisyonu ton/yıl	(A x B) = 8,352

(*) Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı yayın 09.12.2024 yayını

Özet ve Yorum

Bu tabloda, çelik üretimi için enerji ve kireç kullanımı ile ilgili kilit varsayımlar yer alıyor. Özellikle:

- Yumuşak pişmiş (yüksek aktif CaO, "kaliteli") kireç ile sert pişmiş (daha düşük aktif CaO, "kalitesiz") kireç arasında aynı çelik tonunu arıtmak için gereken kireç miktarı farkı: 45 kg vs 58 kg. Bu, 1 milyon ton/yıl çelikte 13.000 ton/yıl ekstra kireç tüketimi demek.
- Enerji tarafında elektrik birim fiyatı ve kWh başına kcal dönüşümü verilmiş; ayrıca CaCO₃'ün CaO'ya dönüşümü için gereken 1.250 kcal/kg kimyasal ayrışma enerjisi (en az).

Enerji ve Maliyet Avantajı (Kaliteli vs Kalitesiz Kireç)

- Aynı arıtma işi için kaliteli kireç 45 kg/ton, kalitesiz 58 kg/ton gerekiyor. Aradaki fark, 1 milyon ton çelikte 13.000 ton/yıl daha fazla kireç kullanımına yol açıyor.
- Bu ekstra 13.000 ton kireç, kireç üretiminde hem kimyasal ayrışma enerjisi (kalkerden CaO üretimi) hem de fırın/işletme enerjisi demek. Tablodaki 1.250 kcal/kg, sadece

ayırışma entalpisi; gerçek proses enerji ihtiyacı bunun üzerinde olur. Ancak verilen veriyle alt sınır tasarrufu yorumlanabilir:

- $13.000.000 \text{ kg kireç} \times 1.250 \text{ kcal/kg} = 16,25 \times 10^9 \text{ kcal}$
- $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$ varsayımıyla $\approx 18,9$ milyon kWh
- Elektrik fiyatı 0,11 USD/kWh ile $\approx$ **2,08 milyon USD/yıl'lık alt limit enerji** maliyetinden kaçınma. **Gerçekte proses verimsizlikleriyle bu tasarruf daha yüksek olur; dolayısıyla bu rakam, muhafazakâr bir taban.**

Ayrıca, daha az kireç tüketimi lojistik, öğütme, taşıma ve toz toplama gibi yardımcı operasyonlarda da enerji ve işletme maliyeti düşüşü yaratır; tablo bunları vermiyor ama yönü aşağıdır.

CO2 Emisyon Avantajı

Kireç üretiminde CO2'nin iki ana kaynağı vardır:

1. Prosesten (dekarbonasyon): $\text{CaCO}_3 (100) \rightarrow \text{CaO} (56) + \text{CO}_2 (44)$.
Stokiyometri gereği 1 ton CaO için $44/56 = 0,785$ ton CO2 prosesten salınır (kalker saflığı/yan ürünler basitleştirilmiştir).
2. Yakıt/elektrik: Fırın ve yardımcı enerji tüketiminden kaynaklı CO2.

Bu tabloda net emisyon faktörleri yok; ancak alt limit bir tahmin yapılabilir:

- **Prosesten gelen CO2: 13.000 ton "ekstra kireç" (CaO karşılığı) için yaklaşık 0,785 tCO2/tCaO ile $\approx 10.200 \text{ tCO}_2/\text{yıl}$ emisyon önlenir. – Bunu kireç fabrikası harcıyor (CCUS için Avrupa'da modern çalışmalar yürütülüyor.)**
- Enerji kullanımından gelen CO2: Yukarıdaki $\approx 10.200 \text{ tCO}_2$ proses kaynaklı + $8.352 \text{ tCO}_2 = \text{oplamda} \approx 18,5 \text{ ktCO}_2/\text{yıl}$ mertebesinde bir azaltım sinyali çıkar (şebeke ve proses varsayımlarına çok duyarlı) bu da 18,9 GWh daha az enerji ihtiyacı demektir.

SONUÇ Net: Yüksek aktif CaO'lu (yumuşak pişmiş) kireç, daha az miktarda kireçle aynı metalurjik performansı sağladığı için:

- **Kireç üretiminde enerji tüketimi azalır.**
- **Buna bağlı elektrik/yakıt maliyeti düşer (1 mio ton/yıl = 2 milyon US\$ kazanç).**
- **Prosesten ve enerjiden gelen CO2 emisyonları anlamlı ölçüde azalır.**
- **Bu bağlamda, sürdürülebilir üretim yöntemleri tercih edildiğinde, yumuşak kireç, hem ekonomik hem de çevreci bir seçenek olarak ön plana çıkar.**
- **Böylece, endüstri kaynaklarını daha verimli kullanma imkanı doğar.**