

## ATIK YAKMA TESİSİ BACA GAZINDA SO<sub>2</sub>'NİN KURU SÖNMÜŞ KİREÇLE GİDERİMİ

TARİH: ŞUBAT-2021

## İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ.....	3
2. SCRUBBER MALZEMESİ .....	4
3. KALSİYUM SÜLFİT VE KALSİYUM SÜLFAT .....	5
4. PH, PULLANMA VE TIKANMA .....	9
5. TEMAS SÜRESİ .....	10
6. CA/S MOLAR ORANLARI VE DÖNER ATOMİZER/İKİ AKIŞKAN NOZULLU .....	11
7. SICAKLIK, BAĞIL NEM VE SÖNMÜŞ (HİDRATLANMIŞ) KİREÇ BOYUTU .....	15
8. YATIRIM VE İŞLETME MALİYETİ .....	18
9. SİRKÜLE EDİLEN AKIŞKAN YATAKLI (CFB) KURU SCRUBBER .....	20
9.1. TANIMLAMA .....	20
9.2. TEKNİK AÇIKLAMA .....	20
9.3. EKONOMİK DEĞERLENDİRME .....	23
9.4. UYGULAMA İÇİN İTİCİ GÜÇ.....	24
<b>10. KAYNAKLAR.....</b>	<b>25</b>
<b>Şekil 1.</b> CaSO <sub>3</sub> 'un CaSO <sub>4</sub> 'e Cebri Havalandırmayla Oksidasyonu.....	5
<b>Şekil 2.</b> Sprey Kuru Yıkayıcı (Scrubber) Prosesinin Akış Şeması.....	7
<b>Şekil 3.</b> Sprey Kurutucu FGD Sistemlerinde Kullanılan Döner Atomizer Örneği .....	12
<b>Şekil 4.</b> İki Akışkan Nozul Atomizer (Nozul Gövdesi) .....	13
<b>Şekil 5.</b> İki Akışkan Nozul Atomizer (Yüksek Basıncılı Hava Akımı).....	14
<b>Şekil 6.</b> Faz Diyagramı: CaCl <sub>2</sub> • n H <sub>2</sub> O .....	16
<b>Şekil 7.</b> Kalsiyum hidroksit ile Şartlandırılmış Kur Rmilim için Optimum Sıcaklık-Nem Aralığı ile Mollier H-x Diyagramı (A = başlangıç noktası).....	17
<b>Şekil 8.</b> Sirküle Edilen Akışkan Yataklı (CFB) Scrubber Prosesi Akış Şemaları .....	21
<b>Tablo 1.</b> Maliyet Bilgilerinin Özeti (\$/kW (2001 Dolar) cinsinden).....	18
<b>Tablo 2.</b> Kükürt Oksit Emisyonlarını Azaltmak İçin Sprey Kuru Gaz Yıkayıcı Tekniğinin Performansı .....	19
<b>Tablo 3.</b> Kükürt Oksit (SO <sub>2</sub> ve SO <sub>3</sub> ) Emisyonlarını Azaltmak İçin CFB Kuru Gaz Yıkayıcı Tekniğinin Performansı .....	23

## 1. GİRİŞ

Dünyada kuru scrubber sistemi %11 oranında kullanılırken ıslak scrubber sistemi %87 oranında uygulanmaktadır.

Kuru scrubber yapı malzemesi olarak genellikle karbon çelik kullanılır. Bu da ıslak yıkayıcılara (scrubber) kıyasla yatırım maliyetini daha ucuzlatır. Ancak, işletmede gerekli kireç kullanımı, işletme maliyetini önemli miktarda artırır.

Kuru scrubber küçük ve orta ölçekli sistemlere uygulanır.

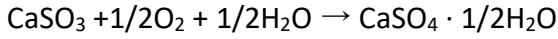
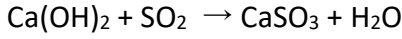
Termik santrallerde kömürlerin ve atık yakma tesislerinde atıkların yakılması sonucu kömür veya atık içinde bulunan kükürt maddesi, %97 oranında SO<sub>2</sub>'e ve %3 oranında SO<sub>3</sub>'e dönüşür. Ayrıca kömür ve atık içindeki klorür ve florür bileşikleri baca gazında HCl ve HF gazları oluşturur.

CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HCl ve HF gibi asidik gazlardan dolayı baca gazı asidiktir.

SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HCl ve HF gazların ve bazı ağır metallerin bacadan salımlanmadan önce arıtılması ve baca gazı sınır değerlerinin altına düşürülmesi gereklidir.

Gelişmiş ülkelerde baca gazında SO<sub>2</sub> gideriminde yaygın olarak kullanılan metotlardan biride sönmüş (hidratlanmış) toz kireç kullanılarak sprey kuru gaz yıkayıcı (scrubber) (SDS) metodudur. Diğer metot ise Sirküle Edilen Akışkan Yataklı (CFB) Kuru Scrubber'dır.

Sönmüş kireçle SO<sub>2</sub> giderim denklemleri aşağıda verilmiştir.



Bu çalışmada, baca gazında kuru sönmüş ((hidratlanmış) toz kireç sprey gaz yıkayıcı (scrubber) ve Sirküle Edilen Akışkan Yataklı (CFB) Kuru Scrubber ile SO<sub>2</sub> kirletici giderimi üzerinde durulmuştur. Ana kirletici SO<sub>2</sub> giderilirken SO<sub>3</sub>, HCl ve HF gibi asidik gazlar da giderilmektedir.

Bu metotlarla baca gazında SO<sub>2</sub>, ortalama %85-90 oranında giderilebilmektedir. SO<sub>3</sub>, %99, HCl ve HF ise %95 oranında giderilmektedir.

Sönmüş (hidratlanmış) toz kireç sprey kuru yıkayıcılar (SDS) ve sirküle edilen akışkan yataklı (CFB) kuru scrubber, kömür yakıtlı elektrik santrallerinde ve atık yakma tesislerinde SO<sub>2</sub> emisyonlarını bertaraf etmek için dünyada yaygın olarak kullanılan en ekonomik ve pratik metotlardır.

## 2. SCRUBBER MALZEMESİ

Absorber, genellikle korozyonu ve aşınmayı kontrol altında tutmak için uygun bir yapı malzemesi olarak kauçuk (lastik), paslanmaz çelik, karbon çelik veya nikel alaşımlı bir kaplama malzemesi kullanılır. Fiberglas (cam yünü), scrubberlarda yalıtım amacıyla kullanılır.

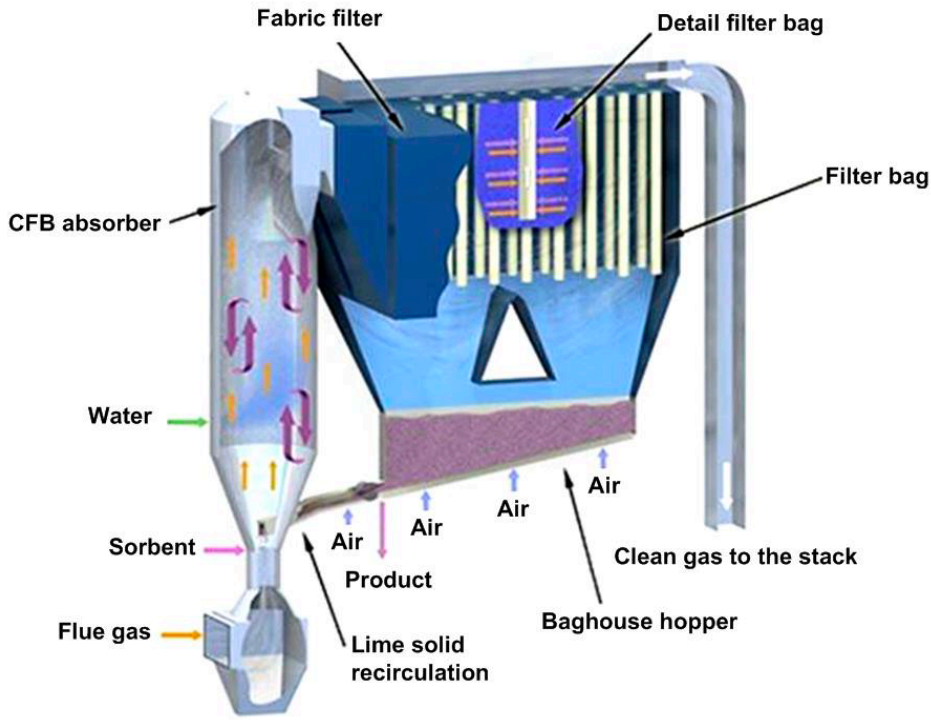
Kuru gaz yıkayıcılar (dry scrubber), daha pahalı alaşımlar yerine hafif karbonlu çelikten yapılabilir. Scrubber iç duvarı korozyona ve aşınmaya dayanıklı malzeme ile kaplanmalıdır.

Ayrıca kuru gazı yıkayıcılar (SDS), ıslak gaz yıkayıcılar kıyasla aynı oranda korozyon problemleri göstermez.

### 3. KALSİYUM SÜLFİT VE KALSİYUM SÜLFAT

Sönmüş (hidratlanmış) toz kireç için yeterli kapasitede bir depo gereklidir.

SO<sub>2</sub> giderme sonucu oluşan kalsiyum sülfat atığını, doğal havalandırma ile kalsiyum sülfata dönüştürmek çok zordur. CaSO<sub>3</sub>'ün CaSO<sub>4</sub> oksidasyonu için ortamda yeterli hava yoksa absorbanın altından cebri hava verilerek CaSO<sub>3</sub> CaSO<sub>4</sub>'e okside edilmelidir (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.A**). Aksi durumda okside edilmeden kalsiyum sülfat içeren atığı çöp depolama alanında depolamak çok zordur ve ciddi koku kirliliği oluşturur.



Şekil 1. CaSO<sub>3</sub>'ün CaSO<sub>4</sub>'e Cebri Havalandırma ile Oksidasyonu

Ayrıca doğal olarak havalandırılan kalsiyum sülfat konsantrasyonu yüksek atığı (içinde kalsiyum sülfat da olsa) susuzlaştırmak oldukça zordur.

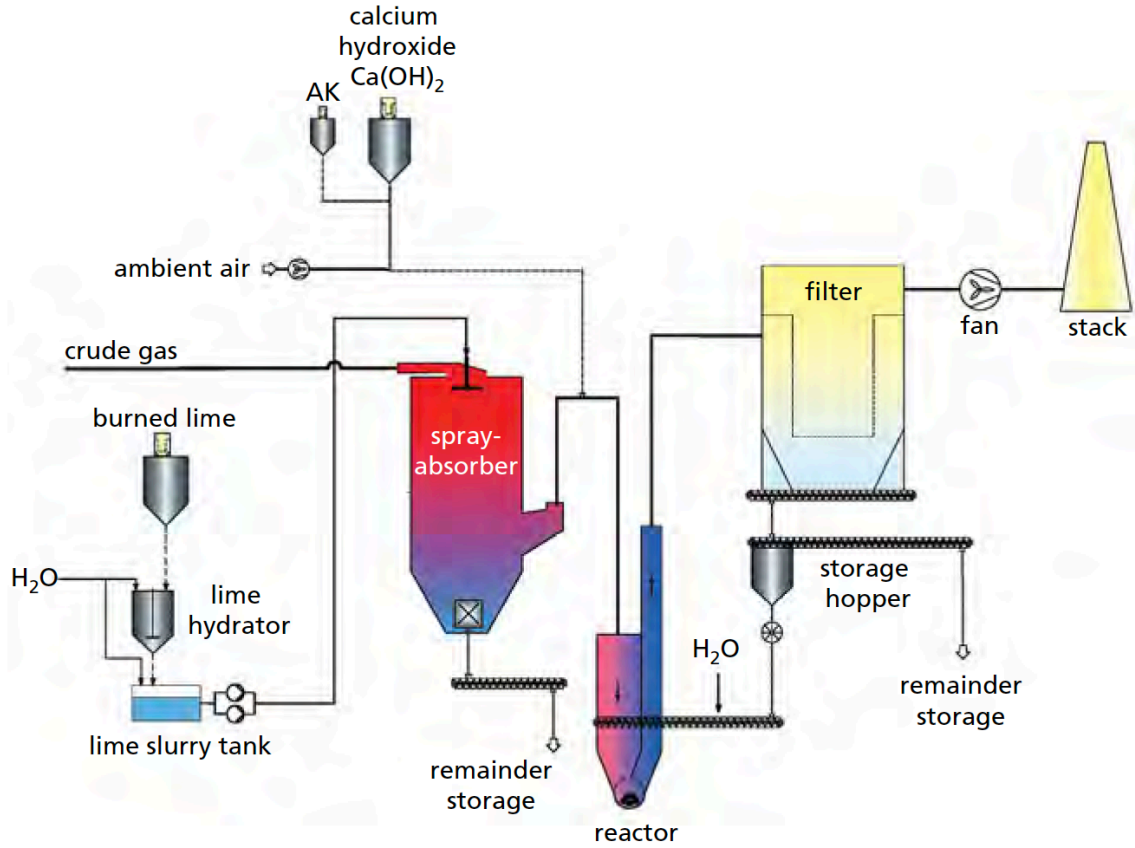
ABD'de doğal havalandırılmalı tesislerin %95-99'de kalsiyum sülfat/alçı taşı pullanması oluşturduğu gözlenmiştir. Cebri havalandırma ile CaSO<sub>3</sub>'ün CaSO<sub>4</sub>'a dönüştürüldüğü zaman ortam malzemesi üzerinde pullanma önlenmektedir. Bu yüzden kalsiyum sülfatlı malzeme cebri havalandırma ile havalandırılarak kalsiyum sülfata dönüştürülüp elde edilen alçı taşı ürünü alternatif hammadde olarak kullanılmaktadır.

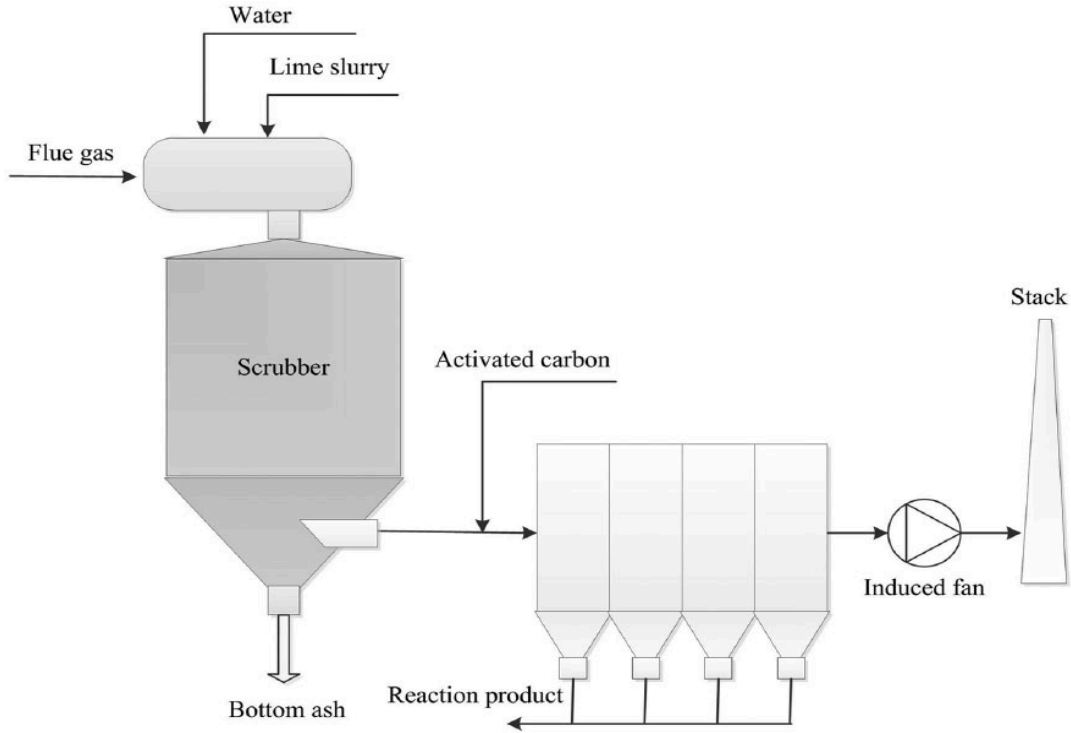
Cebri havalandırma ile stabilize edilen bakiye atığı susuzlaştırmak için ilave yüksek yatırıma ihtiyaç yoktur.

SO<sub>2</sub> giderimi sonucu cebri hava ile havalandırma yapılarak CaSO<sub>3</sub>'ün CaSO<sub>4</sub>'a dönüştürülen ürünlerin (alçı taşının, (CaSO<sub>4</sub> 1/2H<sub>2</sub>O)) kullanım alanları daha geniştir (çimento üretimi gibi).

Bu şekilde %90 saflıkta CaSO<sub>4</sub> elde etmek mümkündür. ABD ve Japonya gibi ülkelerde geri kazanılmakta ve hammadde olarak kullanılmaktadır.

Alçı taşının alternatif hammadde olarak kullanılabilmesi için baca gazındaki tozun ön-toz çöktürücü (presipitator) (isteğe bağlı) ile giderilmesinde, filtre edilmesinde, yarar vardır. Böylece DeSO<sub>x</sub> ünitesinde elde edilen alçı taşı daha temiz ve kullanışlı olur ve kullanım alanı daha geniş olur.





**Şekil 2.** Sprey Kuru Yıkayıcı (Scrubber) Prosesinin Akış Şeması

Özellikle atık yakma tesislerinde yanma sonucu oluşan uçucu küller multisiklonlarda tutulur. Sönmüş toz kireçle SO<sub>2</sub> giderildikten sonra scrubber tabanında biriken toz hala önemli miktarda kireç içeriyorsa tekrar sisteme enjekte edilebilir. Sistem buna göre düzenlenmelidir.

Tozu giderilmiş SO<sub>2</sub>, HCl ve HF kirleticilerinin giderimi için sıcak gaz DeSO<sub>x</sub> ünitesine verilir.

DeSO<sub>x</sub> öncesi multi siklonda uçucu kül giderimi yapılmazsa DeSO<sub>x</sub> ünitesinde filtre edilen tozlar çok kirli olur. Elde edilen kirli tozu alçı taşı olarak kullanmak çok problemlidir.

Ayrıca multi siklon kullanılmadığı zaman torbalı filtre ünitesinde çok karışık kirleticiler oluşur. Bu metotla daha fazla sönmüş (hidratlanmış) toz kireç kullanılır. Elde edilen tozun kullanım alanı oldukça kısıtlıdır. Genelde depolama alanlarında depolanır. Depolama alanında ise koku kirliliğine dikkat edilmelidir.

DeSO<sub>x</sub> ünitesinde sönmüş toz kireçle SO<sub>2</sub> giderildikten sonra scrubber tabanında biriken toz hala önemli oranda kireç içeriyorsa tekrar sisteme enjekte edilebilir. Sistem buna göre düzenlenmelidir.

Multisiklonda toz giderildiği zaman DeSO<sub>x</sub> tesisinde elde edilen alçı taşı daha temiz olur ve kullanım alanı daha geniştir.

Multisiklonda tutulan uçucu küller ise önemli bir hammaddedir, çimento sanayi ve hazır beton üretimi gibi tesislerde hammadde olarak kullanılabilir.

Atık yakma tesislerinde önce multi siklon kullanılarak yüksek sıcaklıktaki baca gazını soğutmak için aşırı enerji tüketilmez. Türkiye’de multisiklon teknolojisi gelişmiştir.

Baca gazı torbalı filtreye verilmeden önce yeterli bekleme süresi oluşacak şekilde boru üzerinde toz aktif karbon enjekte edilir. Multi siklondan, DeSO<sub>x</sub> ünitesinden ve aktif karbon enjekte noktasından gelen uçucu kül , sönmüş kireç tozu ve aktif karbon tozunu içeren baca gazı ortalama 140 oC sıcaklıkta torbalı filtreye verilir.

Türkiye’de torbalı filtre teknolojisi Türkiye’de gelişmiştir. Torbalı filtrede tutulan sönmüş (hidratlanmış) kireç, aktif karbon ve toz sisteme tekrar verilir. Böylece daha az sönmüş kireç kullanılması sağlanır.

Ve yakma tesislerinde atık oluşması önlenir. Arıtma sonucu elde edilen ürünler alternatif hammadde olarak kullanılır.

Baca gazında cıva kirliliği, aktif karbon enjeksiyonu ile ortalama %85 oranında giderilir.



#### 4. pH, PULLANMA VE TIKANMA

Aritma işlemi esnasında baca gazı ortamında pH, 7 ve üzerinde olmalı (7-8 arası gibi). Baca gazında pH, 5 ve altında olursa bacada SO<sub>2</sub> giderimi reaksiyonu gerçekleşmez. Düşük pH seviyelerinde, absorbanın SO<sub>2</sub> giderme özelliğini azalır. pH<5 gibi düşük pH'larda;

$\text{CaSO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$  oluşur ve daha sonra

$\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2 + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$

reaksiyonu gerçekleşir.

Oluşan kalsiyum sülfid ise suda çözünebilir özelliğe sahiptir.

Kalsiyum bisülfid oksitlenir ve alçıtaşı veya kalsiyum sülfat dihidrat oluşturmak üzere kristalleşir.

Baca gazında pH'in 5'in altına düşmesine izin verilirse, nispeten çözünür kalsiyum bisülfid oluşur. pH değerinde müteakip bir artışla, bisülfid, daha az çözünür olan, kristalize olan, pullanma ve tıkanma oluşturan kalsiyum sülfite dönüşür. Buda baca gazı arıtma ünitesinin iç yüzeylerinde aşınmalara (pullanmalara (scaling) ve tıkanmalara (plugging) ) neden olur.

Baca gazı arıtım ünitesinde pullanmayı ve tıkanmayı önlemek için hem aşırı doygunluğu hem de pH'ı kontrol altında tutmak gereklidir. Bu yüzden, arıtma esnasında baca gazı pH'nın kontrol altında tutulması çok önemlidir. Ayrıca, pH'ın 6'ya ve altına ani olarak düşmesi önlenmelidir.

Sprey kuru yıkayıcılar (scrubbers) en yaygın kullanılan ikinci FGD teknolojisidir ve uygulamaları  $0.8 \times 10^6$  Nm<sup>3</sup>/saat hacimsel akış hızına sahip baca gazları ile sınırlıdır. Daha büyük tesisler, toplam baca gazı akışı ile başa çıkmak için çeşitli modüllerin kullanılmasını gerektirir. Ticari kullanımda sprej kuru yıkayıcılar %90'dan fazla olmayan SO<sub>2</sub> giderim verimi elde edilmiştir. Yöntem, %3,5'e kadar kükürt içeriğine sahip yakıt kullanan termik santrallerde baca gazında SO<sub>2</sub>'i gidermek için kullanılabilir.

## 5. TEMAS SÜRESİ

Gaz yıkayıcı (scrubbers) içinde sönmüş toz kirecin hidrolik bekleme süresi ortalama 2-10 saniyedir. Bu süre, SO<sub>2</sub>'nin hidratlı kireç ile aynı anda reaksiyona girmesine izin vermek için kuru bir kalsiyum sülfat ve sülfid karışımı oluşturmak yeterli olur. Gaz yıkayıcı (scrubber) içinde sönmüş (hidratlanmış) kirecin homojen olarak dağılması, yeterli süre kalması ve SO<sub>2</sub> gibi kirleticilerle yeterli süre temas etmesi çok önemlidir.

Çoğu ticari tesislerde bekleme süresi, 2 ila 10 sn olarak seçilir.

Reaksiyon sonucu oluşan CaSO<sub>4</sub>/CaSO<sub>3</sub> gibi baypas ürünlerin bir kısmı, akış hızı 1,5 m/sn'den düşükse, spray scrubber'un tabanında kuru ve yarı kuru olarak çöker ve tabandan bu maddeler alınır. Akış hızı, 2 m/sn'den yüksek ise kireç iç yüzeylerde aşındırmaya neden olur. Spray scrubber'dan geçen tozun önemli kısmı filtre ünitesine verilir. Torbalı fitrede kullanılması halinde torba yüzeyinde biriken sönmüş (hidratlanmış) kireç tozları, SO<sub>2</sub> ile ilave reaksiyona girerek %20 daha fazla oranda SO<sub>2</sub> giderimi sağlar. Buda sönmüş kireç kullanım miktarını azaltır.

Baca gazında asit çığ noktasının üzerinde arka-son sıcaklığı korumak çok önemlidir. Ancak korozyonu önlemek için hava ısıtıcı çıkış sıcaklığının yükseltilmesi, ünite verimliliği üzerinde olumsuz bir etki gösterir.

Toz çöktürücü içinde sıcaklığın, çığ noktasının altına düşmemesi için torbalı fitrenin cam yünü gibi yalıtım malzemesi ile yalıtımının yapılması tavsiye edilir.

Yan ürün, ayrıca reaksiyona girmemiş kireç de içerir. Böylece yan ürünün yaklaşık %8 ila %15'lik bir kısmı gaz yıkayıcı besleme ünitesine yeniden sirküle edilebilir. Bu hat kurulur ve deneme çalışması esnasında oran belirlenir.

## 6. Ca/S MOLAR ORANLARI VE DÖNER ATOMİZER/İKİ AKIŞKAN NOZULLU

Sönmüş (hidratlanmış) kireçle, baca gazı arıtım işleminin ilk yatırım maliyeti çok düşüktür. Bu metotla SO<sub>2</sub> giderimde Ca/S molar oranları 1,1 ila 1,4 arasında değişmektedir. Deneyimlerimize göre, en iyi stokiyometrik Ca/S molar oranı, yaklaşık 1.3 ile ölçülen, devridaim sırasında kalıntılara buhar enjeksiyonu ile elde edilebilir. CaO/SO<sub>2</sub> molar oranı yaklaşık 1.5 çıkarıldığında %90 oranında SO<sub>2</sub> giderme verimi elde edilir.

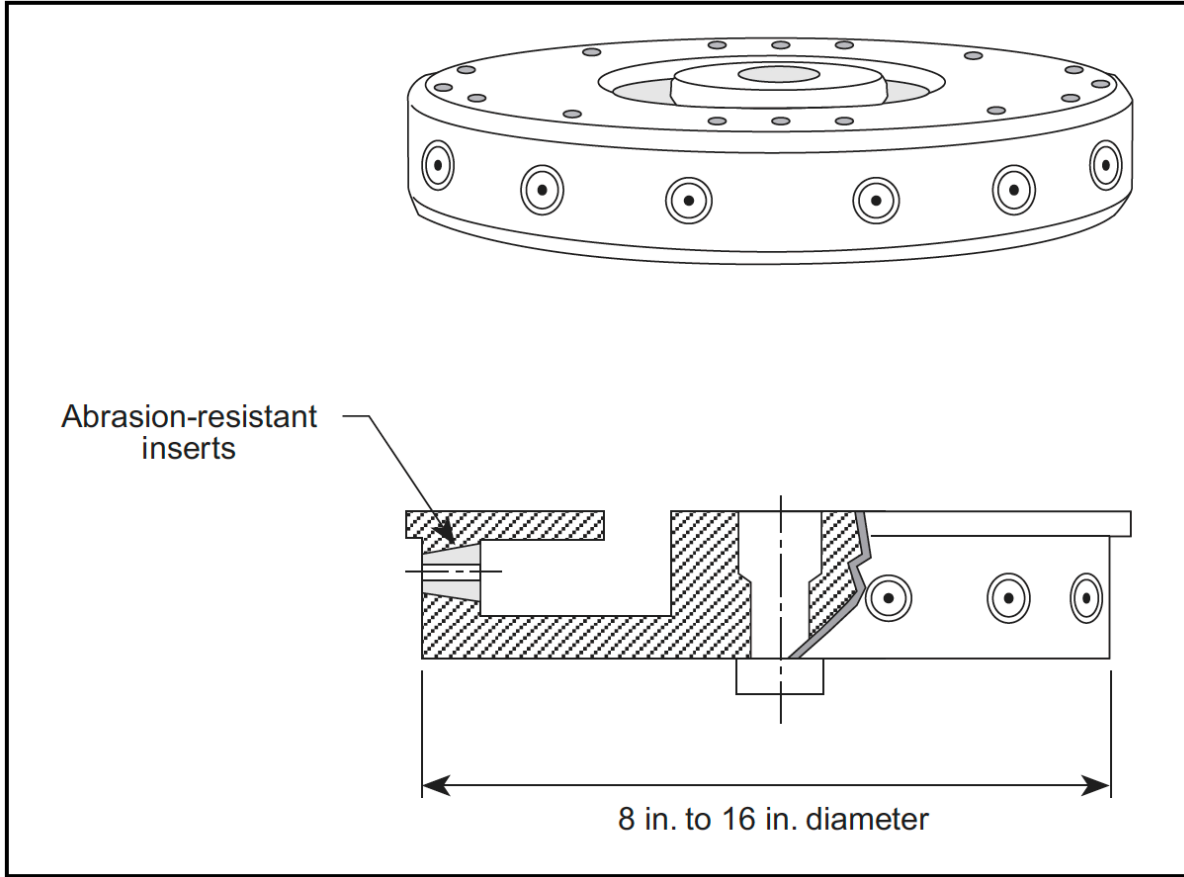
Büyük miktarda fazla sorbent, külle birlikte CaO formunda kazanda serbest kalır. Ca/S molar oranı işletme esnasında optimize edilir.

Sprey kuru işlemlerde, kükürt dioksit adsorbsiyonu (emilimi), bir döner atomizerler veya iki akışkan nozullar tarafından oluşturulan alkali çözeltisi damlacıkları ortamında gerçekleştirilir. Kireç, baca gazların nötrale ederken SO<sub>2</sub> ile reaksiyona girer ve CaSO<sub>3</sub> oluşur. CaSO<sub>3</sub> cebri havalandırma ile CaSO<sub>4</sub>'e okside edilir.

Püskürtme kuru gaz yıkayıcılarında bulamaç atomizörünün püskürtme memeleri, sürekli bir püskürtme kalitesini sağlamak ve korumak için yüksek özelliklere sahip olmalıdır. Örneğin, nozullar baca gazı sıcaklığına, korozyonuna ve kireç erozyonuna dayanıklı olmalıdır. Ek olarak, düşük basınç düşüşüne ve minimum tıkanma riskine sahip olmalı. Bulamaç atomizöründe döner atomizör ve sabit çift akışkan nozul gibi birçok tipte püskürtme nozul (memesi) kullanılır.

Artık baca gazındaki asitlerin giderilmesi için sprej kurutucularda iki tip atomizör kullanılmaktadır. Bunlar; döner diskler veya tekerlekler ve çift akışkan nozullardır. Her iki durumda da, atomizörün amacı, sorbent bulamacını baca gazı asidi ile yakın sorbent temasını sağlamak için ince damlacıklar bulutu oluşturmaktır.

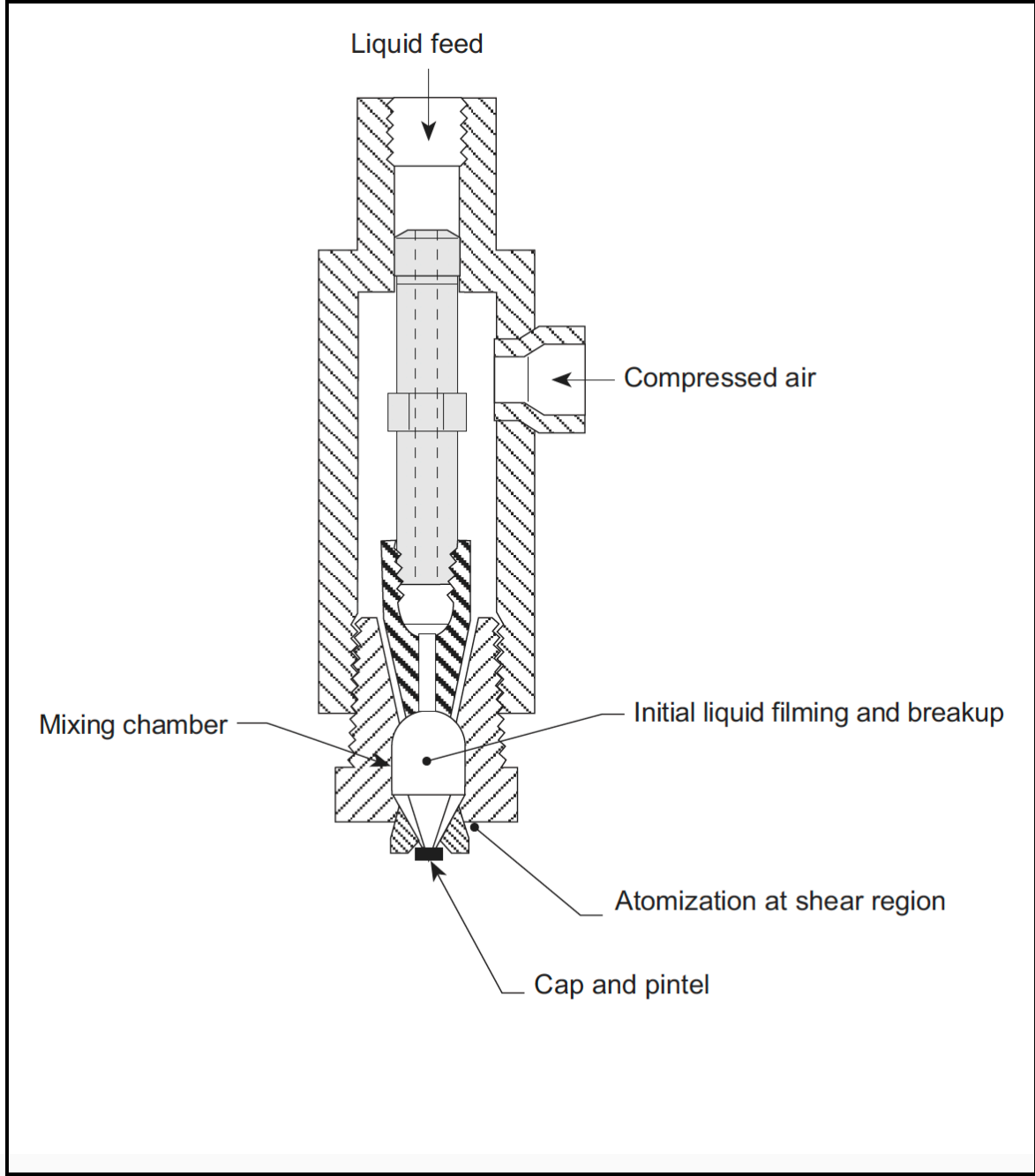
Döner atomizörde, bulamaç dönen tekerleğin veya diskin üstünden beslenir. Merkezkaç kuvveti bulamacın boşluğun iç yüzeyinde ince bir tabaka oluşturmasına neden olur. Bulamaç, çukurun kenarındaki aşınmaya dayanıklı ekler vasıtasıyla boşluktan çıktığında, sıvı radyal olarak dışarı doğru itilen ayrı damlacıklara atomize edilir. Genellikle 25-150 µm çapındaki bu damlacıklar, sprej kurutucu içindeki sıcak baca gazında hızla kurur. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de sprej kurutucularda kullanılan tipik bir atomizer tekerleğinin bir örneğini göstermektedir.



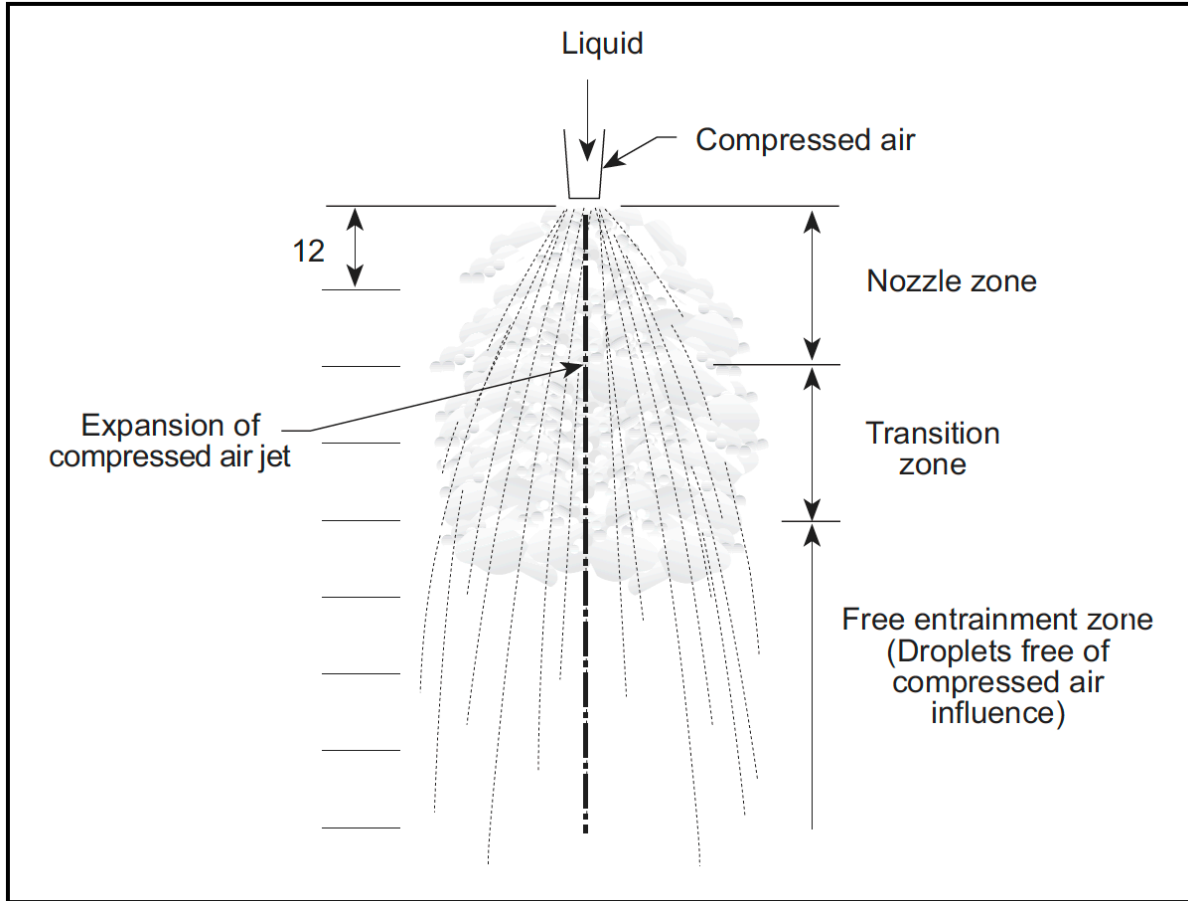
Şekil 3. Sprey Kurutucu FGD Sistemlerinde Kullanılan Döner Atomizer Örneği

FGD sprey kurutucu uygulamaları için, atomizer tekerlekleri çapı 8 ila 16 inç arasında değişir ve devir sayısı dakikada 7.000 ila 20.000 arasında (rpm) değişir. Çamurun yüksek aşındırıcı yapısı nedeniyle (sönmüş kireç ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) veya sönmüş kireç artı geri dönüştürülmüş uçucu kül/reaksiyona giren üründen oluşabilir), tekerlekler kanatlar veya nozullardaki seramik ekler de dahil olmak üzere korozyona ve aşınmaya dayanıklı malzemelerden imal edilmiş olmalıdır.

Çift akışkan pnömatik nozul atomizasyonunda, bulamaç besleme bir nozul gövdesine enjekte edilir. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterildiği gibi yüksek hızlı, yüksek basınçlı bir hava akımına sürüklenir. Yüksek hızlı hava bulamaç besleme akışını etkiler ve ince damlacıkların üretilmesine neden olur. Hava akımı ve bulamaç iki sıvıyı içerir. Basınçlı hava basıncı ve sıvının havaya bağlı hızı arttıkça üretilen sıvı damlacıklarının boyutu azalır.



Şekil 4. İki Akışkan Nozul Atomizer (Nozul Gövdesi)



Şekil 5. İki Akışkan Nozul Atomizer (Yüksek Basıncılı Hava Akımı)

Damlacıkları radyal olarak dışa ve gaz akışına dik olarak yansıtan döner atomizör tipi bir sprey kurutucu için, kurutucunun (L/D) uzunluk-çap oranı tipik olarak 0.8:1'dir.

150-200 MWe kapasiteli kazanlarda baca gazını arıtmak için uygun gaz yıkayıcı (scrubber) boyutu genellikle 14–15 m (çap) x11-12 m (silindirik yükseklik)'dir.

## 7. SICAKLIK, BAĞIL NEM VE SÖNMÜŞ (HİDRATLANMIŞ) KİREÇ BOYUTU

Desülfürizasyon (DeSO<sub>x</sub>) reaksiyonu verimliliğini;

- Ortam sıcaklığı,
- pH,
- Bağıl nem,
- SO<sub>2</sub> konsantrasyonu,
- Sönmüş (hidratlanmış) toz kireç boyu,
- Temas süresi (bekleme süresi),

kuvvetli şekilde etkiler.

Kuru desülfürizasyon teknolojisinin tüm varyasyonlarının yukarıda belirtilen koşulları mümkün olduğunca optimize etme edilmelidir.

Sönmüş (hidratlanmış) toz kireç kullanılarak yüksek verimlilikte kuru gaz yıkayıcı enjeksiyon sistemleri ile SO<sub>2</sub> gidermek için scrubber (yıkayıcı, temizleyici) ünitesine 180 °C optimum sıcaklıkta atık gaz verilir. Scrubber çıkış sıcaklığının (> 140 °C) olması istenir. Scrubber emicilerin boyutlandırılması (örneğin bekleme süresi) buna bağlı olarak yapılır.

Bu sıcaklık verimlilik ile asit çığlenme noktasına olan güvenli mesafe arasındaki en iyi optimum noktayı temsil eder, bu esas olarak gazın HCl konsantrasyonuna bağlıdır.

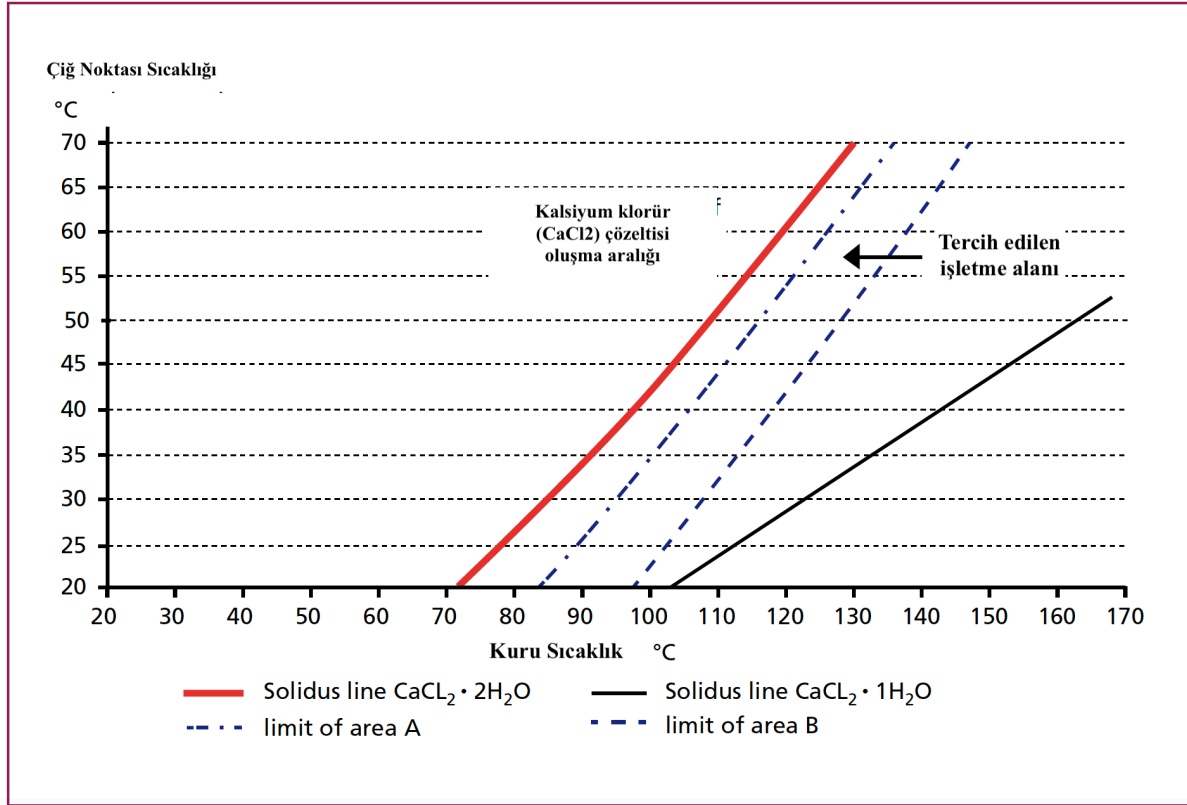
İyi bir SO<sub>2</sub> gidermenin temin edilmesinin anahtarı, kuru gaz yıkayıcıdan çıkan baca gazının sıcaklığını, baca gazı doyumluğuna ulaştırmadan mümkün olduğu kadar çığ noktasının (adyabatik doyumluk) üzerinde tutulmalıdır.

Kılcal yoğunlaşma ve yüzeyde hidrat kabuğunun oluşması için yüksek seviyede bağıl nem gereklidir. Bu nedenle baca gazı, aşağı akan kirleticileri giderme işlemini optimize etmek için ilk olarak şartlandırılır. Bu şartlandırma, yaklaşık olarak %6'lık bir bağıl nem elde etmek için esas olarak gaz sıcaklığının yaklaşık 140-150 ° C'ye düşürülmesinden oluşur. 130 °C'nin altındaki baca gazı sıcaklıklarından kaçınılmalıdır çünkü yüzey sıcaklığına bağlı olarak, reaksiyon sırasında oluşan tuzlar tesisin baca gazı ile doğrudan temas halinde olan bölümlerinde korozyon riskini artırabilir.

Sıcaklığın düşürülmesi veya bağıl nemin artırılması bir ekonomizör (ECO) veya bir soğutma kulesi (CT) aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, hem gaz soğutma hem de nemlendirme işlemlerinin bir kombinasyonu (kombi) de mümkündür. Soğutma kulesi, enjekte edilen su miktarı ile sistemdeki mutlak nemin artırılmasına olanak sağlar. Enjekte edilen su, hidrat kireç parçacıklarına yapışan kirletici maddelerin ayrılmasını teşvik eder.

Kalsiyum bazlı katkı tozlarının kullanılması durumunda, SO<sub>3</sub> ve HF'nin giderilmesi, tam sıcaklık aralığında yüksek bir reaksiyon hızı ile gerçekleşirken, kuru sıcaklığın yanı sıra gazdaki bağıl nem, HCl ve SO<sub>2</sub> giderimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklığı düşürmek ve nemi

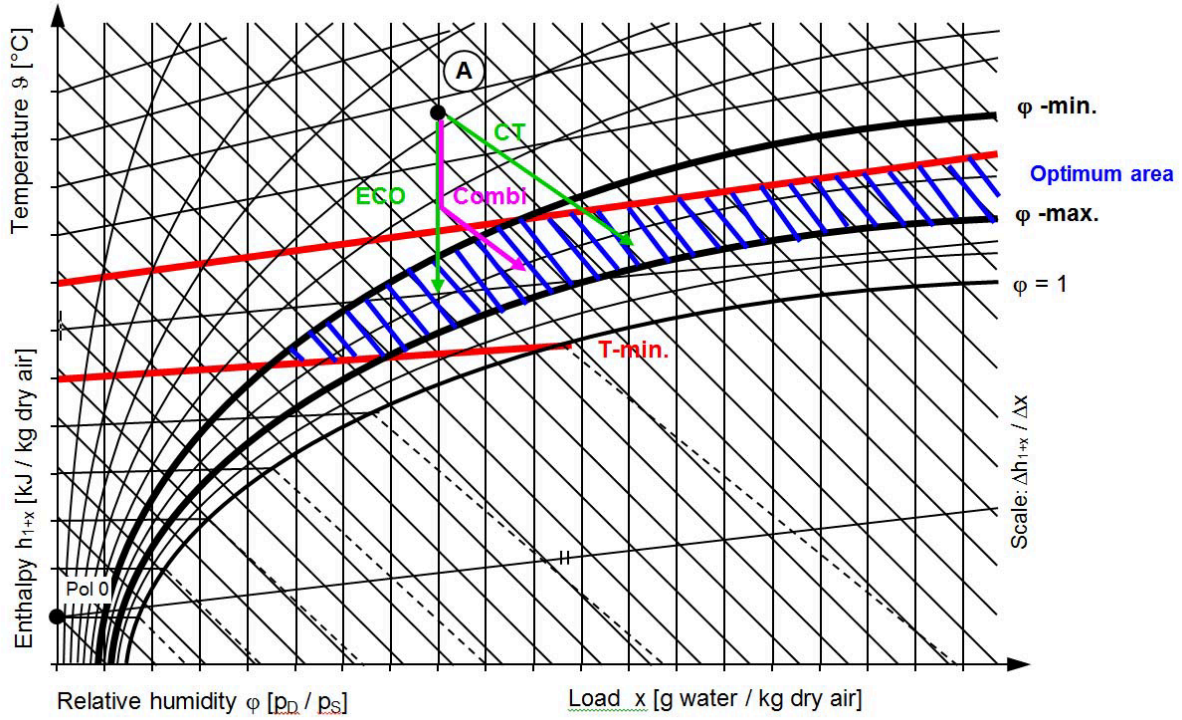
arttırmak verimliliği artıracaktır. Çiğlenme noktası sıcaklığına bağlı olarak kuru sıcaklık için tercih edilen çalışma aralığı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 6. Faz Diyagramı: CaCl<sub>2</sub> • n H<sub>2</sub>O

Sıcaklığın düşürülmesi veya bağıl nemin arttırılması, bir ekonomizör (ECO) veya bir soğutma kulesi (CT) aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, hem gaz soğutma hem de nemlendirme işlemlerinin bir kombinasyonu (Kombi) de mümkündür. Soğutma kulesi, enjekte edilen su miktarı ile sistemdeki mutlak nemin artırılmasına olanak sağlar. Enjekte edilen su, hidrat kireç partiküllerine yapışan kirletici maddelerin ayrılmasını sağlar.





**Şekil 7.** Kalsiyum hidroksit ile Şartlandırılmış Kur Rmilim için Optimum Sıcaklık-Nem Aralığı ile Mollier H-x Diyagramı (A = başlangıç noktası)

Giderme verimliliğini artırmak için, torbalı filtredeki reaksiyon ürünlerinin bakiyelerinin bir kısmı baca gazına geri beslenmelidir. Bu, reaksiyona girmemiş koşulun kirleticilerle tekrar temas etmesine ve özellikle daha fazla SO<sub>2</sub>'yi giderme verimliliğini artırmak için bir miktar klorür sağlamasına izin verir. Kalsiyum klorür varlığı ile ilgili olarak, baca gazı arıtma sisteminin girişinde bir miktar HCl/SO<sub>2</sub> > 1 gerekir.

Scrubberdan aşağı doğru akışta, SO<sub>2</sub>'li baca gazının CaO karışım reaksiyonu, baca gazı sıcaklığının çığlenme noktasına yaklaşması dışında çok düşük bir reaksiyon oranı gösterir. Bu durum korozyon ve birikinti büyümesi nedeniyle önemli sorunlara neden olabilir.

Baca gazında bağıl nem, reaksiyon için çok önemlidir. 1 saniyelik temas süresinde bağıl nem %9 dan %65'e yükseldikçe SO<sub>2</sub> giderme verimliliği %20'den %75'e çıkar. Baca gazında, SO<sub>2</sub> giderme ünitesinde, bağıl nemin %70 ve üzerinde olması tavsiye edilir.

Torbalı filtre sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, bağıl nem azalmasına bağlı olarak SO<sub>2</sub> giderimi o kadar az verimli olur.

Sönmüş toz kireç dane boyutu (çapı) küçüldükçe, SO<sub>2</sub> giderme verimliliği artmaktadır. Dane boyutu 100 mesh'den daha ince olması özellikle tavsiye edilir.

Kuru sönmüş kireç yüz alanının bilinmesi önemlidir. Sönmüş kireç yüzey alanı arttıkça SO<sub>2</sub> ile reaksiyona girmesi o oranda artmaktadır.

## 8. YATIRIM VE İŞLETME MALİYETİ

Kuru toz sönmüş kireç ile SO<sub>2</sub> giderme metodunun yatırım maliyeti diğer bertaraf tekniklerine göre düşüktür. Küçük ve orta ölçekli termik santrallerde ve atık yakma tesislerinde kullanılması tavsiye edilir.

Kuru toz sönmüş kireç ile SO<sub>2</sub> giderme yatırım maliyeti tesis kapasitesine bağlıdır.

Püskürtmeli kurutma sisteminin yatırım maliyeti, aynı büyüklükteki bir LCP için ıslak kireçtaşı işleminin yatırım maliyetinden yaklaşık %30-50 daha düşüktür. Ancak daha yüksek sorbent maliyetleri nedeniyle işletme maliyetleri daha yüksektir. Püskürtmeli kuru yıkayıcılarda kullanılan kireç sorbentinin baskın ıslak yıkayıcılar için kireçtaşına kıyasla dört ila beş kat daha yüksek maliyeti, muhtemelen sprey kuru yıkayıcıların en büyük dezavantajıdır. Tek modüllü bir sprey kurutucunun kullanımı, işletme maliyetlerini makul sınırlarda tutmak için 3.300 milyon m<sup>3</sup>/s maksimum akış hızına sahip 1500 MWth altındaki üniteler ve düşük ila orta kükürtlü yakıtlarla sınırlıdır. Püskürtmeli kuru sistemler sadece küçük üniteler ve düşük işletme yükleri için daha ekonomiktir.

**Tablo 1'**de ABD'de 2000'li yıllarda termik santrallere uygulanan SO<sub>2</sub>'nin kuru metotla gideriminin mevcut yatırım maliyetlerinin yaklaşık 100 \$/kW olduğu bildirilmektedir. İlave donanımla yatırım maliyeti %30 artmaktadır.

**Tablo 1.** Maliyet Bilgilerinin Özeti (\$/kW (2001 Dolar) cinsinden)

Bertaraf metodu	Tesis Kapasitesi (MW)	Yatırım maliyeti (\$/kW)	Ton SO <sub>2</sub> Kirleticisi Giderim maliyeti (\$/ton)
Kuru Sistem	>200	40-150	150-300
	<200	150-1.500	500-4.000

AB tarafından yapılan başka bir çalışmada, baca gazında SO<sub>2</sub> gidermek için yatırım maliyeti, yaklaşık olarak 7–45 avro/kWth (yakıt enerji girdisi) ve bakım-onarım işletme maliyeti ise yaklaşık 0,5–0,7 avro/MWh'dir. Diğer bir çalışmada yatırım maliyeti 297 US\$/kW (125-216 \$/KW) olarak hesaplanmıştır.

Bir başka çalışmada kuru sprey metotla ton başına SO<sub>2</sub> gidermek için yatırım, işletme ve bakımı maliyeti;

- 200 MW'tan büyük tesisler için 150 ila 300 \$,
- 200 MW'tan küçük için 500 ila 4.000 \$,

arasında değişmektedir.

Küçük ve orta ölçekli termik santraller ve atık yakma tesisleri için bu metot diğer metotlara göre en ekonomiktir. SO<sub>2</sub> kirleticini giderme maliyeti, 600-800 avro/ton giderilmiş SO<sub>2</sub>'dir.

MWh üretilen elektrik başına elektrik fiyatı üzerindeki etkisi yaklaşık 6 avrodur. Kuru sönmüş kireç kullanılarak SDS ile baca gazı SO<sub>2</sub> gidermede tüketilen elektrik enerji, tesiste üretilen enerjinin %0,5 ila %1 kadardır.

Baca gazı sıcaklığına bağlı olarak 1000 m<sup>3</sup> baca gazı için 20 ila 40 litre su tüketilir. Su kullanımı, baca gazı sıcaklığına, bağıl neme ve debisine bağlı olarak değişir.

SDS'lerin daha düşük yüklerde çalışabilme gücü, gaz yıkayıcıya giren baca gazı sıcaklığına bağlıdır.

**Tablo 2.** Kükürt Oksit Emisyonlarını Azaltmak İçin Sprey Kuru Gaz Yıkayıcı Tekniğinin Performansı

Teknikler	Genel SO <sub>2</sub> Giderme Oranı	Diğer Performans Parametreleri	Değerler
Sprey Kuru Scrubber (SDS)	%85-92	Parametreler	Değerler
		İşletme sıcaklığı	120-200 °C (baca gazı girişi) 65-80 °C (baca gazı çıkışı)
		Sorbent	Kireç, Ca(OH) <sub>2</sub>
		Hidrolik Bekleme Süresi	Yak. 2-10 sn
		Ca/S molar oranı	1,1-1,4
		Absorber başına maks. Baca gazı debisi	3 300 000 m <sup>3</sup> /saat
		SO <sub>3</sub> ve HCl giderim oranı	%95-%99
		Kullanılmış sorbent resirkülasyon oranı	%0-75
		Enjeksiyon Sıvısında Katı muhtevası	%10-45
		Güvenirlilik	%95-99
		Bakiye/bypass ürün	Uçucu kül, reaksiyona giremeyen sorbent ve CaSO <sub>3</sub> karışımı
		Elektrik üretimi başına enerji tüketimi	%0,5-1
		Su tüketimi	Yok
		Toz giderme ünitesi olmaksızın spey dryerin basınç düşmesi	100 mbar (10 <sup>3</sup> Pa)

**NB:**

The use of tower mills for slaking can increase the reactivity of the slaked lime.  
As spray dry scrubbers can remove more SO<sub>3</sub> than wet scrubbers, there is likely to be less of a problem of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the environment close to the plant than with wet scrubbers.  
The overall power consumption for pollution control (including NOX and dust control devices) is usually below 1.0 % in a plant using a spray dry scrubber.  
With sulphur contents exceeding 3 %, the removal efficiency decreases slightly.  
The spray dry scrubber efficiency very much depends on the dedusting device used (e.g. bag filter or ESP), because desulphurisation occurs to a certain extent, for instance, in the filter cake of the bag filter.

## 9. SİRKÜLE EDİLEN AKIŞKAN YATAKLI (CFB) KURU SCRUBBER

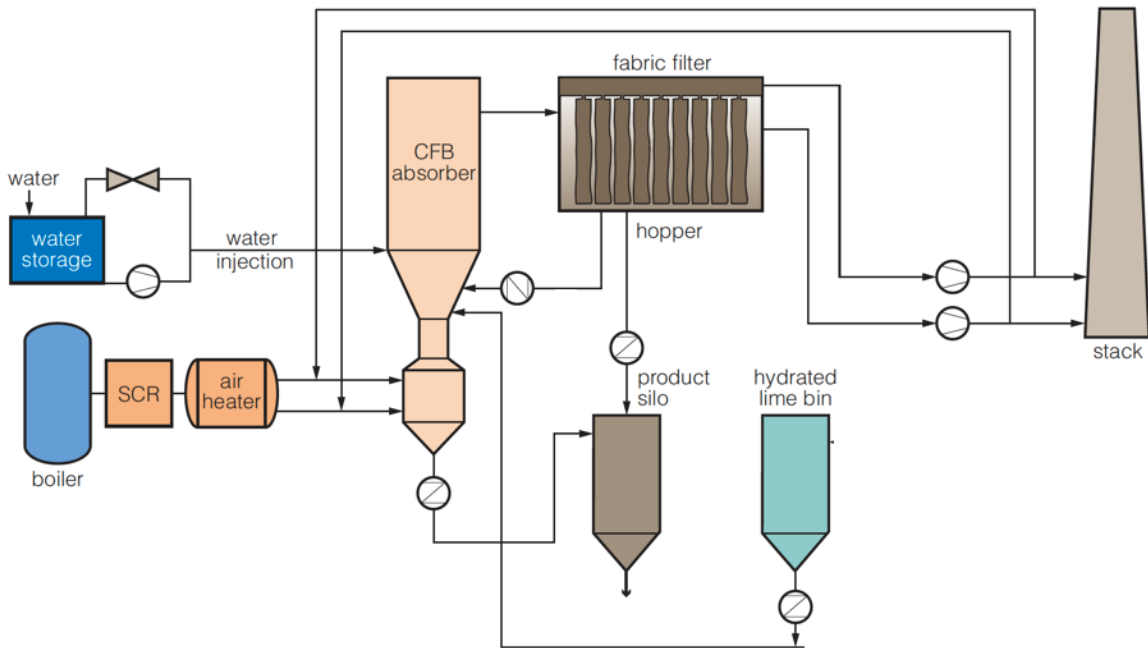
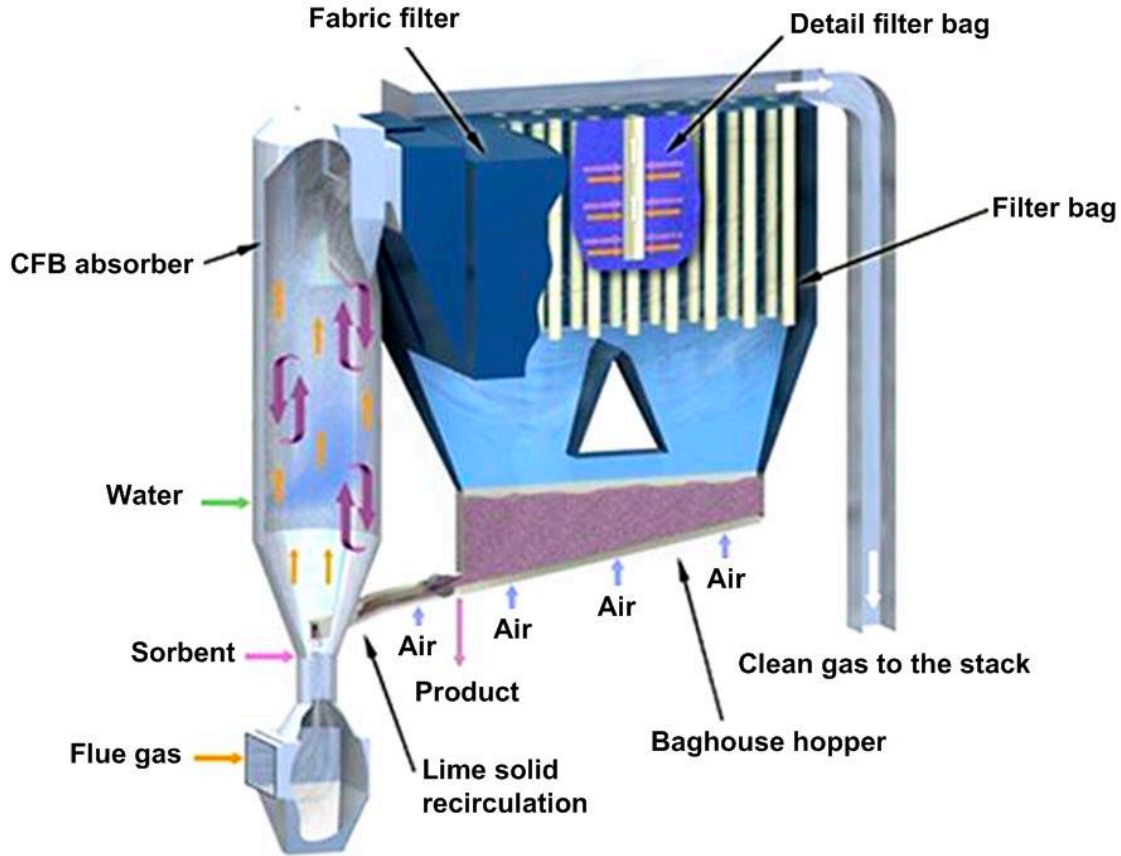
### 9.1. TANIMLAMA

Sirkülasyonlu akışkan yataklı (CFB) proses, sprey kuru gaz yıkayıcı (scrubber) ve kanal sorbent enjeksiyon teknikleri için ayrı bir işlemdir. Kazan hava ön ısıtıcısından gelen baca gazı, alttan CFB absorberine girer. Katı sorbentin ve suyun baca gazı akımına ayrı ayrı enjekte edildiği bir venturi bölümünden dikey olarak yukarı doğru akışı sağlanır. Yeterli süre içinde katı ile gazın teması sağlanır.

Baca gazında SO<sub>2</sub>, %98 ve SO<sub>3</sub>, HCl, HF>%99 oranında giderilir.

### 9.2. TEKNİK AÇIKLAMA

Venturi, kanal (vessel) çalışma aralığı boyunca uygun akış dağılımını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Venturi içinde gaz önce hızlandırılır ve daha sonra silindirik üst kanala (vessel) girmeden önce yavaşlar. Vesselin yüksekliği, istenen sönmüş kireçle SO<sub>2</sub> temas süresi için gerekli olan yatak malzemesinin kütlesine ve hidrolik bekleme süresine uyacak şekilde tasarlanmıştır. Ekipmanın boyutlandırılması çoğunlukla baca gazı akışına bağlı olarak belirlenir. Devridaim malzemesi, taze reaktif ve gaz koşullandırma suyu gibi tüm harici girişler, venturinin ayrılan duvarındaki gaza verilir. Vessel'in dahili mekanik veya yapısal bileşeni yoktur. Gaz dağılımının, sorbent akış hızının ve nemlendirme buharının dağıtımı ve miktarının kontrolü, optimum SO<sub>2</sub> giderme verimliliği için uygun koşulları sağlar.

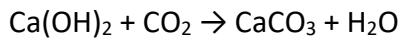
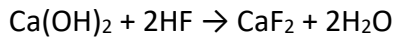
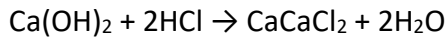
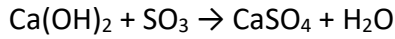
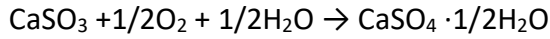
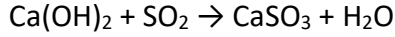


Şekil 8. Sirküle Edilen Akışkan Yataklı (CFB) Scrubber Prosesi Akış Şemaları

SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, HF, HCl gibi asidik kirleticileri giderilmiş ve katı faza dönüştürülmüş baca gazı içindeki uçucu katı maddelerle birlikte bir toz filtre ünitesine (torba filtre veya elektostatik çöktürücü) verilir. Partikül madde filtre ünitesinden çıkan çıkış gazları, bir indüklenmiş çekiş fanı vasıtasıyla bir bacaya verilir. Filtre edilmiş tozların çoğu absorberda tekrar değerlendirmek üzere geri

verilir. Hazne seviyesi (hopper), bertaraf için yan ürün silosunda toz ekstraksiyonu kontrol edilir.

Baca gazından asit gazların arıtılması ile ilişkili işlemin kimyası, SO<sub>2</sub>, HCl, HF ve hidratlanmış kireç arasındaki basit bir asit/baz absorpsiyon reaksiyonudur:



Absorpsiyon kimyası, baca gazı sıcaklığı, pH, gaz nemi ve baca gazındaki SO<sub>2</sub> konsantrasyonu gibi faktörlerden güçlü bir şekilde etkilenir. Oluşan yan ürün, kalsiyum sülfid, kalsiyum sülfat, uçucu kül ve reaksiyona girmemiş kirecin kuru bir karışımıdır.

Uçucu külün çoğunun absorber'a girmeden önce bertaraf eden bir ön-kollektörün kullanılması ortak bir tasarım özelliğidir. Hava ısıtıcı ve absorber arasına monte edilir. Bir ön kolektörün montajının başlangıç yatırım maliyetini ve işletme maliyetlerini dengelemeye yardımcı olabilecek bazı avantajları vardır;

- Belirli bir desülfürizasyon verimi için, (belirli bir  $\Delta T$ 'de) kireç tüketimini azaltabilir. Bu, CFB gaz yıkayıcı çalışma sıcaklığının (belirli bir Ca/S oranında) artırılmasını gerektirse de, bu aynı zamanda toz birikme risklerini de azaltır.
- Daha yüksek torbalı filtre verimliliği ve dolayısıyla daha düşük nihai emisyon elde edilmesine yardımcı olur.
- Bertaraf edilecek atık hacmini azaltır.
- Uçucu kül pazarı iyi kurulduğunda faydalı olan satılabilir bir ürün (uçucu kül) toplanır.

Ön toz arıtma işlemi normalde basit bir tek alanlı torbalı filtredir. Bununla birlikte, sonradan yükseltmelerde mevcut tozları kontrol ekipmanı genellikle bir ön kollektör olarak kullanılır.

İşlem, karmaşık değildir ve bakımı kolaydır. Çünkü öğütme değirmenleri, aşınmaya dayanıklı bulamaç pompaları, karıştırıcılar, döner atomizörler ve çamur susuzlaştırma cihazları gibi yüksek bakım gerektiren mekanik ekipman gerektirmez. Ayrıca, sirkülasyon yatağının artan etkili yüzey alanı, baca gazındaki neredeyse tüm SO<sub>3</sub> ve halojenlerin (klorür, florür) başarılı bir şekilde giderilmesini sağlar ve kondensat SO<sub>3</sub> aerosol sisten gaz yolu korozyonu olasılığını ortadan kaldırır.

CFB ile ilgili ana gelişmeler:

- 400.000 m<sup>3</sup>/h'den fazla gaz debilerinde giriş gazları için birden fazla nozul venturi kullanılır.
- Katı sirkülasyon ve sönmüş kireç, venturi meme ile yukarı besleme yapılır.
- Katı sirkülasyonu ve hidratlı kireç, venturi nozulunun yukarisından beslenir.
- Gaz akışının sınırsız kısmi yükü için temiz gaz sirkülasyonu yapılır.



- Kanallarda birikmeleri (çökmeleri) önlemek için absorber üst tasarımı ve çökeltici bağlantısı yapılır.
- Torba yüzeylerinde kirlenmeyi önlemek için düşük basınçlı darbe jet kumaş filtre sistemi kullanılır.

Elde edilen çevresel faydalar;

- Baca gazından havaya SO<sub>x</sub> ve halojenlerin salımları yarı yarıya iner.
- Toz giderme verimliliği artar.

**Tablo 3.** Kükürt Oksit (SO<sub>2</sub> ve SO<sub>3</sub>) Emisyonlarını Azaltmak İçin CFB Kuru Gaz Yıkayıcı Tekniğinin Performansı

Teknikler	Genel SO <sub>2</sub> Giderme Oranı	Diğer Performans Parametreleri	
		Parametreler	Değerler
CFB Kuru Scrubber (CFB)	%90-99	Halojenleri Giderme Verimliliği	%95-99
		İşletme sıcaklığı	90 °C (+/-15 °C)
		Sorbent	Ca(OH) <sub>2</sub>
		Hidrolik Bekleme Süresi	3 sn
		Ca/S molar oranı	1,1-1,5
		Kullanılmış sorbent resirkülasyon oranı	%10-100
		Enjeksiyon Sıvısında Katı muhtevası	%10-45
		Güvenirlilik	%98-99,5
		Bakiye/bypass ürün	Uçucu kül/CaSO <sub>4</sub> /CaSO <sub>3</sub>
		Elektrik üretimi kapasitesi başına enerji tüketimi	%0,3-1
		Su tüketimi	Yok
		Toz giderme ünitesi olmaksızın spey dryerın basınç düşmesi	7-15 hPa
		Remarks	
		The CFB vessel is designed with clean gas recirculation and an internal gas velocity range of 1.8–6 m/s for boiler loads from 30 % to 100 %. High removal of metals.	

### 9.3. EKONOMİK DEĞERLENDİRME

- Diğer DeSO<sub>x</sub> yöntemlerine kıyasla daha düşük yatırım maliyeti gerektirir.
- Uçucu külün yeniden aktivasyonu, satılabilirliklerini etkileyebilir.
- CFB sistemi içinde ürünün geri dönüşümü: kullanılan sorbentin daha fazla kullanılması taze sorbent tüketiminde tasarruf sağlar.

- İşletme maliyetlerini azaltmanın ek bir yolu, bir Kireç Kuru Nemlendirme Sistemi (LDH) kullanmaktır: yerinde bir nemlendirici kullanarak, daha ucuz kireç su ile yüksek kaliteli bir sulu kirece reaksiyona girer.
- Daha büyük yakma tesisleri çoklu gaz yıkayıcılar (scrubberlar) gerektirebilir.

Kuru sistemin yatırım maliyeti, ıslak sisteme göre %30 ila %50 daha ekonomiktir. Sönmüş kuru kireç kireçtaşından daha pahalıdır, bu da işletme maliyetini artırır.

SO<sub>2</sub> indirgeme maliyeti, 600-800 Avro/ton SO<sub>2</sub>'dir.

Elektrik üretimi kapasitesi başına enerji tüketimi; %0,5-1'dir.

### **9.4. UYGULAMA İÇİN İTİCİ GÜÇ**

- SO<sub>x</sub> emisyonları azaltılır.
- Basit, güvenilir ve yüksek giderme verimliliğine haizdir.
- Daha az su tüketilir.
- Artılacak su/çamur yoktur.
- Toz giderme kademesinin dahil edilmesi gerekmez.
- Halojenlerin (Cl, F) ve SO<sub>3</sub>'ün yüksek oranda giderilmesi sağlanır.



## 10. KAYNAKLAR

1. Thierry Lecomte, José Félix Ferrería de la Fuente, Frederik Neuwahl, Michele Canova, Antoine Pinasseau, Ivan Jankov, Thomas Brinkmann, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho, “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants”, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and control, 2017.
2. Andreas Poullikkas, “Review of Design, Operating, and Financial Considerations in Flue Gas Desulfurization Systems” Energy Technology & Policy, 2, 92–103, 2015.
3. Frank Leuschke “What is possible to achieve on flue gas cleaning using the CFB technology”, <https://www.researchgate.net/publication/286016536>, 2005.
4. G. Krammer and G. Staudinger, “SO<sub>2</sub> removal from flue gas with dry Limestone”, Gas Separation Et Purification 1991 Vol 5 December.
5. Nilgun Karatepe, “A Comparison of Flue Gas Desulfurization Processes”, Energy Sources, 22:197 206, 2000.
6. A. Saleem, “Flue Gas Scrubbing with Limestone Slurry”, Journal of the Air Pollution Control Association, 22:3, 172-176, 1972.
7. R. K. Srivastava & W. Jozewicz, “Flue Gas Desulfurization: The State of the Art”, Air & Waste Manage. Assoc. 51:1676-1688, 2001.
8. Paul S. Nolan, “Flue Gas Desulfurization Technologies for Coal-Fired Power Plants”, Coal-Tech 2000 International Conference November 13-14, 2000.
9. “Air Pollution Control Technology Fact Sheet”, Flue Gas Desulfurization, EPA-452/F-03-034.
10. Cara Niu, “Comparison of flue Gas Desulfurization Technologies”, <https://www.researchgate.net/publication/328279990>.
11. Anne M Carpenter, “Low water FGD Technologies”, IEA Clean Coal Centre, November 2012.