



TÜBİTAK

1997

Bilim Ödülü

Prof.Dr. Fikret Kargı



Mikroorganizmalar yardımıyla kömürden organik ve inorganik kükürdün giderilmesi konusunda uluslararası düzeyde üstün nitelikli çalışmalar nedeniyle bilim ödülü verilmiştir.

1951 yılında Malatya'da doğan Fikret Kargı, lise ve Üniversite yıllarında TÜBİTAK bursiyeri olarak öğrenim görmüş, 1973 yılında Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuş, 1979 yılında Cornell Üniversitesi'nde (ABD) doktora derecesi almış, 1986 yılında Washington Üniversitesi'nde (St.Louis, ABD) doçentliğe ve 1992 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi'nde profesörlüğe yükselmiştir.

1973-1976 yılları arasında Hacettepe Üniversitesi'nde, 1976-1979 yılları arasında Cornell Üniversitesi'nde (ABD), 1979-1980 yılları arasında Rochester Üniversitesi'nde (ABD), 1980-1984 yılları arasında Lehigh Üniversitesi'nde (ABD), 1986-1990 yılları arasında Washington Üniversitesi'nde (St.Louis, ABD) görev yapan Prof.Dr. Kargı, 1991 yılından bu yana Dokuz Eylül Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü'nde (İzmir) görev yapmaktadır.

Fikret Kargı, Bioprocess Engineering (Springer-Verlag) ve Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences dergileri editörleri kurulu üyesidir. Fikret Kargı yetmişbeşin üzerinde bilimsel makale yayınlamış ve kırkın üzerinde bilimsel tebliğ sunmuş olup kendi konusunda biri ABD (Bioprocess Engineering, Prentice Hall, 1992) biri de Türkiye'de (Çevre Mühendisliğinde Biyoprosesler, DEÜ, 1993) yayınlamış iki ders kitabı vardır.

Fikret Kargı'nın Uluslararası Science Citation Index'çe taranan hakemli dergilerde çıkmış 42 yayını olup bu yayınlara Mayıs 1997 itibarıyla 456 atıf yapılmıştır.

Kömürün Desülfürizasyonunda Biyoteknolojik Yöntemler

Kömürün doğrudan yakılması ile atmosfere verilen kükürt dioksit ve azot oksitler atmosferde su ile birleşerek asit oluşumuna ve asitli yağışlara neden olmaktadır. Bu nedenle kömürden kükürt bileşiklerinin giderilmesinde biyoteknolojik yöntemler önemli ve özel bir yer kapsar. Kömürün desülfürizasyonunda kimyasal bağlı organik kükürt bileşiklerinin yanmadan önce giderimi zor ve pahalı yöntemlere dayanır. Bu amaçla son yıllarda geliştirilen biyoteknolojik yöntemler bu konuda yeni bir çığır açmıştır. Biyoteknolojik yöntemlerle kömür desülfürizasyonu, teknolojik olarak mümkün olmakla birlikte organik kükürt bileşiklerinin giderim hız ve yüzdesinin düşük olması prosesin ekonomik yapılabilirliğini kısıtlayabilir.

Sanayileşme nedeniyle artan enerji gereksinimi fosil yakıtların özellikle termik enerji santrallerinde giderek artan kullanımına neden olmaktadır. Ancak kömürün temizlenmeden doğrudan yakılması sonucu açığa çıkan kükürt dioksit atmosferde su ile birleşerek sülfürik asit oluşumuna ve asitli yağışlara neden olmaktadır. Bu durum su ve toprak gibi doğal ortamlarda pH'ın düşmesine yol açmakta ve canlıların yaşamı için tehlike teşkil etmektedir.

Kömürden kükürtlü bileşiklerin giderilmesi (desülfürizasyon) yanmadan önce ve sonra olmak üzere iki grupta toplanabilir.

Halen uygulanmakta olan desülfürizasyon yöntemleri yanma sonrası yapılmaktadır. Bu yöntemler arasında sönmemiş kireç ya da kireç taşı ile birlikte yakma ya da çıkan gazların kireç sütü çözeltisinden geçirilerek kükürt dioksitin kalsiyum sülfat halinde tutulması sayılabilir. Desülfürizasyon işlemlerinin yanma sonrası yapılması cihazlarda korozyon ve benzeri sorunlara neden olduğundan ve fazla miktarda katı atık oluşmasına yol açtığından tercih edilmemektedir. Atık oluşumu ve korozyon sorunlarını ortadan kaldıracak

ğı için yanma öncesi desülfürizasyon işlemleri önemli avantajlara sahiptir.

Kömürün yanma öncesi desülfürizasyon işlemleri üç ana grupta toplanabilir:

1. Fiziksel Yöntemler: Flotasyon, manyetik ayırma.
2. Kimyasal Yöntemler: Oksitleme, indirgeme.

3. Biyoteknolojik Yöntemler: Mikroorganizmalarla kükürt giderimi.

Fiziksel yöntemler, sadece kömürün yapısında fiziksel olarak bulunan inorganik kükürt bileşiklerinin (pirit içeren kömür parçacıkları) giderimini sağlar; kimyasal olarak bağlı organik kükürt bileşiklerini gideremez ve ayrıca bir miktar kömür kaybı dolayısıyla enerji kaybına yol açar.

Kimyasal yöntemler, kükürt içeren bileşiklerin oksitlenmesi ya da indirgenmesi esasına dayanır. Oksitleyici bileşikler olarak demir III bileşikleri, hidrojen peroksit, hipoklorit gibi bileşikler kullanılabilir. İndirgeme işlemleri için ise yüksek sıcaklık ve basınçta hidrosülfürizasyon yöntemi kullanılır. Kimyasal yöntemler oldukça pahalı, zor şartlarda oluşan ve istenmeyen yan ürün oluşturan yöntemler olduğundan

ve de kullanılan kimyasalların geri kazanımını gerektirdiğinden tercih edilmezler.

Biyoteknolojik yöntemler diğer yöntemlere göre aşağıda belirtilen avantajlara sahiptirler.

a. Daha düşük yatırım ve işletme masrafları gerektirirler.

b. Normal şartlarda (1 atm, 20-30 °C) oluştuklarından daha az enerji gerektirir ve kolay işletme şartları sağlarlar.

c. İstenmeyen yan ürün oluşturmazlar.

d. Hem organik hem de inorganik kükürt bileşiklerinin giderilmesini sağlarlar.

Kimyasal yöntemlere göre daha yavaş olmaları biyolojik yöntemlerin bir dezavantajı olmasına rağmen yukarıda belirtilen avantajları dikkate alındığında daha etkin bir alternatif olarak görülebilir.

Kömürdeki Kükürt Bileşikleri

Kömür oldukça kompleks, aromatik bileşiklerden oluşan polimerik bir yapıya sahiptir. Bu yapıda element olarak C, O, H, N ve S bulunur. Kömürün yapısında pirit gibi bazı mineraller fiziksel olarak bulunurlar. Kömürün karbon içeriği ne kadar yüksek ve oksijen içeriği ne kadar düşük ise enerji değeri o kadar yüksek olur. Kömürdeki kükürt bileşikleri iki ana grupta toplanabilir.

a. İnorganik kükürt bileşikleri: Pirit (FeS_2), Markasit (FeS_2)

b. Organik kükürt bileşikleri: Sülfidler, Disülfidler, Thioller ve Thiolenler.

İnorganik kükürt bileşiklerinden pirit ve markasit (kristal yapısı piritten farklı) fiziksel olarak parçacıklar halinde bulunurlar ve giderilmeleri nispeten kolaydır. Az miktarda sülfat iyonları da piritik kükürdün havada kendiliğinden oksitlenmesi sonucu oluşur. Kömürün kaynağına ve cinsine bağlı olarak piritik kükürt %1-%4 arasında bulunabilir.

Organik kükürt bileşikleri kömürün kimyasal yapısının bir parçası olarak karbonlu gruplara bağlıdır. Bu bileşiklerin kimyasal yapıları Tablo 1 de özetlenmiştir. Bu bileşiklerin oksit-

leme/indirgeme ile giderimi oldukça zor ve yavaştır. Thiofen grubu bileşiklerinden dibenzothiofen giderilmesi en zor olanıdır.

Kömürün organik kükürt içeriği kömürün kaynağına ve cinsine bağlı olarak değişir ve genellikle % 0.5- % 4 arasında değişir.

Kömürün toplam kükürt içeriği genellikle %1-%6 arasında olup kaynağına bağlı olarak kükürt bileşiklerinin dağılımı değişir.

Kükürt Gideren Mikroorganizmalar

Bazı organizmalar kükürtlü bileşiklerini oksitleyerek yaşamları için gerekli olan enerjiyi sağlarlar. Organizmaların bunu yapabilmeleri için ortamda daha kolay oksitlenebilen bileşiklerin olması ve ortam şartlarının (besin bileşenleri, sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen vb) uygun olması gerekir.

Kükürtlü bileşikleri oksitleyen organizmalar üç ana grupta toplanabilirler.

a. Ototrofik Organizmalar: Bu organizmalar havadaki karbondioksiti karbon kaynağı olarak kullanıp inorganik kükürt bileşiklerini sülfata oksitleyerek enerji elde eden aerobik organizmalardır.

Bu organizmaların en çok bilinen ve kullanılanı *Thiobacillus ferrooxidans*'tır. Bu organizma, asidofilik (pH = 2-4), mezofilik (T = 25-30 °C) ve aerobik bir ototrof olup piritte bağlı kükürdü oksitleyerek sülfata dönüştürür. *Thiobacillus* türünden diğer organizmalar da hem indirgenmiş demiri (Fe II) hem de kükürdü oksitleyebilirler. Örneğin, *Thiobacillus thiooxidans* elementel kükürdü sülfata oksitleyerek kömürden piritik kükürdün giderilmesinde *T. ferrooxidans*'a yardımcı olur. Bazı durumlarda bu iki organizma birlikte kullanılarak inorganik kükürt giderimi artırılabilir.

Bu organizmalar dışında *Beggiatoa* ve *Thiotrix* türü ototrofik organizmalar da piritik kükürdünün oksitlenmesinde kullanılabilir.

b. Fakültatif Ototrofik Organizmalar: Bu organizmalar ototrofik şartlarda kömürden piritik kükürdün giderilmesinde kullanılabildiği gibi heterotrofik şartlarda organik kükürdün giderilme-

sinde de kullanılabilirler. Bu organizmaların en bilineni *Sulfolobus acidocaldarius*'tur. *Sulfolobus* türü organizmalar termofilik (T=50-90 °C), asidofilik (pH=2-4) ve aerobik organizmalar olup kömürden hem piritik hem de organik kükürdün giderilmesinde başarıyla kullanılabilir.

c. Heterotrofik Organizmalar: Bu tür organizmalar kükürt içeren organik bileşikleri parçalayıp hem karbon hem de kükürdü oksitleyerek kullanırlar. Bu tür organizmalar arasında bazı *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter* ve *Rhizobium sp.* türleri sayılabilir. Heterotrofik organizmalar ototrofik olanlara göre daha hızlı büyüdüklerinden kükürt bileşiklerini de daha hızlı giderirler; ancak istenmeyen yan ürün oluşumuna da neden olabilirler.

Bazı durumlarda karma heterotrofik kültürlerin kullanılması kükürdün sülfata dönüştürülmesi için gerekli olabilir.

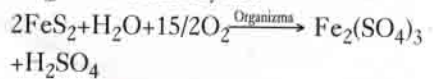
Kükürt Oksidasyon Mekanizmaları

İnorganik Kükürt Bileşikleri: Piritik kükürt doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki ayrı mekanizma ile oksitlenir.

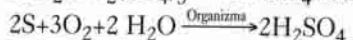
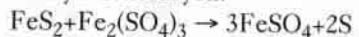
Doğrudan mekanizmada organizmalar piritik kükürdü sülfata ve Fe^{II} yi Fe^{III} 'e oksitlerler. Bu oksitlemeleri yapan enzimler hücre duvarına bağlı olup organizmalarla kömür tanecikleri arasında doğrudan temas gerekir. Dolaylı mekanizmada sulu çözeltide organizmaların Fe^{II} iyonlarını oksitlemesi ile oluşan Fe^{III} iyonları piritte bağlı kükürdü sülfata oksitlerler ve Fe^{II} 'ye indirgenirler. Dolaylı mekanizma organizma ile kömür taneciklerinin temasını gerektirmez. Bu mekanizmada organizmanın görevi Fe^{III} iyonlarının yeniden oluşumunu sağlamaktır.

Bu mekanizmalar aşağıdaki reaksiyonlarla özetlenebilir:

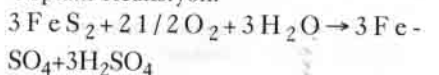
Doğrudan Oksidasyon :



Dolaylı Oksidasyon:



Toplam Reaksiyon:

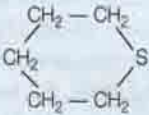
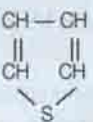
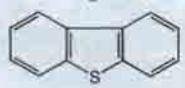


Sülfürik asit oluşumu nedeniyle ortam pH'ı başlangıç değeri olan pH=3'ten pH=2.5'e kadar düşebilir.

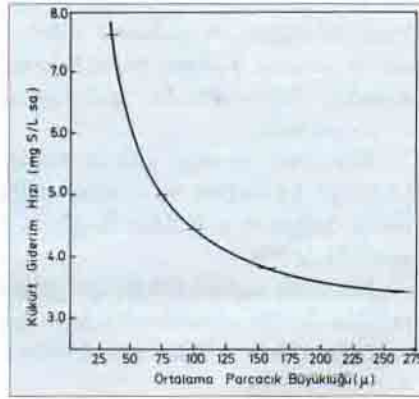
Piritik kükürt giderimi 3-4 gün süren alıkonma süresi gerektirmektedir.

Organik Kükürt Bileşikleri: Model organik kükürt bileşiklerinin büyük bir kısmı organizmalar üzerinde toksin/inhibisyon etkisi yaptıklarından bu konuda sınırlı sayıda çalışma vardır. Dibenzotiyofen (DBT) üzerinde yapılan çalışmalar başlıca iki mekanizma gözlenmiştir. Bu mekanizmalarda DBT önce oksitlenerek hidroksillenmekte sonra da kükürt ya sülfata ya da daha basit bir organik kükürt bileşiğine dönüşmektedir. Karma kültür kullanımı ile tüm kükürt bileşikleri son ürün olan sülfata dönüştürülebilmektedir. Organik kükürt bileşiklerinin oksidasyonu oldukça yavaş olup *S. acidocaldarius* kullanıldığında 3-4 hafta sürebilmektedir. Bazı heterotrofik organizmaların kullanımı ile (*Pseudomonas* vb) bu süre 1-2 güne düşürülebilir. Oluşan sülfat iyonları kireç sütü ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ilavesi ile CaSO_4 halinde çökeltilip filtrasyon ile sudan ayrılabilir. Proses suyunun bir kısmı ise geri döngü ile tekrar kullanılabilir.

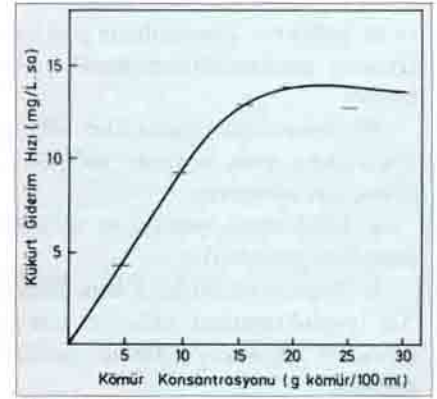
Kömürdeki kükürt bileşiklerinin oksidasyon reaksiyonları ve kullanılan organizmalar Tablo II'de özetlenmiştir.

Bileşik	Kimyasal Yapı
1. Tioller	R - SH ya da $\text{O} - \text{SH}$
Ethan thiol	$\text{CH}_3\text{CH}_2 - \text{SH}$
Benzen thiol	$\text{C}_6\text{H}_5 - \text{SH}$
2. Sülfidler	$\text{R}_1 - \text{S} - \text{R}_2$
Dietil sülfid	$\text{CH}_3\text{CH}_2 - \text{S} - \text{CH}_2\text{CH}_3$
Thiosiklo hexan	
3. Disülfidler	$\text{R}_1 - \text{S} - \text{S} - \text{R}_2$
Dietil disülfid	$\text{CH}_3\text{CH}_2 - \text{S} - \text{S} - \text{CH}_2\text{CH}_3$
Dimetil disülfid	$\text{CH}_3 - \text{S} - \text{S} - \text{CH}_3$
4. Thiofenler	
Thiofen	
Dibenzotiyofen (DBT)	

Tablo I: Kömürde mevcut başlıca organik kükürt bileşikleri



Şekil 1: Parçacık büyüklüğünün mömürden piritik kükürt giderim hızına etkisi



Şekil 2: Kömür konsantrasyonunun piritik kükürt giderim hızına etkisi

Proses Şartları ve Değişkenleri

Kömürün organizmalarla desülfürizasyonu bir yüzeysel oksidasyon olayı olduğundan kömür taneciklerinin yüzey alanı ya da parçacık boyutu önemli bir parametredir. Yüzey alanı arttıkça ya da parçacık boyutu azaldıkça kükürdün oksidasyon hızı artar (Şekil 1). Pratik sınırlar içinde $D_p=50-100$ mikron parçacık boyutu istenilen kükürt giderim hızını sağlar.

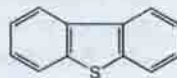
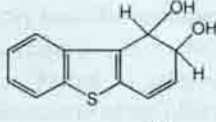
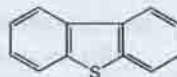
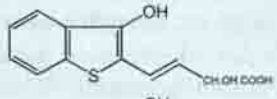

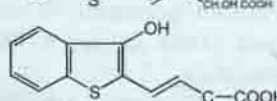

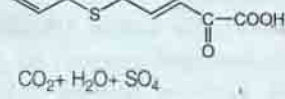
Sulu ortamdaki kömür derişimi de önemli bir değişken olup ortamdaki kömür derişimi (pulp yoğunluğu) arttıkça kükürt oksidasyon hızı hiperbolik olarak artar (Şekil 2). Genellikle % 20-25 kömür derişimi maximum hız sağlar. Bu kömür derişimlerinden sonra organizma derişimi, çözünmüş oksijen derişimi vb sınırlamalar nedeniyle hız sabit kalır.

Ortamdaki organizma derişimi de kükürt giderim hızını etkileyen önem-

li parametrelerden biridir. Düşük organizma derişimlerinde kömür parçacık yüzeyinin ancak bir kısmı organizmalarla kaplı olacağından kükürt oksidasyon/giderim hızı organizma derişimi ile sınırlıdır ve organizma derişimi arttıkça hız da artar. Ancak belli bir organizma derişiminden sonra yüzey organizmalarla doyunluğa ulaşacağından hız sabit kalır. Deneysel olarak optimum organizma derişimi, 1 gram pirit için 10^{12} hücre olarak bulunmuştur.

Sulu ortamda çözünmüş oksijen derişimi 2 mg/l ' nin üzerinde olmalıdır. Bu da etkin bir havalandırma ve karıştırma ile sağlanır.

Özellikle piritte bağlı kükürdün giderilmesinde suda çözünmüş karbondioksit te önemli bir değişken olup yüksek derişimlerde piritik kükürt içeren kömürler için karbondioksitle zenginleştirilmiş (% 1-2 CO_2) hava kullanılmasını gerektirebilir. Oksidasyon yavaş olduğundan genellikle havadaki karbondioksit içeriği yeterlidir.

Bileşik	Organizma	Reaksiyon
Pirit	<i>T. ferrooxidans</i>	$3\text{FeS}_2 + 21/2 \text{O}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{FeSO}_4 + 3 \text{H}_2\text{SO}_4$
	<i>S. acidocaldarius</i>	
Dibenzotiyofen (DBT)	<i>P. aeruginosa</i>	 \rightarrow 
	<i>Acinetobacter</i> sp.	 \rightarrow 
	<i>Rhizobium</i> sp.	 \rightarrow 
	<i>Pseudomonas</i> sp.	 \rightarrow 
	<i>Sulfolobus</i> sp.	$\rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4$

Tablo II: Kömürdeki kükürt bileşiklerinin oksidasyon ürünleri ve organizmalar

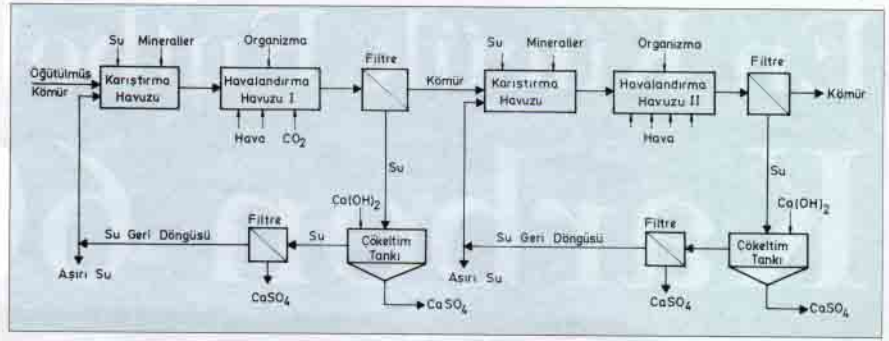
Proses şartları kullanılan organizma ve giderilen kükürt türüne bağlı olmak üzere değişir. Piritik kükürt gideriminde *T. ferrooxidans* kullanımı daha ılımlı şartlar gerektirdiğinden tercih edilir. Bu durumda sıcaklık, 25-30 °C; pH 3 ve çözülmüş oksijen, 2 mg/l olmalıdır. Organik kükürt gideriminde organik kükürt bileşiklerine adapte edilmiş *S. acidocaldarius* türü organizmalar kullanıldığında sıcaklık, 70 C; pH 3 ve çözülmüş oksijen, 2 mg/L olmalıdır. Bu amaçla *Pseudomonas* türü adapte edilmiş organizmalar kullanıldığında sıcaklık, 20-30 °C; pH 6-7 ve çözülmüş oksijen 2 mg/l olmalıdır. Özellikle organik kükürt gideriminde kullanılacak organizmaların tercihen karma kültür halinde kullanılmaları ve kullanılmadan önce organik kükürt bileşiklerine (DBT vb) adapte edilmeleri gerekir.

Ortama organizmaların gereksinim duyacağı azot, fosfor ve mineral bileşikleri ilave edilmesi, bu bileşikler kömürün yapısından sağlayabileceği için genellikle gerekmede de bazı durumlarda gerekebilir.

Organizmaların kömür tanecik yüzeyine bağlanmaları oldukça seçici olup bu amaçla yapılan SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve TEM (tünelleme elektron mikroskobu) çalışmalarında organizmaların pirit yüzeylerine bağlandığı gösterilmiştir. Şekil 3 kömür yüzeyinde pirit taneciklerine bağlanan *S. acidocaldarius*'un SEM ile çekilmiş fotoğrafını göstermektedir.

Genel olarak piritik kükürt giderimi 3-4 günlük alıkonma süresinde %90-95 verimle gerçekleşmektedir. Ancak, organik kükürt kömürün organik yapısının bir parçası olduğundan yaptığımız çalışmalarda en fazla %40 oranında giderilebilmiştir. Organik kükürdün tamamının giderilmesi kömürün polimerik yapısının önemli ölçüde bozunmasını gerektirdiğinden çok zor ve hatta imkansızdır. Organik kükürdün giderilebilmesi için önce piritik kükürdün giderilmesi gerekir.

Organizmalarla temastan önce kömürün asit ya da diğer kimyasal oksitleyicilerle kısa süreli teması, organik kükürt bileşiklerinin kısmen oksidasyonunu sağlayacağından, biyolojik oksidasyonu kolaylaştırır ve organik kükürt giderimini artırır.

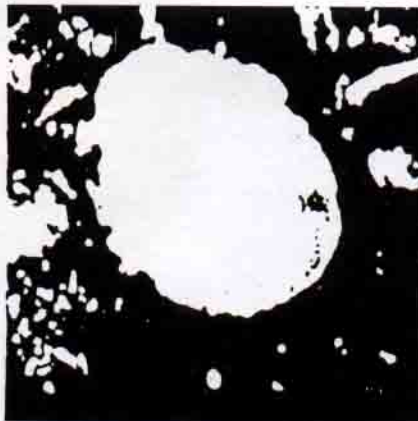


Şekil 4: Kömür desülfürizasyonu için iki basamaklı biyolojik proses

Önerilen Proses Şeması

Piritik ve organik kükürdün giderilme şartları farklı olduğundan iki basamaklı desülfürizasyon prosesi gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen iki basamaklı proses şeması Şekil 4'te şematik olarak gösterilmektedir.

İlk basamakta piritik ve ikinci basamakta organik kükürt giderimi sağlanan bu proseste 100 mikron boyutuna kadar öğütülen kömür bir karıştırma havuzunda su ve gerekli mineraller ile karıştırılır (%20-25 kömür derişimi) ve pH 3'e ayarlanır. Bu karışım tercihen yüksek derişimli *T. ferrooxidans* ile aşılınmış havalandırmalı havuza beslenir. Havalandırmalı havuz sıgı (1-2 m) ve geniş yüzeyli olup tercihen yüzey havalandırıcılarıyla havalandırılıp karıştırılır. Altan difüzörlerle havalandırma sağlandığında daha derin (3-5 m) havuzlar kullanılabilir. Bu havuzda alıkonma süresi 3-4 gün olup çıkış suyu önce vakumlu filtrelerden geçirilerek kömür-su ayırımı yapılır. Suda mevcut sülfat iyonları sönmüş kireç sütü (%0.2 Ca(OH)₂) ile bir çökeltim tankında temas ettirilerek CaSO₄ oluşumu ve kısmen çökmesi



Şekil 3: Kömür tanecik yüzeyinde pirit üzerine tutunmuş *S. acidocaldarius*'un SEM fotoğrafı

sağlanır. Çökeltim tankı içeriği filtrasyondan geçirilerek CaSO₄ ayrılır ve çıkış suyu kısmen (%60-70) geri döngü ile karıştırma tankına geri verilir.

İlk basamakta piritik kükürdü giderilmiş kömür ikinci basamak karıştırma tankında su ve gerekiyorsa mineraller ile karıştırılır ve pH ayarlandıktan sonra ikinci havalandırma havuzuna beslenir.

İkinci havalandırma havuzunda organik kükürt bileşiklerine adapte olmuş *S. acidocaldarius* kullanılabileceği gibi tercihen karma kültür kullanılır. Bu havuzda alıkonma süresi kullanılan kültüre bağlı olarak birkaç günden birkaç haftaya kadar değişebilir. Çıkış suyu vakumlu filtreden geçirilerek temizlenmiş kömür ayrılır. Proses suyu birinci basamaktakine benzer işlemlerden geçirilerek CaSO₄ ayrılır ve suyun bir kısmı karıştırma havuzuna geri verilir.

Bu prosesin ilk basamağında önemli bir problem olmamakla beraber ikinci basamağı giderilen organik kükürt yüzdesinin yüksek olmaması ve kullanılacak organizmaların istenilen niteliklerde olmaması nedeniyle geliştirmeye açıktır ve bu konuda halen çalışmalar yapılmaktadır. Organik kükürdü daha hızlı ve daha etkin giderecek kararlı organizmalarla proses uygulamaya daha uygun hale gelecektir.

Optimum şartlarda önerilen proses ile kömürün desülfürizasyon maliyeti 20-25 A.B.D. Doları/ton olarak hesaplanmıştır. Proste yapılabilecek gelişmelerle bu maliyet daha düşük seviyelere çekilebilir.

Fikret Kargı
Prof. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi,
Çevre Mühendisliği Bölümü

Kaynaklar
Kargı, F., "Microbiological Coal Desulfurization" *Enzyme & Microbial Technol.* 4:13-19,1982
Kargı, F., "Microbial Desulfurization of Coal" *In 'Advances in Biotechnological Processes'*, pp 241-272,1984.
Kargı, F., "Microbial Methods for Coal Desulfurization" *Trends in Biotechnol.* November,1986, pp 293-297.
Bioprocessing and Biotreatment of Coal. Ed. D.L.Wise, Marcel Dekker, 1990