

EVSEL ISITMADAN KAYNAKLANAN SO₂ EMİSYONUNUN AZALTIILMASINDA KİREÇ VE KİREÇ-MELAS KARIŞIMININ KULLANILMASI

Hüseyin TOPAL

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi
Maltepe 06570 Ankara, topal@mmf.gazi.edu.tr

ÖZET

Ülkemizde evsel ısıtmada kömür yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak kullanılan linyit kömürlerinin kükürt içeriği yüksektir. Yanma sonucu baca gazları ile atmosfere atılan SO₂ emisyonu insan sağlığına ve doğal çevreye büyük zararlar vermektedir. Ülkemizde konut sektörüne tahsis edilen kömürler yıkanmış, elenmiş uygun ısıl değerde tane kömür olarak algılanmakta, orijinal kömürün kükürt içeriğinde genelde herhangi bir azaltma yoluna gidilmemektedir. Konut ısıtmasında kullanılan, yanma yönünden sorun olmayan bu tür kömürlerin SO₂ emisyonlarının azaltılması yönünde en pratik çözüm kömüre kireç karıştırılmasıdır.

Bu çalışmada, konut ısıtılmasında kullanılan soba ve kazanlarda çeşitli tür ve özellikteki kömürler, kireç ilave edilmeksizin ve çeşitli kireç ilave yöntemleri uygulanarak yakıcıların yanma ve emisyon özellikleri deneysel olarak incelenmiş, kireç ilavesinin yakma sisteminin yanma ve emisyon davranışına olan etkileri araştırılmıştır. Kazan deneylerinde SO₂ emisyonunda yaklaşık %30 luk bir azalma sağlanırken yanma bozulmuş, yanma verimi ortalama %7, kazan ısı verimi ise %4 azalmıştır. Soba deneylerinde kömüre kireç ilave edilmesi yanma verimini düşürmeksizin SO₂ emisyonunda %50 azalma sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler : Kömür yakma, yanma verimi, emisyonlar, SO₂ tutma.

LIME/LIME - SUGAR WASTE PULP MIXTURE USAGE FOR REDUCTION OF SO₂ EMISSIONS CAUSED BY DOMESTIC HEATING

ABSTRACT

In our country coal is used wide in the domestic heating sector. Generally the Sulphur content in lignite coal which is used commonly is large. Combustion product SO₂ emission which is emitted to the atmosphere with chimney gases is

very harmful to human health and nature. The best coals allocated for the domestic sector in Turkey are prewashed and screened with a defined heating value appropriate for combustion in combustors. Generally, no preprocess is applied for reduction of sulphur content of the coal. The only practical way for reduction of SO₂ emissions resulting from combustors used in domestic heating is to mix lime into coal to be burned. In this study the combustion and emission behaviour of stoves and boilers used in domestic heating have been investigated experimentally using different coals with and without lime mixing into the coal. In the boiler experiments, although there was a 30% decrease in the SO₂ emission, combustion was damaged, the combustion efficiency and the boiler thermal efficiency decreased in average to 7% and 4% respectively. Adding lime into coal in the stove experiments provided nearly 50% decrease in SO₂ emission without any loss in combustion efficiency.

Keywords : Coal combustion, combustion efficiency, emissions, SO₂ capture.

1. GİRİŞ

Hava kirliliğinin global boyutta dikkate alındığı günümüzde çevre bilinci gelişmiş ve çevreyi koruyucu çalışmalar hızlanmıştır. Hava kirliliği, sadece canlıları değil ekolojik dengeyi de bozarak gelecek kuşakların yaşantılarını da risk altına sokmaktadır. Kömür kullanılması durumunda, özellikle ısıtmadan kaynaklanan hava kirliliğinin azaltılması büyük önem taşımaktadır.

Ülkemizde tüketilen toplam enerjinin yaklaşık % 36'sı konut sektöründe binaların ısıtılmasında kullanılmaktadır. Avrupa Topluluğu (AT) ülkelerinde ise bu oran % 26 dolayındadır [1]. AT ülkelerine kıyasla tükettiğimiz enerjinin daha büyük bir bölümünü konutlarımızın ısıtılmasında kullanmamıza karşın, konutlarımızdaki konfor koşullarının yetersizliği konut sektöründeki enerji ekonomisi yönünden yapısal sorunların boyutunu ortaya koymaktadır [2]. Ayrıca yakıt kalitesi, yakma sistemlerinin tasarımı ve yakıtın kükürt içeriği açısından ülkemiz kömürleri, evsel ısıtma sistemlerinde oldukça yüksek emisyon oluşumuna neden olmaktadır.

Kazan ve soba işletilmesinde ısı verim ve kapasite ile ifade edilen ısı performans, yakma sisteminin ekonomik boyutunu, bacadan çevreye atılan kirletici emisyonlar ise sistemin çevresel etki boyutunu tanımlamaktadır. Diğer ülkelerde olduğu gibi ülkemizde de, yakma uygulamalarında ekonomik boyutun ötesinde çevresel etki yönünden de uyulması gereken yasal düzenlemeler getirilmiştir. "Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği" nde [3] izne tabi olmayan tesisler grubuna giren küçük kapasiteli kazanlar, sobalar ve fırınlar vb. yakma tesislerinin üretim ve pazarlamasında "Tip ve Emisyon Belgesi" uygulaması öngörülmektedir. Bu ise bu tür sistemlerin, ekonomik ve çevresel etki boyutları dikkate alınarak oluşturulacak bir amaç fonksiyonu uyarınca tasarım ve işletilmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaç fonksiyonu, ısı verimin olabildiğince yüksek, emisyonların ise olabildiğince düşük

olduğu yakma sistemlerinin uygun maliyetlerde üretimi ve işletilmesi olarak özetlenebilir [4].

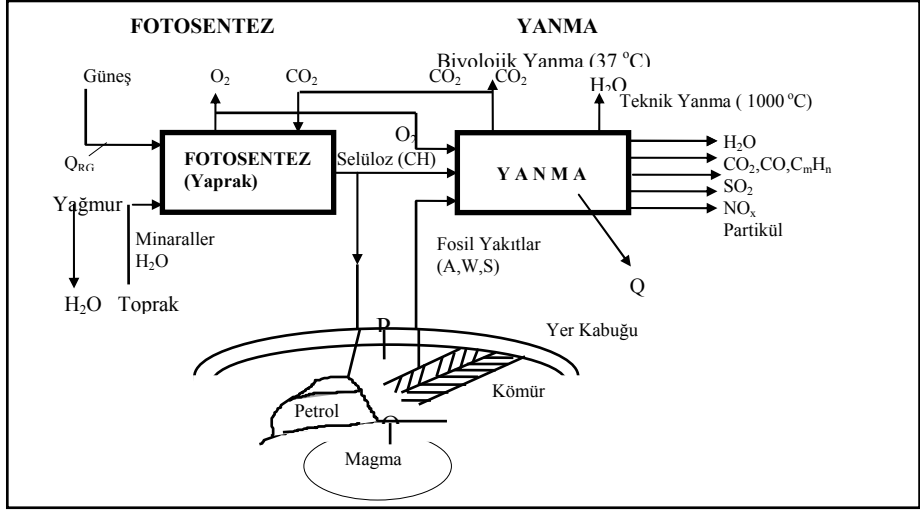
Hava kirleticiler içerisinde kükürtdioksit en zararlı kirleticilerden biridir. Atmosferdeki SO₂ oranının 24 saatlik ortalamasının 300 µg/m³ (0.1 ppm)'in üzerinde çıkmasının tıp dünyasında sağlık açısından zararlı olduğu kabul edilmiştir. Bu oranın 900-1000 µg/m³'ün üzerine çıktığı durumlarda insan hayatının riske girdiği görülmüştür [5].

Ülkemiz linyitlerinin genç kömür olması nedeniyle, yanıcı uçuş oranları yüksek, ısı değerleri düşüktür. Kükürt oranları da oldukça yüksektir. İçerisinde %2-4 kükürt bulunan kömür yakıldığında baca gazındaki SO₂ derişimi yaklaşık 1400-2800 ppm arasında olmaktadır. Bu nedenle baca gazının içerdiği SO₂ emisyonları yanma odasında SO₂ tutma veya baca gazı arıtma uygulamaları ile atmosfere atılmadan önce olabildiğince azaltılmalıdır. SO₂ emisyonlarının adsorbent uygulaması ile tutulması ya yanma aşamasında (küçük sistemler) veya baca gazı arıtma sistemleri uygulaması ile yanma sonrası (büyük sistemler) sağlanabilir. SO₂'i tutma çalışmalarında ucuz ve kolay bulunabilmesi nedeniyle adsorbent olarak kireç ve kireçtaşı en çok kullanılanlardır.

Bu çalışmada, soba ve kazanlarda kömüre çeşitli biçimlerde kireç karıştırılarak (ilave edilerek) yakma deneyleri yapılmış ve kireç ilavesinin emisyon davranışı ve ısı performansını üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre emisyon davranışını yönünden uygun yanma koşulları belirlenmiştir.

Fosil Yakıtların Oluşumu ve Yanma

Dünyamızda son çeyrek yüzyılda yaşanan enerji kökenli sorunlar ile 30-40 yıldır, genelde bölgesel boyutta yaşanan yoğun çevresel sorunların (ekolojik denge) tam olarak kavranabilmesi için; dünyanın, atmosferin, fosil yakıtların oluşum ve gelişim süreçlerinin kısaca ele alınması, konunun evrensel boyutta anlaşılması bakımından yararlı olacaktır. Güneşteki bir patlama sonucu bir alev topu biçiminde güneşten kopan dünya, güneş sisteminde yerini almış ve böylelikle dünyanın soğuma ve gelişme süreci başlamıştır. Bu soğuma sürecinde çeşitli reaksiyonlarla açığa çıkan tozlar ve gazlar (CO₂, H₂, O₂, N₂, vb.) ilk ham atmosferi oluşturmuştur. Atmosferdeki tozların yere inmesi ile yer kabuğu, H₂ ve O₂'nin reaksiyonu ile oluşan suyun yere inmesi ile denizler oluşmuştur. Yarı işlenmiş atmosferde depolu bulunan CO₂'in yeryüzüne çekilerek devasa orman ve canlılar biçimine dönüşümü (karbon çağı), Şekil 1'de verildiği biçimde fotosentez süreci ile olmuştur.



Şekil 1. Fosil yakıtların oluşumu, biyolojik yanma, teknik yanma ve emisyonlar

Şekil 1’de görüldüğü gibi atmosferdeki CO₂’in yer yüzüne selüloz (odun) biçiminde çekilmesi; atmosferden emilen CO₂’in yerden sağlanan su ve mineraller ile yaprakta (orman, yeşil kuşak) güneş ışınma enerjisi (Q_{RG}) altında fotosentezi ile olmuştur. Fotosentez ile oluşan devasa canlı ve bitkiler, yüzeysel traşlama olayları ile (jeolojik, atmosferik, vb.) çukurlara (denizlere) taşınmış, üzerleri toprak ile örtülerek yüksek basınç (p) ve ısı (Q_M) (magma tabakası) altında milyonlarca yıl süren karbonizasyon süreci ile fosil yakıtlara dönüşmüştür. Fotosentez, yanma ürünü CO₂’i selüloza (hidrokarbonlar, karbonhidratlar) dönüştüren ve O₂ veren (O₂, C_mH_n kaynağı, CO₂ kuyusu) bir süreçtir ve doğal dengenin sürekliliğini sağlar. Yanma ise fotosentez ürünleri (C_mH_n, O₂) ile beslenir; biyolojik, sosyal ve ekonomik yaşamın sürekliliği için gerekli olan ısı enerjisini (Q) üretir ve yanma atıkları olarak tanımlanan emisyonları yayar.

Biyolojik yanma, karbonhidrat (besin) girdili, biyolojik yaşamın sürekliliği için gerekli ısıyı sağlayan düşük sıcaklık yanmasıdır. Biyolojik yanmanın emisyonları, fotosentez tarafından işlenebilen türden (CO₂, H₂O) faydalı emisyonlardır. Sosyo-ekonomik yaşamda kas enerjisinin, dolayısı ile biyolojik yanmanın etkin olduğu sanayi devrimi öncesi dünyamızda, günümüz anlamında bir çevre sorunu söz konusu olmamıştır.

Teknik yanma, fosil yakıt girdili, sosyo-ekonomik yaşamın çok hızlı artan enerji gereksiniminin karşılanmasını sağlayan 1000 °C üzerinde gerçekleşen yüksek sıcaklık yanmasıdır. Yakıt ve yanma özellikleri nedeni ile teknik yanmada, CO₂ ve H₂O dışında, fotosentez süreci tarafından özümlemeyen ve çevreye zarar veren genelde gaz (CO, C_mH_n, SO₂, NO_x vb.) ve partikül (toz, is, kurum vb.) biçimde olan emisyonlar yayılır.

Bu emisyonlar günümüz çevre sorunlarının temel nedenidir. Sanayi devrimi ardından günümüze kadar geçen sürede, fosil yakıt kullanımındaki hızlı artış ile bir yandan atmosfere verilen CO₂ miktarı aşırı biçimde artmış, diğer yandan ormanların azalması, toprak erozyonu vb. nedenlerle yer kabuğunun fotosentez yeteneği giderek azalmıştır. Bunun sonucu atmosferdeki CO₂ konsantrasyonu giderek artmaktadır. Bu artış, CO₂ in sera etkisi ile atmosfer sıcaklığının artması ve bunun sonucu kutuplardaki buzulların erimesi ve denizlerin yükselmesi ile bir doğal felaketin oluşabileceği endişesini ciddi biçimde gündeme getirmektedir. Uyumlu ve dengeli fotosentez/yanma süreçleri ile O₂, CO₂ ve H₂O geri kazanımları ve döngüleri sağlanarak dünyanın doğal dengesi korunur (Şekil 1). Bu dengenin korunmasında tekniğine uygun yakma ve bilinçli enerji kullanımı önemli bir rol oynamaktadır [6].

SO₂ Emisyonunu Azaltma Yöntemleri

Fosil yakıtların yanması sonucu bacalardan atmosfere atılan SO₂ miktarı insan ve çevre sağlığı açısından ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Atmosferdeki SO₂, konsantrasyonuna bağlı olarak insanlarda ciddi rahatsızlıklara hatta toplu ölümlere sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca problemin bir diğer önemli boyutu da, atmosferde bacadan atılan kükürdün yağmurlarla yeryüzüne H₂SO₄ biçiminde geri dönmesi ve çevreye telafisi mümkün olmayan zararlar vermesidir.

Yeryüzünde kükürt oranı düşük, yüksek kaliteli kömür rezervleri oldukça sınırlıdır. Bu bakımdan eldeki düşük kaliteli ve yüksek kükürt içeriğine sahip linyitlerin verimli ve temiz biçimde yakılması önem kazanmaktadır. Genel olarak SO₂ emisyonunu azaltmak için alınan önlemleri üç grup altında toplamak mümkündür. Bunlar;

1. Yanmadan önce uygulanan SO₂ arttırma yöntemleri
2. Yanma sırasında uygulanan SO₂ tutma yöntemleri
3. Yanmadan sonra baca gazında SO₂ tutma yöntemleri

Yakıt iyileştirme yöntemleri olarak da adlandırılan birinci grupta yer alan yöntemlere örnek olarak Fuel-Oil'in sıvı fazdaki hidrodesülfirasyonu ve kömürdeki pritik (inorganik) ve organik kükürdün uzaklaştırılması gösterilebilir. Fuel-Oil'in hidrodesülfirasyonu ile yakıtın içindeki kükürdün % 62'sinin giderilmesi mümkün olabilmektedir [7,8]. Kömür içerisindeki pritik kükürdün giderilmesi ise yıkama, elektromagnetik çöktürme gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler toprak gibi yanıcı olmayan safsızlıkların uzaklaştırılmasını da sağladıklarından kalori/ton başına hesaplanan taşıma maliyetlerini de düşürmektedir. Ancak, bu yöntemler kömür içinde kimyasal bağlarla bağlı bulunan organik kükürdün uzaklaştırılmasında yetersiz kalmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalar kömür içerisinde organik yapıda bulunan kükürdün uzaklaştırılmasının ekonomik olmadığını göstermektedir. Bu nedenle bu yöntemle hava kalitesi standartlarında belirlenen limitleri sağlayacak kömürlerin elde edilmesi oldukça zor görünmektedir. Yakmadan önce SO₂

emisyonunu azaltmak için kullanılan yöntemlerden, linyitten dumansız yakıt elde etmek üzere karbonizasyonu iyi bir alternatif oluşturmaktadır [9].

İkinci grup yöntemler esas olarak kömürün yanması esnasında oluşan SO₂'yi tutmak amacı ile yanma odasına SO₂ tutucu bir katkı maddesinin (adsorbent) ilave edilmesine dayanır. Katkı maddesi olarak kolay ve ucuz biçimde sağlanabilen kireç, kireç taşı ve dolamit tercih edilmektedir. Kireçtaşı veya dolamitin kullanıldığı bu SO₂ tutma uygulamalarında;

- Pulvarize edilmiş kireç/kireçtaşı veya dolamit, kazanın SO₂ tutma yönünden uygun sıcaklık bölgesine kuru biçimde enjekte edilir,
- Kırılmış kireçtaşı veya dolamit adsorbent olarak yanma odasına beslenir.

Bu uygulamalar genelde orta kapasiteli yakma sistemlerinde uygulanmaktadır. Konut sektöründe, bireysel ve apartman ölçeğindeki ısıtma uygulamalarında kullanılan çok küçük kapasiteli soba ve kalorifer kazanlarında, kömüre çeşitli biçimlerde kireç/kireçtaşı ilave edilerek SO₂ tutulması güncel bir konudur.

Bu çalışmada önce, sobalarda kömüre kireç ilavesinin soba yanma ve emisyon davranışına etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında kömüre daha farklı kireç ilave yöntemi (yüzeysel kaplama) denenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yakma sistemlerinin çeşitli yakıt ve işletme koşullarında ısı performans ve emisyon özelliklerinin incelenmesi amacıyla Gazi Üniversitesi Müh.-Mim.Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Isıl Güç Laboratuvarında kazan, soba ve akışkan yatak test merkezi kurulmuştur. Bu çalışmada 10 m² ısıtma yüzeyli, alıılmış yarım silindirik, alev duman borulu bir kazan ve ülkemizde kömür yakmada yaygın olarak kullanılan kovalı bir soba kullanılmıştır.

Ölçme ve Değerlendirme Sistemleri

Yakma sistemlerinin ısı performans ve emisyon özelliklerinin hatasız ve hassas olarak incelenmesi gaz ve toz içerikli baca gazı analizlerinin tekniğine uygun yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Baca gazı emisyon konsantrasyonlarının doğru olarak analizi, gaz örneklerinin standartlarda belirtildiği biçimde alınmasını, hazırlanmasını ve koşullandırılmasını gerektirmektedir. Baca gazı içerisindeki gaz emisyonların, doğru ve hassas olarak analizi, örneklenen gaz kütlesinin baca gazı gerçek özelliklerini göstermesine, kuru ve analiz sisteminin gerektirdiği fiziksel özelliklerde sisteme beslenmesine bağlıdır. Atalet kuvvetleri etkisi altında bulunan toz partikül emisyon ölçümlerinin doğru biçimde yapılabilmesi gaz örneğinin, izokinetik koşullarda, yani örnek gaz hızının baca gazı hızına eşit olacak biçimde emilmesine bağlıdır.

Mobil Emisyon Test Laboratuvarı'nda (M.E.T.L) bulunan ölçme ve veri değerlendirme sistemleri şematik olarak Şekil 2'de verilmiştir. M.E.T.L., örnek gaz alma ve hazırlama sistemi, ölçüm aygıtları, sıfır hava sistemi, kayıt sistemi, basınç ve sıcaklık hatları, veri toplama ve değerlendirme sistemi, merkezi işlem bilgisayarı ve diğer yardımcı teçhizattan oluşmaktadır [10].

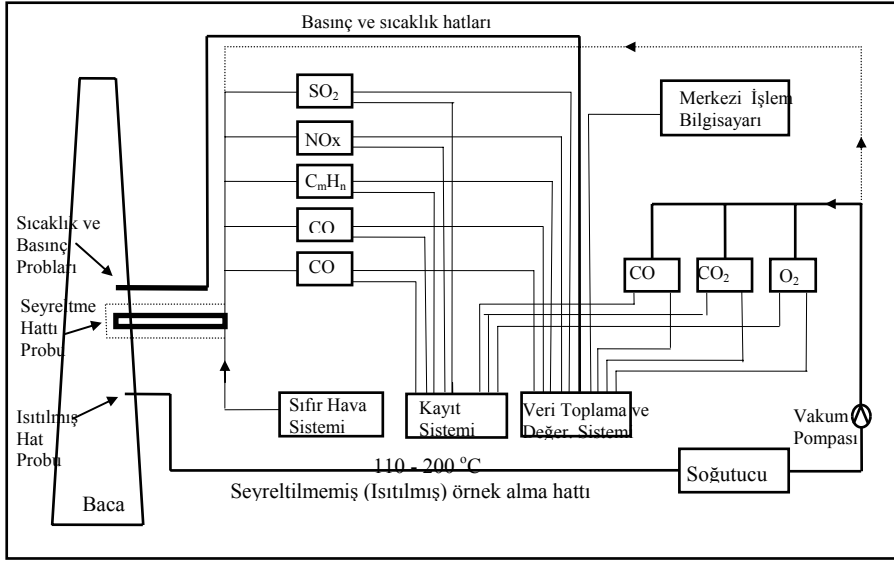
Gaz emisyon ölçümlerinde seyreltilmiş ve seyreltilmemiş olarak iki örnekleme hattı kullanılmıştır. Gaz analizi yapılacak olan numune sürekli olarak aynı anda iki hat ile beraber alınabilmektedir. Örnekleme yapılan gaz konsantrasyonları gaz analiz sistemlerinin ölçme sınırlarının üzerinde olması durumunda seyreltilmiş hat ile gaz örneği aynı anda M.E.T.L.'da hazırlanan temiz hava ile seyreltilerek alınır. Seyreltme uygulanmayan örnek gaz alma işlemlerinde, örnekleme hattında yoğunlaşmanın önlenmesi için ısıtılmış hat kullanılmıştır. Elektrik ile ısıtılan örnek gaz alma hortumlarında, ısıtma sıcaklığı 170-200 °C aralığında ayarlanabilmektedir. Gaz örneğinin içerisindeki nem, bir yoğunlaştırıcıdan alındıktan sonra, kuru olarak gaz analiz cihazlarına beslenmektedir.

Gaz Analiz Sistemleri

Yakma sistemlerinin ısı performans ve emisyon özelliklerinin incelenmesi için, yanma gazlarının içerdiği bazı gaz konsantrasyonlarının analizi gerekmektedir. Bu gazlar ve analiz yöntemleri Tablo 1'de verilmektedir.

Saçınımsız kızılötesi veya morötesi ışınım yöntemleri, analizi yapılan gazın bu ışınları kısmen absorbe ederek, enerji şiddetini azaltması esasına dayanır. Işın enerjisindeki azalma, ölçülen gaz konsantrasyonu için bir ölçüdür. Paramanyetik yöntemde, manyetik alan içinde O₂ moleküllerinin azot ile dolu küreciklere uyguladığı kuvvet sonucu oluşan sapma etkisi, O₂ analizi için kullanılmaktadır. Bu sapma yanma gazlarının içerdiği oksijen konsantrasyonu için bir ölçüdür. Kimyasal ışınım yönteminde NO_x'lerin ozon ile tepkimeye girmesi sonucu oluşan ışımının şiddeti, NO_x konsantrasyonu için bir göstergedir. Alev iyonizasyon yönteminde, hidrokarbonların yakılması ile oluşan alev iyonlarının miktarı, yanma gazlarının içerdiği hidrokarbon konsantrasyonu için bir ölçüdür.

Genel olarak bütün ölçüm sistemleri, belirli zaman aralıklarında doğru ölçüm değerlerinden sapmalar gösterirler. Yapılan deneysel çalışmaların doğruluğu ve güvenilirliği yapılan ölçümlerin hassasiyetine bağlıdır. Bu çalışma süresince yapılan tüm deneylerde kullanılan ölçüm cihazları bilgisayar kontrollü bir kalibrasyon sisteminde sertifikalı kalibrasyon gazları kullanılarak kalibre edilmişlerdir. Isıl performans ve emisyon testlerinde, sıcaklık ölçümleri için ısı çiftler, radyasyon pirometresi gibi ölçüm aletleri ve veri toplama-değerlendirme sistemleri kullanılmıştır. Basınç ölçümlerinde manometreler, emiş ölçerler ve farklı çalışma



Şekil 2. Ölçme ve veri değerlendirme sistemlerinin şematik görünümü.

sınırlarına sahip basınç transduserleri, akış ölçümleri için gazometre, digital anemometre vb. cihazlar kullanılmıştır.

Tablo 1. Baca gazında analiz edilen gazlar ve analiz yöntemleri

Ölçülen Gaz	Kullanılan Analiz Yöntemi
O ₂	Oksijen molekülünün paramanyetik özelliklerinin kullanılması
CO - CO ₂	Saçımsız kızılötesi ışınım yöntemi (NDIR - Non dispersive infrared)
SO ₂	Saçımsız morötesi ışınım yöntemi (NDUV - Non dispersive ultraviolet)
NO - NO ₂ - NO _x	Kimyasal ışınım yöntemi (Chemilumineszens)
C _m H _n	Alev iyonizasyon yöntemi (FID - Flame ionization detector)

Yakıt Analiz Sistemi

Kullanılan yakıt ve curuf analizleri, TS 679, 1042, 1051, 2289, 2390, 2678, 362 standartlarına bağlı kalınarak elementel analiz cihazı, hassas terazi, kurutma fırını, kül yakma fırını ve bomba kalorimetresi gibi cihazlar kullanılarak yapılmıştır. Testlerde kullanılan yakıtlara ait yaş temelde yapılan elementel analiz sonuçları ve ısı değerleri Tablo 2’de verilmektedir.

Soba Deneyleri

Ülkemizde yaygın olarak kullanılan kovalı ve kovalısız sobalar, kömüre kireç karıştırılarak yakılmış, ısı performans ve emisyon davranışına etkileri incelenmiştir. (Deneylerde Hasanoğlan kireçtaşı kullanılmıştır.) Deneylerde en uygun kireç tane büyüklüğü ve Ca/S oranında, değişik kömür ve soba türleriyle testler yapılmıştır.

Tablo 2. Kullanılan kömürlere ait elementel analiz sonuçları ve ısıl değerleri

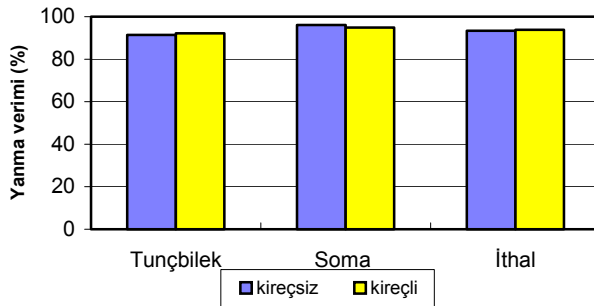
Yakıt Cinsi Yakıt Bileşenleri	Tunçbilek Linyiti	Soma Linyiti	İthal Taşkömürü	Ağaçlı Linyiti
C (%)	54.85	51.12	62.51	60.95
H (%)	4.26	3.89	3.04	4.67
O (%)	10.64	15.47	10.00	6.09
N (%)	1.94	0.61	1.76	1.80
S (%)	1.67	0.87	1.39	2.19
A (%)	19.14	14.36	12.05	11.30
W (%)	7.50	13.68	9.25	13.00
Ho (kcal/kg-yakıt)	5553	4946	5532	5250
Hu (kcal/kg-yakıt)	5278	4655	5312	4929

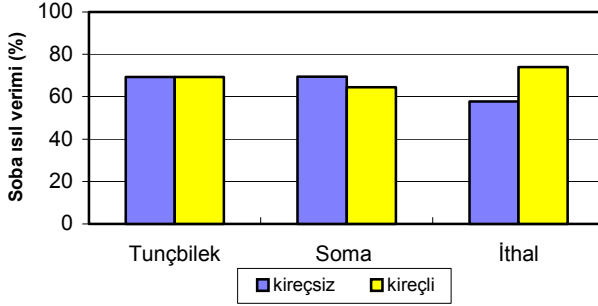
Kireçli ve kireçsiz olarak yapılan bu deneyler verimler ve emisyonlar yönünden karşılaştırılmıştır.

Soba üstten tutuşturularak yakılmış ve tam yükleme şartlarında test edilmiştir. Baca çekişi standartlara [11] uyularak 0,15 mbar civarında tutulmuş, deney süresi boyunca 10'ar dakika ara ile soba ağırlığındaki değişim kaydedilmiş baca gazı emisyonu ve sıcaklıklar M.E.T.L. kullanılarak ölçülmüştür. Uçucu partikül ölçümü, yanma kararlı rejimde iken izokinetik şartlarda yapılmıştır. Kül ve uçucu partiküldeki yanmamış karbon kaybı ise kül yakma fırınlarında yakılarak bulunmuştur.

Kömüre karıştırılan kirecin soba işletme koşullarında en uygun tane büyüklüğünü, belirlemek amacıyla yapılan deneylerde bu değer 1- 3,15 mm arasında olduğu görülmüştür. Bu belirlemeden sonra tane büyüklüğü sabit tutularak yapılan deneylerde Ca/S oranı değiştirilmiştir. Kirecin kükürt tutma kapasitesinin Ca/S=2 olduğunda en yüksek seviyeye ulaştığı görülmüştür. Ayrıca kireç tane büyüklüğü arttıkça kömürün hava geçirgenliğinin de arttığı saptanmıştır.

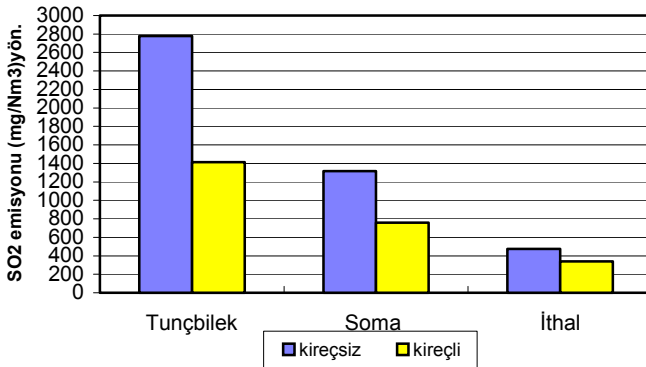
Tunçbilek, Soma ve ithal kömür kullanılarak yapılan deneylerin ısıl performans ve emisyon parametreleri Tablo 3 - 4'de ve kömür türüne göre yanma verimi, soba ısıl verimi ve SO₂ emisyonlarındaki değişimler Şekil 3,4,5'de verilmiştir [12].



Şekil 3. Soba yanma veriminin kireç ilavesi ile değişimi**Şekil 4.** Soba ısı veriminin kireç ilavesi ile değişimi

İthal kömür kullanılması durumunda yanma veriminde bir değişme görülmezken soba ısı veriminde çevre şartlarına bağlı olarak göreceli bir artış dikkati çekmektedir. Bunun nedeni soba ısı veriminin dolaylı yöntemle belirlenmesi sonucu baca sıcaklıklarındaki değişimdir. Sobadan çekilen kullanılabilir enerjinin farklılık göstermesinin nedeni işletme deney günü dış ortam baca gazı duyulur ısı kaybının kirecsiz deneyde yüksek olmasıdır.

Kükürt emisyonu, kireç ilavesiyle her üç yakıtta belli oranlarda azalmıştır (Şekil 5, Tablo 4). Kömür gözenek yapısına ve kükürt içeriğine bağlı olarak SO₂ emisyonundaki azalma miktarları farklı farklı elde edilmiştir. Kömür ve kömürün kovalı sobada yanma özelliklerine bağlı olarak, yanma verimlerinde de farklılıklarla karşılaşmıştır (Tablo 3).

**Şekil 5.** Soba SO₂ emisyonunun kireç ilavesi ile değişimi

Tablo 3. Soba deneyleri ısıl performans parametreleri

Kömür Türü	Yanma Şartları	İşletme Parametreleri			Isıl Performans Parametreleri							
		O ₂	n	T _b	K _{ia}	K _{bg}	K _{co}	K _{ch}	K _{up}	η _y	η _s	Q _s
		%	-	°C	%							
Tunçbilek Linyiti	Kireçsiz	11.80	3.85	275	5.40	22.08	2.65	0.239	0.36	91.35	69.27	7455
	Kireçli	14.28	5.20	219	5.89	22.97	1.24	0.380	0.27	92.22	69.25	5881
Soma Linyiti	Kireçsiz	13.70	2.90	230	1.77	26.64	1.14	0.180	0.85	96.03	69.39	5962
	Kireçli	14.10	5.79	240	4.14	30.38	0.16	0.160	0.66	94.88	64.50	4498
İthal Taşkömürü	Kireçsiz	15.70	4.90	222	3.27	35.64	1.87	0.330	1.10	93.43	57.79	3990
	Kireçli	14.40	4.12	196	3.86	19.83	1.69	0.170	0.51	93.77	73.94	3463

Tablo 4. Soba deneyleri emisyon parametreleri

Kömür Türü	Yanma Şartları	İşletme Parametreleri					Emisyon Parametreleri				
		O ₂	CO ₂	CO	N	T _{bg}	CO	C _m H _n	SO ₂	NO _x	U.P.
		%	%	%	-	°C	mg/Nm ³				
Tunçbilek Linyiti	Kireçsiz	11.80	7.90	0.272	3.85	275	10703	56.3	2779	305	89
	Kireçli	14.28	5.70	0.093	5.20	219	5097	185.5	1414	550	60
Soma Linyiti	Kireçsiz	13.70	5.50	0.120	2.90	230	2876	58.7	1317	249	317
	Kireçli	14.10	5.79	0.080	5.79	240	5990	66.9	757	277	119
İthal Taşkömürü	Kireçsiz	15.70	4.20	0.118	4.90	222	6850	29.4	475	320	244
	Kireçli	14.40	5.40	0.184	4.12	196	4178	65.0	341	357	128

Kazan Deneyleri

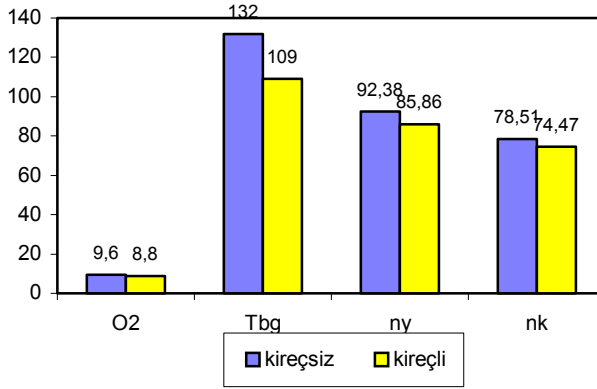
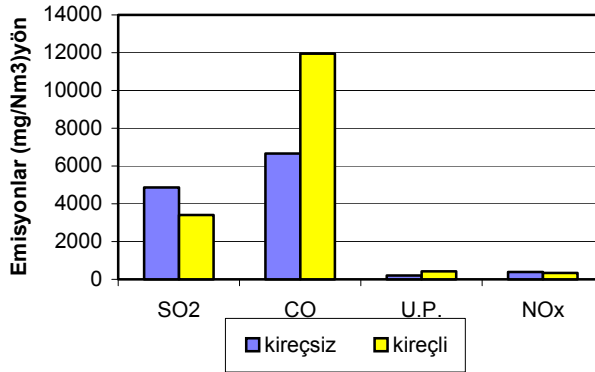
Alışılmış, sabit ızgaralı, 10 m² ısıtma yüzeyli, yarım silindirik, alev duman borulu bir kazanda Ağaçalı bölgesi kömürü kireç ilavesiz ve kireç ilave edilerek yakılmış, yanma ve emisyon davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Kireç ve melas karışımının kömüre kütleli oranı yaklaşık % 0,5 olup, melas ise kirece göre % 10 –15 civarındadır.

Kömür tane boyutu 30-150 mm dolayında olup, bağlayıcı madde olarak kullanılan melasın yüzeysel tutma etkisi ile kömür yüzeyine kireç emdirilmiştir. Tablo 2’de Ağaçalı kömürüne ait elementer analiz değerleri verilmiştir. Kazan ısıl verimi, kazan ısıl kayıplarının ayrı ayrı belirlenmesi esasına dayanan indirek yöntem [13] uygulanarak bulunmuştur. Kazan ısıl performans ve emisyon test sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. 1,2,3 nolu deneyler kireçsiz orijinal kömürle, 4,5,6 nolu deneyler ise melas ile yüzeysel bağlanmış kireçli kömürle yapılmıştır. Orijinal ve kireçli kömürün deney sonuçları üçlü deney grupları ortalaması olarak da verilmiştir.

Kömüre kireç ilavesi ile SO₂ emisyonunun 4868 mg/Nm³’ten %30 azalarak 3410 mg/Nm³’e azalmasına karşın yanma verimi ve kazan ısıl verimi azalmıştır. Partikül emisyonu 202 mg/Nm³’ten 423 mg/Nm³’e, CO emisyonu ise 6656 mg/Nm³’ten 11954 mg/Nm³’e yükselmiştir. Bu sonuçlar grafiklerle Şekil 6,7’de verilmiştir [10].

Tablo 5. Kazan deneyleri ısıl performans ve emisyon parametreleri

	Isıl Performans Parametreleri								Emisyon Parametreleri			
	O ₂	n	T _{bg}	K _{kk}	K _{bg}	K _v	η _k	η _v	SO ₂	CO	U.P	NO _x
Deneyler	%	-	°C	%	%	%	%	%	mg/Nm ³			
D1	9.2	1.9	150	3.51	11.98	6.67	77.84	93.33	4463	4287	298	384
D2	10.0	2.0	136	3.51	10.81	6.03	79.65	93.97	4674	4840	228	435
D3	9.6	2.0	109	3.51	8.29	10.16	78.04	89.84	5466	10842	81	370
Ortalama	9.6	2.0	132	3.51	10.36	7.62	78.51	92.38	4868	6656	202	396
D4	11.3	2.5	99	3.51	9.13	16.89	70.47	83.11	3304	15428	712	516
D5	7.8	1.7	117	3.51	7.74	12.30	76.45	87.70	3686	8836	174	355
D6	7.3	1.6	110	3.51	6.77	13.22	76.50	86.78	3240	11597	382	164
Ortalama	8.8	1.9	109	3.51	7.88	14.14	74.47	85.86	3410	11954	423	345

**Şekil 6.** Kazan ısıl performans parametrelerinin kireç ilavesi ile değişimi**Şekil 7.** Kazan emisyon parametrelerinin kireç ilavesi ile değişimi

3. SONUÇ

Ülkemizde bireysel evsel ısıtmada yaygın olarak kullanılan sobalarda ve merkezi ısıtmada kullanılan kömürlü tipik bir kalorifer kazanında Tunçbilek, Soma ve Ağaçlı bölgeleri linyitleri ile ithal taşkömürü kullanılarak yakma sistemlerinden kaynaklanan SO₂ emisyon seviyeleri belirlenmiş ve bu emisyonun azaltılması için uygulamada kullanılan kireç, kireç-melas karışımlarının kükürt tutma verimleri ve yakma sistemlerinin yanma verimine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kömür yanmasından kaynaklanan SO₂ emisyonunun azaltılmasında tüm dünyada yaygın olarak kireç ve kireçtaşı adsorbent olarak kullanılmaktadır. Farklı oranlara sahip kireç kömür karışımları soba ve kazanlarda yakılarak deneysel olarak emisyon oluşumuna ve yakma sistemi verimine etkileri incelenmiştir.

Sobada kömüre 1,00 – 3,15 mm boyutunda ve Ca/S oranı 2 olacak miktarda kireç karıştırılmıştır. Kömür olarak Tunçbilek ve Soma linyitleri ile İthal taşkömürü kullanılmıştır. Yanma ve soba verimleri her üç kömür için yaklaşık sabit kalırken SO₂ tutma verimleri sırasıyla Tunçbilek, Soma ve İthal kömür için % 49,1 % 42,5 ve % 28,2 olarak elde edilmiştir. Kömüre, belirtilen boyut ve oranda kireç ilave edilmesi soba yanma veriminde düşüşe neden olmaksızın, linyitlerde yaklaşık % 50 civarında SO₂ tutma sağlanabilmiştir.

Kömüre kireç karıştırarak sobalarda SO₂ emisyonu kontrolü uygulaması pratik bir çözüm olarak görülmektedir. Bu sorun; uygun analizde, biçim ve boyutta, taşınabilir, depolanabilir olarak tanımlanan standart kömür (yakıt) üretilmesi kapsamında ele alınmalıdır. Bu ise, standart özellikte uygun nem, kül, yanıcı uçucu oranındaki kömür öğütülüp, uygun oranlarda öğütülmüş kireç/kireçtaşı ile karıştırılarak ve uygun bir bağlayıcı madde ilave edilerek standart özelliklere sahip briket üretimini çözüm yolu olarak göstermektedir.

Kazan deneylerinde, kömür tane boyutu 30-150 mm olan Ağaçlı bölgesi linyit kömürüne bağlayıcı madde olarak melas kullanılarak kireç emdirilmiş ve yakılmıştır. Bu deneyler sonucunda SO₂ emisyonunda %30'luk bir azalma sağlanırken yanma bozulmuş, CO ve uçucu partikül emisyonlarında artışlar görülmüş ve yanma verimi ortalama %7 civarında, kazan verimi ise %4 civarında azalmıştır.

Bu çalışma sonucunda, evsel ısıtmadan kaynaklanan SO₂ emisyonlarının azaltılmasında kömüre kireç ilavesi ile SO₂ emisyonlarının %50 dolayında azaltılabileceği görülmüştür. Ancak bu tür SO₂ arıtma uygulamaları kazan ve soba işletilmesi yönünden pratik değildir.

SEMBOLLER

A	: Kül, (%)
C	: Karbon, (%)
CO	: Karbonmonoksit, (mg/Nm ³) _{%702}
CO ₂	: Karbondioksit, (%)
C _m H _n	: Toplam metan eşdeğer hidrokarbonlar, (mg/Nm ³) _{%702}
Ca	: Kalsiyum
H	: Hidrojen, (%)
H _o	: Yakıt üst ısı değeri, (kcal/kg)
H _u	: Yakıt alt ısı değeri, (kcal/kg)
K _{ia}	: Izgara altı karbon kaybı, (%)
K _{bg}	: Baca gazı duyulur ısı kaybı, (%)
K _{co}	: Baza gazı karbonmonoksit eksik yanma kaybı, (%)
K _{ch}	: Baza gazı toplam hidrokarbon eksik yanma kaybı, (%)
K _{up}	: Baza gazı uçucu partikül eksik yanma kaybı, (%)
N	: Azot, (%)
NO _x	: Azotoksitler, (mg/Nm ³) _{%702}
O ₂	: Oksijen, (%)
S	: Kükürt, (%)
SO ₂	: Kükürtdioksit, (mg/Nm ³) _{%702}
T _{bg}	: Baca gazı sıcaklığı, (°C)
U.P.	: Uçucu partikül, (mg/Nm ³) _{%702}
W	: Nem, (%)
η _k	: Kazan ısı verimi, (%)
η _s	: Soba ısı verimi, (%)
η _y	: Yanma verimi, (%)

KAYNAKLAR

1. Enerji İstatistikleri, **Türkiye 6. Enerji Kongresi**, Ankara, 1994.
2. Durmaz, A., “Türkiyenin Enerji Altyapısı ve Hava Kirliliği”, **Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu**, Ankara, 1987.
3. T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü, “Hava Kalitesinin Korunması Yönetmeliği”, Ankara, 1986.
4. Durmaz, A., “Sobalarda Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliği ve Azaltılması”, **Soba Sanayi Kongresi Bildirileri**, Eskişehir, 1993.
5. Starkman, E. S., **Combustion Generated Air Pollution**, Plenum Press, New York, 1971.
6. Durmaz, A., “Bölüm 22 Kömürün Yanması”, **Kömür Özellikleri, Teknolojisi ve Çevre İlişkileri**, Edidör Kural O., İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 353-394, 1998.
7. Gregoli, A. A., Hatas, G. R., Pollution Control and Energy Needs, **Adv. in Chem. Ser.**, 127,98, 1973.

8. Gültekingil, M., **Liquid Phase Hydrodesulfurization of Fuel-Oils**, Yüksek Lisans Tezi, O.D.T.Ü., Ankara, 1973.
9. Ar, İ., **Kireçtaşı-SO₂ Reaksiyonunun Kinetiği Çalışmaları ve Baca Gazındaki SO₂'in Tutulması Amacıyla Sobalara Uygulanması**, Doktora Tezi, Gazi Üniv.Fen Bilimleri Enst., Ankara, 1992.
10. Topal, H., **Izgaralı Kazanlarda Yanma Odasındaki Yapısal Değişikliklerin Kazan Isıl Performans ve Emisyon Davranışına Etkisinin İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enst., Ankara, 1992.
11. T.S.E.K., Katı Yakıt Yakan Sobalar, T.S. 4900, 1986.
12. Eroğlu, S., **Kireç Karıştırılmış Kömür Yakılan Sobaların Yanma ve Emisyon Davranışının Deneysel İncelenmesi**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniv.Fen Bilimleri Enst.,Ankara, 1995.
13. T.S.E.K., Kazanlar Anma Isı Gücü ve Verim Deneyleri Esasları, T.S. 4041, 1986.