



bu bir MMO
yayıdır

MMO, bu makaledeki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan ve basım hatalarından sorumlu değildir.

Kömürlü Kalorifer Kazanlarında Tasarım ve İşletme Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi

**YALIM ATALAY
ALİ DURMAZ**

GAZİ ÜNİ.
Müh. Mim. Fak. Mak. Müh. Böl.

KÖMÜRLÜ KALORİFER KAZANLARINDA TASARIM VE İŞLETME PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Yalım ATALAY
Ali DURMAZ

ÖZET*

Isıtmada kullanılan kömürlü kazanlarda yapılan ısı performans ve emisyon testleri, bu kazanların ısı verimlerinin düşük, hava kirlenici emisyonlarının ise çok yüksek olduğunu göstermiştir. Bunun başlıca nedeni kazan tasarımında esas olan yakıtla ilgili tasarım ve işletme verilerinin bilinmemesi, kazan tasarımının ise kabul edilen bazı ortalama özgül ısıtma yüzeyi ısı yükleri uyarınca kabaca yapılmasıdır.

Bu çalışmada, alışılmış kalorifer kazanları, ısıtma için tahsis edilen başlıca kömürler (Tunçbilek Linyiti, Soma Linyiti, İthal Kömür) kullanılarak ısı performans ve emisyon testlerine tabi tutulmuştur. Bu testler sonucu kömür özelliği, kazan yükleme biçimi, kazan yükü vb. koşullara bağlı olarak kazan ısı kayıpları, ısı verimleri, gaz, partikül emisyonlarının yanı sıra, ızgara özgül yakıt yükü, yanma odası hacimsel ve kesitsel ısı yükleri, çeşitli ısıtma yüzeyleri sıcaklık dağılımları, ısı geçişi özellikleri vb. tasarımla ilgili veriler deneysel olarak belirlenmiştir. Daha verimli ve temiz yanma için uygun kazan tasarımına esas olacak yakıtla ilgili işletme ve tasarım verileri elde edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

GİRİŞ

Dünyamızda hızlı nüfus artışı ve tarım toplumundan sanayi toplumuna geçiş, büyük enerji ihtiyacını da beraberinde getirmiştir. Mevcut enerji dönüşüm teknolojilerinin genel olarak fosil yakıtlara bağlı olması çevrenin kirlenmesine dolayısıyla doğal yaşamın ve insan sağlığının tekrar onarılamayacak ölçüde zarar görmesine neden olmaktadır.

Sanayileşmenin ilk başladığı dönemlerde enerji üretimi olayına sadece ekonomik verimlilik yönünden bakılmış olması kirlenme sürecini daha da hızlandırmıştır. Günümüzde çevre kirliliğinin göz ardı edilemeyecek boyutlara ulaşması ve toplumsal bilinçlenme ile beraber, olayın çevresel boyutu da gündeme gelmiş böylece çevre ve içinde yer alan hava kirliliğinin nedenlerinin araştırılması bir zorunluluk haline almıştır. Ülkemizde nüfus artışı ve çarpık kentleşme ile beraber sabit ve hareketli kirlenicilerin hızla artması, bunun yanında çevre ile ilgili yasaların yetersiz kalması hava kirliliğinin etkin bir biçimde kontrolünü zorlaştırmaktadır. Zorunlu olan bu kontrol ancak kirliliği oluşturan faktörlerin kirlilik üzerindeki etkilerinin çok iyi anlaşılması ile mümkündür.

Sabit yakma sistemlerinden çevreye yayılan hava kirlenici emisyonların miktarı, kullanılan yakıt özellikleri ve miktarına, yakma sistemi özelliklerine ve sistem işletme biçimine bağlıdır. Her faktör kendi başına kirlilik düzeyini etkilerken, bütün faktörlerin birbirleri ile olan ilişkileri de kirlilik düzeyinde önemli değişikliklere yol açmaktadır.

* Bu çalışma "NATO İstikrar İçin Bilim Programı" tarafından desteklenmiştir.

İlk olarak yakıt faktörü ele alındığında, konut ısıtılmasında özellikle düşük ve orta gelir düzeyindeki kesimlerde, yaygın olarak ucuz ve kalitesiz linyitlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu linyitlerin ısı değerlerinin düşük ve hava kirletici özelliklerinin yüksek olması şehirlerimizdeki yoğun hava kirliliği olgusunun başlıca nedenini oluşturmaktadır.

Hızlı ve plansız kentleşme nedeni ile Türkiye'de bölgesel ısıtma yaygınlaşmamakta, konut ısıtılmasında daha verimsiz ve kontrolü zor olan küçük kapasiteli bireysel ısıtma sistemleri (sıcak su kazanları, sobalar vb.) kullanılmaktadır. Geçmişte uygulanan enerji politikaları ve birincil enerji kaynağı dengelerine bağlı olarak, kok ve taş kömürü gibi yüksek kaliteli yakıtlar için tasarlanan bu sistemlerde, sistem yapısına uygun olmayan düşük kaliteli linyitlerin yakılmaya çalışılması sistem yanma davranışını olumsuz yönde etkilemektedir (1).

Yakıt ve yakma sistemi arasındaki uyumsuzluk, sistem işletme biçimi ile düzeltilmeye çalışılsa da, işletme ekonomisi ve çevresel etki yönünden gerekli gelişmenin sağlanabilmesi yakıt ve yakma sistemi arasındaki uyuma bağlıdır.

Yukarıda verilen nedenlerden dolayı, şehirlerimizde konut ısıtma sektöründe kullanılan sabit ızgaralı, alev duman borulu sıcak su kazanlarının, sistem yapısına uygun olmayan düşük kaliteli linyitlerle çalışması durumunun incelenmesi ve yakma sistemi tasarım, işletme parametrelerinin bu yakıtların daha temiz ve verimli yakılabilmesi yönünden yakıta uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Yapılan çalışmasının amacı yakıt, yakma sistemi ve işletme şartları arasındaki ısı performans ve emisyon davranışı yönündeki ilişkilerin, sözkonusu linyitler ve mevcut kalorifer kazanları açısından incelenerek tasarım verilerinin ortaya konmasıdır.

Bu amaç doğrultusunda Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Isıl Güç Laboratuvarı'nda kurulu bulunan Kazan Test Merkezi'nde, ülkemizde yaygın biçimde kullanılan türde bir kalorifer kazanı, çeşitli kömürler kullanılarak ısı performans ve emisyon davranışları açısından incelenmiştir.

Kömürlü kazanlarda yanma, ısı performans ve emisyon davranışını etkileyen en etkin kazan bölümü yanma odasıdır. Enerji, işletme ekonomisi ve çevresel etki yönünden en uygun kazan tasarımı ile ilgili, tasarımcı yönünden uygulanabilir basit matematiksel korelasyonların ve modelin bu amaç doğrultusunda bir araç olarak kullanılması önemli bir sorundur. Bu nedenle kazan yanma odası ve konveksiyon yüzeyleri ısı geçişleri, sıfır boyutlu matematiksel model yardımı ile hesaplanarak, sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu tür yaklaşımların ne ölçüde uygulanabilir olduğu incelenmiştir.

1. YANMA VE YAKMA SİSTEMLERİ

1.1. YAKITLAR VE YANMA

Temel bileşenleri karbon (C) olan fosil yakıtlar, karbonun yanında hidrojen (H_2), oksijen (O_2), nem (W), kükürt (S), azot (N) ile yanıcı özelliği olmayan ve yakıt külünü (A) oluşturan çok sayıda mineral içerirler.

Yanma, yakıt içerisindeki yanıcı bileşenlerin oksijenle hızlı kimyasal tepkimeye girmesi sonucu ortaya ısı enerjisinin çıkması olayı olarak ifade edilebilir. Yakıt içerisindeki temel yanıcılar karbon, hidrojen ve hidrokarbon bileşikleridir. Bunun dışında yakıt içerisinde az miktarda bulunan kükürt de oksijenle tepkimeye girer fakat bu reaksiyonla oluşan ısı temel yanıcılardan elde edilen ısıya göre daha azdır.

Yanma gaz fazında gerçekleşmektedir. Bir yakma sisteminde kömürün gaz fazına geçirilerek yakılabilmesi kurutma, uçucuların gazlaştırılması ve kokun gazlaştırılması için gerekli ısının yanma odasına sağlanmasını gerektirir (Şekil 1) ve iç tüketim ısı (Q_{it}) olarak tanımlanır. İç tüketim ısı bir ısı deposundan (alev, kor tabakası, döş tuğlası, akışkanlaştırılmış yatak malzemesi vb.) türbülans yardımıyla oluşturulan uygun bir ısı/kütle aktarım mekanizmasıyla yakıt taneciğine aktarılır.

Yanmanın sürekliliği ve düzgünlüğü açısından; yakıtın gaz fazına geçirilmesi, oksijen ve yanıcı kısmının olabildiğince karıştırılarak molekül düzeyde karışımın oluşturulması, bu karışımın sürekli olarak tutuşma sıcaklığının üzerinde tutulması ve yanma tamamlanıncaya kadar belli bir süre yanma odasında kalmasının sağlanması gerekir. Bu üç süreç (türbülans, sıcaklık, zaman) yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerine, yakma sisteminin yapısına ve benzeri faktörlere bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Yanma odası içerisindeki yakıt taneciği ve oksijen molekülleri arasında yeterli karışımın oluşturulup, yanmanın başlaması ve sürekliliği için gerekli ısı sağlandığı takdirde; kömürün içerdiği nem (W), 105°C civarında buharlaşarak kömür kütlesinin terk eder (kurutma evresi), sıcaklık 400-800°C'a ulaştığında hidrokarbonlardan (C_mH_n) oluşan uçucu yanıcılar da gaz ve buhar (katran) biçiminde kömür kütlesinden ayrılırlar. Geriye sabit karbon (C_f) ve külden (A) oluşan kok kalır. Yanma odası içerisinde kömürün ısı etkisiyle katı ürün (kok) ve uçucu maddelere ayrışması süreci, piroliz olarak tanımlanır. Piroliz, kömürün gaz fazına geçirilmesinin temel aşamasını oluşturmaktadır. Kömürün yanma ve emisyon oluşum modeli Şekil 2 ile gösterilmiştir (2).

1.2. SABİT IZGARA ÜZERİNDE YAKMA SİSTEMLERİ

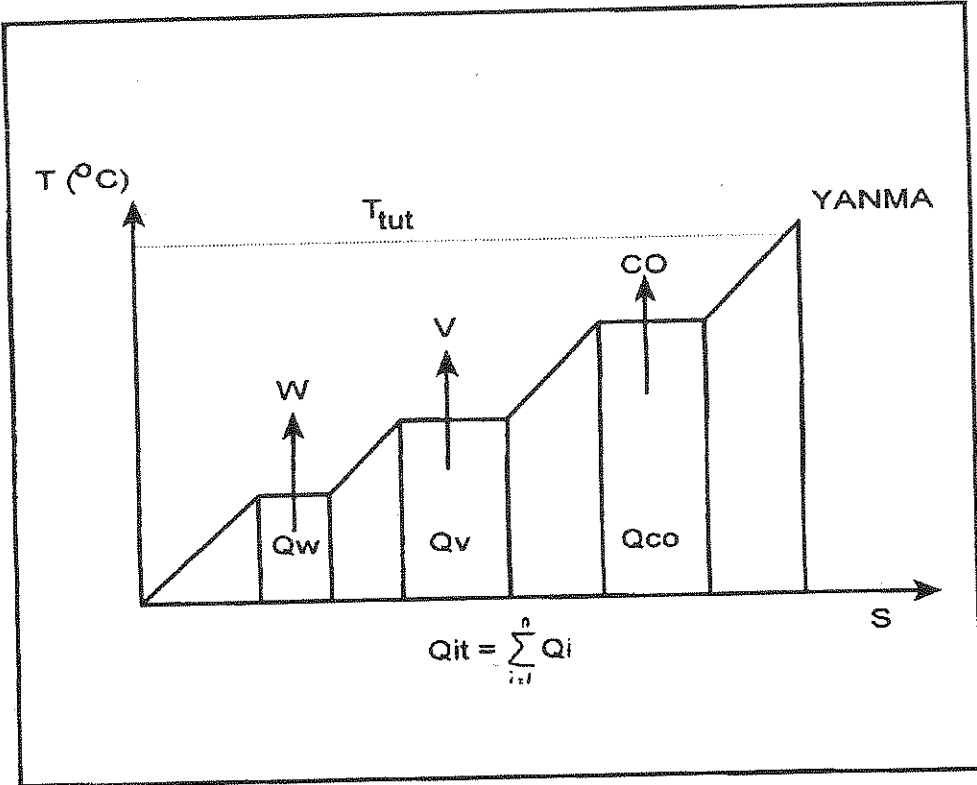
Yakma sistemleri, yanma süreci yardımıyla yakıtlarda depolu bulunan kimyasal enerjiyi yanmanın temel koşulları (türbülans, sıcaklık, zaman) uyarınca ısı enerjisine dönüştüren sistemler olarak tanımlanabilir. Uygulama alanları, işletme biçimleri, ısı kapasiteleri ve kullandıkları yakıtlara göre çeşitli teknolojik biçimlerde tasarlanmakta ve imal edilmektedirler.

İşletme ekonomisi ve çevresel etki yönünden ideal bir yakma sistemi yanmanın üç temel koşulunu öngörülen yakıt türünde ve işletme şartlarında sürekli olarak sağlayabilmelidir. Bu koşulların oluşturulması uygun yanma odası tasarımı ile sağlanır. Yanma odası tasarım sınır şartları; alevin olabildiğince yanma odası hacmini doldurması fakat ısıtma yüzeyleri ile temas etmemesi, yanma odası sıcaklığının sürekli tutuşma sıcaklığının üzerinde, kül ergime sıcaklığının altında olması ve yanmanın en uygun hava fazlalığı ile sağlanması olarak özetlenebilir.

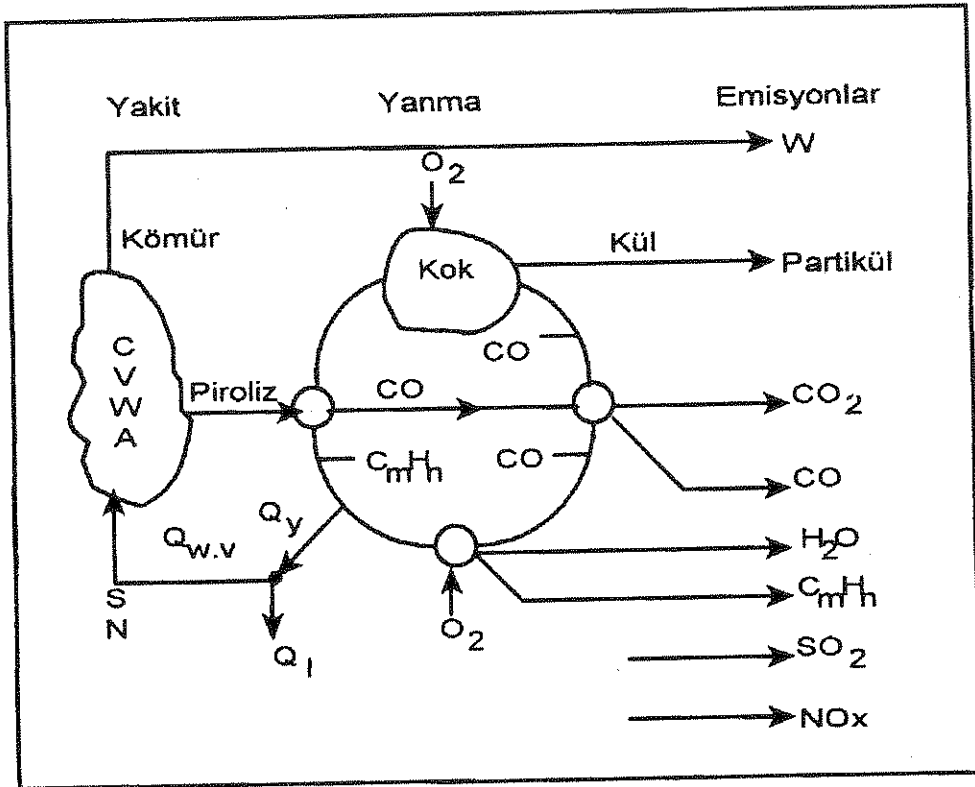
Sabit ızgaralı yakma sistemlerinde, yakıt alttan birincil yakma havası ile beslenen bir ızgara üzerinde yanar. Bu tür yakma sistemleri yapısal olarak sabit karbon (C_f) oranı yüksek, uçucu madde (V) oranı düşük olan yakıtlar (kok, taş kömürü) için uygundur. İşletme ekonomisi ve çevresel etki yönünden uygun bir yanmanın sağlanabilmesi için tasarıma uygun tane büyüklüğüne sahip, taşınabilir, depolanabilir özellikte ilgili yönetmeliklerce kükürt, nem, kül ve yanıcı uçucu oranları yönünden sınırlandırılmış yakıtların kullanılması (kok, briket vb.) gerekir. Izgara üzerinde yakma uygulamasında, bu özellikleri sağlayan iyi kaliteli yakıtlar yerine sabit karbon oranı düşük, yanıcı uçucu, nem, kül ve kirletici emisyon oranları yüksek yakıtların (linyit) kullanılması yakıt ve yakma sistemi arasında uyumsuzluğa neden olmaktadır. Bunun başlıca nedeni sabit karbonun ve yanıcı uçucuların tamamen ayrı yanma özelliklerine sahip olmasıdır. Sabit karbonun ızgara üzerinde yakılması gerekirken gaz biçiminde açığa çıkan yanıcı uçucuların hacimde (yanma odasında) yakılması gerekmektedir.

Uçucu madde oranı yüksek linyitlerin, kokun ızgara üzerinde yakılmasına yönelik olarak tasarlanmış sistemlerde yakılmaya çalışılması, sistem yapısı ve işletme biçimi üzerinde bir takım değişiklikler yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

Sabit ızgaralı kazanlarda yakıt, hareketsiz ve alttan birincil yakma havası beslemeli bir ızgaranın üzerinde yanmaktadır. Bu sistemlerde, yatak yakıt kalınlığına ve elle besleme durumunda ızgara boyuna belli sınırlamalar gelmektedir. Alttan yakma durumunda yakıt ızgara üzerinde yanmakta ve oluşan ısı iletim yoluyla yanma hacmine, oradan da iş akışkanına aktarılmaktadır. Belli bir yatak kalınlığının üzerinde, oluşan ısı yatak ısı iletim direnci nedeniyle yanma hacmine tam olarak aktarılamamakta dolayısıyla ızgara üzerindeki sıcaklık kül ergime sıcaklığının üzerine çıkarak külün ergimesine, ızgara aralıklarının ergiyen cürufu tıkanarak birincil hava girişinin engellenmesine ve yanmanın bozulmasına neden olmaktadır. Izgara yüzey sıcaklığının aşırı arttığı durumlarda ızgara eriyerek tahrip olabilmektedir. Sabit ızgara üzerinde yakmada yakıt yatak kalınlığı (yakıt yükü) doğrudan ızgaranın birincil havayla soğutulmasına ve uygun homojen yakıt tane büyüklüğüne bağlıdır.



Şekil 1. Kömürün gaz fazına geçebilmesi için gerekli süreçler ve ısı ihtiyacı



Şekil 2. Kömür taneciği yanma ve emisyon modeli

Sabit ızgara üzerinde üstten yakma durumunda ise yakıtın ızgaradan başlayarak nemi buharlaşmakta, uçucuları gazlaşarak yanma odası hacmine çıkmakta, bu yanıcı uçucu gazlar yatak üzerinde oluşturulan uygun bir oksijen (ikincil hava) ve alev (ısı) perdesinden geçirilerek tam yanma sağlanmaya çalışılmaktadır. Geriye kalan kok ızgara üzerinde alttan yakma mekanizması ile yanmaya devam etmektedir.

2. KAZAN ISIL PERFORMANS VE EMİSYON PARAMETRELERİ

Kazan açık devre, sürekli akım bir enerji sistemi olup, temel sektörlerin (konut, endüstri, elektrik üretimi vb.) değişken yükteki ısı yüklerini karşılamaktadır. Tasarım, imalat ve işletme aşamalarında alınan gerekli önlemlerle bu sistemlerin her an enerji dengesinin sürekli olarak sağlanması gerekir. Bu aşamalardan kaynaklanan enerji dengesindeki bozulmalar sistem enerji-işletme ekonomisini, emisyon davranışını ve sistem ömrünü olumsuz yönde etkiler. Kazan enerji-işletme ekonomisi, kazan ısı kayıplarının, kazan çevresel etkisi ise kazan emisyonlarının analizi ile incelenebilir. Kazan enerji ekonomisi, çevresel etki ve sistem ömrü yönünden en uygun kazan işletmesinin gerçekleştirilebilmesi için bunlarla ilgili tasarım ve işletme parametrelerinin belirlenmesi ve bunların tüm işletme ömrü boyunca en uygun değerlerde tutulması büyük önem taşımaktadır. Kazan enerji dengesini etkileyen faktörler aşağıda sırası ile verilmiştir.

2.1. Kazan Isıl Kayıpları

Kazan ısı performansını, kazan ısı kayıpları tarafından belirlenmektedir. Küçük kapasiteli, sabit ızgaralı bir kalorifer kazanı için kazan ısı kayıpları, yanma kayıpları ve duyulur ısı kayıpları olarak iki bölümde aşağıdaki şekilde incelenebilir.

2.1.1. Yanma Kayıpları

ızgara altı yanmamış madde kaybı K_{Ia} (%), yakıtın tam yanmadan genelde kok biçiminde ızgara altına düşmesi sonucu oluşur.

Baca gazı yanmamış madde kayıpları (K_{Co} (%), K_{CH4} (%), K_{Up} (%)) yanma odasında eksik yanma sonucu açığa çıkan yanıcı gaz (CO , C_mH_n) ve partiküllerin yakılmadan, baca çekişinin etkisi ile yanma odasını terk etmesiyle oluşurlar.

2.1.2. Duyulur Isı Kayıpları

Kazan kabuğu duyulur ısı kaybı K_{kk} (%), yanma sonucu elde edilen ısının bir bölümünün iş akışkanına aktarılmadan (yararlanılmadan) ışıma ve taşınım yoluyla çevreye atılması ile oluşan kayıptır.

Baca gazı duyulur ısı kaybı K_{bg} (%), yanma sonucu oluşan gazlar ve kazana verilen fazla havanın baca çekişi ile kazandan ayrılırken beraberinde götürdüğü duyulur ısıdan kaynaklanır.

Blöf, iş akışkanı sızıntısı, yük değiştirme vb. kayıplar ile kül ısı kayıpları da bu başlık altında incelenebilir fakat küçük kapasiteli kazanlarda bu kayıplar dikkate alınmayabilir.

2.2. Kazan Isıl Verimi ve Kapasitesi

Kazan ısı verimi, kazan ısıtma yüzeylerinden iş akışkanına verilen toplam ısının, yakıtın yakılması süreci ile elde edilen toplam ısıtma ısısına oranı olarak ifade edilebilir. Yanma η_y (%) ve kazan η_k (%) ısı verimleri, kazan ısı kayıpları üzerinden sırasıyla aşağıdaki ifadelerle hesaplanabilir,

$$\eta_y = K_{Ia} + K_{Co} + K_{CH4} + K_{Up} \quad (1)$$

$$\eta_k = K_{Ia} + K_{Co} + K_{CH4} + K_{Up} + K_{bg} + K_{kk} \quad (2)$$

Kazan ısı kapasitesi Q_k (kcal/h); kazandan iş akışkanına birim zamanda verilen net ısı olarak tanımlanır ve aşağıdaki biçimde hesaplanabilir.

$$Q_k = M_y * H_u * \eta_k \quad (3)$$

2.3. Kazan Emisyonları

Hava kirletici emisyonlar, çeşitli emisyon konsantrasyonları (ppm, mg/Nm³BG, mg/kgY, mg/kWh_t, mg/kWh_{me}, mg/kWh_{elk}, mg/BirimÜrün vb.) biçiminde ve toplam emisyonlar (kg/h, kg/gün, kg/yıl vb.) biçiminde verilebilir. Toplam emisyonlar, baz alınan parametreye bağlı olarak (yakıt, ısı, mekanik enerji, elektrik enerjisi, ürün vb.) bu bazdaki özgül konsantrasyonlar dikkate alınarak hesaplanır. Sabit ızgaralı, yarım silindirik sıcak su kazanlarında kömür yakılması sonucu havaya atılan kirletici emisyonlar gaz emisyonları ve partikül emisyonları olmak üzere iki grupta incelenebilir.

2.3.1. Gaz Emisyonları

Kükürtdioksit (SO₂), yakıta bağlı kirletici olup boyutu yakıtın içerdiği kükürt (S) oranı ve yakıt külünün içerdiği absorptent etkisi olan toprak alkali miktarı tarafından belirlenir. Kükürtün yanması ile önce SO₂ ve daha sonra hava fazlalığına bağlı olarak SO₃ oluşur. Kömürün kül özelliğine bağlı olarak SO₂'nin bir kısmı kül tarafından absorbe edilerek yanma odasında tutulabilmektedir (kül yaklaşık 700-900°C'ta maksimum SO₂ tutma özelliği gösterir) (3,4).

Yanma sonucu ortaya çıkan azotoksit (NO_x) emisyonları, yakma havasının ve yakıtın içerdiği azottan kaynaklanırlar. NO_x oluşumu özellikle 1000 °C civarındaki sıcaklıklarda artış gösterdiğinden etkin bir NO_x kontrolü için alev sıcaklığının kontrolü (düşük NO_x oluşumlu alev) şarttır (1).

CO ve C_mH_n emisyonları Bölüm 2.1. de verilen karbon ve hidrokarbonların eksik yanması sonucu oluşan ve bacadan atılan CO ve C_mH_n den kaynaklanan emisyonlardır. Tam yanma şartlarının (Bölüm 1.1.) sağlanması bu emisyonların azaltılması için etken çözümdür.

2.3.2. Partikül Emisyonları

Partikül emisyonları, yanma odasında tam yanma koşullarının sağlanamaması dolayısıyla oluşan uçucu kok, kurum ve yakıt külünün baca çekişi ile baca gazına karışmasıyla oluşur. Partikül ölçümleri izokinetik koşullarda örnek alma ve gravimetrik yöntemle yapılmalıdır (5,6).

Çevresel etki yönünden yakma sistemlerini incelediğimizde, tam yanmayı sağlayacak bir yakma ve ısı transfer mekanizması, CO, C_mH_n ve partikül emisyonlarını düşürürken, azalan yakıt tüketimiyle sistemin çevreye attığı ve yakıttan kaynaklanan SO₂, NO_x emisyonlarının yıllık toplam miktarlarının da "Hava Kalitesini Kontrol Yönetmeliği"nde belirtilen sınır değerlerin altına düşmesi sağlanır (7).

2.4. Kazan Tasarım Parametreleri

Kazan yapısı, yanma bölümü (radyasyon bölümü) ve ağırlıklı olarak konveksiyon ısı geçişinin olduğu ısıtma yüzeyi bölümü (konveksiyon bölümü) olmak üzere iki bölümde incelenebilir. Enerji ekonomisi ve çevresel etki yönünden uygun kazan işletmesi için bu iki bölge arasında enerji dengesinin oluşturulması ve tüm işletme ömrü boyunca korunması gerekir (8). Kazan boyutlandırılmasının minimum maliyete düşürülmesi, enerji dengesinin radyasyon bölgesine kaydırılmasıyla sağlanmaktadır. Bu ise yanma odası sıcaklığının çok yükselmesi dolayısıyla aşırı NO_x emisyonu oluşumu, kül ergime vb. çevresel ve işletme sorunlarının doğmasına neden olmaktadır. Radyasyon ısı geçişi, partikül (kurum, is, kok) ve üç atomlu yanma gazları (özellikle CO₂, H₂O) yardımıyla oluşmaktadır. Kömürlü kazanlar yanma ürünleri itibarıyla ağırlıklı olarak radyasyon ısı geçişine elverişli kazanlardır.

Konveksiyon ısı yüzeyleri ısı aktarım mekanizmasında en etken faktör baca veya fan çekişi ile oluşturulan gaz hızlarıdır. Bu nedenle çekiş yüzeylerinde yanma gazı hızlarının olabildiğince yüksek (uygun baca ve emiş sistem tasarımı) ve yüzeylerin temiz tutulması gerekmektedir.

2.4.1. Yanma Odası Tasarım Parametreleri

Enerji-ışletme ekonomisi ve çevresel etki yönünden kazan yanma odası tasarım ve boyutlandırılmasında aşağıdaki faktörler göz önünde tutulmalıdır,

- Yakıt ve havanın olabildiğince molekül düzeyde iç içe karışımının sağlanabildiği, oluşan alevin ısıtma yüzeyleri ile temas etmeden yanma odasını olabildiğince doldurabildiği kararlı yanma koşullarının sağlanması.
- Yanma tamamlanana kadar yanıcı karışımın temel yanma koşullarının sağlanacağı özellikte ve boyuttaki bir yanma odasında kalmasının sağlanması.
- Tüm işletme koşullarında yanma odası sıcaklığının tutuşma sıcaklığının üzerinde ve ızgara yüzey sıcaklığı ile yanma odası çıkış sıcaklığının kül ergime sıcaklığının altında tutulmasının sağlanması.

Yukarıda belirtilen yanma koşullarının oluşturulmasını sağlayacak yanma odası biçimlendirme ve boyutlandırma çalışmalarında kullanılan başlıca tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir. Bu parametreler yanma koşulları ve boyutlandırma arasındaki çok karmaşık ilişkileri verdiklerinden teorik olarak belirlenmeleri çok zordur. Bu parametreler genelde amaç doğrultusunda yapılan deneysel çalışmalar yardımıyla belirlenebilir.

Yanma Odası Özgül Hacimsel Isı Yükü:

Kazan yanma odası hacminin belirlenmesinde kullanılan yanma odası özgül hacimsel ısı yükü, q_v (kcal/hm^3), (MW_t/m^3) birim yanma odası hacminde, birim zamanda yanma sonunda açığa çıkan ortalama özgül ısı yükünü tanımlamaktadır ve

$$q_v = Q_y / V_{yo} \quad (4)$$

ifadesi ile hesaplanabilir, burada, Q_y (kcal/h), (MW_t) yanma ısı yükünü belirler ve aşağıdaki biçimde hesaplanır,

$$Q_y = M_y * H_u * \eta_y \quad (5)$$

Bu parametreler yardımıyla yanma odası hacmi V_{yo} (m^3), aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir,

$$V_{yo} = Q_y / q_y \quad (6)$$

Yanma Odası Özgül kesitsel Isı Yükü:

Yanma odası kesit alanı ve ardından yanma odası hacmi üzerinden yanma odası yüksekliğinin belirlenmesinde kullanılan bu tasarım parametresi, yanma odası kesit alanı ortalama ısı akı yükünü tanımlar. Özgül kesitsel ısı yükü q_a (kcal/hm^2),

$$q_a = Q_y / A_{yok} \quad (7)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır, burada, A_{yok} (m^2) yanma odası kesit alanını tanımlamaktadır. q_a (kcal/hm^2) ve q_v (kcal/hm^2) yardımıyla yanma odası kesit alanı A_{yok} (m^2) ve yanma odası yüksekliği h (m) sırasıyla aşağıdaki biçimde hesaplanabilir,

$$A_{yok} = Q_y / q_a \quad (8)$$

$$h = V_{y0} / A_{yok} = q_a / q_v \quad (9)$$

Yanma Odası Soğutma Faktörü:

Yanma sonucu açığa çıkan ısı yükünün ne kadar bir bölümünün yanma odası ısıtma yüzeyleri üzerinden iş akışkanına aktarıldığını tanımlar. Soğutma faktörü CF (*f*), yanma odası ısı geçiş yüzey alanının yanma odası hacmine oranı (A_{y0}/V_{y0}) ve yanma odası incelik biçim faktörü ile orantılıdır. Yanma gazlarının, yanma odasından yanma stabilitesini bozmadan olabildiğince soğutulması, konveksiyon ısıtma yüzeylerine gönderilmesi, kül ergimesinin önlenmesi, aşırı NO_x oluşumunun kontrolü, hasar oluşumunun engellenmesi, konveksiyon ısı geçiş boyutlarının düşürülmesi ve dolayısıyla kazan maliyetinin düşürülebilmesi için önemlidir. Yanma odasında üretilen ve iş akışkanına geçen ısılar cinsinden soğutma faktörü ,

$$CF = Q_{y0} / Q_y \quad (10)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada Q_y (kcal/h) yanma ısı yükünü, Q_{y0} (kcal/h) ise yanma odası ısıtma yüzeylerinden iş akışkanına aktarılan ısıyı tanımlar. Yanma odasında, ısıtma yüzeylerine verilen ısının tamamına yakını radyasyon ısı geçiş mekanizması ile olur. Bu ısı, deneysel olarak veya herhangi bir yanma odası ısı geçiş modeli üzerinden teorik olarak hesaplanabilir.

Izgara Yüzeyi Özgül Yakıt Yükü:

Izgaralı kazanlarda, kazan ısı yükü, izgara yüzeyi ve izgara özgül yakıt yükü tarafından belirlenmektedir. Izgara Yüzeyi özgül yakıt yükü, b_1 (kgY/m²h) izgara birim yüzey alanına, birim zamanda yüklenen yakıt miktarı olarak tanımlanabilir ve

$$b_1 = M_y / A_1 \quad (11)$$

biçiminde ifade edilir. Burada A_1 (m²), kazan izgara alanını tanımlamaktadır. Elle beslemede izgara boyu sınırlanmakta ve kül ergime sıcaklığının aşılması içinde yakıt yatak kalınlığı ve dolayısıyla izgara özgül yakıt yüküne belli sınırlamalar getirmek gerekmektedir. Özgül izgara yakıt yükünün artırılması doğrudan izgaranın birincil hava ile soğutulması, uygun homojen yakıt tane büyüklüğü ve yakıt besleme biçimine bağlıdır. Izgaranın soğutulması ayrıca birincil hava giriş kanallarının aerodinamiğine ve biçim faktörüne de (A/V) bağlıdır. Izgara aralıkları maksimum hava akışını sağlayacak lüle biçiminde oluşturulmalıdır. Yüksek birincil hava hızları yakıt yatağında türbülans ve kül yıkanmasının olumlu etkisinde beraberinde getirmektedir. Izgara biçimlendirmesi ve boyutlandırması, kazan kapasitesi ve yanma kalitesinin artırılmasında en etken faktörlerden biridir.

Izgara Özgül Isı Yükü:

Izgara özgül ısı yükü, izgaralı kazanlarda, birim izgara alanında, birim zamanda yanma ile oluşan ortalama ısı yükünü vermekte ve kazan yanma ısı kapasitesinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Izgara özgül ısı yükü, q_1 (kcal/m²h) ve kazan yanma ısı kapasitesi Q_y (kcal/h) sırasıyla aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$q_1 = b_1 * H_u * \eta_y \quad (12)$$

$$Q_y = A_1 * q_1 \quad (13)$$

Yanma Odası Isıtma Yüzeyleri Ortalama Toplam Isı Geçiş Katsayısı:

Yakıt türü ve uygulama alanına göre yanma odası ısı geçişi yüzeyi ortalama toplam ısı geçiş sayılarının (parametrelerinin) bilinmesi, yanma odasının biçimlendirilmesi ve boyutlandırılması yönünden kazan yapımcılarına büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Yanma odası toplam ısı geçiş katsayısı soğutma faktörü yardımıyla deneysel veya teorik olarak belirlenebilir. Teorik yöntem, kazan türü ve işletme biçimine göre çeşitli kabulleri esas aldığından sonuçlar sistem davranışını tam olarak

veremeyebilir. Bu nedenle deneysel çalışma sonuçları tasarımcı yönünden daha kullanışlıdır. Yanma odası ısıtma yüzeyi ortalama toplam ısı geçiş katsayısı U_{yo} ($\text{kcal}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}$), ($\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{C}$) aşağıdaki biçimde hesaplanabilir,

$$y_o = \frac{Q_{yo}}{\Delta T_m \cdot A_{yo}} \quad (14)$$

2.4.2. Konveksiyon Isıtma Yüzeyleri Tasarım Parametreleri

Yanma odası arkasına yerleştirilen ısı geçiş yüzeyleri, konveksiyon ısı geçişi yüzeyleri olarak tanımlanır. Bu yüzeylerde, yanma gazları, yanma odası çıkış sıcaklığından, düşük sıcaklık korozyonu (H_2SO_4 korozyonu) oluşturmayacak düzeyde bir baca çıkış sıcaklığına kadar soğutulur. Teorik olarak kül ergime sıcaklığı ile yoğuşmanın başladığı çığ noktası sıcaklığına kadar olan bir sıcaklık aralığı söz konusudur. Bu aralık yakıt kükürt oranına bağlı olarak daralır.

Yakıt türü (kömür, fuel-oil, doğalgaz), kazan tipi (alev, alev-duman, su borulu kazanlar), uygulama alanı ve iş akışkanının özelliğine (sıcak su, kızgın su, doymuş buhar, kızgın buhar vb.) göre konveksiyon yüzeyleri ısı geçiş mekanizması ile ilgili tasarım parametreleri belirlenebilir. Bu parametreler bölgesel konveksiyon yüzeyleri toplam ısı geçiş katsayılarıdır. Herhangi bir ısıtma yüzeyi bölümü (paketi) için konveksiyon yüzeyi toplam ısı geçiş katsayısı U_i ($\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{C}$),

$$i = \frac{Q_i}{\Delta T_{mi} \cdot A_i} \quad (15)$$

olarak tanımlanır. İlgili ısıtma yüzeyinden iş akışkanına aktarılan toplam ısı, Q_i (kcal/h), ölçülen baca gazı sıcaklıkları ve özgül ısılarından faydalanarak, aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanabilir,

$$Q_i = V_{bg} \cdot (h_{igir} - h_{içik}) = V_{bg} \cdot (T_{igir} \cdot C_{pg} - T_{içik} \cdot C_{pç}) \quad (16)$$

2.5. Kazan İşletme parametreleri

Tüm işletme ömrü boyunca tasarımda esas alınan yakıt alt ısı değeri (H_U), yakıt tane büyüklüğü (d_m), yakıt besleme biçimi ve hava fazlalık katsayısının (n) tasarımda ön görülen sınırlar içinde tutulması gerekmektedir. Bu parametreler işletme parametreleri olarak tanımlanmaktadır.

3. KAZAN ISIL PERFORMANS, EMİSYON DAVRANIŞI VE TASARIM PARAMETRELERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

İyi kalite yakıtlar için tasarımı yapılan kazanlarda düşük kaliteli yakıtların yakılmaya çalışılması kazan enerji dengesini bozarak, sistem enerji-işletme ekonomisini, emisyon davranışını ve sistem ömrünü olumsuz yönde etkiler. Yakıt özelliklerine göre tam ve temiz yanma koşullarının oluşturulması için, gerekli hesaplamaların yapılarak, uygun tasarım ve işletme şartlarının ortaya çıkartılması gerekir. Özellikle katı yakıtların yanma davranışları ile kazan biçimlendirme ve boyutlandırılması arasındaki çok karmaşık ilişkilerden dolayı, kazan türüne ve işletme biçimine göre bir takım kabullerin esas alınması gerekmekte ve çıkan sonuçlar sistem davranışını tam olarak belirleyememektedir. Bu nedenle amaç fonksiyon doğrultusunda oluşturulacak deney programından elde edilecek deneysel sonuçlar yardımıyla teorik sonuçların desteklenmesi, yeni tasarım ve işletme parametrelerinin gerçek koşullara daha uygun olmasını sağlamaktadır.

3.1. Kazan Isıl Performans ve Emisyon Özelliklerinin İyileştirilmesine Yönelik Araştırma Programı

Bu araştırma programı, düşük kaliteli linyitlerin konut ısıtma sektöründe yaygın olarak kullanılan yarım silindirik, alev duman borulu sıcak su kazanlarında verimli ve temiz yakılabilmesini sağlayacak tasarım ve işletme parametrelerinin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda

ülkemizde yaygın olarak kullanılan türde bir kalorifer kazanı ile üç ayrı cins kömür için 14-21 kg/h aralığında değişen farklı yakıt yüklerinde, enerji dengesi ve emisyon davranışı açısından incelenmiştir (Şekil 3).

Bütün deneylerde, deney sonuçlarını etkileyen değişken sayısını azaltmak amacıyla, Şekil 4 ile gösterilen araştırma programında ayrıntılı olarak incelenmiş işletme şartları sabit tutulmuştur. Araştırmanın gerçekleştirildiği sıcak su kazanı için en uygun işletme şartları aşağıda verilmiştir (9):

Baca çekişi	: 0.07 mbar
Yakıt tane büyüklüğü	: $20 < d_m < 50$ mm
Yakıt besleme periyodu	: 60 dakika
Yakıt besleme biçimi	: yastıklama

Yapılan deneylerde her yakıt türü ve yakıt besleme yükü için,

Baca gazı bileşenleri	: $O_2, CO, CO_2, C_mH_n, SO_2, NO_x$ ve Uçucu partiküller
Kazan sıcaklık dağılımı	: $T_{yo}, T_{ce}, T_{öd}, T_{ad}, T_{bg}$
Kül özellikleri	: Saatte oluşan kül miktarı, kül içerisindeki yanmamış karbon oranı

ölçülerek sonuçlar yanma, ısı performans, emisyon, ısı geçişi ve kazan tasarım parametreleri hesaplamalarında kullanılmıştır.

3.2. Kazan Isıl Performans ve Emisyon Özelliklerinin İncelenmesi ile İlgili Araştırma Altyapısı

Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi bünyesinde bulunan Enerji-Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon (GEÇER) Araştırma Merkezi, NATO, "İstikrar İçin Bilim" programı çerçevesinde desteklenen NATO-TU AIRPOLLUT kodlu araştırma projesi (Ankara'da Hava Kirliliğinin Nedenlerinin Araştırılması ve Azaltılmasına Yönelik Önlemler) bütçesinden sağlanan yurt dışı ve içi mali kaynaklar kullanılarak kurulmuştur.

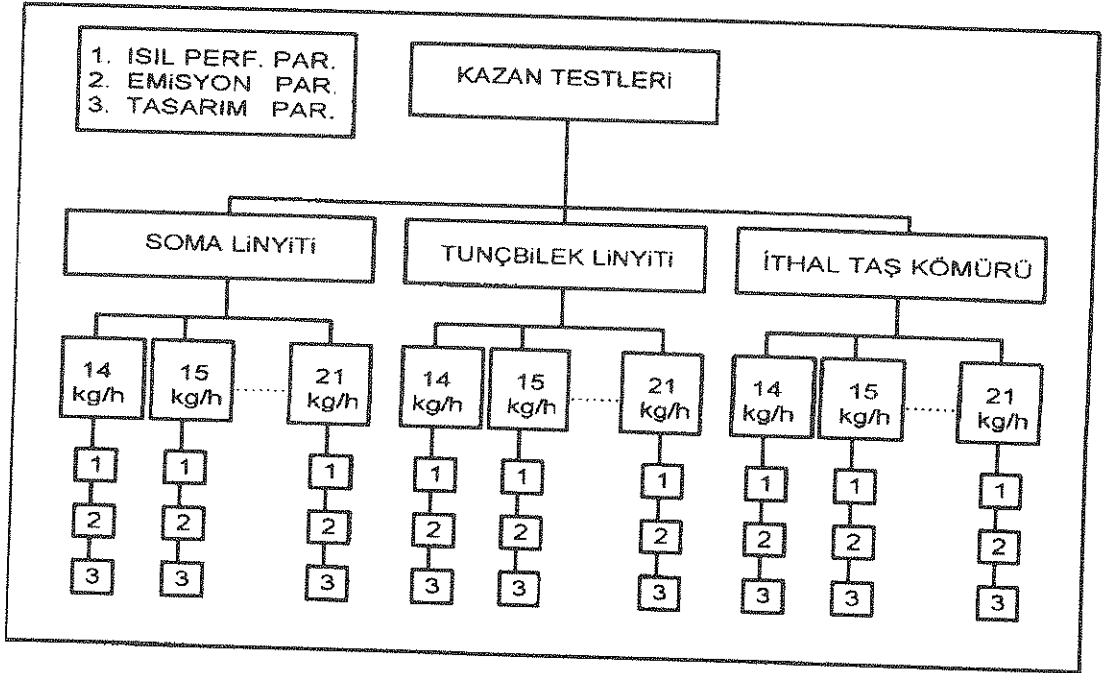
Makina Mühendisliği Isıl Güç Laboratuvarı bünyesinde kurulu bulunan kazan test merkezi, katı, sıvı ve gaz yakıtlarla çalışan, küçük ve orta kapasiteli her türlü kazan ve sobayı Türk Standardları Enstitüsü'nün (TSE) ilgili standardlarına (10,11) uygun olarak verim, kapasite ve emisyon davranışı yönünden test edebilecek biçimde tasarlanmıştır.

Düşük kaliteli linyitlerin verimli ve temiz yakılabilmesine yönelik araştırma programında yapı ve kapasite olarak şehirlerimizde yaygın olarak konut ısıtılmasında kullanılan türde bir kazan seçilmiştir. Yarım silindirik, alev duman borulu, üç çekişli araştırma kazanının özellikleri aşağıda verilmiştir;

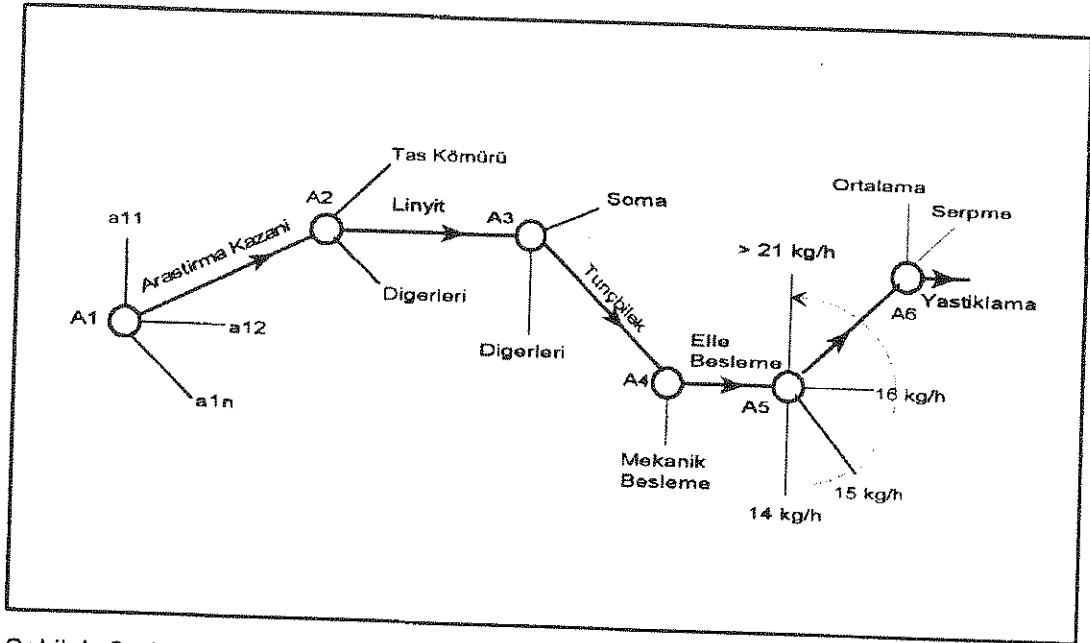
Anma ısı gücü	: 60.000 kJ/h
İşletme basıncı	: 3 kg/cm ²
İzgara boyutları	: $0,63 \times 0,726$ m ²
Ocak boyutları	: $0,84 \times 0,726$ m ²
Yanma Odası su temas alanı	: 1,165 m ²
2. Çekiş toplam su temas alanı	: 3,87m ²
3. Çekiş toplam su temas alanı	: 3,27 m ²

Araştırma kazanı, deneyler sırasında gerekli ölçümlerin alınması için hazırlanmıştır. Araştırma kazanının şematik yapısı ve ölçüm noktaları Şekil 5 ile gösterilmiştir.

Yanma süreci ile kazan ısı performans ve emisyon davranışının tekniğine uygun biçimde incelenebilmesi için, baca gazı bileşenlerinin, sıcaklıklarının, basınçlarının ve akış hızlarının belli noktalarda hassas olarak ölçülmesi gerekir. Kazan test merkezinde bulunan ve yukarıda belirtilen özelliklere sahip olan "Mobil Emisyon Test Laboratuvarı" (M.E.T.L.) ölçme ve veri toplama sisteminin bağlantı şeması Şekil 6 ile verilmiştir. M.E.T.L. sistem yapısı, örnek gaz alma, baca gazı analiz, veri toplama, kalibrasyon, basınç ve sıcaklık ölçüm sistemleri ile bütün analizörlerin ölçüm sonuçlarını toplayan merkezi bilgisayardan oluşmaktadır.



Şekil 3. Kazan ısı performans ve emisyon özelliklerinin incelenmesine yönelik araştırma programı



Şekil 4. Optimum işletme şartlarının bulunmasına yönelik araştırma programı

M.E.T.L. de, bacadan emilen örnek gaz, analizörlerin ölçüm yapabileceği şekilde şartlandırılarak (soğutma, kurutma, filtreleme, gerekirse seyreltme) içerdiği O_2 , CO , CO_2 , SO_2 , NO , NO_2 ve metan eşdeğeri (CH_4) hidrokarbon (C_mH_n) konsantrasyonlarının belirlenmesi için analizörlere dağıtılır. M.E.T.L.'de bulunan gaz analizörlerinin ölçüm yöntemleri ve sınırları Tablo 1. de verilmiştir.

Tablo 1. METL'de Bulunan Gaz Analizörlerinin Ölçüm Yöntemleri ve Ölçüm Sınırları

Ölçüm Gazı	Ölçüm Yöntemi	Ölçüm Sınırları
O_2	O_2 Moleküllerinin Paramanyetik Özelliklerinin Kullanılması	0-100 %
CO	Saçılımsız Kızılötesi Işıma Yöntemi (Non Dispersive infrared)	0-500ppm* , 0-25%***
CO_2	Saçılımsız Kızılötesi Işıma Yöntemi (Non Dispersive infrared)	0-5%* , 0-20%**
SO_2	Saçılımsız Morötesi Işıma Yöntemi(Non Dispersive Ultraviolet)	0-4000 ppm
NO, NO_2	Kimyasal Işıma Yöntemi (Chemilumineszens)	0-5000 ppm
CH_4	Alev iyonizasyonu Dedektörü (Flame Ionization Detector)	0-10000 ppm

* Seyreltilmiş hat, ** Isıtılmış hat

M.E.T.L.'de bulunan ölçüm cihazlarından alınan ölçüm sonuçları, elektrik sinyalleri olarak merkezi bilgisayar sistemine yollanmakta ve burada bir bilgisayar yazılımı yardımıyla değerlendirilmektedir.

Araştırma programında öngörülen çalışmalarda, ülkemizde konut sektöründe yaygın olarak kullanılan toplam üç cins katı yakıt denenmiştir. Deneylerde kullanılan her üç cins kömür, yakılmadan önce kırılmış, yıkanmış ve 20/50 mm lik elekten elenmiştir. Deneylerde kullanılan kömürlerin elemansal analiz sonuçları ve ısı değerleri Tablo 2 ile verilmiştir.

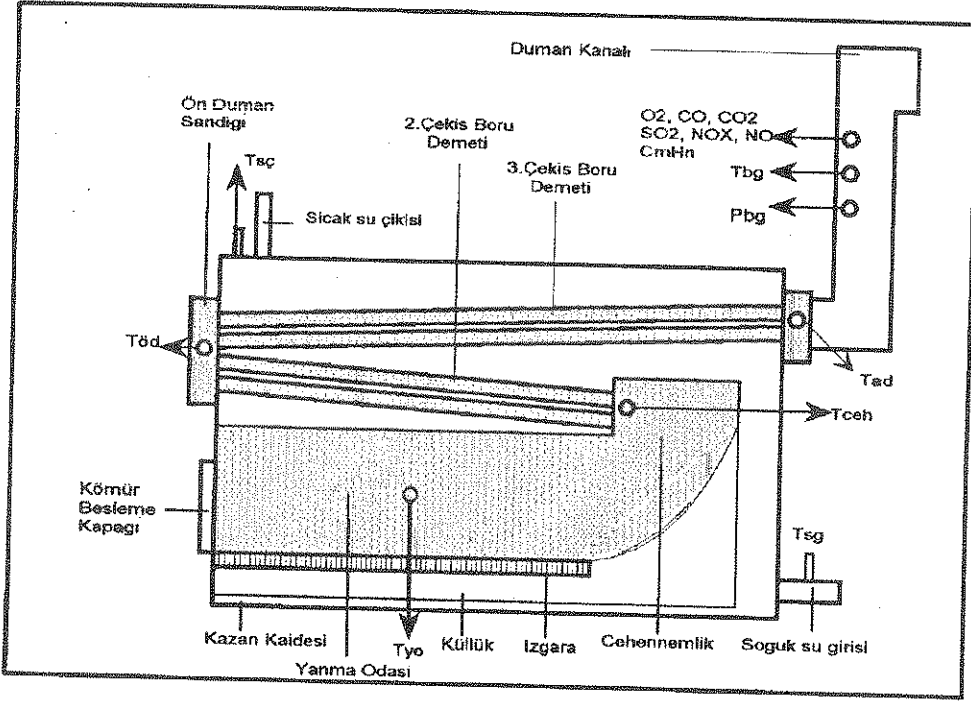
Tablo 2. Deneylerde kullanılan yakıtların elemansal analiz sonuçları ve ısı değerleri

Yakıt Özellikleri Yakıt Türü		C	H ₂	O ₂	N ₂	S	A	W	H _o	H _u
		%	%	%	%	%	%	%	kcal/kg	
Tunçbilek Linyiti	Kuru	64,11	4,97	12,43	2,27	1,95	14,27	0,00		
	Yaş	59,30	4,60	11,50	2,10	1,80	13,20	7,50	5553	5278
Soma Linyiti	Kuru	68,32	5,20	20,93	0,81	1,16	3,58	0,00		
	Yaş	59,10	4,50	18,10	0,70	1,00	3,10	13,5	4946	4655
İthal Kömür	Kuru	68,88	3,35	17,63	1,94	1,53	6,67	0,00		
	Yaş	62,51	3,04	16,00	1,76	1,39	6,05	9,25	5532	5312

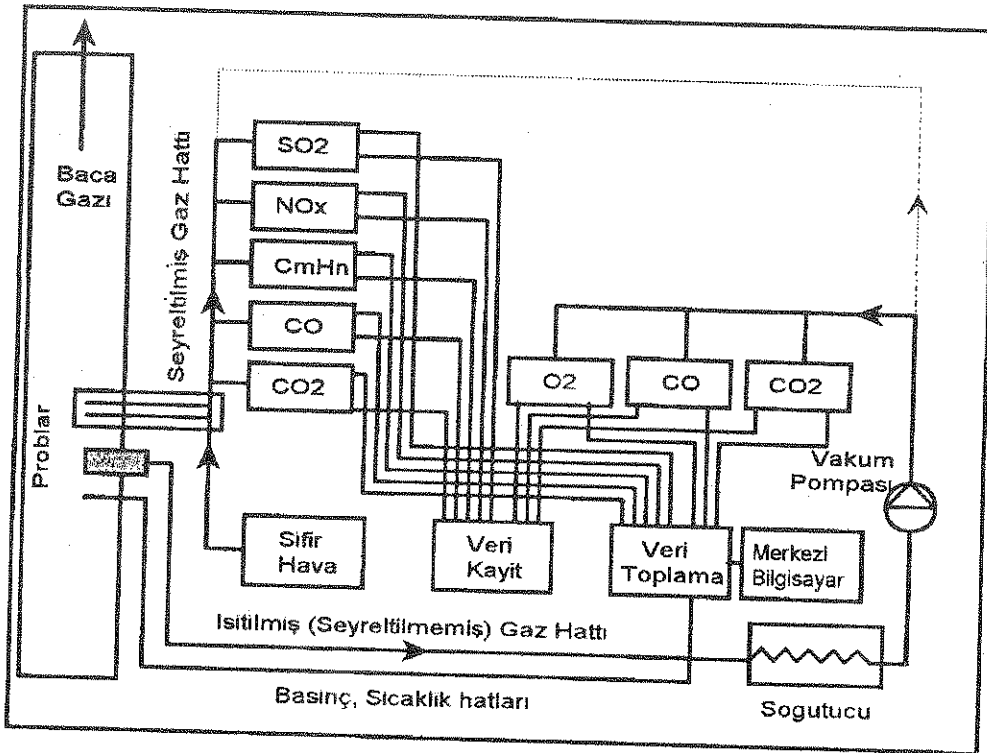
3.3. Kazan Isıl Performans ve Emisyon Deneyleri

Deney koşullarının sağlanması, deneylerin yapılması ve değerlendirilmesi sırasında Türk Standardları Enstitüsü'nün TS4040 ve TS4041 standartlarına bağlı kalmıştır. Ancak TS4041'in hazırlanmasında uçucu ve kül oranı düşük iyi kaliteli kömürler (kok, taş kömürü vb.) göz önüne alındığından baca gazı yanmamış madde kayıplarının hesaplanmasında sadece yanmamış CO kaybı (K_{CO}) hesaba katılmıştır. Araştırma programı dahilinde yapılan bütün deneylerde TS4041'de izlenen yöntem ek olarak uçucu partikül ve hidrokarbon (C_mH_n) ölçümleri yapılmış buradan yanmamış hidrokarbon (K_{CH4}) ve yanmamış uçucu partikül (K_{up}) kayıpları hesaplanarak verim ifadesine dahil edilmiştir.

Test kazanı, her yakıt türü için, 14-21 kg/h yakıt besleme yükü aralığında, 1 kg/h'lik artışlarla ısı performans ve emisyon davranışı yönünden test edilmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 3-5'de verilmiştir.



Şekil 5. Araştırma kazanının şematik görünümü ve ölçüm noktaları



Şekil 6. M.E.T.L. sistem yapısı

3.3.1. Kazan Isıl Performans Davranışı

Test kazanında Soma ve Tunçbilek linyitleri yakılarak yapılan deneylerde kazan üstü (baca gazı) yanmamış madde kayıplarının (K_{CO} , K_{CH_4} , K_{up}), özellikle yüksek yakıt yüklerinde, ithal taş kömürü yakılan deneylere göre oldukça yüksek çıktığı, ithal taş kömürü yakılan deneylerde ise etkin kaybın baca gazı duyulur ısı kaybı (K_{bg}) olduğu saptanmıştır (Şekil 7). Kazan verimi ve ısı kapasitesi, değişen yakıt yüküne göre çok büyük değişiklik göstermemektedir. Bu tür kazanlar yük değişmelerine karşı duyarlı değildir, bununla beraber 21 kg/h'in üstündeki kömür yüklerinde kömür tane büyüklüğü ve besleme biçimine bağlı olarak, kalın kömür tabakası birincil hava girişini engelleyerek yanmayı bozmaktadır. Kırılmış, yıkanmış, elenmiş kömürlerle yapılan testlerde, üç kömür cinsi arasında en yüksek kazan verimine ithal taş kömürü sahiptir (ortalama %77,8) Soma ve Tunçbilek linyitlerinin kazan verimleri sırası ile ortalama %60,5 ve %57,5 tir. Soma ve Tunçbilek linyitleri, kazan anma ısı gücünün (60.000 kcal/h) altında ısı kapasiteye sahipken (Soma için ortalama 50.536 kcal/h, Tunçbilek için ortalama 52.839 kcal/h) ithal taş kömürünün ısı kapasitesi ortalama 72.138 kcal/h'tir (Şekil 8).

3.3.2. Kazan Emisyon Davranışı

Her üç kömür cinsi için, artan yakıt yüklerinde yanmanın bozulmasından dolayı yanmadan kaynaklanan emisyonlar artış göstermiştir. Genel olarak ithal taş kömürü en iyi emisyon davranışını gösterirken, Tunçbilek linyitinde özellikle CO emisyonları çok yüksek değerlere ulaşmıştır (ortalama 38.645 mg/Nm³) (Şekil 9). SO₂ emisyonlarının boyutunu, yakıtın içerdiği kükürt ve kül içerisinde bulunan absorbent etkili toprak alkali miktarı belirlemektedir. Yanma odası sıcaklığının 700-900 °C civarında olması durumunda yakıt külünün SO₂ absorbe etme oranı en üst düzeye çıkmaktadır. NO_x emisyonu yakıtın ve yakma havasının içerdiği azot miktarına ve yanma odası sıcaklığına bağlı olup NO_x oluşumu yaklaşık 1000 °C'in yukarısında aşırı artış göstermektedir. Test kazanında yanma odası sıcaklığı 1000 °C'in çok altında kaldığından NO_x emisyonları çevresel yönden bir sorun oluşturmamaktadırlar (Şekil 10).

3.3.3. Kazan Tasarım Parametreleri

Deney sonuçları incelendiğinde yanma odası sıcaklığının tutuşma sıcaklığının altında kaldığı ve yanmanın tamamlanamadığı görülmektedir (baca gazı analizinde bulunun yüksek yanıcı uçucu konsantrasyonları). Buradan yanma odası boyutlandırılmasının kazan anma ısı gücü ve kullanılan yakıt özelliklerine uygun olmadığı, aşırı boyutlandırma nedeni ile yanma odasının fazla soğutulduğu sonucu çıkartılabilir. Artan ısı yüklerinde yanma odası soğutma faktörünün (CF) düşme eğiliminde olduğu görülmüştür.

Yanma odasından iş akışkanına aktarılan ısı miktarları (Q_{y0}) incelendiğinde, Soma linyiti yakılan deneylerde ortalama 37.183 kcal/h, Tunçbilek linyiti yakılan deneylerde 41.141 kcal/h'lik ısı geçişi gerçekleşirken, aynı deney şartlarında ithal taş kömürü yakılması durumunda, ısı geçişinin yaklaşık %50 artarak 60.000 kcal/h'e ulaştığı görülmektedir (Şekil 11.a). Özgül hacimsel ısı yükü (q_v), özgül kesitsel ısı yükü (q_a) ve özgül izgara ısı yükü (q_i) ortalamaları Soma ve Tunçbilek linyitleri için birbirlerine çok yakın değerler almakla beraber ithal taş kömürü kullanılması durumunda ortalama değerler yakıt alt ısı değeri (H_U) ve yanma verimine (η_y) bağlı olarak %33 dolayında artmaktadır (Şekil 11.b).

Artan yakıt yüklerinde yanma odasından tam olarak iş akışkanına geçemeyen ısı 2. ve 3. çekişlere kaymış ve buradan ağırlıklı olarak konveksiyon ısı geçiş mekanizması ile iş akışkanına verilmiştir. Konveksiyon ısı geçişinde gaz hızları ve sıcaklığı etkili olduğundan yakıt yükü ile beraber artan gaz hızları ve sıcaklığı ısı geçişini olumlu yönde etkilemiştir. Şekil 11.c'de görüldüğü gibi farklı yakıt cinslerinde 2. ve 3. çekişlerden iş akışkanına geçen ortalama ısı yüklerinde yanma odasında olduğu gibi büyük farklar yoktur. Su tarafı ısı geçiş sayısı ve ısıtma yüzeyi (duvar) ısı iletim sayıları sabit kabul edilebileceğinden ısı yükü değişikliğini gaz tarafı ısı geçiş sayısı belirlemektedir. Yapılan deneylerde, üç cins kömür için ortalama gaz sıcaklıkları ve hızlarında büyük farklar görülmemektedir bu nedenle gaz tarafı ısı geçiş sayısının toplam ısı geçiş sayısına sınırlı etkisi toplam ısı geçişlerinin yakın çıkmasını sağlamıştır.

Tablo 4. Araştırma Kazanında Soma Linyiti Yakılarak Edilen Test Sonuçları

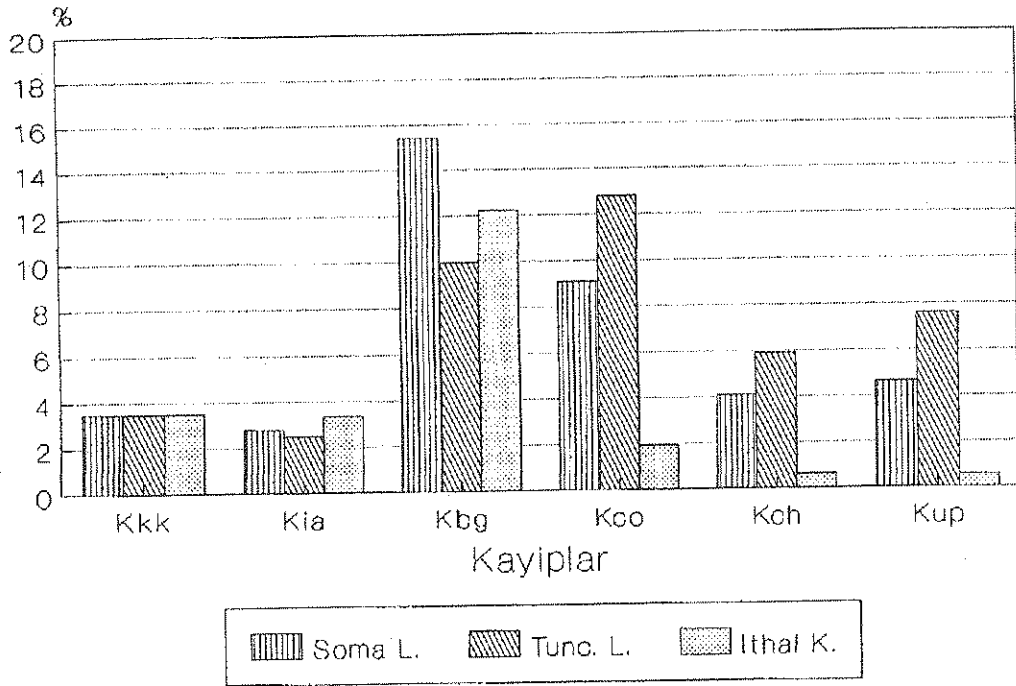
Sistem Dav. Yakıt Yüğü kg/h	İşletme Parametreleri				Sıcaklık Dağılımı				Emisyon Parametreleri					
	O ₂ %	CO ₂ %	CO %	n	T _{yo}	T _{ch}	T _{öd}	T _{ad}	T _{bg}	CO	C _{mH_n}	SO ₂	NO _x	TOZ
15	7.4	10.5	2.46	1.54	602	547	267	209	199	33825	3365	2576	240	2742
16	6.3	11.8	2.20	1.43	662	614	288	215	206	27693	2716	3106	246	1989
17	7.3	10.4	2.02	1.53	655	547	277	217	204	27269	2175	2000	215	1854
18	6.1	11.8	2.55	1.41	653	693	361	257	246	31237	2099	1926	247	1904
19	8.0	10.5	2.31	1.62	644	644	332	236	227	31954	2709	4890	284	3665
20	7.3	11.0	2.50	1.53	667	629	353	265	212	34582	2562	5802	199	5473
21	8.3	10.0	2.08	1.65	626	647	334	251	238	32587	3702	6733	301	3989

Tablo 5. Araştırma Kazanında Tuğçilek Linyiti Yakılarak Edilen Test Sonuçları

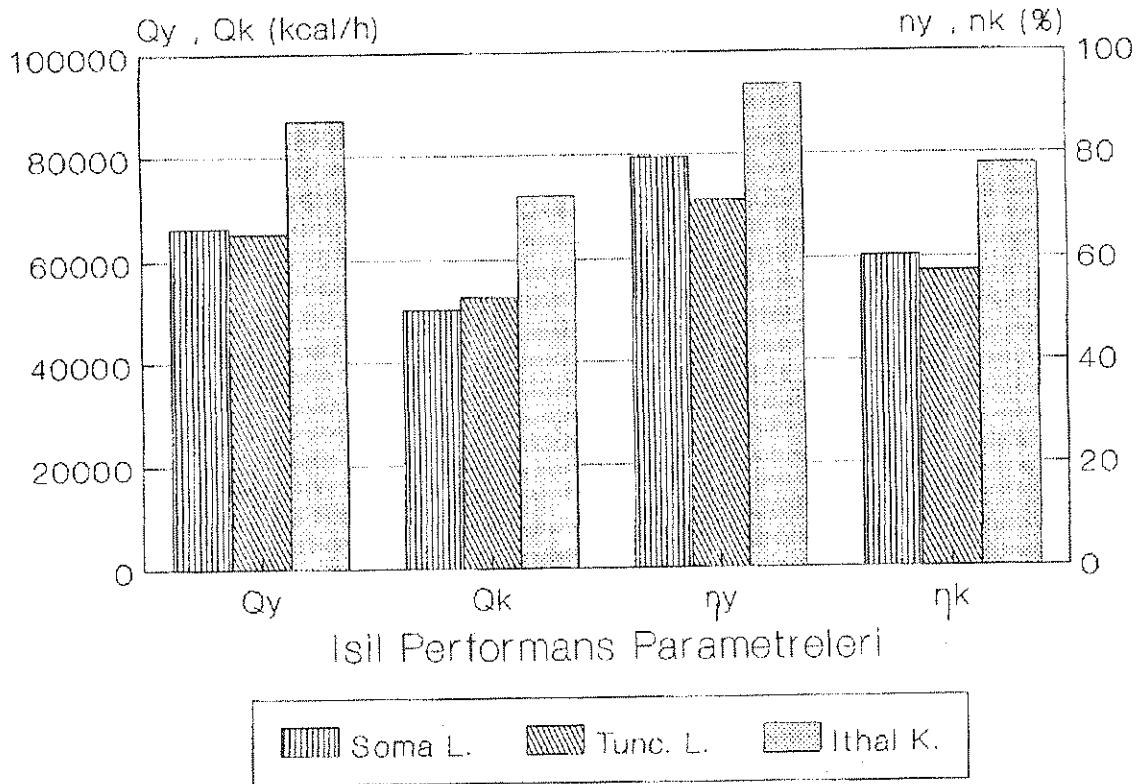
Sistem Dav. Yakıt Yüğü kg/h	İşletme Parametreleri				Sıcaklık Dağılımı				Emisyon Parametreleri					
	O ₂ %	CO ₂ %	CO %	n	T _{yo}	T _{ch}	T _{öd}	T _{ad}	T _{bg}	CO	C _{mH_n}	SO ₂	NO _x	TOZ
14	6.2	11.5	2.07	1.42	570	545	275	225	208	25196	3138	5115	396	4756
15	6.1	11.7	2.15	1.41	579	552	318	234	226	26338	3110	5368	457	6839
16	6.3	11.0	2.22	1.43	595	656	304	179	140	27935	3271	5214	160	4978
17	5.7	10.9	3.35	1.37	574	525	221	126	105	34616	4561	4464	152	6365
18	6.3	10.9	3.51	1.43	652	507	226	157	141	42031	4167	3449	247	6418
19	5.5	11.6	4.48	1.35	695	565	277	193	179	49096	6547	2720	256	6889
20	5.8	10.6	4.04	1.38	647	595	285	220	207	53186	5576	3912	393	4766
21	6.1	10.9	4.15	1.41	644	575	244	198	184	50837	8136	3834	345	10003

Tablo 6. Araştırma Kazanında İthal Taş Kömürü Yakılarak Edilen Test Sonuçları

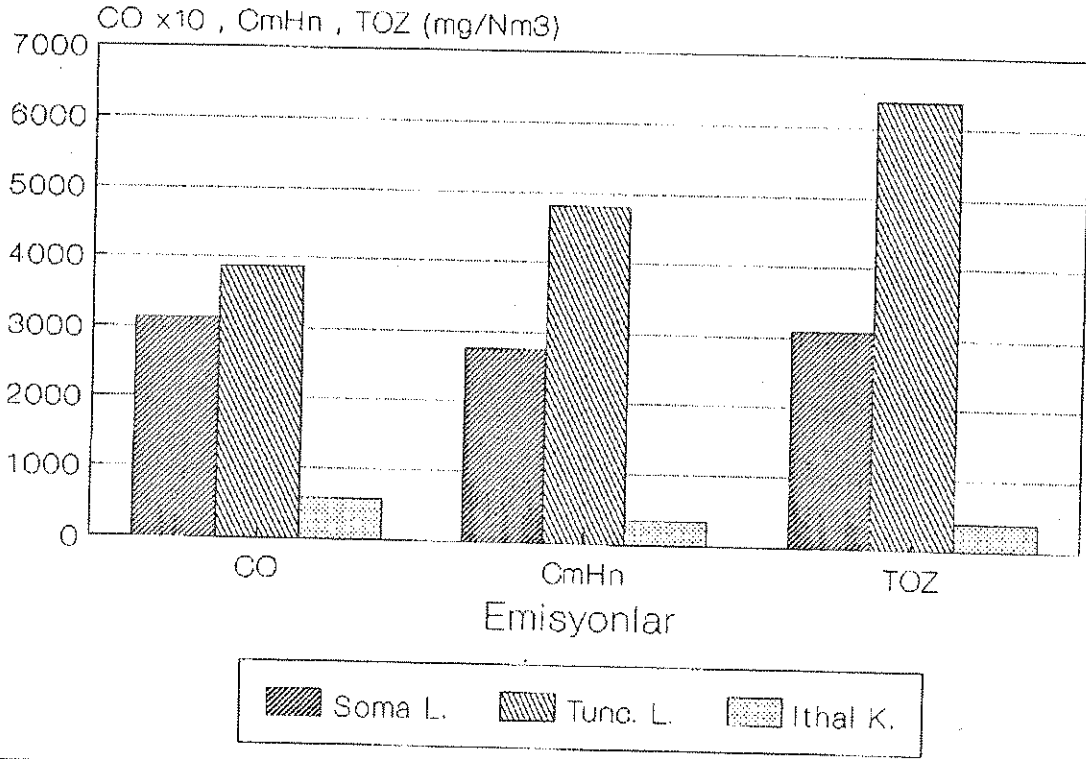
Sistem Dav. Yakıt Yüğü kg/h	İşletme Parametreleri				Sıcaklık Dağılımı				Emisyon Parametreleri					
	O ₂ %	CO ₂ %	CO %	n	T _{yo}	T _{ch}	T _{öd}	T _{ad}	T _{bg}	CO	C _{mH_n}	SO ₂	NO _x	TOZ
14	4.6	12.7	0.18	1.28	612	574	272	186	176	2151	118	809	226	163
15	6.7	10.9	0.24	1.47	675	651	279	192	192	3386	284	2111	284	108
16	5.3	12.4	0.26	1.34	629	638	310	216	203	3252	220	2702	314	211
17	6.0	12.3	0.12	1.40	610	649	314	227	215	1554	80	2909	325	227
18	4.7	13.0	0.55	1.29	633	641	277	201	186	6454	424	2651	326	220
19	7.2	10.8	0.42	1.52	620	585	285	203	192	6125	352	1388	311	168
20	6.8	11.5	1.14	1.48	680	654	338	276	248	15494	854	616	525	724
21	6.9	11.3	0.63	1.49	629	627	311	239	223	8610	532	1375	464	1367



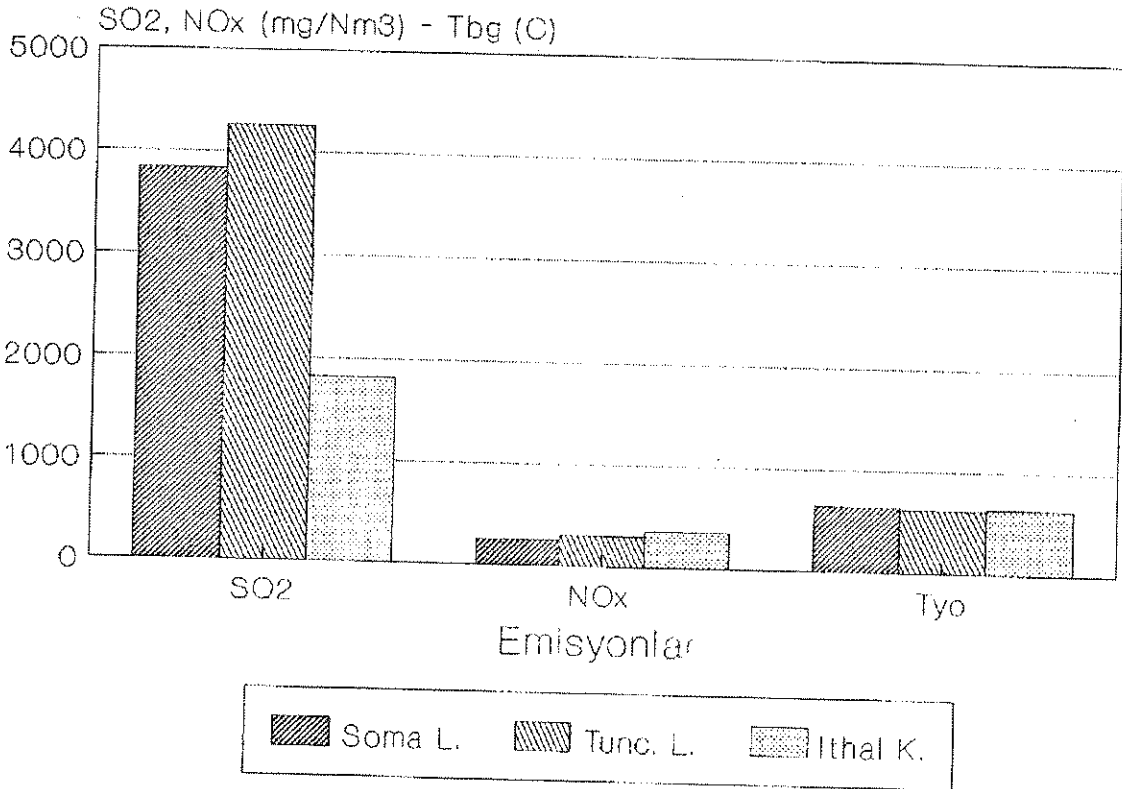
Şekil 7. Ortalama kazan ısı kayıpları



Şekil 8. Ortalama kazan ısı performans parametreleri

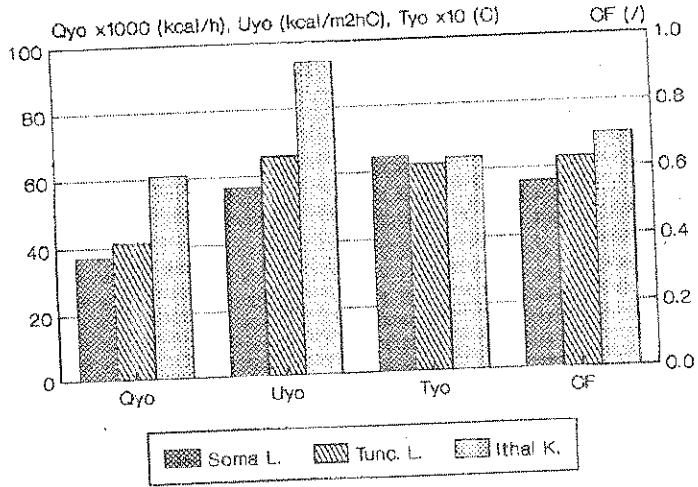


Şekil 9. Ortalama yanmadan kaynaklanan emisyonlar

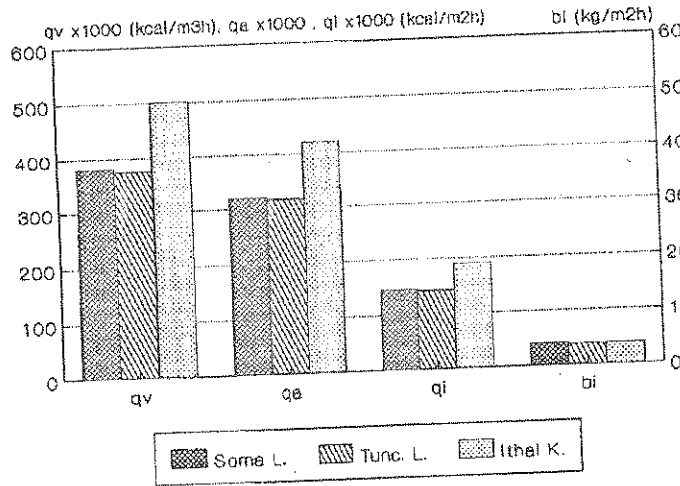


Şekil 10. Ortalama yakıttan kaynaklanan emisyonlar

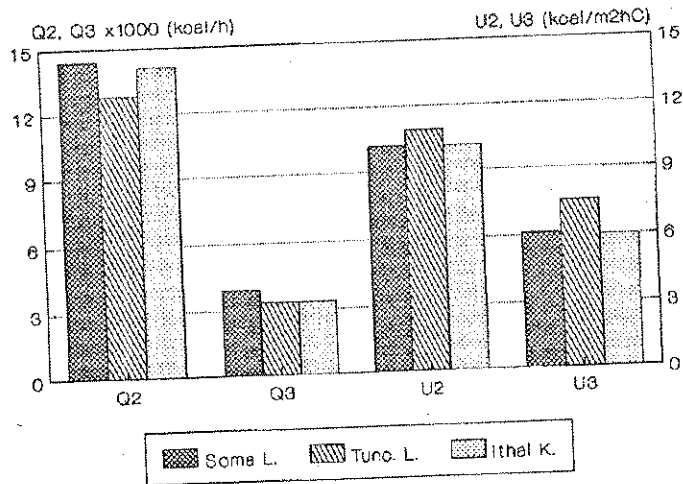
a.



b.



c.



Şekil 11. Ortalama Kazan tasarım parametreleri

4. TEORİK ISI GEÇİŞ HESAPLARI

Deneysel çalışmaların avantajı, amaca uygun oluşturulmuş deney düzeneği ve deney programı yardımıyla gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilebilmesidir. Bununla beraber alınan sonuçların tutarlılığının kontrolü ve farklı boyutlardaki diğer sistemlere taşınabilmesi konuyla ilgili teorik hesapların yapılmasını gerektirmektedir.

Izgara üzerinde yakma ve ısı geçişi ile ilgili pek çok hesap yöntemi önerilmekle beraber sonuçlara etki eden faktör sayısının fazlalığı ile gerçek modelin üç boyutlu ve zamana bağlı olması elde edilen sonuçlar arasında farklılıklara yol açmaktadır. Izgara üzerinde yakma ve ısı geçişinin tasarımcı yönünden hesaplanabilir biçime getirilmesi, bir takım ön kabullerle zamandan bağımsız (sıfır model), basitleştirilmiş modellerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu ısı geçiş hesaplarının çözümü ve kazan tasarımcısı tarafından uygulanabilir hale getirilmesinde doğal yaklaşımdır (12).

Şekil 12'de kazan yanma odası, 2. çekiş ve 3. çekiş ısı geçiş yüzeylerinden iş akışkanına verilen ısı, ısı geçiş mekanizmasına göre sınıflandırılarak verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yanma odasında ağırlıklı olarak radyasyon ısı geçiş mekanizması hakimken (yaklaşık olarak yanma odasından geçen toplam ısının %95'i olarak kabul edilebilir) kazan çıkışına doğru ısı geçişi konveksiyona kaymaktadır. Denenen bütün kömür cinslerinde, 2. ve 3. çekişlerdeki radyasyon/konveksiyon oranının yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmektedir (2. çekiş ~ 30/70 , 3. çekiş ~15/85).

SONUÇ

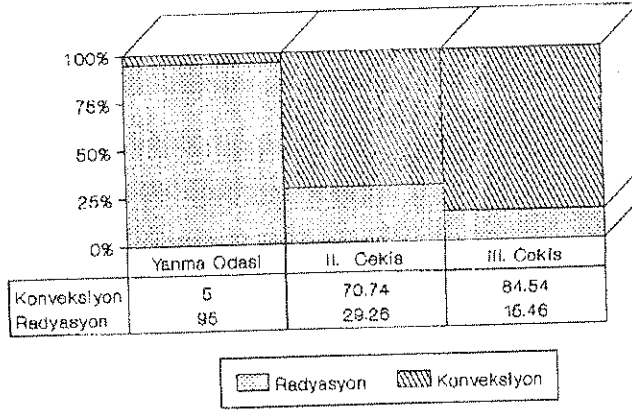
Türkiye'nin enerji altyapısı incelendiğinde konut ısıtma sektöründe, özellikle düşük ve orta gelir düzeyindeki kesimlerde enerji ihtiyacının büyük bölümünün ucuz, hava kirletici özelliği yüksek, ısı değeri düşük linyitlerden karşılandığı görülmektedir. Yapılan çalışma ile konut ısıtılmasında yaygın olarak kullanılan türden yarım silindirik, alev duman borulu, sabit ızgaralı bir sıcak su kazanının düşük kaliteli linyitlerle çalışması durumunda gösterdiği ısı performans (ekonomik boyut) ve emisyon (çevresel boyut) davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Buradan tam ve temiz yanma koşullarının oluşturulmasına yönelik tasarım verileri ortaya konmuştur.

Kazan yanma odasının aşırı boyutlandırılması, yanma odasının fazla soğutulmasına ve sıcaklığın, özellikle yanma odası çıkışında tutuşmanın sağlanamayacağı kadar düşmesine neden olmaktadır. Buna ek olarak yüksek özgül yakıt yükü (q_1) değerlerinde ızgara üzerindeki kalın kömür tabakası birincil hava girişine direnç oluşturduğu için yanmanın üç temel koşulundan ikisi (sıcaklık, karışım) yeterince oluşturulamamakta ve yanma bozulmaktadır. Yanmanın bozulması ile ilgili olarak,

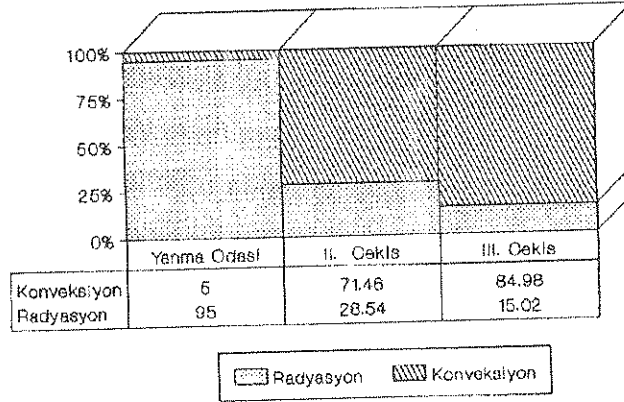
- Özellikle yanıcı uçucu oranı yüksek linyitlerin yakılması durumunda, yanma hacmine çıkan yanıcı uçucular tam olarak yakılamadan yanma odasını terk etmekte ve kazan üstü yanmamış madde kayıpları (K_{CO} , K_{CH_4} , K_{Up}) artarken yanma ve kazan verimleri de (η_y , η_k) düşmektedir.
- CO , C_mH_n ve uçucu partiküllerin tam yakılamadan yanma odasını terk etmesi, baca gazında tam yanma ürünleri (CO_2 , H_2O) yerine eksik yanma ürünlerinin oranının artmasına dolayısıyla CO , C_mH_n ve partikül emisyonlarının artışına neden olmaktadır.
- Kömürlü kazanlar temel olarak yanma odasından radyasyon ısı geçişine göre tasarlanırlar. Radyasyon ısı geçiş mekanizmasında, yanma odası sıcaklığının 4. kuvveti (T_{yo}^4) etkili olduğundan düşük sıcaklıklarda, ısı geçişi konveksiyon ısı geçiş bölgesine kaymakta ve tasarım şartlarının dışına çıkılmaktadır. Bu olay kazan imalat ve işletme maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Linyitlerin yakılması durumunda, yanma odası hacimsel ve kesitsel ısı yükleri (q_v , q_a) düşüktür. Yanma odası boyutları küçülürken, yanma odası hacmi (V_{yo}) ve kesit alanı da (A_{yok}) küçülecek, diğer yandan yükselen yanma odası sıcaklığı ve yanma verimi dolayısıyla yanma ısı yükü

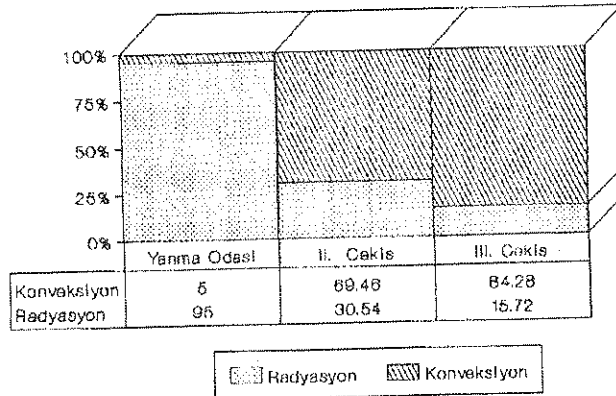
Soma Linyiti



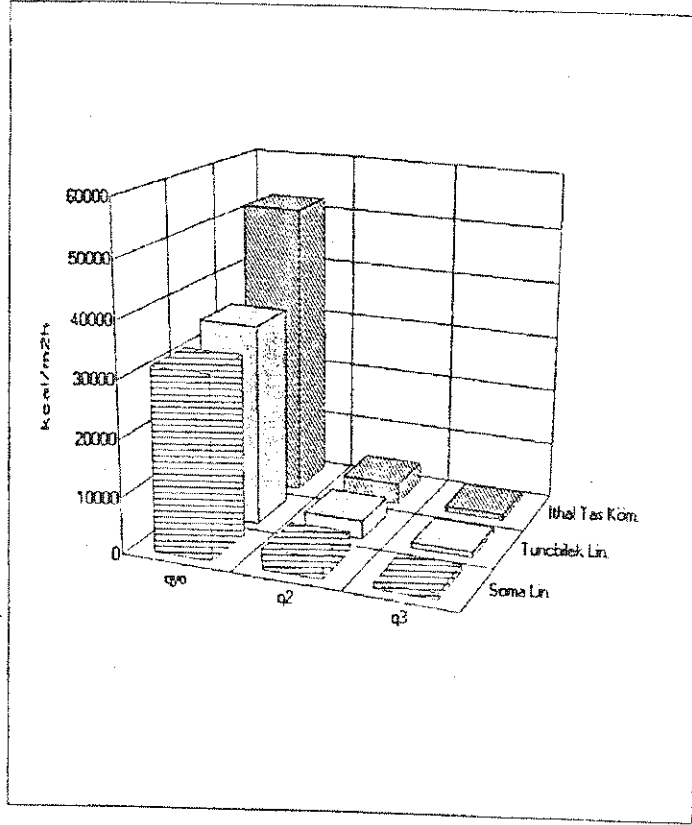
Tunçbilek Linyiti



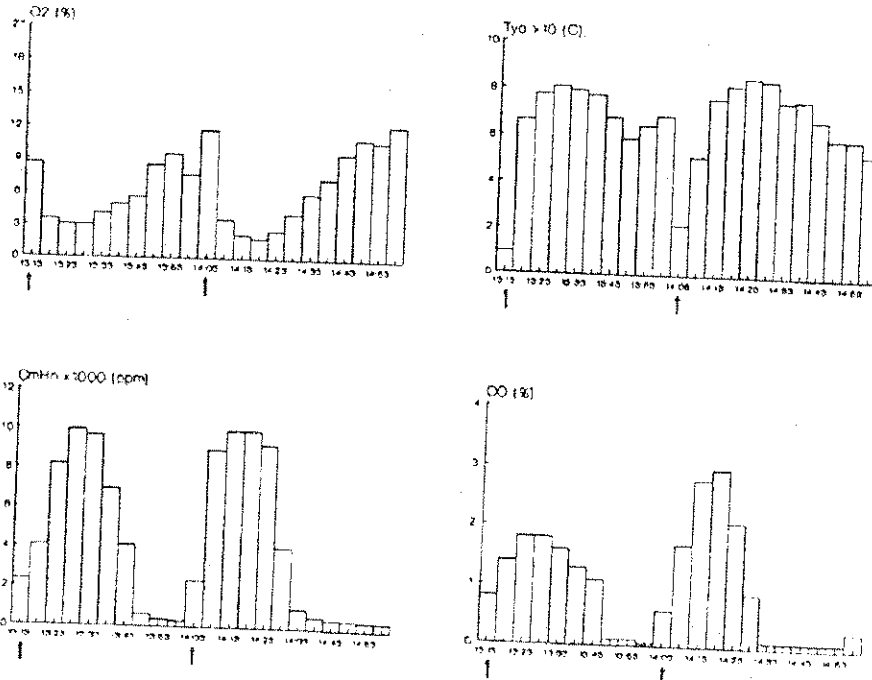
İthal Tas Kömürü



Şekil 12. Kazan ısı geçiş bölgelerinden iş akışkanına radyasyon ve konveksiyonla geçen ısı oranları



Şekil 13. Özgül ısı yüklerinin yakıt cinsi ve ısı geçiş bölgelerine göre değişimi



Şekil 14. 14 kg/h Tunçbtek lineli yakılarak yapılan deneyde O₂H_n ve CO emisyonlarının zamanla değişimi

(Q_v) artacaktır. Böylelikle yanma odası boyutları ile ters, yanma ısı yükü ile doğru orantılı olan q_v ve q_a 'nın küçülen yanma odası boyutları ile artması gerekmektedir. Birim su temas alanından geçen ısı yükü miktarı özgül ısı yükü ($\text{kcal/m}^2\text{h}$) olarak tanımlanırsa, kazan yanma odası, 2. çekiş boru demeti ve 3. çekiş boru demetinde özgül ısı yükleri Şekil 13'deki değerleri almaktadır. Şekil 13'de görüldüğü gibi yanma odasından birim alandan aktarılan ısı yükü 2. ve 3. çekişlere göre çok büyüktür, kazan konveksiyon ısı geçiş bölgesine toplam 7 m^2 nin üzerinde su temas alanına sahip boru demeti yerleştirilirken kazan imalat maliyeti ve dış boyutları da gereksiz yere artmıştır. Bu cins kömürlü kazanlarda imalat maliyetleri açısından, kazan baca çekişi ve baca gazı çıkış sıcaklığı dikkate alınarak (yüksek sıcaklık baca gazı duyulur ısı kaybı artışına ve düşük sıcaklık korozyonuna neden olmayacak şekilde) konveksiyon bölgesi boyutu mümkün olduğu kadar küçültülmelidir.

Şekil 14'de 14 kg/h yakıt yükünde Tunçbilek linyiti yakılarak yapılan bir deneyde, O_2 (%), T_{yo} ($^{\circ}\text{C}$), C_mH_n (ppm) ve CO (%) ölçümlerinin zamana bağlı değişimleri görülmektedir. Saat 13:13 ve 14:03 de kömür yüklemeleri yapılmıştır. Yüklemeler sırasında kazan ön kapağının yüklenme boyunca açık kalması içeri soğuk havanın aniden girmesine neden olmuş ve yanma odası sıcaklığı aşırı düşmüş dolayısıyla yanma bozulmuştur. Yüklemeyi izleyen dakikalarda yanma hacmine çıkan CO ve C_mH_n çok düşük hacim sıcaklığı nedeni ile yakılamadan yanma odasını terk etmiştir.

Yapılan çalışma sonucu, bu cins kazanların, yanıcı uçucu oranı yüksek yakıtlarla çalıştırılması durumunun da, ısı performanslarının çok düşük, kirlitici özelliklerinin ise çok yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Kazan boyutları ve sistem yapısı göz önüne alındığında da, verimli ve temiz yanmayı sağlayacak yapısal değişikliklerin zor ve ekonomik yönden verimli olmadığı görülmektedir. Enerji ekonomisi ve çevresel etki yönünden iyileşmeyi sağlayacak temel parametre yakıttır. Türkiye'de konut ısıtılmasında yaygın olarak kullanılan düşük kaliteli linyitler için yeni yakma sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu sistemlerin tasarımı sırasında göz önünde bulundurulması gereken temel yaklaşım, ızgara soğutması ile ızgara yüzey sıcaklığının, kül ergime sıcaklığının altında tutulması, yanma odası hacminde yanmanın temel koşullarının yanıcı uçucuların yakılabilmesi yönünden olabildiğince uygun hale getirilmesi, yanma odası çıkışında uygun tasarım yaklaşımları ile alev ve oksijen perdesi oluşturularak, geri kalan yanmamış yanıcı uçucuların tam yakılmasının sağlanmasıdır. Buna ek olarak kesintili elle beslemenin yanma koşullarını bozan etkisi, sisteme entegre edilecek bir sürekli yakıt besleme uygulaması ile ortadan kaldırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Durmaz, A., "Türkiye'nin Enerji Alt Yapısı ve Hava Kirliliği", Yanmadan Kaynaklanan Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu, Ankara, (1997)
2. Durmaz, A., "Alışılmış Yakma Sistemleri ve Uygulamaları", 1. Ulusal Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü Sempozyumu, Ankara, (1991)
3. Strehlow, R., Combustion Fundamentals, McGraw Hill, (1985)
4. Keskin, V., Tunçbilek ve Soma Linyitleri Küllerinin Kükürt Tutma Özellikleri, (yüksek Lisans), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1991)
5. Karel, A., Durmuş, M., "Isıtmada Kullanılan Katı Yakıt Kazanlarının Toz Emisyon Özelliklerinin Belirlenmesi", 1. Ulusal Yanma ve Hava Kirliliği Kontrolü Sempozyumu, Ankara, (1991)
6. Sivrioğlu, M., Investigation of the Causes of Air Pollution in Ankara and Measures for its Reduction, Subproject 3, NATO-GÜMMF, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Enerji, Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon Merkezi, (1993)
7. Hava Kalitesini Kontrol Yönetmeliği, T.C. Başbakanlık Çevre Genel Müdürlüğü, Ankara, (1986)
8. Durmaz, A., Investigation of the Causes of Air Pollution in Ankara and Measures for its Reduction, Subproject 1, NATO-GÜMMF, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Enerji, Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon Merkezi, (1993)
9. Başkaya, Ş., Alışılmış Bir Kalorifer Kazanının Tunçbilek Linyiti Kullanılarak Isıl Performans ve Emisyon Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi, (Yüksek Lisans), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1990)
10. Türk Standardları Enstitüsü, Kazanlar-Anma Isıl Gücü ve Verim Deneyleri Esasları, TS4041, Ankara, (1983)

11. Türk Standardları Enstitüsü, Kazanlar-Isı Tekniği ve Ekonomisi Açısından Aranacak Özellikler, TS4040, Ankara, (1983)
12. Atalay, Y., Tasarım Standardlarının Oluşturulmasına Yönelik Olarak Katı Yakıt Yakan Kazaların İncelenmesi, (Yüksek Lisans), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1995)

ÖZGEÇMİŞ

Yalım ATALAY

1969 yılında Ankara'da doğan Yalım ATALAY, 1986 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümüne üçüncülükle girdi. 1990 yılında mezun olarak aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başladı. 1990 yılında aynı bölümde proje mühendisliği görevine başladı. Görevi süresince Türkiye'nin çeşitli yerlerinde konutlardan ve sanayiden havaya atılan kirletici emisyonların ölçümlerinde bulundu. 1991 yılında Makina Mühendisliği Bölümü Enerji ana bilim dalında araştırma görevlisi oldu. NATO ve Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nin ortak yürüttüğü "Ankara'da Hava Kirliliğinin Nedenlerinin Araştırılması ve Azaltılmasına Yönelik Önlemler" isimli projede görev aldı. 1992 ve 1994 yıllarında Makina Mühendisleri Odasının çıkarttığı "Teknik ve Uygulama" dergisinin yayın kurulunda ve çeşitli komisyonlarında görev aldı. Halen araştırma görevlisi olarak, görevine devam etmektedir.

Ali DURMAZ

Prof. Dr. Ali Durmaz, 1944 yılında Denizli'de doğdu. 1402 Sayılı Yasa uyarınca Ankara E.G.O. Genel Müdürlüğü bursiyeri olarak 1970'de Stuttgart Üniversitesi Makina Fakültesinden Yüksek Mühendis, 1974 yılında aynı Üniversitenin Enerji Fakültesinden Doktora derecesini aldı. 1967-1974 yılları arasında aynı Üniversite'de araştırma görevlisi, 1975-1976 da E.G.O.'da proje mühendisi, 1976-1979 da ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümünde Yrd. Doç., 1979-1985 de aynı bölümde Doçent ve ISILMAREN Araştırma Merkezi Direktörlüğü görevinde bulundu. 1985'den beri Prof. olarak Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyesidir. 1985-1992 Makina Mühendisliği Bölüm Başkanlığı, 1992-1993 Rektör Yardımcılığı, 1988'den beri de G.Ü. Enerji-Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon (GEÇER) Araştırma Merkezi Direktörlüğü görevini sürdürmektedir. Prof. Dr. Ali Durmaz, Enerji-Çevre-Endüstriyel Rehabilitasyon konularında yurt içinde ve dışında bir çok araştırma projesinde araştırmacı ve yönetici olarak görev almış, bu konularda laboratuvarlar kurmuştur. Yurt dışında 50 yurt içinde 100'ün üzerinde çeşitli konularda çalışmaları bulunmaktadır.

SEMBOLLER

SEMBOL	ANLAM
A_i	i bölgesinin yüzey alanı, m^2
A_{yo}	Yanma odası su temas alanı, m^2
A_{yok}	Yanma odası kesit alanı, m^2
b_i	Izgara yüzeyi özgül yakıt yükü, kg/hm^2
C	Kömürün içerdiği karbon yüzdesi, %
CF	Yanma odası soğutma faktörü, /
CH_4	Metan
C_mH_n	Hidrokarbonlar
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
C_p	Özgül ısı, $kcal/Nm^{30C}$
d_m	Yakıt tane çapı, m
h	Yanma odası boyu, m
H_o	Yakıtın üst ısı değeri, $kcal/kg$
H_u	Yakıtın alt ısı değeri, $kcal/kg$
K_{bg}	Baca gazı duyulur ısı kaybı, %
K_{CH_4}	Yanmış hidrokarbon kaybı, %
K_{co}	Yanmamış CO kaybı, %
K_{ia}	Izgara altı yanmamış madde kaybı, %
K_{kk}	Kazan kabuğu duyulur ısı kaybı, %
K_{up}	Yanmamış uçucu partikül kaybı, %
M_y	Yakıt yükü, kg/h
n	Hava fazlalık katsayısı,
NO_x	Azotoksitler
Q_2	2.çekişten geçen toplam ısı, $kcal/h, kW$
q_2	2.çekiş özgül ısı yükü, $kcal/hm^2, kW/m^2$
Q_3	3.çekişten geçen toplam ısı, $kcal/h, kW$
q_3	3.çekiş özgül ısı yükü, $kcal/hm^2, kW/m^2$
q_a	Yanma odası özgül kesitsel ısı yükü, $kcal/hm^2, kW/m^2$
q_b	Birim kütle buharlaşma ısı, $kcal/kg$
q_i	Yanma odası özgül ızgara ısı yükü, $kcal/hm^2, kW/m^2$
Q_i	i konveksiyon yüzeyinden iş akışkanına verilen ısı, $kcal/h, kW$
Q_{it}	İç tüketim enerjisi, $kcal/h, kW$
Q_k	Kazan ısı kapasitesi, $kcal/h, kW$
q_v	Yanma odası özgül hacimsel ısı yükü, $kcal/hm^3, kW/m^3$
Q_y	Yanma ısı yükü, $kcal/h, kW$
Q_{yo}	Yanma odasından iş akışkanına verilen ısı, $kcal/h, kW$
q_{yo}	Yanma odası özgül ısı yükü, $kcal/hm^2, kW/m^2$
Q_{yok}	Yanma odasından konveksiyonla geçen ısı, $kcal/h, kW$
Q_{yor}	Yanma odasından radyasyonla geçen ısı, $kcal/h, kW$
SO_2	Kükürtdioksit
T_{ad}	Arka duman sandığı sıcaklığı, $^{\circ}C$
T_{bg}	Baca gazı sıcaklığı, $^{\circ}C$
T_{ceh}	Cehennemlik sıcaklığı, $^{\circ}C$
$T_{öd}$	Ön duman sandığı sıcaklığı, $^{\circ}C$
T_{yo}	Yanma odası sıcaklığı, $^{\circ}C$
U_i	i konveksiyon yüzeyi ort. ısı geçiş katsayısı, $kcal/m^2h^{\circ}C, kW/m^2^{\circ}C$
U_{yo}	Yanma odası ortalama ısı geçiş katsayısı, $kcal/m^2h^{\circ}C, kW/m^2^{\circ}C$
V_{bg}	Baca gazı debisi, Nm^3/h
V_{yo}	Yanma odası hacmi, m^3
η_k	Kazan ısı verimi, %
η_y	Yanma verimi, %
ΔT_m	Ortalama dengelenmiş sıcaklık farkı, $^{\circ}C$