

## Katı yüzey ışınlamı ile gaz yakıtlı ocaklarda ısı geçişinin arttırılması

Süleyman TUCER\*, Kemal ONAT, Erhan BÖKE

İTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34437, Gümüşsuyu, İstanbul

### Özet

Yapılan bu çalışmanın amacı doğal gaz yakıtlı kazanların ocaklarında ısı geçişini arttırmaktır. Gaz yakıtlı ocaklarda ışınlamı arttırmak için ocak içerisine dolgu olarak adlandırılan farklı geometrilere sahip katı yüzeyler yerleştirilerek ısı geçişindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan teorik hesaplamalar neticesinde, gaz yakıtlı ocaklarda ışınlamı artırıcı katı yüzeylerden oluşan dolgu maddeleri kullanıldığı zaman, ısı geçişinin arttığı, farklı dolgu geometrileri için ısı geçiş oranlarının da farklı olduğu görülmüştür. Isı geçişindeki artışa bağlı olarak ocak sıcaklığının düştüğü tespit edilmiştir. Bu teorik hesaplamaları desteklemek amacıyla bir de deneysel çalışma yapılmış, deneyden elde edilen sonuçların teorik hesaplamalarla uyum içinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Katı yüzey ışınlamı, zayıf ışınlı alev, ısıl azot oksit, dolgu.

### Solid surface radiation technique to enhance heat transfer in gas-fired furnaces

#### Abstract

The aim of this study is to increase the heat transfer rate in gas-fired furnaces. Since natural gas combustion flame has low emissivity, heat transfer rate from flame to furnace wall decreases and the result is high flame temperature. In gas fired furnaces heat transfer can be increased by increasing the radiation. To accomplish this, solid surface, which was called as filling material, were placed in the furnace. The filling materials were formed in different shapes. Theoretical results showed that the filling material increased the heat transfer in the furnace. In accordance with the increasing heat transfer, the temperature of the furnace decreased. The ratio of the heat transfer also changed with respect to the shape of the filling material. An experimental work was carried out to compare the results with theoretical calculations. It was seen that the results of the experimental work were supporting the theoretical calculations. The experiments showed also that the filling material decreased the furnace temperature and increased the heat transfer rate from flame to the furnace wall. It was determined that the thermal  $NO_x$  decreased by the decreasing furnace temperature. The filling material can be placed into the present domestic boilers in order to increase the heat transfer and to reduce the emission.

**Keywords:** Filling material, furnace, solid surface, high flame temperature, thermal  $NO_x$ .

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Süleyman TUCER. suleyman.tucer@isisan.com.tr; Tel: (352) 321 13 43.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamlanmış olan "Katı yüzey ışınlamı ile gaz yakıtlı ocaklarda ısı geçişinin artırılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 28.04.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 27.10.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.11.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Yanma işlemi ocak içerisinde gerçekleştiği için ocaklarda yüksek gaz sıcaklıklarına bağlı olarak ısı geçişinde ışınım etkili olmaktadır. Alevden ocağı çevreleyen ıslak yüzeylere ısı enerjisinin %85-90'ı ışınım, geriye kalan kısmı ise yanma gazlarının hızına bağlı olarak taşınım ile aktarılmaktadır. Ocaktaki toplam ısı transferi hesap edilirken, alev ışınımı, gaz ışınımı ve taşınım ile olan ısı geçişini bir arada düşünmek gerekir.

Alev ışınımı olarak is ışınımı, toz kömür ocaklarında ise bunlardan başka kömür taneciklerinin ışınımı bir arada düşünülür. Is ışınımında, yakacağın hidrojeni karbondan önce oksijenle birleştiğinden, açıkta kalan karbon (is) zerrecikleri yanıcaya kadar yanma gazı içerisinde bir süre asılı halde korlaşır. Böylece milyarlarca is zerrisi aynen katı cisim gibi ışınım yapar (Onat vd., 1996).

Gaz molekülünü oluşturan atomlar, serbest elektrik yükü içerdiklerinden, dönme ve titreşim hareketleri yaparak elektromanyetik dalga yayarlar. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> gibi molekülünde çok sayıda atom bulunan gazlar çevrelerine ışınım yayarlar. Buna karşılık aynı cinsten atomlardan oluşan H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> gibi gazlar serbest elektrik yükü içermedikleri için ışınım kabiliyetleri yoktur, yani ne ışınım yayarlar ne de yutarlar. Gazların ışınımı, katılardan farklı olarak, hem belirli dalga boylarında yapılır, hem de ışınım yüzeyde olmayıp hacim içerisinde oluşur. Yanma ürünlerinin büyük bir kısmını CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O oluşturmaktadır. Yanma ürünleri içerisinde bulunan diğer nötr gazlar kısmi basınca olan etkileri dışında sonuçta herhangi bir değişiklik yapmazlar. Gaz ışınımının şiddeti sınır tabaka kalınlığı, gaz kısmi basıncı ve gaz sıcaklığına bağlı olarak değişir (Rohsenow vd., 1998; Modest, 1993; Holman, 1989; Öztürk ve Yavuz, 1985).

Katı ve sıvı yakıtlı ocaklarda tanecik, is ve gaz ışınımı birlikte gerçekleşmektedir. Buna mukabil gaz yakıtlı ocaklarda tanecik ve is ışınımı bulunmadığından, ocak ısıtma yüzeyine sadece gaz ışınımı ile ısı geçişi olmaktadır. Gaz yakıt yakılan ocaklarda ocak sıcaklığı katı ve sıvı ya-

kıtlı ocaklardakine göre daha yüksektir. Ocak sıcaklığındaki bu artış NO<sub>x</sub> oluşumunu hızlandırdığı gibi özellikle ocak yükünün fazla olduğu hallerde ocaklarda malzeme mukavemetini tehlikeli sınırlara doğru zorlayabilmektedir. Bu durum katı ve sıvı yakıt yakılan ocakların doğal gaza dönüştürülmesinde çok defa önemli sayılabilecek sorunlara yol açabilmektedir. Malzeme-yi yüksek sıcaklık tahribatından korumak için refrakter ile örtmek veya daha iyi soğumasını sağlamak gibi bazı önlemlere başvurulsa bile NO<sub>x</sub> oluşumunu ocağı soğutmadan engellemek kolay olmamaktadır (Onat, 1987).

Gaz yakıtlı kazanlarda ocak içerisine bir dolgu maddesi yerleştirmek suretiyle ocak içerisindeki ısı geçişini artırıp, ocak sıcaklığını düşürmek mümkündür. Dolgu maddesi üzerine gelen ışınımı yansıtacağı için ilave bir katı yüzey ışınımı oluşturur. Isı geçişi hesaplamalarında dolgu maddesi izole yüzey gibi düşünülerek hesap yapılabilir. Gaz ışınım yaparak molekül enerji-sinin bir kısmını ışınım yoluyla kendisini çevreleyen yüzeye verirken soğur. Işınımı alan yüzey ise ısınır, üzerine düşen ışınım enerjisini ısı enerjisine çevirir. Boş ocak halinde enerji gaz ışınımı ile ocak duvarlarına aktarılırken, dolgu ocak halinde ocak duvarlarına geçtiği gibi dolgu yüzeylerine de aktarılmaktadır. Böylece dolgu da kendi sıcaklığından dolayı katı yüzey ışınımı yaparak üzerine almış olduğu enerjiyi ocak duvarlarına verir.

Beyaz bir porselen plaka üzerine grafitle bir çizgi çekilecek olursa, plaka soğuk iken çizgi porselenden daha koyu, kızgın iken ise daha açık görünür. Çünkü oda sıcaklığında grafit çizgi hemen hemen bütün ışınları yuttuğundan kara, porselen plaka ise üzerine düşen ışınları yansıtıldığından açık renk tesiri bırakır. Buna karşın plaka kızgın iken grafit daha fazla radyasyon enerjisi gönderdiğinden porselenden daha açık renkte görünür (Eker, 1983). Anlaşıyor ki, ayna gibi yansıtma kabiliyeti fazla olan bir cisim ısıtılınca, üzerine düşen bütün ışınları yutan bir cisimden daha az ışın gönderir. Dolayısıyla kullanılacak dolgu maddesinin mat olmasında fayda vardır, aksi halde hedeflenen sıcaklıklara ulaşmakta yeterince başarılı olunamayacağı gö-

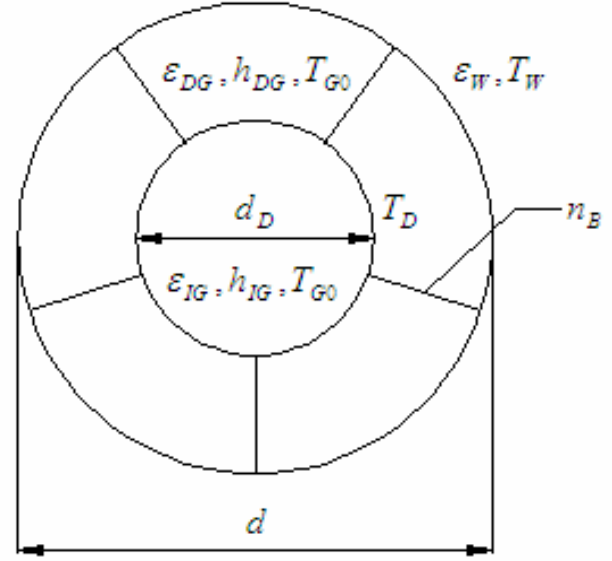
rılmektedir. Ayrıca kullanılacak dolgu maddelerinin seçiminde de yüksek sıcaklığın etkisi göz ardı edilmemelidir. Dolgu yüzey sıcaklığı ocak duvarlarına kıyasla oldukça yüksek sıcaklığa maruz kalır. Ocak duvarları su ile temas halindedir ve metal yüzey sıcaklıkları su sıcaklığından 15 - 20°C daha yüksektir. Dolgu malzemesi ise su ile soğutulmadığı için ya akma mukavemeti yüksek olan metaller ya da yüzeyleri matlaştırılmış yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler tercih edilmelidir.

Dolgu maddesi ile ısı geçişinin artırılması uygulama bulmuş bir yöntemdir. Yarım silindirik katı yakıtlı kazanların cehennemlik kısmına ateş tuğlaları yerleştirilir, böylelikle sıcak duman gazlarının etkisiyle tuğlalar ısınarak ilave bir katı yüzey ışınımı oluşturur. Aynı şekilde doğal gaz yakıtlı döküm kazanlarda ocak içerisine radyasyon çubukları yerleştirilerek NOx oluşumu azaltılmaktadır. Benzer tarzda duman borularına yerleştirilen türbülötörler de taşınım ile ısı geçişini artırırken gazdan aldıkları ısıyı ışınım ile ısıtma yüzeyine iletmektedirler. Ayrıca radyasyon tüpleri olarak bilinen, kazanlarda kullanılan çift cidarlı borular da bu amaçla kullanılmaktadır (Küçükçalı, 1998).

### Dolgulu ocak için model oluşturulması

Modelde,  $d$  çaplı ve  $l$  boyunda bir ocağın içerisine, iki bölümden oluşan ve uzunluğu ocak uzunluğuna eşit olan bir dolgu yerleştirildiği kabul edilmiştir. Konuya ilişkin bir görünüş Şekil 1’de verilmiştir. Birinci bölgeyi boru dolgunun içi, ikinci bölgeyi ise boru dolgunun dışındaki kanat kısmı oluşturmaktadır. Boru dolgunun dışı ile ocak arasını  $n_B$  adet eşit parçaya ayıran kanat kısımları Şekil 1’de gösterilmiştir.

Dolgu çapının ocak çapına oranı  $x_D$  sembolü ile gösterilmiştir.  $\varepsilon_{IG}$ ,  $h_{IG}$ ,  $\varepsilon_{DG}$ ,  $h_{DG}$ ,  $\varepsilon_W$ ,  $T_W$ ,  $T_{G0}$ ,  $T_D$  terimleri sırasıyla boru dolgunun iç kısmındaki gaz ışınım yayma ve taşınım katsayısını, boru dolgunun dış kısmındaki ışınım yayma ve taşınım katsayılarını, ocak duvarının ışınım yayma katsayısını, ocak duvar sıcaklığı ve ortalama ocak gazı sıcaklığını, dolgu sıcaklıklarını temsil etmektedir.



Şekil 1. Dolgulu ocak modeli

Şekil 1’de verilen model için duman gazından ocak ısıtma yüzeyine geçen toplam ısıyı hesaplamak üzere elektrik benzeşim devresi Şekil 2’de verilmiştir. Işınım ve taşınım yolu ile ısı geçişinin bir arada olması durumu için dirençler (1) – (19) eşitlikleri ile verilmiştir.

$$R_W = \frac{1 - \varepsilon_W}{\varepsilon_W A_W} \quad (1)$$

$$R_{DW} = \frac{1}{(1 - \varepsilon_{DG}) A_D \phi_{DW}} \quad (2)$$

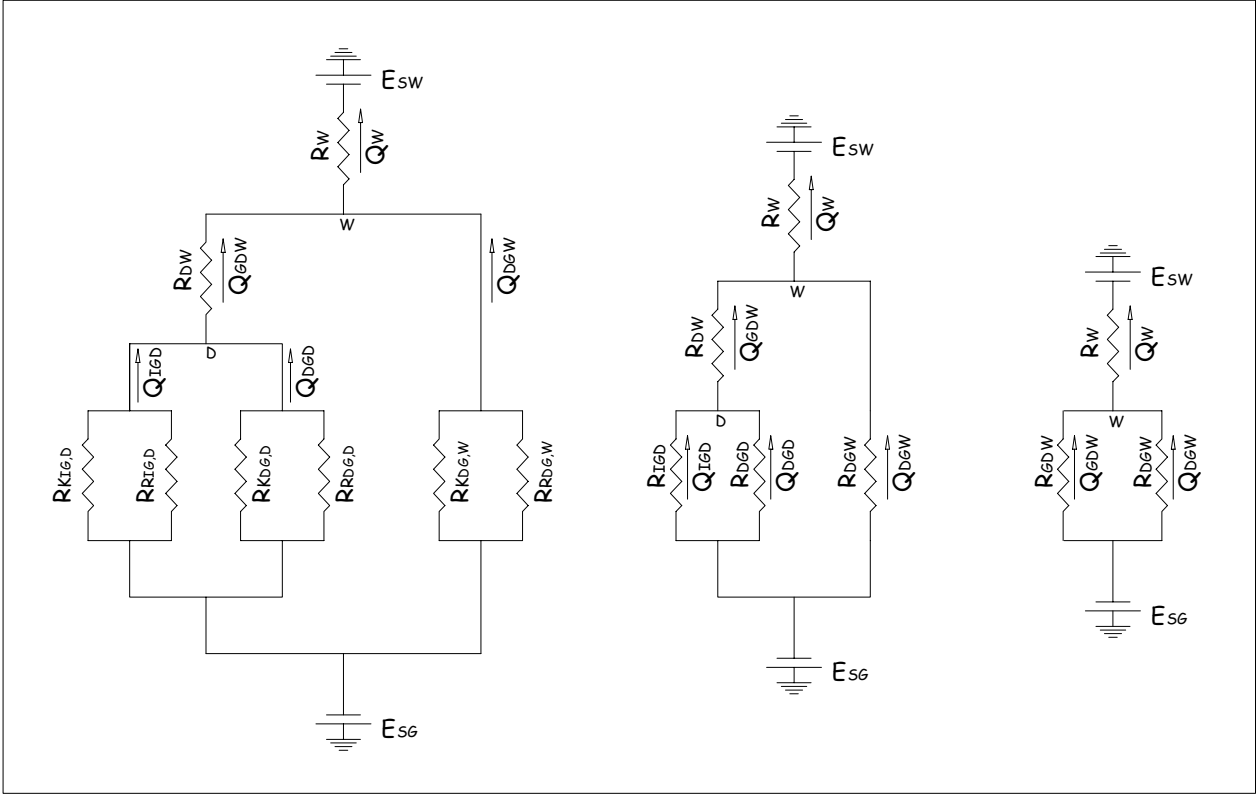
$$R_{KIG,D} = \frac{E_{SG} - E_{SD}}{h_{IG} A_D (T_{G0} - T_D)} \quad (3)$$

$$R_{RIG,D} = \frac{1}{\varepsilon_{IG} A_D} \quad (4)$$

$$R_{IGD} = \frac{R_{RIG,D}}{(1 + C_{KIG,D})} = \frac{1}{(1 + C_{KIG,D}) \varepsilon_{IG} A_D} \quad (5)$$

$$R_{KDG,D} = \frac{E_{SG} - E_{SD}}{h_{DG} A_D (T_{G0} - T_D)} \quad (6)$$

$$R_{RDG,D} = \frac{1}{\varepsilon_{DG} A_D} \quad (7)$$



Şekil 2. Dolgulu ocakta ısı geçişinin elektriksel benzeşim devresi

$$R_{DGD} = \frac{R_{RDG,D}}{(1 + C_{KDG,D})} = \frac{1}{(1 + C_{KDG,D})\epsilon_{DG} A_D} \quad (8)$$

$$R_{DGW} = \frac{R_{RDG,W}}{(1 + C_{KDG,W})} = \frac{1}{(1 + C_{KDG,W})\epsilon_{DG} A_W} \quad (15)$$

$$R_{GD} = \left( \frac{1}{R_{IGD}} - \frac{1}{R_{DGD}} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$R_{GW} = \left( \frac{1}{R_{GDW}} + \frac{1}{R_{DGW}} \right)^{-1} \quad (16)$$

$$R_{DGD} = \frac{R_{RDG,D}}{(1 + C_{KDG,D})} = \frac{1}{(1 + C_{KDG,D})\epsilon_{DG} A_D} \quad (10)$$

(13) ve (15) bağıntıları (16) da yerlerine yazılırsa

$$R_{GDW} = R_{GD} + R_{DW} \quad (11)$$

$$R_{GW} = \frac{1}{(uA_D + [1 + C_{KDG,W}]\epsilon_{DG} A_W)} \quad (17)$$

$$u^{-1} = \frac{1}{(1 + C_{KIG,D})\epsilon_{IG} + (1 + C_{KDG,D})\epsilon_{DG}} + \frac{1}{(1 - \epsilon_{DG})\rho_{DW}} \quad (12)$$

elde edilir.

$$R_{ES} = R_{GW} + R_W \quad (18)$$

$$R_{GDW} = \frac{1}{A_D u} \quad (13)$$

(17) ve (1) bağıntıları (18) de yerlerine yazılırsa:

$$R_{RDG,W} = \frac{1}{\epsilon_{DG} A_W} \quad (14)$$

$$R_{ES} = \frac{1}{(uA_D + [1 + C_{KDG,W}]\epsilon_{DG} A_W)} + \frac{1 - \epsilon_W}{\epsilon_W A_W} \quad (19)$$

elde edilir. (19) bağıntısı sadeleştirilerek:

$$b = \frac{1}{\frac{1}{(uA_{DW} + [1 + C_{KDG,W}] \varepsilon_{DG})} + \frac{1}{\varepsilon_W} - 1} \quad (20)$$

$$R_{ES} = \frac{1}{bA_W} \quad (21)$$

şeklini alır. Burada  $b$  toplam ısı geçiş katsayısını temsil etmektedir.  $A_D$ ,  $A_W$ ,  $A_{DW}$ ,  $\varphi_{DW}$ ,  $u$ ,  $C_K$  terimlerini ise sırasıyla dolgu alanını, ocak ısıtma yüzeyini, dolgu yüzeyinin ocak yüzeyine oranını, dolgu ile ocak yüzeyi arasındaki şekil faktörünü, dolgudan ocak yüzeyine ısı geçiş katsayısını, taşınım ilave katsayılarını temsil etmektedir. Birim zamandaki toplam ısı geçişi için

$$\dot{Q}_W = \frac{E_{SG} - E_{SW}}{R_{ES}} \quad (22)$$

$$E_{SG} = \sigma T_{G0}^4 \quad (23)$$

$$E_{SW} = \sigma T_W^4 \quad (24)$$

$$E_{SD} = \sigma T_D^4 \quad (25)$$

yazılırsa ve (23), (24) ve (21) bağıntıları (22) bağıntısında yerlerine yazılırsa

$$Q_W = bA_W \sigma (T_{G0}^4 - T_W^4) \quad (26)$$

olarak elde edilir. Burada  $\sigma$  Stefan-Boltzman katsayısını temsil etmektedir.

Burada taşınım ilave katsayıları için

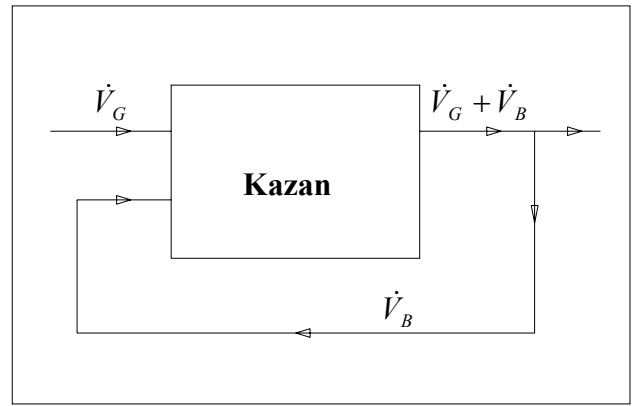
$$C_{KIG,D} = \frac{\dot{Q}_{KIG,D}}{\dot{Q}_{RIG,D}} = \frac{h_{IG}(T_{G0} - T_D)}{\varepsilon_{IG}(E_{SG} - E_{SD})} \quad (27)$$

$$C_{KDG,D} = \frac{\dot{Q}_{KDG,D}}{\dot{Q}_{RDG,D}} = \frac{h_{DG}(T_{G0} - T_D)}{\varepsilon_{DG}(E_{SG} - E_{SD})} \quad (28)$$

$$C_{KDG,W} = \frac{\dot{Q}_{KDG,W}}{\dot{Q}_{RDG,W}} = \frac{h_{DG}(T_{G0} - T_W)}{\varepsilon_{DG}(E_{SG} - E_W)} \quad (29)$$

ifadeleri yazılabilir.

Baca gazındaki azot oksit emisyonlarını azaltmak için kullanılan yöntemlerden birisi de ocak sıcaklığının düşürülmesidir. Bu maksatla baca gazının bir kısmı bir fan yardımıyla ocağa geri gönderilir bu işleme enjeksiyon denilmektedir. Konuya ilişkin şematik bir gösterim Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ocakta enjeksiyon yönteminin şematik görüntüsü

Baca gazından ocağa enjekte edilen duman gazının hacimsel debisi bulunmak istenirse

$$e = \frac{\dot{V}_B}{\dot{V}_G + \dot{V}_B} \quad (30)$$

$$e \cdot \dot{V}_G + e \cdot \dot{V}_B = \dot{V}_B \quad (31)$$

$$\dot{V}_B = \frac{e}{(1-e)} \dot{V}_G \quad (32)$$

şeklinde olur. Ocağa giren toplam debi için ise

$$\dot{V}_G + \dot{V}_B = \frac{1}{(1-e)} \dot{V}_G \quad (33)$$

yazılabilir. Enjeksiyonun olması durumunda birim zamandaki toplam ısı geçişini veren ifade

$$\dot{Q}_W = \frac{1}{(1-e)} \dot{V}_G c_{PMO} (T_{TH} - T_{G0}) \quad (34)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $e$ ,  $\dot{V}_G$ ,  $c_{PMO}$  ve  $T_{TH}$  terimleri sırasıyla enjeksiyon oranını, duman gazı debisini, ocak sıcaklığındaki duman gazı özgül ısısını ve adyabatik alev sıcaklığını temsil etmektedir. Ocaktaki ısı dengesi için (26) ve (34) denklemleri birbirine eşitlenir ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa

$$\frac{1}{(1-e)} \dot{V}_G c_{PMO} (T_{TH} - T_{G0}) = b A_W \sigma (T_{G0}^4 - T_W^4) \quad (35)$$

$$x = \frac{T_{G0}}{T_W} \quad (36)$$

(35) ve (36) bağıntıları yardımıyla

$$\frac{1}{(1-e)} \frac{\dot{V}_G c_{PMO}}{A_W \sigma T_W^3} \left( \frac{T_{TH}}{T_W} - x \right) = b (x^4 - 1) \quad (37)$$

elde edilir.

$$a = \frac{\dot{V}_G c_{PMO}}{A_W \sigma T_W^3} \quad (38)$$

şeklinde kısaltılırsa

$$\frac{1}{(1-e)} a \left( \frac{T_{TH}}{T_W} - x \right) = b (x^4 - 1) \quad (39)$$

elde edilir.

$$\mathfrak{G} = \frac{1}{(1-e)} \frac{a}{b} \quad (40)$$

(40) bağıntısı, (39) bağıntısına yerleştirilirse:

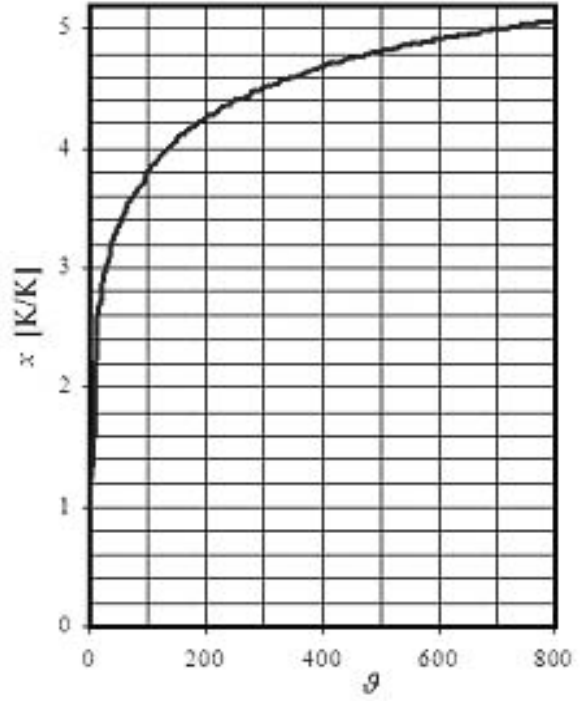
$$\mathfrak{G} \left( \frac{T_{TH}}{T_W} - x \right) = (x^4 - 1) \quad (41)$$

şeklini alır. (41) ifadesi düzenlenirse:

$$x^4 + \mathfrak{G}x - (1 + \mathfrak{G} \frac{T_{TH}}{T_W}) = 0 \quad (42)$$

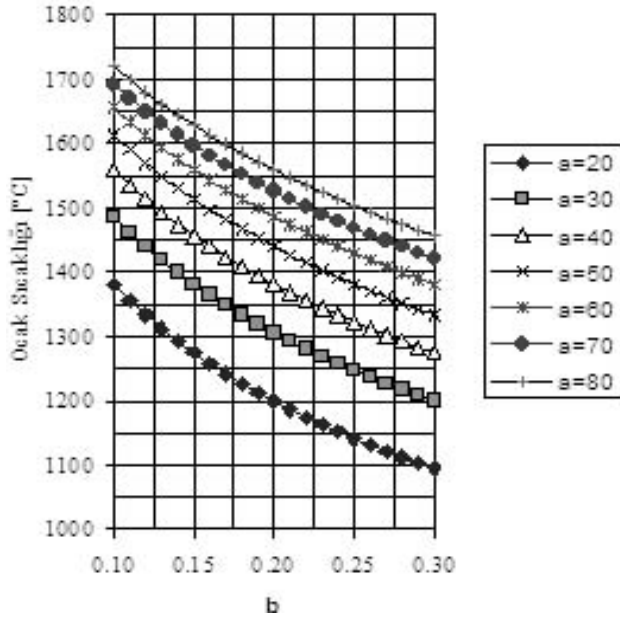
şeklinde dördüncü dereceden bir polinoma dönüşür. Burada  $x$  ortalama ocak gazı sıcaklığının, dolgu sıcaklığına oranını;  $\mathfrak{G}$  ise  $e$ ,  $a$  ve  $b$  sayılarına bağlı olarak değişen boyutsuz polinom katsayısını temsil etmektedir.

$\mathfrak{G}$  ya karşılık gelen  $x$  çözümü Şekil 4'te,  $a$  ve  $b$  boyutsuz sayılarına göre ocak sıcaklığının değişimi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4.  $\mathfrak{G}$  ya karşılık gelen  $x$  çözümü ( $e=0$ ,  $T_w = 373 K$ ,  $T_{TH} = 2201 K$  için)

Dolgu geometrisinin ısı geçişine etkisini daha iyi tahlil etmek üzere 1 m çaplı, 4.2 m uzunluğunda bir ocakta 1.1 hava fazlalığı ile doğalgaz yakılması durumunda, ocaktaki duman gazı hızı yaklaşık 14 m/s alınarak ve  $e=0$ ,  $a=73.5$ ,  $T_{TH}=2201 K$ ,  $T_w=373 K$  kabul edilip hesaplama yapılırsa, ocakta gerçekleşen toplam ısı geçişi için Tablo 1'de verilen değerler elde edilir.



Şekil 5.  $a$  ve  $b$  boyutsuz sayılarına göre ocak sıcaklığının değişimi ( $e = 0$ ,  $T_w = 373$  K,  $T_{TH} = 2201$  K için)

Tablo 1. Dolgu geometrisine göre ocakta toplam ısı geçişinin değişimi

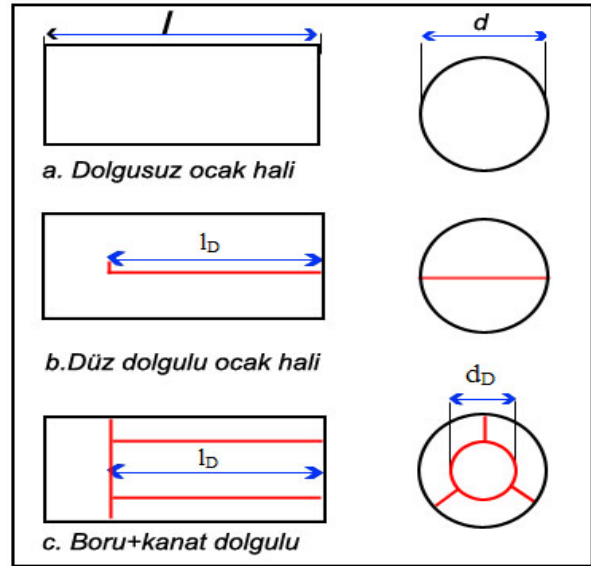
$x_D / n_B$	0	1	2	3	4
0.00	950	1031	1107	1163	1208
0.10	990	1100	1199	1275	1334
0.20	1031	1129	1217	1292	1349
0.30	1071	1157	1232	1297	1350
0.40	1109	1179	1241	1302	1350
0.50	1139	1196	1251	1301	1345
0.60	1169	1214	1257	1297	1333
0.70	1191	1224	1255	1286	1314
0.80	1213	1235	1256	1275	1294
0.90	1223	1234	1245	1256	1266
1.00	950	950	950	950	950

### Prototip ocağın tanıtılması ve hesaplamalar

420 kW gücünde skoç tipi üç geçişli bir sıcak su kazanının ocağına ilişkin ölçüler Şekil 6'da verilmiştir. Ocağın çapı 0.5 m ve boyu 1.25 m dir. Verilen ölçülere göre ocak yükü yaklaşık olarak  $1900 \text{ kW/m}^3$  olmaktadır.

Şekil 6a'da dolgunsuz ocak, 6b'de ise düz dolgulu, 6c'de boru ve kanat dolgulu ocak görülmek-

tedir. Dolgulu ocakta dolgu boyu 1 m olup, dolgunun alevin geometrisinde daha az olumsuz etki oluşturması bakımından 0.25 m ocağın arka kısmına doğru yerleştirilmiştir. Ocak malzemesi olarak, DIN 17155 standardına uygun HI kalite kazan sacı, dolgu malzemesi olarak 4 mm kalınlığında DIN 17100 standardına uygun St 37 kalite sac kullanılmıştır.



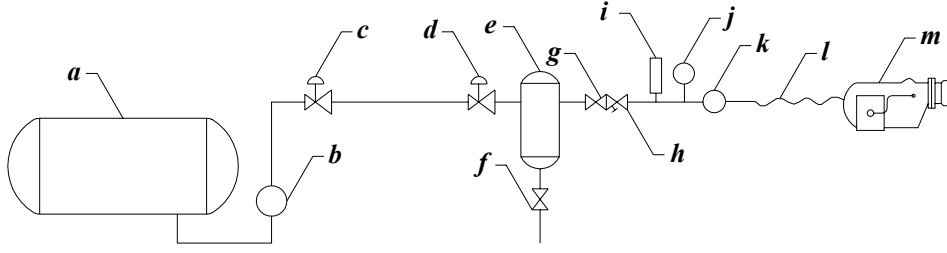
Şekil 6. Ocağın genel görünümü

Deneyde gaz yakıt olarak LPG karışımı kullanılmıştır. LPG, % 30 propan ve % 70 bütan gazlarının karışımlarından oluşmaktadır.

Söz konusu ocağın, dolgunsuz olması durumu ( $x_D = 0$  ve  $n_B = 0$ ), borusuz düz dolgulu ( $x_D = 0$  ve  $n_B = 2$ ) olması durumu ve boru+kanat ( $x_D = 0.6$  ve  $n_B = 3$ ) dolgulu olması durumu için ocak sıcaklıkları ve toplam ısı geçiş miktarları ayrı ayrı hesap edilmiştir. Ayrıca dolgulu durumdaki dolgu sıcaklığı hesaplanmıştır. Hesaplama enjeksiyon oranı  $e = 0$  alınmıştır. Farklı dolgu tipleri için yapılan hesaplamaların sonuçları toplu olarak Tablo 2 de verilmiştir.

### Deney tesisatı

Deneyde kullanılan olan sıcak su kazanında yakıt olarak LPG gazı kullanılmıştır. LPG tankı ile brülör arasındaki hattı Şekil 7'de gösterilmiştir. Sıvı halde tanktan alınan LPG buharlaştırıcıdan



- a. 5 m<sup>3</sup> LPG Stok Tankı  
b. 100 kg/h LPG Buharlaştırıcısı  
c. I. Kademe Regülatör  
d. II. Kademe Regülatör  
e. Separatör (likit ayırıcı)  
f. Drenaj Vanası  
g. Gaz Kesme Vanası  
h. Gaz Filtresi  
i. Termometre  
j. Manometre  
k. Gaz Sayacı  
l. Fleks Gaz Hortumu  
m. Gaz Brülörü

Şekil 7. Yakıt hattı şeması

Tablo 2. Dolgusuz ocak ile dolgulu ocakların kıyaslaması

Sembol	Boş ocak	Düz dolgulu ocak	Boru ve kanat dolgulu ocak
$x_D$	0	0	0.6
$n_B$	0	2	3
$A_{DW}$	0	$2/\pi$ m <sup>2</sup>	0.982 m <sup>2</sup>
$\varphi_{DW}$	-	1	0.848
$L_{ED}$	0.375 m	0.245 m	0.1365 m
$L_{EI}$	-	-	0.241 m
$\varepsilon_{DG}$	0.088	0.072	0.056
$\varepsilon_{IG}$	-	-	0.078
$C_{KDG,D}$	-	0.16	0.24
$C_{KIG,D}$	-	-	0.20
$C_{KDG,W}$	0.19	0.27	0.45
$u$	-	0.077	0.136
$b$	0.104	0.138	0.209
$a$	41.9	41.52	41.0
$g$	402.9	300.9	196.17
$T_{TH}$	1974 °C	1993 °C	2020 °C
$x$	4.758	4.594	4.343
$T_{G0}$	1502 °C	1441 °C	1347 °C
$T_D$	-	690 °C	798 °C
$\dot{Q}_W$	114.3 kW	132.3 kW	159.8 kW
$\dot{Q}_W / \dot{Q}$	27.2 %	31.5 %	38.0 %

gaz fazında çıkar ve birinci kademe regülatörden geçerek basıncı 1 bar'a düşürülmüştür. Gaz, brülöre öncesinde ikinci kademe regülatörden geçirilerek basıncı 300 mbar'a düşürülmüştür. Tesisatta oluşabilecek yoğuşma riskine karşı bir sıvı ayırıcı gaz hattına yerleştirilmiştir. Gaz sayacı öncesine pislik tutucu filtre yerleştirilmiştir. Gaz tüketimini ölçmek için bir gaz sayacı, ölçülen değeri indirgenmiş şartlara dönüştürebilmek için termometre ve manometre brülörden önceki hat üzerine yerleştirilmiştir. İhtiyaç duyulan kapasitenin 1.5 katı fazla yakıt yakabilen bir brülör kazan üzerine monte edilerek gaz hattı tamamlanmıştır.

Sıcak su kazanını 70/90°C su giriş ve çıkış sıcaklığında kararlı halde çalıştırabilmek için, Şekil 8'de görülen deney düzeneği kullanılmıştır. Kazan anma ısıl gücü 420 kW'dır. Kazana 70°C sıcaklıkta su verebilmek üzere bir karışım tankı kullanılmıştır. Kazandan 90°C sıcaklıkta çıkan suyun bir kısmı drenaj tankına bir ayar vanası kullanılarak alınmış, kalan kısmı ise karışım tankına gönderilmiştir. Drenaj tankına aktarılan su kadar, soğuk su tankından karışım tankına su ilave edilerek 70°C sıcak su kazana verilmiştir.

Sistemde suyun sirkülasyonu için bir adet, karışım tankına soğuk su ilave etmek için bir adet olmak üzere toplam iki adet santrifüj pompa kullanılmıştır. Kazan giriş çıkış suyu sıcaklıkla-



rını ölçmek üzere iki adet dijital göstergeli ısıl eleman, suyun debisini ölçmek için bir sıcak su sayacı kullanılmıştır.

Ocak sıcaklığını ölçmek için PtRh-Pt ısıl eleman ve sayısal sıcaklık gösterge cihazı kullanılmıştır. Dolgu sıcaklığını ölçmek için ise Ni-NiCr ısıl eleman dolgu üzerine kaynakla tutturulmuştur. Şekil 9'da sıcaklık okuma esnasındaki ısıl elemanların durumu gösterilmiştir.

### Deneyin yapılışı

Kazan su ile doldurulmuş, tesisattaki hava atılmıştır. Brülörün bağlandığı ocak kapağına, sıcaklık probunun girebileceği çapta bir delik açılmıştır. Buharlaştırıcı çalıştırılmış, I. kademe regülatörün basıncı 1 bar'a ayarlanmış, gazın basıncı manometreden gözlenmiş, II. kademe gaz regülatörün çıkışındaki basınç 300 mbar'a ayarlanmıştır.

Kazandaki suyun sıcaklığı 90°C'ye ulaştınca sirkülasyon pompası çalıştırılmıştır. Karışım tankındaki su sıcaklığı 70°C'ye getirildikten sonra, soğuk su tankından karışım tankına su gönderen pompa devreye alınmış, drenaj tankına giden ayar vanası ile karışım tankına soğuk su basan pompanın çıkışındaki ayar vanası kullanılarak, 70/90°C kararlı çalışma şartı elde edilmiştir. Deneylerde yakıt tüketimi, 477 kW brüt ısıl güce karşılık gelen 0.0043 Nm<sup>3</sup>/s değerine ayar-

lanmıştır. Dolgusuz ocakta, kazan rejim halindeyken baca sıcaklığı 182°C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık probu ocak içerisine daldırılarak farklı daldırma boyları için üç ayrı noktada sıcaklık ölçülmüştür. Ölçme sonuçları Tablo 3'te verilmiştir.

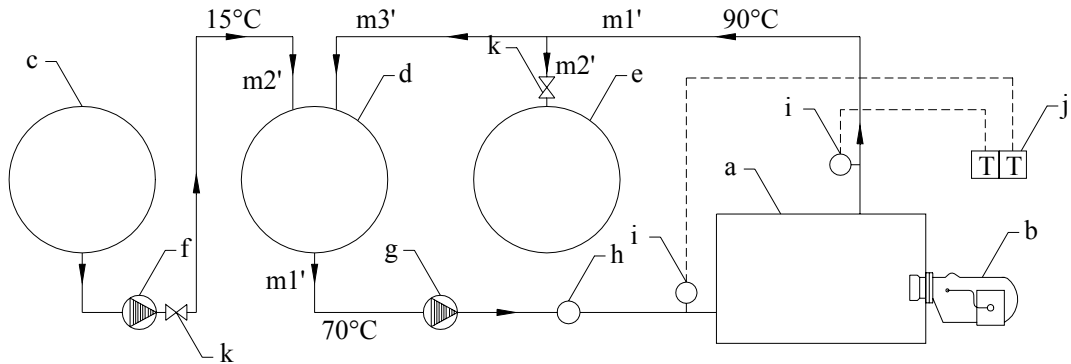
Tablo 3. Dolgusuz hal için ölçülen ocak sıcaklıkları

Ölçme No	$T_{G0}$ (°C)
I	1438
II	1427
III	1411

Ölçülen üç değer ortalama alındığı zaman ocak sıcaklığı 1425°C olarak tespit edilmiştir. Ocak içine düz dolgu yerleştirilerek deney yenilenmiştir. Gaz debisi dolgusuz deneydeki değerine ayarlanmış ve 70/90°C su sıcaklığı kararlı rejim hali elde edilmiştir. Ocak sıcaklığı ve dolgu sıcaklığı ölçülmüştür. Deney sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Düz dolgulu ocakta ölçülen ocak ve dolgu sıcaklıkları

Ölçüm No	$T_{G0}$ (°C)	$T_D$ (°C)
I	1394	698
II	1385	703
III	1369	701



- a. 420 kW Sıcaksu Kazanı
- b. 600 kW Gaz Brülörü
- c. Soğuksu Rezerv Tankı
- d. Karışım Tankı

- e. Drenaj Tankı
- f. Santrifüj Pompa
- g. Santrifüj Pompa
- h. Sıcaksu Sayacı

- i. Sıcaklık Sezgi Elemanı
- j. Dijital Sıcaklık Göstergesi
- k. Ayar Vanası

Şekil 8. Su hattının şematik görünüşü

Ortalama ocak ve dolgu sıcaklığı sırasıyla 1383°C ve 701°C olarak tespit edilmiştir.

Deney boru ve kanatlı dolgu ile tekrarlanmış ve ölçülen değerler Tablo 5'te verilmiştir. Dolgu sıcaklığı boru ile kanatın birleştiği noktadan ölçülmüştür. Gaz debisi düz dolgulu ocak deneyindeki değerine ayarlanmıştır. Ortalama ocak ve dolgu sıcaklığı sırasıyla 1328°C ve 749°C olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5. Boru ve kanat dolgulu ocakta ölçülen ocak ve dolgu sıcaklıklar

Ölçüm No	$T_{G0}$ (°C)	$T_D$ (°C)
I	1338	752
II	1326	745
III	1319	749

Hesap edilen ve ölçülen sıcaklıklara ilişkin kıyaslama Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Hesaplanan ve ölçülen sıcaklıkların kıyaslaması

Ocaktaki dolgu durumu	Hesaplanan	Ölçülen	Fark
	[°C]	[°C]	[%]
	Ocak Sıcaklığı		
Dolgunsuz ocakta	1502	1425	5.4
Düz dolgulu ocakta	1441	1383	4.2
Boru ve kanat dolgulu ocakta	1347	1328	1.4
	Dolgu Sıcaklığı		
Düz dolgulu ocakta	690	701	1.6
Boru ve kanat dolgulu ocakta	798	749	6.5

## Sonuçlar ve öneriler

Düz dolgulu ocakta ocak sıcaklığı, dolgunsuz ocağa kıyasla daha düşük değer almıştır. Dolgunsuz ocakta ocak sıcaklığı 1502°C olarak hesaplanırken, deneyde 1425°C değeri ölçülmüştür. Alevin merkezinde ölçülen sıcaklık en büyük değeri alırken, merkezden uzaklaştıkça sıcaklık azalmaktadır. Teorik hesaplamada ocak sıcaklığı tek bir değer ile karakterize edilmiştir. Gerçek şartlarda ocak içinde sıcaklık dağılımı meydana gelir. Hesaplanan ve ölçülen sıcaklıklar arasındaki fark modeldeki kabullerden kaynak-

lanmaktadır. Düz dolgulu halde ocak ve dolgu sıcaklıkları sırasıyla teorik olarak 1441°C ve 690°C iken deneysel olarak 1383°C ve 701°C olarak bulunmuştur. Boru ve kanat dolgulu halde ocak ve dolgu sıcaklıkları sırasıyla teorik olarak 1347°C ve 798°C iken deneysel olarak 1328°C ve 749°C olarak bulunmuştur. Dolgulu ocaklarda teorik olarak bulunan sıcaklıklarla ölçülen değerler arasındaki fark, model kabulleri yanı sıra alevin geometrisinde oluşabilecek olumsuzlukları azaltmak için dolgunun deneylerde ocak ağzından 25 cm içeriye yerleştirilmesi, teorik hesaplamada ise dolgu boyunun ocak boyuna eşit alınmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan teorik hesaplamalar ve deneysel çalışmalar gaz yakıtlı ocaklarda ışıyım artırıcı katı yüzey olarak dolgu maddeleri kullanılması halinde ocakta ısı geçişinin arttığı görülmüştür. Isı geçişinin artmasına paralel olarak ocak sıcaklığı da düşmektedir. Ocak sıcaklığına bağlı olarak yakma havasının içerisindeki azotun reaksiyona girecek oluşturduğu NO<sub>x</sub> emisyonu hesaplanmıştır. Dolgu durumuna bağlı olarak hesaplanan ocaktaki ısı geçiş miktarı, ocak sıcaklıkları ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının değişimi Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Dolgu geometrisine bağlı olarak ısı geçişleri ve ocak sıcaklıklarının değişimi

	Ocakta Isı geçişi [kW]	Ocak Sıcaklığı [°C]	Isıl NO Emisyonu [Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> ]
Dolgunsuz ocak	114.3	1502	0.0029
Düz dolgulu ocak	132.3	1441	0.0025
Boru ve kanat dolgulu ocak	159.8	1347	0.0020

Dolgu geometrileri için ocakta yüzeylere geçen ısı enerjisi miktarı değişmektedir. Isı geçişini dolgunun alanı, dolgu ile ocak duvarları arasındaki şekil faktörü, eşdeğer gaz tabaka kalınlığı ve gaz emisiviteleri etkilemektedir. Boru geometrisi olmayan düz dolgulara, ocak ne kadar çok parçaya bölünürse, dolgu alanı büyüyerek ısı geçişini artırmaktadır. Düz dolguların yerine, boru ve etrafında düz kısımlardan oluşan kanatlı dolgu kullanmak ısı geçişini artırmak açısından daha avantajlıdır. Boru kısmı olan dolgulara belirli bir dolgu çapı için borunun dışındaki ka-

nat sayısı arttıkça ısı geçişi artmaktadır. Dolgunun dışındaki belirli kanat sayısı için ısı geçişinin maksimum olduğu bir dolgu çapı mevcuttur.

### Semboller

$a$	: Belirli bir kazan geometrisi için sabit boyutsuz sayı
$A_D$	: Dolgu alanı
$A_{DW}$	: Dolgu alanının ocak ısıtma yüzeyine oranı
$A_W$	: Ocak ısıtma yüzeyi
$b$	: Toplam ısı geçiş katsayısı
$C_{KDG,D}$	: Boru dolgunun dışındaki gazdan dolguya taşınım ilave katsayısı
$C_{KIG,D}$	: Boru dolgunun içerisindeki gazdan dolguya taşınım ilave katsayısı
$C_{KDG,W}$	: Boru dolgunun dışındaki gazdan ocak duvarına taşınım ilave katsayısı
$c_{PMO}$	: Ocak sıcaklığındaki duman gazının özgül ısı
$d$	: Ocak çapı
$d_D$	: Dolgu çapı
$e$	: Enjeksiyon oranı
$E_{SG}$	: Duman gazı ışınım yayma gücü
$E_{SD}$	: Dolgunun ışınım yayma gücü
$E_{SW}$	: Ocak duvarlarının ışınım yayma gücü
$E_W$	: Ocak duvarını terk eden ışınımın gücü
$h_{IG}$	: Boru dolgunun içerisindeki taşınım katsayısı
$h_{DG}$	: Boru dolgunun dışındaki taşınım katsayısı
$H_U$	: Yakıtın alt ısı değeri
$i_{TH}$	: Adyabatik yanma entalpisi
$i_{G0}$	: Sabit sıcaklıkta varsayılan ocak gazının entalpisi
$l$	: Ocak boyu
$l_D$	: Dolgu boyu
$L_{ED}$	: Boru dolgunun dış kısmı için eşdeğer tabaka kalınlığı
$L_{EI}$	: Boru dolgunun iç kısmı için eşdeğer tabaka kalınlığı
$n_B$	: Boru dolgunun dışındaki kanat sayısı
$\dot{Q}_W$	: Birim zamandaki toplam ısı geçişi

$R_{DW}$	: Dolgu ile ocak duvarı arasındaki ısı direnç
$R_{DGD}$	: Dolgunun boru kısmının dışındaki gaz ile dolgu arasındaki ısı direnç
$R_{DGW}$	: Dolgunun boru kısmının dışındaki gaz ile ocak duvarı arasındaki ısı direnç
$R_{ES}$	: Toplam ısı direnç
$R_{GD}$	: Ocak içerisindeki gaz ile dolgu arasındaki ısı direnç
$R_{GDW}$	: Ocak içerisindeki gaz-dolgu-ocak duvarları arasındaki ısı direnç
$R_{GW}$	: Ocak içerisindeki gaz ile ocak duvarları arasındaki ısı direnç
$R_{IGD}$	: Dolgunun boru kısmının içindeki gaz ile dolgu arasındaki ısı direnç
$R_{KDG,D}$	: Dolgunun boru kısmının dışındaki gazdan dolguya taşınım ile ısı geçmesi durumundaki ısı direnç
$R_{KDG,W}$	: Dolgunun boru kısmının dışındaki gazdan ocak duvarına taşınım ile ısı geçmesi durumundaki ısı direnç
$R_{KIG,D}$	: Dolgunun boru kısmının içindeki gazdan dolguya taşınım ile ısı geçmesi durumundaki ısı direnç
$R_{RDG,D}$	: Dolgunun boru kısmının dışındaki gazdan dolguya ışınım ile ısı geçmesi durumundaki ısı direnç
$R_{RDG,W}$	: Dolgunun boru kısmının dışındaki gazdan ocak duvarına ışınım ile ısı geçmesi durumundaki ısı direnç
$R_{RIG,D}$	: Dolgunun boru kısmının dışındaki gazdan ocak duvarına ışınım ile ısı geçmesi durumundaki ısı direnç
$R_W$	: Ocak duvarının ışınım yüzey direnci
$T_D$	: Dolgu sıcaklığı
$T_{G0}$	: Ocak sıcaklığı
$T_H$	: Yakma havası sıcaklığı
$T_{TH}$	: Adyabatik alev sıcaklığı
$T_W$	: Ocak duvarlarının sıcaklığı
$u$	: Dolgudan ocak duvarına ısı geçiş katsayısı
$\dot{V}_B$	: Baca gazından ocağa enjekte edilen duman gazının hacimsel debisi
$\dot{V}_G$	: Normal şartlara indirgenmiş duman

$x$	: gazı hacimsel debisi : Ocak sıcaklığının, ocak duvarlarının sıcaklığa oranı
$x_D$	: Dolgu çapının ocak çapına oranı $\epsilon_{DG}$ Boru dolgunun dış kısmındaki toplam gaz ışıınım katsayısı
$\epsilon_{IG}$	: Boru dolgunun iç kısmındaki toplam gaz ışıınım katsayısı
$\epsilon_w$	: Ocak duvarının ışıınım yayma katsayısı
$\mathcal{P}$	: $a$ , $b$ ve $e$ ye bağlı boyutsuz polinom katsayısı
$\varphi_{DW}$	: Dolgu ile ocak ısıtma yüzeyi arasındaki şekil faktörü
$\sigma$	: Stefan-Boltzman sabiti

## Kaynaklar

- Eker, A., (1983). *Kazanlar*, Emel Matbaası, Ankara
- Holman, J.P., (1989). *Heat Transfer*, Seventh Edition, McGraw-Hill, Singapore.
- Küçükçalı, R., (1998). *Isıtma Sistemindeki Gelişmeler*, Isısan Çalışmaları, İstanbul
- Modest, M.F., (1993). *Radiative Heat Transfer*, The Pennsylvania State University, McGraw-Hill, Singapore.
- Onat, K., (1997). Doğalgaz Işıınımının Artırılması İçin Bir Öneri, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, **18**, 3-4, 39-42.
- Onat K., Arısoy A. ve Genceli O.F., (1996). *Buhar Kazanlarının Isıl Hesabı*, İTÜ Makine Fakültesi, 2. Baskı, Cem Ofset Print Shop, İstanbul.
- Öztürk A. ve Yavuz H., (1985). *Uygulamalarla Isı Geçişi*, Çağlayan Basımevi, İstanbul.
- Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P. ve Cho, Y.I., (1998). *Handbook of Heat Transfer*, Third Edition, McGraw-Hill, USA.