

Gözenekli Seramiklerde Işınım Yayma Sayısının Ölçümü

Orhan BÜYÜKALACA

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Adana-TÜRKİYE

Geliş Tarihi: 02.01.1997

Özet: Bu çalışmada, yedi değişik gözenekli seramik malzemenin ve bir adet seramik fiberin değişik dalga boylarındaki ışınım yayma sayıları ve toplam ışınım yayma sayıları ölçülmüştür. Ölçümler 1.2 µm ile 20 µm arasında değişen dalga boylarında ve 200 °C ile 700 °C arasında değişen sıcaklıklarda yapılmıştır. Ölçümler sonucunda, toplam yayma sayısının gözenek büyüklüğünün artmasıyla arttığı ancak sıcaklığın artmasıyla azaldığı bulunmuştur. Test edilen bütün gözenekli seramik malzemelerin toplam yayma sayılarının seramik fiberden daha iyi olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Isı transferi, ışınım, yayma sayısı, gözenekli seramik malzeme

Measurement of Emissivity of Porous Ceramic Materials

Abstract: In this study, measurements of spectral and total emissivities of seven different porous ceramic materials and one ceramic fibre material are reported. Measurements were made for wavelength range from 1.2 µm to 20 µm and temperature range from 200 °C to 700 °C. It was found that total emissivity increases with increase of pore size but decreases with increase of temperature. The results showed all the porous ceramic materials tested to be much better than ceramic fibre in terms of total emissivity.

Key Words: Heat transfer, radiation, emissivity, porous ceramic material

Giriş

Dünyanın enerji kaynaklarının sınırlı olmasına rağmen günümüzde toplumların refah seviyelerinin artmasına paralel olarak enerji gereksinimleri sürekli olarak artmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak üzere bazı alternatif enerji kaynaklarını kullanmak teorik olarak mümkün olsa da günümüz teknolojisi ile bunların büyük ölçekli uygulanması pratik değildir. Bu sebeple eldeki mevcut enerji kaynaklarının en verimli bir şekilde kullanılması gereklidir. Kullandığımız birçok malzemenin üretim sürecinde bir çeşit ısı işlem mevcut olduğundan toplam enerji tüketiminde fırınlar büyük bir paya sahiptir. Fırınların ısı verimini arttırmak üzere tasarlanmış ve kullanılmakta olan bazı sistemler mevcuttur. Bunların başında da atık ısı geri kazanım sistemleri gelmektedir (Büyükalaca, 1997a). Bu sistemlerde genel olarak egsoz gazları kullanılarak taze yanma havası veya ısıtılacak kütle ön ısıtmaya tabii tutulmaktadır. Ancak bu sistemlerin orta ve küçük kapasiteli fırınlara uygulanması ekonomik olmamaktadır.

Bu sebeple yanma ürünlerinin enerjisinden mümkün olduğunca fırın içerisinde faydalanılması yoluna

gidilmelidir (Büyükalaca, 1997b). Bunu gerçekleştirebilmenin yollarından bir tanesi de fırın iç cidarında kullanılan malzemenin ışınım yayma sayısını arttırmaktır (Docherty ve Tucker, 1985). Günümüzde düşük ısı kapasiteleri ve kolay bakım ve tamirat gibi avantajları sebebiyle fırınlarda seramik fiberler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Fırın tasarımında bu malzemelerin ışınım yayma sayısının 0.6 ile 0.9 mertebesinde olduğu kabul edilmesine rağmen yakın geçmişte yapılan bir araştırma (Jackson ve Yen, 1994), özellikle 4µm den düşük dalga boylarında bu değer çok daha düşük (<0.3) olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca seramik fiberlerin, asbestosun sebep olduğu hastalıklara benzer hastalıklara yol açabileceği bilindiğinden, kullanımında ve özellikle de montaj ve tamirinde bazı önlemler alınmalıdır (The European Ceramic Fibres Industry Association, 1989). Bu sebeple önümüzdeki yıllarda seramik fiberlerin kullanımına (özellikle sıcak yüzey astar malzemesi olarak) bazı sınırlandırılmaların getirilmesi beklenmektedir (Energy Efficiency Office, 1996). Son yıllarda, düşük ışınım yayma sayısı ve sağlık açısından muhtemel tehlikelerini ortadan kaldırmak amacıyla fırınlarda seramik fiberlerin

yerine gözenekli seramik malzemelerin kullanılması gündeme gelmiştir. Gözenekli seramik malzemelerin bir diğer uygulama alanı ise yanma sonucu açığa çıkan gazların enerjisinden fırın içerisinde faydalanmak üzere bacaya veya herhangi bir atık ısı geri kazanım sistemine gitmeden önce gaz akışına dik yönde geçirgen bir seramik levhanın yerleştirilmesidir (Büyükalaca, 1997b). Ancak bu düşünceler daha yaygın olarak uygulamaya geçirilmemiştir. Bu tür sistemlerin tasarımı için gözenekli seramiklerin ışınım yayma özelliklerine ihtiyaç vardır.

Günümüzde gözenekli seramik malzemeler katalitik konvertörlerde katalizör, filtre (sıcak gazlar ve sıvı metaller için) ve brülörlerde yanma ortamı gibi değişik uygulama alanları için üretilmekte ve ticari olarak satılmaktadır. Gözenekli seramiklerin kullanıldığı ortamların birçoğu yüksek sıcaklıklar içerdiğinden, ısı transferinde ışınım büyük bir rol oynamaktadır. Bu sebepten dolayı, ısı transferi hesapları ve modelleme çalışmaları için bu malzemelerin ışınım özelliklerine ihtiyaç vardır. Bu özelliklerin en önemlilerinden bir tanesi de ısı ışınım yayma sayısıdır.

Fırınlarda yalıtım malzemesi olarak kullanılan gözeneksiz olarak üretilmiş seramik malzemelerin yayma sayıları hakkında literatürde (Morrell, 1987; Hampartsoumian, 1990; Elich ve Wieringa, 1995) bazı bilgiler mevcut olmakla birlikte gözenekli yapı araştırılmamıştır. Bunun sebeplerinden bir tanesi bu malzemelerin ticari olarak üretimini ancak son yıllarda yaygınlaşmış olması ve buna bağlı olarak ısı transferi uygulamalarında yeni olmasıdır. Diğer bir faktör ise gözenekli malzemelerde ışınım yayma sayısının ölçümünün zor olmasıdır.

Gözenekli seramik malzemelerin yayma sayılarının ölçümü bazı zorluklar içerir. Bu malzemelerin ısı iletim katsayıları düşük olduğundan ısıtıldıklarında özellikle yüzeye yakın bölgelerde, malzeme içerisinde büyük sıcaklık farklılıkları oluşabilir. Bu sebepten ve gözeneklerden dolayı ısı ışınım sadece yüzeyden kaynaklanmamaktadır. Yüzeye çok yakın yüzey altındaki bölgelerde, yüzeyden yayılan ışınımı etkileyebilmektedirler. Ayrıca ısı iletim katsayısının düşük olması ve katı ortamın süreksizlikler göstermesi yüzünden, gözenekli seramik malzemelerin sıcaklıklarının ölçümü oldukça zordur.

Yayma Sayısının Elde Edilmesi

Bir cismin yayma sayısı (ϵ_λ), aynı sıcaklık ve dalga boyunda cisim tarafından yayılan ışınımın (E_λ) siyah cisim tarafından yayılan ışınımına (E_λ^*) oranı olarak tanımlanır:

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_\lambda^*(\lambda, T)} \quad (1)$$

Bu çalışmada aynı dalga boyu ve sıcaklıkta E_λ ve E_λ^* ölçülerek ϵ_λ elde edilmiştir.

Toplam ışınım yayma sayısı (ϵ_t) ise, aynı sıcaklıkta cisim tarafından bütün dalga boylarında yayılan ışınımın (E_t) siyah cisim tarafından bütün dalga boylarında yayılan ışınımına (E_t^*) oranı olarak tanımlanır:

$$\epsilon_t(T) = \frac{E_t(T)}{E_t^*(T)} \quad (2)$$

E_t^* , Stefan-Boltzmann kanunu kullanılarak belirlenebilir. Bu durumda (2) eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$\epsilon_t(T) = \frac{E_t(T)}{\sigma T^4} \quad (3)$$

Buradan, sıcaklık (T) ve cisim tarafından yayılan toplam ışınımın (E_t) ölçülmesi durumunda toplam yayma sayısının bulunabileceği görülmektedir.

Toplam yayma sayısı bu şekilde doğrudan ölçülebileceği gibi değişik dalga boylarında ölçülen yayma sayıları kullanılarak da belirlenebilir:

$$\epsilon_t(T) = \frac{E_t(T)}{E_t^*(T)} = \frac{\int_0^\infty E_\lambda(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty E_\lambda^*(\lambda, T) d\lambda} \quad (4)$$

Bu eşitlikte yer alan $E_\lambda(\lambda, T)$, (1) eşitliği ve Planck kanunu kullanılarak yeniden yazılabilir. Stefan-Boltzmann kanunu da dikkate alınırsa toplam yayma sayısı (ϵ_t) için şu şekilde elde edilir:

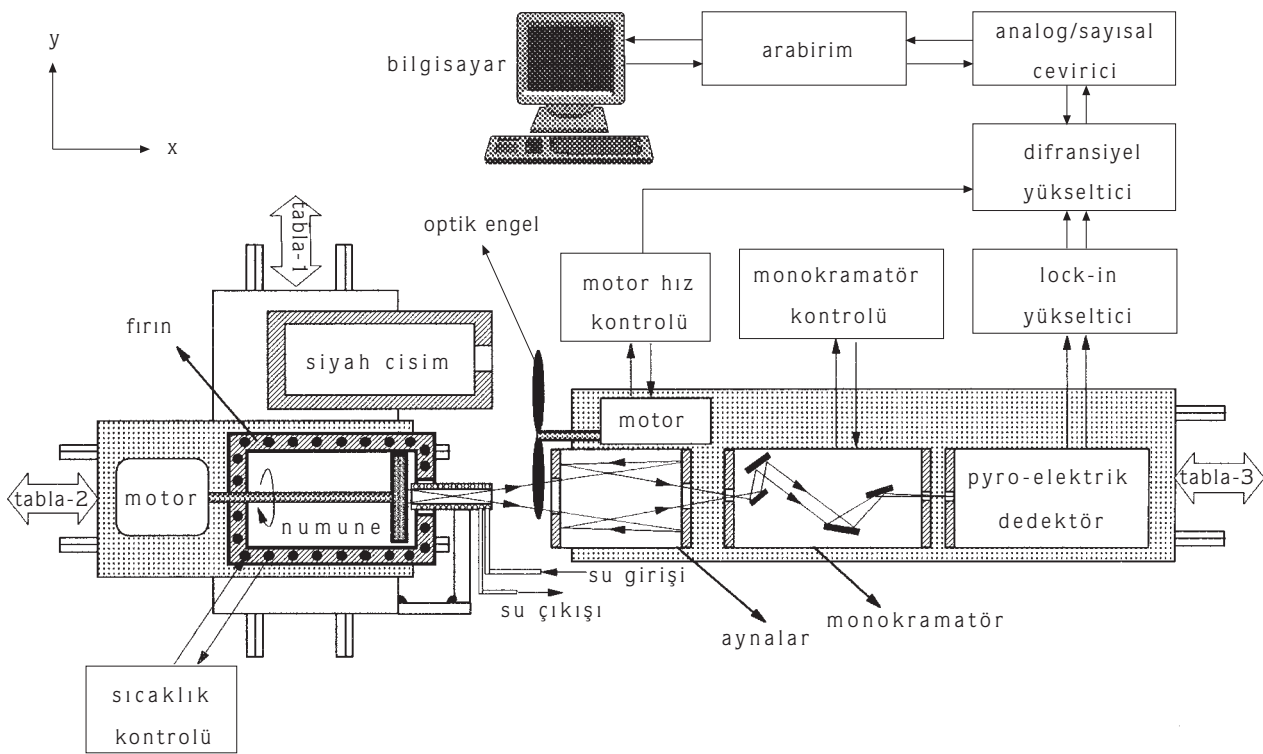
$$\epsilon_t(T) = \frac{\int_0^\infty \epsilon_\lambda(\lambda, T) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} d\lambda}{\sigma T^4} \quad (5)$$

ϵ_λ değerleri yazılan bir bilgisayar programı yardımıyla nümerik olarak integre edilerek ϵ_t elde edilmiştir.

Deneylerin Yapılışı

Bu çalışmada gözenekli seramik malzemelerin hem değişik dalga boylarındaki yayma sayısı (ϵ_λ) hem de toplam yayma sayısı (ϵ_t) ölçülmüştür. Bu amaçla iki adet deney düzeneği kullanılmıştır.

ϵ_λ ölçümleri Şekil 1'de şematik olarak gösterilen



Şekil 1. Yayma sayısı ölçüm düzeneği.

deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Numune ve siyah cisim aynı sıcaklığa getirildikten sonra sırasıyla numuneden ve siyah cisimden yayılan ısı ışınım ölçülmüştür. Ölçümler yapılırken cihazların gerekli hareketlerini gerçekleştirebilmek ve ayarları yapabilmek için, kullanılan cihazların bazıları raylar üzerinde hareket edebilen tablalar üzerine yerleştirilmiştir.

Gerek numune yüzey sıcaklığı ölçümündeki zorluklar, gerekse ışınımın yüzeyin hemen altındaki bölgelerden kaynaklanabilmesi gibi problemlerden dolayı yayma sayısı ölçülecek numune belirli bir hızla (≈ 30 devir/dakika) döndürülmüştür. Böylelikle numunenin tamamının aynı sıcaklıkta olması sağlanmıştır. Numune bu çalışma için özel olarak tasarlanıp, imal edilmiş bir fırın içerisine yerleştirilmiştir. Fırın, ön kapağına, arka yüzeyine ve çevresine yerleştirilmiş, kontrol edilebilir elektrikli ısıtıcılar yardımıyla ısıtılmıştır. Numuneyi döndürmek için hızı ayarlanabilir bir motor kullanılmış ve numune motor miline seramik bir çubuk ile bağlanmıştır. Ölçümler için fırının ön kapağına yaklaşık 25 mm çapında daire kesitli bir pencere açılmıştır. Numune istenilen sıcaklığa ulaşıncaya kadar bu pencere seramik

fiberden yapılmış bir tıpa ile kapatılmıştır. Bu tıpa sadece ışınım ölçümü yapılırken açılmış ve numuneden yayılan ışınımın ölçüm cihazlarına geçmesi sağlanmıştır. Ölçüm cihazlarına sadece numuneden yayılan ışınımın geçmesini sağlamak, gerek fırın cidarlarından gerekse çevreden yansıyan ışınımın ölçümü etkilememesi için ölçüm penceresi önüne suyla soğutulan bir adet gözetleme tüpü yerleştirilmiştir. Fırın istenilen sıcaklığa ulaşıncaya, pencereyi kapatan tıpa açılmış, fırın x yönünde hareket ettirilerek, tüpün pencere içerisine girmesi sağlanmıştır. Fırının x yönündeki hareketi numune ile gözetleme tüpü arasındaki mesafe yaklaşık 1 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.

Işınımı ölçmek amacıyla bir adet pyro-elektrik dedektör kullanılmıştır. Numuneden yayılan ışınım önce bir ayna sisteminden geçirilerek monokramatör üzerine yoğunlaştırılmıştır. Monokramatörde aynalar yardımıyla ışınlar önce paralel hale getirilmiş ve daha sonra sırasıyla bir dağıtma ızgarası ve bir filtreden geçirilerek sadece istenilen dalga boyundaki ışınımın pyro-elektrik dedektör üzerine yönlendirilmesi sağlanmıştır. Değişik dalga boylarındaki ışınım miktarlarını ölçülebilmek için ise değişik ışın dağıtma ızgaraları ve filtreler kullanılmış,

ayrıca ızgaraların açısı değiştirilmiştir.

Numune ile monokromatör arasına bir adet döner optik engel yerleştirilerek dedektörün periyodik olarak belirli bir süre numuneden yayılan ışınımı ve belirli bir süre de ortamdaki gelen ışınımı görmesi sağlanmıştır. Işınımın büyüklüğü ile orantılı olarak pyro-elektrik dedektörde elde edilen elektrik sinyali sırasıyla bir lock-in ve difransiyel yükselticiden geçirilerek analog/sayısal çeviriciye gönderilmiştir. Burada sayısal değerlere çevrilen sinyaller bir arabirim aracılığıyla kişisel bir bilgisayar tarafından okunmuştur. Daha önce elde edilen kalibrasyon eşitliği kullanılarak elektrik sinyalinden ışınım değeri E_{λ} elde edilmiştir.

Numuneden yayılan ışınım ölçüldükten sonra 1 nolu tabla y yönünde hareket ettirilerek ölçüm cihazlarının karşısına numune ile aynı sıcaklıktaki siyah cisim referans kaynağı getirilmiştir. Bu defa da siyah cisimden yayılan ışınım E_{λ}^* ölçülmüştür. Daha sonra ölçülen E_{λ} ve E_{λ}^* değerleri kullanılarak eşitlik (1) den ϵ_{λ} elde edilmiştir.

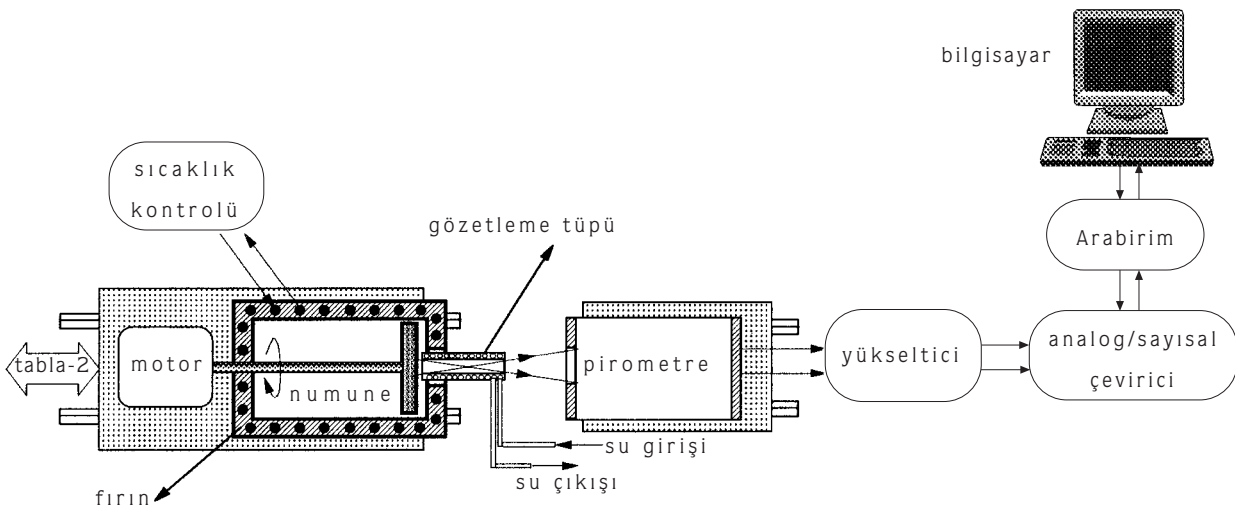
Şekil 2'de ise toplam yayma sayısı (ϵ_t) ölçümlerinde kullanılan düzenek şematik olarak gösterilmiştir. Burada da numunenin ısıtılması için değişik dalga boylarında yayma sayısını ölçmek için kullanılan fırından faydalanılmıştır. Numuneden yayılan ışınım gözetleme tüpü içerisinde geçirildikten sonra 0.6 μm ile 40 μm arasındaki dalga boylarında yayılan ışınım duyarlı bir piranometre üzerine yönlendirilmiştir. Piranometrede

ışınım miktarıyla orantılı olarak üretilen elektrik sinyali bir analog/sayısal çeviriciden geçirildikten sonra bilgisayar tarafından okunmuştur. Daha sonra da kalibrasyon eşitliği yardımıyla elektrik sinyalinden ışınım değeri E_t elde edilmiştir.

Hem değişik dalga boylarındaki yayma sayısının hem de toplam yayma sayısının elde edilmesinde, numunenin sıcaklığını ölçmek için numune içerisine, ön yüzeyinden yaklaşık 3 mm derinlikte bir adet K tipi ısı eleman çifti yerleştirilmiştir. Ayrıca bir adet K tipi ısı eleman çifti kullanılarak ortam sıcaklığı da ölçülmüştür. Isıl eleman çifti sinyalleri bir referans sıcaklığından geçirildikten sonra analog/sayısal çeviriciye gönderilerek bilgisayar tarafından okunmuştur.

Deney Parametreleri: Bu çalışmada yayma sayısının ölçümü, 1 μm ile 20 μm arasında değişen toplam 41 değişik dalga boyunda yapılmıştır. Sıcaklık ise 200 °C ile 700 °C arasında değiştirilerek 200, 300, 400, 500, 600 ve 700 °C'de ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Hata Analizi: Yayma sayısının doğruluğunu etkileyen hata kaynakları şunlardır: Işınım ölçüm cihazlarından kaynaklanan hatalar, ölçüm cihazlarına numuneden yayılan ışınımın yanında fırın duvarlarından yayılan ve numune tarafından belirli bir miktar ışınımın da yansıtılmasından kaynaklanan hatalar, sıcaklık ölçümünden kaynaklanan hatalar ve son olarak numune ve siyah cismin aynı sıcaklıkta tutulamamasından kaynaklanan hatalardır. Bu hatalar Moffatt (1988)



Şekil 2. Toplam yayma sayısı ölçüm düzeni.

tarafından verilen yöntemle göre analiz edilmiş ve en kötü durumun yayma sayısının düşük olduğu numunede, küçük dalga boylarında ve düşük sıcaklıklarda meydana geldiği görülmüştür. Bu analize göre yayma sayısındaki en büyük hatanın ± 0.08 olduğu tahmin edilmiştir. Yayma sayısındaki toplam hata büyük oranda numune ve siyah cismin aynı sıcaklıkta tutulmamasından ve yansıyan ışımdan kaynaklanmaktadır. Bunlardan birincisi sıcaklığın ve dalga boyunun artmasıyla, ikincisi ise sıcaklığın ve yayma sayısının artmasıyla azalmıştır. Yüksek sıcaklık, dalga boyu ve yayma sayısında hata ± 0.04 mertebesine inmiştir.

Toplam yayma katsayısı elde edilirken tüm dalga boylarında ($0 < \lambda < \infty$) yayılan ışınım enerjisinin ölçülmesi gereklidir. Ancak kullanılan piranometre $0.6 \mu\text{m}$ ile $40 \mu\text{m}$ arasındaki dalga boylarındaki ışınımaya duyarlıdır. Bununla birlikte çalışılan sıcaklık bölgesinde ($200-700 \text{ }^\circ\text{C}$) $0.6 \mu\text{m}$ ile $40 \mu\text{m}$ spektrumun çok büyük bir kısmını kapsadığından piranometreden kaynaklanan hata çok küçüktür. Siyah cisim tarafından $0 < \lambda < \infty$ arasında yayılan ışınımın $0.6 \mu\text{m} < \lambda < 40 \mu\text{m}$ arasında yayılan ışınma oranı Siegel ve Howell (1992) tarafından verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve $200 \text{ }^\circ\text{C}$ için 0.980 , $700 \text{ }^\circ\text{C}$ de ise 0.998 olduğu bulunmuştur. Spektrumun tamamının içerilmemesinden dolayı kaynaklanan hata $200 \text{ }^\circ\text{C}$ de $\%1.6$ olurken, $700 \text{ }^\circ\text{C}$ de bu $\%0.2$ olmaktadır.

Yayma sayısının ölçümünde yapılan analize benzer şekilde toplam yayma sayısının ölçümündeki hata kaynakları da incelenmiş ve en büyük hatanın yüksek sıcaklıklarda meydana geldiği (± 0.04), düşük sıcaklıklarda ise hatanın ± 0.03 mertebesine düştüğü görülmüştür.

Numuneler

Deneylerde 7 değişik gözenekli seramik malzemenin yayma sayıları ölçülmüştür. Numuneler iki değişik üretici firmadan temin edilmişlerdir.

1 ve 2 nolu numunelerin (N1 ve N2) malzemesi alumina (Al_2O_3) olup, 1 nolu numunenin gözenekleri çok küçüktür ($50 \mu\text{m}-200\mu\text{m}$). 2 nolu numunenin gözenek çapı daha büyüktür ve 0.1 mm ile 0.2 mm arasında bir dağılım göstermektedir.

3 nolu numune (N3) yine alumina esaslı olup sertliğini arttırmak için içerisine zirkonia ilave edilmiştir. 4 nolu numune (N4) ise alumina ile sertleştirilmiş, yttria ile stabilize edilmiş zirkoniadır. Bu iki numune 12 gözenek/cm olarak sınıflandırılmaktadır.

5, 6 ve 7 nolu numunelerin (N5, N6 ve N7) malzemesi aynı olup, alumina esaslıdır ($\%80-90 \text{ Al}_2\text{O}_3 + \%5-9 \text{ SiO}_2$). Bu numunelerin gözenekliliği sırasıyla 4, 8 ve 12 gözenek/cm 'dir.

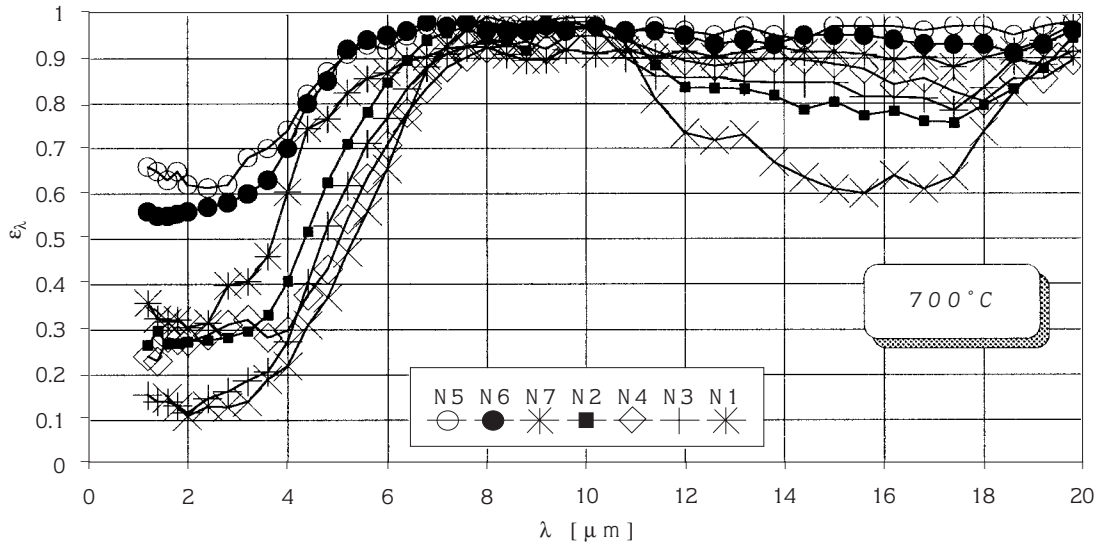
Bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla gözenekli seramik numunelere ilave olarak bir adet seramik fiber numunenin de yayma sayısı ölçülmüştür. Bu numunenin bileşimi $\%45-50 \text{ Al}_2\text{O}_3 + \%55-50 \text{ SiO}_2$ şeklindedir.

Deney Sonuçları ve Tartışma

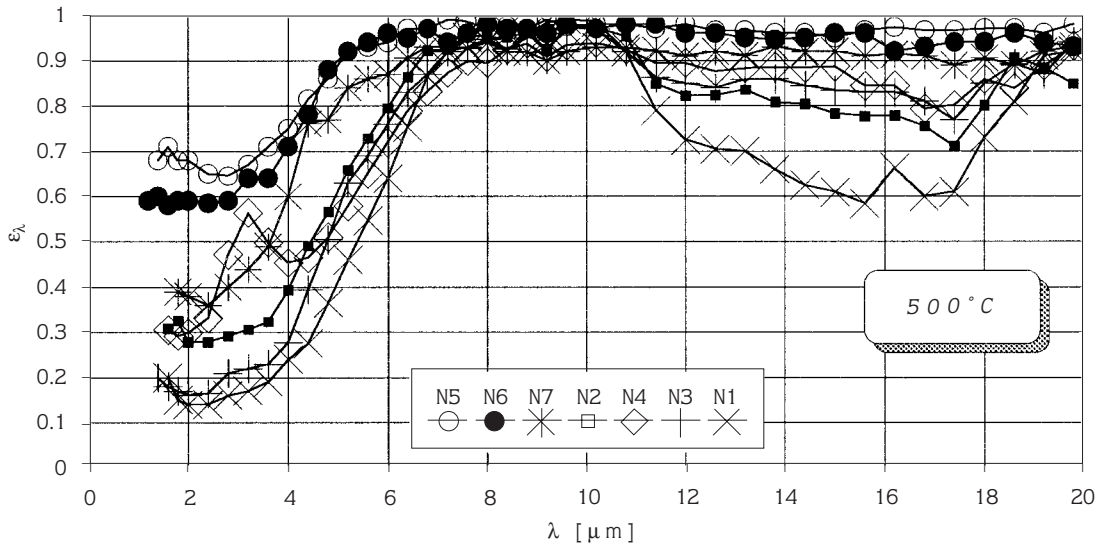
Test edilen bütün numunelerin $700 \text{ }^\circ\text{C}$ de elde edilen ışınım yayma sayıları Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, sayısal olarak farklılıklar olmakla birlikte bütün numunelerin sayılarının dalga boyu ile değişimi benzer özellikler göstermektedir. Buradan görülen genel davranış şöyledir: $4 \mu\text{m}$ 'den düşük dalga boylarında yayma sayıları düşüktür. Bu bölgede $\epsilon_\lambda \approx 0.63$ ile numune N5 en yüksek yayma sayısına sahiptir. Bunu sırasıyla numune N6, N7, N4 ve N2 takip etmektedir. Küçük dalga boylarında numune N3 ve N1'in yayma sayıları oldukça düşüktür ($\epsilon_\lambda \approx 0.1-0.15$). $4 \mu\text{m}$ ile $8 \mu\text{m}$ arasında bütün numunelerin yayma sayıları hızla artarak $8 \mu\text{m}$ de en yüksek değerlerine ulaşmaktadırlar. $8 \mu\text{m}$ ile $10 \mu\text{m}$ arasında yayma sayıları birbirlerine yaklaşmakta ve dalga boyu ile belirgin bir değişim görülmemektedir. Burada yayma sayısı 0.9 ile 0.98 arasında bir değer almaktadır. $10 \mu\text{m}$ 'den sonra genelde yayma sayısında bir düşme gözlemlenmektedir. Ancak bu düşme bazı numunelerde (N1, N2 ve N3) çok belirginken bazılarında daha az (N4) bazılarında ise (N5, N6 ve N7) hemen hemen yok gibidir. Genelde $18 \mu\text{m}$ den sonra yayma sayıları tekrar artmakta ve ölçüm yapılan en büyük dalga boyunda ($20 \mu\text{m}$) $8 \mu\text{m}$ ile $10 \mu\text{m}$ arasındaki seviyelerine çıkmaktadırlar.

Diğer bütün numunelerde, maksimuma ulaştıktan sonra yayma sayısında bir düşme görülürken N5, N6 ve N7'de bu görülmemektedir. Bu üç numunenin malzemesi aynı olup sadece gözenek çapları farklıdır ve bu bölgede diğer numunelerden ayrılmaktadırlar. Bu sebeple $10 \mu\text{m}$ ile $16 \mu\text{m}$ arasında yayma sayısında görülen düşmede gözenekliliğin belirgin bir etkisinin olmadığı, bunda malzeme cinsinin etkili olduğu sonucuna varmak mümkündür.

Diğer sıcaklıklarda yapılan ölçümlerden de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örnek olarak $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $300 \text{ }^\circ\text{C}$ de elde edilen yayma sayıları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekillerden de görülebileceği gibi bu sıcaklıklarda da yayma sayısının dalga boyu ile değişimi $700 \text{ }^\circ\text{C}$ deki profile çok benzemektedir. Bunu



Şekil 3. 700°C sıcaklıkta ışınım yayma sayısının dalga boyu ile değişimi.



Şekil 4. 500°C sıcaklıkta ışınım yayma sayısının dalga boyu ile değişimi.

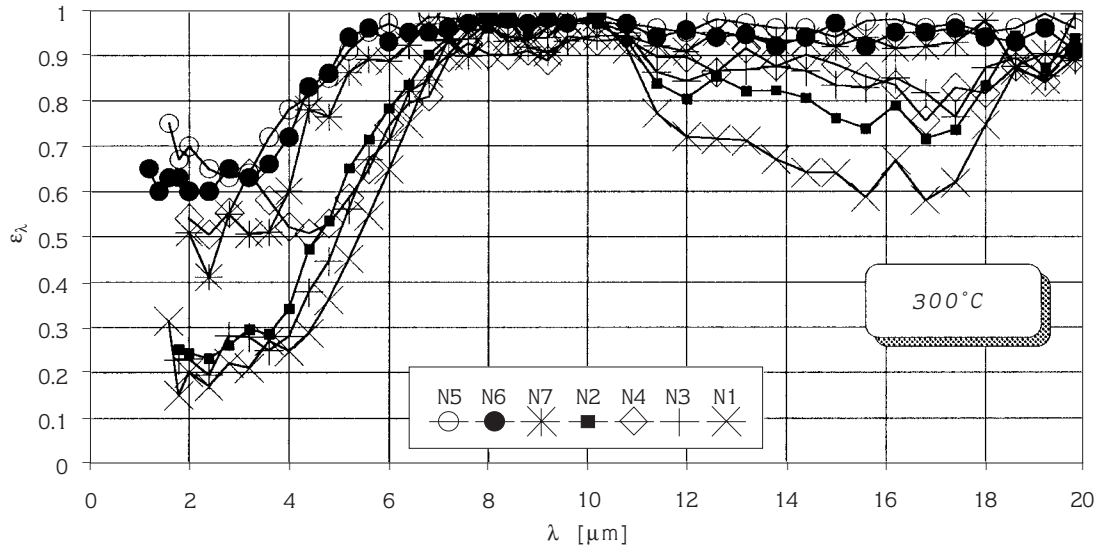
daha iyi görebilmek için, örnek olarak numune N1'den değişik sıcaklıklarda elde edilen yayma sayıları Şekil 6'da verilmiştir. Bu şekilden küçük dalga boyları hariç, sıcaklığın yayma sayısı üzerinde bir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Bu test edilen diğer numuneler için de geçerlidir. Ölçüm yapılan bütün sıcaklıklarda hemen hemen aynı yayma sayıları elde edilmiştir. Ancak yaklaşık 4 μm den düşük dalga boyları için düşük sıcaklıklarda ısı ışınım değerleri (E_λ ve E_λ^*) düşük

olduğundan deneysel belirsizlikler artmakta ve ϵ_λ değerlerinde sapmalar görülmektedir. Bu özellikle 300 $^\circ\text{C}$ de önem kazanmaktadır.

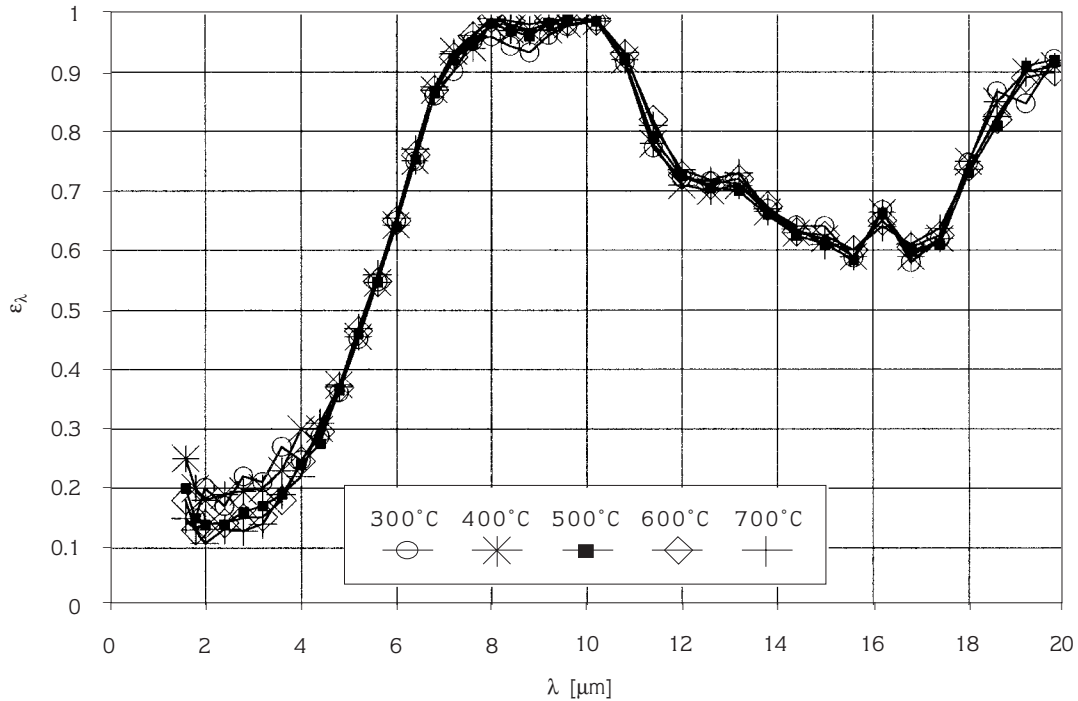
Şekil 7'de bütün numuneler için ölçülen toplam yayma sayılarının (ϵ_t) sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Dalga boyuna bağlı olarak elde edilen yayma sayılarının dağılımı doğal olarak toplam yayma sayısına yansımaktadır. Küçük dalga boylarında numunelerin yayma sayıları arasındaki sıralama aynı şekilde toplam

yayma sayısında da görülmektedir. Numuneler içerisinde en büyük gözenek çapına sahip N5 en yüksek, en küçük gözenek çapına sahip N1 ise en düşük toplam yayma sayısına sahiptir. Diğerleri bu iki

sınır arasında değerler almaktadırlar. N2'nin toplam yayma sayıları ile N4'ün toplam yayma sayıları arasında büyük fark yoktur. Benzer şekilde N3 ve N1'in toplam yayma sayıları birbirine oldukça yakındır. Toplam



Şekil 5. 300°C sıcaklıkta ışınım yayma sayısının dalga boyu ile değişimi.



Şekil 6. Numune N1 için değişik sıcaklıklarda elde edilen yayma sayıları.

yayma sayıları dikkate alındığında, malzemeleri aynı olan ancak gözenek çapları farklı olan N5, N6 ve N7'nin ilk üç sırayı aldığı görülür (Şekil 7).

Şekil 7'den de görüldüğü gibi bütün numunelerde sıcaklığın artmasıyla toplam yayma sayısı azalmaktadır. Genelde 300 °C den yüksek sıcaklıklarda ϵ_t 'nin sıcaklık ile değişimi doğrusaldır ve doğrunun eğimi hemen hemen bütün numuneler için aynıdır. ϵ_t ile sıcaklık (°C) arasında

$$\epsilon_t = a + bT \quad (6)$$

şeklinde bir bağıntı yazılması durumunda, bütün numuneler için b katsayısının yaklaşık 4×10^{-4} olduğu, a katsayısının ise 0.83 ile 1.00 arasında değiştiği görülür (Tablo 1).

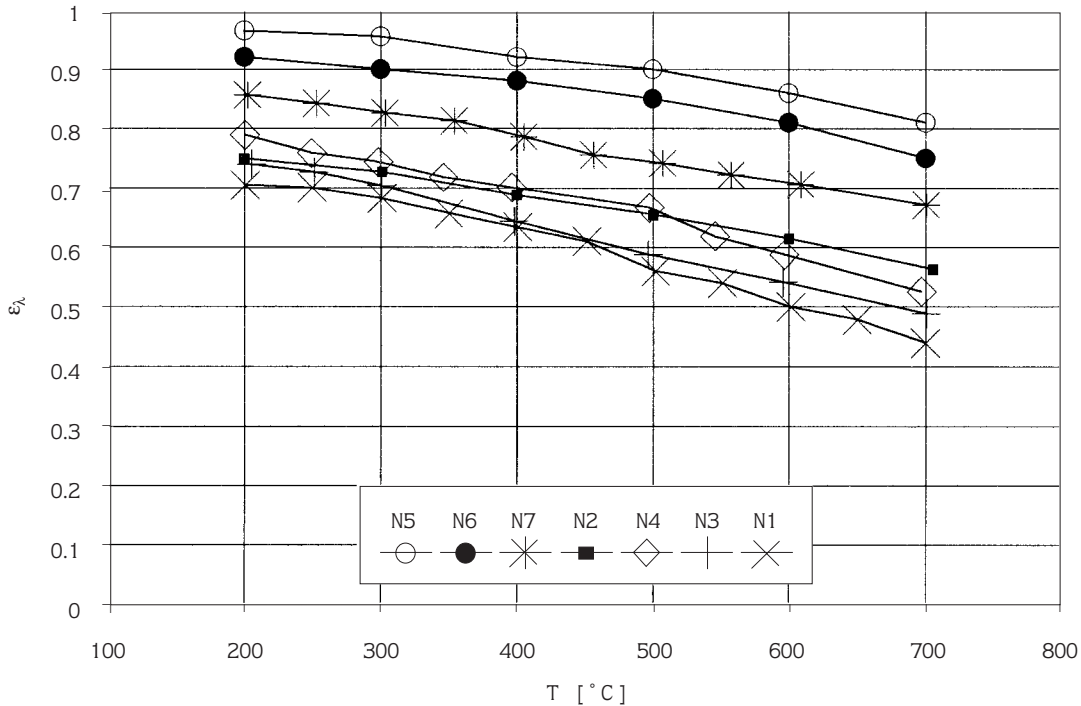
Tablo 1. Eşitlik (6) için a katsayıları.

Numune	a Katsayısı
N1	0.843
N2	0.833
N3	0.854
N4	0.895

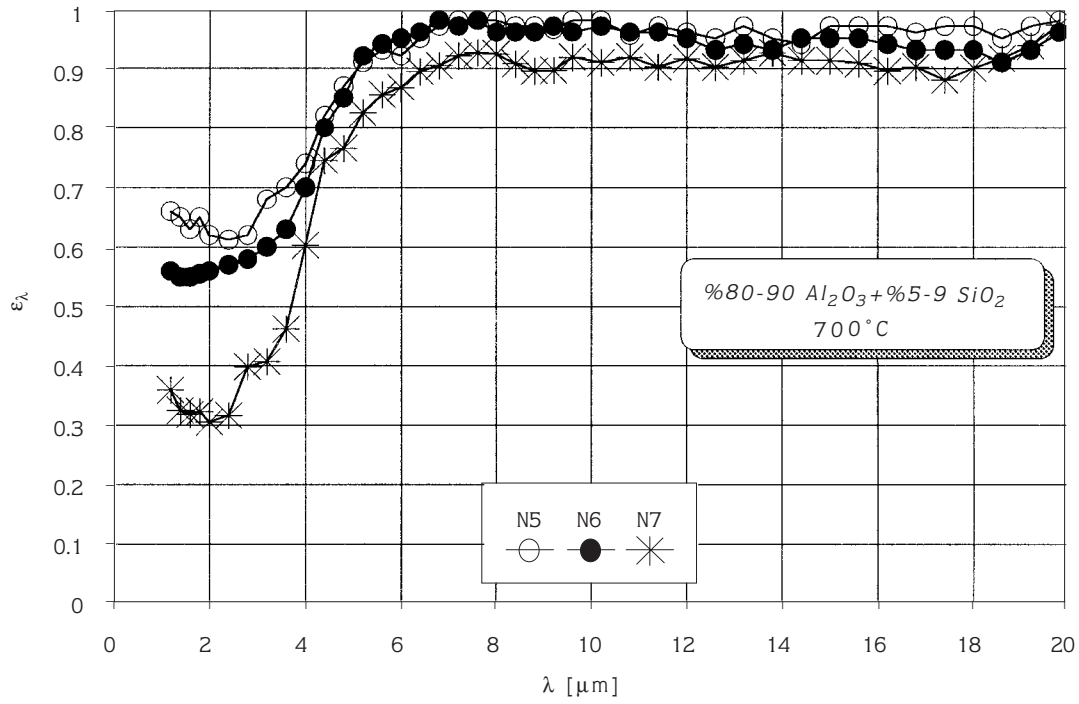
N5	1.000
N6	0.999
N7	0.940

Şekil 7'den genel olarak gözenek çapının artmasıyla toplam yayma sayısının arttığı görülmektedir. Bir malzemenin yayma sayısı, dalga boyu ve sıcaklığın yanında malzemenin cinsi, gözenekliliği ve yüzeyinin yapısına da bağlıdır. Malzeme ve yüzey etkilerini ortadan kaldırarak sadece gözenekliliğin yayma sayısı üzerindeki etkisini görebilmek için aynı malzemeden yapılmış, aynı yüzey özelliklerine sahip (üretildiği haliyle) ancak farklı gözenek yapısındaki (4, 8 ve 12 gözenek/cm) N5, N6 ve N7 numunelerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 8'de 700 °C de bu numuneler için yayma sayısının dalga boyu ile değişimi, Şekil 9'da ise toplam yayma sayısının sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. 4 gözenek/cm olarak sınıflandırılan N5'de yayma sayısı en büyük olurken, 12 gözenek/cm olarak sınıflandırılan N7'de en küçüktür. Buradan gözenek çapının artmasıyla yayma sayısının arttığı sonucunu çıkarmak mümkündür.

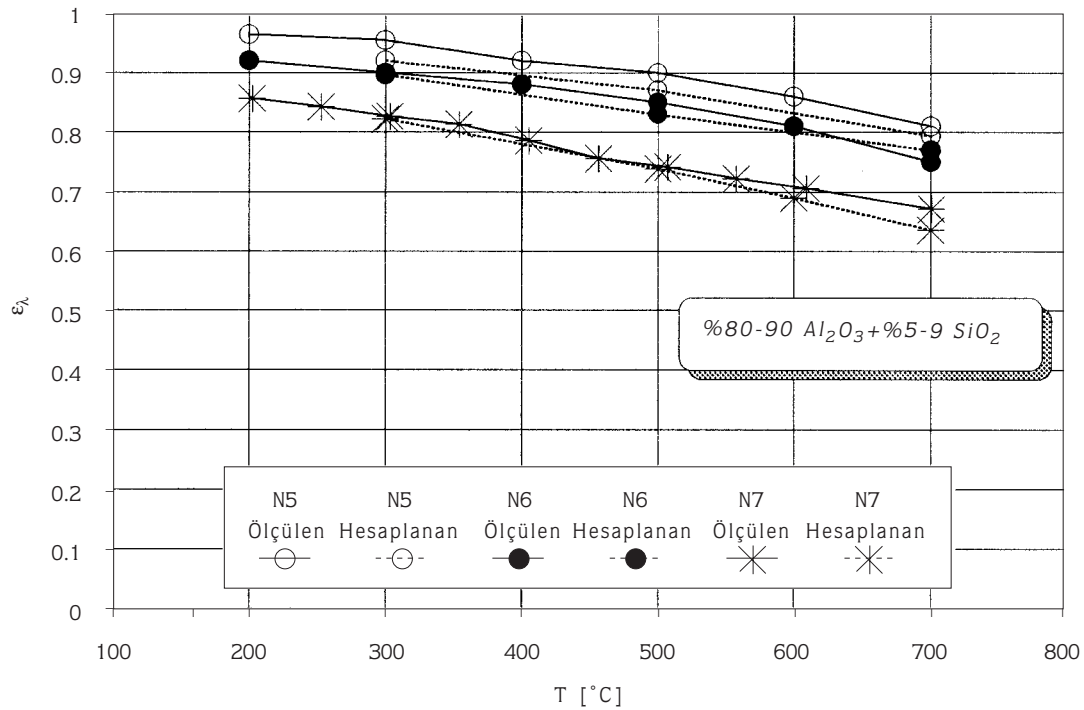
Şekil 9'da, ölçülen toplam yayma sayılarının yanında



Şekil 7. Ölçülen toplam ışınım yayma sayılarının sıcaklıkla değişimi.



Şekil 8. Gözenek büyüklüğünün yayma sayısına etkisi.



Şekil 9. Gözenek büyüklüğünün toplam yayma sayısına etkisi.

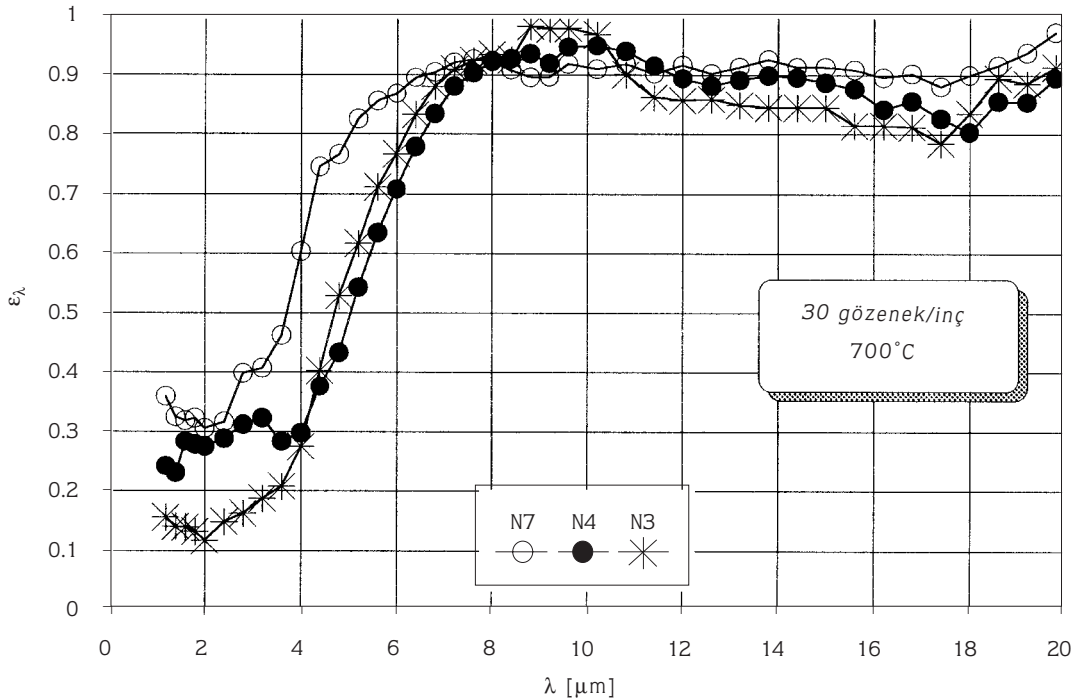
değişik dalga boylarında ölçülen yayma sayılarını kullanarak (5) numaralı eşitlik yardımıyla hesaplanan toplam yayma sayıları da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi hesaplanan değerlerle doğrudan ölçülen değerler arasındaki uyum oldukça iyidir. İkisi arasındaki fark en fazla %6 mertebesinde. Bu, diğer numuneler için de geçerlidir. İki değişik metodla elde edilen sonuçların birbirine yakın olması kullanılan deney düzeneklerinin güvenilirliğini ortaya koymaktadır.

Seramik malzemenin bileşiminin de yayma sayısı üzerinde etkili olduğunu ortaya koyabilmek için aynı gözenekliliğe (12 gözenek/cm) sahip ancak malzemeleri farklı olan N3, N4 ve N7'den elde edilen sonuçlar Şekil 10 ve Şekil 11'de karşılaştırılmıştır. Bu üç numuneden malzemesi %80-90 Al_2O_3 + %5-9 SiO_2 olan N7 en yüksek yayma sayısına sahiptir. Bunu alumina ile sertleştirilmiş zirkonia (N4) ve zirkonia ile sertleştirilmiş alumina (N3) takip etmektedir.

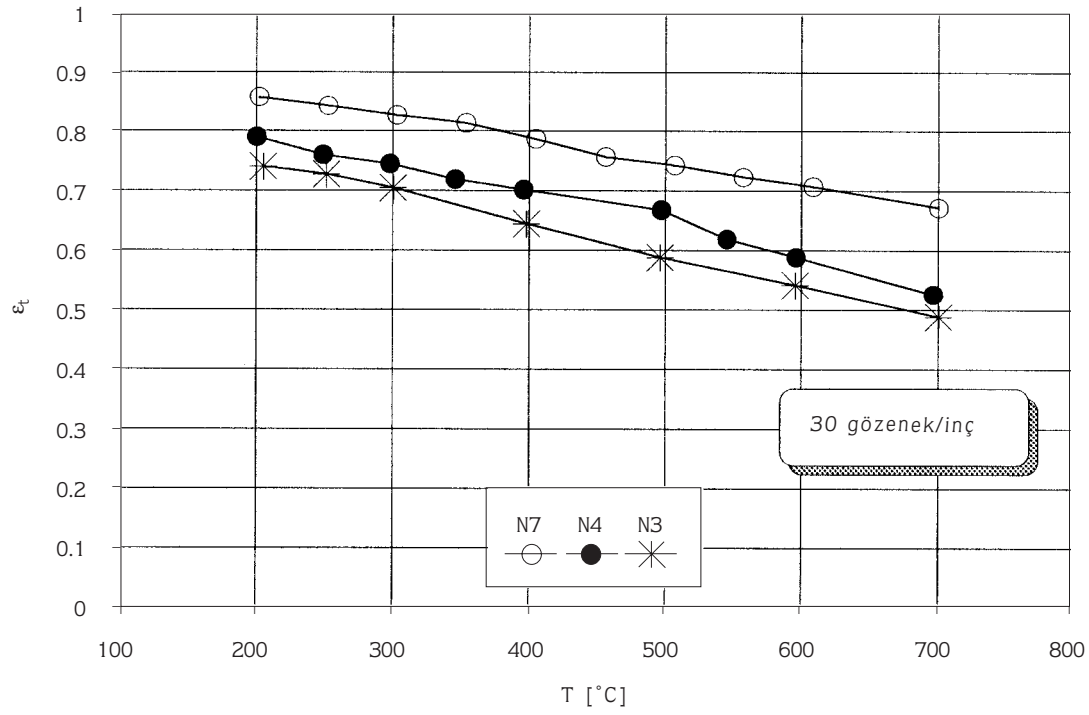
Toplam yayma sayısı basit ısı transferi hesaplarında kullanılan ışınım ile ilgili bir parametredir. Pratikte karşılaşılan cisimlerin büyük çoğunluğu gri cisim özelliğini göstermediğinden bu cisimlerin yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını belirleyebilmek için toplam yayma sayısının yanında yayma sayısının dalga boyu ile değişiminin bilinmesi de önemlidir (Goeckner ve ark., 1992). Bu çalışmada test edilen bazı numunelerde

olduğu gibi, bir cismin toplam yayma sayısı büyük değerler alabilirken, bazı dalga boylarındaki yayma sayıları oldukça düşük olabilmektedir. Örneğin numune N3 ve N1'in toplam yayma sayıları sıcaklığa bağlı olarak 0.7 ile 0.45 arasında değişirken 3 μm den düşük dalga boylarında yayma sayısı 0.1 e kadar düşmektedir.

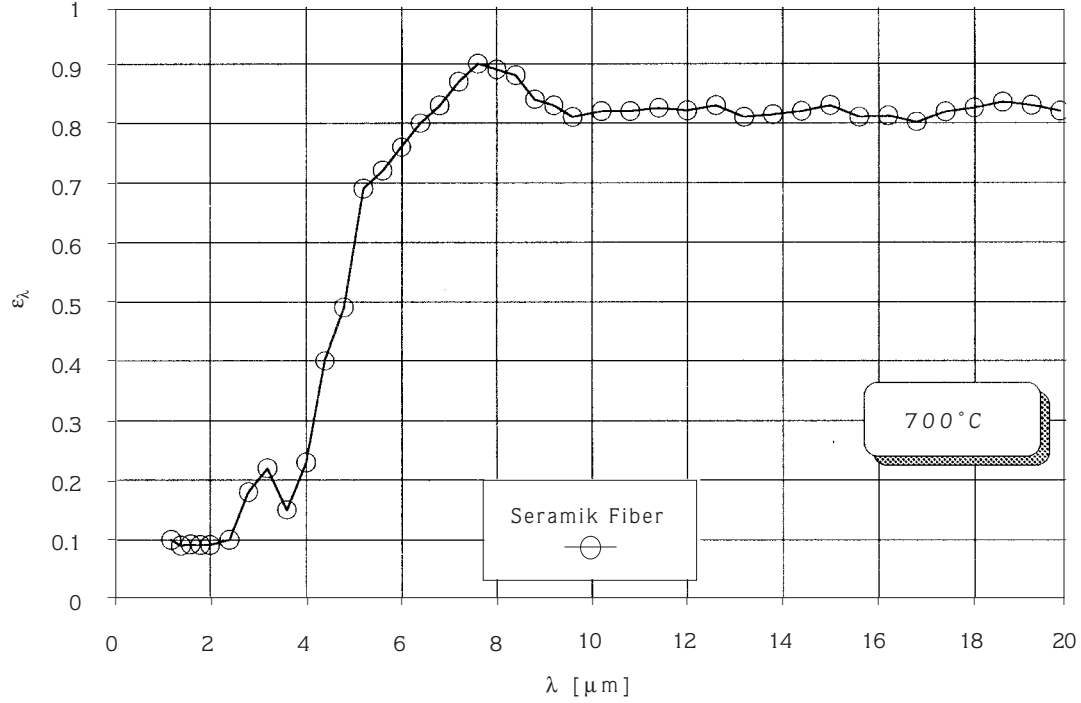
Şekil 12'de ise seramik fiber için 700 °C de değişik dalga boylarında elde edilen yayma sayıları gösterilmiştir. Düşük dalga boylarında yayma sayısı oldukça düşüktür. Gözenekli seramik numunelerde olduğu gibi yaklaşık 4 μm den sonra yayma sayısı hızla artarak 8 μm de bir maksimum oluşturmaktadır. 10 μm de yaklaşık 0.82 seviyesine düşen yayma katsayısı daha büyük dalga boylarında değişmemektedir. Şekil 12'de verilen değerler literatürde seramik fiberler için mevcut bilgilerle uyum içerisindedir. Literatürde değişik seramik fiberlerle yapılmış çalışmalar mevcuttur ve bu çalışmalar (Jackson ve Yen, 1994) yayma sayısının seramik fiber türünden hemen hemen bağımsız olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 13'te ise seramik fiberin toplam yayma sayısı, gözenekli seramiklerin toplam yayma sayısı ile karşılaştırılmıştır. Buradan da görülebileceği gibi seramik fiberin toplam yayma sayısı çok küçük gözenekli numune N1'e çok yakındır. İkisi arasındaki fark deneysel belirsizlikler sınırları



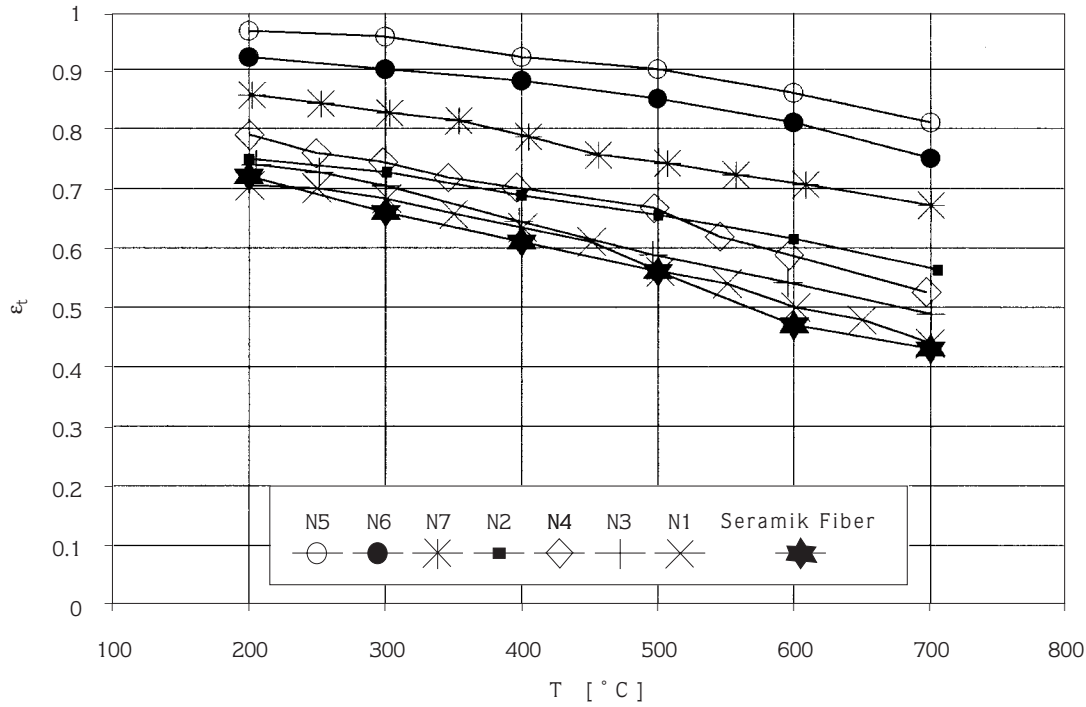
Şekil 10. Malzemenin yayma sayısına etkisi.



Şekil 11. Malzemenin toplam yayma sayısına etkisi.



Şekil 12. Seramik fiber malzemenin yayma sayısının dalga boyu ile değişimi.



Şekil 13. Çeşitli gözenekli seramik malzemelerin ve fiber seramik malzemenin toplam yayma sayılarının karşılaştırılması.

içerisindedir. Ancak seramik fiberin toplam yayma sayısı daha büyük gözenekli numunelerden çok küçüktür. Örneğin en büyük gözenekli numune N5'ten yaklaşık %85, N6'dan %75 ve N7'den %55 daha küçüktür. Bu nedenle fırınlarda seramik fiber yalıtım malzemelerinin yerine gözenekli seramik malzemelerin kullanılmasıyla fırın içi ışınım artacağından fırın ısı veriminde belirli bir artış sağlanabilir. Ancak bunu kesin olarak ortaya koyabilmek için gözenekli seramik malzemelerin gerçek fırınlarda uygulanarak deneylerin yapılması gereklidir.

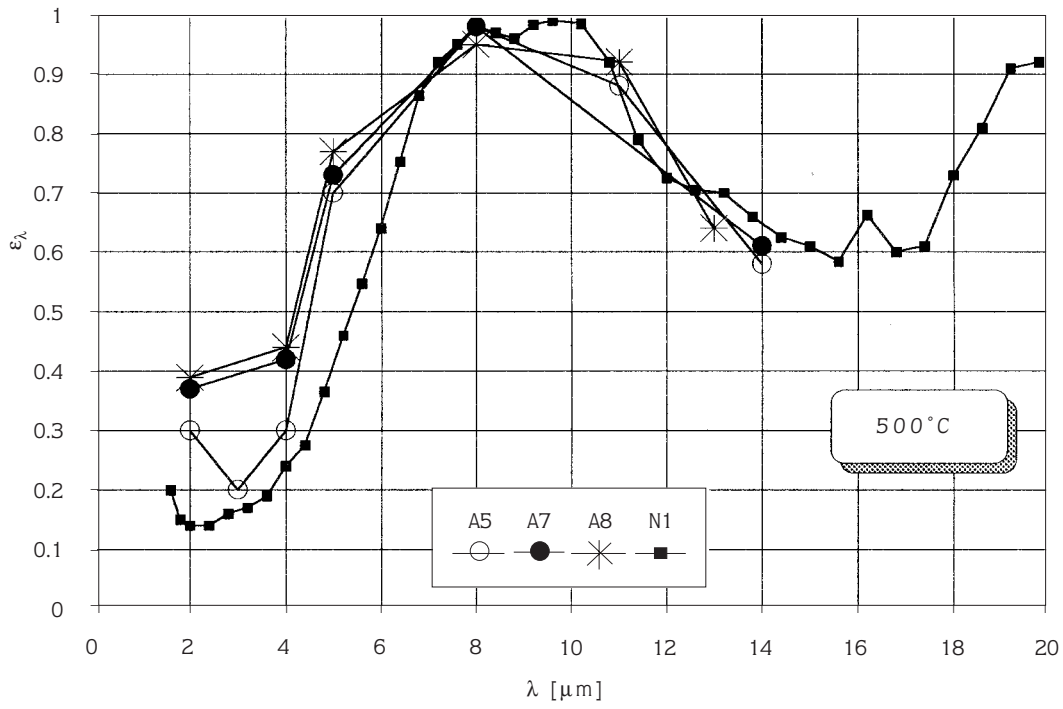
Bu çalışmada sadece numune yüzeyine dik yönde ölçümler yapılmıştır. Ancak buraya kadar verilen bütün sonuçlar ve yapılan tartışmalar tüm yönleri dikkate alan yarı-küresel yayma sayısı için de geçerlidir. Çünkü hemen hemen bütün metal olmayan malzemeler için yarı-küresel yayma sayısının sadece yüzeye dik yöndeki yayma sayısına oranı 1'e çok yakındır (De Witt ve Hernicz, 1972; Siegel ve Howell, 1992; Elich ve Wieringa, 1995). İkisi arasındaki fark daima %6 dan küçük olmaktadır.

Klasik elektromagnetik teori kullanılarak cisimlerin ışınım, optik ve elektrik özellikleri arasında bağıntılar elde etmek mümkündür. Literatürde bu teorinin

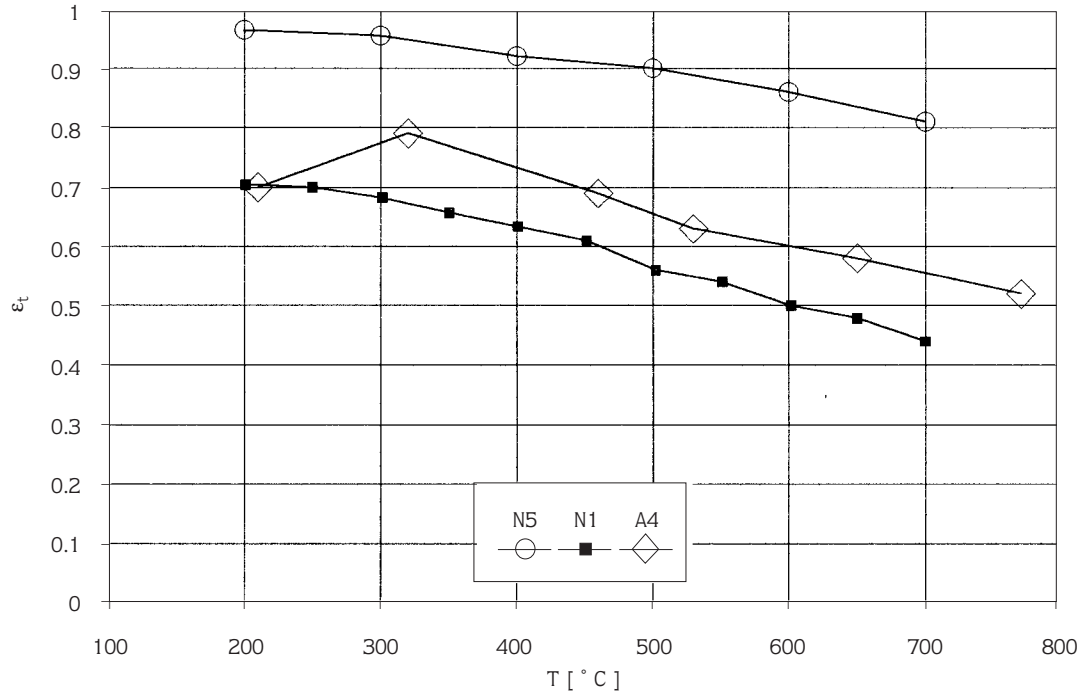
uygulanmasıyla elde edilmiş toplam yayma sayısını veren bazı eşitlikler mevcuttur (Raman ve Thakur, 1982; Siegel ve Howell, 1992). Bu bağıntılarda toplam yayma sayısı, sadece ışınımın yayıldığı ve içerisinde hareket ettiği ortamların kırılma indekslerine bağlı olarak hesaplanmakta, diğer hiçbir parametre dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle bu eşitlikler sadece çok yaklaşık bir tahmin için kullanılabilirler (Siegel ve Howell, 1992). Bu çalışmada kullanılan malzemelerin kırma-kırılma indeksleri bilinmediğinden bu eşitlikleri denemek mümkün olmamıştır.

Sonuç

Değişik numuneler kullanılarak yapılan yayma sayısı ölçümleri bu malzemelerin gri cisim özelliğinden büyük sapmalar gösterdiğini ortaya koymuştur. Yayma sayısı düşük dalga boylarında (4 μm) oldukça düşük olurken, yaklaşık 8 μm de maksimum değerine ulaşmakta ve 10 μm ye kadar bu seviyede kalmaktadır. Daha sonra bazı numunelerin yayma sayısında 18 μm ye kadar bir düşme görülmektedir. Değişik sıcaklıklarda yapılan ölçümler yayma sayısının sıcaklıktan bağımsız olduğunu göstermiştir.



Şekil 14. Çeşitli gözeneksiz seramik malzemelerin yayma sayılarının çok küçük gözenekli seramik malzemenin yayma sayıları ile karşılaştırılması.



Şekil 15. Gözeneksiz ve çok küçük gözenekli seramik malzemenin toplam yayma sayılarının karşılaştırılması.

Toplam yayma sayısı ölçüm yapılan aralıkta (200 °C-700 °C) sıcaklığın artmasıyla düzgün olarak azalmıştır. Bu değişim doğrusal olup, doğrunun eğimi bütün numunelerde hemen hemen aynıdır. Gözenek çapının yayma sayısını büyük oranda etkilediği bulunmuş, gözenek çapının artmasıyla toplam yayma sayısında dikkate değer bir artış görülmüştür. Toplam yayma sayısı en büyük gözenekli numunede maksimum olurken en küçük gözenekli numunede minimum olmuştur. Ayrıca yayma sayısında malzeme bileşiminin de etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Test edilen seramik fiber malzemenin toplam yayma sayısı gözenekli seramiklerden düşük olup en küçük gözenek çapına sahip numunenin toplam yayma sayısına oldukça yakın çıkmıştır.

Değişik dalga boylarında elde edilen yayma sayılarının integrasyonu ile elde edilen toplam yayma sayısının ölçülen toplam yayma sayısına çok yakın olması deney düzeneklerinin güvenilirliğini ortaya koymuştur.

Kaynaklar

- Büyükalaca, O., "Yüksek sıcaklık fırınlarında enerji tasarrufu, I-Klasik yöntemler", Mühendis ve Makina (Yayınlanacak), 1997a.
- Büyükalaca, O., "Yüksek sıcaklık fırınlarında enerji tasarrufu, II-Son gelişmeler", Mühendis ve Makina (Yayınlanacak), 1997b.
- De Witt, D.P. ve Hertz, R.S., "Temperature, It's Measurement and Control in Science and Industry", 41, 459-482, 1972.
- Docherty, P. ve Tucker, R.J., "The Influence of wall emissivity on furnace performance", J. Inst. Energy, 59, 35-37, 1985.
- Elich, J.J.P. ve Wieringa, J.A., "Temperature effects influencing the spectral and total emissivity of refractories", Experimental Thermal and Fluid Science, 10, 318-326, 1995.
- Energy Efficiency Office, "Guide No. 164: Energy Efficient Operation of Kilns in the Ceramic Industries", Energy Efficiency Office, 1996.
- Goekner, B.A., Helmich, D.R., McCarthy, T.A., Arinez, J.M. ve Peard, T.E., "Radiative heat transfer augmentation of natural gas flames in radiant tube burners with porous ceramic inserts", Experimental Thermal Fluid Science, 5, 848-860, 1992.

Semboller

- a, b : Eşitlik (6) daki sabit sayılar
- E_{λ} : Cisim tarafından belirli bir dalga boyunda yayılan ışınım enerjisi [$W/m^2\mu m$]
- E_t : Cisim tarafından yayılan toplam ışınım enerjisi [W/m^2]
- E_{λ}^* : Siyah cisim tarafından belirli bir dalga boyunda yayılan ışınım enerjisi [$W/m^2\mu m$]
- E_t^* : Siyah cisim tarafından yayılan toplam ışınım enerjisi [W/m^2]
- T : Sıcaklık [$^{\circ}C$ veya K]
- ϵ : Yayma sayısı
- λ : Dalga boyu [μm]
- İndisler
- λ : Belirli bur dalga boyunda
- t : Toplam

Hampartsoumian, E., "Spectral emittance measurement of furnace wall materials and coatings", The First International Conference on Ceramics in Energy Applications, Sheffield, UK, 149-157, 1990.

Jackson, J.D. ve Yen, C.C., "Measurements of total and spectral emmissivities of some ceramic fibre insulation materials", Ceramics in Energy Applications Conference, Institute of Energy, 1994.

Moffat, R.J., "Describing the experimental uncertainties in experimental results", Experimental Thermal Fluid Science, 1, 3-17, 1988.

Morrell, R., "Handbook of Properties of Technical and Engineering Ceramics, Part 2: Data Reviews", HMSO Publications, 1987.

Siegel, R. ve Howell, J.R., "Thermal Radiation Heat Transfer, Third Edition", Hemisphere Publishing Co., 1992.

Raman, R. ve Thakur, A., "Thermal emissivity of Materials, Applied Energy", 12, 205-220, 1982.

The European Ceramics Fibres Industry Association, "Code of Practice, Working with Ceramic Fibre", 1989.