

5. RADYASYONLA ISI TRANSFERİ

[\(Ref. e makaleleri\)](#)

Radyasyon, uzayda ışık hızı ile akan enerji olarak düşünülebilir. Bazı tip maddeler elektron bombardımanı, elektrik deşarjı veya belirli dalga boylarındaki ışına maruz kaldıklarında radyasyon çıkarırlar. Bu tip etkilerle oluşan radyasyon kimya mühendisliğini fazla ilgilendirmez. Sıcaklık nedeniyle oluşan radyasyona ısı radyasyonu denir ve ısı transferi konusunda araştırılacak olan bu radyasyon tipidir.

Konunun anlaşılabilmesi için bazı temel kavramların bilinmesi gerekir. Radyasyon, boşluktan düz hatlar veya demetler halinde geçer. Yolu üzerinde bulunan maddeler radyasyonu kısmen veya tamamen yansıtabilir, absorblayabilir ya da değiştirmez.

"Reflektivite, ρ ": radyasyonun bir madde tarafından yansıtılan kesri

"Absorbtivite, α ": radyasyonun bir madde tarafından absorblanan kesri

"Transmissivite, τ ": radyasyonun bir madde tarafından geçirilen kesri

Bunların toplamı 1 e eşittir.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

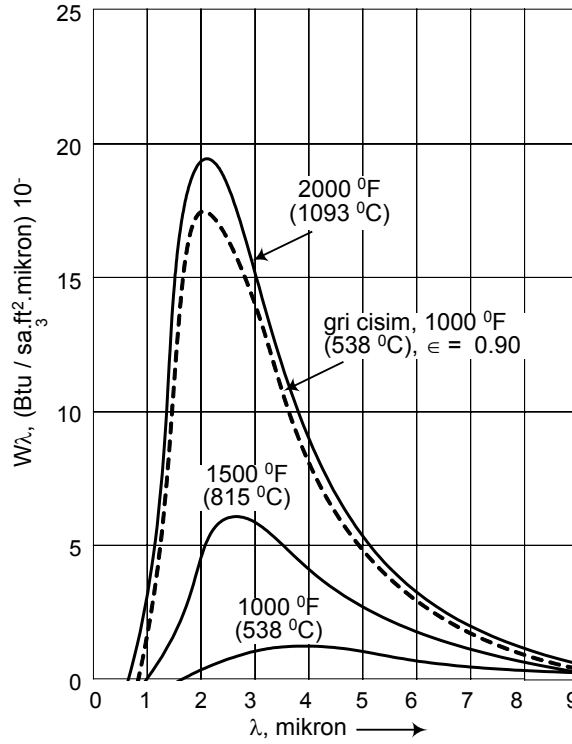
Radyasyon ısı değildir ve absorblanarak ısıya dönüştüğünde de artık radyasyon değildir. Yansıyan veya geçen ışın, çoğu kez başka absorblayıcı birimlerce tutularak ısıya dönüştürülür.

Bir maddenin çıkardığı radyasyon, bir diğerinden çıkandan tamamen bağımsızdır; maddenin kazandığı veya kaybettiği net enerji, absorbladığı radyasyon ile çıkardığı enerji arasındaki farka eşittir. Kondüksiyon veya konveksiyonla ısı akışı da radyasyondan bağımsız olarak gerçekleşir.

Bilinen elektromagnetik radyasyonlar geniş bir dalga boyu aralığını kapsar, 10^{-11} cm dolayındaki kısa kozmik ışınlardan, 1000 m (veya daha uzun) dalga boylarına kadar uzunlukta olabilirler. Tek bir dalga boyundaki radyasyona "monokromatik" adı verilir. Gerçek bir radyasyon demetinde pek çok monokromatik demet bulunur. Sıfırdan sonsuz uzunluğa kadar olan dalga boylarından herhangi biri madde tarafından absorblandığında ısıya dönüşebilir; ancak ısı akışında önemli olan elektromagnetik spektrum 0.5-50 mikron aralığındaki dalga boylarını kapsar. Görünür ışık 0.38 – 0.78 mikron aralığındadır. Endüstride çoğunlukla uygulanan sıcaklıklardaki ısı radyasyonu, infrared spektrumun dalga boylarındadır; bunlar görünür ışığın en uzun dalgala-

rından daha uzundur. 500 °C nin üstündeki sıcaklıklarda, görünür bölgede ısı radyasyonu önemlidir; "kırmızı ısı" ve "beyaz ısı" terimleri, bu amaçla kullanılır. Radyasyon veren maddenin sıcaklığı ne kadar yüksekse, çıkardığı ısı radyasyonunun ağırlıklı dalga boyu o kadar kısadır.

Radyasyon verici bir yüzeyden çıkan monokromatik enerji, yüzeyin sıcaklığına ve radyasyonun dalga boyuna bağlıdır. Sabit yüzey sıcaklığında enerji çıkış (emisyon) hızını, dalga boyunun fonksiyonu olarak gösteren bir eğri olarak çizilebilir. Bu tür tipik eğriler Şekil-20'de görülmektedir. Her eğri kademe kademe bir maksimuma yükselir ve çok yüksek dalga boylarında asimptotik olarak sıfıra düşer. Birim alandan birim zamanda emitlenen monokromatik radyasyona, "monokromatik radyasyon gücü" denir ve W_λ ile gösterilir; W_λ nın birimi Btu/ft².sa.mikron veya cal/cm².sa.mikron dur; Şekil-20'de W_λ ordinat, λ (mikron) absis ekseninde verilmiştir.



Şekil-20: Siyah ve gri cisimlerin spektrumlarında enerji dağılımı (W_λ değerleri, cal/cm².sa.mikron'a çevirmek için 0.271 ile çarpılır)

Bir yüzeyden çıkan radyasyonun tüm spektrum için, toplam radyasyon gücü (W), tüm monokromatik radyasyonların toplamına eşittir.

$$W = \int_0^{\infty} W_{\lambda} d_{\lambda} \quad (2)$$

W , Şekil-20'deki eğrinin altındaki alana eşittir; sıfırdan sonsuza kadar olan dalga boylarını kapsar.

Kirchhoff Kanunu

Bir maddenin radyasyon gücü Kirchhoff Kanunuyla genelleştirilmiştir. Kanuna göre denge sıcaklığında, herhangi bir cismin toplam radyasyon gücü ile absorbtivitesi arasındaki oran, sadece cismin sıcaklığına bağlıdır.

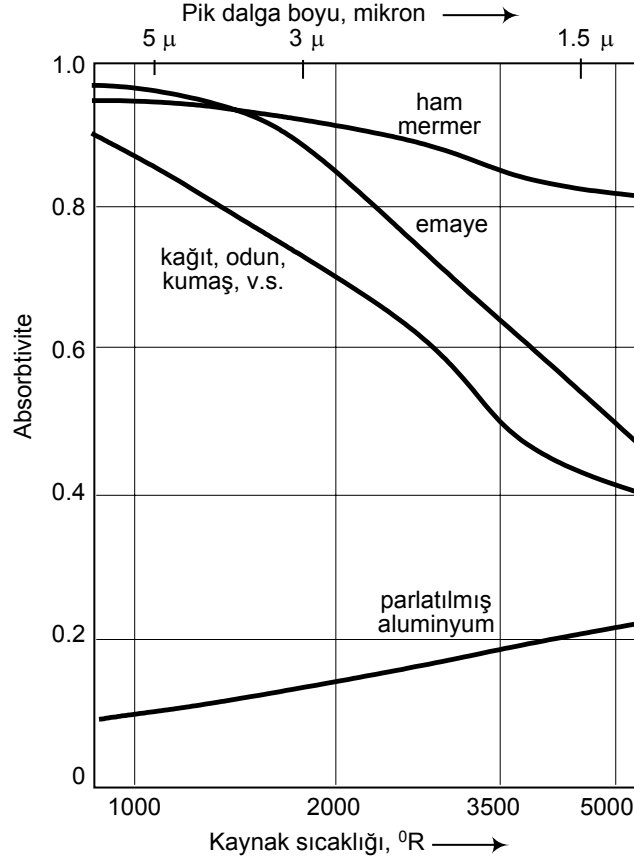
$$\frac{W_1}{\alpha_1} = \frac{W_2}{\alpha_2} \quad (3)$$

eşitliği vardır. W_1 ve W_2 her bir cismin toplam radyasyon gücü, α_1 ve α_2 absorbtiviteleridir. Kanun, monokromatik ve toplam radyasyona uygulanabilir. Gelen radyasyondaki enerji dağılımı radyasyon verici yüzeyin karakterine ve sıcaklığına bağlı olduğundan, alıcı yüzeyin absorbtivitesi de verici yüzeyin bu özelliklerine bağlıdır. Alıcı yüzey gri ise, gelen radyasyonun sabit bir fraksiyonunu, dalga boyuna bağlı olmaksızın absorblar; bu durumda iki yüzey aynı sıcaklıkta olsun veya olmasın Kirchhoff Kanunu uygulanabilir. (Gri cisim, yüzey absorbtivitesi tüm dalga boyları için aynı olan cisimdir.)

Endüstrideki yüzeyler gri değildir ve absorbtiviteleri, gelen radyasyonun doğasına göre değişir. Şekil-21'de çeşitli maddelerin absorbtivitelerinin, gelen radyasyonun pik dalga boyu ve kaynağın sıcaklığıyla değişmesi görülmektedir. Ham mermer gibi griye yakın malzemelerin absorbtiviteleri hemen hemen sabittir. Parlatılmış yüzeyler için absorbtivite α_2 , kaynağın ve yüzeyin mutlak sıcaklıkları T_1 ve T_2 ile aşağıdaki eşitliğe göre yükselir.

$$\alpha_2 = k_1 \sqrt{T_1 T_2} \quad (4)$$

k bir sabittir. Çoğu yüzeylerin absorbtiviteleri, kağıt, odun, kumaş, v.s. de olduğu gibi bir eğri gösterirler; kaynağın sıcaklığı yükseldikçe absorbtivite düşer.



Şekil-21: Çeşitli katı maddelerin kaynak sıcaklığı ve gelen radyasyonun pik dalga boyuna karşı absorbtiviteyi

Siyah Cisim

En yüksek absorbtivite değeri 1'dir ve bu değere, bir cismin gelen radyasyonun (yansıtma ve geçirme olmaksızın) tümünü absorblaması durumunda ulaşılır. Böyle bir cisme "siyah cisim" denir. Kirchhoff Kanuna göre, siyah bir cisim, herhangi bir sıcaklıkta ulaşılacak en yüksek radyasyon gücüne sahiptir.

Bir cismin "emissivitesi (ϵ , radyasyon çıkarması)", cismin toplam radyasyon gücünün, aynı sıcaklıktaki siyah bir cisminkine oranıdır. Siyah cisim 1 ile gösterilirse, Denklem(3) te $\alpha_1 = 1$ dir ve,

$$W_1 = W_b = \frac{W_2}{\alpha_2} \quad (5)$$

W_b , siyah bir cismin toplam radyasyon gücüdür.

$$\alpha_2 = \frac{W_2}{W_b} \quad (5)$$

Bu eşitlik, yukarıdaki tanıma göre, ikinci cismin emissivitesi ϵ_2 dir. Bu durumda,

$$\epsilon_2 = \frac{W_2}{W_b} = \alpha_2 \quad (7)$$

Çevresiyle denge sıcaklığında bulunan herhangi bir cismin emissivitesi ve absorbtivitesi birbirine eşittir.

a. Yüzeyler Arasında Radyasyon

Alanı A_1 , emissivitesi ϵ_1 ve mutlak sıcaklığı T_1 olan opak bir cismin birim alanından çıkan toplam radyasyon,

$$\frac{q}{A_1} = \sigma \epsilon_1 T_1^4 \quad (8)$$

eşitliğiyle tarif edilir. σ , sadece T ve W_b nin birimlerine bağlı universal bir sabittir. Nümerik değeri $0.1713 \times 10^{-8} \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{sa.}^\circ\text{R}^4$ (veya $0.4877 \times 10^{-8} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sa.}^\circ\text{K}^4$) tür. Maddeler, mutlak sıfır sıcaklıktaki boşluklara radyasyon vermezler. Normal halde, herhangi bir cisimden çıkan enerji, cismin gördüğü ve kendileri de birer radyasyon yayıcı olan diğer maddeler tarafından kesilir; bunlardan çıkan radyasyon cismin üzerine düşer, absorblanır veya yansıtılır.

Örneğin, bir odada bulunan bir buhar hattı, odanın duvarı, döşemeleri ve tavanı ile çevrelenmiştir ve bu malzemelerin hepsi boruya radyasyon verir. Boru, çevresinden absorbladığından daha fazla enerji kaybettiği halde, radyasyonla olan net kayıp, Denklem(8) ile hesaplanan değerden daha düşüktür.

İki yüzey sadece birbirini görüyorsa ve ikisi de siyahsa, aralarındaki radyasyon en basit tiptedir (Şekil-22a). Birinci düzlemden çıkan enerji, σT_1^4 tür. Herbir yüzeyden çıkan tüm radyasyon, diğer yüzey üzerine düşer ve tümüyle absorblanır; böylece birinci düzlemin kaybettiği net enerji ve ikinci düzlemin kazandığı net enerji ($T_1 > T_2$ ise),

$$\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4 \text{ veya } \sigma (T_1^4 - T_2^4) \text{ cal/cm}^2 \text{ sa (veya Btu/ft}^2 \text{.sa) tir.}$$

Gerçek mühendislik problemleri bu basit örnekten iki bakımdan ayrılır: (1) Yüzeylerden biri veya her ikisi de birbirinden başka yüzeyleri görür: konkav yüzeyli bir element kendi yüzeyinin bir kısmını da görür. (2) Tam siyah yüzey gerçekte yoktur ve yüzeylerin emissivitelerinin de dikkate alınması gerekir.

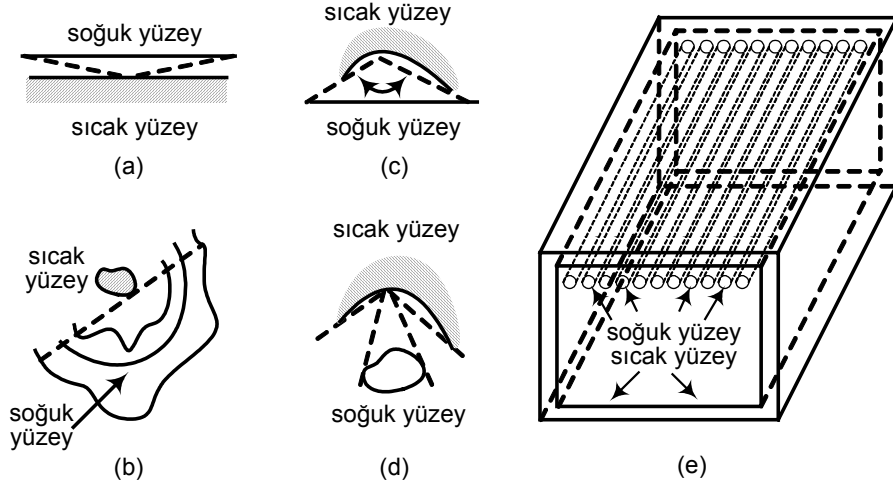
Görüş Açısı

Bir yüzeyin bir alan elementinden çıkan ışının, diğer bir yüzey tarafından kesilmesi (durdurulması) "görüş açısı" terimiyle tanımlanır. Matematiksel açı bir yarım küreyle tanımlanır ve 2π radyandır; bu değer en yüksek görüş açısı değeridir. Görüş açısı 2π den daha yüksek olduğunda, alan elementinden çıkan radyasyonun sadece bir kısmı alıcı alan tarafından durdurulur, kalan kısım açının görüşündeki diğer yüzeyler tarafından absorblanır.

Şekil-22'de radyasyon verici bir kaç tip yüzey görülmektedir. (Şekil-22a) İki büyük paralel düzlem birbirine 2π radyanlık görüş açısındadırlar. Her levhadan olan ışın, diğeri tarafından durdurulur. (Şekil-22b) Sıcak cisim üzerindeki bir nokta, sadece soğuk yüzeyi görür ve görüş açısı gene 2π radyandır. Soğuk yüzeyin elementleriye daha fazla kısım görür (soğuk yüzeyin diğer kısımlarını) ve sıcak kısım için görüş açısı 2π radyandan küçüktür; dolayısıyla "kendini absorblama" etkisi vardır.

Bu etki Şekil-22(c)'de de görülür. (Şekil-22c) Sıcak yüzeyin bir elementinin soğuk yüzey tarafından belirlenen görüş açısı küçüktür. (Şekil-22d) Soğuk yüzey sıcak yüzeyde küçük bir açı belirler. Sıcak yüzeyden gelen radyasyon kütesinin çoğu belirsiz yerlere geçer. (Şekil-22e) Burada basit bir fırın görülmektedir. Sıcak kaynaktan (veya tabandan) çıkan radyasyon, kısmen fırının üst kısmındaki tüp dizileri tarafından, kısmen de refraktör duvarlar ve tüplerin arkasındaki refraktör tavan tarafından tutulur. Bu tür sistemlerdeki refraktörün, enerjii aynı hızla absorbladığı ve emittediği kabul edildiğinden, refraktördeki net enerji etkisi sıfırdır. Refraktör tavan, tüpler arasından geçen enerjii absorblar ve sonra tekrar tüplere gönderir.

Küçük bir yüzeyden çıkan ve büyük bir yüzey tarafından durdurulan enerjinin miktarı sadece görüş açısına bağlıdır, fakat yüzeyler arasındaki mesafeden etkilenmez. Alıcı yüzeyin birim alanına düşen enerji, yüzeyler arasındaki mesafenin karesiyle ters orantılıdır.



Şekil-22: Radyant ısı akışında görüş açısı

Siyah Yüzeyler Arasındaki Radyasyonun Kantitatif Hesabı

Aşağıdaki modelde görüldüğü gibi, diferensiyel alan elementleri dA_1 ve dA_2 olan iki düzlem düşünelim. A_1 ve A_2 alanlarının bu iki elementer yüzeyi arasındaki net radyasyon değişimi dq_{12} , dA_1 ve dA_2 yüzeylerinin mutlak sıcaklıkları T_1 ve T_2 ile gösterildiğinde,

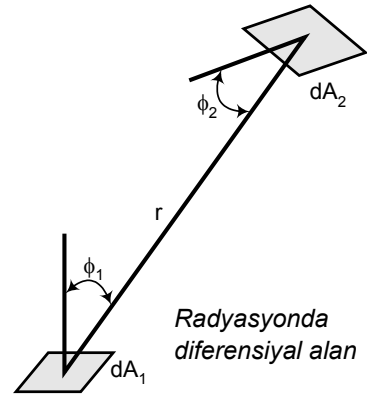
$$dq_{12} = \sigma \frac{\cos \phi_1 \cos \phi_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

eşitliği ile verilir. Buradaki ϕ_1 ve ϕ_2 , her bir yüzeye normal olan doğru ile alanları birleştiren doğru (r) arasındaki açılardır, σ , Stefan-Boltzman sabitini gösterir.

Denklem(9)un integrasyonu ile aşağıdaki denklem elde edilir.

$$q_{12} = \sigma A F (T_1^4 - T_2^4) \quad (10)$$

A = iki yüzeyden birinin alanı, F = boyutsuz faktördür; buna görüş veya açı faktörü denir. F nin değeri iki yüzeyin geometrisine, birbiriyle



ilişkisine ve A için seçilen yüzeye bağlıdır. A için A_1 veya A_2 yüzeylerinin alınması halinde q_{12} aşağıdaki şekillerde yazılır.

$$q_{12} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (11)$$

$$q_{12} = \sigma A_2 F_{21} (T_1^4 - T_2^4) \quad (12)$$

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (13)$$

F_{12} faktörü, A_1 alanından çıkan ve A_2 alanı tarafından durdurulan radyasyonun kesrine aittir. A_1 yüzeyi sadece A_2 yüzeyini görüyorsa $F_{12} = 1$ dir. A_1 yüzeyinin başka yüzeyleri de görmesi durumunda ise,

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} + \dots = 1.0 \text{ olur.}$$

F_{11} , A_1 yüzeyinin kendine ait diğer kısımları da gördüğünde bir değer taşır, A_1 yüzeyi sadece başka yüzeyleri görüyorsa, F_{11} ile bağıntılı net radyasyon sıfırdır.

Bazı hallerde görüş faktörü çok kolay hesaplanır. Alanı A_2 olan küçük bir siyah cisim, A_1 alanındaki büyük bir siyah yüzey ile sarılmışsa, A_2 alanı A_1 den başka yüzey göremeyeceğinden $F_{21} = 1$ dir. Bu durumda F_{12} faktörü Denklem(13)den kolayca bulunur.

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21}$$

$$F_{12} = \frac{A_2 \times 1}{A_1} = \frac{A_2}{A_1}$$

$$F_{11} + F_{12} = 1 \quad \text{olması gerektiğinden,}$$

$$F_{11} = 1 - F_{12} = 1 - \frac{A_2}{A_1} = \frac{A_1 - A_2}{A_1}$$

Üç duvarı da farklı sıcaklıkta olan üçgen kesitli bir kanal örneğinde ise, duvarlar kendilerine ait kısımları görmezler; faktörleri aşağıdaki eşitliklerle verilir.

$$F_{12} = \frac{A_1 + A_2 - A_3}{2 A_1}$$

$$F_{13} = \frac{A_1 + A_3 - A_2}{2 A_1}$$

$$F_{23} = \frac{A_2 + A_3 - A_1}{2 A_2}$$

Şekil-23'de karşı karşıya duran, birbirinin aynı iki paralel düzlemin F faktörleri görülmektedir. 1 disklere, 2 karelere, 3 dikdörtgenlere (uzunluk/genişlik = 2/1), 4 hattı ise dar ve uzun dikdörtgenlere aittir. Her durumda F, (düzlemin kenarı veya çapı)/(düzlemler arası mesafe) oranına bağlıdır. Bir refraktör tabakası, tüpler arasından geçen enerjiyi absorblar ve tekrar tüp dizilerine gönderir; bu durumda F faktörleri tüplerin absorbladığı radyasyonu gösterir ve refraktör duvara eşit bir paralel alanın absorbladığı enerji kesri olarak hesaplanır (Şekil-24).

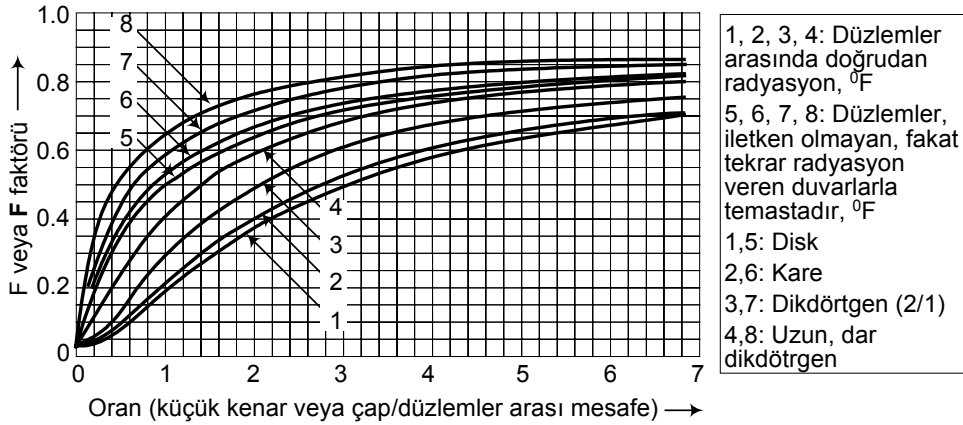
Kaynak ve tüpler Şekil-22(e)'deki gibi refraktör duvarlarla çevrilmişse, F yerine "değişme faktörü" denilen F alınır, Denklem(11) ve (12) aşağıdaki şekilde yazılır.

$$q_{12} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) = \sigma A_2 F_{21} (T_1^4 - T_2^4) \quad (14)$$

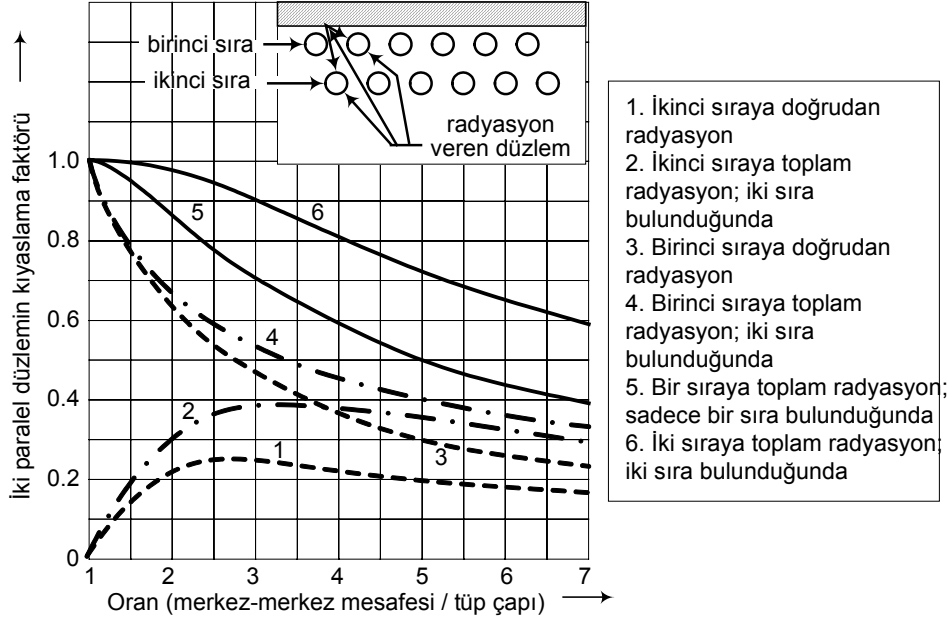
Şekil-23'deki 5-8 hatları, refraktör duvarlara bağlı olan ve karşı karşıya konulmuş paralel düzlemlere aittir. 5 hattı disklere, 6 hattı karelere, 7 hattı dikdörtgenlere (2/1), ve 8 hattı dar-uzun dikdörtgenlere uygulanır. F nin F cinsinden ifadesi,

$$F_{12} = \frac{A_2 - A_1 F_{12}^2}{A_1 + A_2 - 2A_1 F_{12}} \quad (15)$$

Bu eşitlik A_1 ve A_2 alanlarının kendilerini görmedikleri, 1 kaynak ve 1 tabaka boru sırası olan sistemler için doğrudur. Refraktör yüzeyin sıcaklığı sabit kabul edilmiştir; refraktörün sıcaklığı, kaynak ve boru sisteminin sıcaklıkları arasındadır.



Şekil-23: Karşı karşıya duran paralel diskler, dikdörtgenler ve kareler arasında görüş faktörü ve değişim faktörü



Şekil-24: Paralel düzlem ve tüp dizileri arasındaki görüş faktörü ve değişim faktörü

Siyah Olmayan Yüzeyler

Siyah olmayan yüzeyler arasındaki radyasyon işlemleri oldukça karmaşıktır; absorbtivite ve emissivite birbirine eşit değildir ve her ikisi de gelen ışının dalga boyuna ve açısına bağlı olarak değişir.

Basit bir örnek küçük bir cismin, siyah bir cisim ile sarıldığı durumdur. Cismin alanı A_1 , siyah cisminki A_2 , sıcaklıkları T_1 ve T_2 olsun. A_2 yüzeyinden çıkan $\sigma A_2 F_{21} T_2^4$ değerindeki radyasyon A_1 üzerine düşer. Bunun A_1 in absorbtivitesine eşit olan α_1 fraksiyonu dışında kalan kısmı tekrar siyah çevreye yansır ve tümü A_2 alanı tarafından geri absorblanır. A_1 yüzeyi $\sigma \epsilon_1 A_1 T_1^4$ değerinde radyasyon verir; ϵ_1 , A_1 yüzeyinin absorbtivitesidir. Bu ışının hepsini A_2 yüzeyi absorblar. ϵ_1 ve α_1 genel olarak eşit değildirler, çünkü iki yüzeyin sıcaklıkları farklıdır. A_1 yüzeyinin net enerji kaybı,

$$q_{12} = \sigma \epsilon_1 A_1 T_1^4 - \sigma A_2 F_{21} \alpha_1 T_2^4 \quad (16)$$

Denklem(13) e göre $A_2 F_{21} = A_1$ olduğundan,

$$q_{12} = \sigma A_1 (\epsilon_1 T_1^4 - \alpha_1 T_2^4) \quad (17)$$

A_1 yüzeyi gri ise, $\epsilon_1 = \alpha_1$ olacağından,

$$q_{12} = \sigma A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (18)$$

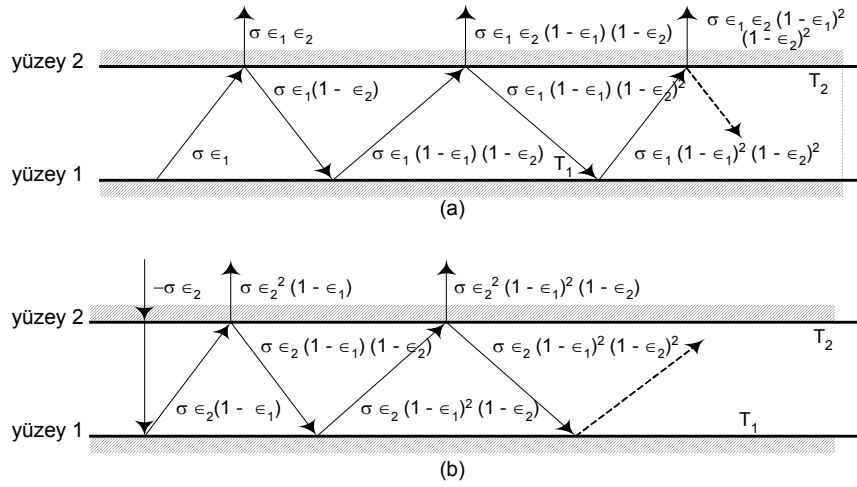
Gri yüzeyler için Denklem(11) ve (12) doğru olduğundan,

$$q_{12} = \sigma A_1 F^*_{12} (T_1^4 - T_2^4) = \sigma A_2 F^*_{21} (T_1^4 - T_2^4) \quad (19)$$

F^*_{12} ve F^*_{21} , ϵ_1 ve ϵ_2 ye bağlı toplam değişme faktörleri denir.

Basit durumlarda F^* faktörleri doğrudan hesaplanabilir. Örneğin, Şekil-25'de görüldüğü gibi T_1 ve T_2 mutlak sıcaklıklarındaki büyük iki gri paralel levha düşünelim; bunların emissiviteleri, sırasıyla ϵ_1 ve ϵ_2 olsun. 1 numaralı yüzeyin birim alanından ışınan enerji $\sigma T_1^4 \epsilon_1$ dir. Bu enerjinin bir kısmı 2 numaralı yüzey tarafından absorblanırken, bir kısmı da yansıtılır.

Absorblanan miktar = $\sigma T_1^4 \epsilon_1 \epsilon_2$ (Şekil-25a)



Şekil-25: Büyük gri paralel levhalar için toplam değişme faktörü; (a) 1 yüzeyinden çıkan ve 2 yüzeyi (birim alanı) tarafından absorblanan enerji, (b) 2 yüzeyinden çıkan ve yine 2 yüzeyi tarafından tekrar absorblanan enerji

Yansıyan ışının bir kısmı 1 yüzeyi tarafından absorblanırken bir kısmı yeniden 2 yüzeyine yansıtılır.

$$\text{Yeniden yansıtılan miktar} = \sigma T_1^4 \epsilon_1 \epsilon_2 (1 - \epsilon_1) (1 - \epsilon_2)$$

Peşpeşe meydana gelen yansımalar ve absorpsiyonlar sonucu aşağıdaki eşitlik elde edilir; bu eşitlik, 1 yüzeyinden çıkan radyasyonun 2 yüzeyi tarafından absorblanan toplamını verir.

$$q_{1 \rightarrow 2} = \sigma T_1^4 \epsilon_1 \epsilon_2 [1 + (1 - \epsilon_1) (1 - \epsilon_2) + (1 - \epsilon_1)^2 (1 - \epsilon_2)^2 + \dots]$$

2 Numaralı yüzeyden çıkan bir miktar enerji (Şekil-25b) 1 yüzeyinden yansır ve 2 yüzeyine dönerken, bir kısmı da absorblanır. Bu enerjinin birim alana düşen miktarı,

$$q_{2 \rightarrow 2} = -\sigma T_2^4 [\epsilon_2 - \epsilon_2^2 (1 - \epsilon_1) - \epsilon_2^2 (1 - \epsilon_1)^2 (1 - \epsilon_2) - \dots]$$

Yüzey 2 nin birim alanı tarafından absorblanan toplam enerji,

$$q_{12} = q_{1 \rightarrow 2} + q_{2 \rightarrow 2} = \sigma T_1^4 \epsilon_1 \epsilon_2 [1 + (1 - \epsilon_1) (1 - \epsilon_2) + (1 - \epsilon_1)^2 (1 - \epsilon_2)^2 + \dots] - \sigma T_2^4 [\epsilon_2 - \epsilon_2^2 (1 - \epsilon_1) - \epsilon_2^2 (1 - \epsilon_1)^2 (1 - \epsilon_2) - \dots]$$

$$x = (1 - \epsilon_1) (1 - \epsilon_2)$$

$$q_{12} = \sigma T_1^4 \epsilon_1 \epsilon_2 (1 + x + x^2 + \dots) - \sigma T_2^4 [\epsilon_2 - \epsilon_2^2 (1 - \epsilon_1) (1 + x + x^2 \dots)]$$

$$1 + x + x^2 \dots = \frac{1}{1 - x} \text{ olduğundan,}$$

$$q_{12} = \sigma T_1^4 \epsilon_1 \epsilon_2 \frac{1}{1 - x} - \sigma T_2^4 [\epsilon_2 - \epsilon_2^2 (1 - \epsilon_1) \frac{1}{1 - x}]$$

$$F_{12}^* = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1}$$

Bir gri yüzeyin bir diğeri tarafından tamamen sarıldığı durumda F_{12}^* faktörü aşağıdaki şekli alır.

$$F_{12}^* = \frac{1}{1/\epsilon_1 + A_1/A_2 (1/\epsilon_2 - 1)}$$

$$F_{12}^* = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1}$$

Bir gri yüzeyin bir siyah yüzey tarafından sarıldığı durumda $\epsilon_2 = 1$, $F_{12}^* = \epsilon_1$ dir.

Gri yüzeyler için, genellikle, toplam değişme faktörü aşağıdaki eşitlikten hesaplanır; ϵ_1 v ϵ_2 , kaynağın ve absorblayıcının emissiviteleridir. Herhangi bir refraktör bulunmaması halinde F yerine F kullanılır.

$$F_{12}^* = \frac{1}{1/F_{12} + (1/\epsilon_1 - 1) + A_1/A_2 (1/\epsilon_2 - 1)}$$

Gaz Radyasyonunda Geometrinin Etkisi

Kapalı bir sistemin yüzeyine ışıyan gazdan transfer hızı, sistemin geometrisine ve gazın kısmi basıncına (p_g) bağlıdır. Genel olarak, bir gazın belirli bir miktarının emissivitesi, ortalama ışın uzunluğu (L) ile değerlendirilmelidir; bu ise sistem geometrisinin bir özelliğidir. L uzunluğu birkaç özel konum için hesaplanabilir. Düşük p_g L değerleri için, $L = 4 V / A$ eşitliğiyle verilir; buradaki V = ışıyan gazın hacmi, A = sistemin toplam yüzey alanıdır. Orta p_g L değerleri için, L değeri, p_g L = 0 olduğundaki değerin 0.85 – 0.90 katıdır. Aşağıdaki tabloda bazı geometriler için L değerleri verilmiştir.

Tablo: Sistemin Tüm Yüzey Alanına Gaz Radyasyonunda Ortalama Işın Uzunlukları

| Sistemin Şekli | Ortalama Işın Uzunluğu, L | |
|---|---------------------------|---------------------------------|
| | p_g L = 0 olduğunda | Ortalama p_g L değerleri için |
| Küre, çap = D | 0.067 D | 0.60 D |
| Sonsuz silindir, çap = D | D | 0.90 D |
| Düz dairesel silindir, yükseklik = çap = D | 0.067 D | 0.60 D |
| Küp, kenar = D | 0.067 D | 0.057 D (CO ₂) |
| Sonsuz paralel düzlemler, aralarındaki mesafe = D | 2 D | 1.7 D (H ₂ O) |
| | | 1.54 D (CO ₂) |

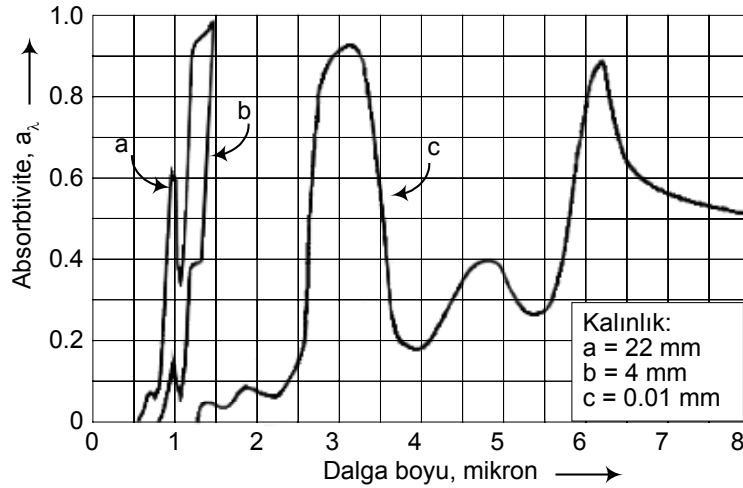
b. Yarı Geçirgen Malzemelerin Radyasyona Davranışı

Endüstride kullanılan pek çok malzeme radyant enerjiyi kısmen geçirir. Cam ve bazı plastikler, ince sıvı tabakaları, pek çok gaz ve buhar yarı-geçirgen maddelerdir. Bunların geçirgenlikleri (transmissivite) ve absorbtiviteleri, radyasyonun geçtiği yola ve demetin dalga boyuna bağlıdır.

Katı veya Sıvı Tabakalarına Radyasyonun Etkisi

Sıvı ve katı tabakalar kalın olduğunda opaktır ve içlerinden geçen radyasyonun tümünü absorblar. İnce tabakalar halindeki sıvıların pek çoğu ve katıların bazıları gelen radyasyonun bir kısmını absorblar, kalanını geçirir; miktarlar, gelen ışının dalga boyuna ve tabakanın kalınlığına bağlıdır. İnce bir su tabakasının absorbtivitesinin kalınlık ve dalga boyuna göre değişimi Şekil-26'da görülmektedir. Çok ince tabakalar (0.01 mm) 1-8 mikron arasındaki dalga boylarının çoğunu geçirirken, 3 ve 6 mikronlarda keskin absorbsiyon pikleri verir. Birkaç mm kalınlığındaki tabakalar, görünür ışığa (0.38-0.78 mikron) karşı yine de geçirendir, fakat 15 mikrondan büyük dalga boylarındaki enerjilerin tümünü absorblar; ısı transferi yönünden su tabakalarının absorbtivitesi 1.0 kabul edilir.

İnce plastik filmler gibi katı tabakalar da benzer davranışlar gösterir. Keza cam, kısa dalga boylarına karşı geçirgen, uzun dalga boylarına karşı opaktır. Bu özellik "sera (limonluk) etkisi" denilen durumu yaratır; cam duvarla çevrilmiş bir malzeme güneş ışığı altında, çevresine göre daha fazla ısınır. Güneşin yüzeyi 12500 °C dolayındadır ve çıkan radyasyonun çoğu kısa dalga boyludur; camdan kolayca geçer. Oysa içerideki radyasyonun sıcaklığı 25-26 °C kadardır ve daha uzun dalga boyludur; camdan dışarı çıkamaz. Bu durumda cam malzemede, giren radyant enerjiye eşit miktarda enerji kaybı oluncaya kadar iç sıcaklık yükselir.



Şekil-26: İnce su tabakası absorbtivitesinin spektral dağılımı

Absorblayıcı Gazlara Radyasyonun Etkisi

Hidrojen, oksijen, helyum, argon, azot gibi monoatomik gazlar infrared ışığı geçirirler Su buharı, karbon dioksit, organik buhar gibi karmaşık poliatomik

moleküller, özel dalga boylarında, radyasyonu şiddetle absorblarlar. Belirli miktarda bir gaz veya buharın absorbladığı radyasyon kesri, radyasyonun geçtiği yolun uzunluğuna ve geçiş sırasında karşılaştığı moleküllerin sayısına (yani, gaz veya buharın yoğunluğuna) bağlıdır. Bu nedenle bir gazın absorbtivitesi, kısmi basıncı ile çok, sıcaklığı ile az değişir.

Absorblayıcı bir gaz ısıtılırsa soğuk olan çevresine, absorbladığı dalga boyu ile aynı dalga boylarında radyasyon verir. Gazın emissivitesi de sıcaklık ve basıncına bağlıdır.

c. Kondüksiyon-Konveksiyon ve Radyasyonla Toplam Isı Transferi

Sıcak bir cisimden çevresine toplam ısı kaybı, çoğu kez kondüksiyon-konveksiyon ve radyasyonla olur. Örneğin bir odadaki bir buhar radyatörü veya sıcak bir boru hattı ısıyı iki mekanizmaya (hemen hemen eşit) göre kaybeder. İki tip ısı transferi paralel olarak meydana geldiğinden, toplam kayıp (çevre siyah cisim kabul ediliyor),

$$\frac{q_T}{A} = \frac{q_c}{A} + \frac{q_r}{A} = h_c (T_w - T) + 0.1713 \epsilon_w \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \quad (20)$$

q_T/A = toplam ısı akısı ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sa}$), q_c/A = kondüksiyon-konveksiyonla ısı akısı, q_r/A = radyasyonla ısı akısı, h_c = konvektif ısı transfer katsayısı ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{sa} \cdot ^\circ\text{C}$), ϵ_w = yüzeyin emissivitesi, T_w = yüzeyin sıcaklığı (K)dır. Bu denklem bazen aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\frac{q_T}{A} = (h_c + h_r) (T_w - T) \quad (21)$$

$$h_r = \frac{q_r}{A (T_w - T)} \quad (22)$$

h_r ye "radyasyon ısı transfer katsayısı" denir; sıcaklık farkı ($T_w - T$) ye ve T_w ile T nin büyüklüklerine bağlıdır.

Film Kaynamada Radyasyon

Film kaynamada ısı transferinin en önemli bölümünü, yüzeyden sıvıya olan radyasyonla transfer oluşturur. Böyle bir koşulda, sıvının absorbtivitesi 1'e eşit olduğundan Denklem(20) uygulanabilir. Radyasyon aktif olduğunda, ısıtıcı elementi saran buhar kılıfı, radyasyon bulunmadığı haldekinden daha kalındır ve konvektif ısı transfer katsayısı daha düşüktür. Sıvıya daldırılmış yatay bir tüp yüzeyindeki film tipi kaynama için verilen h_0 değerinde, radyasyonla ısı transfer katsayısı yoktur. Radyasyon etkisinin varlığında konvektif katsayı h_c değerini alır; h_0 ve h_r ile aşağıdaki bağıntı içindedir.

$$h_c = h_0 \left(\frac{h_0}{h_c + h_r} \right)^{1/3} \quad (23)$$

ÖRNEK

Freon-11 (CCl_3F), içine daldırılmış yatay bir tüp ile atmosfer basıncında kaynatılmaktadır. Tüp duvarının sıcaklığı 149°C , freon-11 in normal kaynama noktası 23.8°C , ısıtma tüpünün emissivitesi $\epsilon_w = 0.85$ tir. Buhar filmi radyasyona karşı geçirgen ve kaynayan sıvı opak olduğunda,

- (a) radyasyon katsayısı h_r ne kadardır?
- (b) toplam ısı transfer katsayısı ne kadardır?
- (c) toplam ısı akısı q_T/A ne olur?

Isı transferinde radyasyonun aktif olmadığı durumda transfer katsayısı $h_0 = 59.5 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sa} \cdot ^\circ\text{C}$, ısı akısı $q/A = 7444 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sa}$ tir. ($\sigma = 0.4877 \times 10^{-8} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sa} \cdot \text{K}^4$; Stefan Boltzman sabiti). Tüpün gri, çevresindeki sıvının siyah olduğu kabul ediliyor.

Çözüm:

(a) Radyasyonla ısı transferinde sıcaklıklar K (veya Rankin, $^\circ\text{R}$) cinsinden alınır. Buna göre $T_1 = 149 + 273.1 = 422.1 \text{ K}$, $T_2 = 23.8 + 273.1 = 296.9 \text{ K}$ dir. Tüp gri, çevre sıvısı siyah kabul edildiğinden,

$$\epsilon_2 = 1 \quad F_{12} = \epsilon_w = 0.85 \text{ tir.}$$

Bu koşullarda Denklem(19) uygulanır.

$$T_1 = 422.1 \text{ K}$$

$$T_2 = 296.9 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\sigma = 0.4877 \times 10^{-8} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sa} \cdot \text{K}$$

$$\epsilon_w = 0.85$$

$$\frac{q_r}{A} = 0.4877 \times 10^{-8} \times 0.85 [(4.22 \times 10^2)^4 - (2.966 \times 10^2)^4]$$

$$\frac{q_r}{A} = 0.4877 \times 0.85 (317.44 - 77.39) = 99.5 \text{ cal/cm}^2 \text{ sa}$$

Denklem(22) den radyasyon ısı transfer katsayısı h_r hesaplanır.

$$h_r = \frac{q_r}{A (T_w - T)} = \frac{99.5}{422.1 - 296.9} = 0.80 \text{ cal/cm}^2 \text{ sa.}^{\circ}\text{C}$$

(b) Radyasyonun aktif olmadığı haldeki ısı transfer katsayısı $h_0 = 59.5 \text{ cal/cm}^2 \text{ sa}^{\circ}\text{C}$ dir. Denklem(23) uygulanarak h_c bulunur.

$$h_c = h_0 \left(\frac{h_0}{h_c + h_r} \right)^{1/3}$$

$$h_c = 59.5 \left(\frac{59.5}{h_c + 0.80} \right)^{1/3} = 59.3 \text{ cal/cm}^2 \text{ .sa.}^{\circ}\text{C}$$

(c) Denklem(21) den q_T/A hesaplanır.

$$\frac{q_T}{A} = (h_c + h_r) (T_w - T) = (59.3 + 0.80) (422.1 - 296.9)$$

$$\frac{q_T}{A} = 7525 \text{ cal/cm}^2 \text{ sa}$$