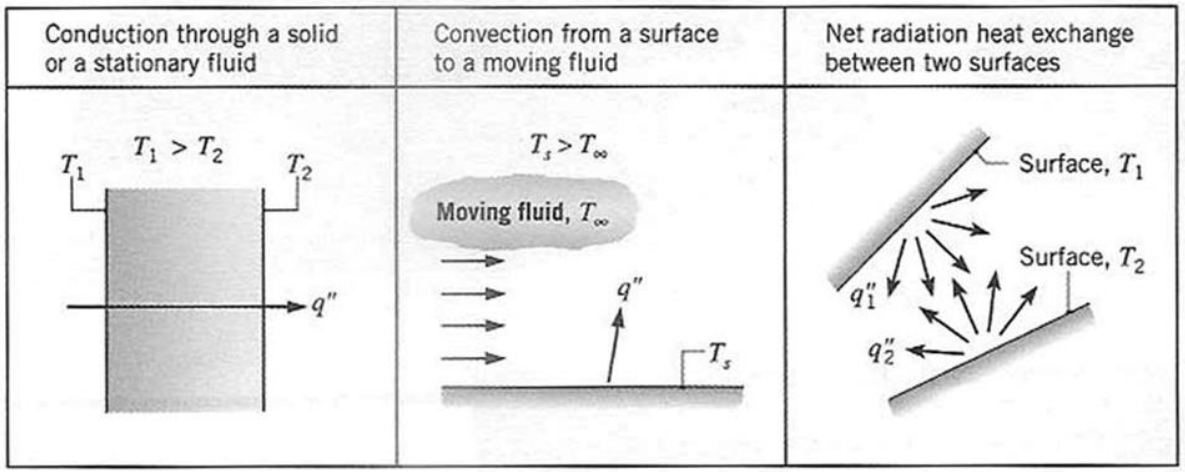
دانشگاه صنعتی شاهرود

جلسه هشتم
مفاهیم فیزیکی و معادلات نرخ انتقال حرارت

انرژی حرارتی و انتقال حرارت

- در ترمودینامیک با تبادل گرما و نقش آن آشنا شده ایم و بنابر اصل دوم ترمودینامیک چنانچه قسمتی از یک سیستم نسبت به قسمتهای دیگر سیستم اختلاف دما داشته باشد انرژی حرارتی از نقاط گرم به سمت نقاط سرد جریان می یابد و به کمک روابط ترمودینامیکی می توان وضعیت حالت تعادل ، دمای تعادل ، مقدار کل انرژی مبادله شده را بدست آورد . اما در ترمودینامیک مکانیزم انتقال گرما و روش های محاسبه نرخ انتقال گرما مورد تجزیه و تحلیل قرار نمی گیرد . لذا ترمودینامیک فقط حالت تعادلی سیستم را مورد بررسی قرار می دهد و لازمه حالت تعادلی معادله ، نبود گرادیان دماست . بعبارت دیگر انتقال گرما ذاتاً غیر تعادلی است لذا هدف ما از مطالعه انتقال گرما پاسخگویی به زمان لازم برای رسیدن به تعادل سیستم و تغییرات دما برحسب زمان و شدت انتقال گرما در هر لحظه از زمان و مکان است . بنابراین انتقال حرارت به صورت انرژی انتقال یافته از یک سیستم به سیستم دیگر در اثر وجود اختلاف دما بین دو سیستم تعریف می گردد لذا به زبان ساده تر انتقال حرارت ، ناشی از وجود اختلاف دماست پس نیروی محرکه انتقال حرارت گرادیان دماست بنابراین نرخ انتقال حرارت در یک جهت مشخص ، به میزان اختلاف دما بر واحد طول بستگی دارد و هر چه اختلاف دما بین دو سیستم زیادتر باشد نرخ انتقال حرارت بیشتر می شود .

- انتقال حرارت کلاً به سه روش هدایت ، جابجایی و تابشی صورت می گیرد . در اکثر مسائل کاربردی انتقال حرارت به صورت ترکیبی از دو یا سه روش فوق می باشد .



انواع مختلف انتقال حرارت هدایتی ، جابجایی ، تشعشعی

انتقال حرارتی هدایتی

- اگر دمای ناحیه ای از جسم از ناحیه ای دیگر آن بیشتر باشد حرارت از ناحیه گرمتر به سمت ناحیه سردتر جریان می یابد . این پدیده را هدایت گویند در این پدیده انتقال انرژی حرارتی به صورت جریان الکترونهای آزاد و یا انتقال انرژی ارتعاشی ذرات جسم به ذرات مجاور، در دمای پایینتر می باشد . در این روش واسطه انتقال حرارت ساکن است (جامدات) لذا شدت انتقال حرارت هدایتی (مقدار گرمای منتقل شده در واحد زمان) متناسب با شیب دما در جسم و اندازه سطح عبوری گرما می باشد. بنابراین شدت انتقال حرارت هدایتی توسط فوریه به صورت زیر بیان گردیده است .

$$q = -KA\frac{\partial T}{\partial x}$$

بعبارت دیگر رابطه **قبل** بیان می کند که هدایت حرارتی در یک محیط به هندسه ، ضخامت ، جنس ماده و اختلاف دما در عرض محیط بستگی دارد

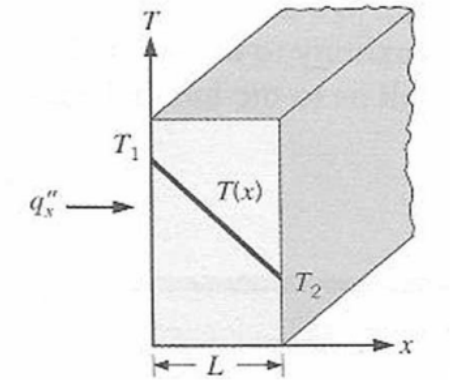
K :ضریب هدایتی حرارتی $\frac{W}{mc^{\circ}}$

A :سطح مقطع عمود بر جهت حرارت m^2

ΔT : اختلاف دما C°

Δx :ضخامت لایه m

q :مقدار حرارت منتقل شده در واحد زمان $\frac{J}{S}$



انتقال حرارت هدایتی یک بعدی

قانون فوریه

قانون فوریه مبتنی بر تحلیل نیست بلکه یک تجربه بشری است همچنین علامت منفی در قانون فوریه بیانگر جهت کاهش انتقال دماست ، به عبارت روشن تر گرما نمی تواند از نقطه ای سرد به نقطه ای گرم نقل مکان کند. (قانون دوم ترمودینامیک) قانون فوریه برای تمامی حالت (پایدار ، ناپایدار) معتبر است . حال با توجه به رابطه **قبل** اگر گرادیان دما ثابت باشد انتقال حرارت تابع ضخامت لایه نخواهد بود زیرا به ازای هر ضخامتی مقدار انتفال حرارت ثابت خواهد بود

ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی ، یک خاصیت مهم حرارتی جسم است و به نوع جسم و شرایط فیزیکی از قبیل دما و فشار آن بستگی دارد . لذا هر چه مقدار عددی ضریب هدایت حرارتی جسم بزرگتر باشد جسم هادی تر بود و مقدار بیشتری گرما از آن عبور می کند و برعکس هر چه مقدار عددی ضریب هدایت حرارتی جسم کوچکتر باشد جسم عایق تر می باشد .

$$K = \frac{q}{\frac{\partial T}{\partial x}}$$

تمرین

۱- اگر از مقطع جسمی عایق با سطح مقطع ۱ m^2، ضخامت ۲/۵ cm و ضریب هدایت گرمایی ۰/۲ W/m.°C مقدار ۳ kW گرما هدایت شود، اختلاف دما را در دو طرف جسم حساب کنید.

حل: چون در این حالت انتقال گرمای هدایتی داریم، پس:

$$q = kA\frac{\Delta T}{L} \Rightarrow \Delta T = \frac{qL}{kA} = \frac{۳۰۰۰ \times ۰/۰۲۵}{۰/۲ \times ۱} = ۳۷۵\,^{\circ}C \Rightarrow \boxed{\Delta T = ۳۷۵\,^{\circ}C}$$

۲- در عرض شیشهٔ لیفی (*fiber glass*) به ضخامت ۱۳۰ mm اختلاف دمای ۸۵°C اعمال می‌شود. ضریب هدایت گرمایی شیشهٔ لیفی ۰/۰۳۵ W/m.°C است. مقدار گرمایی را حساب کنید که از جسم مزبور به‌ازای واحد سطح در ۱ ساعت انتقال می‌یابد.

حل: چون در این حالت انتقال گرمای هدایتی داریم، پس:

$$q = kA\frac{\Delta T}{L} \Rightarrow \frac{q}{A} = k\frac{\Delta T}{L} = \frac{۰/۰۳۵ \times ۸۵}{۰/۱۳} = ۲۲۸۸۶ \text{ W/m}^2 \Rightarrow \boxed{\frac{q}{A} = ۲۲۸۸۶ \text{ W/m}^2 = 82389600 \text{ J/m}^2.\text{h}}$$

در این مسأله واحد W/m^2 را به واحد $J/m^2.h$ تبدیل کرده‌ایم تا همان نوع انتقال به‌دست آید.

نکاتی چند از ضریب هدایت حرارتی

۱ – ضریب هدایت حرارتی معیاری از قابلیت مواد در هدایت گرماست

۲ – فلزات بیشتر از مایعات و مایعات بیشتر از گازها رسانای حرارت هستند یعنی

K گازها < K مایعات < K جامدات غیر فلزی < K الیاژ < K فلزات خالص

۳ – فشار ، روی ضریب هدایت گازها و مایعات تاثیر ندارد

۴ – برای بعضی از اجسام جامد ، مخصوصاً اجسام لیفی مقدار K بستگی به جهت انتقال حرارت دارد .

۵ –K اجسام متخلخل با K سازنده ماده متخلخل متفاوت می باشد .

۶ – در جامدات ، ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما کاهش می یابد .

۷ – درجامدات ضریب هدایت حرارتی ، حاصل جمع امواج ارتعاشی و انرژی منتقله توسط الکترون آزاد است.

۸– در گازها ، ضریب هدایت حرارتی با مجذور دما نسبت مستقیم دارد $K \propto T^{1/2}$

۹ –K تابعی از دماست و برای تعیین مقدار دقیق K هر ماده نیاز به داشتن دمای آن ماده است .

۱۰ – ضریب هدایت حرارتی گازها ، معمولاً کوچکتر از $0.01 \frac{W}{m^2 c^\circ}$ است

۱۱ – ضریب هدایت حرارتی مایعات ، با افزایش دما کاهش می یابد به جز آب و گلیسرین

۱۲– ضریب هدایت حرارتی مایعات ، با افزایش جرم مولکولی کاهش می یابد .

۱۳– ضریب هدایت حرارتی مایعات ، به جز اطراف نقطه سه گانه نسبت به فشار خنثی است

۱۴ – ضریب هدایت حرارتی مایعات فلزی ، خیلی بیشتر از ضریب هدایت حرارتی مایعات غیر فلزی است.

۱۵– ضریب هدایت حرارتی فلزات ، معیار ثابتی ندارد . بدینصورت که در بعضی از فلزات ، ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما کاهش می یابد (مس) در بعضی از فلزات ، ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما افزایش می یابد (آلومینیوم) در بعضی فلزات ، ضریب هدایت حرارتی با افزایش دما بدون تغییر باقی میماند (فولاد)

۱۶ – در دماهای بسیار پایین ، مقدار K با تغییر دما به سرعت تغییر می کند .

ضریب نفوذ حرارتی

ضریب نفوذ حرارتی ، یک خاصیت حرارتی جسم است که به صورت $\propto = \frac{K}{\rho c_p}$ تعریف می شود . لذا ضریب نفوذ حرارتی بیانگر سرعت پخش یا نفوذ حرارتی در داخل جسم است یعنی هر چه مقدار عددی α بیشتر باشد حرارت در داخل جسم سریعتر پخش می شود از طرفی با توجه به رابطه فوق هرچه مقدار عددی ضریب هدایت حرارتی K بیشتر باشد و یا ظرفیت حرارتی جسم (ρc_p) کمتر باشد مقدار ضریب نفوذ حرارتی جسم (α) بیشتر خواهد شد.

انتقال حرارت جابجایی

اگر سطح جسمی با دمای T_w در مجاورت سیالی با دمای T_∞ قرار گیرد بین جسم و سیال حرارتی مبادله می شود که این روش مبادله حرارتی را انتقال حرارت جابجایی گویند . چنانچه دمای جسم نسبت به دمای سیال بیشتر باشد (شوفاژ ، هوای اطاق) انتقال حرارت جابجایی از جسم به سیال صورت می پذیرد و برعکس (هوای اطاق ، شیشه سرد پنجره) انتقال حرارت جابجایی از سیال به جسم صورت می پذیرد .

مکانیزم انتقال حرارت جابجایی

لذا انتقال حرارت جابجایی با دو مکانیزم انجام میگیرد:

الف – انتقال انرژی توسط حرکت زیگزاکی مولکولی (تصادفی)

ب – حرکت ماکروسکوپی سیال

لذا برای محاسبه شدت انتقال حرارت جابجایی ، از قانون سرمایش نیوتن استفاده می کنیم .

$$q = hA(T_w - T_\infty)$$

q : مقدار حرکت منتقل شده در واحد زمان J/S

h : ضریب انتقال حرارت جابجایی $\frac{W}{m^2 {}^\circ C}$

A : سطح مقطع عمود بر جهت جریان m^2

T_w : دمای سطح جسم C°

T_∞ : دمای سیال C°

ضریب انتقال حرارت جابجایی

در معادله قبل ضریب انتقال حرارت جابجایی (h) یک کمیت مقداری است و به جهت بستگی ندارد و جزء خاصیت سیال نبود بلکه مقدار آن به هندسه سطح جسم جامد ، نوع حرکت سیال ، سرعت حجمی سیال بستگی دارد .

نکاتی در مورد ضریب انتقال حرارت جابجایی

۱ – ضریب انتقال حرارت جابجایی مایعات ، بیشتر از گازهاست .

۲ – ضریب انتقال حرارت جابجایی ، میعان بزرگتر از ضریب انتقال حرارت جابجایی جوشش و ضریب انتقال حرارت جابجایی جوشش بزرگتر از ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری و ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری بزرگتر از ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد است .

۳ – هر گاه بین جسم و سیال حرارت مبادله گردد . خواهیم دانست که در مجاورت سطح گرم جریان به سمت بالاحرکت می کند و در مجاورت سطح سرد جریان به سمت پایین حرکت می کند .

۴ – در معادله قانون سرمایش نیوتن h مستقل از دما مد نظر قرار گرفته است اما اصولاً h تابعی از دماست.

روش های افزایش انتقال حرارت جابجایی

۱ – زیاد کردن مقدار عددی ضریب انتقال حرارت جابجایی

۲– ایجاد موانع روی سطوح جسم جامد که سبب افزایش سطح مبادله حرارت بین جسم و سیال می شود

۳ – ایجاد اغتشاش و تلاطم بیشتر سرعت جریان سیال

لذا با توجه به مطالب بیان شده انتقال حرارت جابجایی به دو صورت ذیل انجام می گیرد :

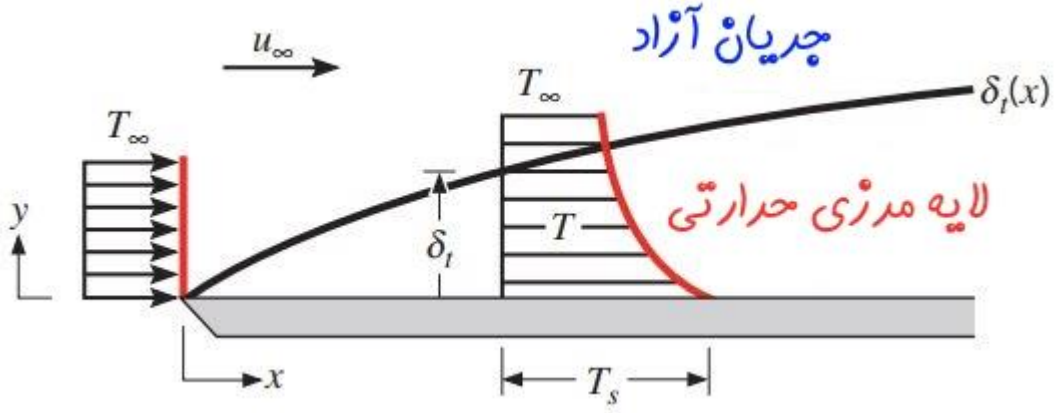
الف – انتقال حرارت جابجایی اجباری

ب – انتقال حرارت جابجایی آزاد

اگر جریان سیال توسط عوامل خارجی نظیر پمپ ، فن و... ایجاد گردد انتقال حرارت جابجایی اجباری است و نیز اگر جریان سیال به واسطه اختلاف چگالی ناشی از تغییرات دما باشد انتقال حرارت را جابجایی آزاد گویند

لایه مرزی حرارتی

- لایه مرزی حرارتی زمانی شکل می‌گیرد که دمای جریان سیال عبوری از روی سطح با دمای خود سطح متفاوت باشند.
- اگر فرض کنیم که سطح، به صورت هم‌دما است، لایه مرزی حرارتی اطراف آن را می‌توان به شکل زیر نمایش داد.

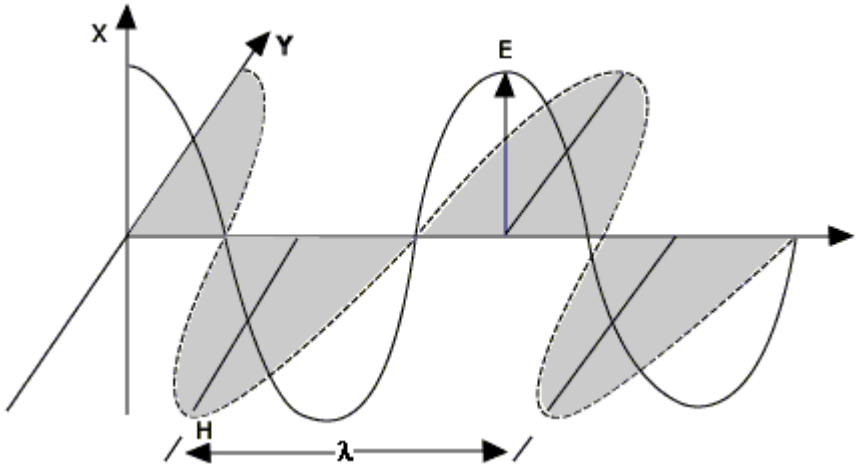


- ذرات سیالی که در تماس با سطح قرار می‌گیرند، با سطح به حالت تعادل حرارتی در می‌آیند و دمای آن‌ها برابر با دمای سطح صفحه می‌شود. در این حالت، این ذرات موجود در سطح با ذرات مجاور خود تبادل انرژی انجام می‌دهند و گرادیان دما در عرض سیال رشد پیدا می‌کند. ناحیه‌ای از سیال که گرادیان‌های دمایی ذکر شده در آن حضور دارند، لایه مرزی حرارتی نامیده می‌شود.
- ضخامت لایه مرزی حرارتی با نماد δ_t نشان داده می‌شود و مقداری از y را تعیین می‌کند که در آن شرط زیر ارضا شده باشد.

$$\frac{T_s - T}{T_s - T_\infty} = 0.99$$

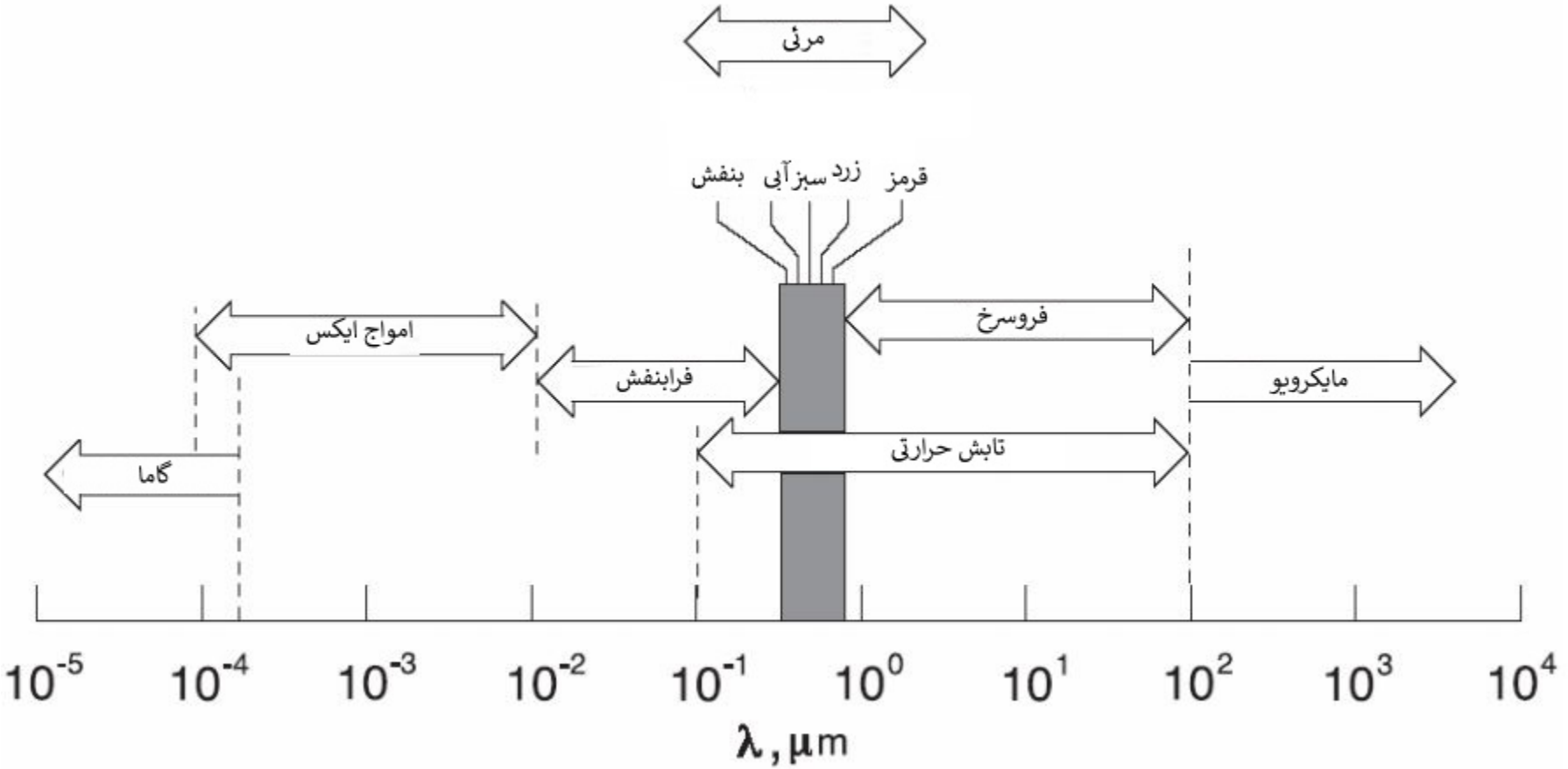
انتقال حرارت تشعشعی

- تابش Radiation عبارت است از انتقال حرارتی که از طریق امواج الکترومغناطیسی صورت می‌گیرد. از آنجایی که این امواج با سرعت نور منتقل می‌شوند، بنابراین سرعت انتقال انرژی در این حالت نیز برابر با سرعت نور است. شاید به همین دلیل است که دستگاه مایکروویو غذا را با سرعت نور گرم می‌کند چرا که مکانیزم آن مبتنی بر انتقال حرارت تشعشعی است!



ساختار یک موج
الکترومغناطیسی

- شکل زیر طیفی از طول موج‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در آن پیدا است، طول موج می‌تواند از 10^{-10} تا 10^{10} میکرومتر متغیر باشد. جالب است بدانید که امواج کیهانی کمترین طول موج و الکتریکی بیشتر طول موج را دارند.



انتقال حرارت تشعشعی

هر گاه دو یا چند جسم که از سطح خود انرژی منتشر می کنند و در معرض دید یکدیگر قرارگیرند مقداری از انرژی تابش شده ، هر سطح به سطح دیگر برخورد می کند و تبادل حرارت صورت می گیرد . که به این روش تبادل حرارت ، انتقال حرارت به روش تشعشعی گویند. لذا تبادل انرژی فی مابین دو سطح ، به صورت امواج الکترومغناطیس می باشد . بنابراین کلیه اجسام در دماهای بالاتر از صفر مطلق انتقال حرارت به صورت تشعشعی دارند که مقدار شدت انتقال حرارت آن توسط بولتزمن به شرح ذیل بیان گردیده است :

$$q = A.\varepsilon.\sigma\ (T_{w_1}^4 - T_{w_2}^4)$$

q:خالص شدت انتقال حرارت تشعشعی J/S

σ: ثابت بولتزمن که مقدار عددی آن برابر $5.6 * 10^{-8} \frac{Wm^2}{k^4}$ است

ε : ضریب صدور سطح جسم که مقدار آن بین ۱-۰ است

A: سطح تشعشع جذب شده m^2

T_{W1} : دمای مطلق جسم اول K°

T_{W2} : دمای مطلق جسم دوم K°

یک پیست اسکی یخی مجاور یک بازار خرید، با دمای هوای ۲۲°C و دمای دیواره‌های محیط تشعشعی ۲۵°C واقع شده است. ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی بین یخ و هوا، به‌خاطر حرکت هوا و حرکت اسکیت باز، ۱۰ W/m².°C می‌باشد. ضریب گسیل یخ ۰/۹۵ است. اگر ابعاد زمین اسکیت ۴۰m × ۱۲m باشد، مقدار سرمای لازم برای این‌که یخ در دمای ۰°C باقی بماند را حساب کنید. اگر هیچ سرمایی ذخیره نشود و پشت سطح کاملاً عایق شده باشد، مقدار گرمای ذوب یخ و مدت زمان لازم برای این‌که ۳ mm از سطح یخ ذوب شود، را حساب کنید.

$\rho_{یخ} = ۹۱۰ \text{ kg/m}^۳$ $\qquad h_f = ۳۳۰ \text{ kJ/kg}$

حل: انتقال گرما به یخ از دو طریق تشعشعی از دیواره‌ها و جابه‌جایی است:

$$q_{کل} = q_{جابه‌جایی} + q_{تشعشعی} \Rightarrow q_{کل} = hA(T_{هوا} - T_{یخ}) + \varepsilon A\sigma(T_{هوا}^۴ - T_{یخ}^۴)$$

$$A = ۱۲ \times ۴۰ = ۴۸۰ \text{ m}^۲ \Rightarrow q_{کل} = ۱۰ \times ۴۸۰(۰ - ۲۲) + ۰/۹۵ \times ۴۸۰ \times ۵/۶۲ \times ۱۰^{-۸}(۲۷۳^۴ - ۲۹۸^۴)$$

$$\Rightarrow \boxed{q_{کل} = -۱۶۵۸۰۰ \text{ W}}$$

علامت منفی به‌خاطر این است که در این مسأله مقدار سرما لازم مورد نظر می‌باشد.

گرما با نرخ ۱۶۵۸۰۰ J/s به یخ انتقال می‌یابد. حال برای محاسبهٔ مقدار گرمای لازم برای ذوب ۳ mm از یخ داریم:

$V = ۱۲ \times ۴۰ \times ۰/۰۰۳ = ۱/۴۴ \ m^3$

$\rho_{یخ} = ۹۱۰ \ kg/m^3$

جرم ذوب‌شده $m = \rho v = ۹۱۰ \times ۱/۴۴ = ۱۳۱۰/۴ \ kg$ $\qquad h_f = ۳۳۰ \ kJ/kg$

گرمای ذوب $q = mh_f = ۱۳۱۰/۴ \times ۳۳۰ = ۴۳۲۴۳۲ \ kJ$

در معادلهٔ بالا h_f همان $h_{ذوب}$ یا گرمای نهان ذوب است. برای محاسبهٔ مدت زمان لازم برای ذوب این مقدار یخ داریم:

گرمای ذوب = نرخ انتقال حرارت $\times t$

$$t = \frac{\text{گرمای ذوب}}{\text{نرخ انتقال گرما}} = \frac{۴۳۲۴۳۲۰۰۰}{۱۶۵۸۰۰ \ J/s} = ۲۶۰۸ \ s = ۴۳/۵ \ min \quad \Rightarrow \quad \boxed{t = ۴۳/۵ \ min}$$

تفاوت انتقال حرارت تشعشعی با انتقال حرارت هدایت و جابجایی

۱ – عامل انتقال حرارت در تشعشع ، امواج الکترومغناطیس یا فوتون است در حالیکه عامل انتقال حرارت در هدایت و جابجایی ، مولکول ، یون یا الکترون است .

۲ – در تشعشع ، انتقال حرارت با توان چهارم درجه حرارت مطلق جسم بستگی دارد در حالیکه در هدایت و جابجایی ، انتقال حرارت ، متناسب با اختلاف دمای نسبی است

تجزیه وتحلیل مسائل انتقال حرارت

۱ – داده های مسئله : پس از مطالعه دقیق مسئله داده های آنرا به صورت خلاصه بنویسید .

۲ – خواسته های مسئله : بطور دقیق خواسته ها مسئله را بنویسید .

۳ – شکل شماتیک : شکل شماتیک سیستم فیزیکی مسئله را رسم کنید .

۴ – فرضیات : تمامی فرضیات منطقی که مسئله را ساده می کند را بنویسید .

۵ – خواص : کلیه خواصی را که برای محاسبات نیاز دارید را مشخص کنید .

۶ – تجزیه و تحلیل : این عمل با کاربرد قوانین بقای مربوطه و استفاده از معادلات انتقال حرارت امکان پذیر است .

۷ – نتایج : روی نتایج بحث کنید .

خلاصه

۱- **هدایت** : پخش انرژی بواسطه حرکت نامنظم مولکولها $q = -KA\frac{dT}{dx}$

۲- **جابجایی :** پخش انرژی بواسطه حرکت نامنظم ملکولها به اضافه انتقال انرژی در اثر حرکت توده سیال

$$q = hA(T_w - T_\infty)$$

۳- **تشعشع :** انتقال انرژی ، توسط امواج الکترومغناطیس $q = A\varepsilon\sigma(T_{w1}^4 - T_{w2}^4)$

۴ – انتقال حرارت ، در جامدات و مایعات ساکن به صورت هدایت انجام می شود .

۵ – انتقال حرارت ، در سیالات و گازها به صورت جابجایی و احتمالاً تشعشع انجام می گیرد .

۶ – مکانیزم انتقال حرارت ، در دماهای خیلی بالا تشعشعی است

۷– مکانیزم انتقال حرارت ، در دماهای پایین جابجایی و هدایت هستند

۸ – محرک انتقال گرما ، گرادیان دماست

9

۹- نرخ انتقال گرما در یک جهت مشخص به میزان اختلاف دما بر واحد وابسته است یعنی هرچه مقدار اختلاف دما بیشتر باشد ، نرخ انتقال حرارت زیادتر می شود .

۱۰- هرگاه گرادیان دما ثابت بود انتقال حرارت به ضخامت بستگی نخواهد داشت زیرا به ازای هر ضخامتی مقدار انتقال حرارت ثابت است .

۱۱-انتقال حرارت هدایتی تابع برداری است و به جهت بستگی دارد .

۱۲- انتقال حرارت جابجایی یک کمیت مقداری است و به جهت بستگی ندارد .

۱۳- برای اندازه گیری دمای اجسام خیلی دور از پیزو متر استفاده می شود .

۱۴ - ρCp مایعات و جامدات عموماً بیشتر از $1\ \frac{MJ}{m^3K}$ است .

۱۵- ρCp گاز ها به علت کم بودن چگالی شان عموماً برابر $1\ \frac{KJ}{Km^3}$ هستند .

فیلم آموزشی درباره انواع انتقال حرارت

- **https://www.aparat.com/v/TZ5gM**