قلم را آن زبان نبود که سرّ عشق گوید باز
ورای حد تقریر است شرح آرزومندی
درین بازار اگر سودی ست با درویش خرسند است
خدایا منعمم گردان به درویشی و خرسندی

فصل اول: مقدمه و مفاهیم پایه

Introduction and Basic Concepts

اکبر اقبالی

WWW.AEGHBALI.BLOG.IR
EGHBALI.D@GMAIL.COM

1393

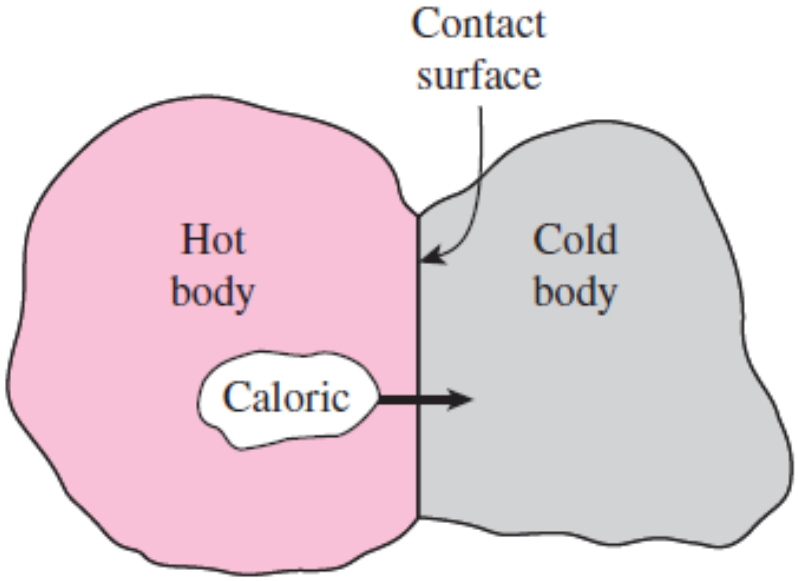
انتقال حرارت و ترمودینامیک

- حرارت: نوعی انتقال انرژی بین دو سیستم و به دلیل اختلاف دما.
- ترمودینامیک: مرتبط با مقدار انتقال حرارت در یک سیستم و طی فرآیندی که بین دو حالت تعادل رخ می دهد.
- انتقال حرارت: اندازه گیری نرخ های انتقال انرژی بصورت حرارت که از محیط دما بالا به محیط دما پایین صورت می گیرد.
- انتقال حرارت زمانی که دو محیط هم دما شوند متوقف خواهد شد.
- روش های مختلف انتقال حرارت:
  - انتقال حرارت هدایت *Conduction*
  - انتقال حرارت جابجایی *Convection*
  - انتقال حرارت تشعشع *Radiation*

مقدمه
تاریخچه HT
HT مهندسی
حرارت و انرژی
تعادل انرژی
انواع HT
شبیه سازی
روش حل

تاریخچه انتقال حرارت

- نظریه سینتیک: مولکولها بصورت کروی عمل می کنند و در حرکت بوده و دارای انرژی سینتیک هستند.
- حرارت: انرژی مرتبط با حرکت تصادفی اتم ها و مولکول ها.
- نظریه کالری: حرارت ماهیتی سیال گونه با عنوان کالری دارد که فاقد جرم، رنگ، بو و مزه بوده و از جسمی به جسم دیگر تراوش می کند.
- درک صحیح فیزیکی از حرارت در نیمه قرن ۱۹ شکل گرفت.



مقدمه
تاریخچه HT
HT مهندسی
حرارت و انرژی
تعادل انرژی
انواع HT
شبیه سازی
روش حل

انتقال حرارت مهندسی

- تحلیل و طراحی انتقال حرارت تجهیزات مورد توجه است
- دو دسته مشکل در مهندسی انتقال حرارت:
  - مسائل نرخ: اندازه گیری نرخ انتقال حرارت برای سیستم در اختلاف دمای خاص.
  - مسائل اندازه: تعیین اندازه سیستم برای انتقال حرارت با نرخ و اختلاف دمای خاص.
- دو رویکرد برای مطالعه تجهیزات و فرآیندها:
  - رویکرد آزمایشگاهی: سیستم فیزیکی، حداقل خطا، گران، زمانبر و اغلب نا ممکن.
  - رویکرد تحلیلی: سریع، ارزان، دقت پایین (فرضیات و تقریب ها)

- *Heat exchangers*
- *Boilers*
- *Condensers*
- *Radiators*
- *Heaters*
- *Furnaces*
- *Refrigerators*
- *Solar collectors*

مقدمه
تاریخچه HT
HT مهندسی
حرارت و انرژی
تعادل انرژی
انواع HT
شبیه سازی
روش حل

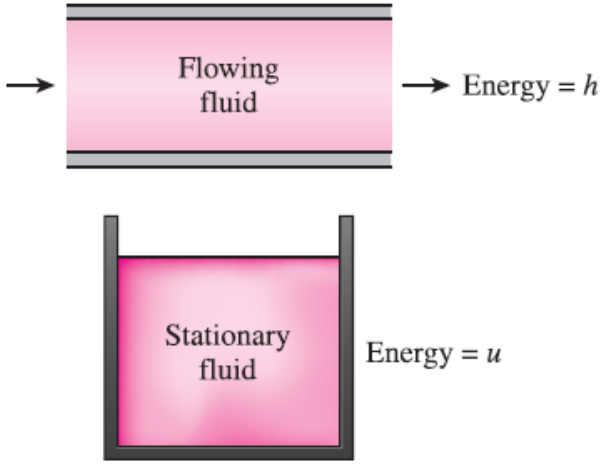
حرارت و انواع انرژی

- انواع مختلفی از انرژی شناخته شده اند:

Thermal	*Electrical*
Mechanical	*Magnetic*
Kinetic	*Chemical*
Potential	*Nuclear*

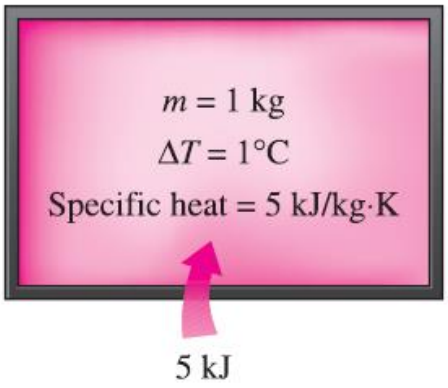
- مجموع تمام اشکال انرژی: انرژی کل سیستم E (e برای واحد جرم).
- مجموع تمام اشکال ماکروسکوپی انرژی: انرژی داخلی سیستم.
- انرژی داخلی: مجموع انرژی های سینتیک و پتانسیل مولکول ها.
- حرارت محسوس: انرژی سینتیک مولکول ها.
- حرارت پنهان: انرژی داخلی مرتبط با فاز سیستم.
- انرژی شیمیایی: انرژی داخلی مربوط به ارتباطات اتمی در مولکول.
- انرژی هسته ای: انرژی داخلی مربوط به ارتباطات اجزای درون اتم.

انرژی داخلی و آنتالپی



- در محاسبات سیالاتی، انرژی داخلی با ترم انرژی جریان ادغام شده و آنتالپی را تشکیل می دهند ($h=u+Pv$):

گرمای ویژه ماده



- انرژی لازم برای افزایش یک واحدی دما در واحد جرم ماده.
- به دو عامل (دما و فشار) بستگی دارد.

ارتباط گرمای ویژه با انرژی داخلی و آنتالپی

$$1\ \text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C} \equiv 1\ \text{J/g}\cdot^\circ\text{C} \equiv 1\ \text{kJ/kg}\cdot\text{K} \equiv 1\ \text{J/g}\cdot\text{K}$$

$$du = c_v\,dT \qquad \text{and} \qquad dh = c_p\,dT$$

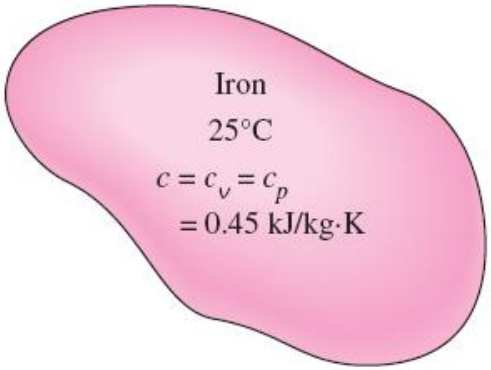
$$\Delta u = c_{v,\,\text{avg}}\Delta T \qquad \text{and} \qquad \Delta h = c_{p,\,\text{avg}}\Delta T \qquad (\text{J/g})$$

$$\Delta U = mc_{v,\,\text{avg}}\Delta T \qquad \text{and} \qquad \Delta H = mc_{p,\,\text{avg}}\Delta T \qquad (\text{J})$$

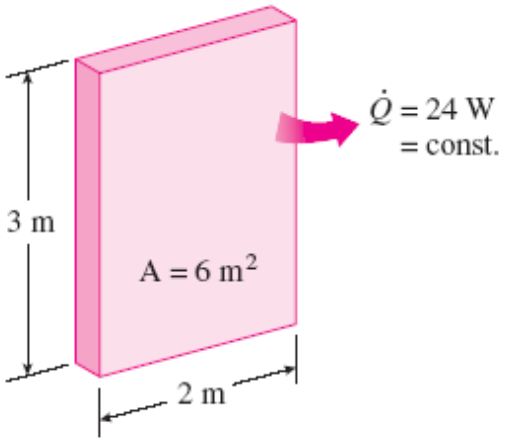
ماده تراکم ناپذیر

- ماده ای که حجم ویژه (یا دانسیته) آن با تغییر فشار یا دما تغییر نکند.
- گرمای ویژه ماده تراکم ناپذیر فقط به دما بستگی دارد.

$$\Delta U = mc_{\text{avg}}\Delta T \qquad (\text{J})$$



انتقال انرژی

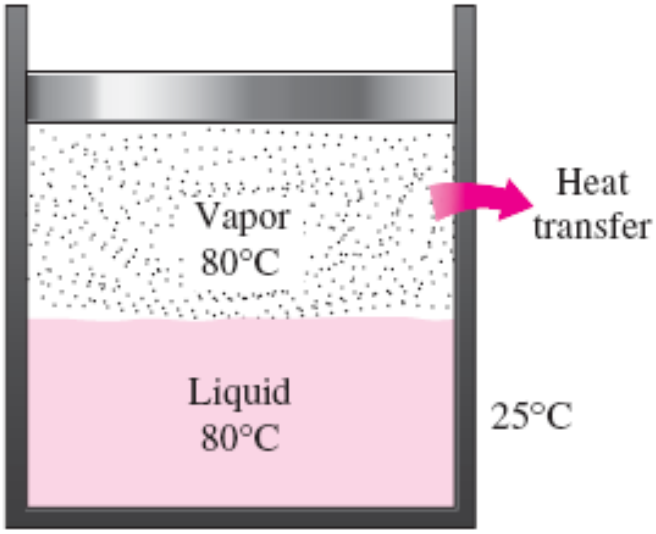


$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{24\ \text{W}}{6\ \text{m}^2} = 4\ \text{W/m}^2$$

- دو صورت انتقال انرژی: انتقال حرارت و کار
- نرخ انتقال حرارت: میزان انتقال حرارت در واحد زمان.

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q}\,dt \qquad \text{(J)}$$

$$Q = \dot{Q}\,\Delta t \qquad \text{(J)}$$



- شار حرارتی: میزان انتقال حرارت در سطح عمود بر راستای انتقال حرارت.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \qquad (\text{W/m}^2)$$

- توان: کار انجام شده در واحد زمان.

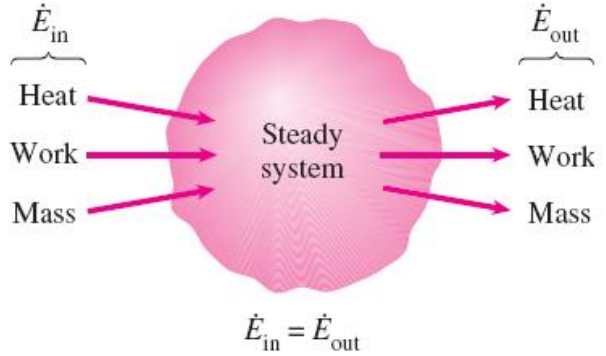
قانون اول ترمودینامیک

- طبق قانون اول ترمودینامیک، انرژی نه از بین می رود و نه تولید می شود. بلکه از نوعی به نوع دیگر تبدیل می گردد (پایستاری انرژی).

$$\left(\begin{array}{c}\text{Total energy}\\ \text{entering the}\\ \text{system}\end{array}\right) - \left(\begin{array}{c}\text{Total energy}\\ \text{leaving the}\\ \text{system}\end{array}\right) = \left(\begin{array}{c}\text{Change in the}\\ \text{total energy of}\\ \text{the system}\end{array}\right)$$

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}}}_{\substack{\text{Rate of net energy transfer}\\ \text{by heat, work, and mass}}} = \underbrace{dE_{\text{system}}/dt}_{\substack{\text{Rate of change in internal}\\ \text{kinetic, potential, etc., energies}}} \quad \text{(W)}$$

$$\underbrace{Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}}_{\substack{\text{Net heat}\\ \text{transfer}}} + \underbrace{E_{\text{gen}}}_{\substack{\text{Heat}\\ \text{generation}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{thermal, system}}}_{\substack{\text{Change in thermal}\\ \text{energy of the system}}} \quad \text{(J)}$$



قانون تعادل برای سیستم بسته (جرم ثابت)

- در سیستم بسته، انرژی کل سیستم معادل انرژی داخلی ذرات است.
- در سیستم پایا، هیچ تغییری در سرعت و ارتفاع ذرات رخ نمی دهد.

Stationary closed system:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta U = mc_v\Delta T \qquad \text{(J)}$$

Stationary closed system, no work:

$$Q = mc_v\Delta T \qquad \text{(J)}$$

مقدمه
تاریخچه HT
HT مهندسی
حرارت و انرژی
تعادل انرژی
انواع HT
شبیه سازی
روش حل

قانون تعادل برای سیستم جریان پایا

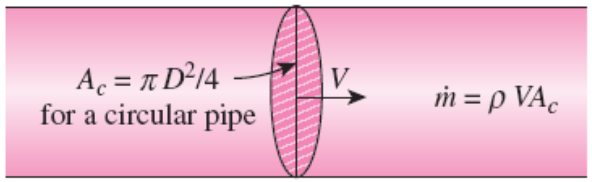
- حجم کنترل (*CV*): سیستم های مهندسی شامل جریان جرمی.
- پایایی (*Steady*): در یک موقعیت خاص، بدون تغییر با زمان است.
- نرخ جریان جرمی: میزان جریان عبوری از یک مقطع عرضی دستگاه جریان، در واحد زمان.

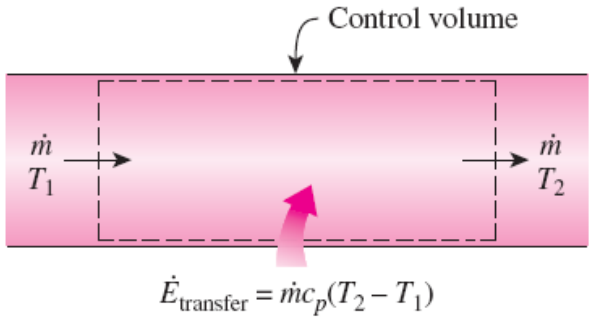
$$\dot{m} = \rho V A_c \qquad (\text{kg/s})$$

- نرخ جریان حجمی: حجم سیال عبوری از یک مجرا در واحد زمان.

$$\dot{V} = VA_c = \frac{\dot{m}}{\rho} \qquad (\text{m}^3/\text{s})$$

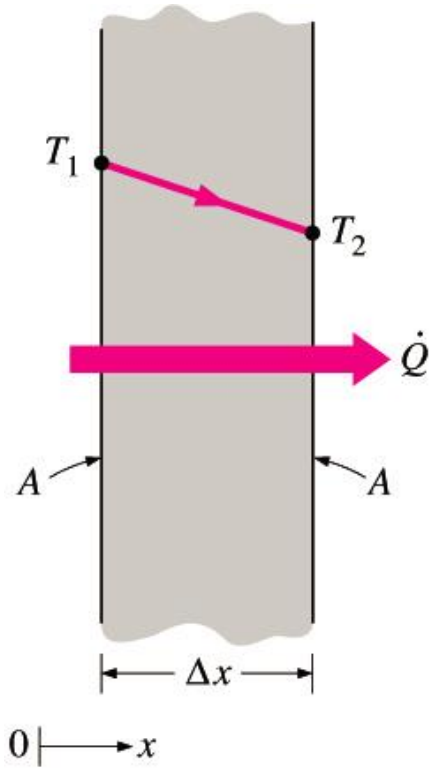
$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m} c_p \Delta T \qquad (\text{kJ/s})$$





۱) انتقال حرارت هدایت Conduction

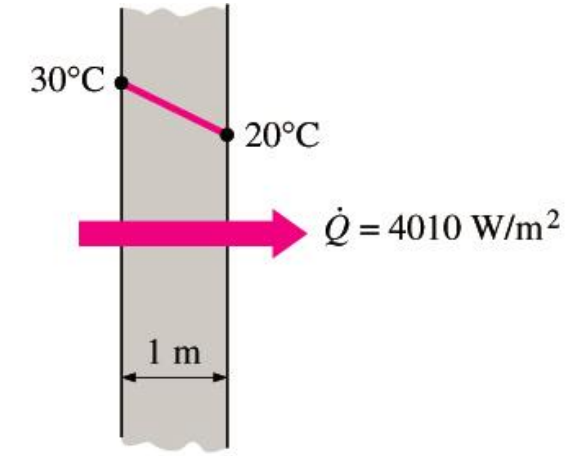
- انتقال انرژی از ذرات پرانرژی به ذرات کم انرژی تر همسایه در یک ماده از طریق بر هم کنش.
- مایع و گاز: تصادف مولکول ها و نفوذ مولکولی در حرکت تصادفی
- جامد: ارتعاش مولکولی + انتقال انرژی توسط الکترون های آزاد
- نرخ حرارت منتقل شده متناسب با
  - اختلاف دما در عرض لایه
  - سطح انتقال حرارت
  - معکوس ضخامت لایه



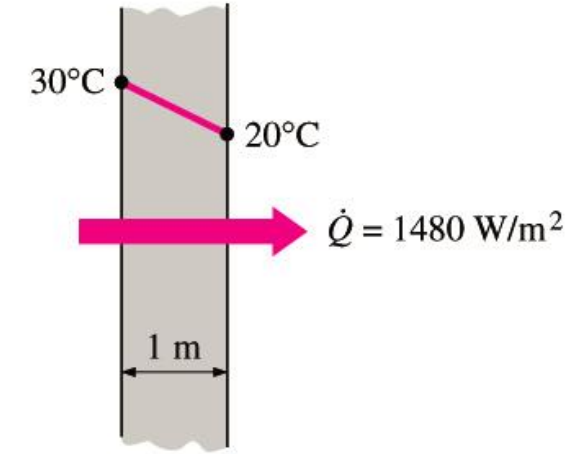
$$\text{Rate of heat conduction} \propto \frac{(\text{Area})(\text{Temperature difference})}{\text{Thickness}}$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA\frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad \text{(W)}$$

۱) انتقال حرارت هدایت Conduction

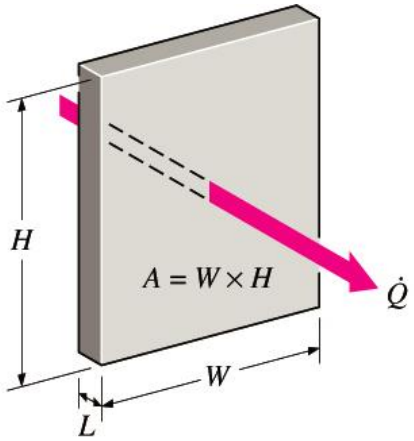


(*a*) Copper ($k = 401$ W/m·°C)



(*b*) Silicon ($k = 148$ W/m·°C)

Fourier's law of heat conduction



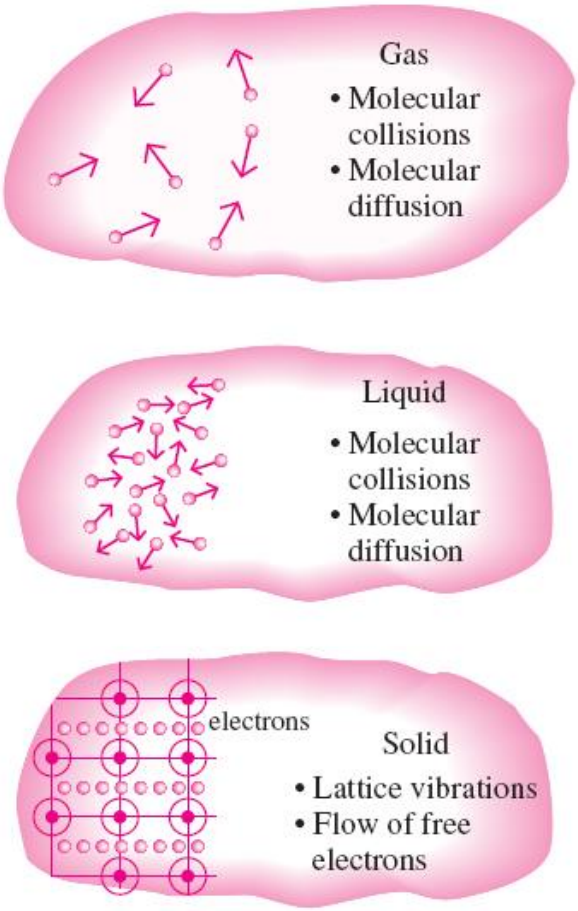
$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA\frac{dT}{dx}$$

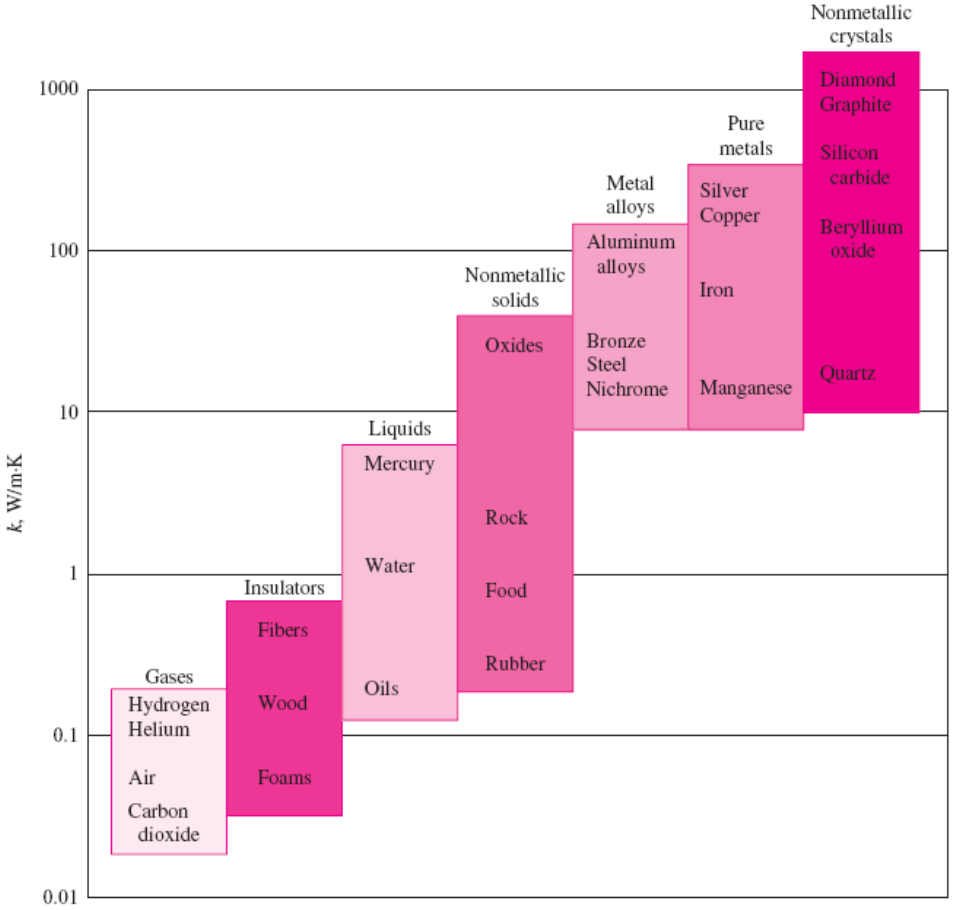
Thermal conductivity, k
Temperature gradient dT/dx
Negative sign

مقدمه
تاریخچه HT
HT مهندسی
حرارت و انرژی
تعادل انرژی
انواع HT
شبیه سازی
روش حل

Conduction ۱) انتقال حرارت هدایت

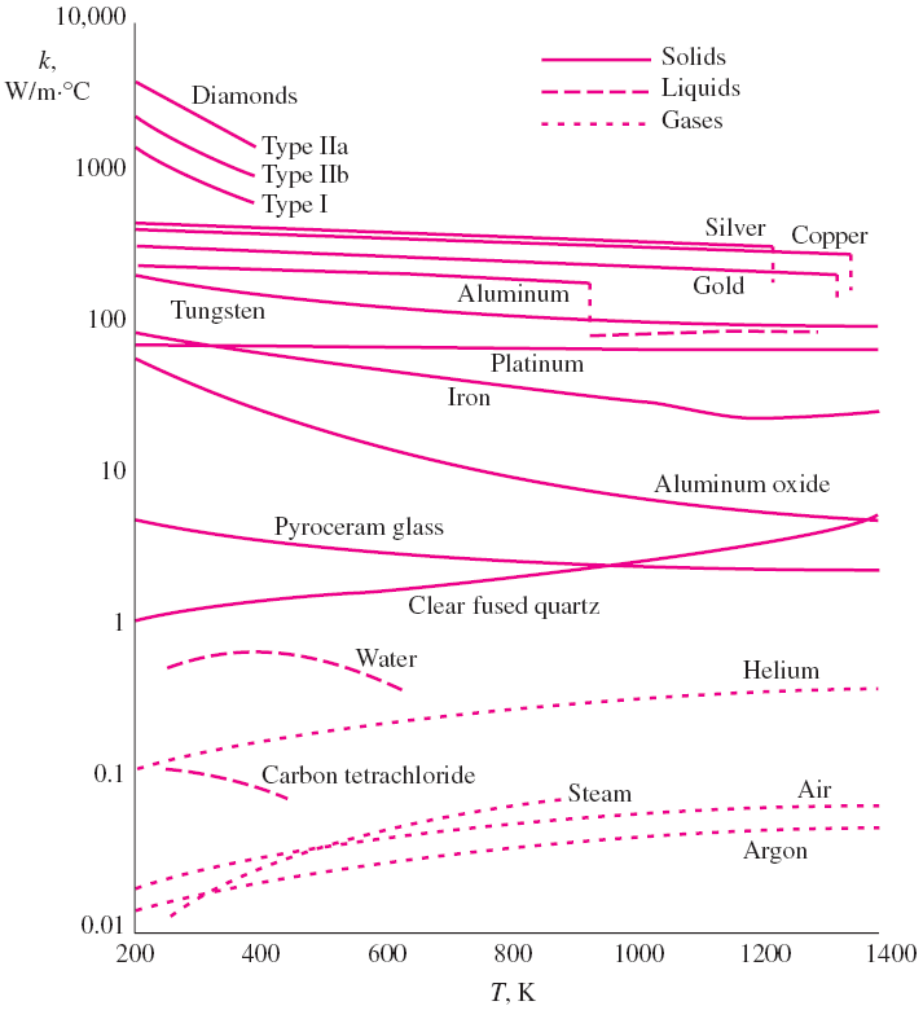
Thermal conductivity, k





Conduction ۱) انتقال حرارت هدایت

Thermal conductivity, k



۱) انتقال حرارت هدایت Conduction

Thermal Diffusivity, α

The thermal diffusivities of some materials at room temperature

Material	α, m²/s*
Silver	149×10^{-6}
Gold	127×10^{-6}
Copper	113×10^{-6}
Aluminum	97.5×10^{-6}
Iron	22.8×10^{-6}
Mercury (l)	4.7×10^{-6}
Marble	1.2×10^{-6}
Ice	1.2×10^{-6}
Concrete	0.75×10^{-6}
Brick	0.52×10^{-6}
Heavy soil (dry)	0.52×10^{-6}
Glass	0.34×10^{-6}
Glass wool	0.23×10^{-6}
Water (l)	0.14×10^{-6}
Beef	0.14×10^{-6}
Wood (oak)	0.13×10^{-6}

C_p Specific heat, J/kg · °C
ρC_p Heat capacity, J/m³·°C
α Thermal diffusivity, m²/s

$$\alpha = \frac{\text{Heat conduction}}{\text{Heat storage}} = \frac{k}{\rho c_p} \qquad (\text{m}^2/\text{s})$$

- ضریب نفوذ حرارتی بالاتر به معنای انتشار سریعتر حرارت در محیط است.
  - ضریب هدایت حرارتی بزرگتر
  - ظرفیت حرارتی کوچکتر

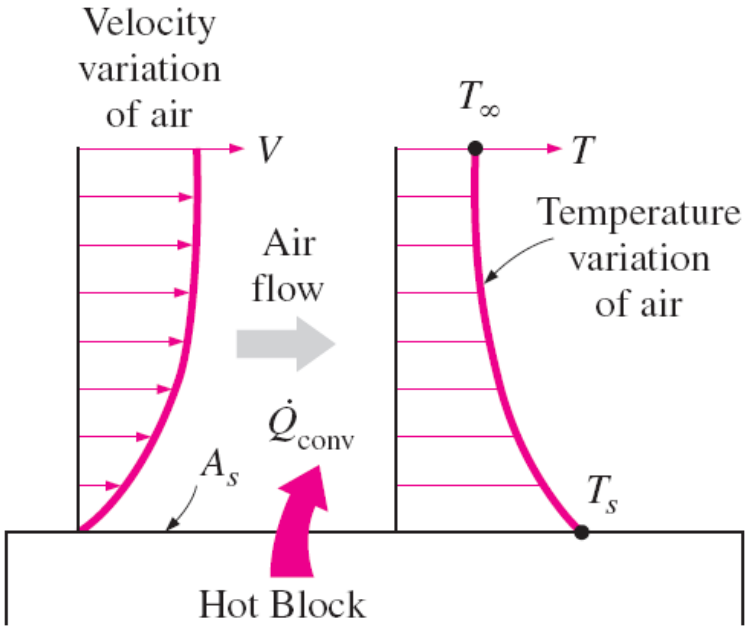
۲) انتقال حرارت جابجایی Convection

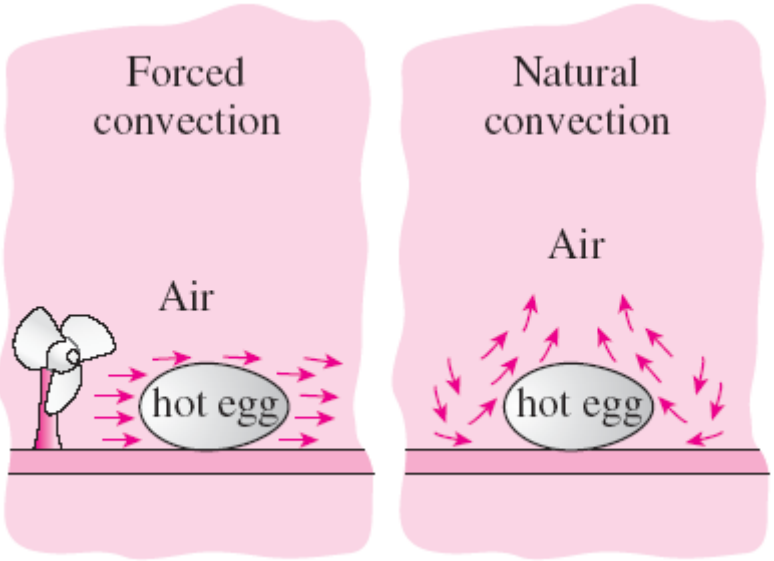
Newton's law of cooling

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \qquad (W)$$

h: convection heat transfer coefficient, W/m² · °C

- the surface geometry
- the nature of fluid motion
- the properties of the fluid
- the bulk fluid velocity





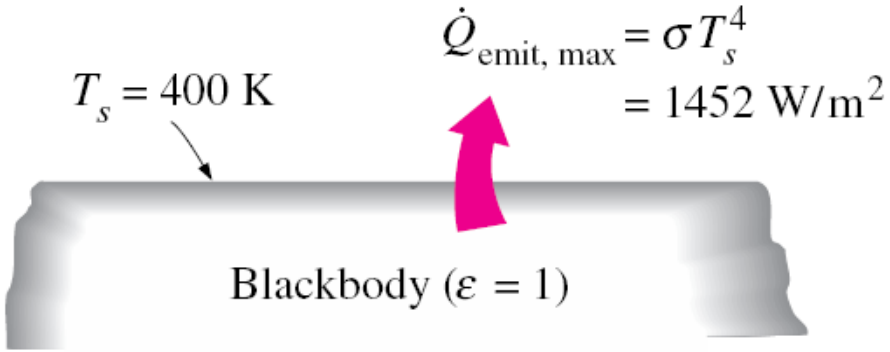
۳) انتقال حرارت تشعشع Radiation

- انتقال از طریق امواج الکترومغناطیس (یا فوتون) صورت می گیرد.
  ناشی از تغییرات در پیکربندی الکترونیکی اتم ها یا مولکول ها.
- بر خلاف هدایت و جابجایی، نیاز به محیط مادی ندارد.
- تمام مواد با دمای بالاتر از صفر مطلق، دارای تشعشع حرارتی هستند.

$$\dot{Q}_{\text{emit, max}} = \sigma A_s T_s^4 \quad \text{(W)} \qquad \textit{Stefan–Boltzmann law}$$

$\sigma = 5.670 \times 10^{-8}\ \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ *Stefan–Boltzmann constant*

$$\dot{Q}_{\text{emit}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad \text{(W)} \qquad \textit{Rradiation emitted by real surfaces}$$

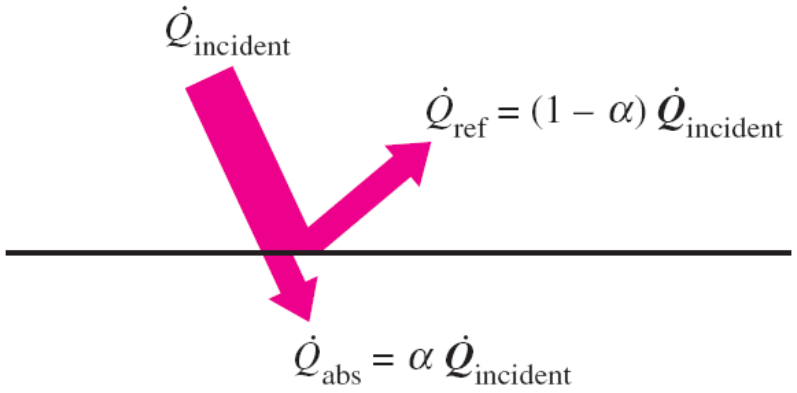


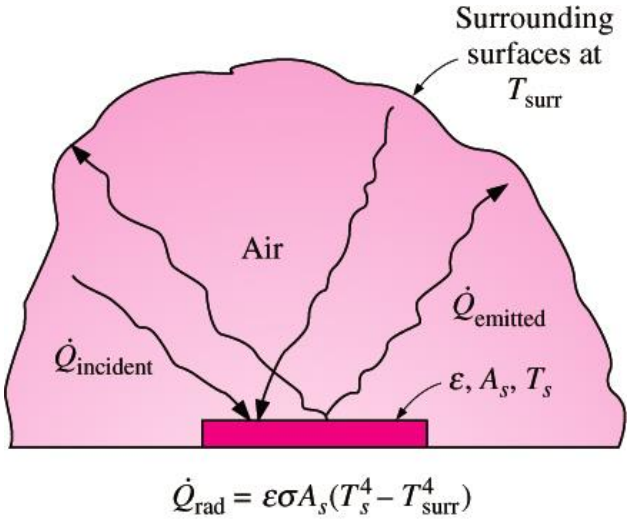
۳) انتقال حرارت تشعشع Radiation

- میزان انتقال حرارت تشعشعی بین دو صفحه به عواملی وابسته است:
  - خصوصیات صفحات.
  - زاویه صفحات نسبت به هم.
  - بر هم کنش محیط بین صفحات با تشعشع.

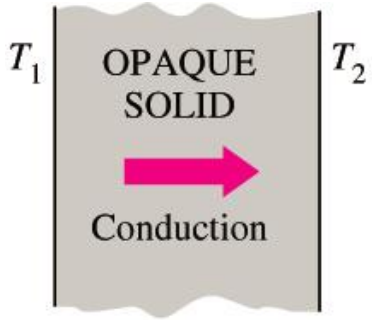
$$\dot{Q}_{\text{absorbed}} = \alpha \dot{Q}_{\text{incident}} \quad \text{(W)}$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad \text{(W)}$$



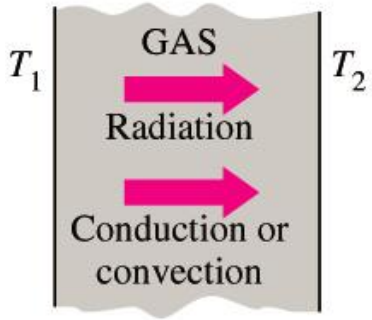


مکانیزم های شبیه سازی انتقال حرارت



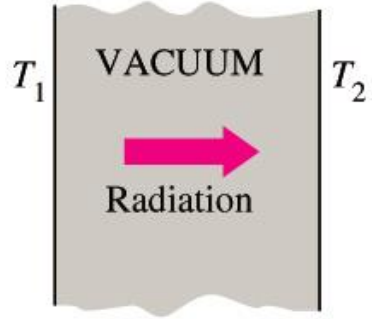
1 mode

- در اجسام کدر فقط هدایت وجود دارد.
- یک جامد هرگز انتقال حرارت جابجایی ندارد.
- جابجایی برای جامد فقط در تماس با جریان.



2 modes

- در سیال ساکن هدایت و تشعشع وجود دارد.
- در سیال جاری، جابجایی نیز وجود دارد.
- در محیط خلأ فقط تشعشع وجود دارد.
- بیشتر گازها بین دو صفحه جامد، در تشعشع دخالت نمی کنند.



1 mode

- مایعات جاذب های قدرتمند تشعشع هستند.

مقدمه
تاریخچه HT
HT مهندسی
حرارت و انرژی
تعادل انرژی
انواع HT
شبیه سازی
روش حل

روش حل مسئله

Step 1: Problem Statement

Step 2: Schematic

Step 3: Assumptions and Approximations

Step 4: Physical Laws

Step 5: Properties

Step 6: Calculations

Step 7: Reasoning, Verification, and Discussion

مقدمه
تاریخچه HT
HT مهندسی
حرارت و انرژی
تعادل انرژی
انواع HT
شبیه سازی
روش حل

از ظلم کردن به کسی که

در برابرت یاوری جز خدا ندارد

سخت بپرهیز

امیر مؤمنان، امام علی علیه السلام