บทที่ 5
การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการแปรรูปอาหาร
(Heat Transfer in Food Processing)

การให้ความร้อนและความเย็นเพื่อการแปรสภาพและถนอมรักษาคุณภาพอาหารเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้หลักวิศวกรรมการแปรรูปอาหาร เช่น การหุงต้ม (Cooking) การทำแห้ง (Drying) การระเหย (Evaporation) การฆ่าเชื้อ (Sterilization or Pasteurization) การทำเย็น (refrigeration) การแช่เยือกแข็ง (Freezing) และหน่วยปฏิบัติการ(Unit operation) กระบวนการทั้งหมดที่กล่าวนี้จำเป็นต้องเข้าใจหลักการถ่ายเทความร้อนในอาหาร และตัวกลางในการทำความร้อนและเย็น (Heating and cooling medium) โดยธรรมชาติการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นระหว่างสาร 2 ชนิดหรือระหว่างบริเวณ 2 บริเวณ และความร้อนถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน ผลต่างของอุณหภูมิเรียกว่า แรงขับดัน (Driving Force) และในการถ่ายเทความร้อนจะต้องถ่ายเทผ่านตัวกลางเสมอ ซึ่งตัวกลางอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ โดยในตัวกลางต่างก็มีความพยายามในการต่อต้านการถ่ายเทในลักษณะเดียวกับขดลวดไฟฟ้าหรือความฝืดในระบบท่อที่ต่อต้านการไหลของของไหล

<u>สมการทั่วไปของการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้เป็น</u>

$$\text{Rate of transfer} = \frac{\text{Driving force}}{\text{Resistance}}$$

คุณสมบัติทางความต้องการของอาหาร (Thermal properties of foods)

<u>สัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรือค่าการนำความร้อน</u> (Thermal Conductivity; k)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อนเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัว (Physical Property) ของวัตถุ มีหน่วยเป็น W/m ^{0}C or J/ m s^{0}C วัตถุแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแตกต่างกันดังตารางที่ 1 หรือในตารางผนวกที่ 4 เป็นตารางแสดงค่าสัมประสิทธ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ

<u>ตารางที่ 1</u> ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัตถุชนิดต่าง ๆ

ประเภทของวัตถุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน J/ m s^{0}C
โลหะ	50-400
น้ำ (0^0C)	0.7
น้ำ (20^0C)	0.597
อาหาร	0.6-0.7

ที่มา: Earle. and Earle. (2005)

นอกจากนี้สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้จากสมการของ Sweat

ผักและผลไม้ที่มีปริมาณน้ำมากกว่า 60 % โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.148+0.00493\ w$$

อาหารเนื้อที่มีอุณหภูมิระหว่าง 0 ถึง 60 ^{0}C และมีปริมาณน้ำ 60-80 % โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.080+0.0052\ w$$

อาหารเนื้อที่มีอุณหภูมิระหว่าง -40 ถึง -5 ^{0}C และมีปริมาณน้ำ 65-85 % โดยน้ำหนักเปียก

$$k = 0.28+0.019\ w - 0.0092T$$

โดยที่ w = ปริมาณของน้ำในอาหาร (%)

T = อุณหภูมิของอาหาร (^{0}C)

ตัวอย่างที่ 1 ให้หาค่าการนำความร้อนของเนื้อวัวที่มีปริมาณน้ำ 60.1 % ที่อุณหภูมิ 50 ^{0}C

ลักษณะของการถ่ายเทความร้อน (Modes of heat transfer)

โดยทั่วไปกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะมีอยู่ 3 ลักษณะด้วยกัน คือ

การนำความร้อน (Conductive heat transfer)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการชนกันโดยตรงของโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง อันเนื่องจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกับบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยมีอัตราการนำความร้อนในทิศทางใด ๆ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับการนำและความลาดเอียงของอุณหภูมิในทิศทางนั้น โดยทั่วไปไม่สามารถมองเห็นการเคลื่อนไหวได้ด้วยตาเปล่า มักพบในของแข็งที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัตถุนั้น

การพาความร้อน (Convection heat transfer)

เป็นการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลมีการเคลื่อนที่ ถ่ายเทความร้อนหรือรับความร้อนจากโมเลกุลอื่น เมื่อของไหลไหลผ่านผิวหน้าของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าหรือต่ำกว่าอุณหภูมิของของไหล จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุ การถ่ายเทความร้อนแบบการพาแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ

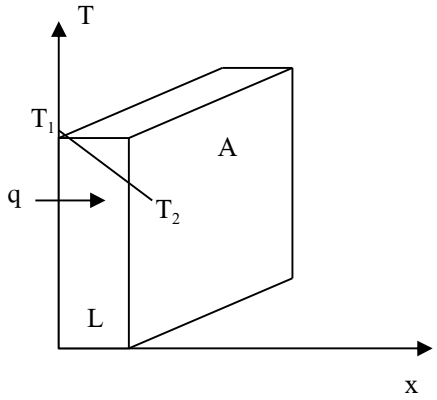
1) การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free Convection or Natural Convection) การเคลื่อนที่ของของไหลเป็นผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิภายในของไหลแตกต่างกัน หรือเกิดขึ้นจากผลของแรงลอยตัว (buoyancy effect) ตามธรรมชาติ

2) การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นโดยอาศัย artificial means เช่น การใช้พัดลมเป่า หรือการใช้เครื่องกวนหรือการใช้ปั๊มในของเหลว

การแผ่รังสี (Radiation)

เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิว 2 ชนิด โดยการแผ่ และดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave)

การนำความร้อน (Conductive heat transfer)



$$q/A = dT/dx$$

Fourier 's Law of Conduction

$$q = -kA\, dT/dx$$

เมื่อ

q = อัตราความร้อนที่ถ่ายเทในทิศทางตามแนวแกน x (W)

k = อัตราการนำความร้อน (W/m^0C)

A = พื้นที่ที่ตั้งฉากกับกานำในแนวแกน x (m^2)

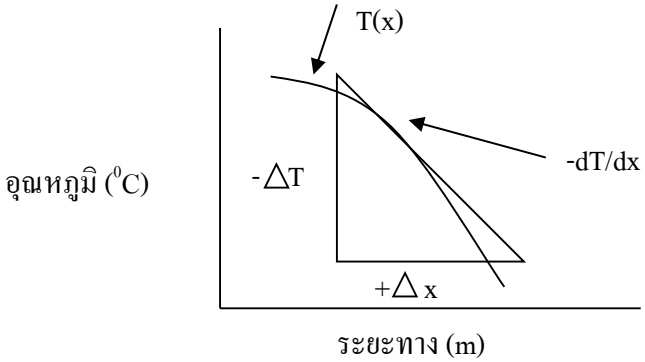
T = อุณหภูมิ (^0C)

L = ระยะทางของความร้อนที่ถ่ายเทหรือส่งผ่านในแนวแกน x (m)

dT/dx = ความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

ภายใต้สภาวะคงที่ q คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

เครื่องหมายลบ หมายความว่าความร้อนจะไหลจากอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำเสมอในขณะที่ผ่านระยะทางที่มากขึ้นดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การถ่ายเทความร้อนแบบการนำ

ถ้ากำหนดให้ภายในช่วงอุณหภูมิ T_1 ถึง T_2 ค่า k และ A คงที่

$$q(x_2 - x_1) = -kA(T_2 - T_1)$$

$$q = \frac{-kA(T_2 - T_1)}{(x_2 - x_1)}$$

$$\boxed{q = \frac{-kA\triangle T}{L}}$$

สามารถเขียนความต้านทานของการพาความร้อนได้ $\boxed{R = \frac{L}{kA}}$

ตัวอย่างที่ 2 ที่ด้านหนึ่งของแผ่นเหล็กไร้สนิมที่หนา 1 เซนติเมตร มีอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในขณะที่ด้านตรงข้ามอีกด้านมีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สมมติว่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ช่วงสภาวะสม่ำเสมอแล้ว (Steady state) ให้หาค่าอัตราการไหลของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ถ้ากำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กไร้สนิมมีค่า 17 W/m ^{0}C

ตัวอย่างที่ 3 แผ่นคอร์กหนา 4 นิ้ว ด้านหนึ่งมีอุณหภูมิ 10 ^{0}F อีกด้านหนึ่งมีอุณหภูมิ 70 ^{0}F ถ้าค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของคอร์กในช่วงอุณหภูมินี้มีค่าเท่ากับ 0.024 BTU/ft h ^{0}F จงหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง 1 ตารางฟุต

ตัวอย่างที่ 4 A cork slab 10 cm. thick has one face at -12 ^{0}C and the other face at 21 ^{0}C. If the mean thermal conductivity of cork in this temperature range is 0.042 W/m ^{0}C, What is the rate of heat transfer through 1 m^2 of wall?

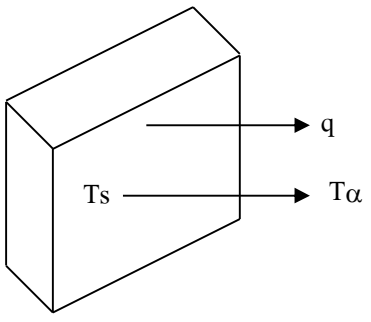
ตัวอย่างที่ 5 แท่งเหล็กมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว ปลายข้างหนึ่งจุ่มอยู่ในน้ำเดือดอุณหภูมิ 212 ^{0}F ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจุ่มอยู่ในถังน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิ 32 ^{0}F แท่งเหล็กมีความยาว 30 นิ้ว ตลอดแท่งเหล็กมีฉนวนหุ้มอย่างดีเพื่อบังคับให้การถ่ายเทความร้อนเกิดเพียงทิศทางเดียวคือจากปลายด้านที่ร้อนไปยังด้านที่เย็น ถ้ากำหนดให้ k ของเหล็กเป็น 26 BTU/hr-ft-^{0}F จงคำนวณหาอัตราความร้อนที่ถ่ายเท

การพาความร้อน (Convective heat transfer)

กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton 's Law of cooling)

$$q = hA(T_s - T\alpha)$$

$$= \frac{(T_s - T\alpha)}{1/hA}$$



เมื่อ q = อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective heat transfer coefficient) W/m^{2}K

T_s = อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ, K

Tα = อุณหภูมิของของไหล, K

สามารถเขียนความต้านทานของการพาความร้อนได้ $R = \frac{1}{hA}$

ตัวอย่างที่ 6 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่จากแผ่นเหล็กมีค่า 1000 w/m^2 อุณหภูมิที่พื้นที่ผิวมีค่า 120 ^0Cและอุณหภูมิรอบ ๆ แผ่นเหล็กมีค่า 20 ^0C ให้หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ตัวอย่างที่ 7 The heat flux, q, is 6000 W/m^2 at the surface of an electrical resistance heater. The heater temperature is 120 ^0C when it is cooled by air at 70 ^0C. what is the average convective heat transfer coefficient, h? What will heater temperature be if q is reduced to 2000 W/m^2

การแผ่รังสี (Radiation)

พลังงานที่วัตถุแผ่รังสีออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (absolute temperature) ของวัตถุนั้นและลักษณะของพื้นผิวที่สะท้อนความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสี สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$q = \sigma \varepsilon A (T_1^4 - T_2^4)$$

เมื่อ q = อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

σ = Stefan-Boltzmann constant มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} W/m^2K^4

ε = emissivity (เทียบกับ blackbody) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

T_1, T_2 = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ, K

สำหรับวัตถุดำ emissivity จะมีค่า blackbody เท่ากับ 1 สำหรับค่า emissivity ของวัตถุชนิดต่าง ๆ สามารถดูได้จากตารางอ้างอิง เมื่อจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$q = \sigma \varepsilon A (T_1^4 - T_2^4) \times \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_2)}$$

$$= h_r A (T_1 - T_2)$$

โดยที่

$$h_r = \frac{\sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)}$$

ดังนั้น สามารถเขียนความต้านทานของการแผ่รังสีได้ดังนี้

$$R = \frac{1}{h_r A}$$

ตัวอย่างที่ 8 จงหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสี จากพื้นที่ที่ถูกขัดเรียบของเหล็กขนาด 100 m^2 โดยมีค่า emissivity เท่ากับ 0.06 โดยอุณหภูมิที่ผิวหน้าของเหล็กมีค่า 37 ^0C

ตัวอย่างที่ 9 Calculate the radiation unit thermal conductance for a small spherical thermocouple junction located in a large black pipe carrying air. The pipe temperature is 300 K, the thermocouple temperature is 500 K, and the emittance of the thermocouple surface is 0.3.

การใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบคงที่ในทางปฏิบัติ (Application of Stead-State Heat Transfer)

การนำความร้อนแบบทิศทางเดียวภายใต้สภาวะคงที่ (One Dimensional, Stead State Conduction) จะพิจารณาเฉพาะกรณีการนำความร้อนแบบทิศทางเดียวภายใต้สภาวะคงที่ (Stead State) ที่สภาวะคงที่อัตราการถ่ายเทความร้อนของระบบจะไม่ขึ้นกับเวลา อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในวัตถุจะมีค่าคงที่ ถ้าระบบอยู่ภายใต้สภาวะไม่คงที่ (Untead State) อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งและเวลา

1. *ผนังราบ (Plane Wall)*

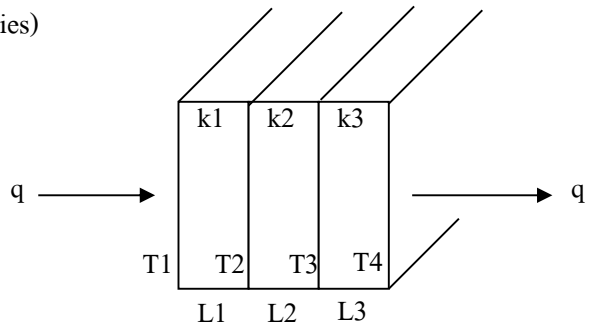
1.1 ผนังราบต่อแบบอนุกรม (Plane Wall in Series)

$$q_r = q_1 = q_2 = q_3$$

$$q_1 = \frac{k_1 A_1 (T_1 - T_2)}{L}$$

$$q_2 = \frac{k_2 A_2 (T_2 - T_3)}{L}$$

$$q_3 = \frac{k_3 A_3 (T_3 - T_4)}{L}$$



$$q_r = \frac{k_1A_1(T_1-T_2)}{L_1} = \frac{k_2A_2(T_2-T_3)}{L_2} = \frac{k_3A_3(T_3-T_4)}{L_3}$$

$$T_1-T_2 = \frac{qL_1}{k_1A} \quad ; \quad T_2-T_3 = \frac{qL_2}{k_2A} \quad ; \quad T_3-T_4 = \frac{qL_3}{k_3A}$$

$$T_1-T_4 = q\left[\frac{L_1}{k_1A} + \frac{L_2}{k_2A} + \frac{L_3}{k_3A}\right]$$

$$q = q_r = \frac{T_1-T_4}{\left[\frac{L_1}{k_1A} + \frac{L_2}{k_2A} + \frac{L_3}{k_3A}\right]} = \frac{T_1-T_4}{R1+R2+R3} = \frac{\triangle T_{total}}{R_{total}}$$

1.2 ผนังราบต่อแบบขนาน (Plane Wall in Parallel)

ความร้อนจะไหลผ่านผนังแต่ละชั้นไปพร้อม ๆ กัน แต่ด้วยปริมาณที่ไม่เท่ากัน อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมจะเท่ากับผลรวมของอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแต่ละชั้น

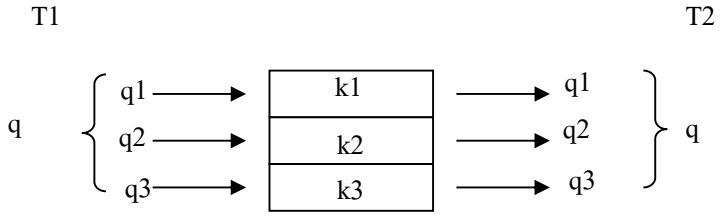
$$q_r = q_1 + q_2 + q_3$$

$$q_1 = \frac{k_1A_1(T_1-T_2)}{L}$$

$$q_2 = \frac{k_2A_2(T_2-T_2)}{L}$$

$$q_3 = \frac{k_3A_3(T_1-T_2)}{L}$$

$$q_r = \left[\frac{k_1A_1}{L_1} + \frac{k_2A_2}{L_2} + \frac{k_3A_3}{L_3}\right](T_1-T_2)$$



$$q_r = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right](T_1-T_2)$$

ตัวอย่างที่ 10 A cold store has a wall comprising 4.5 in of brick on the outside, then 3 in. of concrete, and then 4 in. of cork. The mean temperature within the store is maintained at 0 ^{0}F and the mean temperature of the outside surface of the wall is 60 ^{0}F. Calculate the rate of heat transmission through the wall. The appropriate thermal conductivities are for brick, concrete and cork respectivel, 0.4, 0.44 and 0.025 Btu/hr Ft ^{0}F. Determine also the temperature at the interface between the concrete and the cork layers.

ตัวอย่างที่ 11 The wall of a baker oven is built of insulating brick 4 in. thick, and of thermal conductivity 0.13 Btu/hr Ft ^{0}F. Steel reinforeing members penetrate the brick, and their total area of cross-section represents 1% of the inside wall area of the oven. If the thermal conductivity of the steel is 26 Btu/hr Ft ^{0}F Calculate (a) the relative proportions of the total heat transferred through the wall by the brick and by the steel and (b) the heat transfer for each ft^2 of oven wall if the inner side of the wall is at 450 ^{0}F. and the outer side is at 120 ^{0}F.

2. *ทรงกระบอก (Cylinder)*

การถ่ายเทความร้อนจะเกิดในแนวรัศมี ดังนั้นพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน A = พื้นที่ผิว = $2\pi rL$ สมการสำหรับหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็นดังนี้

$$q = -kA\,dT/dx = -k(2\pi rL)\,dT/dx$$

การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี dx = dr

$$q\int_{r_1}^{r_o} dr = -2\pi kL\int_{T_1}^{T_o} dT$$

$$q\,\ln\left(\frac{r_o}{r_1}\right) = 2\pi kL\,(T_1-T_0)$$

$$q = \frac{(T_1-T_0)}{\frac{\ln(r_o/r_1)}{2\pi kL}} = \frac{\triangle T}{R}$$

กรณีมีฉนวนหุ้มอีกชั้น

$$q = \frac{(T_1-T_3)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L}} = \frac{\triangle T}{R_1+R_2}$$

อาจเขียนสมการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้อีกแบบหนึ่งดังนี้

$$q = \frac{kA_{lm}\,(T_i - T_0)}{r_o - r_i}$$

$$A_{lm} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)} = \frac{2\pi L\,(r_o - r_i)}{\ln(r_o/r_i)} = 2\pi L r_{lm}$$

เมื่อ r_{lm} = logarithmic mean radius

r_a = arithmic mean radius = $(r_i + r_o)/2$

ถ้า $r_o/r_i \leq 2$ อนุโลมให้ใช้ r_a แทนได้

จะเห็นว่า $r_o / r_i = 2$ ⟶ $r_{lm} = 0.96\, r_a$

ตัวอย่างที่ 12 A thick-walled tube of stainless steel (18% Cr, 8%Ni, k=19 W/m ^{0}C) with 2-cm ID and 4-cm OD is covered with a 3-m layer of asbestos insulation (k=0.2 W/m ^{0}C). If the inside wall temperature of the pipe is maintained at 600 ^{0}C and the outside of the insulation at 100 ^{0}C, Calculate the heat loss per meter of length.

ตัวอย่างที่ 13 A tube of 60-mm outer diameter (OD) is insulated with a 50-mm layer of silica foam, for which the conductivity is 0.055 W/m ^{0}C, fllowed with a 40-mm layer of cork with a conductivity of 0.05 W/m ^{0}C .If the temperature of the outer surface of the pipe is 150 ^{0}C and the temperature of the outer surface of the cork is 30 ^{0}C, Calculate the heat loss in watts per meter of pipe.

<u>การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน</u> (Estimation of convective heat-transfer coefficient)

เนื่องจากการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนค่อนข้างซับซ้อน เพราะมีการเคลื่อนที่ของของไหล เรียกว่า Empirical approach ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ข้อมูลที่ได้ส่วนใหญ่ได้จากการทดลอง และการจัดการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ตัวเลขไร้มิติ (Dimensionless numbers) ตัวเลขไร้มิติที่จำเป็นต้องใช้ได้แก่ Reynolds Number, Nusselt number และ Prandlt number

1. <u>Reynolds Number</u>

เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ตัวเลขไร้มิติซึ่งได้จากการทดลองง่าย ๆ เพื่ออธิบายถึงลักษณะการไหล (Flow characteristics) ของของเหลว โดยฉีดสีย้อมเข้าไปในของเหลวที่กำลังไหลอยู่ในท่อที่อัตราการไหล (Flow rate) ต่ำ สีย้อมจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางตามแนวแกน เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง สีย้อมจะเริ่มผสมรวมกับของเหลวที่ระยะหนึ่งจากจุดฉีดสีเข้าไป เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสีย้อมบางส่วนในทิศทางตามแนวรัศมีที่อัตราการไหลสูง ๆ สีย้อมจะผสมรวมกับของเหลวทันทีที่ฉีดเข้าไป สีย้อมจะกระจายออกทั้งในทิศทางตามแนวแกนและแนวรัศมี

- การไหลแบบเส้นตรง (Straight-line flow) ทีอัตราการไหลต่ำ ๆ เรียกว่า Laminar flow
- การไหลแบบเส้นตรง (Straight-line flow) ทีอัตราการไหลระดับกลาง เรียกว่า Transitional flow
- การไหลแบบเส้นตรง (Straight-line flow) ทีอัตราการไหลสูง ๆ เรียกว่า Turbulent flow

Reynolds Number จะใช้บอกอัตราการไหลของของไหล คำนวณได้จากสูตร

$$Re = \frac{Du\rho}{\mu}$$

เมื่อ u = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

μ = ความหนืดของของไหล

ถ้า $Re < 2100$ เป็นลักษณะการไหลแบบ Laminar flow or Streamline flow

$Re > 4000$ เป็นลักษณะการไหลแบบ Turbulent flow

Re มีค่าระหว่าง 2100 ถึง 4000 เป็นลักษณะการไหลแบบ Transitional flow

2. <u>Nusselt number</u> เป็นรูปไร้มิติของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$$Nu = hD/k$$

เมื่อ h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

k = ค่าการนำความร้อนของของไหล

3. Prandtl number

$$Pr = \frac{\text{kinematic viscosity}}{\text{Thermal diffusivity}} = \frac{\upsilon}{\alpha}$$

เมื่อ C_p = ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (specific heat at constant pressure)

μ = ความหนืดของของไหล

k = ค่าการนำความร้อนของของไหล

การคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient)

การคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยการใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง (Empirical correlations) สามารถคำนวณได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. Identify flow geometry

ขั้นแรก คือ การจำแนกรูปร่างทางเรขาคณิตของพื้นผิวของแข็ง (solid surface) ที่สัมผัสกับของไหลเช่น เป็นท่อ (pipe) หรือทรงกลม (sphere) เป็นต้น ของไหลไหลภายในท่อหรือไหลบนผิวด้านนอก

2. Identify the fluid and determine its properties

ขั้นที่สองคือ การจำแนกชนิดของของไหลว่าเป็นน้ำ อากาศ หรืออาหารเหลว และหาอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่อยู่ห่างจากผิวของของแข็ง $T\alpha$ในบางชนิดอุณหภูมิเข้าและออกเฉลี่ยของของไหลอาจแตกต่างกัน เช่น ในกรณีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในกรณีนี้ให้คำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลดังนี้

$$T\alpha = (T_i + T_e) / 2$$

เมื่อ T_i = อุณหภูมิเข้าเฉลี่ยของของไหล

T_e = อุณหภูมิออกเฉลี่ยของของไหล

$T\alpha$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล

จากนั้นใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล $T\alpha$ ในการหาสมบัติทางกายภาพและความร้อน (physical and thermal properties) ของของไหล เช่น ความหนืด (viscosity), ความหนาแน่น (Density), ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) จากตาราง

3. Calculate the Reynolds number

คำนวณ Re เพื่อหาลักษณะการไหลของของไหลว่าเป็นแบบ Laminar flow ,Turbulent flow หรือ Transitional flow เพื่อเลือก empirical correlation ที่เหมาะสม

4. Select an appropriate empirical correlation

เลือก empirical correlation ที่เหมาะสมกับสภาวะ (Conditions) และเรขาคณิต (Geometry) ของวัตถุที่กำลังศึกษา เช่น การไหลของน้ำแบบ Turbulent ในท่อ เป็นต้น จากนั้นใช้ correlation ที่เลือก คำนวณหา Nusselt number และ Convective heat transfer coefficient (h) ซึ่งค่า h จะขึ้นกับชนิดและความเร็วของของไหล, คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล, ผลต่างของอุณหภูมิ และรูปร่างทางเรขาคณิตของระบบที่กำลังพิจารณา

การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection)

ความสัมพันธ์ทั่วไป (General correlation)

$$Nu = CRe^{m}Pr^{n}$$

เมื่อ C, m และ n = coefficients

Internal flow

1. Laminar flow in pipe สมการของ Sieder and Tate

$$Nu = 1.86\,(Re \times Pr \times D/L)^{1/3}\,(\mu_b/\mu_w)^{0.14}$$

เมื่อ L = ความยาวของท่อ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ

คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลจะหาที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล ยกเว้น μ_w ใช้ค่าที่อุณหภูมิผนังท่อ

2. Turbulent flow in pipe

$$Nu = 0.023Re^{0.8} \times Pr^{1/3} \times (\mu_b/\mu_w)^{0.14}$$

ใช้ในกรณี Re > 10,000

คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลจะหาที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล ยกเว้น μ_w ใช้ค่าที่อุณหภูมิผนังท่อ

ตัวอย่างที่ 14 น้ำไหลด้วยอัตราการไหล 0.02 kg/s ถูกทำให้ร้อนขึ้นจาก 20 ^{0}C เป็น 60 ^{0}C ในท่อที่วางในแนวนอน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.5 cm. อุณหภูมิที่ผนังท่อด้านในเท่ากับ 90 ^{0}C จงประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ถ้าความยาวของท่อเท่ากับ 1 m.

ตัวอย่างที่ 15 ถ้าอัตราการไหลของน้ำในตัวอย่างที่ 1 เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.02 kg/s เป็น 0.2 kg/s ในขณะที่สภาวะอื่น ๆ เหมือนเดิม จงคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนใหม่

External Flow

1. *The cylinder in cross flow* ของไหลไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอก

สมการของ Hilpert

$$Nu = hD/k = CRe^{m}Pr^{1/3}$$

ค่า C และ m สำหรับรูปทรงต่าง ๆ ทั้งที่เป็น circular cylinder และ noncircular cylinder หาได้จากตาราง ค่า characteristic length D ที่ใช้ในการคำนวณ Re และ Nu สำหรับรูปทรงต่าง ๆ แสดงอยู่ในรูปในตาราง คุณสมบัติของของไหลหาที่ film temperature

$$T_f = (T\alpha + T_s)/2$$

2. *The sphere* สมการของ Whitaker

$$Nu = 2 + (0.4Re^{1/2} + 0.06Re^{2/3}) Pr^{0.4} \times (\mu\alpha/\mu_s)^{1/4}$$

คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลหาที่อุณหภูมิ $T\alpha$ (free-stream temperature) ยกเว้น μ_s หาที่อุณหภูมิ T_s (surface temperature)

<u>การพาความร้อนแบบอิสระ</u> (Natural Convection)

การพาความร้อนแบบอิสระเกิดเนื่องจากความหนาแน่นที่แตกต่างกันของของไหลที่สัมผัสกับพื้นผิวร้อน การที่ของไหลมีความหนาแน่นน้อยที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดแรงลอยตัว (buoyancy forces) ส่งผลให้ของไหลร้อนเคลื่อนที่ขึ้นข้างบนส่วนของไหลที่เย็นกว่าจะเข้ามาแทนที่

ความสัมพันธ์ทั่วไปจะอยู่ในรูป

$$Nu = hD/k = C(\mathrm{Gr} \times Pr)^{n} = \mathrm{CRa}^{n}$$

เมื่อ C, n = ค่าคงที่

Ra = Rayleigh number = Gr x Pr

Rayleigh number จะเป็นผลคูณของเลขไร้มิติ 2 ตัว คือ Grashof number และ Prandlt number

Grashof number

$$Gr = \frac{g\beta (T_s - T\alpha) \rho^2 D^3}{\mu^2} = \frac{g\beta (T_s - T\alpha) D^3}{\upsilon^2}$$

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational acceleration), m/s^2

β = coefficient of volume expansion, K^{-1} or 1/T for ideal gases

T_s = อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ,

$T\alpha$ = อุณหภูมิของของไหลที่ห่างจากผิววัตถุมาก,

D = characteristic length of the geometry, m

$\upsilon = \mu/\rho$ = kinematic viscosity of the fluid, m^2/s

ในกรณีของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนแบบอิสระ สมบัติทางกายภาพของของไหลจะหาที่อุณหภูมิ T_f (film temperature) โดย $T_f = (T\alpha + T_s)/2$

ตัวอย่างที่ 16 จงประมาณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการสูญเสียความร้อนโดยการพาความร้อนจากท่อไอน้ำที่วางอยู่ในแนวนอน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm. อุณหภูมิที่ผิวท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวนเท่ากับ 130 ^{0}C และอุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 30 ^{0}C

การหาค่าสัมประสิทธิ์รวมการถ่ายเทความร้อน (Estimation of overall heat-transfer coefficient)

การถ่ายเทความร้อนอาจเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ทั้งโดยการนำความร้อนและการพาความร้อน(combined conductive and convective heat transfer) เช่น การถ่ายเทความร้อนจากท่อที่มีของไหลที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมรอบนอกท่อ ในกรณีนี้ ความร้อนจะถ่ายเทจากของไหลภายในท่อมาที่ผนังท่อด้านในโดยการพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) และการถ่ายเทผ่านผนังท่อโดยการนำความร้อน (conduction) จากนั้นถ่านเทแบบการพาความร้อนอิสระ (free convection) จากผิวด้านนอกของท่อไปยังสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนจะเกิดผ่านชั้น 3 ชั้น ที่ความต้านทานต่อกันแบบอนุกรม

จากสมการการถ่ายเทความร้อน

$$q = (T_i - T\alpha) / R_t$$

เมื่อ R_t = ความต้านทานความร้อนรวม (Combination of the thermal resistances)

$$R_t = (R_t)_{insideconvection} + (R_t)_{conduction} + (R_t)_{outsideconvection}$$

โดยที่ $\mathbf{(R_t)_{insideconvection} = 1/ h_iA_i}$

$\mathbf{(R_t)_{conduction} = \ln (r_0/r_i)/2\pi kL}$

$\mathbf{(R_t)_{outsideconvection} = 1/ h_oA_o}$

เมื่อ h_i = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ (inside convective heat transfer coefficient)

A_i = พื้นที่ผิวภายในท่อ (inside surface area of the pipe)

k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ(thermal conductivity of the pipe material)

r_i = รัศมีภายในของท่อ (inside radius)

r_0 = รัศมีภายนอกของท่อ (outside radius)

h_o = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ(outside convective heat transfer coefficient)

A_o = พื้นที่ผิวภายนอกของท่อ

เขียนสมการการถ่ายเทความร้อนรวม ได้ดังนี้

$$q = U_iA_i (T_i - T\alpha) = T_i - T\alpha / \left(1/ U_iA_I\right) \qquad \text{สมการ 1}$$

โดยที่ U_I = สัมประสิทธิ์รวมการถ่ายเทความร้อนโดยเทียบกับพื้นที่ภายในท่อ

จะได้ว่า

$$\frac{1}{U_iA_I} = \frac{1}{h_iA_I} + \frac{\ln(r_0/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_oA_o} \quad \text{และ} \quad \frac{1}{U_oA_o} = \frac{1}{h_iA_I} + \frac{\ln(r_0/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_oA_o}$$

สามารถเขียนสมการการถ่ายเทความร้อนรวมได้อีกแบบหนึ่งคือ

$$\boxed{q = U_oA_o(T_i - T\alpha)} \qquad \text{สมการ 2}$$

สมการ 1 และ 2 จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม q เท่ากัน

โดยที่ $U_iA_I = U_oA_o$ แต่ $U_i \neq U_o$

ตัวอย่างที่ 17 ท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.5 cm. ถูกใช้ในการขนส่งอาหารเหลวที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อมีค่าเท่ากับ 10 W/m^2 ท่อหนา 0.5 cm. ทำจากเหล็กซึ่งมีค่าการนำความร้อน 43 W/m ^{0}C อุณหภูมิรอบ ๆ ด้านนอกเท่ากับ 20 ^{0}C สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกเท่ากับ 100 W/m^2 ^{0}C จงคำนวณหาสัมประสิทธิ์รวมการถ่ายเทความร้อน และความร้อนที่สูญเสียจากท่อยาว 1 m.

แบบฝึกหัดท้ายบท

1. จงหาค่าความร้อนจำเพาะของอาหารต้นแบบ (Model food) ที่มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้ Carbohydrate 35%, Protein 20%, Fat 15%, Ash 5% และ Moisture 25 %

2. จงหาค่าการนำความร้อนของซอสมะเขือเทศที่มีปริมาณน้ำ 78.8 % ที่ อุณหภูมิ 50 ^{0}C

3. ให้หาการถ่ายเทความร้อนแบบ Steady state ต่อหน่วยพื้นที่ผ่านวัตถุเนื้อเดียวกันลักษณะชิ้นบางความหนา 4 เซนติเมตร ที่มีอุณหภูมิที่ผิวสม่ำเสมอทั้งสองด้านเป็น 100 และ 80 ^{0}C สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัตถุนี้เป็น 19 W/m ^{0}C

4. เมื่อน้ำร้อนมีอุณหภูมิ 95 ^{0}C ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ 70 W/m ^{0}C ผ่านผิวที่เย็น 5 ^{0}C ให้หาอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ผิวจากของไหลไปยังผิวเย็นนั้น

5. จงหาว่าก้อนขนมปังจะได้รับความร้อนโดยการแผ่รังสีเป็นปริมาณเท่าใด ถ้าอุณหภูมิภายในเตาอบเป็น 400 ^{0}F และของขนมปังเป็น 100 ^{0}F ขนมปังมีค่า เป็น 0.85 และมีพื้นที่ทั้งหมดเป็น 100 ตารางนิ้ว

6. ที่ด้านหนึ่งของแผ่นเหล็กไร้สนิมที่หนา 1 เซนติเมตร มีอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ในขณะที่ด้านตรงข้ามอีกด้านมีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส สมมติว่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ช่วงสภาวะสม่ำเสมอแล้ว (Steady state) ถ้ากำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กไร้สนิมมีค่า 17 W/m ^{0}C ให้หาอุณหภูมิที่ระหว่าง 0.5 เซนติเมตร จากผิวหนังที่มีอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

7. Heat transfer in cold store wall of brick, Concrete and Cork. A Cold store has a wall comprising 11 cm. of Brick on the outside, than 7.5 cm of Concrete and than 10 cm of Cork. The mean temperature within the store is maintained at -18 ^{0}C and the mean temperature of the outside surface of the wall is 18 ^{0}C . Calculate the rate of heat transfer through the wall.The appropriate thermal conductivity are for Brick, Concrete and Cork, respectively 0.69, 0.76 and 0.043 W/m ^{0}C.Determine also the temperature at the interfaces between the Concrete and Cork layers, and the Brick and Concrete layers

8. ให้หาอัตราการไหลของความร้อนต่อหนึ่งหน่วยความยาวของท่อทองแดง ซึ่งหนา 1.2 cm ท่อทองแดงมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.8 cm รอบท่อทองแดงมีฉนวนหุ้มหนา 4.3 cm ทำด้วย fiberglass ให้ของเหลวไหลภายในท่อทองแดงอุณหภูมิ 350 ^{0}C และอุณหภูมิบรรยากาศรอบฉนวนมีค่าเท่ากับ 20 ^{0}C และกำหนดให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ภายในท่อเท่ากับ 2500 W/m^2 ^{0}K ภายนอกท่อเท่ากับ 17 W/m^2 ^{0}K สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของทองแดงเท่ากับ 386 W/m ^{0}K และของ fiberglass 0.038 W/m^2 ^{0}K

9. ตู้อบแห้งอันหนึ่งทำจากแผ่นเหล็กหนา 5 มิลลิเมตร หุ้มด้วยฉนวนแมกนีเซียมหนา 25 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กและฉนวนมีค่านำความร้อนเป็น 45 และ 0.06 W/m ^{0}C ตามลำดับ ถ้าอุณหภูมิภายในตู้อบเป็น 60 ^{0}C และภายในห้องเป็น 20 ^{0}C อยากทราบว่าความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังจะเป็นปริมาณเท่าใด

10. ไอน้ำอุณหภูมิ 110 ^{0}C ไหลผ่านท่อเหล็กขนาด 25 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ท่อเหล็กมีค่าการนำความร้อนเป็น 45 W/m^2 ^{0}K ภายในห้องมีอุณหภูมิเป็น 15 ^{0}C และให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนจากผนังท่อด้านนอกไปยังอากาศโดยรอบเป็น 20 W/m^2 ^{0}K ให้หาปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปทั้งหมดคอดต่อความยาวท่อ 1 เมตร

11. ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำจาก 20 ^{0}C เป็น 40 ^{0}C ได้ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น ซึ่งท่อในมีขนาด 25 มิลลิเมตร ส่วนไอน้ำซึ่งไหลในท่อนอกมีอุณหภูมิ 95 ^{0}C ให้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของชั้นน้ำ กำหนดให้ m = 1.5 m^3/hr, ρ ที่อุณหภูมิ 30 ^{0}C = 998 kg/m^3

12. ท่อไอน้ำมีฉนวนหุ้ม วัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้ 4 นิ้ว อุณหภูมิที่ผิวฉนวนด้านนอกสุดมีค่า 130 ^{0}C ท่อวางอยู่ในห้องอุณหภูมิอากาศ 70 ^{0}C จงคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของชั้นอากาศที่อยู่ติดกับฉนวน