

บทที่ 2

การถ่ายเทพลังงานความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ

กับตัวกลางชนิดต่าง ๆ

ในบทนี้ได้ตอนแรกระดับก้าวถึงหลักการทำงานของเทอร์โมไดนามิกส์เบื้องต้นเพื่อเป็นพื้นฐานก่อนแล้วจากนั้นจะกล่าวถึงการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) ในรูปแบบต่าง ๆ ที่จะเป็นประโยชน์ในการนำเอาไปใช้กับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกี่ยวข้องกับการนำเอาปริมาณความร้อนมาใช้

2.1 หลักเบื้องต้นของทฤษฎีโมไดนามิกส์

2.1.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ (The first law of thermodynamics)

พลังงานคือความสามารถในการทำงาน อาจเกิดได้หลายแบบและมีอยู่หลายแบบ สิ่งที่จะประกอบให้มีพลังงานขึ้นมา เช่น ความเร็วตำแหน่ง อุณหภูมิของมวล พลังงานจะอยู่ในรูปเด็กตามผลรวมของพลังงานในจักรกล (universe) จะมีค่าคงที่เสมอหมายถึงพลังงานไม่อาจสร้างขึ้นมาใหม่หรือทำลายได้นอกเสียจากมันจะเปลี่ยนสภาพที่กล่าวมานี้คือความหมายของกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ นั้นคือ

พลังงานรูปแบบที่ 1 + พลังงานรูปแบบที่ 2 + = ค่าคงที่

ถ้ามีการสร้างกรอบรอบ ๆ ตัวที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานขึ้น เราจะพบว่า
 พลังงานที่เข้ามา = พลังงานที่ออกไป + การเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่สะสมไว้
 หรือ

$$E_i = E_0 + \Delta E \quad (2.1)$$

เมื่อ E_i คือพลังงานที่กำลังเข้าไปสู่ระบบ, E_0 คือพลังงานที่ออกจากระบบ, ΔE คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่สะสมไว้ในระบบ สมการที่ (2.1) คือกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

2.1.2 ความร้อนจำเพาะ (Specific heat)

ในการคำนวณได ๆ ทางความร้อนมักจะใช้น้ำเป็นตัวเปรียบเทียบ เพราะน้ำมีอยู่ทั่วไปและมีความสามารถดูดกลืนความร้อนได้ดี พลังงานที่อยู่ในรูปของความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับการเพิ่มของอุณหภูมิและมวลสารนั้น นั่นคือ

$$Q \propto m \Delta T$$

เมื่อ Q คือปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเท, ΔT คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ดังกล่าวเนี้ย เชียนใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการได้

$$Q = m c_p \Delta T \quad (2.2)$$

โดยที่ M คือมวลของสารนั้น, c_p คือค่าคงที่แสดงสัดส่วนสัมพันธ์ซึ่งเรียกว่าค่าความร้อนจำเพาะ โดยที่เราใช้น้ำเป็นมาตรฐานเบรเยลที่บีบ จึงประมาณว่าให้ค่า c_p ของน้ำมีค่า $4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{C}$ และมีความหนาแน่น 1000 kg/m^3 แต่อย่างไรก็ตามสารทุกชนิดจะมีค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสารนั้นด้วย ให้ดูได้จากตารางแนบท้าย สมการ (2.2) มีประโยชน์ในการใช้คำนวณในเรื่องการกักเก็บพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ (solar storage) ในกรณีที่ต้องการหาค่ามวลจากปริมาตรให้ใช้ $m = \rho \cdot V$ เมื่อ ρ คือความหนาแน่น, V คือปริมาตร แต่ในการพิจารณามวลของสารที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในการก่อสร้างจริง ๆ เนื่องสารมักจะไม่ร่วงคือไม่เต็มปริมาตร ดังนั้นในการคำนวณหามวลให้

$$m = \frac{\rho V (\% \text{ of solid})}{100\%} \quad (2.3)$$

2.1.3 ความจุความร้อน (Heat capacity) .

เพื่อความสะดวกในการคำนวณเขามักจะรวมค่าความร้อนจำเพาะ c_p เข้ากับความหนาแน่น ρ โดยเรียกว่าใหม่นิวัติว่าความจุความร้อนซึ่งหมายถึงว่า สารใดมีความจุความร้อนมากกว่าจะใช้ปริมาณน้อยกว่าเพื่อรับการเพิ่มปริมาณความร้อนที่เท่ากันได้

$$\text{ความจุความร้อน} = \text{ความร้อนจำเพาะ} \times \text{ความหนาแน่น}$$

หรือ

$$H_c = c_p \times \rho \quad (2.4)$$

ชนิดของสาร	ความจุความร้อน	
	KJ/m ³ - °C	Btu/ft ³ - °F
น้ำ	4180	62.4
หิน	2390	35.7
คอนกรีต	2160	32.2
เชซเหล็ก	3940	58.8
เชซอลูมิเนียม	2620	39.1
อิฐ	1880	28.0

ตารางที่ 2-1 ค่าความจุความร้อนของสารบางชนิด

ค่าความจุความร้อนของสารบางชนิดดูได้จากตารางที่ 2-1 จากร่างทำให้ทราบค่าความจุความร้อนของสารบางชนิดซึ่งนำมาประกอบการพิจารณา กับราคาเมื่อจะนำมาใช้ เช่น น้ำ หาง่าย ราคาถูก ความจุความร้อนสูง แต่ภาระที่ใช้บรรจุค่อนข้างแพงเป็น ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนไปใช้

$$Q = H_C \times V \times \Delta T \times \frac{(\% \text{ of solid})}{100\%} \quad (2.5)$$

2.1.4 ชนิดของพลังงาน

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ $E_i = E_0 + \Delta E$ ดังเดียวกันแล้ว พลังงานมีค่าอนุรักษ์ ในการพิจารณาทางระบบความร้อนที่ได้จากแสงอาทิตย์ พลังงานในรูปแบบต่างๆ ที่ควรทราบคือ

ก. Internal energy ของสารได้ ϵ คือพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงภาวะของโมเลกุลทั้งหมดของสารนั้น ๆ ซึ่งเป็นพิร์ชันกับอุณหภูมิ ถ้าสารได้มีอุณหภูมิยิ่งมาก internal energy ก็ยิ่งมีค่ามากหน่วยเป็น KJ/kg หรือ Btu/lbm เราใช้สัญญลักษณ์ e

ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ สารที่ใช้เป็นตัวพาความร้อนในตัวรับแสงไปยังตัวกักเก็บเพื่อนำไปใช้มักริช อากาศหรืออิน้ำ เช่น กรณีของอากาศที่เป็นกําazi อุดมคติ (ideal gas) เราจะได้

$$e = \text{internal energy} = c_v T \quad (2.6)$$

เมื่อ c_v คือความร้อนจำเพาะของอากาศ, T คืออุณหภูมิของอากาศ ดังนั้น เมื่ออากาศมีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_1 เป็น T_2 การเปลี่ยนแปลงของ internal energy, e จะมีค่า

$$\Delta e = e_2 - e_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad (2.7)$$

ข. พลังงานจลน์ (kinetic energy), $K.E = \frac{1}{2} mv^2$ เมื่อ m คือมวลสาร, v คือความเร็วของสารนั้น

ค. พลังงานศักย์ (potential energy), $P.E = mgz$ เมื่อ g คือความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก, z คือความสูงของวัตถุจากระดับบังอิงได้ ๆ

2.1.5 การไหลของของไอลที่อัดต่อไปอีกไม่ได้ (Incompressible flow)

ของเหลวถือได้ว่าเป็นสารที่อัดต่อไปอีกไม่ได้ ก้าวเข่นอากาศที่ความกดดันเปลี่ยนแปลงค่อนข้างต่ำก็อาจถือได้ว่าอัดต่อไปอีกไม่ได้ จึงทำให้มวลคงลักษณะเดิมไม่ค่าอนุรักษ์

$$m_i = m_0 + Am \quad (2.8)$$

เมื่อ m_i = มวลที่ไหลเข้าสู่ระบบ, m_0 = มวลที่เหลือออกจากระบบ, Δm คือมวลที่เปลี่ยนแปลงในระบบหรือในบริเวณกักเก็บ (storage) ดังนั้น ถ้าเป็นการไหลอย่างสม่ำเสมอ (steady flow) จะได้

$$\dot{m}_i = \dot{m}_0, \quad Am = 0$$

หารด้วยเวลาจะได้

$$\dot{\bar{m}}_i = \dot{\bar{m}}_0 \quad (2.9)$$

เมื่อ \dot{m} แทนอัตราการไหลของมวล (mass flow rate) ซึ่งมีค่า

$$\dot{\bar{m}} = \rho \bar{v} A \quad (2.10)$$

เมื่อ \bar{v} คือความเร็วเฉลี่ยของของไอล, A คือพื้นที่หน้าตัดของห่อ, เมื่อแทนค่าลงใน (2.9) จะได้

$$\rho_i \bar{v}_i A_i = \rho_0 \bar{v}_0 A_0 \quad (2.11)$$

กรณีที่ของไอลอัดต่อไปไม่ได้อีก ความหนาแน่นไม่เปลี่ยนจะได้

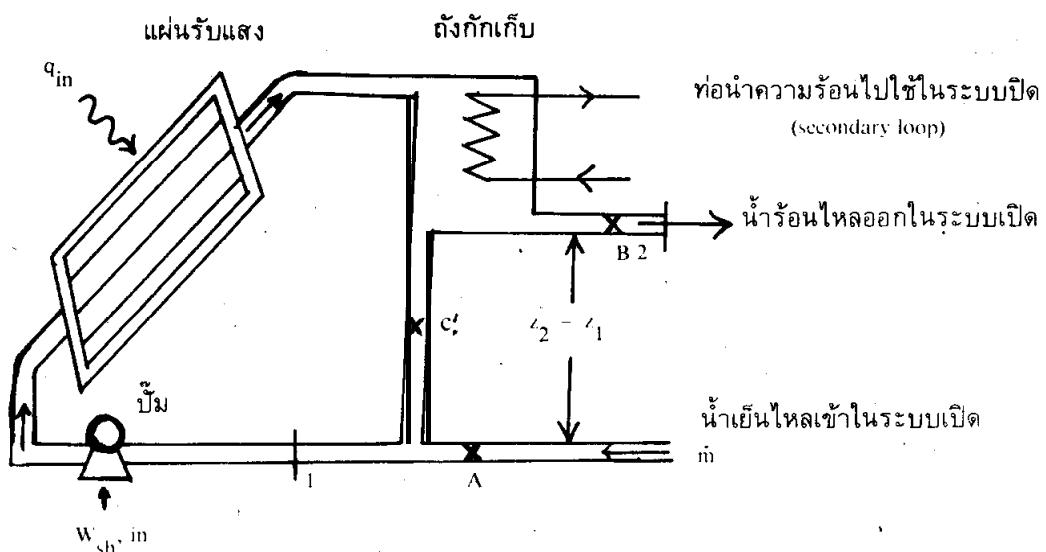
$$\bar{v}_i A_i = \bar{v}_0 A_0 \quad (2.12)$$

2.1.6 การวิเคราะห์ระบบการไหลทั้งหมด

(Overall flow system analysis)

ในการคำนวณกำลังและขนาดของปั๊มหรือพัดลมในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในการนำเอาความร้อนมาใช้ โดยที่ปั๊มจะเป็นตัวขับดันของเหลว ส่วนพัดลมขับดันกําชีวเพื่อนำความร้อนผ่านท่อลิ้น ถังเก็บ ตัวแลกเปลี่ยนเพื่อนำความร้อนไปใช้ มักจะพิจารณาความสมดุลย์ของพลังงานหรือกำลังงานที่เกิดขึ้นแก่ระบบทั้งหมดโดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์

พิจารณาระบบเปิด (open system) เมื่อมีการไหลของของไหลแบบสม่ำเสมอโดยที่มีท่อนำเข้าและนำออกของของไหลต่างระดับกันดังรูปที่ 2-1 น้ำเย็นเข้าทางลิ้น A นำร้อนออกไปทาง B โดยที่ลิ้น C ปิดและในรูปเดียวกันนี้ในระบบปิด (closed system) ลิ้น A,B ปิดโดยเปิดเฉพาะ C และจะมีท่อหมุนเวียนอันที่สองซึ่งอาจใช้ของไหลชนิดอื่นมาพาเอาความร้อนไปใช้ในกรอบระบบปิด



รูปที่ 2-1 แสดงการหมุนเวียนของของไหลในระบบการนำเอาความร้อนจากดวงอาทิตย์ไปใช้

ต่อนแรกพิจารณาระบบเปิดก่อนเราอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โนไดนามิกส์
จะได้สมการแสดงภาวะสมดุลย์ของกำลังงานเป็น

$$\dot{m} [z_1 g + \frac{v_1^2}{2} + (e + pV)_1] + q + w_{sh} = \dot{m} [z_2 g + \frac{v_2^2}{2} + (e + pV)_2] + \Sigma F_{fr} \quad (2.1-3)$$

\dot{m}	= อัตราการไหลของมวลผ่านระบบ (kg/sec)
z	= ความสูงเพื่อแสดงพลังงานศักย์ (m)
g	= ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (9.806 m/sec^2)
v	= ความเร็วของไหล (m/sec)
$(e + pV)$	= enthalpy ของของไหล (internal energy + ความดัน \times ปริมาตร), (J/kg)
ΣF_{fr}	= กำลังที่สูญเสียไปเนื่องจากความเสียดทานระหว่างของไหลที่ถูกดันและท่อ, J/sec
q	= อัตราการถ่ายเทความร้อน (rate of heat transfer) ซึ่งให้แก่ของไหล, J/sec
w_{sh}	= กำลังที่ปั๊มใช้ขับดันของไหล, J/sec

ที่กล่าวมาพิจารณาในระบบเปิด แต่ส่วนใหญ่ของตัวรับแสงอาทิตย์จะมีการไหลเวียนของของไหลที่เป็นตัวทำงาน (working fluid) เป็นแบบวงจรปิด และความร้อนนำออกจากถังกักเก็บ (storage tank) ผ่านท่อหมุนเวียนอันที่สอง (a secondary loop) ดังนั้นมีพิจารณาไว้ให้แล้วปิด-ปิด A และ B ปิดส่วน C เปิดและเมื่อไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อหมุนเวียนอันที่สอง จะได้จุด 1,2 ซ้อนกัน นั่นคือ

$$z_1 g + \frac{v_1^2}{2} + (e + pV)_1 = z_2 g + \frac{v_2^2}{2} + (e + pV)_2 \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.13) จะเหลือ

$$q + w_{sh} = \Sigma F_{fr} \quad (2.15)$$

โดยที่ ΣF_{fr} คือผลรวมของกำลังที่สูญเสียไปเนื่องจากความเสียดทานของของไอลที่ถูกดันกับท่อ

ในการติดตั้งระบบนำความร้อนจากดวงอาทิตย์ไปใช้ เช่นระบบการทำน้ำร้อนในระบบเล็ก ๆ อาจไม่ต้องใช้ปั๊มแต่ใช้การหมุนเวียนโดยธรรมชาติ (natural circulation) โดยพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ q จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของน้ำ เกิดแรงยกตัวพาให้น้ำร้อนเคลื่อนที่ชนความเสียดทานกับท่อได้ เกิดการหมุนเวียนโดยน้ำร้อนไหลขึ้นไปและน้ำเย็นไหลมาแทนที่ แต่ในระบบใหญ่ ๆ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของไอล นำความร้อนได้เต็มที่เข้าจะใช้ปั๊มหรือพัดลมช่วย

2.2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

(Principles of heat transfer)

ในการออกแบบและคำนวณระบบการนำเอาระบบนำความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้ (solar - thermal systems) จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่าง ๆ เมื่อใดที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิก็ขึ้น พลังงานจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่อุณหภูมิต่ำ ตามความหมายของวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานดังกล่าวคือความร้อน ถึงแม้ว่าวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ดังเดิมจะพิจารณาพลังงานและการถ่ายเทความร้อนของระบบที่อยู่ในภาวะสมดุลย์ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณพลังงานที่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงระบบจากภาวะสมดุลย์ระดับหนึ่งสู่อีกระดับหนึ่งได้ แต่ไม่สามารถคำนวณหาว่าการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นเกิดขึ้นได้เร็วแค่ไหน การศึกษาการถ่ายเทความร้อนเพื่อการประยุกต์ใช้มีการ

เพิ่มเติมกญข้อที่หนึ่งและสองของวิชาเทอร์โมไดนามิกส์ดังเดิมให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นโดยใช้วิธีวิเคราะห์หาอัตราของการถ่ายเทคุณร้อน และการกระจายของอุณหภูมิ วิธีดังกล่าวเรียกวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทคุณร้อน (heat transfer analysis) ความแตกต่างที่เห็นได้อย่างง่าย คือระหว่างเทอร์โมไดนามิกส์ดังเดิมและการวิเคราะห์การถ่ายเทคุณร้อนก็คือ ถ้าเราทรงระบบอุ่นโลหะใส่ลงไปในถังน้ำร้อน เทอร์โมไดนามิกส์สามารถคำนวณอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อระบบทั้งสองอยู่ในภาวะสมดุลย์แต่ไม่สามารถบอกได้ว่าอุณหภูมิของทรงระบบอุ่นเป็นเท่าไรหลังจากเวลาผ่านไปเท่านั้นเท่านี้ หรือบอกไม่ได้ว่านานเท่าใดระบบจึงจะเข้าสู่ภาวะสมดุลย์ ส่วนการวิเคราะห์การถ่ายเทคุณร้อนสามารถที่จะคำนวณหาอัตราของการถ่ายเทคุณร้อนจากน้ำไปยังทรงระบบอุ่นและน้ำนั้นได้และสามารถคำนวณอุณหภูมิของทรงระบบอุ่นและอุณหภูมิของน้ำให้เป็นพังก์ชันของเวลาได้

การศึกษาการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับการนำ (conduction), การพา (convection) และการแผ่รังสี (radiation) ซึ่งจำเป็นต่อระบบการนำเอาร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ ซึ่งเราจะศึกษาต่อไปนี้

2.2.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction heat transfer)

การนำเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งที่เกิดได้ในของแข็ง เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิแตกต่างกันความร้อนจะไหลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า อัตราที่ความร้อนถ่ายเทโดยการนำ, q , จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิเมื่อระบบเปลี่ยนไป, $\frac{dT(x)}{dx}$ อุณหภูมิพื้นที่ที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน, A หรือ

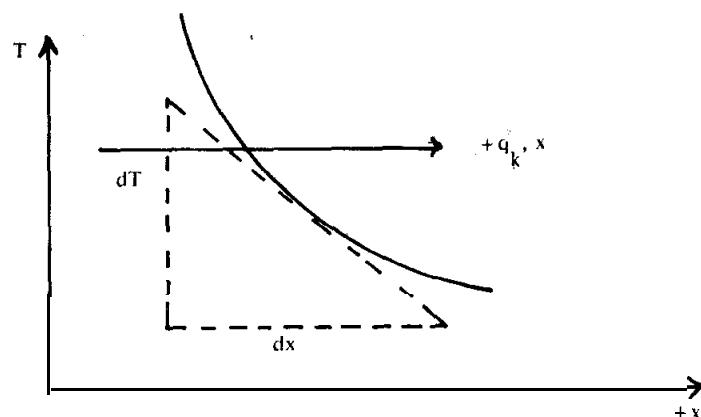
$$q_k \propto A \frac{dT(x)}{dx} \quad (2.16)$$

โดยที่ $T(x)$ คืออุณหภูมิซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทาง
 x คือระยะทางในทิศทางที่ความร้อนไหลผ่าน

อัตราจริงของการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับสภาพการนำความร้อน (thermal conductivity), k ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลาง กรณีการนำผ่านวัตถุมีเนื้อดีกว่ากันต่อๆ ตาม สมการ (2.16) เขียนได้เป็น

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.17)$$

เครื่องหมายลบเป็นผลมาจากการหักห้ามที่สองของเทอร์โน่ไดนามิกส์ ซึ่งเป็นสิ่งบอกว่าความร้อนไหลไปทางอุณหภูมิต่ำ ให้ดูรูปที่ 2-2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อระยะทางเปลี่ยนไปมีความชัน (slope) เป็นลบนั้นคือถ้าระยะทางยิ่งมากค่าอุณหภูมิยิ่งลดลง สมการ (2.17) เรียกว่า Fourier's law of heat conduction และทำให้ทราบคุณสมบัติของสภาพนำความร้อน



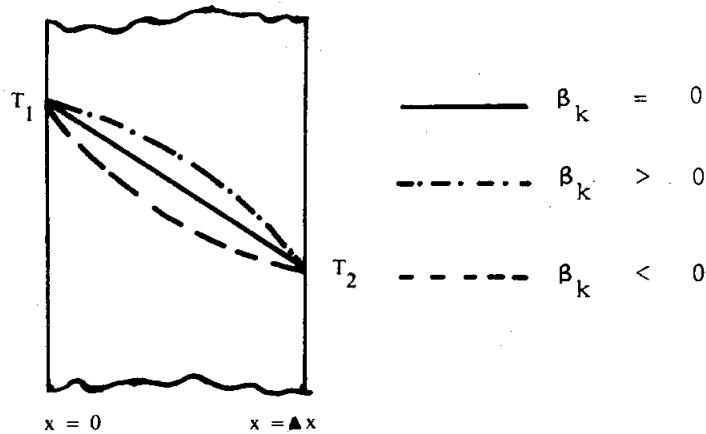
รูปที่ 2-2 ทิศทางของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ

k ถ้าพื้นที่เป็นตารางเมตร (m^2), อุณหภูมิเป็นองศา Kelvin (K), x เป็นเมตร (m) และ อัตราความร้อนไหลเป็นวัตต์ (W), k จะมีหน่วยเป็น $W/(m \cdot K)$ ถ้าระบบอังกฤษจะมีหน่วย เป็น Btu/(hr.ft.F)

2.2.1.1 การคำนวณความร้อนผ่านผนัง (plane walls)

การนำเอา Fourier's law มาใช้กับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังดังรูปที่ 2-3 ถ้าสภาพนำความร้อนมีค่าสมำเสมอในทิศทาง (integrate) สมการ (2.17) จะได้

$$q_k = - (kA / \Delta x) (T_2 - T_1) = (kA / \Delta x) (T_1 - T_2) \quad (2.18)$$



รูปที่ 2-3 การกระจายของอุณหภูมิในการคำนวณความร้อนผ่านผนังซึ่งใช้ถ้าสภาพนำความร้อนคงที่และไม่คงที่

โดยที่ Δx คือความหนาของแผ่น, T_1 คืออุณหภูมิที่ผิวด้านซ้ายที่ $x = 0$ และ T_2 คืออุณหภูมิที่ผิวด้านขวาที่ $x = \Delta x = L$

วัสดุหลายชนิดมีสภาวะนำความร้อนเป็นพังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิตามสมการ

$$k(T) = k_0(1 + \beta_k T) \quad (2.19)$$

ดังนั้นเมื่ออินทิเกรตสมการ (2.17) จะได้

$$q_k = (k_0 A / \Delta x) [(T_1 - T_2) + (\beta_k / 2) (T_1^2 - T_2^2)] \quad (2.20)$$

หรือ

$$q_k = (k_{av} A / \Delta x) (T_1 - T_2) \quad (2.21)$$

โดยที่ $k_{av} = k_0 [1 + (\beta_k / 2)(T_1 + T_2)]$ คือค่าของ k ที่อุณหภูมิเฉลี่ย $(T_1 + T_2)/2$ การกระจายของอุณหภูมิที่มีค่าสภาวะนำความร้อนคงที่ ($\beta_k = 0$), มีค่าเพิ่มขึ้น ($\beta_k > 0$) และลดลง ($\beta_k < 0$) กับอุณหภูมิ ให้ดูรูปที่ 2-3

ตัวอย่างที่ 2.1

แผ่นแก้วที่ใช้ครอบบันดัรับแสงมีพื้นที่ 10 ตารางเมตร และมีความหนา 1 เซนติเมตร มีสภาวะการนำความร้อนของแก้วเท่ากับ $0.8 \text{ W}/(\text{m.K})$ ในวันอากาศค่อนข้างเย็นผิวด้านนอกของแผ่นแก้วมีอุณหภูมิ 273.5 K และผิวด้านในมีอุณหภูมิ 275.5 K ให้คำนวณหา

ก. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นแก้ว

ข. อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นแก้ว

วิธีทำ

ก. อัตราการถ่ายเทความร้อนแผ่นแก้วมีค่า

$$\begin{aligned} q &= kA(T_1 - T_2) / \Delta x \\ &= (0.8 \frac{W}{m \cdot K}) (1.0 m^2) (2 K) / (0.01 m) \\ &= 1.6 \times 10^3 W \end{aligned}$$

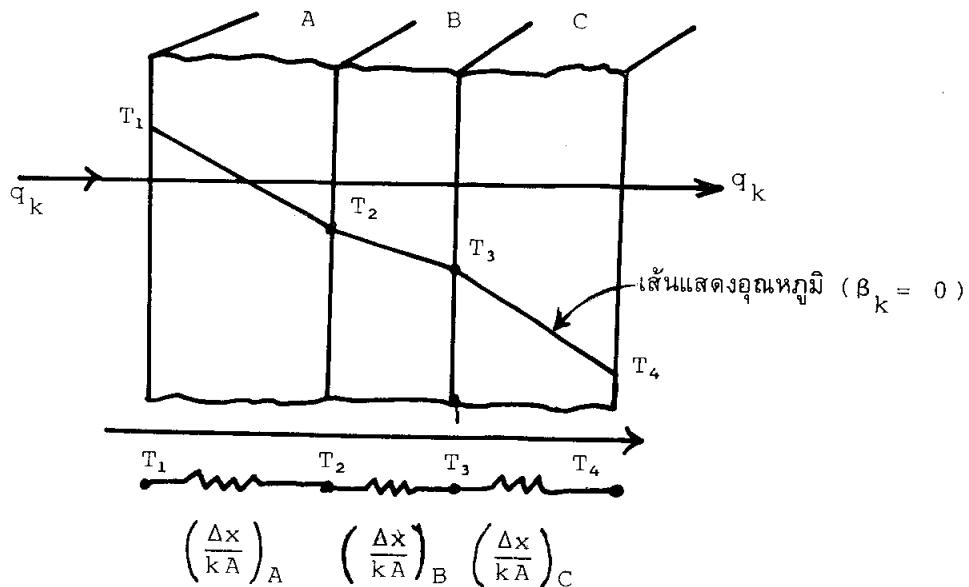
ข. อุณหภูมิระหว่างแผ่นมีค่า

$$(T - T_1) / (T_2 - T_1) = \frac{1}{2} = (T - 275.5) / (273.5 - 275.5)$$

$$T = 274.5 \text{ K}$$

ค่า T ที่ได้คือค่าเฉลี่ยของผิวทั้งสอง เราใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อระสภพการนำความร้อนมีค่าคงที่ จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงระยะทางเป็นฟังก์ชันแบบเส้นตรง ผ่านระยะความหนาของแผ่นแก้ว

ถ้าความร้อนถูกนำผ่านแผ่นวัสดุหลาย ๆ แผ่นเรียงกัน เช่นผ่านผนังหลาย ๆ ชั้นในการก่อสร้างบ้านเรือน การคำนวณก็ยากขึ้นเล็กน้อย พิจารณาการถ่ายเทอย่างสม่ำเสมอ (steady state) หมายถึงอัตราการไหลของความร้อนแต่ละส่วนมีค่าเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม ดังแสดงในรูป 2-4 แสดงการนำความร้อนผ่านระบบที่มีสามชั้น ที่มีสภพการนำความ



รูปที่ 2-4 แสดงการนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้น และข่ายงานการต้านทานความร้อน

ร้อนต่างกันจะมีการเปลี่ยนของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนระยะทางมีค่าต่างกัน และวงจรข้างล่างแสดงข่ายงานการต้านทานความร้อน (thermal resistance network) ยัตราการถ่ายเทขายร้อนในแต่ละส่วนจะมีค่าเท่ากันกรณีการให้ผ่านของความร้อนอย่างสม่ำเสมอคือ

$$q_k = \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_A} = \frac{(T_2 - T_3)}{\left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_B} = \frac{(T_3 - T_4)}{\left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_C} \quad (2.22)$$

เมื่อพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวแรกถึงผิวสุดท้ายโดยขั้นตอน T_2 และ T_3 ออกจะได้

$$T_1 - T_2 + T_2 - T_3 + T_3 - T_4 = q_k \left[\left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_A + \left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_B + \left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_C \right]$$

$$q_k = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_A + \left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_B + \left(\frac{\Delta x}{kA} \right)_C} \quad (2.23)$$

สมการ (2.23) นี้เป็นจุดทำให้เกิดความคิดเบรียบเทียบได้กับทฤษฎีวงจรไฟฟ้า โดยให้ q_k คล้ายกระแสไฟฟ้าที่流ผ่านตัวต้านทานแต่ละตัว นั่นคือ $\Delta x/(kA)$ ก็คล้าย R และอุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิว ΔT ก็คล้ายกับความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ดังนั้นสมการ (2.18) จึงเขียนได้แบบกฎหมายโอล์ม (Ohm's law) ตามทฤษฎีวงจรไฟฟ้าได้เป็น

$$q_k = \frac{AT}{R} \quad (2.24)$$

โดยที่

$$\Delta T = T_1 - T_2 , \quad R = \frac{\Delta x}{kA}$$

ในทำนองเดียวกัน กรณีความร้อนไหลผ่านแต่ละส่วนของผนังแบบเรียงกัน (series) ดังรูปที่ 2-4 เราจะได้

$$q_k = \Delta T / (R_A + R_B + R_C) \quad (2.25)$$

โดยที่

$$\Delta T = T_1 = T_4 , \quad R_A = \frac{\Delta x}{(kA)_A} , \quad R_B = \frac{\Delta x}{(kA)_B}$$

แล้ว

$$R_C = \frac{\Delta x}{(kA)_C}$$

ตัวอย่างที่ 2.2

ผนังบ้านประกอบด้วยแผ่นอิฐธรรมชาติหนา 0.1 เมตร มีสภาพการนำความร้อนเท่ากับ 0.70 วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน และแผ่นยิปซัมหนา 0.0375 เมตร มีสภาพการนำความร้อน 0.48 วัตต์ต่อเมตรต่อเคลวิน ให้เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นนี้ที่ไม่มีฉนวนร่วมกันกับที่มีฉนวนระหว่างแผ่นอิฐและยิปซัมเป็นมุ่งผู้นินฟอยหนา 0.0508 เมตร ซึ่งมีสภาพการนำความร้อนเท่ากับ 0.065 วัตต์ ต่อเมตรต่อเคลวิน

วิธีทำ

อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นไม่มีฉนวนกันต่อตารางเมตรต่อความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นองศาเคลวินระหว่างผิวมีค่าหาได้จาก

$$\frac{q_k}{A} = \frac{T_i - T_o}{(\Delta x/k)_A + (\Delta x/k)_B}$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} \frac{q_k}{A \cdot \Delta T} &= \frac{1}{(\Delta x/k)_A + (\Delta x/k)_B} \\ &= \frac{1}{[(0.10/0.70) + (0.0375/0.48)] (m \cdot m K/W)} \\ &= 4.52 W/(m^2 \cdot K) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อมีจำนวนก้อนเพิ่มเข้ามาเป็นตัวต้านทานตัวที่สามโดยมีค่า } (\Delta x/k) &= \frac{0.0508 \text{ m}}{0.065 \text{ W/(m.K)}} \\ &= 0.783 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad \text{ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเป็น} \end{aligned}$$

$$\frac{q_k}{A \cdot \Delta T} = \frac{1}{0.145 + 0.783 + 0.079} = 1.00 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K})$$

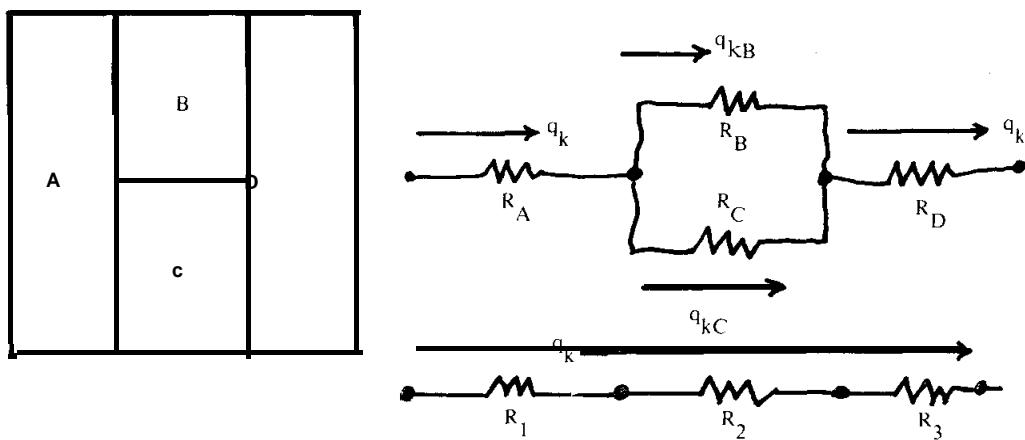
เพราะฉะนั้นผังที่เพิ่มแผ่นหินฟอยจะลดการสูญเสีย (หรือเพิ่ม) ความร้อนประมาณ
 $(4.52 - 1) \times 100\% / 4.52 = 78\%$

จากสมการ (2.25) อัตราการไหลของความร้อน q อยู่ในรูปของอุณหภูมิแตกต่างทั้งหมดและความต้านทานของแต่ละส่วนในทางผ่านของความร้อน เราอาจพิจารณาความหมายของคำใหม่ขึ้นมาให้ชื่อว่า overall transmittance หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ใช้สัญลักษณ์ U หรือเรียกว่า U -factor เป็น

$$U = q_k / (A \cdot T) \quad (2.26)$$

สำหรับค่า U -factor ของวัสดุการก่อสร้างผังบ้านเรือนที่มีผังหลายชั้นและพื้นที่เท่ากันให้หา $(\Delta x/k)$ ของแต่ละส่วนแล้วนำรวมกัน จากนั้นนำเอาไปหารหนึ่งก็จะได้ค่า U ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรต่อเคลวิน ดังตัวอย่างที่ 2.2

ในทำนองเดียวกันกับที่พิจารณามาแล้วถ้าวัสดุที่เป็นทางผ่านของความร้อน (thermal resistance) ไม่ได้ต่อ กันแบบอนุกรมอย่างเดียวแต่ต่อแบบขนาน (parallel) ด้วยเรา ก็อาศัยความคล้ายคลึงกับการต่อวงจรไฟฟ้ามาใช้ดังรูปที่ 2-5 โดยตัวกลางมี 2 ชั้นนานกันอยู่ ดังนั้นในกรณีนี้ R_2 จะรูป หาได้จากการพิจารณาการไหลผ่านของความร้อนแบบสม่ำเสมอจะได้ q_k อัตราการไหลผ่าน R_2 เป็น



รูปที่ 2-5 การนิยามความร้อนผ่านพื้นที่วัสดุที่เรียงกันแบบอนุกรมและขนาดและข่ายงานการ
ทำงานความร้อน

$$q_k = \frac{(T_i - T_0)}{\left(\frac{\Delta x}{kA}\right)} = q_{kB} + q_{kC} = \frac{T_i - T_0}{\left(\frac{\Delta x}{kA}\right)_B} + \frac{T_i - T_0}{\left(\frac{\Delta x}{kA}\right)_C}$$

เพราะจะนั่น

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_B} + 1 = \frac{R_C}{R_C + R_B} + \frac{R_B}{R_C}$$

$$R_2 = R_B R_C / (R_B + R_C) \quad (2.27)$$

ดังนั้นกรณีการต่อแบบอนุกรมอาจเขียนในรูปทั่ว ๆ ไปได้ว่า อัตราการไหลของความร้อน

$$q_k = \Delta T_{\text{overall}} / \sum_{n=1}^{n=N} R_{\text{th},n}, \quad (2.28)$$

เมื่อ N = จำนวนของชิ้นวัสดุที่เรียงกันแบบอนุกรม

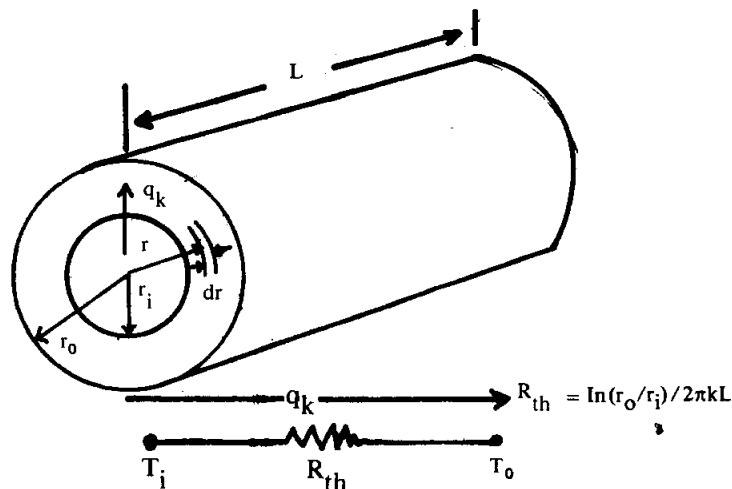
$R_{\text{th},n}$ = ความต้านทานความร้อนของวัสดุ ชิ้นที่ n

T_{overall} = อุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวในและผิวนอก

2.2.1.2 การนำความร้อนผ่านทรงกระบอกและทรงกลม

(Cylinders and spheres)

การนำความร้อนผ่านท่อต่าง ๆ รวมทั้งถังบรรจุน้ำทรงกลมมีบทบาทมากในระบบการนำเอาร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ ตอนแรกเราพิจารณาทรงกระบอกกลวงยาวรัศมีภายใน r_i รัศมีภายในของ r_i ท่อยาว L ดังรูปที่ 2-6 อุณหภูมิผิวในเป็น T_i อุณหภูมิ



รูปที่ 2-6 การนำความร้อนในแนวรัศมีผ่านทรงกระบอกกลวง

ผิวนอก T_0 ในการคำนวณหาอัตราการนำความร้อนตาม Fourier's law สามารถนำมาใช้ได้เมื่อพิจารณาว่าท่อยาวพอที่จะละผลของปลายท่อโดยความร้อนไหลไปตามแนวรัศมีเท่านั้น ดังนั้นพื้นที่ที่ความร้อนนำผ่านระบบท่อทรงกระบอกคือ $A_r = 2\pi r L$ ดังนั้น

$$q_k = -k A_r \frac{dT}{dr} = -2\pi k L r \frac{dT}{dr} \quad (2.29)$$

แยกตัวแปรจะได้

$$q_k \frac{dr}{r} = -2\pi k L dT$$

อินทิเกรทโดยมี boundary conditions

$$\begin{aligned} T(r) &= T_i \quad \text{ที่ } r = r_i \\ T(r) &= T_0 \quad \text{ที่ } r = r_0 \\ q_k \int_{r_i}^{r_0} \frac{dr}{r} &= -2\pi k L \int_{T_i}^{T_0} dT \end{aligned}$$

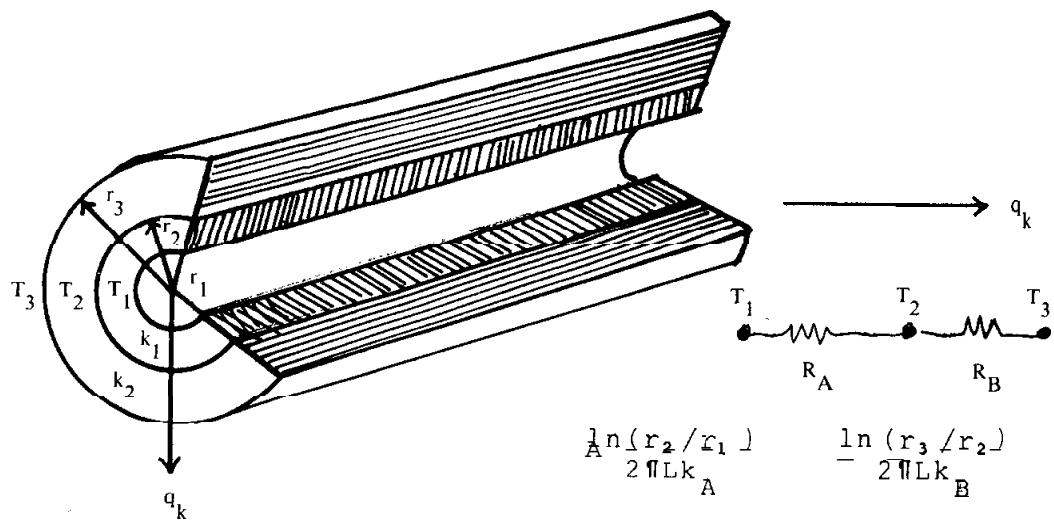
ดังนั้นจะได้อัตราการนำความร้อนผ่านทรงกระบอกในแนวรัศมี เป็น

$$q_k = 2\pi k L (T_i - T_0) / \ln(r_0/r_i) \quad (2.30)$$

หรือ $q_k = (T_i - T_0) / R_{th}$
เมื่อ $R_{th} = \ln(r_0/r_i) / 2\pi k L$

ในกรณีพิจารณาการต้านทานดังที่เคยกล่าวมาแล้วคือกรณีของทรงกระบอก
หลายชั้น ตัวอย่างถ้าเป็น 2 ชั้นดังรูปที่ 2-7 ซึ่งเป็นท่อแล้วโอบปิดด้วยฉนวน จะได้

$$q_k = (T_1 - T_3) / (R_A + R_B) \quad (2.31)$$



รูปที่ 2-7 การคำนวณความร้อนผ่านห้องเผาไหม้ตามแนวแกนที่มีฉนวนหุ้มด้วยและข่ายงานการต้านทาน
ความร้อน

โดยที่

$$R_A = \ln(r_2 / r_1) / 2\pi L k_A, \quad R_B = \ln(r_3 / r_2) / 2\pi L k_B$$

กรณีทรงกลม (spherical systems) ก็ทำในทำนองเดียวกัน เมื่อความร้อนไหลในแนว
รัศมี อุณหภูมิเป็นพังก์ชันของรัศมีเท่านั้น อัตราการนำความร้อนผ่านทรงกลม栝งจากรัศมี
ภายใน r_i และรัศมีภายนอก r_o เมื่ออุณหภูมิภายนอก T_0 และอุณหภูมิภายนอก T_i
เป็น

$$q_k = -4\pi r^2 k \frac{dT}{dr}$$

$$q_k \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r^2} = -4\pi k \int_{T_i}^{T_0} dT$$

$$q_k = \frac{4\pi k (T_i - T_0)}{(r_o - r_i) / (r_o + r_i)}$$

ส่วนกรณีทรงกลมหลายชั้นก็พิจารณาคล้ายกันกับที่พิจารณามาแล้ว

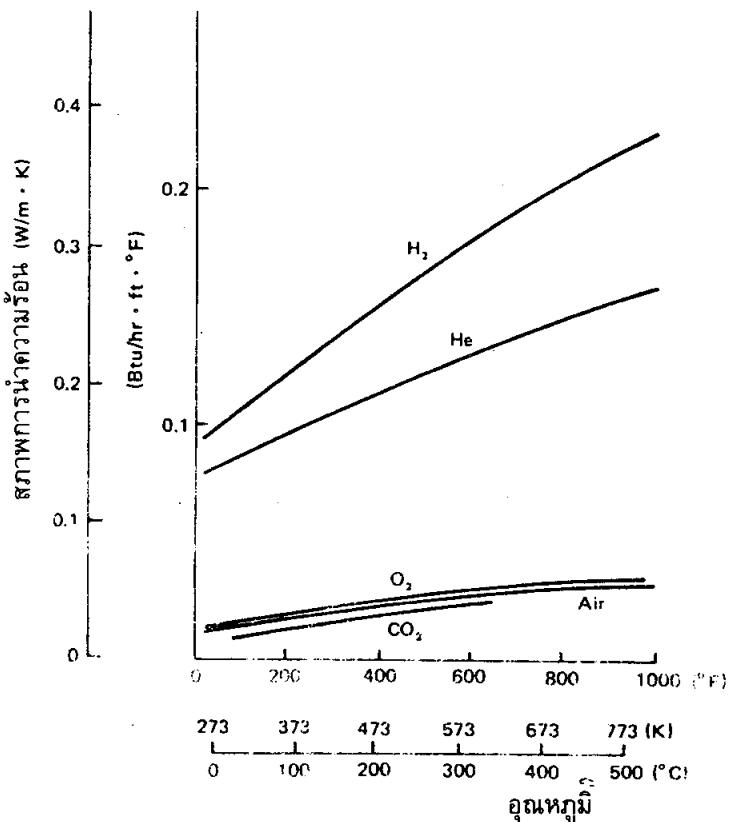
2.2.1.3 สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity)

สภาพการนำความร้อนของสารนิยามดังสมการ 2.17 นอกจำกัดที่อุณหภูมิ
ต่ำๆ เป็นการยากในการคำนวณคุณสมบัตินี้ ดังนั้นข้อมูลที่เหลือเกี่ยวกับการหาค่า
สภาพการนำความร้อนจะเขียนอยู่กับการทดลอง โดยทั่วไปแล้วสภาพการนำความร้อนของสาร
ใดจะแปรผันกับอุณหภูมิแตกในทางปฏิบัติเพื่อความสะดวก เขาอาจจะใช้ค่าคงที่ที่ได้จากการค่าเฉลี่ย
ของอุณหภูมิของระบบซึ่งก็ให้ค่าพอใช้ได้ ตารางที่ 2-2 แสดงค่าการนำความร้อนของโลหะ
ของแข็งโลหะ ของเหลวและกําชบางชนิดซึ่งแสดงเฉพาะตัวเลขที่จะนำไปใช้ในการปฏิบัติได้
ส่วนรายละเอียดอื่น ๆ ให้ดูจากตารางแบบทั่วไป

ชนิดสาร	ค่าสภาวะการนำความร้อน ที่อุณหภูมิ 300 K (W/m.K)
ทองแดง	386
อลูมิเนียม	204
เหล็กกล้า	54
แก้ว	0.75
พลาสติก	0.2-0.3
น้ำ	0.6
น้ำมันเครื่องยนต์	0.15
ฟรีอ่อนเหลว (freon)	0.07
ไฮโดรเจน	0.18
อากาศ	0.026

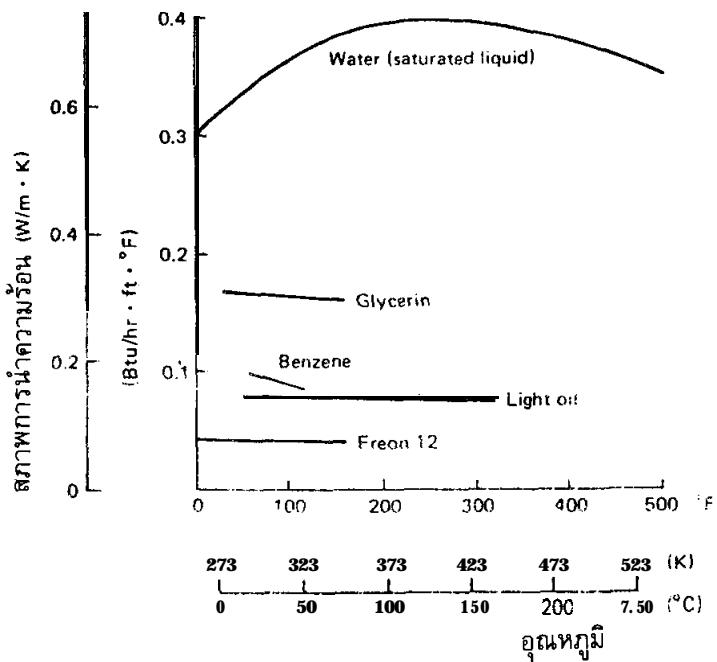
ตารางที่ 2-2 ค่าสภากการนำความร้อนของโลหะ ของเหลวของโลหะ ของเหลวและกําชนาด

กลไกการหาค่าสภากำหนดความร้อนของก๊าซจะต้องอาศัยทฤษฎีจลน์ของก๊าซ พิจารณาว่าไม่เลกุลทุกตัวของก๊าซจะเคลื่อนที่แบบสุ่มและจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมณตั้มเมื่อมันทึ้งหล้ายบะทะกัน ไม่เลกุลที่มีอุณหภูมิสูงจะมีพลังงานจลน์สูงกว่าจะเคลื่อนที่เข้าสู่ป่านไม่เลกุลอุณหภูมิต่ำกว่า เมื่อกีดการบะทะกันจะถ่ายเทพลังงานในรูปพลังงานความร้อน ส่วนกลไกทางพิสิกส์เกี่ยวกับการนำในของเหลวที่มีลักษณะคล้ายก๊าซเพียงแต่ว่าไม่เลกุลอยู่ใกล้ชิดกันมากกว่าจึงเกิดมีสนามของแรง (force fields) มาเกี่ยวข้องในการถ่ายเทพลังงานระหว่างชนกัน จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ชับช้อนกว่าก๊าซ



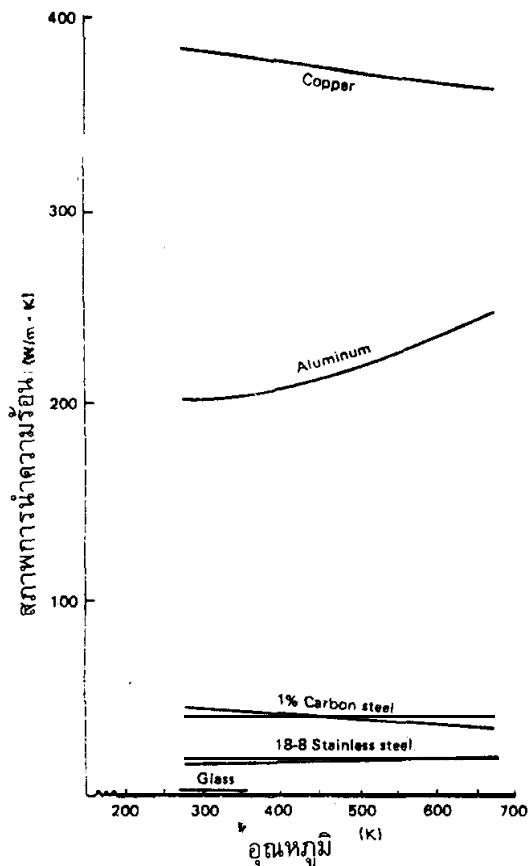
รูปที่ 2-8 สภาพการนำความร้อนของกําชบ้างชนิด

รูปที่ 2-8 แสดงสภาพการนำความร้อนของกําชซึ่งจะขึ้นกับอุณหภูมิและแบบทั้งหมดไม่ขึ้นกับความดันของกําชกับบริเวณใกล้จุดวิกฤต (critical point) จากการวิเคราะห์จากรูปแบบของการแลกเปลี่ยนพลังงานจะพบว่าสภาพการนำความร้อนของกําชจะเพิ่มขึ้นเป็นพังก์ขึ้นกับรากที่สองขององค์ความนูรรณ์ (K^2) ส่วนรูปที่ 2-9 แสดงสภาพการนำความร้อนของของเหลวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ยกเว้นน้ำจะมีค่าสูงขึ้นในระยะแรกและลดลงในระยะหลังเมื่ออุณหภูมิเพิ่มแต่จะเห็นว่าส่วนใหญ่มีค่าคงที่ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงถือว่ามีค่าคงที่ได้



รูปที่ 2-9 สภาพการนำความร้อนของเหลวบางชนิด

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเฉลี่ยและความดันไม่ทำให้ค่าดังกล่าวเปลี่ยนไปมากนัก และอีกรูปหนึ่งคือรูปที่ 2-10 แสดงสภาพการนำความร้อนของโลหะบางชนิด ในของแข็งพลังงานความร้อนสูกนำไปโดยอีเลคตรอนอิสระ และการกวัดแก่วงของโครงสร้างของอะตอมที่ประกอบกันเป็นโลหะนั้น ๆ แต่การเคลื่อนไหวของอีเลคตรอนอิสระจะมีบทบาทมากกว่า ดังนั้นจึงทำให้ตัวนำไฟฟ้าที่ดีซึ่งมีอีเลคตรอนอิสระมากกว่าจะนำความร้อนได้ดีกว่า ในทางตรงกันข้ามอโลหะจะนำความร้อนได้ไม่ดีซึ่งเป็นอนุนวยที่ดี เช่น พลาสติกและพลาสติก มีการพยายามสร้างอนุนวยที่มีคุณภาพสูง ๆ (superinsulators) โดยประกอบด้วยวัสดุสะท้อนรังสีวิทยุซ่อนกันหลายชั้น รวมไม่ให้ชิดกันเพื่อป้องกันการนำและการพาความร้อน ทำให้สภาพการนำความร้อนต่ำมาก



รูปที่ 2-10 สภาพการนำความร้อนของของแข็งบางชนิด

2.2.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (Convective heat transfer)

เมื่อของไ碌มากจะทำผิวของแข็งที่อุณหภูมิต่างกันจะมีผลทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในรูปการพาความร้อน วิธีการดังกล่าวรู้สึกเหมือนชาร์มดาเต่เมื่อวิเคราะห์ในระบบจะเอียดแล้วซับซ้อนมาก ในหนังสือนี้เราจะกล่าวเฉพาะเรื่องราวเบื้องต้นที่มีค่ากดลงหาได้และสามารถนำไปใช้คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนในระบบทำความร้อนและความเย็นจากแสงอาทิตย์ได้

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเมีย 2 แบบคือ แบบธรรมชาติ (natural or free convection) อีกแบบหนึ่งคือการพาเนื่องจากแรงขับดัน (forced convection) ในแบบแรกแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เกิดจากความร้อนที่สัมผัสของไอลจะทำให้เกิดความหนาแน่นของไอลแตกต่างกันจึงทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ด้วยย่างเช่นการไอลพาโดยธรรมชาติของอากาศภายในบ้านที่มีผนังหรือหลังคาได้รับความร้อน การไอลพาของของเหลวในถังน้ำที่มีชุดลวดให้ความรุนแรงอยู่ และการสูญเสียความร้อนของแผ่นรับแสงอาทิตย์ไปในอากาศในตอนที่ไม่มีลมพัด

ส่วนการพาความร้อนเนื่องจากแรงขับดัน เกิดจากมีแรงภายนอกเข้ามาดันของไอลให้ผ่านผิวบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำมากกว่าของไอล เนื่องจากแรงจากภายนอกมีกำลังทำให้ของไอลเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าการพาโดยธรรมชาติ ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจึงมีมากกว่า

อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเป็นการพาแบบใด อัตราการถ่ายเทความร้อน q_c หาได้จาก Newton's law of cooling

$$q_c = \bar{h}_c A [T_s - T_f] \quad (2.33)$$

เมื่อ \bar{h}_c = ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาผ่านผิวพื้นที่ A ในหน่วย $W/(m^2 \cdot K)$

A = คือพื้นที่ที่สัมผัสกับของไอล, m^2

T_s = อุณหภูมิที่ผิว, K

T_f = อุณหภูมิของของไอลที่ไอลอย่างราบเรียบ (undisturbed fluid), K

ตารางที่ 2-3 แสดงค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาหันที่เราจะคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา เรามาศึกษารูรัมวิธีการเคลื่อนย้ายพลังงานในรายละเอียดบางอย่างที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนของแหล่งเสียง ก่อน รูปที่ 2-11 แสดงแผนผังรับความร้อนแผ่นหนึ่งเมื่อถูกระบายนายความร้อนด้วยกระแสอากาศที่

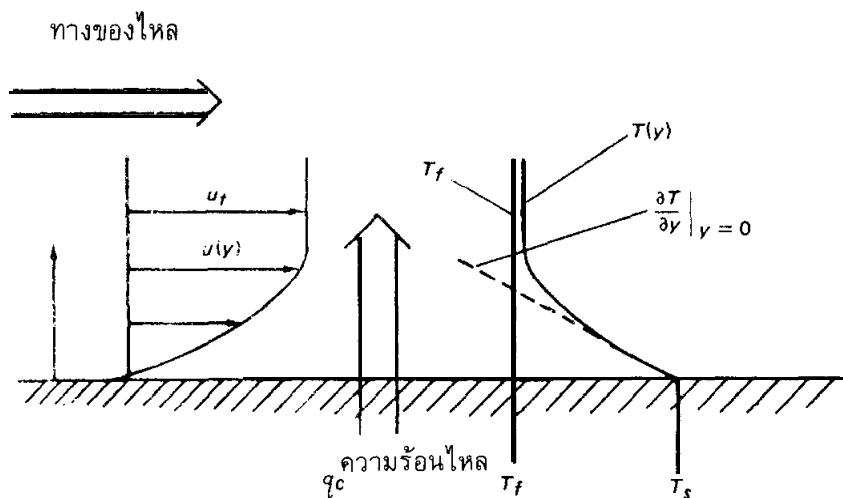
ชนิดสาร	W/(m ² .K)	Btu/(hr.ft ² .F)
อากาศ (การพาโดยธรรมชาติ)	6-30	1-5
ไอน้ำหรืออากาศร้อนเย็นยะด (การพาโดยแรงภายในออก)	30-300	5-50
น้ำมัน (การพาโดยแรงภายในออก)	60-1,800	10-300
น้ำ (การพาโดยแรงภายในออก)	300-6,000	50-1,000
น้ำ (กำลังเดือด)	3,000-60,000	500-10,000
ไอน้ำ (กำลังกลั่นตัว)	6,000-120,000	1,000-20,000

ตารางที่ 2-3 ขนาดตัวเลขโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา, h_c

ถูกขับดันไปหลังจากกระแสอากาศที่หลังแผ่นความร้อน จะมีความเร็วและอุณหภูมิบริเวณใกล้ผิวแตกต่างกัน, จุดแรกที่นำสังเกตคือความเร็วจะมีค่าลดลงที่สุดตรงที่สัมผัสกับผิวของแผ่น ความร้อนเนื่องจากแรงหนืด (viscous forces) ระหว่างของแข็งและกระแสอากาศ เมื่อความเร็วของของไหลบริเวณผิวสัมผัสแผ่นความร้อนมีค่าเป็นศูนย์จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวและชั้นของไหลที่สัมผัสโดยการนำเป็น

$$\frac{q_c}{A} = -k_f \left. \frac{\partial T_f}{\partial y} \right|_{y=0} = \bar{h}_c (T_s - T_f)$$

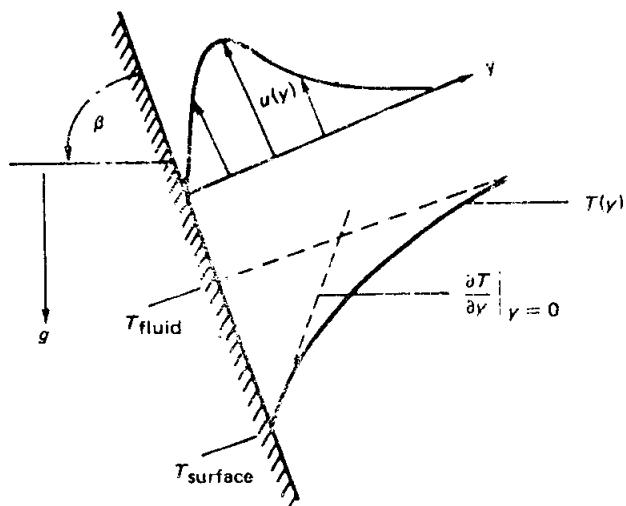
ถึงแม้การพิจารณาดังกล่าวจะเห็นว่าธรรมวิธีทางการพยากรณ์ของคล้ายการนำที่ผิวสัมผัสแต่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนไปที่ผิว ($\partial T / \partial y$) เป็นการคำนวณจากอัตราที่ของไอลที่ถูกดูดออกไปจากแผ่นความร้อนสามารถถ่ายเทพลังงานไปสู่กระเสօอากาศส่วนใหญ่ได้ ดังนั้นอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจากผิวจะขึ้นกับการไอลของของไอล ถ้าไอลเร็วจะทำให้อุณหภูมิแตกต่างไปมากหมายถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ในขณะเดียวกันที่มีการพาก็มีการนำเกิดขึ้นอยู่ด้วยในของไอล กรณีของน้ำค่าส่วนของการนำความร้อนมีค่ามากกว่าอากาศ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาก็มีค่ามากกว่าของอากาศด้วยดังตารางที่ 2-2



รูปที่ 2-11 การกระจายของความเร็วและอุณหภูมิกรณีการพากความร้อนเนื่องจากแรงขับดันของไอลผ่านแผ่นความร้อน

ส่วนกรณีการพากความร้อนโดยธรรมชาติก็มีลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในรูปที่ 2-12 ความแตกต่างเล็กน้อยตรงที่กรณีที่มีแรงขับดันความเร็วที่ไอลออกไปจากผิวจะไป

ได้ค่อนข้างอิสระ ส่วนกรณีการพาโดยธรรมชาติความเร็วของของไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้นในตอนแรกที่ห่างจากผิวไประยะหนึ่งแล้วจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าของความหนืดมีค่าลดลงอย่างเร็วที่ระยะห่างผิวออกไปในขณะที่ความแตกต่างของความดันลดลงช้ากว่า อย่างไรก็ตามในที่สุดแรงล�ตัวก็จะมีค่าลดลงเมื่อค่าความดันของของไหลร้อนมีค่าเข้าใกล้ค่าความดันของของไหลที่ไม่ได้รับความร้อน จากนานาภิริยา (interaction) ดังกล่าวนี้จึงทำให้ของไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ระยะหนึ่งและลดลงเป็นศูนย์ที่ระยะไกลออกจากผิวแห่งร้อน ลักษณะเส้นโค้งของอุณหภูมิทั้งแบบของไหลมีแรงขับดันและแบบธรรมชาติมีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งทั้งคู่ที่บริเวณผิวสัมผัสการถ่ายเทความร้อนจะเป็นการนำ



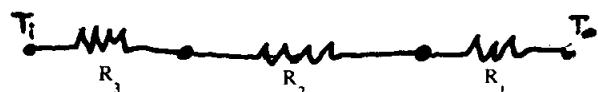
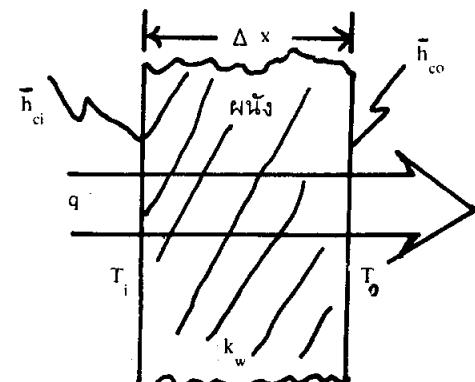
รูปที่ 2-12 การกระจายของความเร็วและอุณหภูมิกรณีการพาทานธรรมชาติของของไหลที่ผ่านแผ่นความร้อนที่อ้างเป็นมุม β กับแนวระดับ

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาจชี้นำอยู่กับความหนาแน่น ความหนืดและความเร็วของของไอลร่วมทั้งคุณสมบัติทางความร้อนของมัน (สภาพนำความร้อนและความร้อนจำเพาะ) กรณีใช้แรงขับดันน้ำใช้ระบบปั๊มหรือพัดลมช่วยส่วนการพาทุ่งธรรมชาติขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นผิวที่ร้อนและของไอล สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของของไอล (หมายถึงการเปลี่ยนความดันต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยน) และแรงโน้มถ่วงกรณีระบบแสงอาทิตย์ก็คือแรงโน้มถ่วงของโลก

ดังนั้นมือเราทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาเราก็สามารถคำนวณหาความต้านทานความร้อนเนื่องจาก การพาตามสมการ

$$R_C = \frac{1}{\bar{h}_C A} \quad (2.34)$$

เป็นการหาความต้านทานความร้อนนี้องจากการพาที่เกิดระหว่างผิวติดกับของไอลที่อุณหภูมิต่างกัน เช่น การถ่ายเทความร้อนจากภายในห้องที่อุณหภูมิ T_i ผ่านกำแพงไปสู่บรรยากาศภายนอกห้องที่อุณหภูมิ T_o ดังรูปที่ 2-13 เริ่มต้นความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยการพาสู่ผิวกำแพง



รูปที่ 2-13 วงจรสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากภายในบ้านที่อุณหภูมิ T_i ผ่านผนังสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกที่อุณหภูมิ T_o

ด้านในห้องจากนั้นจะถูกนำผ่านกำแพงไปยังผิวภายนอก และในที่สุดจากผิวภายนอกถูกพาสู่อากาศข้างนอกเมื่อเราสามารถนำความร้อนในอากาศซึ่งมีความต้านทาน 3 ตัวแบบอนุกรม ดังนี้น้อตตราการถ่ายเทความร้อนจึงเป็น

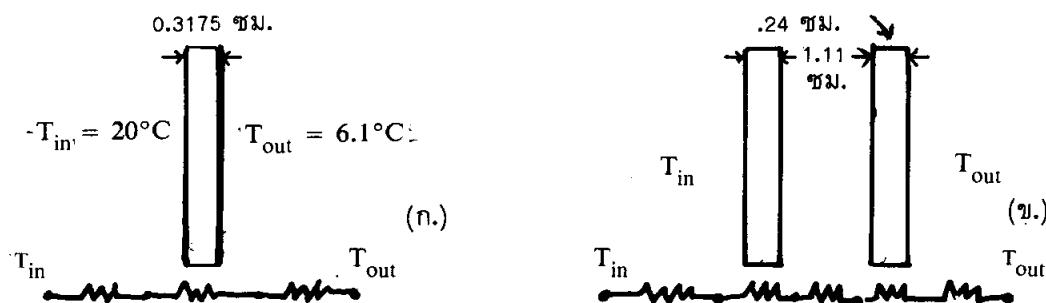
$$q = \frac{T_i - T_0}{\sum_{i=1}^{i=3} \frac{R_i}{R_i}} = \frac{T_i - T_0}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.35)$$

โดยที่

$$R_1 = \frac{1}{\bar{h}_c A}, \quad R_2 = \frac{\Delta x}{k_w A}, \quad R_3 = \frac{1}{\bar{h}_{ci} A}$$

ตัวอย่างที่ 2.3

ให้เปรียบเทียบการสูญเสียความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกแผ่นเดียว กับกระจกสองแผ่น เมื่อพิจารณาว่าอากาศระหว่างแผ่นแก้วถูกกักไว้ในบริเวณแคบ ๆ จึงทำให้อากาศค่อนข้างเฉื่อย (stagnant) จึงพิจารณาเฉพาะการนำความร้อน ให้พิจารณารายละเอียดต่าง ๆ และวงจรความร้อนตามรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 ความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่างกรณี (ก.) กระจกแผ่นเดียว (ข.) กระจกคู่

โดยที่ T_{in}	= อุณหภูมิภายในห้อง
T_{out}	= อุณหภูมิภายนอกห้อง
$R_{k,g}$	= ความต้านทานความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทโดยการนำในกระจก
$R_{c,in}$	= ความต้านทานความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทโดยการพาที่เกิดบนผิวด้านในกระจก
$R_{c,out}$	= ความต้านทานความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทโดยการพาที่เกิดบนผิวด้านนอกกระจก
$R_{k,a}$	= ความต้านทานความร้อนเนื่องจากการถ่ายเทโดยการนำในอากาศระหว่างแผ่นแก้ว
$h_{c,in}$	= $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
$h_{c,out}$	= $22.68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

เมื่อพิจารณาให้พื้นที่ที่ความร้อนจะผ่านเป็น 1 m^2 ของหน้าต่าง ดังนั้นความต้านทาน จะได้

$$R_{c,in} = \frac{1}{h_{c,in} A} = \frac{1}{5.67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} \times 1 \text{ m}^2 = 0.176 \text{ K/W}$$

$$R_{k,g} = \frac{w}{k_g A} = \frac{0.003175 \text{ m}^{-3}}{0.779 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{k}}} \times 1 \text{ m}^2 = 4.076 \times 10^{-3} \text{ K/W}$$

$$R_{c,out} = \frac{1}{k_{c,out} A} = \frac{1}{22.68 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} \times 1 \text{ m}^2 = 0.0441 \text{ K/W}$$

โดยที่ k_g คือสภาวะการนำความร้อนของแก้ว

ถ้าอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายใน T_i มีค่า 20°C หรือ 293 K และอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายนอก T_{out} มีค่า 6.1°C หรือ 279.1 K ดังนั้นยัตราชการสูญเสียความร้อนผ่านกระจกพื้นที่ 1 m^2 ดังนี้ล่าวมีค่า

$$\begin{aligned} q &= (T_{in} - T_{out}) / (R_{c,in} + R_{k,g} + R_{c,out}) \\ &= 13.9 \text{ W} / (0.176 + 4.076 \times 10^{-3} + 0.0441) \\ &= 6.2 \text{ W} \end{aligned}$$

กรณีหน้าต่างใช้กระเจกคู่ซึ่งแต่ละแผ่นหนา 0.24 cm . และอยู่ห่างกัน (อากาศอยู่) 1.11 cm . ดังรูป 2-14 (ข.) เราจะได้

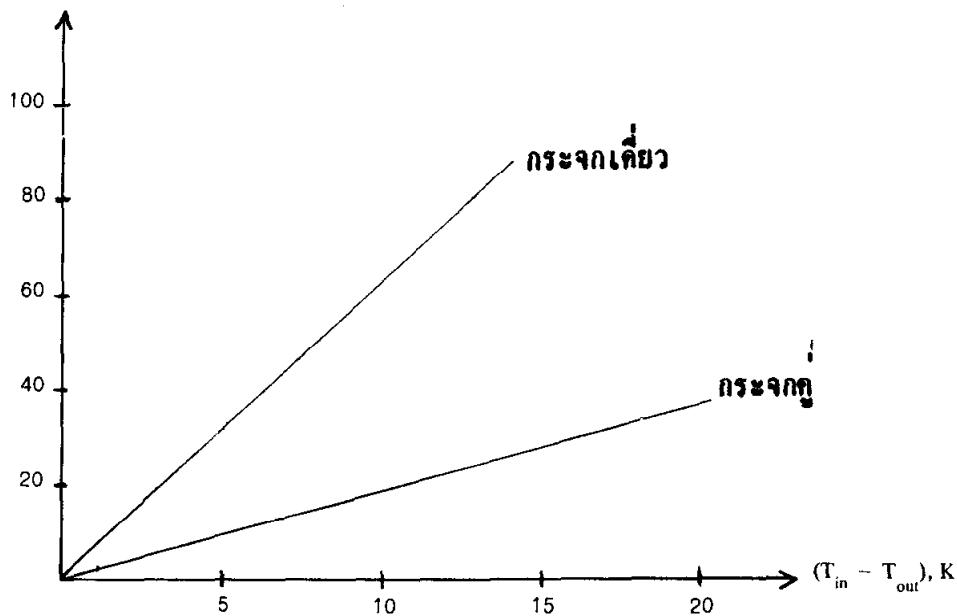
$$\begin{aligned} R_{c,in} &= 0.176 \text{ K/W} \\ R_{k,g} &= \frac{W}{k_g A} = \frac{(0.24 \text{ cm})(0.01 \text{ m/cm})}{0.799 \frac{W}{m \cdot K} \times 1 \text{ m}^2} \\ &= 3.08 \text{ } 10^{-3} \text{ K/W} \\ R_{k,a} &= \frac{W}{k_a A} = \frac{0.0111 \text{ m}}{0.0242 \text{ W} \cdot \text{K} \times 1 \text{ m}^2} \\ &= 0.458 \text{ K/W} \\ R_{c,out} &= 0.0441 \text{ K/W} \end{aligned}$$

โดยที่ k_a คือสภาวะการนำความร้อนที่เกิดขึ้นกับอากาศภายในระหว่างกระจก ความร้อนสูญเสีย q หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 4 &= \frac{(T_{in} - T_{out})}{(R_{c,in} + 2R_{k,g} + R_{k,a} + R_{c,out})} \\
 &\approx 13.9 \text{ W}/(0.176 + 2 \times 3.08 \times 10^{-3} + 0.458 + 0.0441) \\
 &= 20.3 \text{ W}
 \end{aligned}$$

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกระหว่างกระจกแผ่นเดียวและกระจกคู่จะได้การสูญเสียความร้อนดังรูปที่ 2-15

อัตราการสูญเสียความร้อน, W/m^2



รูปที่ 2-15 แสดงผลของความแตกต่างของอุณหภูมิ ($T_{in} - T_{out}$) ของหน้าต่างกระจกเดียวและคู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อน

ในทางปฏิบัติการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพามัจจะมีการทดลองได้ค่าที่อยู่ในทอมของปริมาณที่ไม่มีหน่วยหลายปริมาณ (dimensionless quantities) เช่น Reynolds number Re, Nusselt number Nu และ Prandtl number Pr ซึ่งเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการไหลของของไหลในท่อรูปแบบต่าง ๆ ที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเกิดขึ้น ในตัวรานีราจะละเอื่องน้ำเพรานอกเหนือหลักสูตรและหากที่จะสรุปสั้น ๆ ให้เข้าใจได้ ผู้สนใจจะศึกษาเพิ่มเติมได้ในตัวรานที่เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาที่เราต้องใช้ ในเรื่องแผ่นรับแสงอาทิตย์ในบทที่ 3 เป็นกรณีการพาที่เกิดจากลมพัดผ่านแผ่นรับแสงที่ติดตั้งบนหลังคาหรือผนังของอาคาร แผ่นรับแสงจะเกิดการสูญเสียความร้อนโดยการพาเนื่องจากลมพัดผ่าน จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา \bar{h}_c ในหน่วย $W/(m^2 \cdot K)$ สัมพันธ์กับความเร็วลม v ในหน่วย m/sec โดยประมาณ (จาก F.Kreith, 1976) ตามสัมการ

$$\bar{h}_c = 5.7 + 3.8 v \quad (2.36)$$

2.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

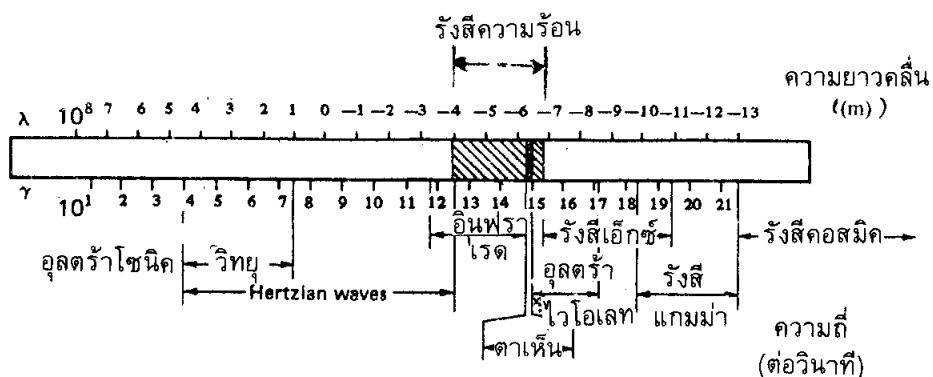
(Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีก็มีบทบาทสำคัญในการออกแบบและสร้างระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เพราะแสงอาทิตย์เป็นตัวที่จะทำให้เกิดความร้อนแก่ระบบ แสงอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในสัญญาณด้วยความเร็วคงที่ c เมื่อมันเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะมีความเร็วเปลี่ยนไป ความยาวคลื่น λ ขึ้นอยู่กับดัชนีหักเห (refractive index) เมื่อผ่านตัวกลางนั้น ๆ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับผลคูณของความยาวคลื่นและความถี่ของการแผ่รังสี

$$c = \lambda v = \frac{c_0}{n} \quad (2.37)$$

- โดยที่ λ = ความยาวคลื่น, m
 v = ความเร็ว, sec^{-1}
 c_0 = ความเร็วแสงในสูญญากาศ
 n = ตัวชั้นหักเหของตัวกลางที่แสงผ่าน

การแผ่รังสีความร้อนเป็นชนิดหนึ่งของพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวัตถุทุกชนิดที่มีความร้อนจะแผ่ออกมา เมื่อวัตถุได้รับความร้อนอะตอม, โมเลกุล แม้กระทั่งอิเลคตรอนจะได้รับพลังงานสูงขึ้นเมื่อการกวัดแก่วงหรือขึ้นสูง ระดับพลังงานที่สูงกว่าเดิม (excited states) เมื่อกลับสู่ระดับเดิมจะปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมานะ หรือพิจารณาตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าอนุภาคประจุที่มีความเร่งเนื่องจากการกวัดแก่วงจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมารอบ ๆ ตัวเมื่อคลื่นดังกล่าวมีความถี่ของรังสีความร้อนออกมายังก๊าซเรียกว่าเกิดการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) ปกติคลื่นที่แผ่ออกมานี้จะมีหลายความถี่ซึ่งตามทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพอดีจะแบ่งอย่างหยาบ ๆ ได้ดังรูปที่ 2-16 ความยาวคลื่นของรังสีความร้อนจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.1 ถึง 100 μm ส่วนการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.1 ถึง 3 μm



รูปที่ 2-16 スペクトรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ตามทฤษฎีความอนตัม (quantum theory) แสงจะเป็นก้อนพลังงานที่เรียกว่า โพตอน (photon) แต่ละตัวจะมีพลังงาน

$$\frac{E_p}{P} = \frac{h\nu}{P} \quad (2.38)$$

E_p คือพลังงานของโพตอน, h คือค่าคงที่ของ Planck ($= 6.625 \times 10^{-34}$ J.sec), ν_p คือความถี่ของแสงดังกล่าว

ในการศึกษาการแผ่รังสีจากวัตถุต่าง ๆ เพื่อความสะดวกในการสร้างทฤษฎี จึงมีการสมมุติวัตถุในอุดมคติ (ideal body) ขึ้นมาซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีและปลดปล่อยรังสีได้ดีที่สุด เรียกว่า "วัตถุดำ" (black body) ดังนั้นในการศึกษาการแผ่รังสีจากวัตถุดำ จากรากฐานทฤษฎีเทอร์โมไนมิกส์และตามทฤษฎีความอนตัมซึ่งนักศึกษาอาจศึกษาเพิ่มเติมได้จากตำราทางพิสิกส์ดังกล่าวโดยตรง เราจะนำเอาบางส่วนมาใช้เลยคือ จากทฤษฎีของ Planck ได้ทำการแผ่รังสีของวัตถุดำในรูปของความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) หรือพลังงานที่สะสมไว้ในหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อความยาวที่กำหนดให้ได้ ๆ มีค่า

$$U_{b\lambda} = \frac{\frac{8\pi h c_0}{\lambda^5}}{(e^{hc_0/\lambda kT} - 1)} \quad (2.39)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่า 1.38×10^{-23} J/(molecule.K) และ T คือองศาสมบูรณ์ (K) แต่เพื่อให้สะดวกในการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ เราจะแปลงให้สมการ (2.39) ให้อยู่ในรูปของพลังงานที่เผยแพร่มาจากวัตถุดำต่อเวลาต่อพื้นที่ต่อความยาวคลื่น ได้ ๆ เนื่องจากวัตถุได้รับความร้อนมีอุณหภูมิ T แทนด้วยสัญลักษณ์ $E_{b\lambda}$ จะมีค่าจากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} E_{b\lambda} &= \frac{U_{b\lambda} c_0}{4} \cdot \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5 (e^{hc_0/\lambda kT} - 1) n^2} \\ &= \frac{c_1}{(e^{c_2/\lambda T} - 1) \lambda^5} \end{aligned} \quad (2.40)$$

โดยที่ $C_1 = 3.74 \times 10^8 \text{ W} \cdot (\mu\text{m})^4/\text{m}^2$, $C_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, n มีค่าเป็น 1 ถ้าเป็นօากาศดังนั้น หน่วยของ $E_b\lambda$ เป็น $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ อาจเรียกว่า the monochromatic emissive power ของวัตถุดำ

ดังนั้นพลังงานทั้งหมดที่ปล่อยออกมายากวัตถุดำหาได้จากการอินทิเกรท สมการ (2.40) ทุกช่วงความถี่เข้าด้วยกันจะได้ Stefan-Boltzmann law คือ

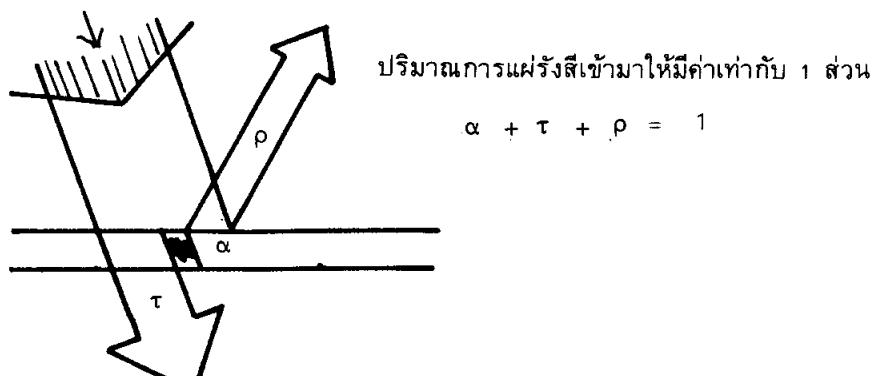
$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.41)$$

โดยที่ σ = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

T = อุณหภูมิ, K

จริง ๆ แล้ววัตถุดำหรือวัตถุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนและปลดปล่อยรังสีได้ดีที่สุดนั้นไม่มีแต่เราสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ศึกษาและจะได้เปรียบเทียบจากวัตถุจริง ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาและทดลอง

เมื่อมีการแผ่รังสีกระบวนการวัตถุใด ๆ จะมีส่วนหนึ่งสะท้อน บางส่วนถูกดูดกลืน และถ้าวัตถุนั้นใส่ก็จะมีบางส่วนหลุดผ่านไปได้ดังรูปที่ 2-17



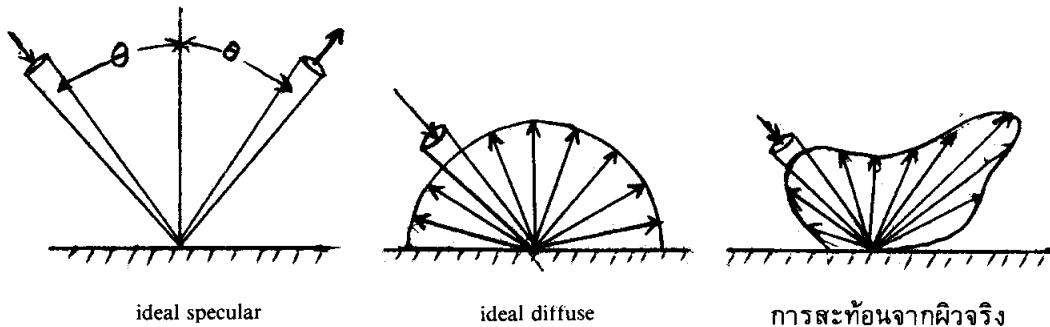
รูปที่ 2-17 ปริมาณรังสีที่ตกกระทบวัตถุที่มีค่า transmittance , absorptance และ reflectance

ส่วนของรังสีที่กระจายออกไปเนื่องจากการสะท้อนนิยามแทนด้วย reflectance ρ ส่วนถูกดูดกลืนแทนด้วย absorptance α และส่วนที่หล่อผ่านด้วย transmittance τ ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad (2.42)$$

วัตถุทึบแสง (opaque bodies) จะไม่มีการให้แสงผ่าน $\tau = 0$

การสะท้อนของการแพร่งรังสีอาจจะเป็นลักษณะ specular หรือ diffuse ก็ได้ เมื่อมุมตากะร่างบทเท่ากับมุมสะท้อนจะเกิดลักษณะ specular ส่วนการสะท้อนไปทุกทิศทุกทางสม่ำเสมอ ก็เรียกว่า diffuse ให้ดูรูปที่ 2-18 ส่วนการสะท้อนจริง ๆ จะไม่เป็นทั้งแบบ specular และ diffuse แต่วัตถุที่มีผิวขัดมันจะมีลักษณะใกล้เคียงการสะท้อนแบบ specular ส่วนวัตถุผิวหยาบมักจะเป็นแบบ diffuse



รูปที่ 2-18 การสะท้อนแบบต่าง ๆ บนผิววัตถุ

จากคุณสมบัติการแผ่รังสีดังกล่าวเราจะนำเอามาใช้ โดยการพิจารณา the emissive power ของผิววัตถุจริง ๆ เทียบกับวัตถุคำ สมมุติว่าวัตถุนั้นเป็นถูกล้อมรอบด้วยวัตถุ คำซึ่งมีอุณหภูมิหนึ่ง วัตถุคำที่ล้อมรอบนี้จะแผ่รังสีออกตามสมการ (2.41) เวลาหนึ่งผ่านไป เมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลย์วัตถุภายนอกจะมีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุคำสมมุติอุณหภูมิเป็น T และพลังงานที่ปล่อย出去ไปจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่มันได้รับ ถ้าเราให้ฟลักซ์ของการแผ่รังสี (radiation flux) ที่จุดหนึ่งจุดใดบนวัตถุคำที่ล้อมรอบเป็น q_i ภาวะสมดุลย์จะเกิดขึ้นเมื่อการปล่อยรังสีมีค่าเท่ากับการรับรังสี หรือ

$$E A = q_i A \alpha \quad (2.43)$$

เมื่อ E คือพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุต่อพื้นที่ต่อเวลา, A คือพื้นที่ของวัตถุ ถ้าหากวัตถุที่อยู่ภายนอกเป็นวัตถุคำด้วยแล้ว เราจะได้ $\alpha_b = 1$ สมการ (2.43) จึงเป็น

$$E_b A = q_i A (1.0) \quad (2.44)$$

จากการนี้ที่พิจารณา mann ได้ว่าที่อุณหภูมิใด ๆ ในภาวะสมดุลย์ค่า absorptance ของวัตถุได้ ϵ มีค่าเท่ากับค่า emittance โดยเมื่อหารสมการ (2.43) ด้วย (2.44) จะได้

$$\frac{E(T)}{E_b(T)} = \epsilon(T) = \alpha(T) \quad (2.45)$$

โดยที่นิยาม $E/E_b = \epsilon$ เป็นที่น่าสังเกตว่าค่า absorptance และ emittance ที่กล่าวมาแล้วนี้เป็นค่ารวมทั้งหมดของวัตถุใด ๆ หมายถึงว่าเป็นค่าที่รวมการแผ่รังสีทุกย่างความถี่

สารจริงใด ๆ นอกจจากจะแผ่รังสีได้น้อยกว่าวัตถุคำแล้วการแผ่รังสียังมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับความยาวคลื่นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนิยามค่าที่เกี่ยวกับความยาวคลื่นเฉพาะได้ ϵ (monochromatic properties) ขึ้นมาโดยให้ the monochromatic emittance คืออัตราส่วน

ของ the monochromatic emissive power ของวัตถุจริงได้ ๆ ต่อ the monochromatic emissive power ของวัตถุดำที่ความยาวคลื่นและอุรูหภูมิเดียวกันหรือ

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{b\lambda}} \quad (2.46)$$

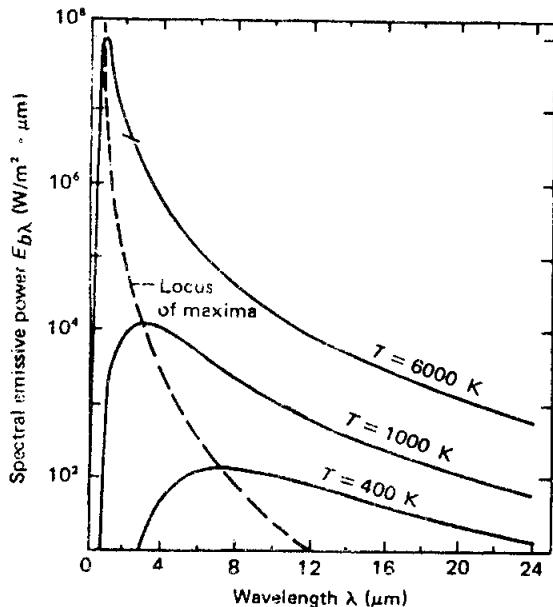
จากนิยามค่า emittance ในสมการ (2.46) เราจะนำมาใช้กับการบล็อกการบล็อกพลอยรังสีทั้งหมดที่แผ่ออก มาครึ่งทรงกลมจากพื้นที่ผิวดี ๆ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า the hemispherical emittance แต่โดยทั่วไปแล้วคำว่า hemispherical มักจะไม่เขียนไว้ ดังนั้น ค่า total emittance ของผิวนี้ สัญญลักษณ์ ๔ หาได้จาก

$$\bar{\epsilon} = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \epsilon_{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{\epsilon_{\lambda} E_{b\lambda}}{\sigma T^4} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda} \quad (2.47)$$

เพื่อประโยชน์ในการศึกษาเราจะสมมุติให้มีวัตถุอิฐนิดหนึ่งขึ้นมาคือ วัตถุสีเทา (gray body) ซึ่งมีค่า the monochromatic emittance ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับความยาวคลื่น ดังนั้นสำหรับวัตถุสีเทาจะมี $\bar{\epsilon} = \epsilon_{\lambda} = \bar{\epsilon}_{\lambda} = \bar{\epsilon}$ แต่สำหรับวัตถุจริง ๆ แล้วค่า emittance และ absorptance จะเปลี่ยนแปลงไปกับความยาวคลื่นในการหาค่ารวมทั้งหมดของค่าดังกล่าวนี้ หาได้จากการอินทิเกรททุกช่วงความยาวคลื่น เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะพิจารณาตารางที่จะกล่าวต่อไปนี้

ตารางแสดงการแผ่รังสี (Radiation function tables)

ในการคำนวณเพื่อจะนำไปใช้เพื่อที่จะให้สะดวกกว่าสมการ (2.40) เราจะใช้วิธีเขียนกราฟระหว่าง the monochromatic emissive power ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น



รูปที่ 2-19 สเปกตรอลดิสทริบิวชันของการแผ่รังสีจากวัตถุดำ

ดังรูปที่ 2-19 ซึ่งแสดงสเปกตรอลดิสทริบิวชัน (spectral distribution) ของการแผ่รังสีจากวัตถุดำ กรณีอุณหภูมิ 400, 1,000 และ 6,000 K จากกราฟจะเห็นว่ายอดของ $E_{b\lambda}$ จะมีค่าความยาวคลื่นสั้นลงเมื่ออุณหภูมิของวัตถุดำสูงขึ้น ที่จุดยอดเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของวัตถุดำอย่างหนึ่งคือเมื่อดифเฟอเรนเชียล (differentiate) Planck's distribution law หรือสมการ (2.40) เทียบกับความยาวคลื่นแล้วให้เท่ากับศูนย์ก็จะเป็นจุดที่ได้ความยาวคลื่นที่ทำให้ $E_{b\lambda}$ มีค่าสูงสุด เราจะใช้สัญลักษณ์ความยาวคลื่นนั้นเป็น λ_{max}

$$\frac{dE_{b\lambda}}{d\lambda} = 0 \longrightarrow \lambda_{max}$$

ซึ่งทำให้ได้ Wien's displacement law

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2.48)$$

มีปอยครั้งที่เราต้องการทราบปริมาณของรังสีที่ญูกปล่อยออกมานอกจากวัตถุดำเนินช่วงความยาวคลื่นแนพะได้ วิธีการคำนวนทำได้โดยการเทียบกับปริมาณรังสีที่แผ่อออกมานอกจากวัตถุดำเนินหงด กล่าวคือใช้

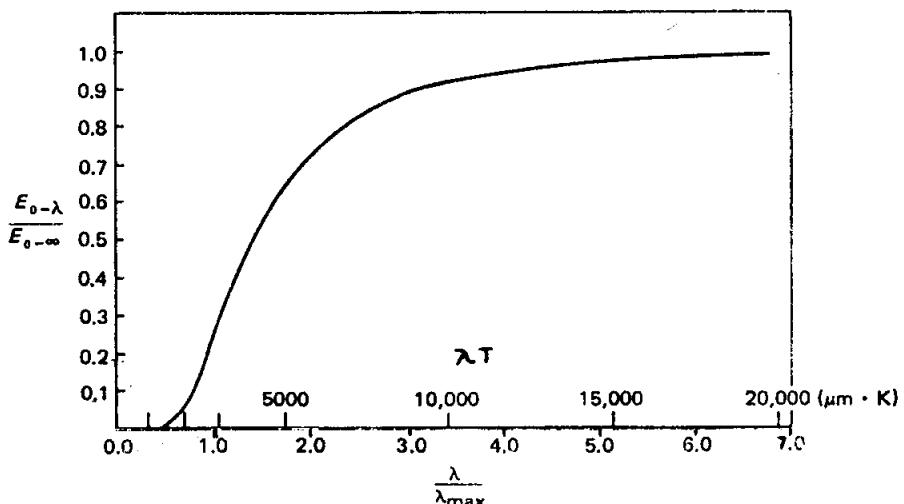
$E_b^{\lambda}, 0 \rightarrow \lambda$ เป็นปริมาณรังสีที่ปล่อยออกมานอกจากวัตถุดำเนิน $0 \rightarrow \lambda$

$E_b^{\infty}, 0 \rightarrow \infty$ เป็นปริมาณรังสีที่ปล่อยออกมานอกจากวัตถุดำเนิน $0 \rightarrow \infty$

ดังนั้นอาศัยสมการ (2.40) จะได้พังก์ชันที่ขึ้นกับ (λT) เท่านั้นคือ

$$\frac{E_b^{\lambda}, 0 \rightarrow \lambda}{E_b^{\infty}, 0 \rightarrow \infty} = \frac{\int_0^{\lambda} E_b \lambda d\lambda}{\sigma T^4} = \frac{\int_0^{\lambda T} \frac{C_1 d(\lambda T)}{\sigma (\lambda T)^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}}{(2.49)}$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2-20 และดังแสดงในตารางที่ 2-4 ในตารางนี้



รูปที่ 2-20 สัดส่วนของ total emissive power (ในช่วง $\lambda = 0 \rightarrow \lambda$ หรือ $\lambda = 0 \rightarrow \infty$) เป็นพังก์ชัน กับ λT และ λ / λ_{\max}

ช่วงแรกคืออัตราส่วนของ λ / λ_{\max} (จากสมการ 2.48) ซึ่งที่สองเป็นอัตราส่วนของ $E_{b,\lambda} / E_{b,\lambda_{\max}}$ (จากสมการ 2.40) และซึ่งที่สามคืออัตราส่วนของ $E_{b,0 \rightarrow \lambda} / \sigma T^4$ (จากสมการ 2.49) และจากสมการ (2.49) นี้เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้กับเครื่องคำนวณอาจจะประมาณได้จากสมการ polynomials ซึ่งคิดโดย Pivovonsky และ Nagel (1961) ดังนี้

$$\text{กรณี } v \geq 2$$

$$\frac{E_{b,0 \rightarrow \lambda}}{\sigma T^4} = \frac{15}{\pi^4} \sum_{m=1,2,\dots} \frac{e^{-mv}}{m^4} [\{ (mv+3)mv+6 \} mv+6] \quad (2.50)$$

$$\text{กรณี } v < 2$$

$$\frac{E_{b,0 \rightarrow \lambda}}{\sigma T^4} = \frac{1-15}{\pi^4} "3 \left(\frac{1}{3} - \frac{v+v^2}{8} - \frac{v^4}{60} + \frac{v^6}{5040} - \frac{v^8}{272160} \right)$$

(2.51)

เมื่อ

$$v = c_2 / \lambda T$$

ตัวอย่างที่ 2.4

สมมุติว่าดวงอาทิตย์เป็นวัตถุดำมีอุณหภูมิ 5762 K n. ที่ความยาวคลื่นเท่าใดที่ให้ค่า the monochromatic emissive power สูงสุด ข. ให้หาพลังงานในช่วงที่ตามองเห็น (0.38 ถึง 0.78 μm)

λ/λ_{\max}	$E_{b\lambda}$	$E_{b\lambda,0-\lambda}$	σT^4	λ/λ_{\max}	$E_{b\lambda}$	$E_{b\lambda,0-\lambda}$	σT^4	λ/λ_{\max}	$E_{b\lambda}$	$E_{b\lambda,0-\lambda}$	σT^4
0.00	0.0000	0.0000		1.50	0.7103	0.5403		2.85	0.1607	0.8661	
0.20	0.0000	0.0000		1.55	0.6737	0.5630		2.90	0.1528	0.8713	
0.25	0.0003	0.0000		1.60	0.6382	0.5846		2.95	0.1454	0.8762	
0.30	0.0038	0.0001		1.65	0.6039	0.6050		3.00	0.1384	0.8809	
0.35	0.0187	0.0004		1.70	0.5710	0.6243		3.10	0.1255	0.8895	
0.40	0.0565	0.0015		1.75	0.5397	0.6426		3.20	0.1141	0.8974	
0.45	0.1246	0.0044		1.80	0.5098	0.6598		3.30	0.1038	0.9045	
0.50	0.2217	0.0101		1.85	0.4815	0.6761		3.40	0.0947	0.9111	
0.55	0.3396	0.0192		1.90	0.4546	0.6915		3.50	0.0865	0.9170	
0.60	0.4664	0.0325		1.95	0.4293	0.7060		3.60	0.0792	0.9225	
0.65	0.5909	0.0499		2.00	0.4054	0.7197		3.70	0.0726	0.9275	
0.70	0.7042	0.0712		2.05	0.3828	0.7327		3.80	0.0667	0.9320	
0.75	0.8007	0.0960		2.10	0.3616	0.7449		3.90	0.0613	0.9362	
0.80	0.8776	0.1236		2.15	0.3416	0.7565		4.00	0.0565	0.9401	
0.85	0.9345	0.1535		2.20	0.3229	0.7674		4.20	0.0482	0.9470	
0.90	0.9725	0.1849		2.25	0.3052	0.7777		4.40	0.0413	0.9528	
0.95	0.9936	0.2172		2.30	0.2887	0.7875		4.60	0.0356	0.9579	
1.00	1.0000	0.2501		2.35	0.2731	0.7967		4.80	0.0308	0.9622	
1.05	0.9944	0.2829		2.40	0.2585	0.8054		5.00	0.0268	0.9660	
1.10	0.9791	0.3153		2.45	0.2447	0.8137		6.00	0.0142	0.9790	
1.15	0.9562	0.3472		2.50	0.2318	0.8215		7.00	0.0082	0.9861	
1.20	0.9277	0.3782		2.55	0.2197	0.8290		8.00	0.0050	0.9904	
1.25	0.8952	0.4081		2.60	0.2083	0.8360		9.00	0.0033	0.9930	
1.30	0.8600	0.4370		2.65	0.1976	0.8427		10.00	0.0022	0.9948	
1.35	0.8231	0.4647		2.70	0.1875	0.8490		20.00	0.0002	0.9993	
1.40	0.7854	0.4911		2.75	0.1780	0.8550		40.00	0.0000	0.9999	
1.45	0.7477	0.5163		2.80	0.1691	0.8607		50.00	0.0000	1.0000	

ตารางที่ 2-4 พังค์ชั้นการแผ่รังสีความร้อนโดยทั่วไป

λ = wavelength in μm
 λ_{\max} = wavelength at $E_{b\lambda, \max}$ in μm = $2898/T$
 $E_{b\lambda}$ = monochromatic emissive power in $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$
= $374.15 \times 10^6 / \lambda^5 [\exp(14,387.9/\lambda T) - 1]$
 $E_{b\lambda, \max}$ = maximum monochromatic emissive power in $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$
= $12.865 \times 10^{-13} T^4$
 $E_{b\lambda,0-\lambda} = \int_{\lambda}^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda$
 $\sigma T^4 = E_{b\lambda,0-\infty} = 5.670 \times 10^{-8} T^4 \text{ W/m}^3$
 T = absolute temperature in K

วิธีทำ

$$\text{n. } \lambda_{\max} T = 2897.8 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

$$\frac{\lambda_{\max}}{5762} = \frac{2897.8 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{K}}{\text{K}} = 0.503 \text{ } \mu\text{m}$$

ข. จากกราฟรูปที่ 2.20 ที่

$$\lambda T = 0.78 \times 5762 = 4494 \mu\text{m.K}$$

ได้

$$\frac{E_0 \rightarrow .78}{E_0 \rightarrow \infty} \approx 56.3\%$$

$$\lambda T = 0.38 \times 5762 = 2190 \mu\text{m.K}$$

ได้

$$\frac{E_0 \rightarrow .38}{E_0 \rightarrow \infty} \approx 9.9\%$$

ดังนั้นสัดส่วนของพลังงานในช่วงที่ตามองเห็นมีค่า $56.3 - 9.9 = 46.4\%$ หรืออาจคำนวณจากตารางได้โดยพิจารณาที่

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{0.78}{0.503} = 1.55 \xrightarrow{\frac{E_{b\lambda, 0 \rightarrow .73}}{\sigma T^4}} 0.5630 = 56.30\%$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \frac{0.38}{0.503} = 0.76 \xrightarrow{\frac{E_{b\lambda, 0 \rightarrow .38}}{\sigma T^4}} \approx 10\%$$

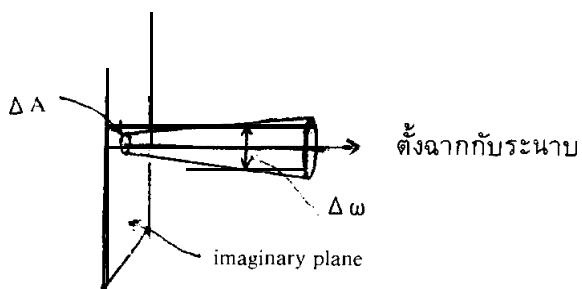
ดังนั้น

$$\frac{E_{b\lambda, .38 \rightarrow .78} \mu\text{m}}{\sigma T^4} = 56.30 - 10 = 46.3\%$$

2.2.4 ความเข้มและพลังค์การแผ่รังสี

(Radiation intensity and flux)

ตามที่กล่าวมาเรารู้ว่าการแผ่รังสีจากวัตถุดำเนินทุกทิศทาง แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกในการศึกษาเราจะพิจารณาการแผ่รังสีจากวัตถุดำเนินทิศทางเฉพาะทิศทางหนึ่ง โดยนิยามความเข้มของการแผ่รังสี I ที่หมายในการนำเอาไปใช้ว่าคือพลังงานที่ส่งผ่านระนาบสมมุติอันหนึ่ง (imaginary plane) ต่อพื้นที่ต่อเวลาต่อมุมโคซลิด (solid angle) โดยมีทิศทางตรงกลางของการแผ่รังสีตั้งฉากกับระนาบดังกล่าวดังในรูปที่ 2-21 ถ้าให้ ΔE แทนพลังงาน



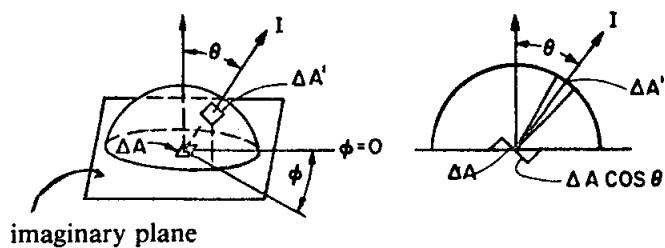
รูปที่ 2-21 เครื่องแสดงความเข้มของการแผ่รังสี

ต่อเวลาที่ผ่านพื้นที่ ΔA ซึ่งอยู่ในมุมโคซลิด $\Delta\omega$ ดังนั้นจะได้

$$I = \lim_{\substack{\Delta A \rightarrow 0 \\ \Delta \omega \rightarrow 0}} \frac{\Delta E}{\Delta A \Delta \omega} \quad (2.52)$$

I เป็นปริมาณเวคเตอร์มีทั้งขนาดและทิศทางซึ่งเราอาจแทนด้วยสัญลักษณ์ I^+ และ I^- และแต่พิจารณาออกหรือเข้าพื้นที่ดังกล่าว

อีกด้วยที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มคือฟลักซ์การแพร่รังสีซึ่งนิยามว่าคือพลังงานที่ส่งผ่านระหว่างสมมุติต่อพื้นที่ต่อเวลาและในทุกทิศทางด้านใดด้านหนึ่งของระหว่างสมมุติความแตกต่างระหว่างความเข้มและฟลักซ์คือพื้นที่ของความเข้มคือพื้นที่ที่ดึงฉากกับทิศทางการแพร่รังสีออกไป สรุปพื้นที่ของฟลักซ์อยู่ระหว่างที่เป็นฐานของครึ่งทรงกลมที่ก่อให้เกิดการแพร่รังสี



รูปที่ 2-22 เค้าโครงแสดงฟลักซ์การแพร่รังสี

ความเข้มอาจใช้คำนวณค่าฟลักซ์ที่ผ่านระหว่างได ๆ โดยการพิจารณาพื้นที่เล็ก ๆ ΔA ในระหว่างสมมุติที่คลุมด้วยครึ่งทรงกลมซึ่งมีรัศมี r ดังรูปที่ 2-22 พลังงานต่อหน่วยเวลาที่ส่งผ่านพื้นที่ $\Delta A'$ ในผิวครึ่งทรงกลมจากพื้นที่ ΔA มีค่าประมาณ

$$\Delta Q = I \Delta A \cos \theta \frac{\Delta A'}{r^2} \quad (2.53)$$

โดยที่ $\frac{\Delta A'}{r^2}$ คือมุมไซโลิดระหว่างพื้นที่ ΔA และ $\Delta A'$ และ $\Delta A \cos \theta$ คือพื้นที่ในทิศทางของเวกเตอร์ความเข้ม ดังนั้นฟลักซ์ของพลังงานที่ส่งผ่านมุมไซโลิดในทิศทาง θ, ϕ นิยามว่า

$$\Delta q = \text{flux} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A} = I \cos \theta \frac{\Delta A}{r^2} \quad (2.54)$$

ดังนั้นผลลัพธ์ของการแพร่รังสีในครึ่งทรงกลมหาได้จากการอินทิเกรต Δq ตลอดครึ่งทรงกลม โดยพิจารณาไว้ว่าพื้นที่เล็ก ๆ ที่ป্রากกฎทรงกลมอยู่ในเทอมของมุม θ และ ϕ ดังนั้นจะได้

$$\int d\Omega = q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{2} I \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.55)$$

สิ่งที่เกี่ยวข้องกับผลลัพธ์การแพร่รังสีมีสองอย่างคือ ผลลัพธ์การแพร่รังสีขึ้นอยู่กับระนาบสมมุติที่เราเลือกพิจารณาและมีได้สองทิศทางแล้วแต่ทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบสมมุติในทิศทางเข้าหรือออก ที่กล่าวมาแล้วนั้นเราให้ผลลัพธ์การแพร่รังสีและความเข้มอยู่ในคำแห่งนึงๆ ในอวกาศ (space) เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิววัตถุหลายแผ่นในสูญญากาศหรือมีชั้นของอากาศอยู่บ้าง ๆ ค่าผลลัพธ์และความเข้มที่จะนำมาใช้เกิดจากผิวเหล่านั้นจะมีบางกรณีที่ผิวนั้นให้ I ไม่ขึ้นกับทิศทาง ดังนั้นจากสมการ (2.55) จะได้

$$q = \pi I \quad (2.56)$$

ผิวที่มีความเข้มของการแพร่รังสีมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับทิศทางเรียกว่า Lambertian หรือ diffuse surfaces วัตถุคำจะปลดปล่อยรังสีออกมาในลักษณะแพร่กระจาย (diffuse) ดังนั้น emissive power ของวัตถุคำสัมพันธ์กับความเข้มของวัตถุคำตามสมการ

$$E_b = \pi I_b \quad (2.57)$$

สมการ (2.57) นี้ เป็นการแพร่รังสีทั้งหมด กรณีพิจารณาการแพร่รังสีที่ความยาวคลื่นเฉพาะใด ๆ เราเขียนสมการ (2.57) ใหม่ได้เป็น

$$E_{b\lambda} = \pi I_{b\lambda} \quad (2.58)$$

ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแพร่รังสีระหว่างผิวน้ำวัตถุ 2 ผิว สิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาไม่เพียงแต่คุณภาพน้ำหนักและคุณสมบัติของผิวน้ำทั้งสองเท่านั้นยังต้องพิจารณาลักษณะของแผ่นผิวน้ำที่มันจะส่งผ่านการแพร่รังสีด้วย ซึ่งเป็นลักษณะทางเรขาคณิตของแผ่นทั้งสองที่กระทำต่อกันเรียกว่า radiation shape factor ซึ่งใช้สัญญาณดังนี้

$$F_{1-2} = \text{สัดส่วนของการแพร่รังสีออกจากผิวที่ } 1 \text{ ไปถึงผิวที่ } 2$$

$$F_{2-1} = \text{สัดส่วนของการแพร่รังสีออกจากผิวที่ } 2 \text{ ไปถึงผิวที่ } 1$$

ในรูปทั่วไปใช้ $F_{m-n} = \text{สัดส่วนของการแพร่รังสีออกจากผิวที่ } m \text{ ไปถึงผิวที่ } n$

ถ้าผิวทั้งสองเป็นผิววัตถุคำ พลังงานที่แพร่ออกจากผิว m ไปยังผิว n คือ $E_{bm} \cdot A_m \cdot F_{m-n}$ และ พลังงานที่แผ่ออกจากผิว n ไปยังผิว m คือ $E_{bn} \cdot A_n \cdot F_{n-m}$ ถ้าผิวทั้งสองดูคล้ายรังสีที่ตกลงบนหมดอัตราการแลกเปลี่ยนสุทธิ q_{m-n} จะมีค่า

$$q_{m-n} = E_{bm} A_m F_{m-n} - E_{bn} A_n F_{n-m} \quad (2.59)$$

ถ้าผิวทั้งสองมีคุณภาพน้ำหนักเท่ากันจะได้ $E_{bm} = E_{bn}$ และอัตราการแลกเปลี่ยนสุทธิเป็นศูนย์หรือ $q_{m-n} = 0$ นี้จะแสดงว่า the geometric radiation shape factor สอดคล้องตามความตั้งพั้นธ์

$$A_m F_{m-n} = A_n F_{n-m} \quad (2.60)$$

ดังนั้นกรณีวัตถุคำทั้งคู่ อัตราสุทธิของการแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็น $\frac{1}{2}(E_{bm} + E_{bn})$ ได้เป็นสองสมการที่เท่ากันคือ

$$q_{m-n} = A_m F_{m-n} (E_{bm} - E_{bn}) = A_n F_{n-m} (E_{bm} - E_{bn}) \quad (2.61)$$

นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาหาค่า the geometric shape factor กรณีอิน ๆ ทั่วไปอีก สำหรับระบบส่วนมากทางพลังงานแสงอาทิตย์จะมีกรณีเฉพาะ 2 ถึง 3 กรณีที่น่าสนใจ อย่างแรกคือ วัตถุทรงนูนพื้นที่ A_1 ล้อมรอบด้วยผิวนึงซึ่งมีพื้นที่ A_2 ดังนั้นการแพร่รังสีทั้งหมดที่ออกจาก A_1 จะรับไว้โดย A_2 หมวด นั้นคือ $F_{1-2} = 1$ ส่วน $F_{2-1} = A_1/A_2$ กรณีที่สองก็คือการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างหน้าที่ 2 แผ่น ถ้าแผ่นทั้งสองอยู่ใกล้กันรังสีทั้งหมดที่แพร่ออกจากผิว A_1 จะถูกผิว A_2 หมวด และในทางตรงข้ามก็เช่นเดียวกันคือจะได้ $F_{1-2} = F_{2-1} = 1.0$ กรณีที่สามก็คือการแลกเปลี่ยนรังสีระหว่างผิวเล็ก ๆ ΔA_1 และส่วนของบรรยายกาศ A_2 ตัวอย่างเช่น แผ่นรังสีของ ΔA_1 แพร่รังสีทั้งหมดที่ ΔA_1 ไปสู่ A_2 กับแนวระดับแลกเปลี่ยนรังสีกับห้องพักที่แผ่นรังสีของ ΔA_1 ให้ได้ กรณีเช่นนี้เราต้องพิจารณาตามความหมายของผลักซ์การแพร่รังสีตามรูปที่ 2-22 เราจะได้ว่าสัดส่วนของการรับการแพร่รังสีจะมีค่ามากน้อยแค่ไหนขึ้นกับการอ้างอิงของแผ่นรังสี ΔA_1 กับครึ่งทรงกลม ถ้าแผ่นรังสีของ ΔA_1 แพร่รังสีทั้งหมดที่ ΔA_1 ไปสู่ A_2 จะได้ $F_{1-2} = 1$ และถ้าตั้งฉากจะได้ $F_{1-2} = \frac{1}{2}$ ดังนั้นกรณีทั่วไปจึงเขียนได้เป็นเหมือนที่เราเคยได้มาแล้วในบทที่หนึ่งคือ

$$F_{1-2} = \frac{1}{2}(1 + \cos s) = \cos^2(s/2) \quad (2.62)$$

ถ้าการแพร่รังสีของห้องพักเป็นแบบการกระจายสมำเสมอ และสมุติว่าเป็นลักษณะของวัตถุคำ ดังนั้นพื้นที่ผิวคำเล็ก ๆ A_1 จะรับอัตราการแพร่รังสีจากห้องพักในอัตรา (กรณีวัตถุคำทั้งคู่ the shape factor เป็นไปตามสมการ 2.60)

$$A_1 F_{1-sky} E_{sky} = \frac{A_1}{2} (1 + \cos s) \sigma T_{sky}^4 \quad (2.63)$$

โดยที่อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแพร่รังสีสุทธิมีค่าตามสมการ

$$q_{sky \neq 1} = A_1 F_{1-sky} \sigma (T_{sky}^4 - T_1^4) \quad (2.64)$$

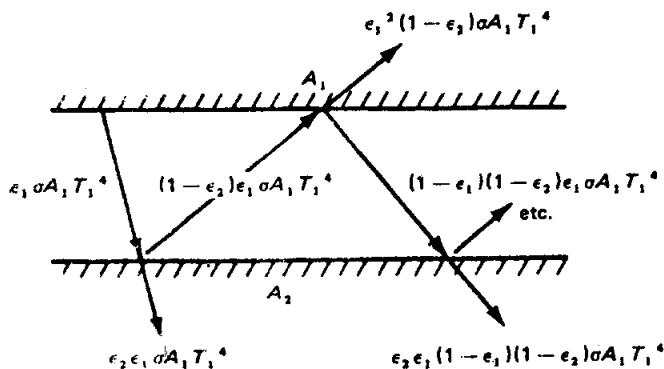
ถ้าผิวแผ่นรับรังสีเป็นสีเทา (gray body) ซึ่งมีค่า absorptance $\bar{\alpha}$ เท่ากับค่า emittance E และไม่ขึ้นกับความยาวคลื่น จะได้อัตราการแลกเปลี่ยนสุทธิมีค่า

$$q_{sky \neq 1} = A_1 F_{1-sky} \bar{\alpha} \sigma (T_{sky}^4 - T_1^4) \quad (2.65)$$

2.2.5 การแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีระหว่างแผ่นขนาดสี่เหล็ก

(Radiation exchange between two gray parallel flat plates)

อัตราสูตรของ การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นขนาดสี่เหล็กสองแผ่นพื้นที่ A_1 และ A_2 ซึ่งมีค่า emittance ϵ_1 และ ϵ_2 ตามลำดับ หาได้โดยพิจารณาว่า



รูปที่ 2-23 นานาสภาวะที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตามลำดับ

ผิว A_1 แผ่รังสีด้วยอัตรา $\epsilon_1 \sigma A_1 T_1^4$ และถ้า $F_{1-2} = 1$ หมายถึงรังสีทั้งหมดถึงผิว A_2 ดังรูปที่ 2-23 โดยที่ปริมาณ $\epsilon_2 \epsilon_1 \sigma A_1 T_1^4$ ของการแผ่รังสีจะถูกดูดกลืนไว้และ $(1-\epsilon_2) \epsilon_1 \sigma T_1^4$ จะสะท้อนกลับไปยังผิว A_1 ให้สังเกตว่าค่า $\epsilon_2 = \epsilon_1$ สำหรับผิวสี่เหล็ก การสะท้อนและการดูดกลืนรังสีจะดำเนินไปเรื่อยๆ จนได้ ปริมาณรังสีทั้งหมดที่ถูกดูดกลืนโดยผิว A_2 มีค่าตามสมการ

$$q_{1 \rightarrow 2} = A_1 \sigma T_1^4 [\epsilon_1 \epsilon_2 + \epsilon_1 \epsilon_2 (1 - \epsilon_1) (1 - \epsilon_2)]$$

$$+ \epsilon_1 \epsilon_2 (1 - \epsilon_1)^2 (1 - \epsilon_2)^2 + \dots]$$

(2.66)

โดยอาศัยอนุกรมคณิตศาสตร์จะได้ผลบวกเป็น

$$q_{1 \rightarrow 2} = A_1 \sigma T_1^4 \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)} = A_1 \sigma T_1^4 \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2.67)$$

พิจารณาในทำนองเดียวกันปริมาณการแผ่รังสีที่แผ่ออกจากผิว A_2 และดูดกลืนโดย A_1 จะได้

$$q_{2 \rightarrow 1} = A_2 \sigma T_2^4 \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

ดังนั้นอัตราสุทธิของการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวทั้งสองคือ

$$q_{1 \rightleftharpoons 2} = \frac{A \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (2.68)$$

เมื่อ $A = A_1 = A_2$ สมการ (2.68) นี้ยังสามารถนำไปใช้ได้กับการแผ่รังสีระหว่างทรงกระบอกสองอันซึ่องันซึ่งประกอบกันเป็นวงแหวนโดยมีอัตราส่วนของรัศมีทั้งสองเข้าใกล้หนึ่ง และยังประยุกต์ใช้ได้กรณีทั่วไปกับการแผ่รังสีผ่านวงแหวนเมื่อการสะท้อนมีลักษณะ specular มากกว่าเป็นแบบ diffuse บนผิวทั้งสองหรือบนผิวนอกอย่างเดียว

เพื่อให้อยู่ในสมการที่สะดวกในการนำเอาไปใช้จึงพยายามทำสมการ (2.68) ให้ การแผ่รังสีเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิแตกต่างมากกว่าอยู่ในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิ

ยกกำลังสี่ โดยการพิจารณาว่าถ้าอุณหภูมิของผิวที่ทำการแลกเปลี่ยนการแพร่รังสีไม่สูงนัก และอุณหภูมิแตกต่างค่อนข้างต่ำ เช่นน้อยกว่า 20 K สมการ (2.68) ทำให้เป็นพังก์ชันเชิงเส้น ได้โดยพิจารณาว่า

$$T_1^4 - T_2^4 = (T_1^2 - T_2^2)(T_1^2 + T_2^2) = (T_1 - T_2)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)$$

ดังนั้นสมการ (2.68) จึงเขียนได้เป็น

$$q_{1 \leftrightarrow 2} = \frac{T_1 - T_2}{R_r} \quad (2.69)$$

โดยที่

$$R_r = \frac{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}{A_1 \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}$$

ตัวอย่างที่ 2.4

ให้คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวแผ่นรับแสง ($\epsilon_1 = 0.95$, $T_1 = 360 \text{ K}$) และกระจกรอบแผ่นรับแสง ($\epsilon_2 = 0.90$, $T_2 = 340 \text{ K}$) ถ้าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพามีค่า $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการนำเมื่อพิจารณา ว่ามีค่าน้อย

วิธีทำ

การแผ่รังสีและการพาความร้อนเกิดในแบบขนาน (parallel) ระหว่างอุณหภูมิ T_1 และ T_2 เราจะได้ความต้านทานการพาความร้อนมีค่า

$$R_C = R_1 = \frac{1}{Ah_C} = 0.1 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

และจากสมการ (2.69) จะได้ความต้านทานการแผ่รังสีความร้อนมีค่า

$$R_r = R_2 = \frac{(1.11 + 1.052 - 1) \times 10^8}{5.67A(340+360)(1.15+1.29) \times 10^5} = 0.120 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

ดังนั้นการต้านทานความร้อนในแนวขนานมีค่า

$$R_{parallel} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)}$$

และได้

$$\frac{q}{A} = \frac{(T_1 - T_2)(R_1 + R_2)}{R_1 R_2} = \frac{20 \times (0.1 + 0.12)}{0.012 \times 0.012} = 367 \frac{W}{m^2}$$

2.2.6 ลักษณะการแผ่รังสีและคุณสมบัติของสาร

(Radiation characteristics and properties of materials)

ซึ่งเป็นลักษณะและคุณสมบัติของสารที่ใช้ในการออกแบบและสร้างระบบพลังงานแสงอาทิตย์ จึงควรศึกษาในเรื่องเหล่านี้ไว้เพื่อให้รู้และสามารถเลือกใช้สารต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสมกับงานที่ต้องการ

2.2.6.1 วัตถุทึบแสง (Opaque materials)

เพื่อสะดวกในการศึกษาได้มีการนิยามสิ่งต่อไปนี้ขึ้นมาคือ ค่า emittance ในทิศทางเฉพาะที่ความยาวคลื่นเฉพาะใด ๆ (the monochromatic directional emittance) ของวัสดุนึง มีค่าเท่ากับความเข้มที่ความยาวคลื่นกำหนดให้ในทิศทางกำหนดให้เฉพาะใด ๆ ต่อความเข้มที่เกิดจากวัตถุดำที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน หรือตามสมการ

$$\epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) = \frac{I_{\lambda}(\theta, \phi)}{I_{b\lambda}} \quad (2.70)$$

เมื่อ θ คือมุมชีนิก และ ϕ คือมุมอซิมูท (azimuth) ตามรูปที่ 2-22 ดังนั้นค่า emittance ในทิศทางใด ๆ ทั้งหมดทุกความยาวคลื่นมีค่า

$$\begin{aligned} \epsilon(\theta, \phi) &= \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) I_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{b\lambda} d\lambda} \\ &= \frac{1}{I_b} \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) I_{b\lambda} d\lambda \end{aligned} \quad (2.71)$$

นอกจากนี้ยังมีค่า emittance ของการแผ่รังสีเป็นครึ่งทรงกลมที่ความยาวคลื่นเฉพาะได้ ฯ หาได้จากการอินทิเกรตสมการ (2.70) ซึ่งเป็นการแผ่รังสีแบบจำแสงตลอดทั้งครึ่งทรงกลมที่มุ่งต่าง ๆ ที่มีการแผ่รังสีออกไปได้เทียบกับของวัตถุคำนั้นคือ

$$\begin{aligned} \epsilon_{\lambda} &= \frac{\int_0^2 \pi \int_0^1 \epsilon_{\lambda}(\mu, 0) I_{b\lambda} \mu d\mu d\theta}{\int_0^2 \pi \int_0^1 I_{b\lambda} \mu d\mu d\theta} \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^2 \pi \int_0^1 \epsilon_{\lambda}(\mu, \theta) \mu d\mu d\theta \quad (2.72) \end{aligned}$$

โดยที่ค่า $\mu = \cos \theta$ (เพื่อความสะดวก) และดังนั้นค่า emittance ทั้งหมดทุกพิศทุกความยาวคลื่น ของการแผ่รังสีมีค่า

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\int_0^{\infty} \int_0^2 \pi \int_0^1 \epsilon_{\lambda}(\mu, \theta) I_{b\lambda} \mu d\mu d\theta d\lambda}{\int_0^{\infty} \int_0^2 \pi \int_0^1 I_{b\lambda} \mu d\mu d\theta d\mu} \\ &= \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda \quad (2.73) \end{aligned}$$

จะสังเกตเห็นว่าทั้งค่า ϵ_λ และ ϵ เป็นคุณสมบัติของผิวสาร

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างของผิวัตถุคือค่า absorptance โดยเราเริ่มนิยามว่าค่า absorptance ในทิศทางเฉพาะที่ความยาวคลื่นได้ θ (the monochromatic directional absorptance) หมายถึงความเข้มของการแผ่รังสีที่ถูกดูดกลืนที่ความยาวคลื่นหนึ่งในทิศทาง (θ, ϕ) ต่อความเข้มของการแผ่รังสีที่ต่อกันที่ความยาวคลื่นและทิศทางเดียวกัน หรือเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\alpha_{\lambda}(\theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,a}(\theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\theta, \phi)} \quad (2.74)$$

สมการ (2.74) นี้เป็นคุณสมบัติของผิวัตถุด้วย ตัวต่อไปที่สำคัญมากคือ ค่า absorptance ในทิศทางหนึ่งที่ทุกความยาวคลื่นหมายถึงความเข้มของการแผ่รังสิทุกช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืนในทิศ (θ, ϕ) ต่อความเข้มของการแผ่รังสิทุกช่วงความยาวคลื่นที่ต่อกันที่ความยาวคลื่นหนึ่งในทิศ (θ, ϕ) หรือเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\begin{aligned} \alpha(\theta, \phi) &= \frac{\int_0^\infty \alpha_{\lambda}(\theta, \phi) I_{\lambda,i}(\theta, \phi) d\lambda}{\int_0^\infty I_{\lambda,i}(\theta, \phi) d\lambda} \\ &= \frac{1}{I_i(\theta, \phi)} \int_0^\infty \alpha_{\lambda}(\theta, \phi) I_{\lambda,i}(\theta, \phi) d\lambda \quad (2.75) \end{aligned}$$

ค่า absorptance ในทิศทางเฉพาะที่ทุกความยาวคลื่นนี้เป็นพังก์ชันของลักษณะของการแผ่รังสิที่มาต่อกัน ดังนั้นจึงไม่เหมือนค่า absorptance ในทิศทางเฉพาะที่ความยาวคลื่นหนึ่ง กล่าวคือไม่เป็นคุณลักษณะของผิวัตถุอย่างเดียวแต่มีคุณลักษณะที่ว่าสามารถเป็นผิวที่

เลือกได้ว่าสามารถถูกกลืนการแผ่รังสีจากแหล่งหนึ่งได้ในอัตรามากกว่าจากอีกแหล่งหนึ่ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าถ้ามีพิจารณาตาม Kirchhoff's law ค่า emittance ในทิศทางเดพะที่ความยาวคลื่น λ จะต้องมีค่าเท่ากับค่า absorptance ในทิศทางเดพะที่ความยาวคลื่น λ ดัง

$$\alpha_{\lambda}(\theta, \phi) = \epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) \quad (2.76)$$

แต่ค่า emittance ทั้งหมดทุกทิศทางทุกช่วงความยาวคลื่นไม่จำเป็นที่จะต้องเท่ากับค่า absorptance ทั้งหมดทุกทิศทางทุกช่วงความยาวคลื่น นอกเสียจากปรากฏภาวะสมดุลย์แห่งความร้อนซึ่งทำให้รังสีที่แผ่และรับมีลักษณะเหมือนกัน หรือเหตุผลที่ว่า $\alpha(\theta, \phi)$ ไม่เป็นคุณสมบัติของผิวเหมือน $\epsilon(\theta, \phi)$ ก็คือว่า尼ยามของ $\alpha(\theta, \phi)$ มีพังก์ชัน $I_{\lambda, i}(\theta, \phi)$ ที่ไม่เฉพาะเจาะจง (unspecified function) แต่ค่าความเข้ม $I_{\lambda, i}$ ซึ่งอยู่ในนิยามของ $\epsilon(\theta, \phi)$ มีค่าเฉพาะ (specified) เมื่อทราบอุณหภูมิที่ผิวของมัน สิ่งที่น่าจำก็คือค่าที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ต่างก็เป็นพังก์ชันของผิวซึ่งแล้วแต่ความชุขระ, อุณหภูมิ, ความสะอาด, ฯลฯ ด้วย

ด้วยไปที่เราจะนิยามต่อคือค่า absorptance ของการแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นใด ๆ ในคริ่งทรงกลม, α_{λ} มีค่า

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 \alpha_{\lambda}(\mu, \theta) I_{\lambda, i}(\mu, \theta) \mu d\mu d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 I_{\lambda, i}(\mu, \theta) \mu d\mu d\theta} \quad (2.77)$$

เมื่อ $\mu = \cos \theta$ ส่วนค่า absorptance ทั้งหมดทุกความยาวคลื่นทุกทิศในคริ่งทรงกลมมีค่า

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \int_0^2 \int_0^1 \alpha_{\lambda}(\mu, \theta) I_{\lambda, i}(\mu, \theta) \mu d\mu d\theta d\lambda}{\int_0^{\infty} \int_0^2 \int_0^1 I_{\lambda, i}(\mu, \theta) \mu d\mu d\theta d\lambda} \quad (2.78)$$

ผลของมุมตากกระทบที่มีต่อค่า absorptance แสดงดังตารางที่ 2-5

มุมตากกระทบ ;	absorptance, α (i)
0 - 30	0.96
30 - 40	0.95
40 - 50	0.93
50 - 60	0.91
60 - 70	0.88
70 - 80	0.81
80 - 90	0.66

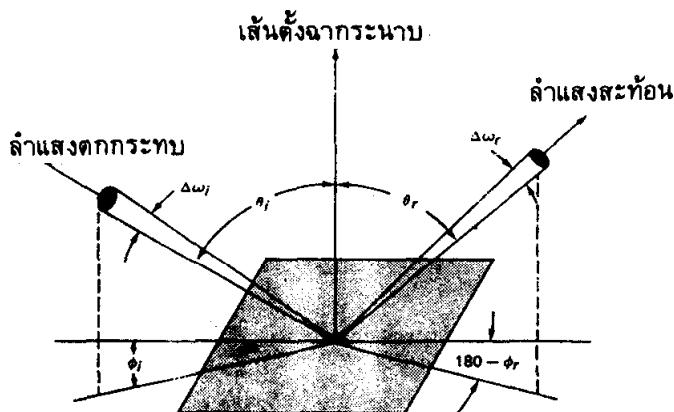
ตารางที่ 2-5 การประพันเขิงมุมของค่า absorptance ของผิวที่เคลือบด้วยคริสตัลวันทะเกียง (จาก Löff และ Tybout, 1972)

คุณสมบัติของผิวที่สำคัญตัวที่สามของวัตถุที่นับแสงก็คือค่า reflectance โดยเฉพาะในการออกแบบตัวรับแสงที่มีตัวช่วยเพิ่มความเข้ม (the focusing collectors) ดังได้กล่าวมาแล้ว ว่าการสะท้อนรังสีแบ่งได้เป็น 3 แบบคือแบบ specular, diffuse และอีกแบบไม่เป็นทั้งสองแบบ ดังกล่าวตามรูปที่ 2.18 ซึ่งแบบที่สามเป็นของวัตถุจริง

โดยทั่วไปขนาดของความเข้มของแสงที่สะท้อนออกไปในทิศใด ๆ ของผิวที่กำหนดได้ จะเป็นพังก์ชันของความยาวคลื่นและทิศทางของรังสีที่มาตักกระทบและสะท้อน ดังนั้นค่า the biangular reflectance หรือพังก์ชันแสดงการสะท้อนมีความสัมพันธ์กับความเข้ม ของรังสีที่สะท้อนไปในทิศทางใด ๆ ตามสมการ

$$\rho_{\lambda}(\mu_r, \theta_r, \mu_i, \theta_i) = \frac{\pi I_{\lambda,r}(\mu_r, \theta_r)}{I_{\lambda,i} \mu_i \Delta\omega_i}$$

ซึ่งความสัมพันธ์ในสมการ (2.79) เกิดขึ้นดังในรูปที่ 2-24 ค่า the biangular reflectance มีค่าเช่นเป็น π เท่าของความเข้มของแสงที่สะท้อนไปในทิศ μ_r, θ_r ต่อฟลักซ์ของพลังงาน



รูปที่ 2-24 ระบบโคออร์ติเนทสำหรับพัฟฟ์ชันของการสะท้อน

ปริมาณ $\pi \mu_i \Delta\varphi$ (มาจากการ 2.54 เมื่อ $\mu_i = \cos \theta_i, \Delta\varphi = \text{มุมโพลิค}$) ที่ตากกระทำบนผิวมากจากทิศทาง μ_r, θ_r ส่วนหนึ่ง ก็คุณบันคุณนั้นนำเข้ามาเพื่อให้เชิงมีลักษณะเป็นฟลักซ์ของพลังงานด้วย แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความสะดวกในการการนำเข้ามาใช้เราจะนิยามค่า ρ_{λ} ดังจะกล่าวต่อไปนี้

เมื่อผู้ใด ๆ รับรังสีที่มาจากทุกทิศทาง รังสีที่สะท้อนออกห้างหมดจะมีค่าหนึ่ง เราจะได้ลักษณะของผู้ที่เรียกว่า reflectance ของครึ่งทรงกลมที่ความยาวคลื่นหนึ่งซึ่งนิยามว่าเป็น

$$\rho_{\lambda} = \frac{q_{\lambda,r}}{q_{\lambda,i}} \quad (2.80)$$

ทั้งนี้นั่นค่า reflectance ของคริ่งทรงกลมทุกช่วงความยาวคลื่นหาได้จาก

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda, r} d\lambda}{\int_0^{\infty} q_{\lambda, i} d\lambda} \quad (2.81)$$

ซึ่งมีความสัมబูดหกับการแจกแจงเชิงมุม (the angular distribution) และการแจกแจงความยาวคลื่นของรังสีที่มาต่อกัน

ค่า ρ_{λ} มีความหมายมากเพริ่งว่าถ้าเราทราบค่า ϵ เราสามารถคำนวณหาค่า emittance และ absorptance ของวัตถุที่บ่งได้ ซึ่งจะแสดงได้ง่าย ๆ โดยการพิจารณา วัตถุหนึ่งซึ่งมีอุณหภูมิเดียวกับวัตถุค่าอันหนึ่งที่ล้อมรอบ (สมมุติอุณหภูมิ T) เราจะได้ความเข้ม ของการแพร่รังสีที่ความยาวคลื่นหนึ่งซึ่งมีทั้งการแพร่รังสีเนื่องจากการปลดปล่อยอุณหภูมิ และ การสะท้อนจากวัตถุดังกล่าวจะมีค่าเหมือนความเข้มที่เกิดจากวัตถุค่าที่อุณหภูมิ T คือ

$$I_{b,\lambda}(T) = \epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) I_{b,\lambda} + \rho_{\lambda}(\theta, \phi) I_{b,\lambda} \quad (2.82)$$

แต่จาก Kirchhoff's law เราได้ $\epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) = \alpha_{\lambda}(\theta, \phi)$ ดังนั้น จะได้

$$\epsilon_{\lambda}(\theta, \phi) = 1 - \rho_{\lambda}(\theta, \phi) = \alpha_{\lambda}(\theta, \phi) \quad (2.83)$$

ตารางที่ 2-6 แสดงค่า emittance แนวคริ่งทรงกลมทุกปานความถี่ (total hemispherical emittance) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่า absorptance ที่มีต่อแสงอาทิตย์ที่มาในแนวดังนี้จากทั้งสองรับ ทุกปานความถี่ที่อุณหภูมิห้องสำหรับวัตถุบางอย่าง

ชนิดสาร	Emittance(อุณหภูมิ, K)	Absorptance
อสูรนิ้ม (polished)	0.102 (573), 0.130 (773), 0.113 (873)	0.09-0.10
อสูรนิ้ม (anodized)	0.842 (296), 0.720 (484), 0.669 (574)	0.12-0.16
อสูรนิ้มเคลือบ SiO ₂	0.366 (263), 0.384 (293), 0.378 (324)	0.11
สีดำจากถ่านหรือเชื้อเพลิง (polished)	0.83 (at 278 K)	0.94
ทอง	0.041 (338), 0.036 (463), 0.039 (803)	0.35
เหล็ก	0.025 (275), 0.040 (468), 0.048 (668)	0.20-0.23
แมกนีเซียมอัลลอยไซด์	0.071 (199), 0.110 (468), 0.175 (668)	0.44
นิกเกิล	0.73 (380), 0.68 (491), 0.53 (755)	0.14
ตัวสำหรับทา	0.10 (310), 0.10 (468), 0.12 (668)	0.36-0.43
Parsons black	0.981 (240), 0.981 (462)	0.98
Acrylic white	0.90 (298)	0.26
White (ZnO)	0.929 (295), 0.926 (478), 0.889 (646)	0.12-0.18

(จาก Touloukian, Y.S., และคณะ)

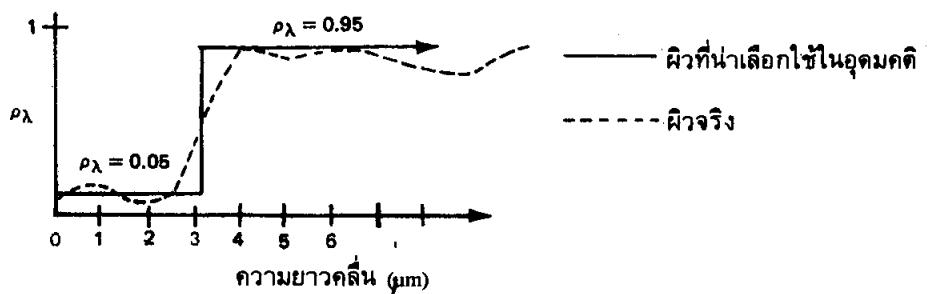
ตารางที่ 2-6 ค่า emittance ในแนวครึ่งทรงกลม และ absorptance ที่มีต่อแสงอาทิตย์ที่มาในแนวตั้งจาก

2.2.6.2 ผิวที่น่าเลือกใช้และผิวที่ให้การสะท้อนแสง

(Selective and reflecting surfaces)

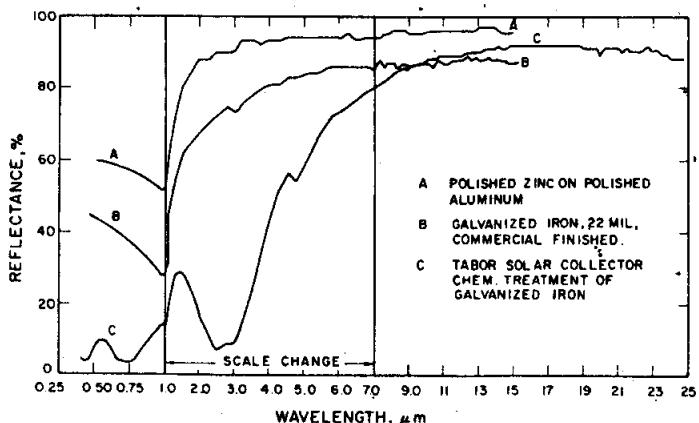
เมื่อวันที่ 2 แบบที่มีบทบาทสำคัญในระบบพลังงานแสงอาทิตย์คือ ผิวที่น่าเลือกใช้ และผิวที่ให้การสะท้อนแสง

ผิวที่น่าเลือกใช้จะเป็นแบบที่มีค่า absorptance สูงต่อการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ และมีค่า emittance ต่ำสำหรับอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงที่ผิวทำการปลดปล่อยรังสีออกมานานประกอนของผิวที่มีลักษณะแบบนี้เป็นไปได้เพร率为 98% ของพลังงานที่ได้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์อยู่ในช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 3 μm โดยที่ 99% ของการแผ่รังสีจากวัตถุผิวค่าหรือจากผิวสีเทาที่อุณหภูมิประมาณ 400 K (อุณหภูมิของแผ่นรับแสง) จะอยู่ในช่วง



รูปที่ 2-25 ลักษณะของผิวที่นำเลือกใช้ในอุณหภูมิ

ความยาวคลื่นมากกว่า $3 \mu\text{m}$ ผิววัตถุที่มีคุณสมบัติดังกล่าวจะเป็นแผ่นรับความร้อนที่ดีที่จะนำเข้ามาใช้ ดังนั้นผิวที่นำเลือกใช้ในอุณหภูมิ (an idea selective surface) สำหรับแผ่นรับแสงได้ ๆ ควรจะมีค่า reflectance ที่ความยาวคลื่นเฉพาะได้ ๆ สูงสำหรับความยาวคลื่นเกิน $3 \mu\text{m}$ และมีค่าที่สำหรับคลื่นสั้นกว่า $3 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 2-25 ซึ่งแสดงลักษณะของค่า ρ_λ ที่คงที่และเปลี่ยนแปลงจากต่ำเป็นสูงในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าว ซึ่งเป็นลักษณะผิวครึ่งสีเทา (semi-gray surface) ที่นำเลือกใช้ในอุณหภูมิซึ่งแสดงด้วยเส้นที่บันทึกค่า reflectance คงที่เป็น 0.05 ให้ $3 \mu\text{m}$ และเป็น 0.95 เหนือ $3 \mu\text{m}$ ส่วนผิวจริงที่ผลิตได้ แสดงด้วยเส้นข้าดซึ่งเป็นค่าเปรียบเทียบโดยประมาณ ให้ดูรายละเอียดแต่ละชนิดจากรูปที่ 2-26



รูปที่ 2-26 Spectral reflectances ของผิวต่างกัน (จาก Edwards และคณะ, 1960)

ส่วนผิวอิกรูปนึงคือผิวที่ให้การสะท้อนแสงนั้นประโยชน์เพื่อใช้เป็นตัวเพิ่มปริมาณพลังงานของความร้อนบนผิวที่รับแสงอาทิตย์จากแสงอาทิตย์ที่เข้ามาปกติให้มีค่าความเข้มเพิ่มขึ้นนั้นเอง ในการนี้ต้องอาศัยผิวที่ให้การสะท้อนแสงได้ดีซึ่งหมายถึงมีค่า specular reflectance สูงต่อスペคตรัมของแสงอาทิตย์ หรืออาจจะเป็นอุปกรณ์ที่ให้เกิดการหักเหของแสงโดยมีค่า transmittance สูงต่อスペคตรัมของแสงอาทิตย์ โดยปรกติผิวที่ให้การสะท้อนแสงมักเป็นโลหะที่ผิวน้ำ (polished metal) มาก ๆ หรืออาจเป็นโลหะที่ฉาบด้วยสารที่ให้การสะท้อนได้ดีโดยปรกติวัตถุที่บ้านจะสามารถให้เกิดการสะท้อนที่ผิวด้านหน้า เช่น ทองแดงชุบโคเมียมหรืออลูминัมขัดมันที่ผิว แต่สำหรับสารที่ให้แสงผ่านได้อาจจะฉาบสารสะท้อนแสงที่ผิวด้านหน้าหรือด้านหลังก็ได้ ในการนี้ที่ฉาบผิวด้านหลังแสงจะผ่านวัตถุสองครั้ง ดังนั้นค่า transmittance ของสารจึงมีบทบาทสำคัญมาก เป็นที่น่าสังเกตอีกอย่างว่าค่า specular reflectance ของผิวที่ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสง ดังนั้นในการหาค่าเฉลี่ยของ the specular reflectance $\bar{\rho}_s$ จะต้องทราบพังก์ชันที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแล้วอินทิเกรตผลลัพธ์スペคตรัมของแสงอาทิตย์ นั้นคือ

$$\bar{\rho}_s = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda, rs} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda, i} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{s,\lambda} I_{\lambda, i} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda, i} d\lambda} \quad (2.84)$$

โดยที่ $\rho_{s,\lambda}$ คือ the specular monochromatic reflectance และ $I_{\lambda, rs}$ คือความเข้มของแสงที่สะท้อนออกมารูปแบบ specular ที่ความยาวคลื่น λ

2.2.6.3 การแปรรูปสีผ่านวัตถุไปร่วมแสงบางส่วน

สำหรับวัตถุที่แสงจะมีค่า absorptance + reflectance = 1 หรือ $\alpha + \rho = 1$ ส่วนวัตถุที่ไปร่วมแสงบางส่วนจะมี $\alpha + \rho + \text{transmittance } (\tau) = 1$ เป็นจริงสำหรับหลายผิวหรือหลาย ๆ ชั้นด้วย ค่า τ ก็เหมือน α , ρ เป็นพังก์ชันของความยาวคลื่น (λ), มุนของรังสีที่ตก

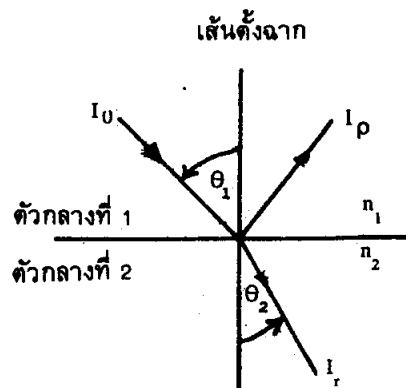
กระบวนการแสงยังขึ้นกับดัชนีหักเห (refractive index (n) และสัมประสิทธิ์การลดความเข้มแสง。
 (n) ของสารนั้น กล่าวได้ว่า n_1 , n_2 เป็นพัมพ์ขึ้นของความยาวคลื่นของการแผ่รังสีแต่เพื่อความ
 สะดวกในการนำเอาไปใช้ เรายังคงต้องไม่ขึ้นกับความยาวคลื่น

Fresnel ได้แสดงความสัมพันธ์สำหรับการสะท้อนของการแผ่รังสีที่เป็น nonpolarized ซึ่งผ่านจากตัวกลางที่ 1 ซึ่งมีดัชนีหักเห n_1 ไปยังตัวกลางที่ 2 ซึ่งมีดัชนีหักเห n_2 โดยได้

$$\rho = \frac{\text{ความเข้มของแสงที่หักเหออกไป}}{\text{ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ}} = \frac{I_r}{I_0}$$

$$= \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (2.85a)$$

โดยที่ θ_1 และ θ_2 คือมุมของแสงที่ตกกระทบและหักเหดังรูปที่ 2-27 โดยที่ค่าในวงเล็บใหญ่จะแทนส่วนของการสะท้อนแต่ละส่วนของ polarization (ρ_{\perp} และ ρ_{\parallel}) กล่าวคือสมการ (2.85a)



รูปที่ 2-27 มุมทกกระทบและมุมหักเหในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_1 และ n_2

ให้ค่าการสะท้อนของรังสีที่เป็นแบบ unpolarized เป็นค่าเฉลี่ยของสองส่วนดังกล่าว และ นุ่ม θ_1 และ θ_2 มีความสัมพันธ์กับครรชน์หักเหตาม Snell's law คือ

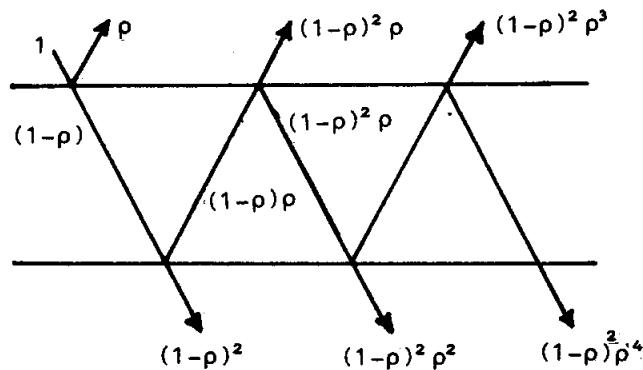
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (2.86)$$

ถ้าแสงตกกระทบในแนวตั้งจากกับวัตถุใช้ค่า

$$\rho = \frac{I_r}{I_0} = \left[\frac{(n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)} \right]^2 \quad (2.85b)$$

ถ้าตัวกลางหนึ่งเป็นอากาศ ก็ใช้ค่าครรชน์หักเหของอากาศเป็น 1

ถ้าเราลากการคูณกันในแผ่นกระดาษดังรูปที่ 2-28 ถ้าเราพิจารณาว่าข้างบน และข้างล่างแผ่นนี้เป็นอากาศจะได้ $(1-\rho)$ ของค่าแสงที่ตกกระทบจะผ่านผิวในด้านบนข้าไป



รูปที่ 2-28 การหักดูผ่านแผ่นวัตถุของแสง

ในกระจก และจะหดลู่ผ่านผิวในด้านส่างไปปริมาณ $(1-\rho)^2$ และปริมาณ $\rho(1-\rho)$ จะสะท้อนกลับไปยังผิวในด้านบน และเป็นแบบนี้ไปเรื่อยๆ เมื่อร่วมผลที่ได้จากปริมาณรังสีที่ผ่านผ่านกระจก จะได้ค่า transmittance (τ) ของกระจกแผ่นหนึ่งเมื่อเราลดการคูณกันไว้คือ

$$\tau_{r,1} = (1-\rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1-\rho)^2}{(1-\rho^2)} = \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad (2.87)$$

ถ้าหากเป็นระบบที่มีกระจก n แผ่นซ้อนกับกันอยู่และกระจกเหล่านั้นเป็นวัตถุชนิดเดียวกัน พิจารณาในทำนองเดียวกันจะได้

$$\tau_{r,n} = \frac{(1-\rho)}{1 + (2n-1)\rho} \quad (2.88)$$

สมการนี้เป็นจริงสำหรับแต่ละส่วนของ polarization ทั้งสองส่วนของแสง ดังนั้นค่า transmittance สำหรับแสงที่เริ่มต้นจากแบบ unpolarized หากได้จากการหาค่าเฉลี่ยของค่า transmittance ของทั้งสองส่วนดังกล่าว

ที่นี่เราสามารถนำการคูณกันในวัตถุไปร่วมแสงบางส่วนดังกล่าวด้วยค่า μ ตามที่ Bouger's law ที่มีสมมุติฐานว่า การคูณกันรังสีเป็นสัดส่วนกับความเข้มของแสงในตัวกลางและระยะทางที่มีผ่าน x นั่นคือ

$$-\frac{(dI/I)}{dx} = \mu \quad (2.89)$$

ค่า μ คือ สัมประสิทธิ์การลดความเข้มของแสง เราสมมุติว่ามีค่าคงที่ต่อสเปกตรัมของแสง (กรณีผิวสีเทา μ ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่น) เมื่อยินติเกรทสมการดังกล่าวโดยมีลิมิต จาก 0 ถึง L ซึ่งเป็นระยะที่แสงผ่าน

$$\begin{aligned}
 -\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} &= \mu \int_0^L dx \\
 \ln \left| \frac{I}{I_0} \right| &= \mu L + C \\
 \ln_e \frac{I_L}{I_0} &= \ln \frac{I_L}{I_0} = \mu L + C
 \end{aligned}$$

พิจารณาที่ $L = 0$ จะได้ $I_0 = I_L$ จะได้

$$\ln 1 = 0 = C$$

* ดังนั้นค่า transmittance ที่คิดเฉพาะการดูดกลืนอย่างเดียว

$$\tau_a = \frac{I_L}{I_0} = e^{-\mu L} \quad (2.90)$$

สำหรับแผ่นแก้วค่า μ มีค่าประมาณ $0.04/cm$ สำหรับแก้วใส และประมาณ $0.32/cm$ สำหรับแก้วสี

ดังนั้นค่า transmittance ที่พิจารณาทั้งที่เกิดการสะท้อนและการดูดกลืนในตัวกลาง ดังกล่าวจะหาได้จาก

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \quad (2.91)$$

สมการนี้ใช้ได้เมื่อค่า L มีค่าน้อย ๆ (τ_a ไม่ห่างจาก 1 มากนัก)

ตัวอย่างที่ 2.5

ให้ค่า俆ณหาค่า reflectance ของผิวแก้วเมื่อแสงตกกระทบในแนวตั้งแนวระนาบในแนว 45° จากแนวตั้งจากผิวแก้ว เมื่อค่า折射率หักเหโดยเฉลี่ยของแผ่นแก้วต่อสเปกตรัมดวงอาทิตย์มีค่า 1.526

วิธีทำ

$$\text{กรณีแสงตกในแนวตั้งใช้สมการ } \rho = \frac{I_r}{I_0} = \left\{ \frac{(n-1)}{(n+1)} \right\}^2 \quad \text{เราจะได้}$$

$$\rho(0) = (0.526/2.526)^2 = 0.0434$$

ส่วนกรณีแสงตกกระทบแผ่นแก้วเป็นมุน 45° จากแนวตั้ง เราใช้สมการ $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$ หาค่ามุนหักเห θ_2 ได้

$$e_2 = \sin^{-1} \left\{ \frac{\sin 45^\circ}{1.526} \right\} = 27.6^\circ$$

จากสมการ (2.85)a จะได้

$$\begin{aligned} \rho(45^\circ) &= \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sin^2(-17.4^\circ)}{\sin^2(72.6^\circ)} + \frac{\tan^2(-17.4^\circ)}{\tan^2(72.6^\circ)} \right\} \\ &= \frac{1}{2} \{ 0.0982 + 0.0096 \} = 0.0539 \end{aligned}$$

ตัวอย่างที่ 2.6

ให้俆ณหาค่า transmittance ของกระดาษข้อนกันสองแผ่น เมื่อแสงตกกระทบแผ่นแก้วในแนวตั้งจากและเป็นมุน 45° จากแนวตั้งจากแผ่นแก้ว เมื่อพิจารณาไว้เมื่อพะการส่งผ่านและสะท้อนแสง

วิธีทำ

กรณีตกกระทบในแนวตั้ง เราจะได้ค่า reflectance ของผิวแก้วด้านบนมีค่าจาก
ตัวอย่างที่ 2.5 เป็น $\rho(0) = 0.0434$ ดังนั้นจากสมการ $\tau_{r,n} = (1-\rho)/\{1+(2n-1)\rho\}$
ค่า transmittance คิดเฉพาะการสะท้อนเท่านั้นจะได้

$$\tau_r(0) = (1-0.0434)/\{1+3(0.0434)\} = 0.85$$

กรณีมุมตกกระทบเป็น 45° เราต้องหาค่า reflectance จากผิวแก้วในแต่ละส่วนของ polarization คือจะได้ $\rho_x = 0.0982$ และ $\rho_y = 0.0096$ ดังนั้นจากสมการหาค่า τ ซึ่งใช้กับแต่ละส่วน
ของแสงของ polarization ค่า transmittance จะหาได้จากค่าเฉลี่ยของทั้งสองส่วน นั่นคือ

$$\tau_r(45^\circ) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1-0.0982}{1+3(0.0982)} + \frac{1-0.0096}{1+3(0.0096)} \right\} = 0.83$$

แบบฝึกหัด

1. ถ้าแผ่นไฟเบอร์กลาสมีอุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวคันละด้านเป็น 50 K เมื่อแผ่นดังกล่าวนี้ มีความหนา $10\text{ }\mu\text{m}$. และสภาน้ำความร้อนมีค่า 0.04 W/m.K จงคำนวนหาอัตราการถ่ายเท ความร้อนผ่านแผ่นต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง
2. ปริมาณแสง 700 W/m^2 ตกบนแผ่นโลหะซึ่งมีค่า solar absorptance 0.9 และเมื่อด้านหลัง ของแผ่นโลหะนี้กันด้วยฉนวนอย่างสมบูรณ์ ถ้าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการ พาด้านบนของแผ่นโลหะนี้มีค่า $10\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ และอุณหภูมิแวดล้อมแผ่นโลหะเป็น 300 K ให้คำนวนหาอุณหภูมิของแผ่นโลหะนี้เมื่ออุปในภาวะสมดุลย์แห่งความร้อน
3. จากโจทย์ในข้อ 2 ถ้าสมมุติว่าแผ่นโลหะดังกล่าวถูกสร้างขึ้นมาให้เป็นผิวที่น่าเลือกใช้ได้ดี คือ เคลือบผิวให้มีค่า solar absorptance เท่ากับ 0.9 และมีค่า emittance เมื่ออุปในภาวะสมดุลย์ แห่งความร้อนเป็น 0.2 ให้คำนวนหาอุณหภูมิของแผ่นโลหะอีกรั้งในภาวะดังกล่าว
4. แผ่นขนาดใหญ่สองแผ่นมีคุณสมบัติที่ผิวเหมือนวัสดุดำมีอุณหภูมิ 300 และ 400 K ตามลำดับ ให้คำนวนหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผรังสีระหว่างแผ่น ทั้งสองในหน่วย W/m^2
5. ให้คำนวนข้อ 4 อีกรั้งเมื่อสมมุติว่าแผ่นทั้งคู่มีค่า emittance เท่ากับ 0.1 และทั้งคู่เป็น วัสดุสีเทา
6. ให้คำนวนหาเปอร์เซนต์ของการแผรังสีจากวัสดุดำที่มีอุณหภูมิ 300 K ในช่วงความยาว คลื่นระหว่าง $8\text{ }\mu\text{m}$ ถึง $14\text{ }\mu\text{m}$
7. ให้คำนวนหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผรังสีระหว่างแผ่นวัสดุสองแผ่น เมื่อ อุณหภูมิ , ค่า emittance ของแผ่นทั้งสองมีค่า $500\text{ K}, 0.45$ และ $500\text{ K}, 0.3$ ตามลำดับ
8. จากตัวอย่างที่ 2.6 ในบทนี้ ให้คำนวนหาค่า transmittance ทั้งหมด เมื่อแสงตกกระทบ แผ่นแก้วในแนวตั้งฉากและเป็นมุม 45° องศา กับแนวตั้งจากกับแผ่นแก้ว เมื่อแผ่นแก้ว ทั้งสองเต็มแผ่นหนา $0.25\text{ }\mu\text{m}$ เซนติเมตร และค่าสัมประสิทธิ์การลดความเข้มของแสง(μ) ของแก้วมีค่า $0.161/\text{เซนติเมตร}$ และค่าด้วยรชนีหักเหมือนค่า 1.526