

วรรณคดีวิจารณ์

2.1 บทนำ

จากการทบทวนเอกสารพบว่าได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและวัสดุในชั้นวัสดุหนามานานแล้ว จากการศึกษาของ Schumann (1929) ซึ่งเป็นผู้หนึ่งที่ริเริ่มการศึกษาเรื่องนี้ พบว่าพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนในชั้นวัสดุหนาจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวเช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุและของไหล ความเร็วและความดันของของไหล ความหนาแน่นของของไหลและวัสดุ ความจุความร้อนของของไหลและวัสดุ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างของไหลและวัสดุ เป็นต้น แต่ในการใช้งานจริงนั้นในบางระบบตัวแปรบางตัวอาจส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของระบบน้อยเช่น ในระบบสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์ (rock-bed thermal storage) เนื่องจากอุณหภูมิของวัสดุและของไหลเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก จึงกำหนดให้คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุและของไหลมีค่าคงที่ และพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุที่ใช้มีขนาดเล็กจึงถือว่าการนำความร้อนระหว่างก้อนวัสดุและผลของการนำความร้อนภายในวัสดุมีค่าน้อยสามารถตัดทิ้งได้หากวัสดุมีขนาดเล็ก (Riaz (1976)) แต่ข้อสมมติฐานนี้ใช้ในการหลอมเหล็กไม่ได้ เนื่องจากอุณหภูมิของของไหลและวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงมากและในกรณีที่ชิ้นเหล็กมีขนาดใหญ่ผลของการนำความร้อนภายในวัสดุหนาหากตัดทิ้งจะทำให้ผลการคำนวณคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงมาก (Kinney (1927)) ดังนั้นการศึกษาที่ผ่านมาจึงมีผู้ศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในชั้นวัสดุหนาเช่น ศึกษาถึงสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างของไหลและวัสดุในชั้นวัสดุหนา การนำความร้อนระหว่างวัสดุอัตราส่วนช่องว่าง (void fraction) การเปลี่ยนแปลงความเร็วและความดันของของไหลเมื่อไหลผ่านวัสดุ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุและของไหลในชั้นหนา แต่ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุและของไหลในชั้นวัสดุหนา สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและอัตราส่วนช่องว่างเท่านั้น เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการศึกษามีลักษณะเป็นทรงกลมผิวสัมผัสระหว่างวัสดุจึงมีไม่มากนัก ดังนั้นค่าการนำความร้อนระหว่างวัสดุสามารถตัดทิ้งได้ และเนื่องจากวัสดุที่ใช้มีผิวที่เรียบและชั้นของวัสดุไม่หนามากนัก ดังนั้นค่าความดันและความเร็วของของไหลถือว่ามีความสำคัญ แต่สำหรับผู้สนใจที่จะศึกษาเพิ่มเติมถึงตัวแปรที่ไม่ได้นำเสนอก็สามารถศึกษาได้จากเอกสารที่เสนอไว้ในบรรณานุกรมท้ายเล่ม

2.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุและของไหลในชั้นวัสดุหนา

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุและของไหลในชั้นวัสดุหนา ที่ผ่านมานั้นมี ทั้งที่ใช้การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์และใช้การทดลองในการหาสมการการกระจายของอุณหภูมิแต่ งานที่ได้รับการยอมรับมักเป็นงานที่ใช้การแก้สมการทางคณิตศาสตร์ ผลงานที่น่าสนใจในระยะ แรกมักเป็นงานที่ได้จากการทดลองเช่น Nusselt (1911) และ Anzelius (1926) ได้ทำการ ทดลองเพื่อหาสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุและของไหลภายในชั้นวัสดุหนาดตามแนว ทางการทดลองของ Reynolds (1901) ซึ่ง Reynolds เป็นบุคคลแรกที่ศึกษาถึงการถ่ายเท ความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ แต่งานของทั้งสองท่านนี้ไม่ค่อยได้รับการยอมรับนัก งานที่ได้รับความสนใจและเป็นต้นแบบของการศึกษาต่อมาก็คืองานของ Schumann (1929) โดย Schumann กำหนดให้ของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงไหลผ่านชั้นวัสดุหนาที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าแล้ว สร้างสมการการถ่ายเทความร้อนของของไหลและชั้นวัสดุหนาภายใต้ข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. วัสดุมีขนาดเล็กและมีค่าการนำความร้อนสูง ดังนั้นอุณหภูมิของวัสดุจะถือว่าเท่ากันทั้ง ก้อน
2. การนำความร้อนระหว่างวัสดุและการนำความร้อนระหว่างของไหลมีค่าน้อยมาก เมื่อ เทียบกับการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างวัสดุและของไหล
3. คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุและของไหลที่ตำแหน่งใดๆ ให้พิจารณาที่อุณหภูมิเฉลี่ย ของวัสดุและของไหล ณ จุดนั้น
4. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของวัสดุและของไหลที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ถือว่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้
5. คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุและของไหลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเท่านั้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Schumann สามารถเขียนในรูปของสมการโดยพิจารณา สมดุลทางความร้อนของของไหลและวัสดุได้ดังนี้

สมการความสมดุลพลังงานของของไหลคือ

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + v \frac{\partial T_g}{\partial x} = -\frac{k}{h_g f} (T_g - T_s) \quad (2.1)$$

และสมการความสมดุลพลังงานของวัสดุคือ

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{k}{h_s (1-f)} (T_g - T_s) \quad (2.2)$$

โดยที่ x คือระยะทางจากขอบของชั้นวัสดุหนา (m)

t คือเวลา (s)

T_0 คืออุณหภูมิเริ่มต้นของของไหล ($^{\circ}\text{C}$)

T_g คืออุณหภูมิของของไหล ($^{\circ}\text{C}$)

T_s คืออุณหภูมิของวัสดุ ($^{\circ}\text{C}$)

h_g คือความจุความร้อนต่อปริมาตรของไหล ($\text{J/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

h_s คือความจุความร้อนต่อปริมาตรของวัสดุ ($\text{J/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

k คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตร ($\text{W/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

f คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง (decimal)

v คือความเร็วโดยเฉลี่ยของของไหล (m/s)

ผลเฉลยของสมการที่ (2.1) และ (2.2) คือ

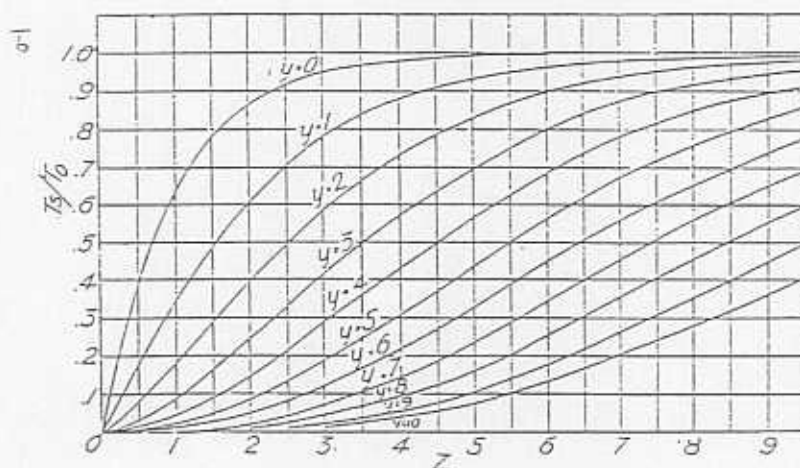
$$\frac{T_s}{T_0} = 1 - e^{-y-z} \sum_{n=0}^{\infty} y^n Mn(yz)$$

$$\frac{T_g}{T_0} = 1 - e^{-y-z} \sum_{n=1}^{\infty} y^n Mn(yz)$$

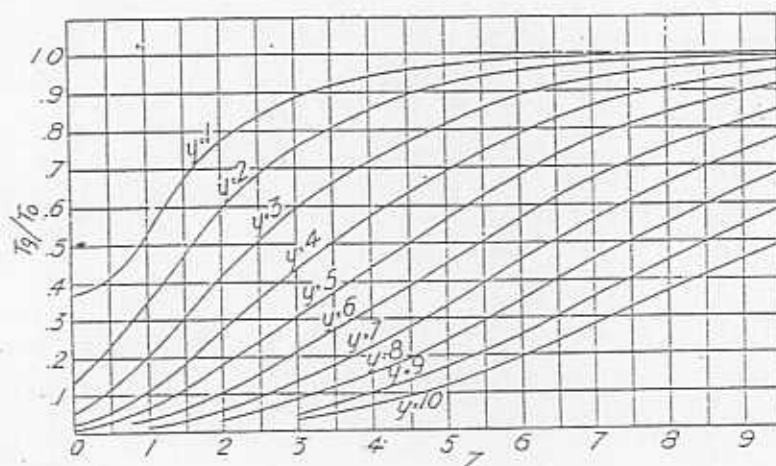
โดยที่ $y = kx/(vh_g f)$

$$z = k(t-x/v)/h_s(1-f)$$

โดย Schumann ได้แสดงผลเฉลยของสมการที่ (2.1) และ (2.2) ไว้ในรูปของกราฟสองกราฟคือ รูปที่ 2.1 เป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิของวัสดุต่ออุณหภูมิเริ่มต้นของของไหลกับค่า z โดยให้ค่า y คงที่ และรูปที่ 2.2 เป็นกราฟระหว่างอุณหภูมิของของไหลต่ออุณหภูมิเริ่มต้นของของไหลกับค่า z โดยให้ค่า y คงที่



รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในวัสดุ



รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายของอุณหภูมิในของไหล

สำหรับงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนในชั้นวัสดุหนา ในลำดับต่อมามักเป็นงานที่นำงานของ Schumann ไปปรับปรุงให้ดีขึ้นหรือไม่ก็จะเป็นการนำสมการของ Schumann ไปประยุกต์ใช้กับระบบต่างๆที่คนสนใจศึกษา ผู้ที่นำสมการที่ (2.1) และ (2.2) ไปปรับปรุง เช่น Huausen (1929) นำสมการของ Schumann มาวิเคราะห์เชิงเลขเพื่อให้การแก้สมการนั้นง่ายและเร็วขึ้นโดยนำเสนอผลเฉลยในรูปกราฟเช่นเดียวกันของ Schumann ซึ่งผลที่ได้นั้นขาดความแม่นยำ แต่ก็มีส่วนนำไปใช้กับงานที่ค่อนข้างซับซ้อนเช่น ในรีเจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น

Klinkenberg (1948) ได้แก้สมการ (2.1) และ (2.2) ให้อยู่ในรูปของ error function ซึ่งผลที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้นคือ เช่นที่ $y=8$ มีความคลาดเคลื่อน 0.001 แต่ผลเลขที่ได้ไม่สามารถหาค่าได้ที่ $y < 2$ และที่ $z < 1$

สำหรับงานที่นำสมการของ Schumann ไปประยุกต์ใช้กับระบบที่ตนสนใจเช่น ในการศึกษาถึงการสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ มักจัดรูปสมการที่ (2.1) และ (2.2) ให้อยู่ในรูปของ NTU (number of transfer units) โดย Hughes (1975) ได้จัดรูปสมการของ Schumann ใหม่โดยถือว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลกับระยะทาง ซึ่งทำให้ได้สมการในรูปของ

$$\frac{\partial T_f}{\partial (x/L)} = -NTU(T_f - T_s) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial \theta} = NTU(T_f - T_s) \quad (2.4)$$

โดยที่

$$NTU = \frac{h_v AL}{m_f C_c}$$

$$\theta = \frac{m_f C_c}{\rho C_s (1 - \varepsilon) AL}$$

โดยที่ T_f คืออุณหภูมิของของไหล ($^{\circ}\text{C}$)

T_s คืออุณหภูมิของวัสดุ ($^{\circ}\text{C}$)

h_v คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างของไหลและวัสดุ ($\text{J/m}^3\text{C}$)

C_f คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของของไหล ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)

C_s คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของวัสดุ ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)

m_f คืออัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/s)

ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

ε คือค่าอัตราส่วนช่องว่าง (decimal)

τ คือเวลา (s)

A คือพื้นที่หน้าตัดของชั้นวัสดุหนา (m)

L คือความยาวของชั้นวัสดุหนา (ในทิศทางการไหล) (m)

โดยในการหาผลเฉลี่ยของสมการ (2.3) และ (2.4) นั้น Hughes (1975) ได้ใช้การวิเคราะห์เชิงเลข โดยกำหนดให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของวัสดุเป็นแบบเส้นตรงแต่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของของไหล (อากาศ) เป็นแบบ exponential ซึ่งจากการศึกษาของ Kuhn (1978) พบว่าผลเฉลี่ยที่ได้เหมาะสมที่จะใช้กับระบบการสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์

2.3 ค่าอัตราส่วนช่องว่าง

ค่าอัตราส่วนช่องว่างเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาตรของวัสดุและของไหลที่อยู่ในชั้นวัสดุหนา ซึ่งมีผู้ทำการศึกษาไว้หลายท่านดังนี้

จากการศึกษาของ Shewen (1978) ได้ศึกษาถึงค่าอัตราส่วนช่องว่างของวัสดุที่มีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าอัตราส่วนช่องว่างสามารถหาได้จากมวลของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุ โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักของน้ำที่บรรจุในปริมาตรเดียวกันดังนี้คือ

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{void}}}{V_{\text{bed}}} \quad (2.5)$$

โดยที่ V_{void} คือปริมาตรของช่องว่างในชั้นวัสดุหนาเท่ากับวัสดุ (m^3)

V_{bed} คือปริมาตรของชั้นวัสดุหนา (m^3)

ความหนาแน่นของวัสดุสามารถหาได้จาก

$$\rho_b = \frac{m_b}{V(1-\varepsilon)} \quad (2.6)$$

โดยที่ m_b คือมวลของวัสดุที่บรรจุในชั้นหนา

เส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของวัสดุสามารถหาได้จาก

$$d = \frac{6m_b}{\pi\rho_b N} \quad (2.7)$$

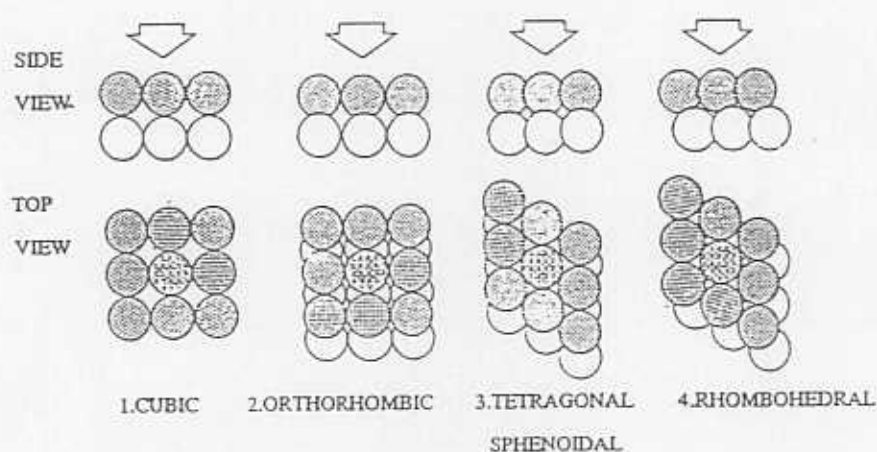
โดยที่ d คือเส้นผ่าศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของวัสดุ (m)

N คือจำนวนของวัสดุ

Ogawa, Yoshikawa และ Lee (1991) ได้ศึกษาค่าอัตราส่วนช่องว่างของวัสดุที่มีลักษณะเป็นทรงกลมตามลักษณะการเรียงของวัสดุที่เป็นทรงกลมภายในชั้นหนา ปรัชญาของการศึกษาเป็นดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าอัตราส่วนช่องว่างตามลักษณะการเรียงของวัสดุที่เป็นทรงกลม

Type of Packing arrangement	Voidage	Coordination number N
Cubic	0.4764	6
Orthorhombic	0.3954	8
Tetragonal-Sphenoidal	0.3019	10
Rhombohedral	0.2594	12



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเรียงของวัสดุที่เป็นทรงกลมในชั้นหนา

จากการศึกษาของ John (1951) ได้เสนอค่าอัตราส่วนช่องว่างที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวของวัสดุภายในชั้นวัสดุหนาที่เป็นทรงกระบอก โดยวัสดุมีรูปร่างเป็นทรงกลมปรากฏผลเป็นดังนี้คือ

สำหรับวัสดุที่มีผิวขรุขระ

$$\varepsilon = 0.453 D_p/D_t + 0.442 \quad (2.8)$$

สำหรับวัสดุที่มีผิวเรียบ

$$\varepsilon = 0.308 D_p/D_t + 0.373 \quad (2.9)$$

โดยที่ D_t คือเส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นวัสดุหนา (m)

D_p คือเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ (m)

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่นความเร็วของของไหล ความหนาแน่นของของไหล ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล เป็นต้น การหาสมการค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจึงทำได้ยากมาก การวิเคราะห์เชิงมิติจึงมีประโยชน์มากในการลดจำนวนตัวแปรลง (นักสิทธิ์ 2526) แต่การได้มาซึ่งสมการของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนก็ยังคงยุ่งยากอยู่นั่นเอง ได้มีผู้ที่ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติเช่น Colburn (1931), Andrew (1955) แต่สมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนมากมีความยุ่งยากในการใช้ ดังนั้นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติจึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้งาน สมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่นิยมใช้เป็นสมการที่ได้มาจากการทดลอง ซึ่งสมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้จากการทดลองนี้มีผู้ศึกษาไว้เป็นจำนวนมาก โดยในแต่ละสมการจะกำหนดขอบเขตการใช้งานที่เหมาะสมกับสมการแต่ละสมการไว้ ทำให้สามารถเลือกใช้สมการได้ตามความเหมาะสม อีกทั้งสมการที่ได้มักอยู่ในรูปที่ไม่ซับซ้อนสามารถใช้ได้ง่าย ดังนั้นในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะสมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้จากการทดลองเท่านั้น

Furnas (1932) ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างอากาศกับวัสดุที่ใช้ในการส่งถ่ายความร้อนที่สภาวะต่างๆ ทำให้ได้สมการสำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนดังนี้

$$h_v = \frac{cG^{0.7} T^{0.3} 10^{0.68-3.56f^2}}{d^{0.9}} \quad (2.10)$$

โดยที่ c คือค่าที่ซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ในการส่งถ่ายความร้อน

T คืออุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของอากาศเข้ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ ($^{\circ}\text{F}$)

d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ (ft)

f คือ อัตราส่วนช่องว่าง

G คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (ft/s)

โดยจากการทดลองที่อุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศ 200 องศาฟาเรนไฮท์ (93.3°C) จะได้ค่า c ของวัสดุต่างๆดังนี้

ชนิดของวัสดุ	c
Limestone	0.452
CorsiCa iron ore	0.627
Coke	0.344
iron balls	0.661

Colburn (1933) ได้ทำการทดลองโดยการใช้ของไหลไหลผ่านวัสดุทรงกลมที่อยู่ในชั้นหนาที่เป็นทรงกระบอก ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้จะมีหน่วยเป็นบีทียูต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์ฟุตต่อองศาฟาเรนไฮท์ โดยได้แบ่งการศึกษากออกเป็นดังนี้

การทดลองแรก เป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบที่มีของไหลเป็นอากาศโดยค่าความเร็วเชิงมวลมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อตารางฟุตต่อวินาที สมการที่ได้คือ

$$h_s = aG^{0.53} \quad (2.11)$$

โดยที่ a คือค่าคงที่สามารถหาค่าได้จากรูปที่ 2.4

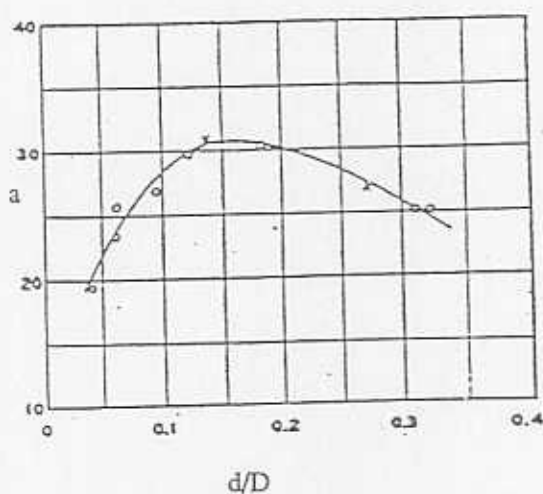
d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุ (ft)

D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของชั้นหนา (ft)

การทดลองต่อไป เป็นการทดลองที่ใช้แก๊สอื่นๆแทนอากาศในการหาค่าของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน สำหรับการไหลแบบราบเรียบ โดยที่ค่าเส้นผ่าศูนย์กลางท่อมีหน่วยเป็นนิ้ว และค่าความหนืดของของไหลมีหน่วยเป็นเซนติพอยส์ สมการที่ได้คือ

$$h_s = 36C_p z^{0.2} G^{0.3} / D^{0.2} \quad (2.12)$$

โดยที่ z คือค่าความหนืดของของไหล (cP)



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ a และ d/D

สำหรับของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วนนั้น สมการของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จาก

$$h_s = 8aC_p z^{0.2} G^{0.53} \quad (2.13)$$

โดยที่ค่าคงที่ a หาค่าได้จากรูปที่ 2.4

Williams (1941) ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศกับวัสดุที่ใช้ในการส่งถ่ายความร้อนที่มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส

$$h_s = (G^{0.6}/d^{0.4}) \quad (2.14)$$

Gamson, Thodos และ Hougen (1943) ได้ทำการทดลองโดยการใช้อากาศไหลผ่านวัสดุที่ใช้ในการส่งถ่ายความร้อนที่เป็นทรงกลมและทรงกระบอก โดยมีสมมุติฐานในการทดลองคือ ถือว่าระบบไม่มีการส่งถ่ายความร้อนกับสิ่งแวดล้อม อยู่ภายใต้สภาวะคงที่ มีการไหลแบบปั่นป่วน ที่ค่า modified Reynolds number 350 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียสคือ

$$h_s = (G^{0.59}/d^{0.41}) \quad (2.15)$$

แต่สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่มีค่า modified Reynolds number ต่ำกว่า 40 จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะไม่ขึ้นกับค่าอัตราไหลเชิงมวล แต่จะขึ้นอยู่กับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเท่านั้น ดังนั้นสมการของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะกลายเป็น

$$h_s = (1/d) \quad (2.16)$$

Lof และ Hawley (1948) ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรของอากาศที่ถ่ายเทสู่ชั้นหนาที่มีขนาดของวัสดุที่ใช้ส่งถ่ายความร้อนขนาด 0.5 นิ้ว ถึง 1.5 นิ้ว อัตราเร็วของอากาศ 12.05 ถึง 66.3 ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาทีต่อตารางฟุต โดยอากาศเข้ามีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 100 องศาถึง 250 องศาฟาเรนไฮต์

$$h_v = 0.79(G/d)^{0.7} \quad (2.17)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรที่ได้มีหน่วยเป็น บีทียูต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์ฟุตต่อองศาฟาเรนไฮต์ ค่าความเร็วเชิงมวลของอากาศมีหน่วยเป็นปอนด์ต่อชั่วโมงต่อตารางฟุต และเส้นผ่านศูนย์กลางมีหน่วยเป็นฟุต เพื่อให้สมการอยู่ในหน่วย S.I. สมการ (2.17) เขียนใหม่ได้เป็น

$$h_v = 652(G/d)^{0.7} \quad (2.18)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อลูกบาศก์เมตรต่อองศาเซลเซียส ค่าความเร็วเชิงมวลมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที และค่าเส้นผ่านศูนย์กลางมีหน่วยเป็นเมตร

จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเชิงปริมาตรที่ได้ ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่อพื้นที่ได้คือ

$$h_s = h_v d / 6(1-\epsilon) \quad (2.19)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เสนอมานี้ จะพบว่าได้มีผู้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไว้ค่อนข้างมาก แต่การศึกษาในที่นี้จะเลือกใช้สมการของ Lof และ Hawley เนื่องจากสมการของทั้งสองท่านนี้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางอีกทั้งสมการที่ได้มีขอบเขตการใช้ที่กว้างกว่าของผู้อื่น