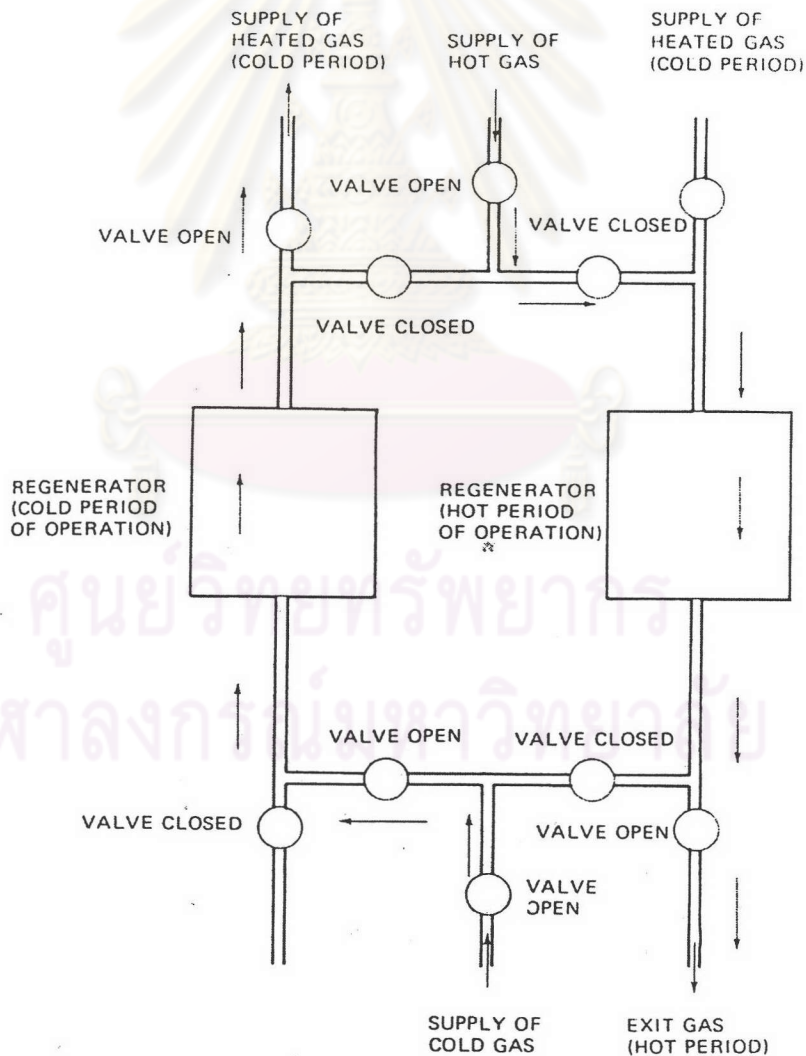


### บทที่ 3

### ทฤษฎี

#### 3.1 ความรู้พื้นฐานของรีเจเนอเรเตอร์ (Regenerator Fundamentals)

Thermal Regenerator หรือ Regenerative Heat Exchanger เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด (ส่วนมากเป็น ก๊าซ) โดยมีโครงร่างของวัสดุที่เป็นของแข็ง (checkerwork) เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน การทำงานของรีเจเนอเรเตอร์ จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเรียกว่า ช่วงสะสมความร้อน (heating period) และช่วงคายความร้อน (cooling period)



รูปที่ 3.1 Fixed two – bed regenerator system (Schmidt and Willmott, 1981)

ในช่วงสะสมความร้อน (heating period) ก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะไหลผ่านโครงร่างของตัวกลางซึ่งเป็นของแข็งด้วยอัตราการไหลและอุณหภูมิค่าหนึ่ง พร้อมกับถ่ายเทความร้อนให้กับตัวกลางสะสมได้เป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นในช่วงปลายของคาบ (period) จึงทำการกลับทิศ (reversal) เพื่อเข้าสู่ช่วงคายความร้อน (cooling period) โดยการตัดการไหลของก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงดังกล่าว แล้วสลับให้ก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่านตัวกลางดังกล่าวแทนในทิศสวนทางกับการไหลของก๊าซในช่วงสะสมความร้อน (heating period) ความร้อนที่สะสมในตัวกลางจึงถ่ายเทไปสู่ก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำดังกล่าว เมื่อเวลาผ่านไปสักระยะหนึ่งจึงทำการกลับทิศเพื่อเข้าสู่ช่วงสะสมความร้อน (heating period) อีกครั้ง แล้วดำเนินการเป็นวัฏจักรเช่นนี้ไปจนจบการทำงาน

การควบคุมการทำงานของรีเจเนอเรเตอร์ จะใช้วาล์วในการ เปิด - ปิด การไหลของอากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ และก๊าซเสียจากการเผาไหม้ โดยสลับให้ของไหลทั้ง 2 ไหลผ่านรีเจเนอเรเตอร์ ทั้งซ้ายและขวาตามลำดับดังนี้ เปิด - ปิด วาล์ว ให้ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงไหลเข้ารีเจเนอเรเตอร์ทางด้านขวา ในขณะที่เดียวกันให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำไหลเข้ารีเจเนอเรเตอร์ทางด้านซ้าย เมื่อใช้เวลาระยะหนึ่งจึงสลับให้ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงไหลเข้ารีเจเนอเรเตอร์ทางด้านซ้าย แล้วให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำไหลผ่านรีเจเนอเรเตอร์ ทางด้านขวา ทำเช่นนี้เป็นวัฏจักร โดยเมื่อก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงไหลเข้ารีเจเนอเรเตอร์ ความร้อนก็จะถ่ายเทและสะสมไว้ในรีเจเนอเรเตอร์ จากนั้นเมื่ออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่านความร้อนที่สะสมอยู่ในรีเจเนอเรเตอร์ ก็จะถ่ายเทมาสู่อากาศซึ่งเป็นการทำให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรีเจเนอเรเตอร์

รีเจเนอเรเตอร์ที่ทำการวิจัยประกอบขึ้นจากโครงอิฐทนไฟก่อเรียงเป็นปล่องไฟสี่เหลี่ยมรวมทั้งผนังที่ล้อมรอบอิฐทนไฟจะทำหน้าที่สะสมและถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด ที่ไหลผ่าน

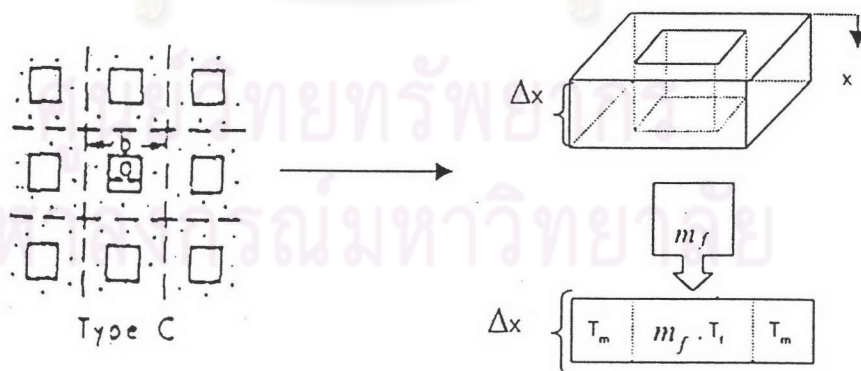
Willmott (1964) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟและของไหลที่ไหลผ่านรีเจเนอเรเตอร์

ของไหลจะไหลผ่านโครงอิฐทนไฟโดยมีสมมติฐานดังนี้

1. ไม่คำนึงถึงผลจากการนำความร้อนของอิฐทนไฟ และของไหลในทิศทางการไหลของของไหล
2. ไม่คำนึงถึงผลจากการผสมกันของของไหลเก่าที่เหลืออยู่ในรีเจเนอเรเตอร์ กับของไหลใหม่ที่เข้ามาแทนที่ในทิศทางตรงกันข้ามเมื่อเริ่มสลับทิศทางการไหล
3. ในแต่ละคาบอัตราการไหลโดยมวลของของไหลทั้ง 2 ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4. อุณหภูมิของอากาศร้อน และอากาศเย็นที่ไหลเข้ารีเจเนอเรเตอร์ครั้งที่ 2 คาบ (heating / cooling)
5. การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับอิฐทนไฟสามารถแทนได้ด้วยเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient) ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหลและอุณหภูมิเฉลี่ยของโครงอิฐทนไฟ
6. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และคุณสมบัติทางความร้อนของอิฐทนไฟ และของไหลไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละคาบ และยังมีค่าเท่ากันในทุกส่วนของรีเจเนอเรเตอร์ในคาบนั้นๆ
7. ไม่คำนึงถึงความร้อนที่ถ่ายเทออกทางด้านข้าง ด้านบน และด้านล่าง ของ Storage Unit
8. ของไหลมีความเร็วคงที่ และเป็นเอกกรูป (uniform flow)
9. อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟ และของไหล เปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นเมื่อเทียบกับเวลา

จากสมมติฐานที่กล่าวมาจึงเลือกใช้ปริมาตรควบคุม (control volume) โดยพิจารณารูปที่ 3.2 เป็นภาพตัดขวางใด ๆ ของรีเจเนอเรเตอร์ ซึ่งแบ่งช่องการไหลของของไหลเป็นส่วนเล็ก ๆ ขนาดเท่ากันให้มีความสมมาตรตามแนวเส้นประ (ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านเส้นประ) ส่วนที่กั้นระหว่างช่องต่าง ๆ คือเนื้ออิฐทนไฟโดย  $a$  คือความกว้างของช่องการไหลของของไหลรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ  $b$  คือความกว้างของ element รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความลึก  $\Delta x$  เมตร เมื่อรีเจเนอเรเตอร์มีความยาว  $L$  เมตร จะมีจำนวนปริมาตรควบคุมรวม  $L/\Delta x$  ส่วน ต่อ 1 ช่องการไหล



รูปที่ 3.2 ปริมาตรควบคุมของโครงอิฐทนไฟ

### 3.2.1 สมการเชิงอนุพันธ์ (The Differential Equations)

จากปริมาณควบคุมในรูปที่ 3.2 เนื่องจากแต่ละช่องมีความสมมาตรกันจึงพิจารณาช่องการไหลใด ๆ เพียง 1 ช่อง เพื่อเป็นต้นแบบ ดังนั้นจะได้สมการสมดุลทางความร้อนที่ต้องพิจารณา 2 สมการ คือ

1. สมการสมดุลทางความร้อนของของไหล คือ สมการเชิงอนุพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับของไหลร้อน (heating period) หรือ ของไหลเย็น (cooling period) กับอัตราการถ่ายเทและสะสมความร้อนในของไหลร้อนหรือของไหลเย็น (Schmidt and Willmott, 1981)

$$\frac{hA\Delta x}{L}(t_m - t_f) + \dot{m}_f c_f t_f \Big|_x = \dot{m}_f c_f t_f \Big|_{x+\Delta x} + m_f c_f \Delta x \frac{\partial t_f}{\partial \tau} \quad (3.1)$$

จาก Taylor series expansion

$$t_f \Big|_{x+\Delta x} = t_f \Big|_x + \frac{\partial t_f}{\partial x} \Delta x$$

แทนค่าลงในสมการ (3.1) จะได้

$$hA(t_m - t_f) = \dot{m}_f c_f L \frac{\partial t_f}{\partial x} + m_f c_f \frac{\partial t_f}{\partial \tau} \quad (3.2)$$

โดย  $h$  คือ heat transfer coefficient ( $W / m^2 K$ )

$x$  คือ ระยะความยาวของโครงอิฐทนไฟ โดยวัดไปในทิศทางเดียวกันกับการไหลของของไหลในคานนั้น ๆ (m)

2. สมการสมดุลทางความร้อนของของแข็ง คือ สมการเชิงอนุพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับของไหลร้อน (heating period) หรืออากาศที่ช่วยในการเผาไหม้ (cooling period) กับอัตราการถ่ายเท และสะสมความร้อนในโครงอิฐทนไฟ

$$hA(t_f - t_m) = M_m c_m \frac{\partial t_m}{\partial \tau} \quad (3.3)$$

โดย  $M_m$  คือ มวลของวัสดุสะสมความร้อน (kg)

เพื่อความสะดวกในการคำนวณเชิงแปลงสมการ (3.2) และ (3.3) ให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ (dimensionless variable) โดยกำหนดพารามิเตอร์ไร้มิติ (dimensionless parameter) ดังนี้ (Schmidt and Willmott, 1981)

$$\xi = \frac{hAx}{m_f c_f L} \quad (3.4) \text{ พารามิเตอร์ไร้มิติทางระยะทาง}$$

$$\eta = \frac{hA}{M_m c_m} \left( \tau - \frac{m_f x}{m_f L} \right) \quad (3.5) \text{ พารามิเตอร์ไร้มิติทางเวลา}$$

และตัวแปรไร้มิติดังนี้

$$T_f = \frac{t_f - t_f''}{t_f' - t_f''} \quad (3.6) \text{ ตัวแปรไร้มิติของอุณหภูมิของของไหล}$$

$$T_m = \frac{t_m - t_f''}{t_f' - t_f''} \quad (3.7) \text{ ตัวแปรไร้มิติของอุณหภูมิของของแข็ง}$$

จากสมการ (3.4), (3.5), (3.6) และ (3.7) จะได้สมการ (3.2) และ (3.3) อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ คือ

$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = T_m - T_f \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial \eta} = T_f - T_m \quad (3.9)$$

นอกจากนั้นพารามิเตอร์ไร้มิติในสมการ (3.4) และ (3.5) ยังทำให้เกิดกลุ่มของพารามิเตอร์ไร้มิติ (dimensionless group) อีก 2 กลุ่ม ดังนี้

เมื่อ  $x = L$  และ  $\tau = P$  จะได้

$$\Lambda = \frac{hA}{m_f c_f} = \text{"Reduced Length"} \quad (3.10)$$

$$\Pi = \frac{hA}{M_m c_m} \left( P - \frac{m_f}{m_f} \right) = \text{"Reduced Period"} \quad (3.11)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ (3.8) และ (3.9) เมื่ออินทิเกรตแล้วใช้การประมาณค่าอินทิกรัลด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟกับของไหลร้อน หรือของไหลเย็นที่เวลาใด ๆ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้

### 3.2.2 เงื่อนไขขอบ (Boundary Condition)

จากสมการเชิงอนุพันธ์ทั้ง 2 สมการดังกล่าว มีเงื่อนไขขอบ 2 เงื่อนไข คือ

1. อุณหภูมิของของไหลเย็นและของไหลร้อนที่ไหลเข้ารีเจเนอเรเตอร์ คงที่ทั้ง 2 คาบ (heating / cooling)
2. อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อสิ้นสุดคาบใด ๆ (heating / cooling) จะเท่ากันกับเมื่อเริ่มต้นคาบถัดไป

### 3.2.3 Cyclic Equilibrium

วัฏจักรการทำงาน 1 รอบของรีเจเนอเรเตอร์ ประกอบด้วยคาบหนึ่ง (heating / cooling) ตามด้วยอีกคาบหนึ่ง (cooling / heating) ในแต่ละคาบจะมีค่า Reduced Length ( $\Lambda$ ), Reduced Period ( $\Pi$ ) และอุณหภูมิของของไหลขาเข้าคงที่ เป็นของตัวเองหลังจากรีเจเนอเรเตอร์ทำงานเป็นวัฏจักรไปเป็นเวลานานหนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์ข้างต้น จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟที่เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นอีกต่อไป ซึ่งเรียกสภาวะเช่นนี้ว่า "Cyclic Equilibrium" นั่นคือผลลัพธ์ดังกล่าวจะเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ไม่ว่าจะทำงานต่อไปเป็นเวลานานเท่าใด การเข้าสู่ "Cyclic Equilibrium" หรือจะไม่พิจารณาจากการคำนวณ Pseudo – Thermal Ratio เมื่อสิ้นสุดคาบของการคายความร้อน (cooling period) ดังนี้

$$\Phi(n) = \frac{t_{fo}'' - t_{fi}'}{t_{fi}' - t_{fi}''} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $\Phi(n) - \Phi(n-1)$  หรืออีกแง่หนึ่ง คือผลต่างอุณหภูมิของของไหลขาออกของคาบการคายความร้อน (cooling period) น้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ วัฏจักรที่  $n$  จะถือว่าเข้าสู่ Cyclic Equilibrium และจะสามารถคำนวณค่า Thermal Ratio,  $\eta_{REG}$  ทั้ง 2 คาบได้จาก (Willmott, 1964)

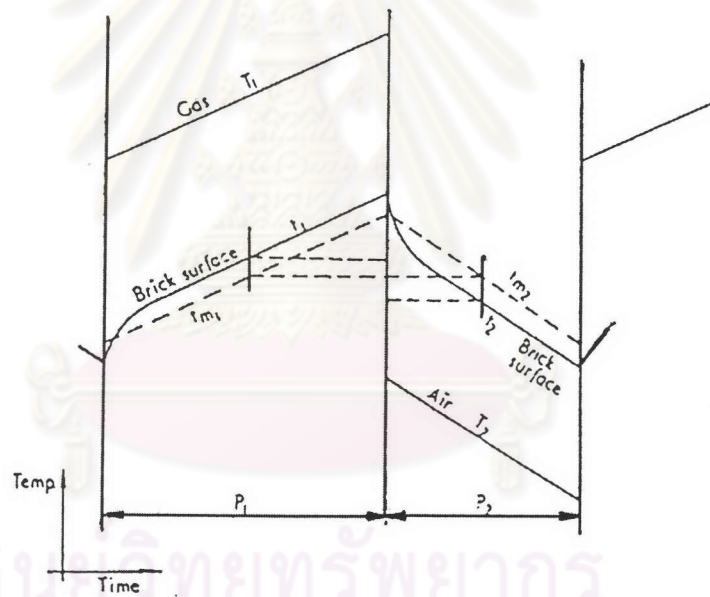
$$\eta_{REG}' = \frac{t_{fi}' - t_{fo}'}{t_{fi}' - t_{fi}''} = 1 - T_{fo}' \quad \text{สำหรับ Heating Period} \quad (3.13)$$

$$\eta_{REG}'' = \frac{t_{fo}'' - t_{fi}''}{t_{fi}' - t_{fi}''} = T_{fo}'' \quad \text{สำหรับ Cooling Period} \quad (3.14)$$

โดยค่า Thermal Ratio เหล่านี้จะเป็นตัววัดว่า รีเจเนอเรเตอร์ ทำงานมีประสิทธิภาพหรือไม่

### 3.2.4 Modified Heat transfer coefficient

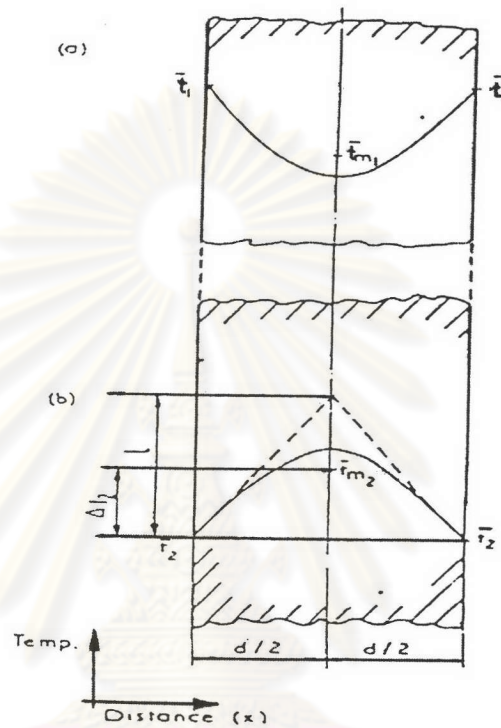
ในรีเจเนอเรเตอร์ที่ทำมาจากโลหะ ณ ตำแหน่ง เวลา หรือ คาบเวลา ใด ๆ สามารถพิจารณาให้มีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ (uniform temperature) ภายในเนื้อโลหะได้ ในกรณีนี้ผลจากความต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับโลหะจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของโลหะ จึงพิจารณาการถ่ายเทความร้อนเฉพาะการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น โดยอุณหภูมิภายในโลหะและที่ผิวโลหะจะเป็นค่าเดียวกัน แต่สำหรับรีเจเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟที่มีส่วนของเนื้ออิฐในการสะสมความร้อนค่อนข้างหนา และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งภายในและที่ผิวของอิฐทนไฟจะมีความสำคัญพอๆกัน Schofield , Yong และ Butterfield (1961) ได้กล่าวถึงการใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับกรณีนี้ว่า



รูปที่ 3.3 แสดงอุณหภูมิของอิฐทนไฟและของไหลที่หน้าตัดใด ๆ ของรีเจเนอเรเตอร์ กับ เวลา

จากรูปที่ 3.3 อุณหภูมิของของไหลกับอิฐทนไฟจะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งและเวลา ในช่วงสะสมความร้อน ( $P_1$ ) อุณหภูมิของของไหลร้อน ( $T_1$ ) จะสูงกว่าอุณหภูมิของอิฐทนไฟ ( $t_1$ ) รวมถึงอุณหภูมิเฉลี่ยตามเวลาของอิฐทนไฟ ( $t_m$ ) ด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของไหลร้อน กับ เวลา เป็นแบบเชิงเส้น (linear) ยกเว้นช่วงแรกของคาบ แต่ก็จะกลับเข้าสู่ความเป็นเชิงเส้นอีกครั้งอย่างรวดเร็ว และในช่วงคายความร้อน ( $P_2$ ) ก็เป็นเช่นเดียวกันกับช่วงสะสมความร้อน การกระจายอุณหภูมิของอิฐทนไฟในช่วงสะสมความร้อน ( $P_1$ ) สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.4 (a) ส่วนช่วงคายความร้อน ( $P_2$ ) แสดงในรูป 3.4 (b)

ซึ่งรูปจะกลับกัน โดยในช่วงต่อระหว่างช่วงสะสมความร้อน และคายความร้อน รูปแบบการกระจายจะมีการเปลี่ยนเว้าเพื่อเข้าสู่อีกรูปแบบหนึ่ง จึงสามารถสมมติได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับเวลาเป็นแบบเชิงเส้น (linear)



- a Heating, on gas  
b Cooling, on blast

รูปที่ 3.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเนื้ออิฐทนไฟที่เวลาใด ๆ

เมื่อพิจารณาแผ่นระนาบใด ๆ ที่ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน สมการของการนำความร้อน (heat conduction equation) จะอยู่ในรูป

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (3.15)$$

โดย  $\tau$  คือ เวลา (s)

$x$  คือ ระยะพิกัด  $x$  ตามรูปที่ 3.4 (m)

$\alpha$  คือ Thermal Diffusivity ของอิฐทนไฟ ( $\text{m}^2 / \text{s}$ )

$t$  คือ อุณหภูมิของอิฐทนไฟเฉลี่ยตามเวลา ( $^{\circ}\text{C}$ )



ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับเวลาเป็นแบบเชิงเส้น (linear) จะได้ว่า

$\frac{\partial t}{\partial \tau} =$  ค่าคงที่ ดังนั้นทำให้  $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} =$  ค่าคงที่ด้วย นั้นหมายความว่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอิฐทนไฟกับพิกัด  $x$  เป็นแบบพาราโบลา

ดังนั้นจากการใช้อุณหภูมิของโครงอิฐทนไฟเป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละหน้าตัด (cross section) ที่เวลาใด ๆ ( $\bar{t}_m$ ) เมื่อต้องการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับของไหล ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจึงต้องมีการปรับปรุงให้สามารถนำมาใช้กับอุณหภูมิเฉลี่ยของอิฐทนไฟได้ดังสมการต่อไปนี้ (Schofield, Butterfield and Young, 1961)

$$\frac{1}{\bar{h}} = \frac{1}{h_s} + \phi_1 \frac{w}{3k} \quad (3.16)$$

โดย  $\bar{h}$  คือ Modified Heat Transfer Coefficient ( $W / m^2 K$ )

$h_s$  คือ Surface Heat Transfer Coefficient ( $W / m^2 K$ )

$w$  คือ Semi - Thickness (m)

$k$  คือ Conductivity ( $W / m K$ )

$\phi_1$  คือ ค่าเฉลี่ยผลของการเบี่ยงเบนการกระจายอุณหภูมิในอิฐทนไฟไปจากรูปพาราโบลา ระหว่าง Reversal Effect

เพื่อให้ใช้ค่า Modified Heat Transfer Coefficient นี้ได้ตลอดช่วงของการพิจารณาสามารถหาได้ดังนี้ (Schmidt and Willmott, 1981)

$$\text{เมื่อ } \frac{w^2}{\alpha_m} \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) \leq 5$$

$$\phi = 1 - \frac{w^2}{15\alpha_m} \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) \quad (3.17)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{w^2}{\alpha_m} \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) > 5$$

$$\phi = \frac{2.142}{\sqrt{0.3 + \frac{4w^2 \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right)}{2\alpha_m}}} \quad (3.18)$$

พจน์  $\phi_1 \frac{w}{3k}$  คือ ค่าความต้านทานเฉลี่ยของการถ่ายเทความร้อนภายในอิฐทนไฟ โดยที่ค่า  $\frac{w}{3k}$  หาได้จากการประมาณการกระจายอุณหภูมิภายในอิฐทนไฟที่เป็นรูปพาราโบลาเป็นค่าเฉลี่ย  $\bar{t}_{m_2}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (b)

อัตราการความร้อนที่ถ่ายเทจากภายในอิฐสู่ผนัง = อัตราความร้อนจากการพาความร้อน

$$\frac{Q}{P} = -kA_s \left( \frac{\partial t}{\partial kP} \right)_{x=0} \Rightarrow \frac{Q}{A_s} \left( \frac{d}{2kP} \right) = \frac{d}{2} \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0}$$

เนื่องจากความสูงของพาราโบลาคือ  $\frac{l}{2}$  และ ระยะ  $\Delta t_2$  (เท่ากับความสูงของ  $\bar{t}_{m_2}$ ) มีค่าเป็น 2 ใน 3 ของความสูงพาราโบลา จะได้

$$\Delta t_2 = \bar{t}_{m_2} - \bar{t}_2 = \frac{2}{3} \left( \frac{l}{2} \right) = \frac{l}{3} \Rightarrow l = 3(\bar{t}_{m_2} - \bar{t}_2)$$

$$\left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{l}{\left( \frac{d}{2} \right)} = \frac{3(\bar{t}_{m_2} - \bar{t}_2)}{\left( \frac{d}{2} \right)}$$

แทนค่ากลับจะได้

$$(\bar{t}_{m_2} - \bar{t}_2) = \frac{Q}{A_s} \left( \frac{d}{6kP} \right)$$

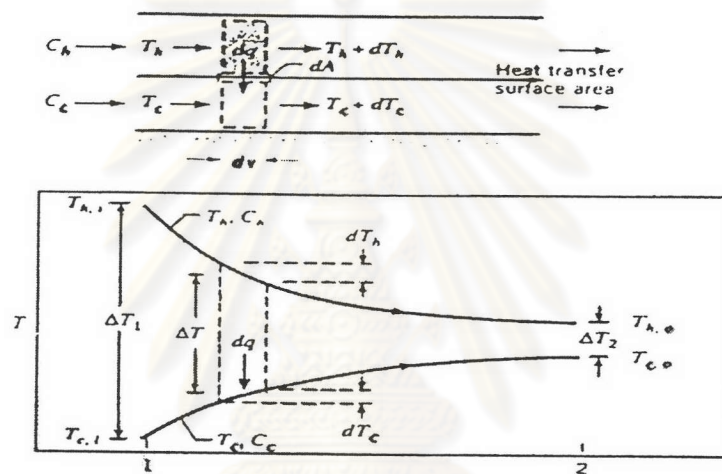
ในที่นี้  $A_s$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนจากรูปที่ 3.4 จะมี 2 ด้าน เมื่อนำมาใช้กับปริมาตรควบคุม (control volume) ในรูปที่ 3.2 พื้นที่การถ่ายเทความร้อนจะมีเพียง 1 ด้าน ดังนั้น

$$(\bar{t}_{m_2} - \bar{t}_2) = \frac{Q}{A_s} \left( \frac{d}{3kP} \right)$$

จะได้ว่า  $\left( \frac{d}{3k} \right)$  คือ Internal Thermal Resistant ( $d = w = \text{Semi-Thickness}$ )

### 3.3 Logarithmic Mean Temperature Difference

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบขนานกัน (parallel-flow) ที่มีของไหล 2 ชนิด คือ ของไหลร้อน (hot fluid) และของไหลเย็น (cold fluid) ตลอดหน้าสัมผัสของการถ่ายเทความร้อนจะมีการกระจายอุณหภูมิของของไหลทั้ง 2 ชนิด โดยที่ทางเข้าของช่องการไหล ความต่างของอุณหภูมิทั้ง 2 จะมากและจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะ  $x$  เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของของไหลเย็นจะไม่มีทางมากกว่าอุณหภูมิของของไหลร้อน



รูปที่ 3.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลแบบขนานกัน

(Incropera and Dewitt, 1996)

รูปที่ 3.5 ตัวห้อย 1 และ 2 หมายถึงทางเข้าและทางออกของช่องการไหลตามลำดับ โดยสมมูลพลังงานของปริมาตรควบคุม (เส้นประ) และการวิเคราะห์ที่ตั้งอยู่บนสมมติฐานดังนี้

1. มีการหุ้มฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อมจนมีการถ่ายเทความร้อน จนมีการถ่ายเทความร้อนเฉพาะกับของไหลร้อนและของไหลเย็น
2. ไม่คำนึงถึงการนำความร้อนตามทิศทางการไหลของของไหล
3. ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์
4. ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหลมีค่าคงที่
5. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าคงที่

จึงสามารถเขียนสมการแสดงการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

$$Q = UA\Delta t_{lm} \quad (3.19)$$

โดย  $Q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

$U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $\text{W/m}^2 \text{K}$ )

$A$  คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน ( $\text{m}^2$ )

$\Delta t_{lm}$  คือ Logarithmic Mean Temperature Difference (K)

$$\Delta t_{lm} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln \frac{\theta_2}{\theta_1}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \quad (3.20)$$

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปแบบการไหลแบบขนานกัน

$$\theta_1 = t_{h,1} - t_{c,1} = t_{h,i} - t_{c,i} \quad \text{สำหรับทางเข้า}$$

$$\theta_2 = t_{h,2} - t_{c,2} = t_{h,o} - t_{c,o} \quad \text{สำหรับทางออก}$$

### 3.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนมักเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ระหว่างตัวกลางชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกันก็ได้ ในกรณีของรีเจเนอเรเตอร์เนื่องจากพื้นผิวภายนอกเป็นอิฐทนไฟถึง 3 ชั้น ทำให้อุณหภูมิผิวภายนอกไม่ต่างจากสิ่งแวดล้อมมากนัก เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายในรีเจเนอเรเตอร์จึงถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวภายนอกนี้ ดังนั้นในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของรีเจเนอเรเตอร์ จะพิจารณาเฉพาะภายในโครงอิฐทนไฟ (storage unit) ที่มีอุณหภูมิสูงเป็นหลักซึ่งแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน

#### 3.4.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

เป็นการถ่ายเทพลังงานจากการปฏิสัมพันธ์กันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปสู่อนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าที่อยู่ติดกัน การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลว และ

ก๊าซ ในกรณีของแข็งการนำความร้อนเกินจากการสั่นของโมเลกุลในโครงร่างผลึกของตัวกลาง พลังงานดังกล่าวจะถูกถ่ายเทโดยอิเล็กตรอนอิสระ ส่วนกรณีของเหลว และก๊าซ การนำความร้อนจะเกิดจากการชนและการแพร่ของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ไปมา อัตราการนำความร้อนผ่านตัวกลางขึ้นอยู่กับรูปร่าง ความหนา และชนิดของตัวกลาง รวมทั้งความแตกต่างของอุณหภูมิด้วย ตามกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's law of conduction) ซึ่งมีรูปเป็น

$$\dot{Q} = -kA \frac{dt}{dx} \quad (3.21)$$

โดย  $\dot{Q}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน (W)

$k$  คือ ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง (W/m K)

$A$  คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ( $m^2$ )

$\frac{dt}{dx}$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิต่อระยะทางที่ความร้อนไหลผ่าน (K/m)

เครื่องหมายลบมีเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกในทิศทางของ  $x$

### 3.4.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

เป็นรูปแบบการถ่ายเทพลังงานระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหล (ของเหลว หรือก๊าซ) ที่อยู่ติดกัน และเกี่ยวข้องกับการนำความร้อนรวมถึงการเคลื่อนที่ของของไหลด้วย ของไหลที่เคลื่อนที่เร็วกว่า จะพาความร้อนได้ดีกว่า ส่วนของไหลที่อยู่นิ่งจะมีเพียงการนำความร้อนเท่านั้นตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปเป็น

$$\dot{Q}_{conv} = hA(t_s - t_\alpha) \quad (3.22)$$

โดย  $\dot{Q}_{conv}$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อน (W)

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2 K$ )

$A$  คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน ( $m^2$ )

$t_s$  คือ อุณหภูมิพื้นผิว (เท่ากับอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ติดกัน) (K)

$t_\alpha$  คือ อุณหภูมิของของไหล ณ ตำแหน่งห่างจากพื้นผิวไกลออกไป (K)

ในรีเจเนอเรเตอร์ที่ทำการวิจัยการพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวอิฐทนไฟกับก๊าซเสียหรืออากาศจะเป็นแบบบังคับ (forced convection) มีพัดลมเป็นตัวขับเคลื่อน และเป็นการไหลภายในท่อ (internal flow) โดยสัมพันธ์กับการพาความร้อน ( $h$ ) ขึ้นอยู่กับรูปแบบการพาความร้อนตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพของระบบดังนี้

- รูปแบบการไหลในท่อ (Flow Regimes in a Tube)

การไหลในท่อสามารถเป็นไปได้อีกทั้ง 2 แบบ คือ แบบราบเรียบ (laminar) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) โดยถูกกำหนดด้วยเรย์โนลด์นัมเบอร์ (reynold number) ดังนี้ (Cengel, 1998)

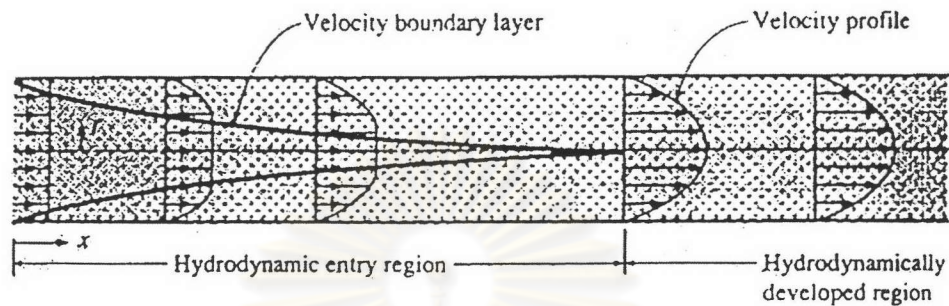
$$Re = \frac{v_m D_h}{\nu} = \frac{\dot{m} D_h}{A_c \mu} \quad (3.23)$$

โดย	Re	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ เมื่อ	Re < 2,300 Laminar flow
			2,300 ≤ Re ≤ 4,000 Transition to turbulence
			Re > 4,000 Turbulent flow
	$v_m$	คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)	
	$D_h$	คือ เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)	
	$\nu$	คือ ความหนืดคินแมติกส์ (m <sup>2</sup> /s)	
	$A_c$	คือ พื้นที่หน้าตัดการไหล (m <sup>2</sup> )	
	$\mu$	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ (kg/m-s)	

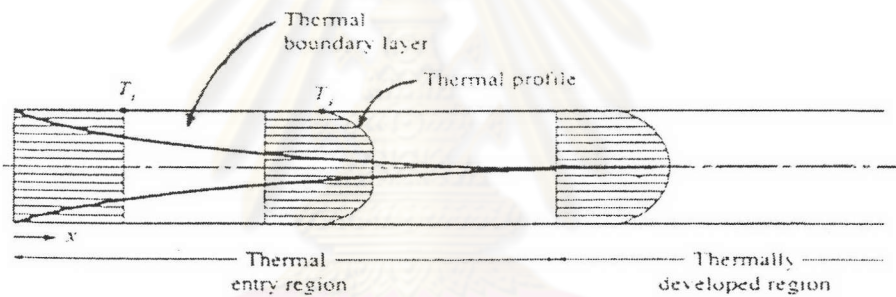
- Hydrodynamic and Thermal Entry Lengths

พิจารณาของไหลที่ไหลในท่อ อนุภาคของของไหลในชั้นที่ติดกับพื้นผิวท่อจะหยุดนิ่ง ซึ่งจะทำให้อนุภาคของของไหลในชั้นถัดถัดไปเคลื่อนไหวช้าลงจากแรงเสียดทาน เพื่อเป็นการชดเชยความเร็วที่ลดลง ความเร็วของของไหลตรงกลางท่อต้องเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลโดยมวลที่คงที่ จึงเกิด Velocity Boundary Layer ขึ้นตลอดความยาวท่อ ความหนาของชั้นบาวดารีเลเยอร์ (boundary layer) จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามทิศทางการไหล จนมาบรรจบกันตรงกลางของท่อ ดังรูปที่ 3.6 พื้นที่จากทางเข้าของท่อจนถึงจุดที่ชั้นบาวดารีเลเยอร์มาบรรจบกันเรียกว่า Hydrodynamic Entry Length ( $L_h$ ) ส่วนพื้นที่เลยจากนี้ไปซึ่งโปรไฟล์ความเร็ว (velocity profile) พัฒนาเต็มที่ และไม่เปลี่ยนแปลงอีกเรียกว่า

Hydrodynamic Developed Region โดยโปรไฟล์ความเร็วในพื้นที่นี้เป็นรูปโค้งแบบพาราโบลา สำหรับการไหลแบบลามินาร์ แต่จะแบนราบกว่าสำหรับการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์



รูปที่ 3.6 แสดงการพัฒนาของ Velocity Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ



รูปที่ 3.7 การพัฒนาของ Thermal Boundary Layer ของของไหลที่ไหลภายในท่อ

(Cengel, 1998)

เมื่อพิจารณาของไหลที่มีอุณหภูมิคงที่แบบเอกรูป (uniform) ไหลเข้าท่อที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิของของไหลในชั้นที่ติดกับพื้นผิวท่อจะถือว่ามีความแตกต่าง ซึ่งเป็นการเริ่มต้นการพาความร้อนในท่อและการพัฒนา Thermal Boundary Layer ไปตามท่อ โดยความหนาของชั้นบาวดารีเลเยอร์นี้จะเพิ่มขึ้นตามทิศทางการไหลจนมาบรรจบกันที่กลางท่อ ดังรูปที่ 3.7 พื้นที่จากที่มีการไหล และ Thermal Boundary Layer พัฒนาขึ้นจนจุดที่ชั้นบาวดารีเลเยอร์มาบรรจบกันเรียกว่า Thermal Entry Region และความยาวของพื้นที่นี้เรียกว่า Thermal Entry Length ( $L_t$ ) ส่วนพื้นที่ที่เหลือจากนี้ไปซึ่งโปรไฟล์ของ Dimensionless Temperature  $\left(\frac{t-t_s}{t_m-t_s}\right)$  คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงอีกเรียกว่า Thermally Developed Region พื้นที่ทั้งที่เป็น Hydrodynamically และ Thermally Developed จะเรียกว่า "Fully Developed Flow"

ในกรณีของการไหลแบบลามินาร์ค่าพรานด์เติลนัมเบอร์ (Prandtl number) จะเป็นตัววัดความสัมพันธ์กันของการพัฒนาความเร็ว และ Thermal Boundary Layer โดยของไหลที่เป็นก๊าซ ( $Pr = 1$ ) ชั้นบาวดาร์เลเยอร์ทั้งสองชนิดจะพัฒนาไปพร้อม ๆ กัน และสามารถประมาณ Hydrodynamic กับ Thermal Entry Length ได้ดังนี้ (Cengel, 1998:377)

$$\begin{aligned} L_{h,laminar} &\approx 0.05 Re D_h \\ L_{t,laminar} &\approx 0.05 Re Pr D_h \end{aligned} \quad (3.24)$$

ในกรณีของการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ ค่า Hydrodynamic กับ Thermal Entry Length จะไม่ขึ้นอยู่กับ Re และ Pr จึงได้ว่า

$$L_{h,turbulent} \approx L_{t,turbulent} \approx 10 D_h \quad (3.25)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดความยาวท่อ ( $\bar{h}_{conv}$ ) หาได้จากสมการ

$$\bar{h}_{conv} = \frac{\bar{N}_{u_{D_h}} k}{D_h} \quad (3.26)$$

โดย  $\bar{h}_{conv}$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตลอดความยาวท่อ ( $W/m^2 K$ )

$D_h$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

$k$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล ( $W/m K$ )

$\bar{N}_{u_{D_h}}$  คือ ค่านัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยตลอดความยาวท่อ

สำหรับการไหลแบบลามินาร์หลังจากพิจารณาความยาวของท่อแล้วพบว่าสั้นกว่า  $L_h$  และ  $L_t$  รวมทั้งไม่มีความยาวท่อส่วนที่มีอุณหภูมิเท่ากับของไหลที่ไหลผ่าน (Unheated Starting Length) นอกจากนั้นยังไม่ใช่ของไหลที่มีค่า  $Pr \gg 1$

เมื่อ  $\left[ \left( \frac{Re_{D_h} Pr}{L/D_h} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \right] \geq 2$  ท่อที่พิจารณาจะอยู่ในช่วงของ Combined Entry Length

(Thermal and Velocity) ,  $t_s =$  ค่าคงที่ ,  $0.48 < Pr < 16,700$  และ  $0.0044 < \frac{\mu}{\mu_s} < 9.75$

(Incropera and Dewitt. 1996:443-444)

$$\bar{N}_{u_{D_h}} = 1.86 \left( \frac{Re_{D_h} Pr}{L/D_h} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (3.27)$$



เมื่อ  $\left[\left(\frac{Re_{D_h} Pr}{L/D_h}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14}\right] < 2$  และ  $t_s$  = ค่าคงที่ พื้นที่ส่วนใหญ่ของท่อจะมีการไหลแบบ

Fully Developed

$$\overline{Nu}_{D_h} = 2.98 \quad (3.28)$$

คุณสมบัติทุกอย่างที่ปรากฏในสมการหาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล ( $\bar{t}_f$ ) ยกเว้น  $\mu_s$  หาได้ที่อุณหภูมิผิวท่อ

สำหรับการไหลแบบเทอร์วิวเลนที่ที่คุณสมบัติต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงมาก สมการที่ใช้ต้องมีการประมาณที่ดี และสามารถใช้ได้กับสภาพ Uniform surface Temperature และ Uniform Heat Flux ดังนี้ (Incropera and Dewitt, 1996:445)

เมื่อ  $(0.7 \leq Pr \leq 16,700)$ ,  $(Re \geq 10,000)$ ,  $\left(\frac{L}{D_h} \geq 10\right)$

$$\overline{Nu}_{D_h} = 0.027 Re_{D_h}^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (3.29)$$

คุณสมบัติทุกอย่างที่ปรากฏในสมการหาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล ( $\bar{t}_f$ ) ยกเว้น  $\mu_s$  หาได้ที่อุณหภูมิผิวท่อ และสามารถใช้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์เมื่อ  $2,300 \leq Re \leq 4,000$  ได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ Re เข้าใกล้ 4,000

### 3.8 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

การถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนเป็นการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง พลังงานความร้อนที่เคลื่อนที่โดยการแผ่รังสีความร้อนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านที่ต่าง ๆ ได้แม้กระทั่งในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เช่น การเคลื่อนที่ของความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นต่าง ๆ ของอวกาศเป็นระยะทางนับเป็นล้าน ๆ กิโลเมตร เป็นต้น

จากกฎของสเตฟาน – โบลทซ์มันน์ (Stefan – Boltzmann Law) สมการแสดงอัตราการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวใด ๆ กับสิ่งแวดล้อม คือ

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A (t_s^4 - t_\infty^4) \quad (3.30)$$

โดย	$\dot{Q}_{rad}$	คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อน (W)
	$\varepsilon$	คือ ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิว $0 \leq \varepsilon \leq 1$
	$\sigma$	คือ ค่าคงที่สเตฟาน - โบลทซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
	$A$	คือ พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี ( $\text{m}^2$ )
	$t_s$	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของพื้นผิว (K)
	$t_\infty$	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของสิ่งแวดล้อม (K)

การแผ่รังสีความร้อนในรีเจเนอเรเตอร์เป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศ (cooling period) หรือก๊าซเสีย (heater period) กับพื้นผิวโครงอิฐทนไฟ องค์ประกอบในอากาศ และก๊าซเสียที่เป็นหลักในการดูดซับหรือคายพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีคือ ก๊าซชนิดต่าง ๆ นั้นเอง แต่ที่มีคุณสมบัติโดดเด่นเป็น Polar Molecules มีขอบเขตของอุณหภูมิในการดูดซับหรือคายพลังงานกว้าง และมีปริมาณมากคือ ไอน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ )<sub>g</sub> และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ )

สมการ Heat Flux ของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับอากาศ หรือก๊าซเสียจึงมีค่าเท่ากับ (Schmidt and Willmott, 1981:164-166)

$$Q_{rad} = \sigma \left( \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \right) (\varepsilon_g t_f^4 - \alpha_g t_s^4) \quad (3.31)$$

รูปแบบของสมการ Heat Flux นี้ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) เพื่อความสะดวกสามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้น (linear) โดยใช้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเทียบเท่า (equivalent radiative heat transfer coefficient,  $h_{rad}$ ) จะได้

$$Q_{rad} = h_{rad} (t_f - t_s) \quad (3.32)$$

โดย	$Q_{rad}$	คือ ปริมาณ Heat Flux ของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างโครงอิฐทนไฟกับอากาศ หรือก๊าซเสีย ( $\text{W/m}^2$ )
	$h_{rad}$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเทียบเท่า ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเทียบเท่าเป็นค่าประมาณของการเฉลี่ย สามารถใช้ได้ตลอดทั้งคาบสำหรับการจำลองการทำงานของรีเจเนอเรเตอร์โดยใช้ Linear Model หาได้จาก

$$h_{rad} = \sigma \left( \frac{\varepsilon_s + 1}{2} \right) \left( \frac{\varepsilon_g t_f^4 - \alpha_g t_s^4}{t_f - t_s} \right) \quad (3.33)$$

โดย	$\sigma$	คือ ค่าคงที่สเตฟาน - โบลทซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
	$\varepsilon_s$	คือ ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิวอิฐทนไฟ
	$\varepsilon_g$	คือ ค่าการแผ่รังสีของอากาศ หรือก๊าซเสีย ( $(\text{H}_2\text{O})_g$ , $\text{CO}_2$ เป็นหลัก)
	$\alpha_g$	คือ ค่าการดูดซึมรังสีของอากาศ หรือก๊าซเสีย ( $(\text{H}_2\text{O})_g$ , $\text{CO}_2$ เป็นหลัก)
	$t_f$	คือ Arithmetic Mean ของอุณหภูมิสมบูรณ์ของอากาศหรือก๊าซเสีย (K)
	$t_s$	คือ อุณหภูมิสมบูรณ์เฉลี่ยของพื้นผิวอิฐทนไฟ (K)

พจน์ของ  $\frac{\varepsilon_s + 1}{2}$  ใช้ในกรณีที่ค่าการแผ่รังสีของพื้นผิวอิฐทนไฟมีค่าต่ำกว่า 1 ซึ่งบางส่วนของ การแผ่รังสีของก๊าซจะสะท้อนกลับมาจากพื้นผิวนั้นได้ โดยส่วนใหญ่จะไม่ซึมซับเข้าไปในก๊าซนั้นอีก แต่ จะถูกซึมซับโดยพื้นผิวรอบ ๆ ที่เหลือแทน

เมื่ออุณหภูมิของของไหลและอิฐทนไฟมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดพื้นที่การถ่ายเท ความร้อน สามารถประมาณการใช้ Arithmetic Mean ของอุณหภูมิของไหลโดยเพิ่มพจน์ของ Logarithmic Mean ของผลจางอุณหภูมิเข้าไป จากการพิจารณาให้รีเจเนอเรเตอร์เสมือนเป็นเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอิฐทนไฟกับของไหล

$$t_f = t_s + \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \quad (3.34)$$

โดย	$\theta_1$	คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับอิฐทนไฟที่ทางเข้าของการไหล
	$\theta_2$	คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลกับอิฐทนไฟที่ทางออกของการไหล

Hottel, H. C. (1954) กล่าวว่าเมื่อองค์ประกอบของไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ปรากฏอยู่ใน รูปของผลรวมกับก๊าซที่ไม่มีคุณสมบัติในการแผ่รังสีอื่น ๆ การหาค่าการแผ่รังสีของอากาศ หรือก๊าซเสีย ( $\varepsilon_g$ ) สามารถหาได้ดังนี้

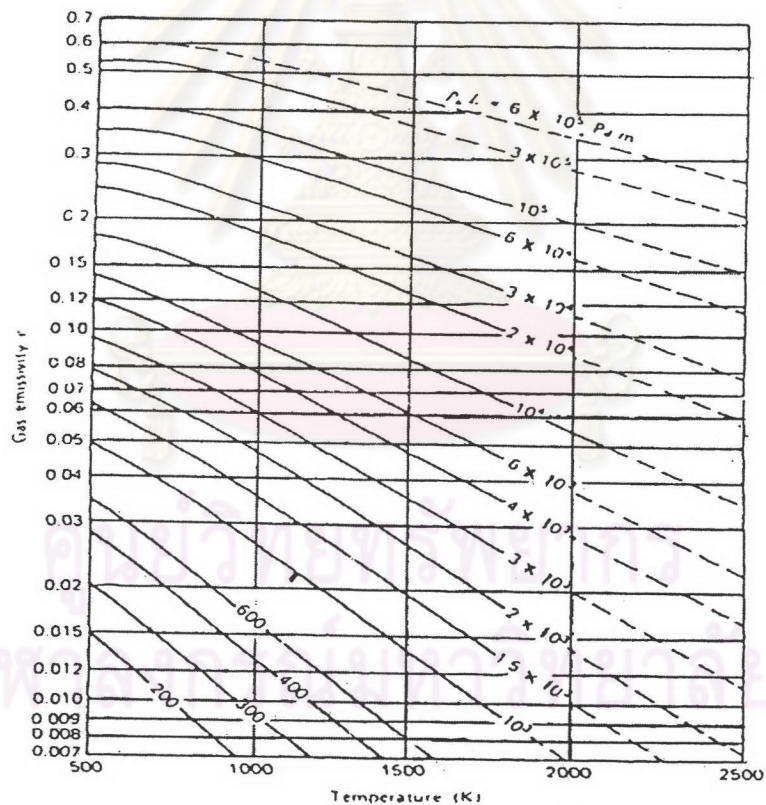
$$\varepsilon_g = C_w \varepsilon_w + C_c \varepsilon_c - \Delta \varepsilon \quad (3.35)$$

โดยค่าการแผ่รังสีของไอน้ำ ( $\epsilon_w$ ) และของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\epsilon_c$ ) สามารถหาได้จากกราฟในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับซึ่งขึ้นอยู่กับ

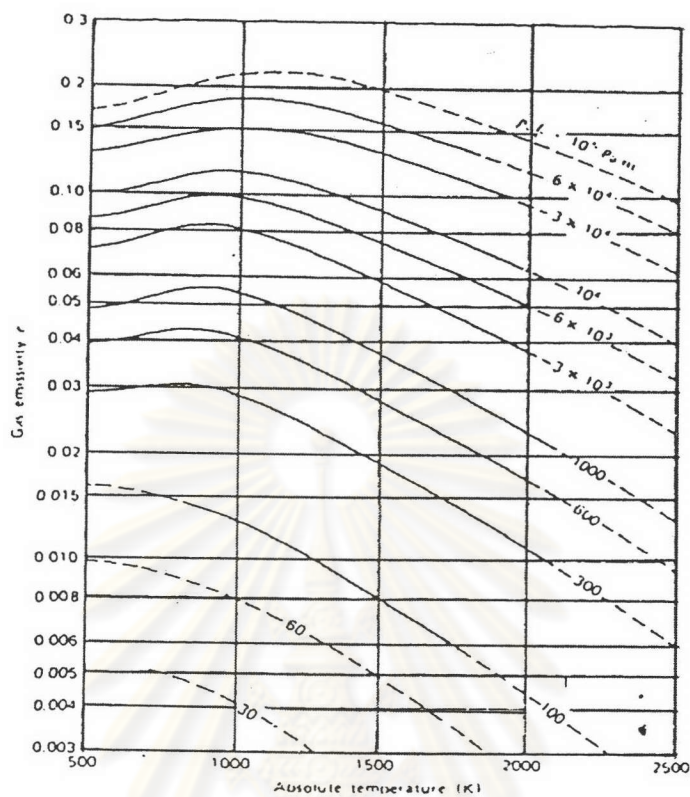
- อุณหภูมิ  $t_f$  ณ Total Pressure ,  $p$  ของอากาศ หรือก๊าซเสียที่ 1 atm
- Partial Pressure,  $p_w$  ของไอน้ำมีค่าเท่ากับ Mole Fraction ของ  $H_2O$  x Total Pressure
- Partial Pressure,  $p_c$  ของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ Mole Fraction ของ  $CO_2$  x Total Pressure

(Moles Fraction คือ อัตราส่วนโดยโมล หรือเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของก๊าซชนิดนั้นต่อก๊าซทั้งหมด)

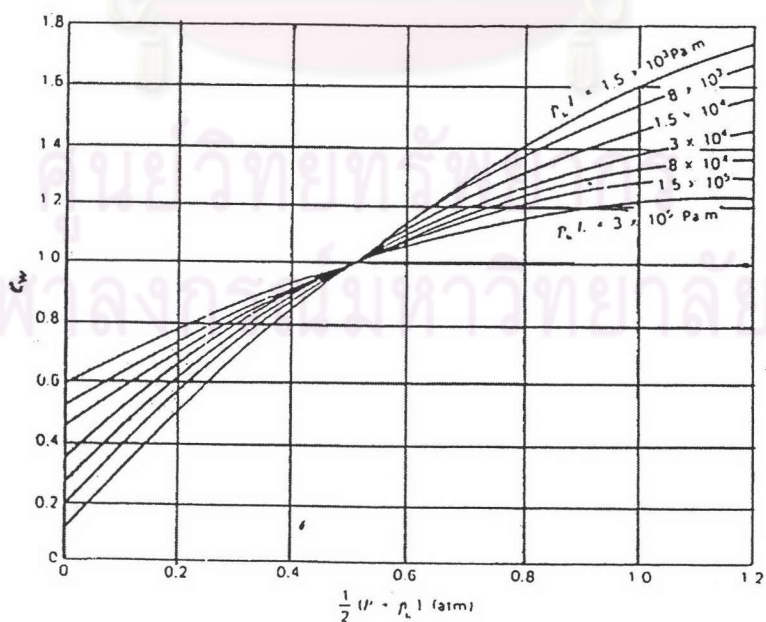
- Effective Mean Beam Length,  $L = 3.4 \frac{\text{volume}}{\text{area}}$  สำหรับก๊าซที่อยู่ในพื้นผิวปิดใด ๆ



รูปที่ 3.8 แสดงค่าการแผ่รังสีของ  $H_2O$  ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียงศูนย์

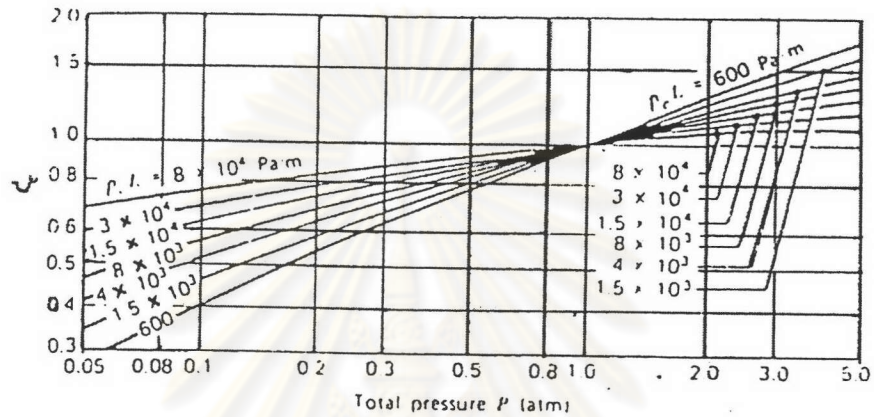


รูปที่ 3.9 แสดงค่าการแผ่รังสีของ CO<sub>2</sub> ที่ Total Pressure 1 atm และ Partial Pressure ใกล้เคียงศูนย์



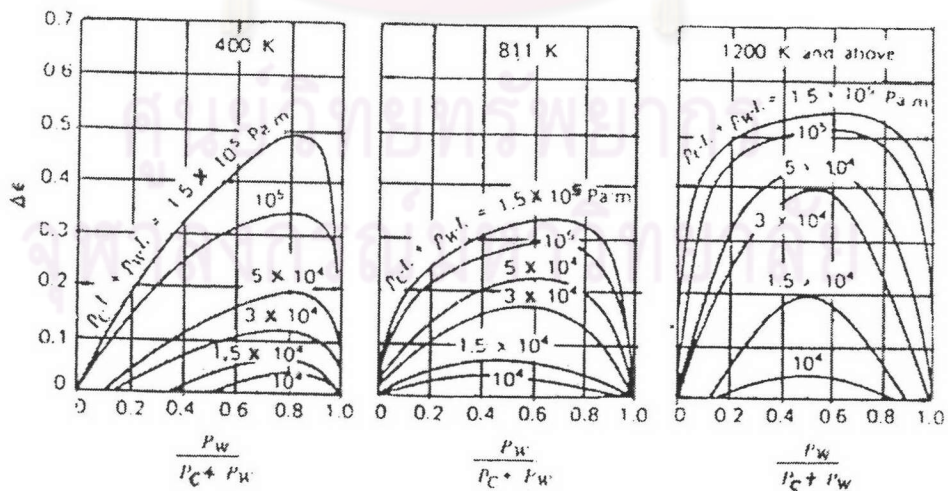
รูปที่ 3.10 แสดง Correction Factor,  $C_w$  ของ  $\epsilon_w$  ที่ Total Pressure  $p$  atm

Correction Factor ของไอน้ำ ( $C_w$ ) และของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $C_c$ ) หาได้จากรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ ใช้เมื่อ Total Pressure สูงหรือต่ำกว่า 1 atm โดยค่าการแผ่รังสีของก๊าซใด ๆ ที่ Total Pressure จะเท่ากับผลคูณของ Correction Factor ที่ได้จากรูป กับค่าการแผ่รังสีที่ Total Pressure เท่ากับ 101.3 kPa



รูปที่ 3.11 แสดง Correction Factor,  $C_c$  ของ  $\epsilon_c$  ที่ Total Pressure  $p$  atm

ส่วน  $\Delta\epsilon$  ส่วน Correction Factor for Overlap ใช้เมื่อ ไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์รวมกัน อยู่ในรูปก๊าซของผสม หาได้จากรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดง Correction Factor for Overlap,  $\Delta\epsilon$  สำหรับก๊าซของผสมที่มีทั้งไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์

ในกรณีของค่าการดูดซึ่มรังสี ( $\alpha_g$ ) ของก๊าซของผสมระหว่างไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha_g = \alpha_w + \alpha_c - \Delta\alpha \quad (3.36)$$

โดย  $\alpha_w = C_w \left(\frac{t_g}{t_s}\right)^{0.45} \varepsilon_w(t_s, p_w L_e \frac{t_s}{t_g})$

$$\alpha_c = C_c \left(\frac{t_g}{t_s}\right)^{0.65} \varepsilon_c(t_s, p_c L_e \frac{t_s}{t_g})$$

ค่า  $\varepsilon_w, \varepsilon_c$  หาได้จากรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ แต่ใช้คุณสมบัติของ  $t_s$  แทน  $t_g$  และใช้คุณสมบัติของ  $p_w L_e \frac{t_s}{t_g}$  กับ  $p_c L_e \frac{t_s}{t_g}$  แทน  $p_w L_e$  กับ  $p_c L_e$

$C_w, C_c$  หาได้จากรูปที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับโดยใช้คุณสมบัติเดิม

$\Delta\alpha = \Delta\varepsilon$  หาได้จากรูปที่ 3.12 โดยใช้คุณสมบัติเดิม

### 3.5 คุณสมบัติของก๊าซผสม (Thermal Properties of Mixed Gas)

ของไหลที่ไหลผ่านรีเจเนอเรเตอร์ไม่ว่าจะเป็นก๊าซเสียในช่วงสะสมความร้อน (hot period) หรืออากาศในช่วงคายความร้อน (cold period) มักปรากฏอยู่ในรูปของก๊าซหลาย ๆ ชนิดรวมกันอยู่ ซึ่งก๊าซแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันไป ถ้าก๊าซชนิดใดมีปริมาณมากคุณสมบัติของก๊าซชนิดดังกล่าวจะเด่นมากกว่าก๊าซที่มีปริมาณน้อยกว่า ดังนั้นในการพิจารณาคุณสมบัติทางความร้อนของของไหล จึงต้องพิจารณาปริมาณของก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่อยู่ในของไหลด้วย

ถ้าให้ของไหลประกอบด้วยก๊าซ 3 ชนิด ชนิดแรกมีปริมาณ  $x_1$  ชนิดที่สองมีปริมาณ  $x_2$  และชนิดที่สามมีปริมาณ  $x_3$  เมื่อต้องการหาความหนาแน่นของของไหล ( $\rho_f$ ) สามารถหาได้ดังนี้

$$\rho_f = \left(\frac{x_1}{x_1 + x_2 + x_3}\right)\rho_1 + \left(\frac{x_2}{x_1 + x_2 + x_3}\right)\rho_2 + \left(\frac{x_3}{x_1 + x_2 + x_3}\right)\rho_3 \quad (3.37)$$

โดย  $\rho_f$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_1$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซชนิดที่แรก ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_2$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซชนิดที่สอง ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_3$  คือ ความหนาแน่นของก๊าซชนิดที่สาม ( $\text{kg/m}^3$ )

สำหรับคุณสมบัติอื่น ๆ ก็สามารถหาได้เช่นเดียวกัน

### 3.6 พลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้ (Heat Recovery)

พลังงานความร้อนที่นำกลับมาใช้ คือพลังงานความร้อนที่อากาศได้รับจากการไหลผ่านโครงอิฐทนไฟในช่วงการคายความร้อน (cooling period)

$$Q = \dot{m} c_p \Delta t \quad (3.38)$$

โดย  $Q$  คือ ปริมาณความร้อนที่นำกลับมาใช้ (kJ)  
 $\dot{m}$  คือ อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (kg / s)  
 $c_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (kJ / kg K)  
 $\Delta t$  คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการรับความร้อนจากอิฐทนไฟ ( $^{\circ}\text{C}$ )

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย