บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เมื่อพูดถึงหม้อน้ำรถยนต์นั้นสิ่งที่สำคัญก็คือความสามารถในการระบายความร้อนของมันที่จะมีผลต่อเครื่องยนต์เป็นอย่างมาก ภายในหม้อน้ำรถยนต์นั้นก็คืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในแบบครีบกับท่อ (Fin and Tube) ดังนั้นเมื่อใช้ไปนานๆหม้อน้ำย่อมที่จะมีฝุ่นผงจับตัวหรือเกิดการสึกกร่อนอันเป็นผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลง ดังนั้นเราจึงสนใจที่จะศึกษามันว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสัมพันธ์กับอายุการใช้งานอย่างไร

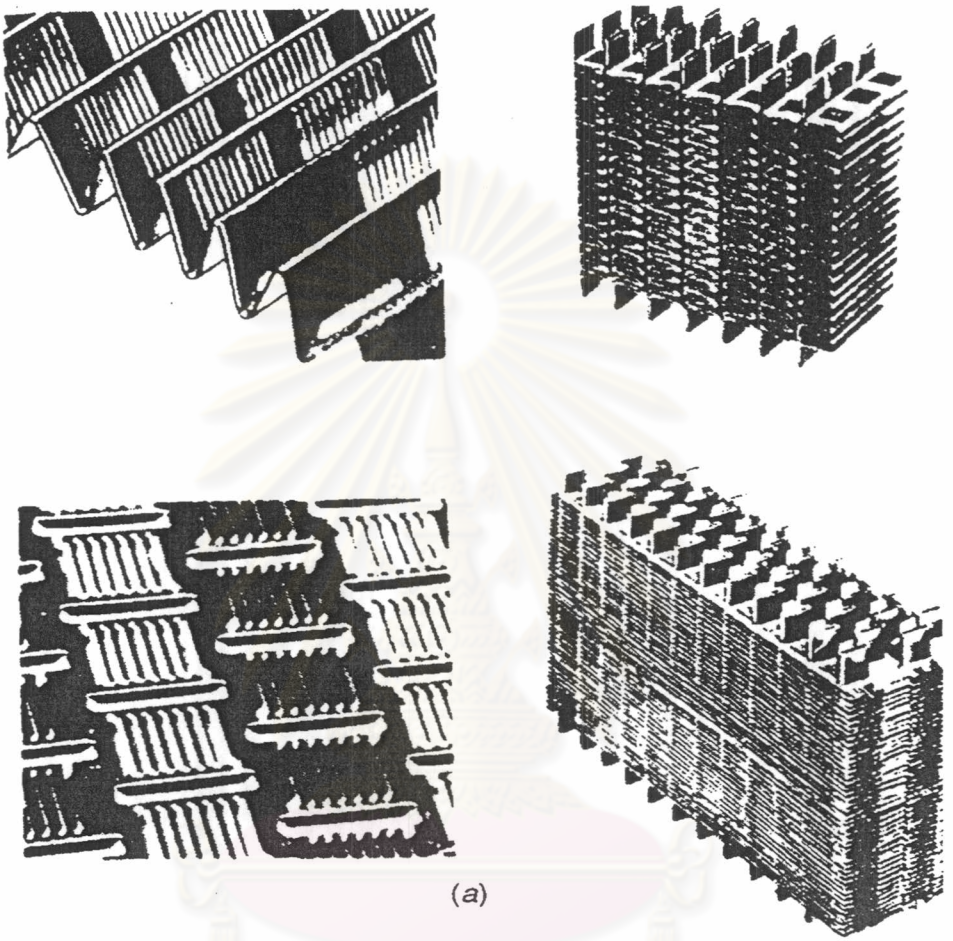
3.1 ส่วนประกอบของหม้อน้ำรถยนต์

หม้อน้ำรถยนต์ (Radiator) คืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่คอยช่วยลดความร้อนในเครื่องยนต์เกือบทั้งหมดของหม้อน้ำรถยนต์นั้นจะเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดครีบ และ ท่อ (Fin and Tube) สารหล่อเย็นจะวิ่งอยู่ในท่อจากทางเข้าไปสู่ทางออกโดยมีครีบติดอยู่กับท่อเพื่อที่จะเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับอากาศโดยบริเวณท่อและครีบเรียกรวมกันว่า คอร์ (Core) ดังรูปที่ 3 - 1 ในรถยนต์เก่าๆนั้นส่วนใหญ่นั้นจะใช้หม้อน้ำแบบไหลแนวดิ่ง (Vertical) จะไหลในทิศทางจากบนลงล่างส่วนในรถยนต์รุ่นใหม่ๆ นั้นจะเป็นในลักษณะไหลแนวนอน (Horizontal) คือไหลจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งหม้อน้ำแบบไหลแนวขวางนั้นทำหน้าที่ในการลดความร้อนได้ดีกว่า เพราะท่อในแบบไหลแนวขวาง นั้นจะยาวกว่าแบบไหลแนวดิ่งซึ่งนี่เป็นเหตุผลที่จะทำให้มีเวลาในการลดความร้อนได้มากกว่า ดังรูปที่ 3 - 2

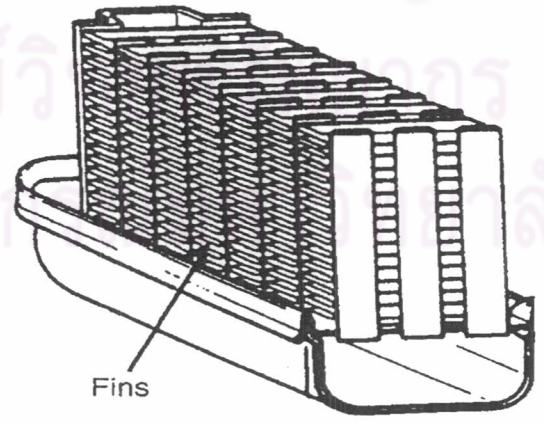
หม้อน้ำรถยนต์รุ่นเก่านั้นมักทำด้วยทองเหลืองกับทองแดงโดยเชื่อมต่อกันด้วยตะกั่วทั้งท่อกับครีบและทั้งหมดกับแท็งค์ (Tank) ส่วนหม้อน้ำรุ่นใหม่ๆนั้นทำด้วยอลูมิเนียมโดยระหว่างท่อกับแท็งค์นั้นประกบกันอยู่ด้วยการพับเหล็กติดกันโดยจะต้องมียาง O-Ring พิเศษเป็นตัวคั่นอยู่ระหว่างท่อกับแท็งค์ ดังรูปที่ 3 - 3

ฝาหม้อน้ำนั้นจะติดตั้งอยู่ด้านบนสำหรับหม้อน้ำแบบ Downflow ส่วนถ้าเป็นแบบ Crossflow นั้นฝาจะอยู่ด้านที่เย็นและมีความดันต่ำกว่า สำหรับรถยนต์รุ่นที่มีเกียร์เป็นแบบ

อัตโนมัตินั้น จะมีระบบท่อน้ำมันเกียร์มารวมอยู่ในหม้อน้ำด้วย โดยจะอยู่ในส่วนของแท็งค์ด้านขาออก รถยนต์รุ่นใหม่เกือบทั้งหมดนั้นใช้ฝาแบบความดัน และยังมีหม้อพักน้ำหล่อเย็นด้วย

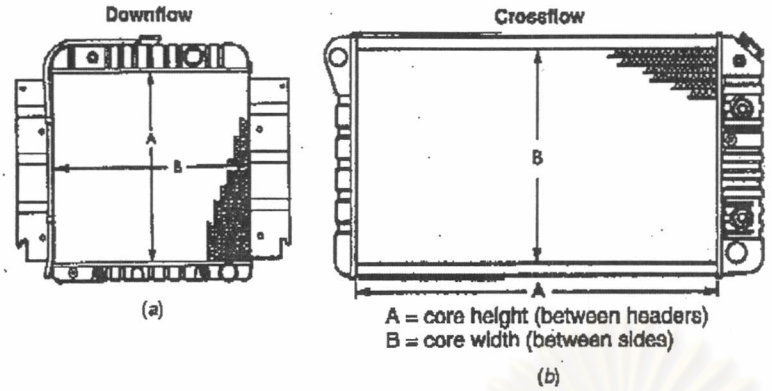


(*a*)

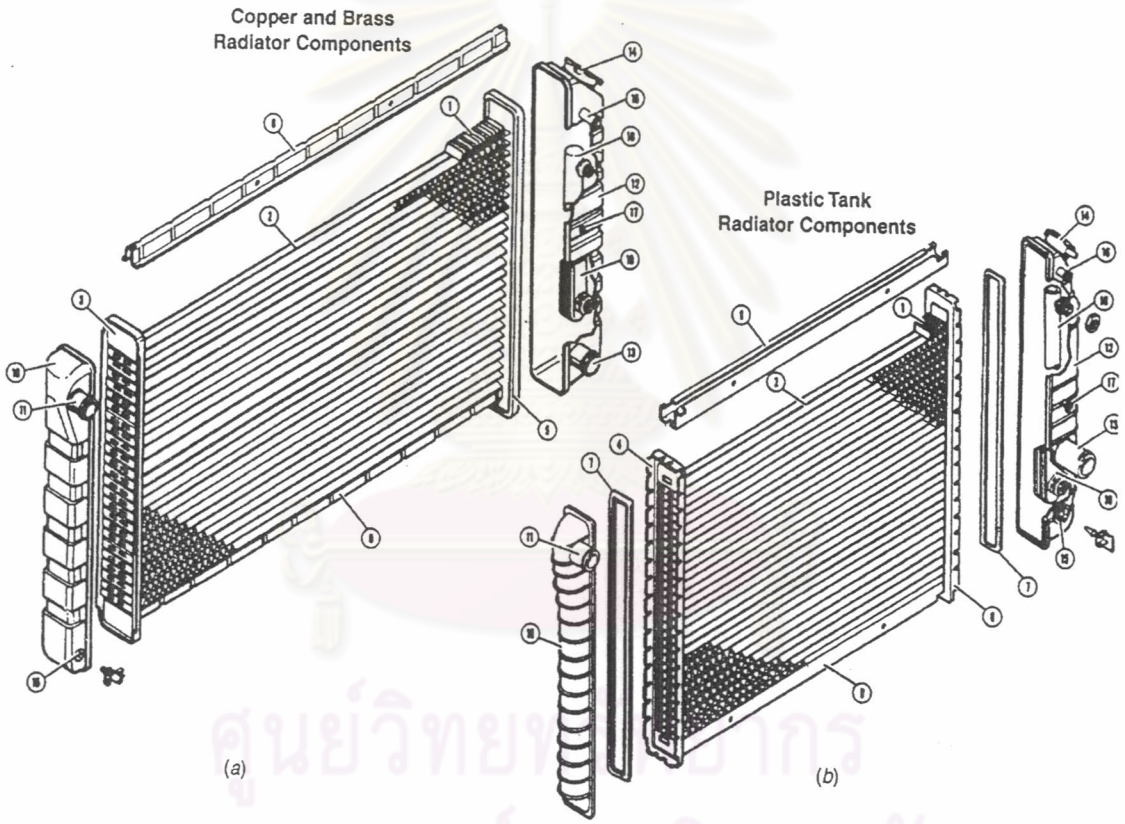


(*b*)

รูปที่ 3 - 1 คอร์ของหม้อน้ำที่ทำจากท่อและครีบ (a) ช่วงต่อของหัวกับแท็งค์
(b) ครีบ



รูปที่ 3 - 2 รถยนต์เก่าเกือบทั้งหมดใช้แบบ Vertical (a) สารหล่อเย็นไหลแนวดิ่ง รถยนต์รุ่นใหม่จะใช้แบบ Horizontal (b) สารหล่อเย็นวิ่งแนวขวาง (Automotive Heating and Air conditioning)



1 Serpentine louvered fin
2 Core tube
3 Inlet (top) header-solder well type (*a*)
4 Inlet (top) header-tabbed type (*b*)
5 Outlet (bottom) header-solder well type (*a*)
6 Outlet (bottom) header-tabbed type (*b*)
7 Gasket seal (*b*)
8 Side piece
9 Side piece
10 Inlet tank
11 Inlet hose connection
12 Outlet (bottom) tank
13 Outlet hose connection
14 Fillerneck/overflow tube
15 Drain fitting
16 Heater return line connection
17 Coolant level indicator fitting or temperature sensor switch
18 Concentric oil cooler
19 Plate oil cooler

รูปที่ 3 - 3 (a)รถยนต์รุ่นเก่าใช้วัสดุเป็นทองเหลืองและทองแดงเชื่อมกับแท็งค์ด้วยตะกั่ว (b) รถยนต์รุ่นใหม่ๆใช้อลูมิเนียมกับทองเหลืองและพลาสติกแท็งค์ (Automotive Heating and Air conditioning)

3.2 จุดประสงค์ในการทำการวิจัยเฟาลิ่ง

ข้อมูลพื้นฐานอย่างหนึ่งที่เป็นที่สนใจของผู้ออกแบบรวมถึงการปฏิบัติงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ สาเหตุของการเกิดเฟาลิ่ง และผลกระทบของเฟาลิ่งต่อการถ่ายเทความร้อนและการเกิดความดันลดลงในระบบการไหล ข้อมูลนี้มักจะขึ้นอยู่กับเวลา ชนิดของเหลว อุณหภูมิระบบ ความเร็วของของเหลว อัตราการถ่ายเทความร้อน และ วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั้งหมดจะใช้ช่วยในการออกแบบ รวมถึงข้อมูลของเฟาลิ่งก็ใช้ด้วย นอกจากนี้เรื่องของเฟาลิ่งยังช่วยถึงการปฏิบัติการและตารางการทำความสะอาดอุปกรณ์ด้วย

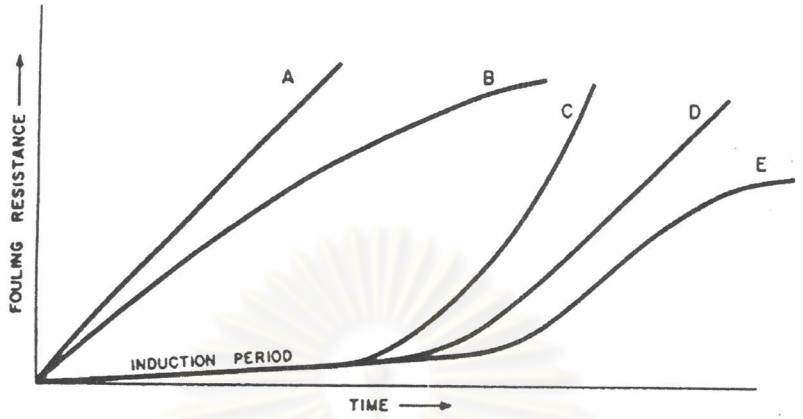
3.3 ความรู้พื้นฐานของ เฟาลิ่ง

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเกือบทุกชนิดมักจะต้องมีการเกิดการสูญเสียความสามารถในการถ่ายเทความร้อนซึ่งเกิดเนื่องมาจากเฟาลิ่ง ในช่วงแรกๆนั้นเรื่องของเฟาลิ่งมีจุดกำเนิดมาจากโรงงานน้ำมันแต่ในขณะนี้มีการแพร่หลายออกไปในอีกหลายกลุ่มได้มีการสนใจหาค่าเฟาลิ่งบนผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในหลายๆประเภทซึ่งเป็นตัวเพิ่มความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนบนผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3.3.1 เฟาลิ่ง เป็นฟังก์ชันของเวลา

สมมุติฐานที่ว่าค่าสัมประสิทธิ์เฟาลิ่งเป็นค่าคงที่นั้นแสดงว่าเมื่อเราเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนแลกเปลี่ยนความร้อนไปใช้นั้นมันย่อมเกิดการเสื่อมในทันทีซึ่งจริงๆไม่เป็นเช่นนั้นในช่วงแรกจะยังไม่มีผลอะไรซึ่งอาจใช้เวลาระยะหนึ่ง การก่อตัวของความต้านทานจาก เฟาลิ่ง เป็นฟังก์ชันของเวลานั้นอาจเป็นไปได้หลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3 - 4 เส้นกราฟ A อธิบายถึงกระบวนการเริ่มจากผิวอุปกรณ์สะอาดปราศจากเฟาลิ่ง แล้วค่อยๆเกิดเฟาลิ่ง ในปริมาณคงที่ตามเวลา เส้นกราฟ B อธิบายถึงการที่ค่าความต้านทานจากเฟาลิ่งเพิ่มจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วค่อยๆลดลง

ส่วนกลุ่มของเส้นกราฟ C , D และ E นั้นแสดงให้เห็นถึงว่าในช่วงแรกๆความต้านทานจากเฟาลิ่งนั้นมีการเกิดขึ้นน้อย หรือไม่มีเลย ต่อจากนั้นจึงเกิดความต้านทานจาก เฟาลิ่งอย่างรวดเร็วโดยเส้นกราฟ C มีอัตราการเกิดเพิ่มขึ้นตามเวลาส่วน เส้นกราฟ E นั่นเป็นลักษณะค่อยๆลดลงของความต้านทานจาก เฟาลิ่ง ส่วนในช่วงท้ายนั้นเป็นค่าคงที่



รูปที่ 3 - 4 การก่อตัวของ เฟาลิ่ง เป็นฟังก์ชันของเวลา (Industrial Heat exchangers A Basic Guide)

ดังนั้นช่วงเวลาที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดหรือยังไม่เกิดความต้านทานจากเฟาลิ่งนั้นจะเป็นเวลานานเท่าใดจึงเป็นสิ่งสำคัญ เราจึงต้องพยายามหาค่านั้นมาใช้ซึ่งมักจะต้องไปเลือกมาจากข้อมูลเก่าๆเป็นพื้นฐาน ดังนั้นเมื่อแรกใช้เอาจจะลดความต้านทานความร้อนเตรียมไว้ก่อนเผื่อไว้ในอนาคตด้วยวิธีการเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเตรียมเอาไว้

ในอีกแง่หนึ่ง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใหม่ๆ ปราศจากความต้านทานจากเฟาลิ่งอาจมีผลทำให้ระบบมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ควรซึ่งอาจเป็นผลเสียกับระบบ ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เกิดความคุ้มค่าที่สุดเราอาจลดปริมาณสารหล่อเย็น ซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วของสารหล่อเย็นลดลง ส่วนอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น โดยที่ทั้งสองกรณีที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลให้เกิดเฟาลิ่งอย่างมาก ดังนั้นการเตรียมการเพื่อการเกิดเฟาลิ่งหรือเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนเผื่อไว้นั้นต้องทำในลักษณะที่คำนึงถึงความปลอดภัยด้วย เพราะการเผื่อนี้อาจจะทำให้เกิดผลในทางกลับกันได้ คือเราเพิ่มพื้นที่ถ่ายเทความร้อนซึ่งทำให้ความเร็วของสารหล่อเย็นลดลงและเกิดการเพิ่มของอุณหภูมิดังนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเสื่อมสมรรถนะอย่างรวดเร็ว

3.3.2 กลไกในการเกิด เฟาลิ่ง

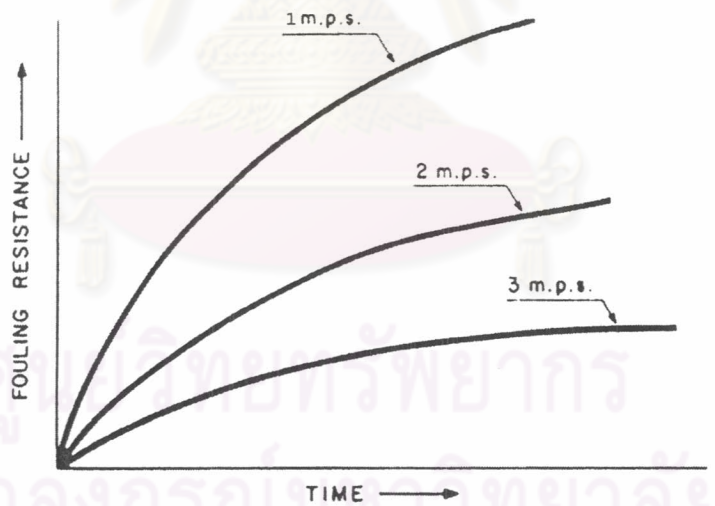
กลไกในการเกิดเฟาลิ่งรวมเป็นหมวดหมู่ได้ดังนี้

1. Crystallization การเกิดเฟาลิ่งเนื่องจากการตกผลึก ซึ่งถ้าในสาร

ละลายมีเกลืออยู่เพียงชนิดเดียวจะมีการเกิดความต้านทานเฟาลิ่งแบบในรูปที่ 3 – 4 เส้นกราฟ D

2. Sedimentation การเกิดเฟาลิ่งเนื่องจากการตกตะกอน ซึ่งในการเกิดการเฟาลิ่งในลักษณะนี้นั้นมักจะเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอ
3. Polymerization and chemical reaction การเกิดเฟาลิ่งเนื่องจากปฏิกริยาเคมี มักจะมีลักษณะการเกิดเฟาลิ่งคล้ายกับในรูป 3 – 4 เส้นกราฟ B
4. Coking การเกิดเฟาลิ่งจากกระบวนการปิโตรเลียม
5. Organic growth การเกิดเฟาลิ่งเนื่องจากสิ่งมีชีวิต เช่น พืชบางชนิดที่เกิดในระบบการถ่ายเทความร้อนที่ปล่อยสารทำความเย็นออกสู่ภายนอก
6. Corrosion effects การเกิดเฟาลิ่งเนื่องจากการเกิดการกัดกร่อน

3.3.3 ผลกระทบจากความเร็วของของไหล



รูปที่ 3 - 5 ชนิดของ ความต้านทานเฟาลิ่งในลักษณะเป็นฟังก์ชันของความเร็วของไหล(Industrial Heat exchangers A Basic Guide)

มีหลักฐานสำคัญชี้ให้เห็นว่าความเร็วของของไหลเป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดที่ส่งผลกระทบต่อเฟาลิ่งในเกือบทุกกรณีการเพิ่มความเร็วของของไหลนั้นจะส่งผลให้เกิดการลดลงทั้งอัตราการเกิดเฟาลิ่งและค่าสูงสุดที่เกิดดังแสดงใน รูปที่ 3 - 5 ถ้าเพิ่มอัตราความเร็วของของไหลเป็นเท่าตัวจากค่าเริ่มต้นต่ำๆอาจลดค่าความต้านทานจาก เฟาลิ่งได้ถึงครึ่งหนึ่งแล้วถ้าเพิ่มอีก

เท่าอาจลดความต้านทานที่เหลือลงไปอีกครึ่งหนึ่งได้อย่างไรก็ดีการเพิ่มครั้งที่สองเป็นการเพิ่มถึงสี่เท่าของความเร็วเริ่มต้นและเพิ่มการลดลง ของความต้านทานความร้อน (Thermal resistance) ลงหนึ่งในสี่เท่านั้น

ในการช่วยลดค่าเฟาลิ่งที่ความเร็วสูงขึ้นนั้นเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วย การลดการเกิดเฟาลิ่งนั้นช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอย่างไรก็ดีเราต้องตระหนักว่า ค่าความดันลดนั้นเป็นฟังก์ชันกำลังสองของความเร็วของของไหล การเพิ่มขึ้นเท่าหนึ่งของความเร็ว การสูญเสียความดันจะเพิ่มขึ้นสี่เท่าซึ่งทำให้ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในส่วนของการเพิ่มความดันโดยการใช้อุปกรณ์ในการเพิ่มความดัน เช่น ปั๊ม

3.4 การวิเคราะห์ค่าความต้านทาน เฟาลิ่ง

ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากของไหลร้อนไปสู่ของไหลเย็นประกอบไปด้วยหลายๆการนำและพาความร้อน ซึ่งสามารถแสดงออกมาในรูปแบบของเทอมการต้านทานความร้อนรวมทั้งหมดเข้าด้วยกัน คือ ความต้านทานความร้อนรวม (Total thermal resistance) และส่วนกลับของมันคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Over all heat transfer coefficient)

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{A_o}{A_i}\frac{1}{h_i} + R_f + R_w \qquad 3.1$$

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

R_f = ความต้านทานเฟาลิ่ง

R_w = ความต้านทานของผนังที่ถ่ายเทความร้อน

โดยเครื่องหมาย i และ o หมายถึง ด้านใน และ ด้านนอก ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยสมมุติให้

1. ที่เวลาเริ่มต้นค่า R_f เป็นศูนย์
2. ค่า h คงที่
3. ค่า Rw คงที่

จะได้ว่า

$$R_f = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} \qquad 3.2$$

โดย

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังจากการใช้งาน

U_0 = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเริ่มต้น

3.4.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

จาก $$q = \dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o}) \qquad 3.3$$

และ

$$q = UA(\Delta T_{Lm}) \qquad 3.4$$

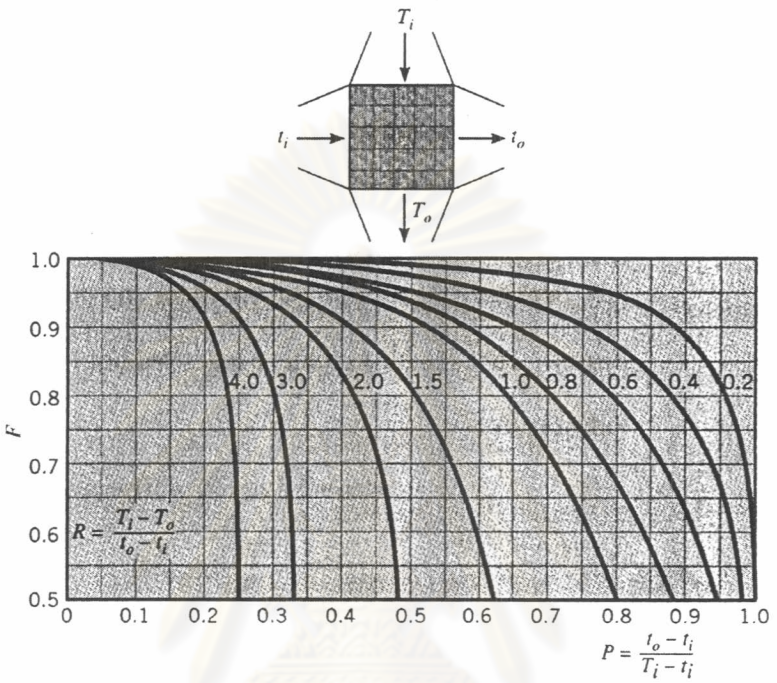
โดย $$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \qquad 3.5$$

ซึ่ง $$\begin{bmatrix} \Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 = T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,i} \end{bmatrix} \qquad 3.6$$

โดยหม้อน้ำรถยนต์นั้นเป็นแบบ Cross flow heat exchanger แบบของไหลทั้งสองอย่างไม่ผสมกันดังนั้นจะได้ค่า

$$\Delta T_{lm} = F\Delta T_{lm,CF} \qquad 3.7$$

โดยค่า F เป็น correction factor ซึ่งหาได้มาจากรูปที่ 3 - 6



รูปที่ 3 - 6 ตัวประกอบปรับแก้ผลต่างอุณหภูมิ single pass,cross flow heat exchanger with both fluid unmixed (Fundamentals of Heat and Mass Transfer)

ดังนั้นจะได้

$$U = \frac{q}{A\left(\Delta T_{lm}\right)} = \frac{\dot{m}_h C_{p,h}\left(T_{h,i} - T_{h,o}\right)}{A\left(\Delta T_{lm}\right)} \qquad 3.8$$

สรุปสมการที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานเฟาลิ่ง (R_f) มีสมการ 3.2 และ 3.8

$$U = \frac{\dot{m}_h C_{p,h}\left(T_{h,i} - T_{h,o}\right)}{A\left(\Delta T_{lm}\right)}$$

$$R_f = \frac{1}{U} - \frac{1}{U_o}$$