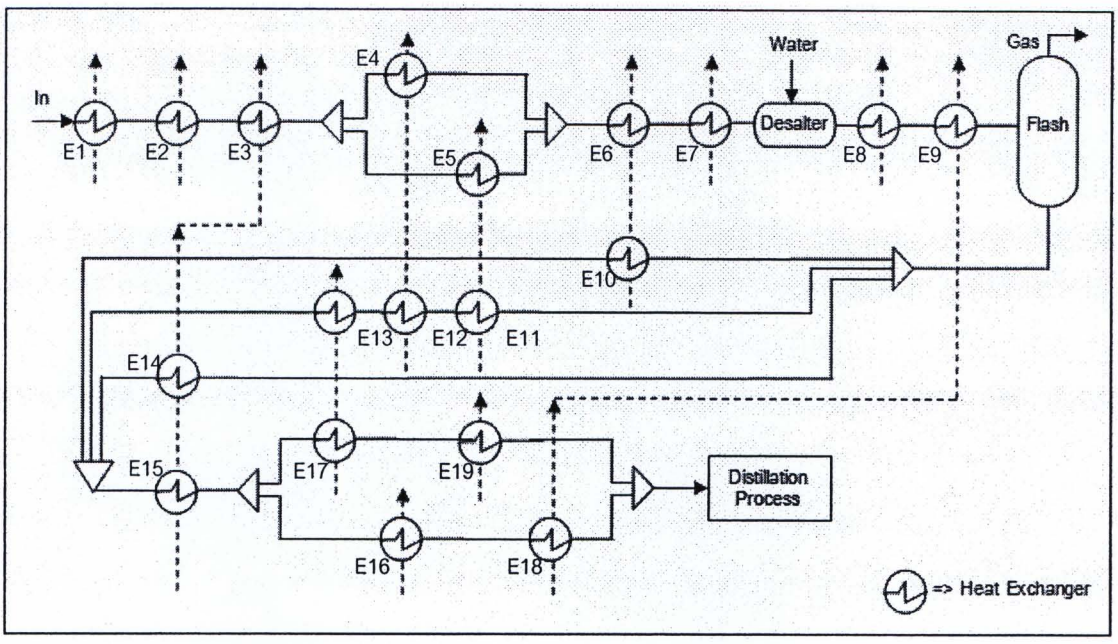
บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ การถ่ายเทความร้อน อัตราการเกิดฟาวลิ่ง และรูปแบบสมการของการเกิดฟาวลิ่งบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.1 กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheat train)

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบคือ ขั้นตอนแรกก่อนที่จะนำน้ำมันดิบเข้ายังหอกลั่น เพื่อทำการกลั่นให้ได้น้ำมันผลิตภัณฑ์ตามคุณสมบัติที่ต้องการ ทั้งนี้ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการกลั่นนั้นต้องนำน้ำมันดิบผ่านเข้าไปยังกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheat train) เพื่อเป็นการอุ่นให้ความร้อนกับน้ำมันให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นที่จะใช้สำหรับการกลั่นต่อไปตามข้อกำหนดของการดำเนินงานของกระบวนการที่ได้ออกแบบไว้ โดยการนำน้ำมันดิบผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อให้น้ำมันดิบแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่กลั่นได้จากหอกลั่น ซึ่งกำหนดให้ค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300-350 ^{o}C (ทั้งนี้ขึ้นกับคุณภาพของน้ำมันดิบ และผลผลิตที่ต้องการ)

สำหรับระบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่ได้ยกนำมาศึกษานี้ประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่อง ทั้งนี้ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการดำเนินงานที่ต่อเนื่องซึ่งกันและกัน โดยแสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบดังรูปที่ 3.1 เริ่มจากการส่งน้ำมันดิบ (Crude Oil) ผ่านเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1ถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 ตามลำดับ ซึ่งในระหว่างการส่งผ่านน้ำมันดิบไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องนั้น น้ำมันดิบจะต้องผ่านเข้าสู่กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalt) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับแยกเกลือออกจากน้ำมันดิบ โดยใช้น้ำทำการละลายเกลือที่ผสมอยู่ในน้ำมันดิบ และแยกน้ำซึ่งจะละลายเกลือออกจากกันป้องกันไม่ให้เกลือแร่หลุดออกไปทำปฏิกิริยากลายเป็นกรดทำให้เกิดการกัดกร่อนกับระบบซึ่งเป็นโลหะ อีกกระบวนการหนึ่งที่น้ำมันดิบต้องผ่านคือ กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash Vessel) ด้วยการลดความดัน ซึ่งในหอนี้บางส่วนจะระเหยออกไปเมื่อความดันลดลง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแยก (Separation) ป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนหรือจับตัวเป็นผลึก เพื่อให้ได้น้ำมันดิบที่มีคุณสมบัติตามต้องการก่อนที่น้ำมันดิบผลิตภัณฑ์จะถูกส่งเข้าสู่หอกลั่น (Distillation) ต่อไป

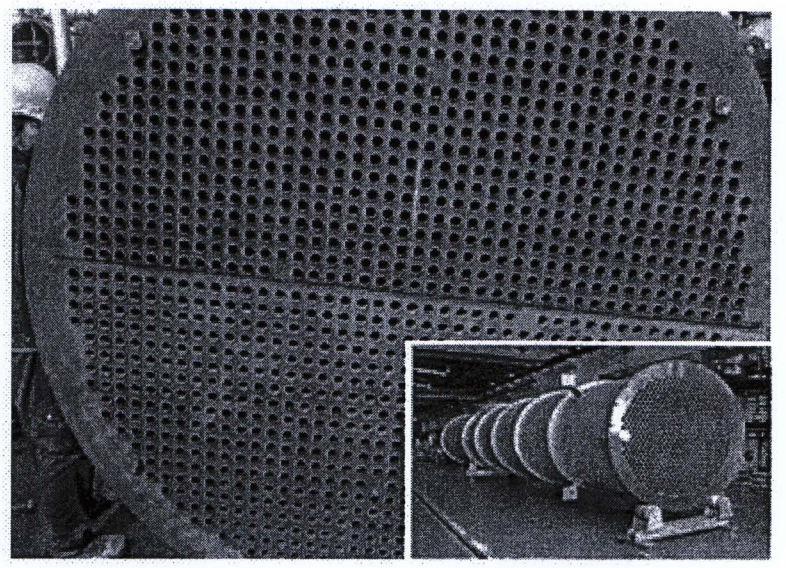


รูปที่ 3.1 แผนภาพข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา

3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

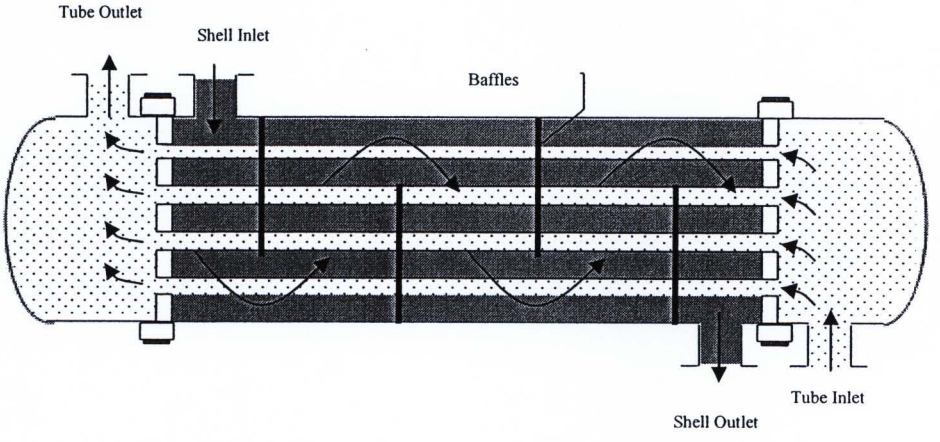
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่วิศวกรเคมีใช้ ในการออกแบบโรงงานอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป มิได้ออกแบบใดแบบหนึ่ง โดยความเป็นจริงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายประเภท ลักษณะที่เหมือนกันส่วนใหญ่ที่ใช้ในระบบงานทางวิศวกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน หรือแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่เป็นของไหลร้อนและของไหลเย็น ซึ่งทั้งสองส่วนนี้แยกจากกันโดยมีผนังกั้น

ในงานวิจัยนี้อ้างอิงข้อมูลจากกระบวนการจริง ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์ และท่อ (Shell and tube exchanger) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายและพบเห็นบ่อย โดยส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้งานในระบบของการถ่ายเทความร้อนของโรงงานอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ได้แก่ กระบวนการหล่อเย็นได้ทั้งของเหลว (Liquids) และแก๊ส (Gas), การควบแน่นด้วยไอน้ำ (Stream Condensing), การเตรียมอุณหภูมิ หรือการอุ่นร้อน (Pre-heating), การอนุรักษ์พลังงานทางความร้อน (Thermal Energy Conservation Effort) โดยการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ (Heat Recovery) เป็นต้น



รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ ที่ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

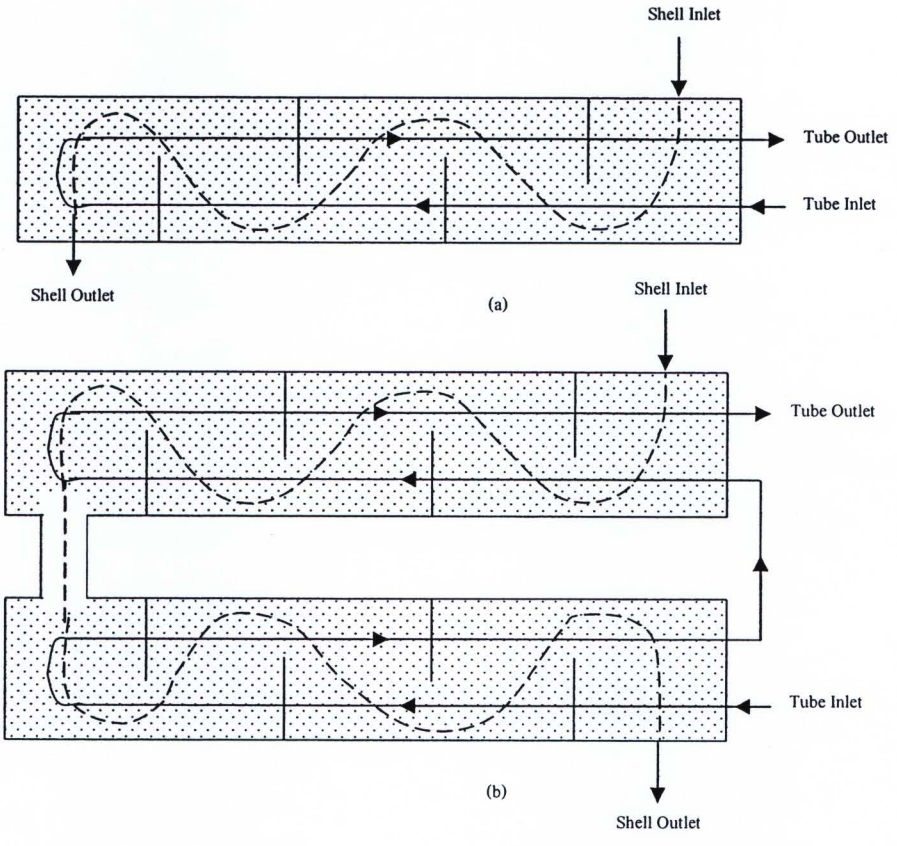
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากซึ่งเกิดจากการวางกลุ่มท่อ โดยกลุ่มท่อเหล่านี้จะบรรจุในกรอบทรงกระบอกที่เรียกว่า เชลล์ (Shell) ของไหลชนิดแรกไหลในกลุ่มท่อ ส่วนของไหลชนิดที่สองไหลรอบกลุ่มท่อที่อยู่ภายในเชลล์ เส้นทางการไหลภายในท่อ (Tube) ประกอบด้วยท่อนอกซึ่งปลายข้างหนึ่งมีฝาปิดอยู่และท่อในซึ่งสอดอยู่ในส่วนของท่อนอก ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ของไหลภายในตัวท่อจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในเชลล์ ในระหว่างที่ของไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอก



รูปที่ 3.3 แสดงทิศทางการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์ และท่อ

ดัดแปลงมาจาก : J.P.Holman (1992)

ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์ และท่อมีการถ่ายเทความร้อนแบบสองกลับ (Two tube passes) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งหมายความว่าของเหลวจะไหลภายในท่อในทิศทางหนึ่งและไหลกลับในอีกทิศทางหนึ่งด้านหัวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทางปลายซ้ายมือนั้นจะติดตั้งตัวแยก เพื่อแยกของเหลวที่ไหลเข้าและไหลกลับมา ตัวกั้น (Baffles) จะถูกจัดวางในเปลือก เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านท่อหลาย ๆ ครั้ง ก่อนที่จะออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



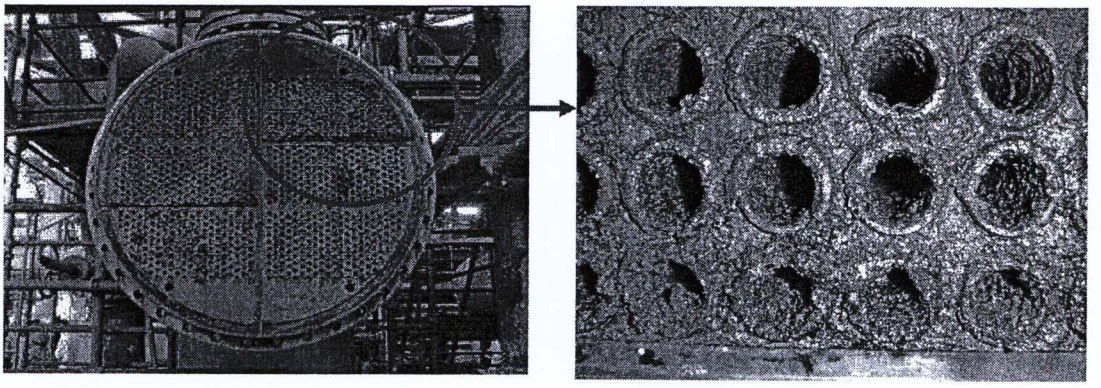
รูปที่ 3.4 การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสองกลับ (Two tube passes)
ดัดแปลงมาจาก : J.P.Holman (1992)

3.3 ฟาวลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factors)

ในระหว่างการใช้งานปกติพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มักถูกปกคลุมด้วยสิ่งเจือปนในของไหลหรือเกิดการสึกกร่อนด้วยปฏิกิริยาระหว่างของไหล และผนังวัสดุที่ใช้สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ เป็นสาเหตุทำให้ค่าความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล และผิวผนังมีค่าสูงขึ้นทำให้สมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดำเนินงานเป็นระยะเวลาหนึ่ง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกเคลือบด้วยสิ่งสกปรก ส่งผลให้เกิดการอุดตันภายในระบบการไหลหรือพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือเกิดจากคราบของสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนอันเนื่องมาจากการใช้ความร้อนในการแลกเปลี่ยนที่มีค่ามากเกินไป จึงทำให้เกิดการตกค้างอยู่บนผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอิทธิพลโดยรวมเหล่านี้แสดงโดยเทอมของฟาวลิ่งแฟกเตอร์หรือค่าความต้านทานของฟาวลิ่ง, $R_{f_{(t)}}$ ซึ่งมักจะรวมอยู่ในค่าความต้านทานในค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม ซึ่งจากเงื่อนไขผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $U_{(t)}$ (หน่วย $Wm^{-2}K^{-1}$) กับผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เริ่มต้นดำเนินการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน U_c (หน่วย $Wm^{-2}K^{-1}$) จะได้นิยามของฟาวลิ่ง แฟกเตอร์คือ

$$R_{f_{(t)}} = \frac{1}{U_{(t)}} - \frac{1}{U_c} \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.5 การเกิดฟาวลิ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

การเกิดฟาวลิ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือรูปแบบการเกิดฟาวลิ่ง (Fouling growth model) บนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของของไหล อัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหล ซึ่งผลของอุณหภูมิของของไหลที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสายร้อนและสายเย็นมีผลกระทบต่อการตกตะกอน และการเกาะตัวของฟาวลิ่งมากที่สุด รูปแบบของการเกิดฟาวลิ่งตามที่ได้ศึกษาในงานวิจัยของ Anwar K. และคณะ (2000) จำแนกออกได้ 4

ลักษณะคือ สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการการเกิดฟาว ลิ่งแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) และสมการการเกิดฟาวลิ่งแบบเอกโปรเนนเชียล (Asymptotic fouling model) ดังแสดงในสมการ (3.2), (3.3), (3.4) และ (3.5) ดังนี้

1.) สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c}(t/t_{p,c}) \tag{3.2}$$

2.) สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c}(t/t_{p,c})^n \tag{3.3}$$

3.) สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c}[\ln(t)/\ln(t_{p,c})] \tag{3.4}$$

4.) สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c}(1-\exp(-t/t_{p,c})) \tag{3.5}$$

เมื่อ $R_f(t)$ คือ การเกิดฟาวลิ่งที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (m^2K/W)

$R_{f,c}$ คือ ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่ง (m^2K/W)

t คือ เวลา (day)

$t_{p,c}$ คือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง (day)

n คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 8 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 246295

3.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

กลไกการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อนั้นประกอบไปด้วยการนำความร้อนและการพาความร้อน ซึ่งเกิดจากความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิของเหลวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

3.4.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer, Q)

สมการของอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมอธิบายได้ดังนี้ คือ

$$Q = UA\Delta T_{lm} \tag{3.6}$$

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (kW)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (kW/m^2K)

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)

ΔT_{lm} = ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม (K)

ค่าผลต่างของอุณหภูมิคำนวณจากความแตกต่างของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย การคำนวณหาค่าอุณหภูมิล็อกเฉลี่ย ต้องคำนึงถึงทิศทางของการไหลซึ่งเป็นไปได้ทั้งแบบขนานกันและสวนทางกัน เมื่อพิจารณาดู รูปที่ 3.6 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แตกต่างกันระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็นในขณะที่ไหลเข้า-ออก และต้องการหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำมาใช้กับสมการ (3.6) เพื่อคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อน สำหรับกรณีที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลเป็นขนานโดยแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและเย็นที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดในช่วงระหว่างทางเข้าและทางออก สำหรับการไหลแบบขนานหรือการไหลตามกันสำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นที่เล็ก ๆ (dA) นำมาเขียนได้สมการดังนี้

$$dq = U(T - T')dA = -\dot{m}_h\, c_h dT_h = \dot{m}_c\, c_c dT_c \tag{3.7}$$

ที่ซึ่งสัญลักษณ์ h และ c แทนของไหลร้อนและเย็นตามลำดับ การถ่ายเทความร้อนสามารถแสดงได้สมการดังนี้

$$dq = U(T_h - T_c)dA \tag{3.8}$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$dT_h = -\frac{dq}{\dot{m}_h c_h} \tag{3.9}$$

$$dT_c = -\frac{dq}{\dot{m}_c c_c} \tag{3.10}$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล และ c_h, c_c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล ดังนั้น

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -dq\left[\frac{1}{\dot{m}_h c_h} + \frac{1}{\dot{m}_c c_c}\right] \tag{3.11}$$

แทนค่า dq จากสมการ (3.8) ลงในสมการ (3.11) จะได้

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -U\left[\frac{1}{\dot{m}_h c_h} + \frac{1}{\dot{m}_c c_c}\right]dA \tag{3.12}$$

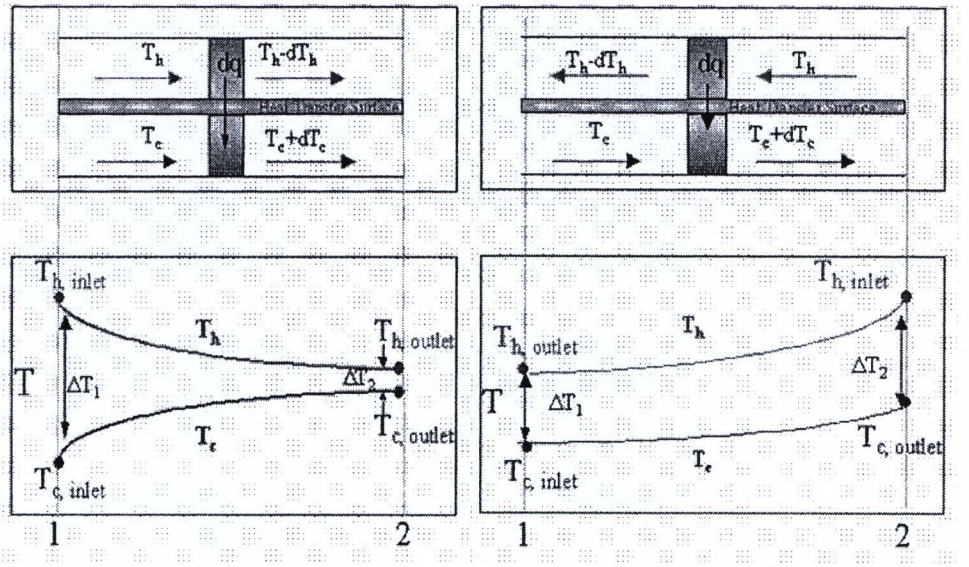
อินทิเกรตสมการอนุพันธ์ระหว่างสภาวะที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะได้สมการ

$$\ln\frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}} = -UA\left[\frac{1}{\dot{m}_h c_h} + \frac{1}{\dot{m}_c c_c}\right] \tag{3.13}$$

เมื่อเทียบย้อนกลับไปที่สมการที่ (3.7) ผลที่ได้ของ $\dot{m}_h c_h$ และ $\dot{m}_c c_c$ นำมาแสดงในเทอมของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด q และอุณหภูมิที่แตกต่างกันของของไหลร้อนและเย็น ดังนั้น

$$\dot{m}_h c_h = \frac{q}{T_{h1} - T_{h2}} \tag{3.14}$$

$$\dot{m}_c c_c = \frac{q}{T_{c1} - T_{c2}} \tag{3.15}$$



(ก) (ข)

รูปที่ 3.6 ลักษณะภาพการถ่ายเทอุณหภูมิ (ก) การไหลแบบขนาน (ข) การไหลแบบสวนทาง

ที่มา : Queen's University (2002)

แทนความสัมพันธ์เหล่านี้ลงในสมการ (3.13) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้

$$q = UA \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2})/(T_{h1} - T_{c1})]} \tag{3.16}$$

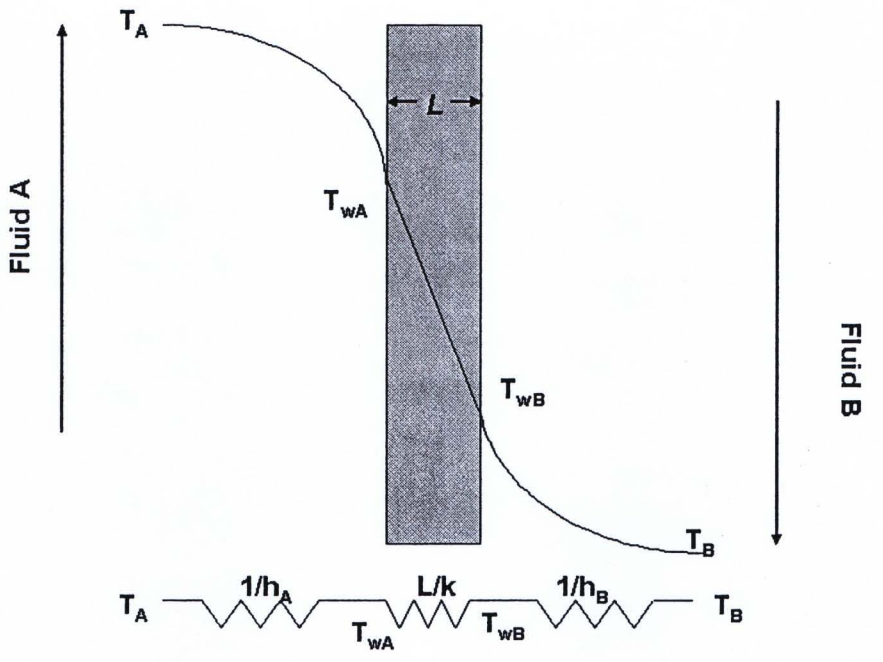
เปรียบเทียบระหว่างสมการ (3.16) และสมการ (3.6) จะได้

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2})/(T_{h1} - T_{c1})]} \tag{3.17}$$

อุณหภูมิที่เกิดค่าความแตกต่างนี้เรียกว่า ค่าผลต่างของอุณหภูมิล็อกเฉลี่ย (log-mean temperature difference; LMTD) รายละเอียดที่ปรากฏคือ ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างที่ปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่แตกต่าง ที่ปลายอีกด้านหนึ่งหารด้วยล็อกธรรมชาติของอัตราส่วนอุณหภูมิทั้งสองนี้ สำหรับผลที่ได้จากความสัมพันธ์ดังที่ได้แสดงไปข้างต้นนั้นเป็นค่าความสัมพันธ์ที่สามารถนำไปคำนวณหาค่าผลต่างของอุณหภูมิล็อคเฉลี่ย โดยมีสมมติฐานที่สำคัญสองประการคือ (1) ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าอุณหภูมิ (2) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าคงที่ ตลอดช่วงที่ไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ โดยปกติสมมติฐานของประการที่สองนี้สำคัญมากกว่าสมมติฐานประการที่หนึ่ง เพราะว่ามีผลต่อจุดทางเข้า ได้แก่ ความหนืดของของไหล และการเปลี่ยนแปลงของสภาพการนำความร้อน เป็นต้น

3.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient, U)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนรวม(Overall Heat Transfer Coefficient, U) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ ความเร็วในการไหล และอัตราการเกิดฟาวลิ่งของสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะสามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีลักษณะเฉพาะของแต่ละเครื่อง หรือแต่ละกระบวนการ การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในเชิงความร้อนคือการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลสองชนิด โดยความแตกต่างอุณหภูมิ และอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดวัดได้จากการทดลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ทราบค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสำหรับผนังราบ แสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของผนังราบ

ที่มา : J.P.Holman (1992)

สำหรับในกรณีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ประกอบด้วยท่อสองขนาดจัดซ้อนร่วมแกนเดียวกันนั้น พื้นที่ผิวด้านในนั้นมีค่าเป็น $2\pi r_i L$ ส่วนที่พื้นผิวด้านนอกจะมีค่าเป็น $2\pi r_o L$ แสดงในรูปที่ 3.8 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คิดจาก A_o ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวด้านนอกก็จะมีค่าเป็น

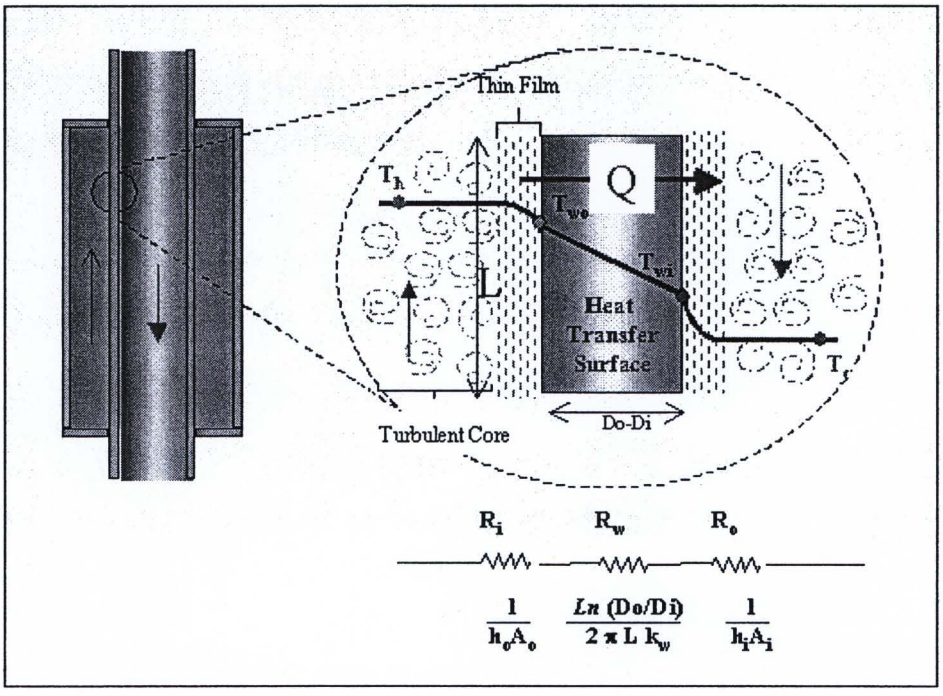
$$U_o A_o = \frac{1}{\frac{1}{\bar{h}_{c,i} A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{\bar{h}_{c,o} A_o}} \tag{3.18}$$

ที่ซึ่งหา U_0 จะได้

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{\bar{h}_{c,i} A_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{\bar{h}_{c,o} A_o}} \tag{3.19}$$

แต่ถ้าหากคิดจาก A_i ซึ่งเป็นพื้นที่ด้านในก็มีค่าเป็น

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{\bar{h}_{c,i}} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{A_i}{\bar{h}_{c,i} A_o}} \tag{3.20}$$



รูปที่ 3.8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น
ที่มา : Queen's University (2002)

หากทราบอุณหภูมิขาเข้า และขาออกของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังนี้

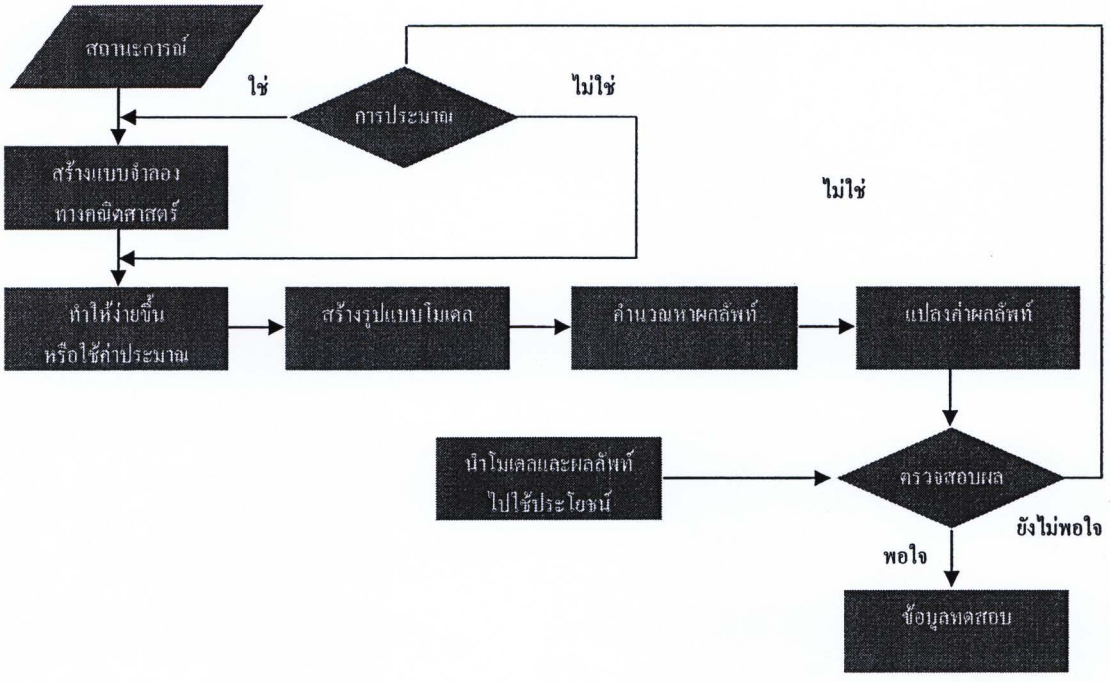
$$UA = \frac{m_h C_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})}{\Delta T_{lm}} = \frac{m_c C_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i})}{\Delta T_{lm}} \tag{3.21}$$

ถึงแม้ว่าการออกแบบที่ระมัดระวังและถูกต้องนั้นจะต้องคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแต่ละค่าก็ตาม แต่สำหรับการออกแบบขั้นต้นนั้นก็จะต้องมีค่าของ U โดยประมาณที่ใช้งานจริง ๆ ก่อนค่า U สำหรับการใช้งานต่าง ๆ นั้นได้มีผู้รวบรวมไว้ให้ในตาราง จะเห็นได้ว่ามีอยู่หลาย ๆ กรณีด้วยกันที่เกือบจะหาค่า U ได้จากความต้านทานจากการพาความร้อนที่ผิววัตถุกับของไหล

3.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ แบบจำลองที่ใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับการอธิบายพฤติกรรมต้นแบบของกระบวนการที่สนใจศึกษา ในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกระบวนการเริ่มต้นจากการศึกษาปัญหาของกระบวนการจริงที่ได้ศึกษา โดยทั้งนี้ทั้งนั้นต้องเลือกแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนและสามารถอธิบายกระบวนการได้ใกล้เคียงมากที่สุด หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ที่ยังไม่ทราบค่าในระบบ การจำลองโดยทั่วไปนั้นจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก ในการหาพฤติกรรมพลวัตของกระบวนการหรือค่าของตัวแปรขาออกกว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างไร ซึ่งเมื่อค่าตัวแปรขาเข้านั้นเปลี่ยนแปลงค่าไปจากเดิมสามารถทำได้โดยการพัฒนาแบบจำลองซึ่งใช้สมการทางคณิตศาสตร์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาเข้า กับตัวแปรขาออกดังวิธีการตามแผนผังรูปที่ 3.9 ได้อธิบายลำดับขั้นตอนการนำแบบจำลองมาใช้ในงานวิจัยนี้ที่ได้ใช้แบบจำลองหรือสมการในการประมาณการ (approximation) ของกระบวนการจริง

แบบจำลองสถานการณ์ของกระบวนการใช้สำหรับทำความเข้าใจกระบวนการ ที่ซึ่งอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ ที่บรรยายการเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรของกระบวนการสามารถใช้แบบจำลองได้ในงานหลายประเภทได้แก่ ใช้แบบจำลองในการทดสอบระบบควบคุมแบบต่างๆ การเลือกพารามิเตอร์ของตัวควบคุมผ่านการซิมูเลท (Simulation) ในระบบควบคุมหรือจากโมเดลของกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุม และการออฟติไมซ์กระบวนการ เพื่อปรับค่าสภาวะการดำเนินงานการผลิต ซึ่งไม่ต้องใช้กระบวนการจริงที่มีความยุ่งยากมากกว่า ค่าใช้จ่ายสูงกว่า และอาจก่อให้เกิดอันตรายได้

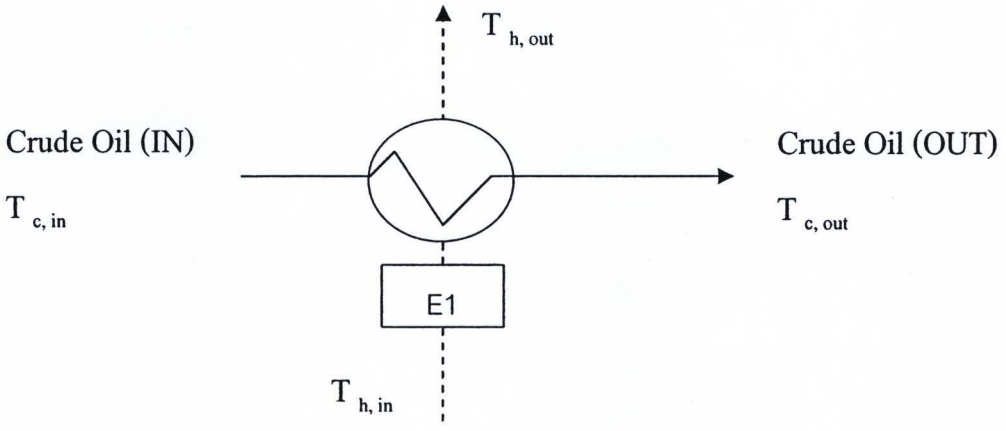


รูปที่ 3.9 แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย

แบบจำลองกระบวนการถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการ โดยในด้านส่วนของการปฏิบัตินั้นจะไม่สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้อย่างสมบูรณ์ครบถ้วนสำหรับใช้อธิบายกระบวนการจริง ซึ่งมีความซับซ้อนหรือปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จึงกำหนดสมมติฐานต่าง ๆ เพื่อพัฒนาแบบจำลองได้ง่าย แต่ยังคงสามารถเป็นตัวแทนของกระบวนการจริงได้ ทั้งนี้แบบจำลองกระบวนการที่พัฒนาขึ้นจะกำหนดสมมติฐานมากหรือน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานศึกษาวิจัย เช่น เพื่อทำความเข้าใจกระบวนการโดยไม่ต้องใช้กระบวนการจริง เพื่อทดสอบ ออกแบบรวมทั้งเลือกค่าพารามิเตอร์ เพื่อออกแบบระบบ และข้อจำกัดต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุม เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการดำเนินการผลิตให้ได้กำไรสูงสุด เป็นต้น

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นวิธีสำหรับแก้ไขปัญหา เพื่ออธิบายพฤติกรรมพลวัต ซึ่งสามารถนำแบบจำลองไปทำนายรูปแบบของอุณหภูมิขาออกของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่นำมาศึกษานี้ได้ โดยจะต้องอาศัยหลักการดุลสมการพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การดุลพลังงานของการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถอธิบายได้ในรูปที่ 3.10 ที่มีสายขาเข้าของน้ำมันดิบ $T_{c,in}$ (สายเย็นขาเข้า) ผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 โดยมีสารแลกเปลี่ยนความร้อน $T_{h,in}$ (สายร้อนขาเข้า) เข้าไป

ถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งได้น้ำมันดิบที่มีอุณหภูมิ $T_{c,out}$ (สายเย็นขาออก) และ $T_{h,out}$ (สายร้อนขาออก)



รูปที่ 3.10 แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1

ที่ซึ่งจากสมการ (3.6) หากกำหนดให้ในระบบไม่มีการสูญเสียพลังงานจะได้สมดุลพลังงานของสายร้อน และสายเย็นดังนี้

$$Q_c = F_c C_{p,c}(T_{c,out} - T_{c,in}) \tag{3.22}$$

$$Q_h = F_h C_{p,c}(T_{h,in} - T_{h,out}) \tag{3.23}$$

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (kW)

F = อัตราการถ่ายเทมวล (kg/s)

C_p = ค่าความจุความร้อน (kJ/kgK)

T = อุณหภูมิ (K)

ซึ่งสัญลักษณ์ตัวห้อย c และ h กำหนดให้เป็นของไหลสายเย็นและสายร้อนตามลำดับ

ที่ซึ่ง

$$F_c C_{p,c}(T_{c,out} - T_{c,in}) = UA\frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - (T_{c,in})}{\ln[(T_{h,in} - T_{c,out})/(T_{h,out} - T_{c,in})]} \quad (3.24)$$

และ

$$F_h C_{p,h}(T_{h,in} - T_{c,out}) = UA\frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - (T_{c,in})}{\ln[(T_{h,in} - T_{c,out})/(T_{h,out} - T_{c,in})]} \quad (3.25)$$

ที่ซึ่ง A คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน, F คืออัตราการไหล, C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ, ตัวห้อย c และ h เป็นพารามิเตอร์แสดงถึง สายเย็น (c) สายร้อน (h) ในส่วนของ in และ out เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงสายขาเข้า (in) สายขาออก (out)

การจำลองกระบวนการโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก การหาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างไร เมื่อตัวแปรขาเข้าเปลี่ยนแปลงค่าไปจากเดิม ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาออกหรือตัวแปรขาเข้า ซึ่งในงานวิจัยนี้เน้นตัวแปรที่เป็นอุณหภูมิ ขาออกของสายร้อนและสายเย็น โดยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้จากสมการนี้คือ

$$\begin{aligned} T_{c,out} = {} & \frac{[F_h C_{p,h}/F_c C_{p,c}](e^{[-UA/F_h C_{p,h}]([F_h C_{p,h}/F_c C_{p,c}]-1)} - 1)}{e^{[-UA/F_h C_{p,h}]([F_h C_{p,h}/F_c C_{p.c}]-1)} - [F_h C_{p,h}/F_c C_{p,c}]} T_{h,in} \\ & + \frac{(1-[F_h C_{p,h}/F_c C_{p,c}])e^{[-UA/F_h C_{p,h}]([F_h C_{p,h}/F_c C_{p,c}]-1)}}{e^{[-UA/F_h C_{p.h}]([F_h C_{p,h}/F_c C_{p,c}]-1)} - [F_h C_{p,h}/F_c C_{p,c}]} T_{c,in} \end{aligned} \quad (3.26)$$

ที่ซึ่ง

$$T_{h,out} = T_{h,in} - [F_c C_{p,c}/F_h C_{p,h}](T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (3.27)$$

ทั้งนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าในกระบวนการ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ในการทำนายรูปแบบสมการที่เหมาะสมในการเกิดฟาว ลิ่งบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงานในระบบที่นำมาศึกษาได้อีกด้วย

3.6 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Estimate parameter)

การสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ระบบด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กลายมาเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการดำเนินงานวิจัย สำหรับในกรณีที่ปัญหามีคำตอบหรือทางเลือกที่เป็นไปได้จำนวนมาก การวิเคราะห์หาคำตอบด้วยการจำลองสถานการณ์ไม่สามารถที่จะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากที่ผ่านมาเทคนิคการจำลองสถานการณ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินผลลัพธ์ อาทิเช่น จะเกิดอะไรขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับระบบ เป็นต้น โดยมีความคาดหวังว่าผลการประเมินที่ได้จะนำมาซึ่งการตัดสินใจหรือเลือกใช้อะไรมาแก้ปัญหาของระบบ

กระบวนการจำลองสถานการณ์ (Simulation) จำเป็นต้องมีขั้นตอนการหาคำตอบหรือผลลัทธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุด ระบบจะอาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินโดยการจำลองสถานการณ์ซึ่งถูกใช้เป็นตัววัดถึงความเหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้า (Input) และนำมาประมวลผลร่วมกับผลที่ได้จากการประเมินในครั้งที่ผ่านๆมา แล้วทำการกำหนดชุดของตัวแปรนำเข้าชุดใหม่เพื่อป้อนเข้าระบบของการจำลองสถานการณ์อีกครั้ง โดยกระบวนการทั้งหมดจะดำเนินไปจนกระทั่งระบบบรรลุเงื่อนไขของการหยุดหาคำตอบ ด้วยเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง เป็นต้นว่าได้ผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เบื้องต้น หรือบรรลุตามเงื่อนไขของระยะเวลาที่กำหนด

ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคใหม่ ๆ เข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคและวิธีการในการค้นหา (Search methodologies) ซึ่งปัจจุบันสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพโดยทั่วไปเทคนิคการหาคำตอบหรือผลลัทธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุด Simulation-optimization มักจะถูกนำไปใช้สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ เพื่อใช้คำนวณหาค่าของชุดตัวแปรตัดสินใจที่จะทำให้ได้ค่าผลลัพธ์ของระบบตามที่ต้องการ ตัวอย่างของการนำเทคนิคนี้ไปใช้ ได้แก่ ใช้เพื่อกำหนดและควบคุมกระบวนการ (Process Control Optimization) การออกแบบงานทางวิศวกรรม (Engineering Design Optimization) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการนำ Simulation-optimization ไปใช้ในงานด้านการจำลองทางภูมิศาสตร์ และงานพยากรณ์อื่น ๆ อีกด้วย

เทคนิคที่ใช้ในการหาคำตอบในกรณีที่ปัญหามีพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถที่จะประเมินผลในทุก ๆ คำตอบที่เป็นไปได้ เมื่อเป็นเช่นนี้ เทคนิคในกลุ่มนี้จึงจะมีการนำเอาวิธีการค้นหาคำตอบ (Search Method) แบบต่าง ๆ เข้ามาเพื่อช่วยในการทำออฟติไมซ์เซชั่นด้วย

สำหรับเทคนิคที่นำมาใช้ในการค้นหาคำตอบตัวแปรพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้ คือ เทคนิคการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search) เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้กับการทำออฟติไมซ์เซชั่นของปัญหาที่เซตคำตอบที่เป็นไปได้มีขนาดใหญ่มาก และเป็นไปไม่ได้ที่ประเมินทางเลือก หรือคำตอบทุก ๆ คำตอบในเซต ดังนั้นเทคนิคในกลุ่มนี้จึงต้องมีขั้นตอนที่นำเข้ามาช่วย เพื่อพิจารณาว่าในกลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้ คำตอบใดควรที่จะถูกนำไปประเมินผลด้วยการจำลองสถานการณ์ ซึ่งขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่จะอาศัยวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search)

โดยทั่วไปวิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบทีละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่อยู่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน ซึ่งคาดว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นกระบวนการเหล่านี้สามารถจำแนกขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 0 กำหนด $k = 0$ เลือกคำตอบเริ่มแรก (initial solution) จากเซตคำตอบที่เป็นไปได้ กำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็น $\theta^{(o)}$ แล้วทำการประเมินค่าผลลัพธ์ที่ได้จากคำตอบดังกล่าวโดยการจำลองสถานการณ์ (simulation) ผลที่ได้กำหนดให้มีค่าเป็น $X(\theta^{(0)})$

ขั้นตอนที่ 1 เลือกคำตอบที่เป็นไปได้ขึ้นมาอีก 1 คำตอบจาก $N(\theta^{(k)})$ ซึ่งเป็นเซตของคำตอบที่อยู่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน (neighborhood solution) กำหนดให้มีค่าเป็น $\theta^{(c)}$ แล้วทำการประเมินหาค่าผลลัพธ์ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์ (simulation) ค่าผลลัพธ์ที่ได้กำหนดให้มีค่าเป็น $X(\theta^{(c)})$

ขั้นตอนที่ 2 ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ (simulation) ของคำตอบ $\theta^{(c)}$ เป็นไปตามเงื่อนไขที่สามารถยอมรับได้ นั่นคือผลลัพธ์ที่ได้มานี้มีค่าที่ดีกว่าผลลัพธ์ในปัจจุบัน ให้กำหนดค่า $\theta^{(k+1)} = \theta^{(c)}$ แต่ถ้าไม่เป็นเช่นนั้น ให้กำหนดค่า $\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)}$

ขั้นตอนที่ 3 ถ้ากระบวนการค้นหาคำตอบ (Search Method) บรรลุตามเงื่อนไขของการหยุดการค้นหา (stopping criterion) ให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบ และถือว่าคำตอบที่ดีที่สุดคือ $\theta^{(k)}$ ถ้าไม่เช่นนั้น ให้กำหนด $k = k+1$ แล้วย้อนกลับไปทำที่ขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search) ที่ได้รับการตีพิมพ์อยู่ในปัจจุบันนั้นมีความหลากหลายและมีความแตกต่างกัน เนื่องจากวิธีการในการระบุของจุดคำตอบใกล้เคียงที่อยู่ในขอบเขตการเคลื่อนที่ของการค้นหา (neighborhood solution) วิธีการที่ใช้ในการเลือกคำตอบเพื่อนำมาทำการประเมินโดยการจำลองสถานการณ์ (simulation) สำหรับเงื่อนไขของการยอมรับ (candidate selection method) ว่าผลการประเมินที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีการปรับปรุงที่ดีขึ้น (acceptance criterion) และเงื่อนไขที่ใช้เพื่อหยุดการค้นหา (stopping criterion)

จากวิธีการที่กล่าวมานั้นเป็นวิธีการที่ได้ความนิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากวิธีการไม่ซับซ้อนมากนักและสามารถหาคำตอบได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม วิธีการค้นหาคำตอบโดยใช้เทคนิคนี้ยังมีอุปสรรคที่สำคัญคือ เรื่องของเวลาซึ่งใช้ในการค้นหาคำตอบที่ค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะได้รับการพัฒนาให้สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วก็ตาม ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วเทคนิคการหาคำตอบหรือผลลัทธ์ที่ดี และเหมาะสมที่สุดนั้นอาศัยหลักการเดียวกัน คือ การใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ เพื่อการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยความแตกต่างระหว่างเทคนิคมักเกิดขึ้นจากความแตกต่างของวิธีการที่ใช้เพื่อการหาจุดคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งหากต้องการจะนำเทคนิคนี้ไปใช้งานจึงยังมีความจำเป็นที่จะต้องให้ความสำคัญกับขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง ส่วนในขั้นตอนของการหาคำตอบที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา หรือตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ค่าที่ใช้ในการบ่งบอกว่าค่าที่ทำการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search) นั้น เป็นค่าตัวแปรที่อยู่ในช่วงเหมาะสม ซึ่งทำให้ค่าแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองมีค่าความใกล้เคียงกันมากที่สุด ใช้วิธีการเทียบค่าความต่างโดยอาศัยค่า Root Mean Square Error (RMSE) เป็นค่าที่บ่งบอกความแม่นยำ ความเที่ยงตรงของการทำนาย หากค่าที่ได้จากการคำนวณ RMSE มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง (obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงมากนั้นเอง RMSE คำนวณได้จากสมการ (3.28)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - predict)^2}{N}} \tag{3.28}$$

เมื่อ

obs คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากการจำลอง

predict คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากข้อมูลโรงงาน

N คือ จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด