

การจำลองการเกิดตะกั่วในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใน
หน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ

นายเอนก ประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

SIMULATION OF FOULING FORMATION
IN HEAT EXCHANGER NETWORK IN ATMOSPHERIC DISTILLATION UNIT

Mr. Anake Prasit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองการเกิดตะกอนในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยน
ความร้อนในหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ

โดย

นายเอนก ประสิทธิ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กษิติศ หนูทอง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

เอนก ประสิทธิ์ : การจำลองการเกิดตะกรันในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ (SIMULATION OF FOULING FORMATION IN HEAT EXCHANGER NETWORK IN ATMOSPHERIC DISTILLATION UNIT)
 อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. สุรเทพ เขียวหอม, 83 หน้า.

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันเพื่ออุ่นน้ำมันดิบเพื่อให้ น้ำมันดิบมีอุณหภูมิเหมาะสมต่อกระบวนการกลั่น หลังจากการดำเนินการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไประยะเวลาหนึ่งตะกรันจะสะสมขึ้นบนพื้นผิว ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงอย่างมาก ดังนั้นการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นประจำเพื่อลดตะกรันจึงเป็นสิ่งจำเป็น

งานวิจัยนี้ศึกษาการก่อตัวของตะกรันซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบลำดับที่สองของหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ โดยแบบจำลองมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียลและแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแตกต่างกัน ซึ่งแบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E13A/B มีความแม่นยำที่สุด รองลงมาคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011, 41E023, 41E010, 41E024A/B และ 41E012 ตามลำดับ ความแตกต่างระหว่างค่าซึ่งทำนายจากแบบจำลองและข้อมูลจากโรงงานจริงเนื่องมาจากองค์ประกอบหลากหลายชนิดของสายน้ำมันดิบและสัดส่วนองค์ประกอบและความเข้มข้นแตกต่างกันออกไป จากแบบจำลองทำให้พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงมากที่สุด รองลงไปได้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011, 41E012, 41E024A/B, 41E023 และ 41E010 ตามลำดับทำให้มีผลให้ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องสูญเสียให้กับระบบมีค่ามากยิ่งขึ้นตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี...
 สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี...
 ปีการศึกษา. 2554.....

ลายมือชื่อนิติ.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5171481321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FOULING / HEAT EXCHANGER / DISTILLATION / CRUDE OIL

ANAKE PRASIT : SIMULATION OF FOULING IN HEAT EXCHANGER NETWORK IN ATMOSPHERIC DISTILLATION UNIT.

ADVISOR : ASST.PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, 83 pp.

Heat exchanger are widely used in the oil refining industry to preheat crude oil to the temperature suitable for the refining process. After operating the heat exchanger for a certain period of time, fouling will start accumulate on its surface. Consequently, the heat transfer efficiency will decrease substantially. Thus, the regular cleaning to reduce fouling is required.

This research studies the fouling formation which affects heat transfer efficiency. The mathematical model is developed to predict the fouling formation rate of second crude preheat train network of atmospheric distillation unit. The model obtained is exponential function. Each heat exchanger has its own suitable constant parameter. The most accurate model to the least accurate model can be ordered as 41E13A/B, 41E011, 41E023, 41E010, 41E024A/B and 41E012 respectively. The discrepancy between the data obtained from the developed model and the actual data is resulted from the variation of crude oil that has various different components. The model shows that heat transfer coefficient reduction can be ordered from the most to the least as 41E013A/B, 41E011, 41E012, 41E024A/B, 41E023 and 41E010 respectively. Hence, these cause energy loss from the most to the least respectively.

Department : Chemical Engineering..... Student's Signature

Field of Study : Chemical Engineering..... Advisor's Signature

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้โดยได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความรู้ ความกรุณา ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแนวทางแก้ไขปัญหอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ทั้ง 3 ท่าน ซึ่งประกอบไปด้วยประธานกรรมการ ผศ.ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์, กรรมการ ผศ.ดร. กษิติศ หนูทอง และ ผศ.ดร.วรพล เกียรติกิตติพงษ์ ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ข้อคิดคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นแหล่งให้ศึกษาวิชาความรู้ ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ เอื้อเพื่อเอกสาร และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานให้แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ข้าพเจ้าขอขอบคุณบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเพื่อข้อมูลต่าง ๆ ที่ทำให้งานวิจัยของข้าพเจ้าสำเร็จลุล่วงไปได้

ท้ายที่สุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฏ
 บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ.....	4
2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	5
2.3 การถ่ายเทความร้อน.....	7
2.4 ตะกั่ว.....	12
2.5 หน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศ.....	20
2.6 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	22
3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	29
4.1 การศึกษารูปแบบการเกิดตะกั่วที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน.....	29
4.2 รวบรวมข้อมูลจากโรงงานจริง.....	33

บทที่	หน้า
4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	38
4.4 การหาค่าพารามิเตอร์.....	39
4.5 การสอบทานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	41
5. ผลการดำเนินการวิจัย.....	44
5.1 การสร้างแบบจำลองสมการการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เหมาะสม กับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	44
5.2 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	58
6. สรุปผลการวิจัย.....	69
รายการอ้างอิง.....	73
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก: คุณสมบัติของน้ำมันดิบ.....	74
ภาคผนวก ข: การทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	77
ภาคผนวก ค: วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random search).....	80
ภาคผนวก ง: การประชุมวิชาการ.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	83

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง.....	32
4.2	สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010.....	33
4.3	สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011.....	33
4.4	สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E012.....	33
4.5	สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B.....	34
4.6	สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E023.....	34
4.7	สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B.....	34
5.1	เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน 41E010 ที่ค่าคงที่ตัวแปร $\alpha = 200.52 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.71$ และ γ $= 1.06 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	47
5.2	เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน 41E011 ที่ค่าคงที่ตัวแปร $\alpha = 76.71 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.69$ และ γ $= 9.85 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	49
5.3	เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน 41E012 ที่ค่าคงที่ตัวแปร $\alpha = 270.81 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.60$ และ γ $= 9.60 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	51
5.4	เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน 41E013A/B ที่ค่าคงที่ตัวแปร $\alpha = 149.70 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.61$ และ $\gamma = 9.68 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	53
5.5	เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน 41E023 ที่ค่าคงที่ตัวแปร $\alpha = 214.81 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.00$ และ γ $= 9.60 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	55
5.6	เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน 41E024A/B ที่ค่าคงที่ตัวแปร $\alpha = 99 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.32$ และ γ $= 9.60 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	57
5.7	แสดงผลอัตราการก่อตัวของตะกอนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เปรียบเทียบระหว่างโรงงานจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง.....	58

ตารางที่		หน้า
5.8	แสดงผลอัตราการก่อตัวของตะกอนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลชุดที่ 2 ของโรงงานจริงกับค่าที่ได้จาก แบบจำลอง.....	65

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แผนภาพข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ.....	4
ภาพที่ 2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อที่ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ.....	5
ภาพที่ 2.3 แสดงทิศทางการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อตัดแปลงมาจาก J.P.Holman(1992).....	6
ภาพที่ 2.4 การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสองกลับ(Two Tube Pass) ตัดแปลงมาจาก J.P.Holeman(1992).....	6
ภาพที่ 2.5 การนำความร้อนผ่านผนังหนา Δx	8
ภาพที่ 2.6 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน.....	8
ภาพที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา.....	9
ภาพที่ 2.8 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น.....	10
ภาพที่ 2.9 ลักษณะการเกิดตะกรันที่บริเวณผิวท่อด้านในและด้านนอก.....	11
ภาพที่ 2.10 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันตามเวลา.....	13
ภาพที่ 2.11 ลักษณะสมบัติความเข้มข้นของเกลือในของไหล เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ.....	14
ภาพที่ 2.12 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันจากการตกตะกอนและการตกผลึกร่วม.....	15
ภาพที่ 2.13 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันแสดงให้เห็นช่วงเวลาพักตัวสำหรับเหล็กกล้า คาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และทองเหลือง.....	17
ภาพที่ 2.14 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันที่ความเร็วของไหลต่าง ๆ แสดงให้เห็นการ เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	18
ภาพที่ 2.15 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลง ตามเวลา.....	19
ภาพที่ 2.16 หน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศ.....	22
ภาพที่ 2.17 แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย.....	23
ภาพที่ 4.1 แผนภาพข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ.....	32
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010.....	35
ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบ	

	หน้า
ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011.....	35
ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E012.....	36
ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B.....	36
ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E023.....	37
ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B.....	37
ภาพที่ 4.8 แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010.....	42
ภาพที่ 5.1 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 41E010.....	46
ภาพที่ 5.2 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E010.....	46
ภาพที่ 5.3 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 41E011.....	48
ภาพที่ 5.4 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E011.....	48
ภาพที่ 5.5 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 41E012.....	50
ภาพที่ 5.6 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E012.....	50
ภาพที่ 5.7 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 41E013A/B.....	52
ภาพที่ 5.8 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E013A/B.....	52
ภาพที่ 5.9 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 41E023.....	54
ภาพที่ 5.10 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E023.....	54
ภาพที่ 5.11 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 41E024A/B.....	56
ภาพที่ 5.12 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E024A/B.....	56
ภาพที่ 5.13 แสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของข้อมูลชุดที่ 2 41E010.....	59
ภาพที่ 5.14 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E010.....	59
ภาพที่ 5.15 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของข้อมูลชุดที่ 2 41E011.....	60
ภาพที่ 5.16 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E011.....	60
ภาพที่ 5.17 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของข้อมูลชุดที่ 2 41E012...	61
ภาพที่ 5.18 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E012.....	61
ภาพที่ 5.19 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของข้อมูลชุดที่ 2	

	หน้า
41E013A/B.....	62
ภาพที่ 5.20 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E013A/B.....	62
ภาพที่ 5.21 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของข้อมูลชุดที่ 2 41E023..	63
ภาพที่ 5.22 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E023.....	63
ภาพที่ 5.23 กราฟแสดงอัตราการเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของข้อมูลชุดที่ 2 41E024A/B.....	64
ภาพที่ 5.24 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E024A/B.....	64
ภาพที่ 5.25 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความ ร้อนเปรียบเทียบกับแผนการกลั่นในอนาคต.....	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
Q_{cond}	อัตราการนำความร้อน	kJ/h
k	ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง	kJ/m h K
dT/dX	เกรเดียนท์ของอุณหภูมิในทิศทางการนำความร้อน	K/m
Q_{conv}	อัตราการพาความร้อน	kJ/h
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	kJ/m h K
A	พื้นที่ผิวของการพาความร้อน	m ²
T_w	อุณหภูมิของพื้นผิว	K
T_{∞}	อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว	K
R_f	ค่าความต้านทานตะกรันรวม,	m ² h K/kJ
U_f	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ สถานะที่ผิวท่อมี่ตะกรัน	kJ/m ² h K
U_c	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของ สถานะที่ผิวท่อยังไม่มีตะกรัน	kJ/m ² h K
$R_f(t)$	ค่าคงที่ของการเกิดตะกรัน(เวลา)	m ² h K/kJ
$R_{p,c}$	ค่าคงที่ของการเกิดตะกรัน	m ² h K/kJ
t	เวลา	day
$t_{p,c}$	ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดตะกรัน	day
n	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น	
$\frac{dR_f}{dt}$	อัตราการก่อตัวของตะกรัน(Fouling rate)	m ² h K/h kJ
Re	Reynolds number	
R	Universal gas constant	kJ/kg mol K
T_f	อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม	K
α	ค่าคงที่ตัวแปร	

คำอธิบายสัญลักษณ์

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
θ	ค่าคงที่ตัวแปร	
λ	ค่าคงที่ตัวแปร	
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	kJ
m	อัตราการถ่ายเทมวล	kg/s
C_p	ค่าความจุความร้อน	kJ/kg K
T	อุณหภูมิ	K

คำอธิบายคำย่อ

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
obs	ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate) จากข้อมูลจริง	-
predict	ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate) จากแบบจำลอง	-
N	จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ธุรกิจอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและปิโตรเลียม เป็นอุตสาหกรรมหนักที่มีความสำคัญต่อประเทศเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ นำรายได้เข้าประเทศและลดการนำเข้าผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้ ธุรกิจโรงกลั่นน้ำมันจัดว่าเป็นธุรกิจปิโตรเคมีและปิโตรเลียมที่สำคัญประเภทหนึ่ง

โรงกลั่นน้ำมันไออาร์พีซี ซึ่งตั้งอยู่ที่จังหวัดระยองทำการผลิตน้ำมันและผลิตภัณฑ์จากน้ำมันต่าง ๆ โดยเริ่มทำการผลิตตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 ซึ่งรับน้ำมันดิบจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อกลั่นแยก กำจัดสารปนเปื้อน และปรับปรุงคุณภาพ จนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐานที่ต้องการ โดยน้ำมันจะถูกแยกภายใต้ความดันบรรยากาศก่อนจนได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงต่าง ๆ

ในการกลั่นที่ความดันบรรยากาศ จะแยกน้ำมันส่วนที่เบาออกทางด้านบนของหอกลั่นส่วนผลิตภัณฑ์ที่หนักจะแยกออกด้านล่างของหอกลั่นตามลำดับ ซึ่งเรียงผลิตภัณฑ์ตามลำดับได้ดังนี้ แอลพีจี ไลท์เนพทา เฮฟวีเนพทา เคโรซีน ไลท์แก๊สออยล์ และส่วนที่หนักที่สุดคือ เอทีบี

ในการที่จะทำการกลั่นน้ำมันดิบจะต้องให้ความร้อนถึงจุดที่เพียงพอให้น้ำมันดิบที่ส่งเข้าในหอกลั่น(Column) เกิดการระเหยตัวขึ้นไปในชั้นต่างๆภายในหอกลั่นได้นั้น ความร้อนที่ได้จากกระบวนการผลิตจะถูกนำกลับมาให้ความร้อนกับน้ำมันดิบโดยผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบก่อนเข้าเตาเผา (Crude Charge Heater) ดังนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญมากในการกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ

ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเกิดตะกรัน(Fouling) โดยตะกรันจะไปลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Rate) ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงจึงมีผลต่อกระบวนการผลิตส่งผลให้ต้องการพลังงานทดแทนมากขึ้นและอาจถึงขั้นต้องลดปริมาณการผลิตหรือหยุดการผลิตเพื่อนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาทำการบำรุงรักษา (Maintenance) และทำความสะอาด (Cleaning) ฉะนั้นปัญหาตะกรันเป็นปัญหาที่สำคัญมากในกระบวนการกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาลักษณะการเกิดตะกรัน(Fouling)และอัตราการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2 (Crude Second Preheat Train) ของหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Distillation Unit)
2. ศึกษาผลกระทบของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2 ของหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ
3. สร้างแบบจำลองทำนายการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2 ของหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาผลตามเวลาของการก่อตัวของตะกรันในขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2 ของหน่วยกลั่นภายใต้บรรยากาศ
2. ศึกษาผลกระทบของตะกรันที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematic Model) เพื่อทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันในขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถจำลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเกิดตะกรันในขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. ได้ข้อมูลการเกิดและอัตราการก่อตัวของตะกรันตามสภาพการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบลำดับที่ 2 ของหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ
3. ได้ข้อมูลพฤติกรรมและการดำเนินไปของการเสื่อมถอยของสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบลำดับที่ 2 ของหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศอันเป็นผลมาจากตะกรัน
4. ได้แบบจำลองการทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันกับสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อสามารถทำนายช่วงระยะเวลาการผลิตจนถึงช่วงหยุดการผลิต (Shut down) เพื่อทำการซ่อมบำรุง (Maintenance) เพื่อให้สามารถวางแผนการหยุดผลิตและการซ่อมบำรุงได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(Mathematic model)ของการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. ทำการรวบรวมข้อมูลการดำเนินการ(Operating data) ของหน่วยกลั่นภายใต้บรรยากาศ
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2
4. ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับข้อมูลจากการผลิตจริง
5. ทำการปรับปรุงแบบจำลองให้เป็นตัวแทนจากข้อมูลการผลิตจริง
6. สรุปผลการวิจัย
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

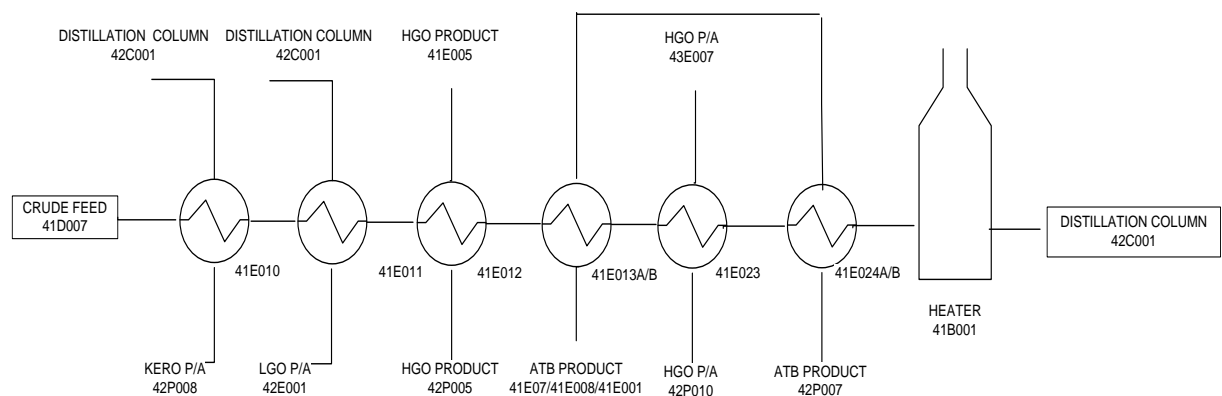
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการอุ่นน้ำมันดิบ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ การถ่ายเทความร้อน อัตราการเกิดตะกรัน กระบวนการกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ และรูปแบบสมการการเกิดตะกรันบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.1 กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude Preheat Train)

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบคือ ขั้นตอนแรกที่จะนำน้ำมันดิบเข้ายังหอกลั่น เพื่อทำการกลั่นให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามคุณสมบัติที่ต้องการ ทั้งนี้ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการกลั่นนั้นต้องนำน้ำมันดิบผ่านไปยังกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ(Crude Preheat Train) เพื่อเป็นการอุ่นให้ความร้อนกับน้ำมันให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นที่จะใช้สำหรับการกลั่นต่อไป ตามข้อกำหนดของการดำเนินงานของกระบวนการกลั่นที่ออกแบบไว้ โดยการนำน้ำมันดิบผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อให้ น้ำมันดิบแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่กลั่นได้จากหอกลั่น ซึ่งกำหนดให้ค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300-350 °C (ทั้งนี้ขึ้นกับคุณภาพของน้ำมันดิบ และผลผลิตที่ต้องการ)

สำหรับระบบข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบลำดับที่ 2 ที่ยกนำมาศึกษาประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 6 เครื่อง ทั้งนี้ข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการดำเนินงานที่ต่อเนื่องซึ่งกันและกัน โดยแสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบลำดับที่ 2 ดังแสดงดังรูป 2.1 เริ่มจากการส่งน้ำมันดิบ (Crude Oil) ผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010 ถึง 41E024A/B ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แผนภาพข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา (อ้างอิงจาก ข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน))

2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายประเภทลักษณะที่เหมือนกันส่วนใหญ่ที่ใช้ในระบบงานทางวิศวกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน หรือแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่เป็นของไหลร้อนและของไหลเย็นซึ่งทั้งส่วนนี้แยกจากกันโดยมีผนังกัน

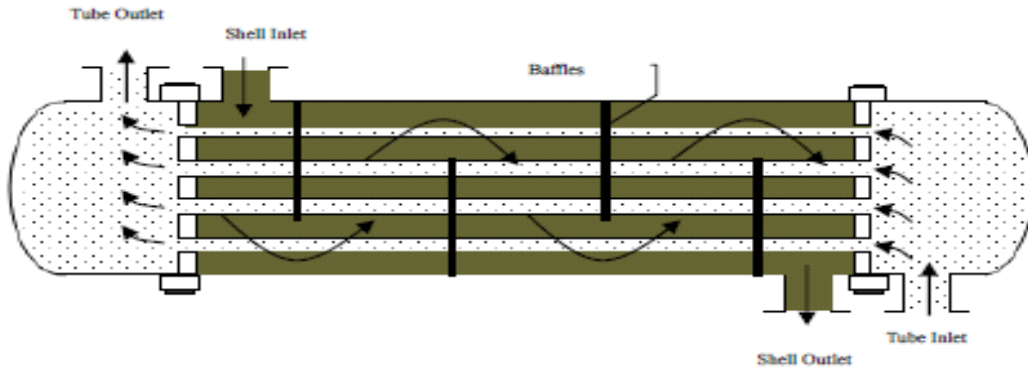
ในงานวิจัยนี้อ้างอิงข้อมูลจากกระบวนการจริงที่ได้จากหน่วยอุ่นน้ำมันดิบที่ 2 ของหน่วยกลั่นภายใต้บรรยากาศของบริษัทไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน) โดยระบบอุ่นน้ำมันดิบใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ(Shell and Tube Exchanger) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายและพบเห็นบ่อย โดยส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้งานในระบบของการถ่ายเทความร้อนของโรงงานอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ได้แก่ กระบวนการหล่อเย็นได้ทั้งของเหลว(Liquid) และแก๊ส(Gas) การควบแน่นด้วยไอน้ำ (Steam Condensing) การเตรียมอุณหภูมิ หรือการอุ่นร้อน(Pre-heating) การอนุรักษ์พลังงานทางความร้อน (Thermal Energy Conservation Effort) โดยการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ(Heat recovery) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อที่ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ
(อ้างอิงจาก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของบริษัทไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน))

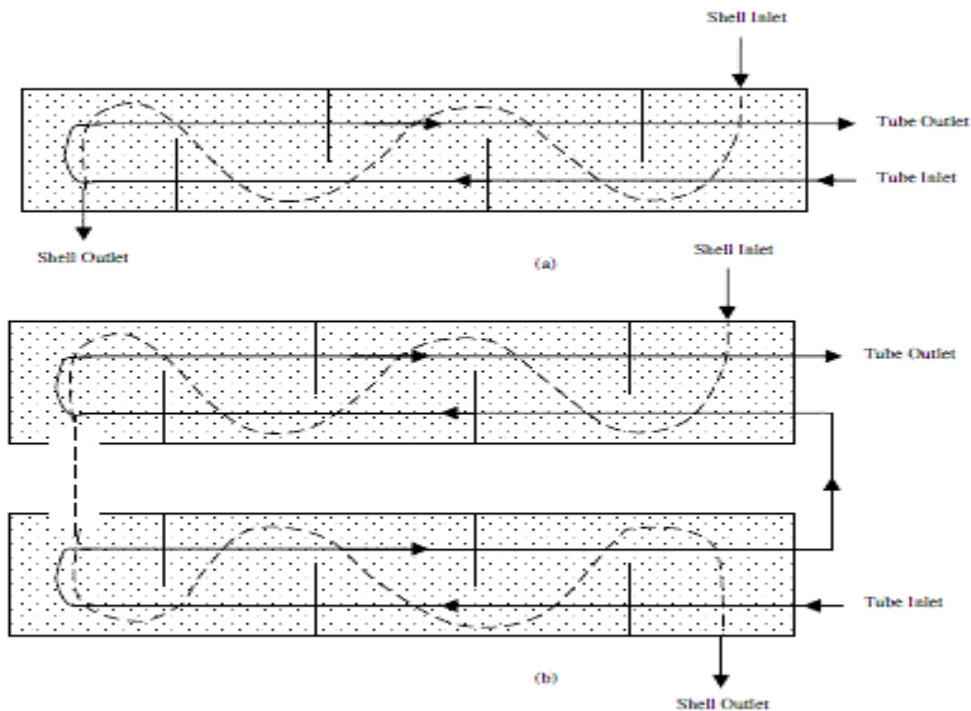
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากซึ่งเกิดจากการวางกลุ่มท่อ โดยกลุ่มท่อเหล่านี้จะบรรจุในกรอบทรงกระบอกที่เรียกว่าเชลล์ (Shell) ของไหลชนิดแรกไหลในกลุ่มท่อ ส่วนของไหลชนิดที่สองไหลรอบกลุ่มท่อที่อยู่ภายในเชลล์เส้นทางการไหลภายในท่อ (Tube) ประกอบด้วยท่อนอกซึ่งปลายข้างหนึ่งมีฝาปิดอยู่และท่อ

ในซึ่งสอดอยู่ในส่วนของท่อนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ของไหลภายในท่อจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในเชลล์ ในระหว่างที่ของไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอก



รูปที่ 2.3 แสดงทิศทาง การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อตัดแปลงมาจาก: J.P.Holman (1992)

ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบสองกลับ (Two Tube Passes) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งหมายความว่าของเหลวจะไหลภายในท่อในทิศทางหนึ่งและไหลกลับในอีกทิศทางหนึ่งด้านหัวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทางปลายซ้ายมือจะติดตั้งตัวแยก เพื่อแยกของเหลวที่ไหลเข้าและไหลกลับมา ตัวกั้น (Baffles) จะถูกวางในเปลือก เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านท่อหลาย ๆ ครั้ง ก่อนที่จะออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2.4 การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสองกลับ (Two Tube Passes) ตัดแปลงมาจาก: J.P.Holman (1992)

2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทของพลังงานจากตัวกลางหนึ่งไปสู่ตัวกลางหนึ่งเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิของตัวกลางทั้งสอง โดยการถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดได้สามทางคือ การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) โดยทั้งสามทางที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้นต้องเกิดเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในงานวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้จะเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนใน 2 ทางคือ การนำความร้อนและการพาความร้อน

2.3.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทอนุภาคของสารที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคใกล้เคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า การนำความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยที่การนำความร้อนในของเหลวและก๊าซเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกัน (Collisions) และการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลในขณะที่โมเลกุลเหล่านั้นมีการเคลื่อนที่ ส่วนการนำความร้อนในของแข็งเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นของโมเลกุล (Vibrations of Molecules) ในแลตทิซ (Lattice) และการขนถ่ายพลังงานโดยอิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons)

ในกรณีการนำความร้อนถ้าอุณหภูมิที่ทุก ๆ จุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่โดยไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาเรียกว่าการนำความร้อนที่สภาวะคงที่ (Steady state heat conduction) ในกรณีนี้ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่ ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิของวัตถุทั้งชิ้นหรืออุณหภูมิของวัตถุส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อัตราการนำความร้อนของวัตถุย่อมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในกรณีนี้เรียกว่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady state heat conduction) โดยทั่วไปการนำความร้อนที่เกิดชัดเจนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถถือได้ว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงที่และปัจจัยสำคัญที่มีส่วนกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือผลต่างของอุณหภูมิ มิติรูปร่างของวัตถุและคุณสมบัติของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงถึงการนำความร้อนในสภาวะคงที่ผ่านผนังซึ่งมีความหนา $\Delta X = L$ และพื้นที่ผิว A และผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาของผนังเป็น $\Delta T = T_2 - T_1$ ส่วนรูปที่ 2.2 แสดงทิศทางการนำความร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาและพื้นที่การนำความร้อนเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของตัวกลาง เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_{cond} = -kA \Delta T \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (2.1)$$

ในกรณีที่ $\Delta X \rightarrow 0$ สมการ (2.1) สามารถทำให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยได้เป็น

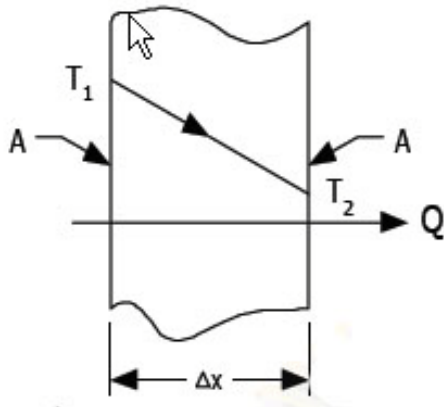
$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dX} \quad (2.2)$$

Q_{cond} = อัตราการนำความร้อน (kJ/h)

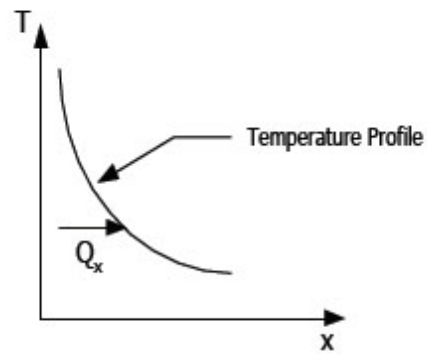
k = ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง (kJ/h m K)

dT/dX = เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางการนำความร้อน (K/m)

สมการที่ (2.2) เรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier 's Law of Heat Conduction)



รูปที่ 2.5 การนำความร้อนผ่านผนังหนา Δx
ร้อน

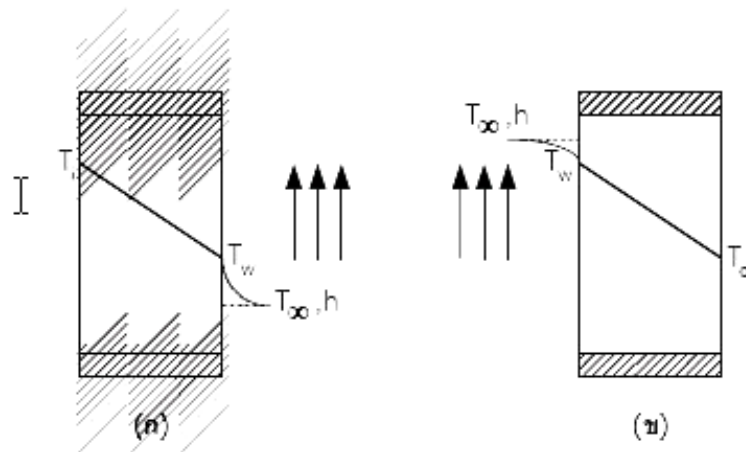


รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน

2.3.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างผิวของแข็งและของเหลวหรือก๊าซที่อยู่ติดกับพื้นผิวนั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนแบ่งออกเป็น การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) และการพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection or Natural convection)

อัตราการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ และสามารถแสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และสามารถเขียนสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ได้ดังสมการ



รูปที่ 2.7 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (ก) $T_w > T_\infty$ (ข) $T_w < T_\infty$

$$Q_{conv} = hA(T_w - T_\infty) \quad (2.3)$$

$$Q_{conv} = hA(T_\infty - T_w) \quad (2.4)$$

โดยที่

Q_{conv} = อัตราการพาความร้อน (kJ/h)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (kJ/h m² K)

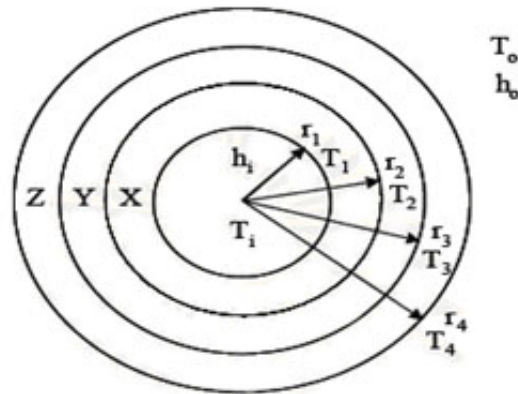
A = พื้นที่ผิวของการพาความร้อน (m²)

T_w = อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

T_∞ = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว (K)

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นไม่ใช่คุณสมบัติของของไหล แต่เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนเช่นรูปแบบการไหล (แบบลามินาร์ เทอบิวเลนซ์ หรือทรานซิชัน) รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งตามผิววัตถุ กลไกการพาความร้อนเช่น การพาความร้อนแบบอิสระและการพาความร้อนแบบบังคับ

2.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat-transfer coefficient)



รูปที่ 2.8 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น

เมื่อพิจารณาท่อดังแสดงในรูปที่ 2.4 ท่อด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลร้อน T_i อีกด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลเย็น T_o ค่าการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} q &= h_i A_i (T_i - T_1) = 2\pi\pi_x L \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_1/r_2)} = 2\pi\pi_y L \frac{(T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)} \\ &= 2\pi 2_z L \frac{(T_3 - T_4)}{\ln(r_4/r_3)} = h_o A_o (T_o - T_4) \end{aligned} \quad (2.5)$$

สามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อน (2.5) ใหม่ได้เป็น

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{\left(\frac{1}{h_i A_i} \right) + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\pi_x L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi\pi_y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi\pi_z L} + \left(\frac{1}{h_o A_o} \right)} \quad (2.6)$$

หรือ

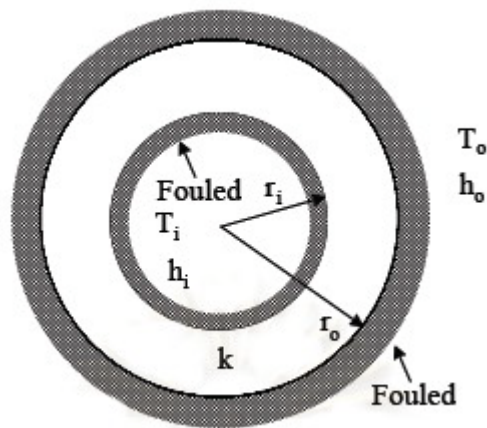
$$q = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) เราสามารถเขียนค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบได้เป็น

$$R = \left(\frac{1}{h_i A_i} \right) + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi\pi_x L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi\pi_y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi\pi_z L} + \left(\frac{1}{h_o A_o} \right) \quad (2.8)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้เป็นดังนี้

$$q = UA(T_i - T_o) = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.9 ลักษณะการเกิดตะกรันที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก

จากสมการที่ 2.7 สมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของพื้นที่ผิวท่อด้านนอกพบว่าจะมีค่า

$$U_o = \frac{I}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_2/r_1)}{2\pi\pi_A L} + \frac{A_o \ln(r_3/r_2)}{2\pi\pi_B L} + \frac{A_o \ln(r_4/r_3)}{2\pi\pi_C L} + \left(\frac{I}{h_o}\right)} \quad (2.10)$$

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) และค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{I}{U_o A_o} \quad (2.11)$$

ในกรณีที่มีตะกรันเกิดขึ้นที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอกต่อดังรูปที่ 2.5 ค่าความร้อนในกรณีที่มีตะกรันนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_f = \left(\frac{I}{h_i A_i}\right) + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi\pi k} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \left(\frac{I}{h_o A_o}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ

i และ o = สภาวะที่เกิดตะกรันด้านในและด้านนอกตามลำดับ

R_{fi}, R_{fo} = ค่าความต้านทานตะกรันที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ

สมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในสภาวะอันเนื่องมาจากการเกิดตะกรันที่ผิวได้เป็นดังนี้

$$\frac{I}{U_{f,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi\pi k} + \left(\frac{I}{h_o}\right) + R_f$$

(2.13)

เมื่อ

ตัวห้อย i และ o = สภาวะที่เกิดตะกรันด้านในและด้านนอก ตามลำดับ

$R_f, R_{f,i}, R_{f,o}$ = ค่าความต้านทานตะกรันรวมและค่าความต้านทานตะกรันที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในสถานะที่ไม่มีตะกรันเกิดขึ้นที่ผิวท่อจะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะหาได้จากสมการ

$$U_{c.o} = \frac{I}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi\pi k} + \left(\frac{I}{h_o}\right)} \quad (2.14)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{U_{c.o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi\pi k} + \left(\frac{I}{h_o}\right) \quad (2.15)$$

เมื่อ

c, i และ o = สถานะที่ไม่มีมีตะกรัน, ด้านในและด้านนอกตามลำดับ

เมื่อนำสมการที่ (2.15) ลบด้วยสมการที่ (2.13) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$R_f = \frac{I}{U_f} - \frac{I}{U_c} \quad (2.16)$$

เมื่อ

R_f = ค่าความต้านทานตะกรันรวม ($m^2 h K$)/kJ

U_f = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ผิวท่อมี่ตะกรัน ($kJ/m^2 h K$)

U_c = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ผิวท่อยังไม่มีตะกรัน ($kJ/m^2 h K$)

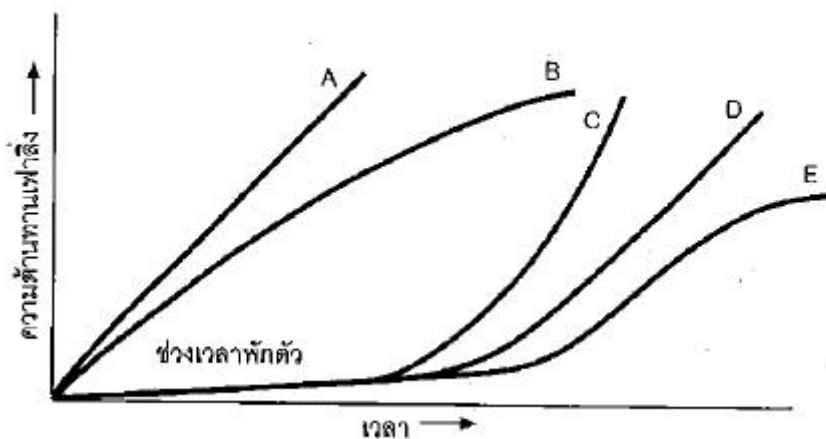
จากสมการที่(2.16)ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานตะกรันรวมสามารถหาได้จากการนำส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ผิวท่อมี่ตะกรันลบกลับส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ยังไม่เกิดตะกรัน

2.4 ตะกรัน (Fouling)

ตะกรันเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(Heat Exchanger) เนื่องจากเมื่อเกิดตะกรันขึ้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง

การสังสมของความต้านทานตะกรันอาจดำเนินไปในหลายลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เส้นกราฟ A แสดงการเริ่มต้นจากผิวที่มีสภาพใหม่ไม่มีความต้านทานตะกรันเลย จากนั้นจึงค่อย ๆ ก่อตัวด้วยอัตราที่คงที่ เส้นกราฟ B แสดงในกรณีที่ความต้านทานตะกรันพัฒนาไปด้วยอัตราคงที่จนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง

ส่วนเส้นกราฟในกลุ่ม C,D และ E แสดงพัฒนาการของตะกรัน โดยมีช่วงเวลากการฟุ้งตัวค่อนข้างยาวนานซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการสะสมของความต้านทานตะกรันน้อยมาก หลังจากนั้นการสะสมจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว สำหรับกราฟ C นั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานทางความร้อนเป็นแบบก้าวหน้า สำหรับกราฟ D นั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานทางความร้อนเป็นแบบเชิงเส้น และกราฟ E อัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานทางความร้อนเป็นไปในลักษณะถดถอยไปสู่ค่าคงที่ในที่สุด



รูปที่ 2.10 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันตามเวลา

(อ้างอิงจาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

2.4.1 ประเภทของตะกรัน

- 1) ตะกรันที่เกิดจากการตกตะกอน(Precipitation Fouling) คือ ตะกรันของตะกอนที่บริเวณพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนจากสารละลายที่เป็นของเหลว กลไกนี้มีความอันตรายสูงมากสำหรับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับหม้อไอน้ำ แต่ในขณะเดียวกันความอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นจากตะกรันประเภทนี้ก็จะเกิดกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเฟสเดียวเท่านั้น
- 2) ตะกรันที่เกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ (Particulate Fouling) จะเป็นของแข็งที่แขวนลอยอยู่บนพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ตะกรันในกรณีนี้จะไม่จับตัวเกาะอยู่บริเวณพื้นผิว แต่ยังมีแรงในการขีดเกาะกันอยู่
- 3) ตะกรันที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี(Chemical reaction fouling) เกิดจากคุณสมบัติการรวมตัวกันทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นผิวในการถ่ายเทความร้อนด้วยตะกรันในกลุ่มนี้จะมีความสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม
- 4) ตะกรันทางชีววิทยา (Biological fouling) เกิดจากการติดและการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตทั้งที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ (เพรียง หอย) และแบบโครงสร้างขนาดเล็ก (แบคทีเรีย)

2.4.2 กลไกการเกิดตะกรัน

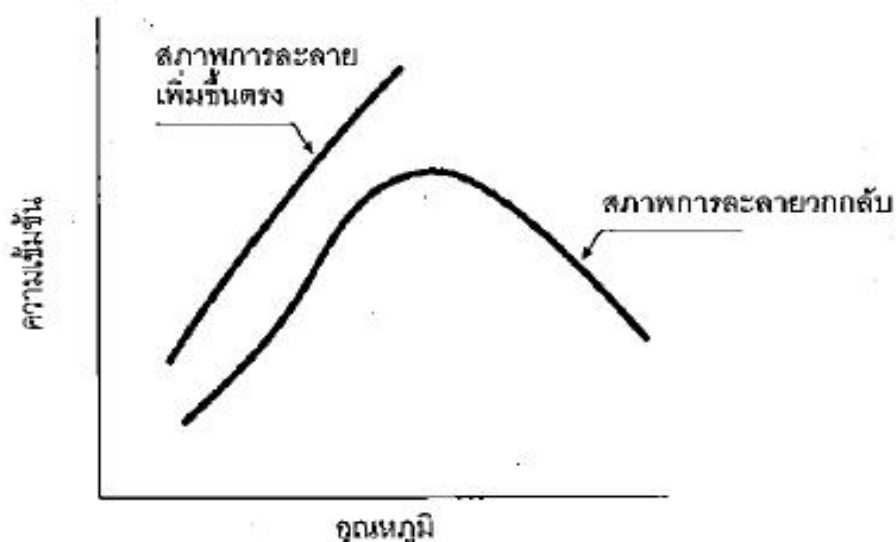
กลไกการเกิดตะกรันมีหลายแบบ ซึ่งพอจำแนกได้ดังต่อไปนี้

1. การเกิดผลึก

สภาพการละลาย หรือความสามารถในการละลายของเกลือในสารละลายเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เป็นไปได้สองแบบดังแสดงในรูปที่ 2.11 ตามปกติสภาพการละลายจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่เกลือบางชนิดที่มักจะพบในน้ำทะเลมีลักษณะสมบัติการละลายที่วกกลับ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าหนึ่งของเหลวที่มีสภาพการละลายเพิ่มขึ้นทางเดียวจะตกผลึกบนผิวที่เย็นส่วนที่มีสภาพการละลายแบบย้อนกลับจะตกผลึกบนผิวที่ร้อน

สารละลายที่ประกอบด้วยเกลือตัวเดียวจะมีการสร้างผลึกที่แข็งแรงมีแรงยึดเกาะกับพื้นผิวสูงขึ้น เกาะสะสมนี้ไม่ค่อยแตกหลุดออกภายใต้การกระทำของความเร็วของไหลที่ไหลผ่านบนพื้นผิวจึงมักจะขยายเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตามเวลา แต่ขณะที่ชั้นเกาะสะสมนี้หนาขึ้นอุณหภูมิผิวรวมทั้งอัตราการเกาะสะสมจะลดลงดังนั้นพัฒนาการของตะกรันเป็นไปตามกราฟ B ในรูปที่ 2.10

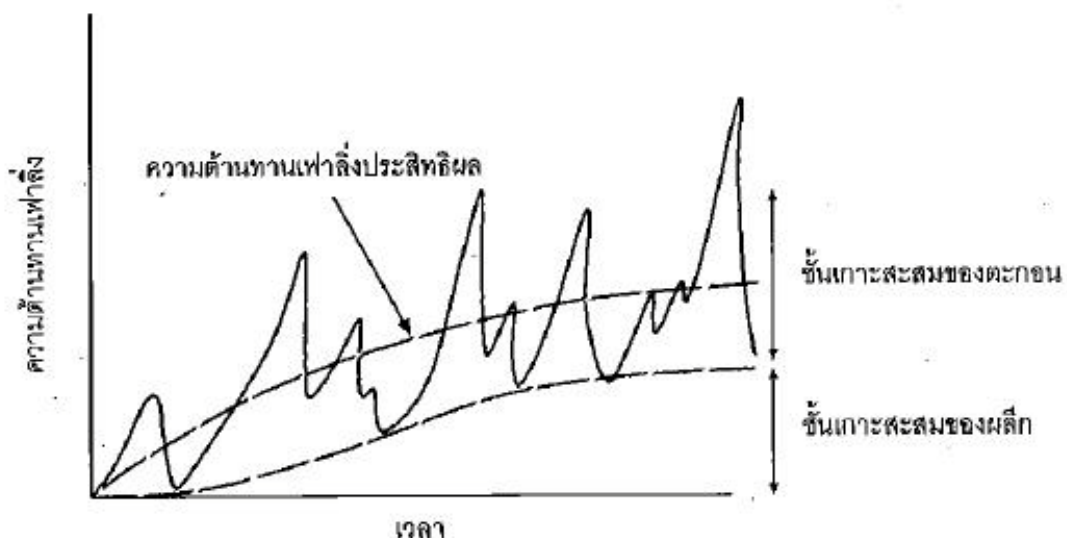
สารละลายที่ประกอบด้วยเกลือหลายตัวจะเกิดผลึกที่ลักษณะที่ซับซ้อนมากขึ้นชั้นเกาะสะสมที่เกิดขึ้นมักไม่สม่ำเสมอและมีแรงยึดเกาะไม่แข็งแรงเท่ากับโครงสร้างที่เกิดจากเกลือตัวเดียว ผลก็คือชั้นเกาะสะสมนี้ทำให้หลุดออกได้ค่อนข้างง่ายชั้นเกาะสะสมในกรณีนี้มีลักษณะที่เป็นไปตามกราฟ E ในรูปที่ 2.10 ในตอนท้ายนั้นอัตราการสะสมของผลึกใหม่เท่ากับอัตราการหลุดออกของผลึกเก่า การเกิดผลึกประเภทนี้มีแนวโน้มที่ค่อนข้างอิสระจากธรรมชาติและความเรียบผิวของพื้นผิว



รูปที่ 2.11 ลักษณะสมบัติความเข้มข้นของเกลือในของไหล เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (อ้างอิงจาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

2. การตกตะกอน

การเกิดตะกอนโดยการตกตะกอนจะเกิดขึ้นในของไหลที่มีสิ่งแขวนลอยปะปนอยู่ มันอาจจะปรากฏในหลายลักษณะซึ่งตามปกติจะเกิดขึ้นร่วมกับตะกอนแบบอื่น ๆ ของไหลมักจะประกอบด้วยโคลน ทราย เศษสนิม ซึ่งมักจะรวมตัวกันอยู่ในบริเวณที่ความเร็วของไหลต่ำ ในบางครั้งเศษอนุภาคเหล่านี้ทำตัวเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยาตกตะกอนและร่วมกับกระบวนการตกผลึกที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ ลักษณะการตกตะกอนเป็นไปตามรูปที่ 2.12 การรวมตัวของตะกอนจะสะสมขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ความต้านทานตะกอนเพิ่มขึ้น ตะกอนเหล่านี้หลุดออกได้ง่ายเป็นชั้นใหญ่โดยการไหลผ่านของของไหลไปบนพื้นผิวเป็นผลให้ความต้านทานตะกอนตกลงทันที จากนั้นจึงเริ่มสะสมอีกครั้งหนึ่ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานเป็นรูปฟันเลื่อย สิ่งที่เกิดขึ้นพร้อม ๆ กับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานเป็นรูปฟันเลื่อย ก็คือการสะสมอย่างสม่ำเสมอของผลึกบนพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 พัฒนาการของความต้านทานตะกอนจากการตกตะกอนและการตกผลึกร่วมกัน (อ้างอิงจาก อุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

3. การเกิดพอลิเมอร์และปฏิกิริยาเคมี

การเกิดตะกอนของพื้นผิวด้วยการสร้างโพลิเมอร์มักจะเกิดขึ้นในงานปิโตรเลียมและเคมีจำนวนมาก พารามิเตอร์วิกฤตประกอบด้วย อุณหภูมิพื้นผิว และการปรากฏอยู่ของตัวส่งเสริมการออกซิไดซ์ กระบวนการที่มักขึ้นมักจะเป็นลักษณะของการจำกัดตัวเองและมีแนวโน้มจะดำเนินไปตามกราฟ B ในรูปที่ 2.10 ลักษณะหนึ่งของตะกอนประเภทนี้ชั้นเกาะสะสมที่หยาบแข็ง ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยการกระทำร่วมของปฏิกิริยาทางเคมีและการตกตะกอน

4. การเติบโตทางอินทรีย์

การเจริญเติบโตทางอินทรีย์ทั้งสัตว์และพืช ในบางครั้งเป็นปัญหาในกระแสน้ำแม่น้ำหรือน้ำทะเลที่ปล่อยผ่านเทียวเดียวโดยไม่มีกรบำบัด การเติบโตจะเกิดขึ้นในท่อของกระแสน้ำที่ปล่อยออกที่อุ่น มากกว่าจะเกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเอง และโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นร่วมกับตะกอนรูปแบบอื่น ๆ

4. ผลจากการกักกร่อน

การกักกร่อนของพื้นผิวมีช่วยช่วยการเกิดตะกอนในทางที่แตกต่างออกไป ในทางหนึ่งผลผลิตจากการกักกร่อนทำให้เกิดเป็นชั้นเกาะสะสมด้านทานการถ่ายเทความร้อนและทำเป็นตัวเร่งที่กระตุ้นกระบวนการเกิดตะกอนรูปแบบอื่น ๆ ในอีกทางหนึ่งนั้น พื้นผิวที่เกิดการกักกร่อนจะขยายขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนจุดก่อดัชนีบนพื้นผิวที่เคยเป็นผิวเรียบสำหรับการเกิดผลึก

2.4.3 ผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อน

ตะกอนเกิดขึ้นมากบ้างน้อยบ้างในระบบทุกชนิดที่มีการให้ความร้อนแก่ หรือระบายความร้อนออกจากของเหลว ไอและแก๊ส ในกระบวนการดังกล่าวอาจจะมีเกิดการเดือด การควบแน่น หรือเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่มี การเปลี่ยนสถานะ

ต้นแหล่งของการเกิดตะกอนมากที่สุดซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นการเกิดผลึกด้วยสภาพการละลายวากกลับและปฏิกิริยาทางเคมีนั้นเกิดขึ้นบนพื้นผิวในกระบวนการให้ความร้อนโดยไม่มี การเปลี่ยนสถานะ กระบวนการระบายความร้อนโดยไม่มี การเปลี่ยนสถานะก็นำไปสู่การเกิดตะกอนเช่นกันอันเป็นผลจากการเกาะสะสมของอนุภาค การตกตะกอน และปฏิกิริยาทางเคมี

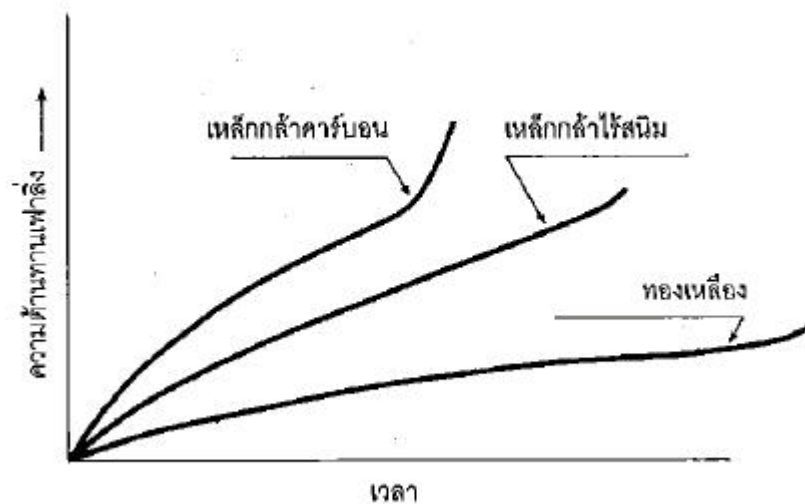
กระบวนการถ่ายเทความร้อนพร้อมกับการเปลี่ยนสถานะอาจจะเป็น 1. การระบายความร้อนซึ่งของไหลมีการควบแน่น หรือ 2. การให้ความร้อนซึ่งของไหลเกิดการเดือด ตะกอนไม่ค่อยจะมีบทบาทสำคัญนักในกระบวนการควบแน่น เนื่องจากปกติไอน้ำค่อนข้างสะอาดแต่การกักกร่อนของพื้นผิวที่เกิดการควบแน่นก็อาจจะมีบ้าง นอกจากนี้ ความเร็วการไหลของคอนเดนเสต มักจะต่ำทำให้ตะกอนอาจจะมี ความสำคัญมากขึ้นในส่วนคอนเดนเสต

ตะกอนในกระบวนการเดือดหรือการระเหยนับเป็นปัญหาที่ร้ายแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบผลิตไอน้ำขนาดใหญ่ถึงระดับที่มักจะมีวิธีการขจัดแร่ธาตุ การกำจัดอากาศ หรือการเติมสารยับยั้งการกักกร่อน มาใช้กับน้ำป้อนในวงจรของการเดือดหรือการควบแน่นที่เป็นแบบวงจรหมุนเวียนปิด

2.4.4 ผลกระทบจากวัสดุและโครงสร้างพื้นผิว

เมื่อชั้นตะกอนเกิดปกคลุมพื้นที่เกือบทั้งหมดของพื้นผิวแล้ว วัสดุหรือผิวหน้าของผนังจะไม่มี ความสำคัญอีกต่อไป มันจะมีผลก็เฉพาะในช่วงเวลาการฟักตัวเท่านั้น วัสดุต่างชนิดชนิดกันจะให้ผล ในทางเร่งปฏิกิริยากับของไหลต่าง ๆ ไม่เหมือนกันซึ่งอาจจะช่วยเร่งหรือยับยั้งการเกิดตะกอนก็ได้ รูปที่

2.13 แสดงประวัติพัฒนาการของตะกอนในระหว่างช่วงเวลาการฟักตัวสำหรับผิวเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และทองเหลือง



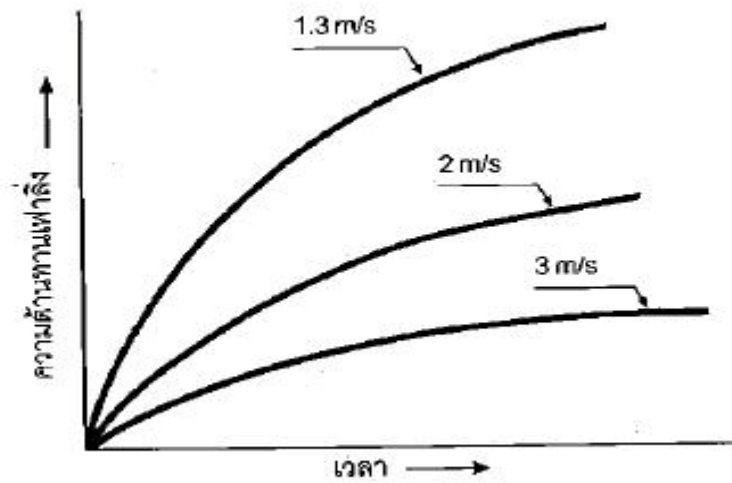
รูปที่ 2.13 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันแสดงให้เห็นช่วงเวลาพักตัวสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และทองเหลือง

(อ้างอิงจาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์)

พื้นผิวขจัดมันจะต้านทานการขยายตัวของตะกรัน แต่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดการกัดกร่อนซึ่งจะทำให้พื้นผิวขรุขระ และเปิดโอกาสให้เป็นบ่อเกิดของการตกผลึก การทำความสะอาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอย่างไม่ถูกต้องปล่อยให้มันชั้นตะกรันตกค้างบนพื้นผิว จะทำให้พื้นผิวนั้นเสื่อมสภาพจากตะกรัน รวดเร็วกว่าการทำให้พื้นผิวนั้นคืนสู่สภาพที่สะอาดคล้ายของใหม่

2.4.5 ผลกระทบจากความเร็วของไหล

มีหลักฐานเป็นจำนวนมากบ่งชี้ว่าความเร็วของไหลเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดต่อการเกิดตะกรันในแทบทุกกรณีการเพิ่มความเร็วจะลดอัตราการก่อตัวของตะกรันและระดับความต้านทานตะกรันสุดท้ายที่ขึ้นไปถึงดังแสดงโดยเส้นกราฟแสดงประวัติพัฒนาการของตะกรันในรูปที่ 2.14 แต่การปรับปรุงโดยการเพิ่มความเร็วให้ผลในอัตราลดลง

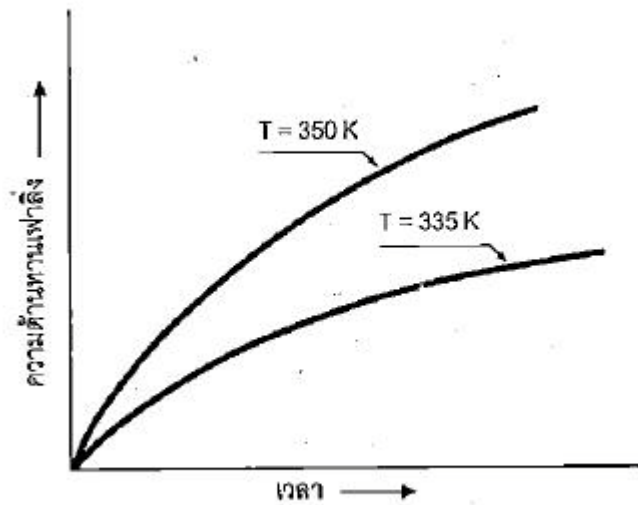


รูปที่ 2.14 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันที่ความเร็วของไหลต่าง ๆ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (อ้างอิงจาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์)

นอกเหนือจากการลดการเกิดตะกรันแล้วความเร็วที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อน ซึ่งอาจจะมีผลให้สามารถลดทั้งขนาดและราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ เมื่อตะกรันลดลงทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้ด้วย

2.4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดตะกรัน

อุณหภูมิต่อการเกิดตะกรันซึ่งสามารถสรุปเป็นแนวโน้มทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2.10 อัตราการเกิดความต้านทานตะกรันและระดับตะกรันที่เสถียรสุดท้ายต่างก็เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ อุณหภูมิในที่นี้หมายถึงอุณหภูมิของพื้นผิวและอุณหภูมิของไหลโดยรวมตัวใดตัวหนึ่ง หรือทั้งสองตัว อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการตกผลึก รวมทั้งผลการเร่งปฏิกิริยาล้วนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างมากซึ่งจะช่วยในการอธิบายการเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิดตะกรัน



รูปที่ 2.15 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันที่อุณหภูมิต่าง ๆ แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (อ้างอิงจาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์)

การเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือรูปแบบการเกิดตะกรัน (Fouling growth model) บนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของของไหล อัตราการไหลและอุณหภูมิของไหล ซึ่งผลของอุณหภูมิของของไหลที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสายร้อนและสายเย็นมีผลกระทบต่ออัตราการตกตะกรัน และการเกาะตัวของตะกรันมากที่สุด รูปแบบของการเกิดตะกรันตามที่ได้ศึกษาในงานวิจัยของ Anwar K. และคณะ (2000) จำแนกออกได้ 4 ลักษณะคือ สมการการเกิดตะกรันแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการการเกิดตะกรันแบบยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการการเกิดตะกรันแบบอัตราลดลง (Falling rate fouling model) และสมการการเกิดตะกรันแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)

- 1) สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

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

- 2) สมการแบบยกกำลัง (Power-law fouling model)

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

- 3) สมการอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)

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

- 4) สมการเอกซ์โปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)

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

เมื่อ $R_f(t)$ = คือการเกิดตะกรันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($\text{m}^2 \text{ h K/kJ}$)

$R_{f,c}$ = คือค่าคงที่ของการเกิดตะกรัน ($\text{m}^2 \text{ h K/kJ}$)

- t = คือเวลา (day)
 $t_{p,c}$ = คือค่าคงที่ของเวลาการเกิดตะกอน (day)
 n = คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น

2.5 หน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศ (Atmospheric Distillation Unit)

เป็นหน่วยการผลิตที่ทำหน้าที่กลั่นแยกน้ำมันดิบ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ กัน โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพคือจุดเดือด ที่แตกต่างกันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดในน้ำมันดิบ โดยสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำ จะถูกแยกออกจากหอกกลั่นที่ด้านบน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดสูงจะถูกแยกออกทางด้านล่าง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียงตามจุดเดือดย่อยไปมากได้ดังต่อไปนี้

1. แอลพีจี (Liquid Petroleum Gas)
2. ไลท์แนพทา (Light Naptha)
3. เฮฟวีแนพทา (Heavy Naptha)
4. เคโรซีน (Kerosene)
5. ไลท์แก๊สออยล์ (Light Gas Oil)
6. เฮฟวีแก๊สออยล์ (Heavy Gas Oil)
7. เอทีบี (Atmosphere Tower Bottom) หรือ รีดิวซ์ครูด(Reduce Crude)

หลักในการแยกของผลิตภัณฑ์ต่างๆ อาศัยความแตกต่างระหว่างจุดเดือดที่แตกต่างกัน ซึ่งน้ำมันดิบจะถูกกลั่นแยกแบบบรรยากาศ โดยจะแบ่งขบวนการผลิตออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ

1. พรีฮีตติงและดีซอลติง(Preheating and Desalting)
2. หอกกลั่นภายใต้บรรยากาศ(Atmospheric Distillation Column)
3. ไซด์สตรีมสตรีปปิง(Side Steam Stripping)
4. หอเสถียรแนพทา(Light Naptha Stabilization)

2.5.1 พรีฮีตติงและดีซอลติง (Preheating and Desalting)

ในการที่จะทำการกลั่นน้ำมันดิบจะต้องให้ความร้อนถึงจุดที่เพียงพอให้น้ำมันดิบที่ส่งเข้าไปในหอกกลั่นเกิดการระเหยตัวขึ้นไปในชั้นต่างๆภายในหอกกลั่นได้นั้นความร้อนที่ได้จากกระบวนการผลิตจะถูกนำกลับมาให้ความร้อนกับน้ำมันดิบ ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนไปได้ไม่เช่นนั้นความร้อนเหล่านี้ก็จะสูญเสียไปเป็นจำนวนมาก

น้ำมันดิบและคอนเดนเสทจะประกอบไปด้วยเกลืออนินทรีย์ ซึ่งจะถูกกำจัดออกก่อนที่จะทำการกลั่น น้ำมันดิบเหล่านี้จะถูกให้ความร้อนโดยผ่านชุดของพรีฮีทเทรน(Preheat train) จนมีความร้อนประมาณ 127 °C ก่อนจะเข้าดีซอลเตอร์(Desalter) น้ำจะถูกผสมกับน้ำมันดิบเพื่อเข้าไปละลายเกลือและน้ำจะถูกแยกออกจากน้ำมันที่ดีซอลเตอร์ โดยใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้น้ำรวมตัวและแยกตัวออกจากน้ำมันดิบ

น้ำมันดิบที่แยกเกลือออกแล้วจะส่งผ่านเข้าพรีแฟลชดรัม(Preflash Drum) เพื่อช่วยลดภาระที่เตาเผาและความดันของระบบหลังจากนั้นน้ำมันดิบจะถูกส่งต่อไปเพื่อรับความร้อนจากชุดพรีฮีทเทรนชุดที่ 2 (Second preheat train) ก่อนที่จะเข้าสู่เตาเผาต่อไป

2.5.2 หอกลั่นภายใต้บรรยากาศ (Atmospheric Distillation Column)

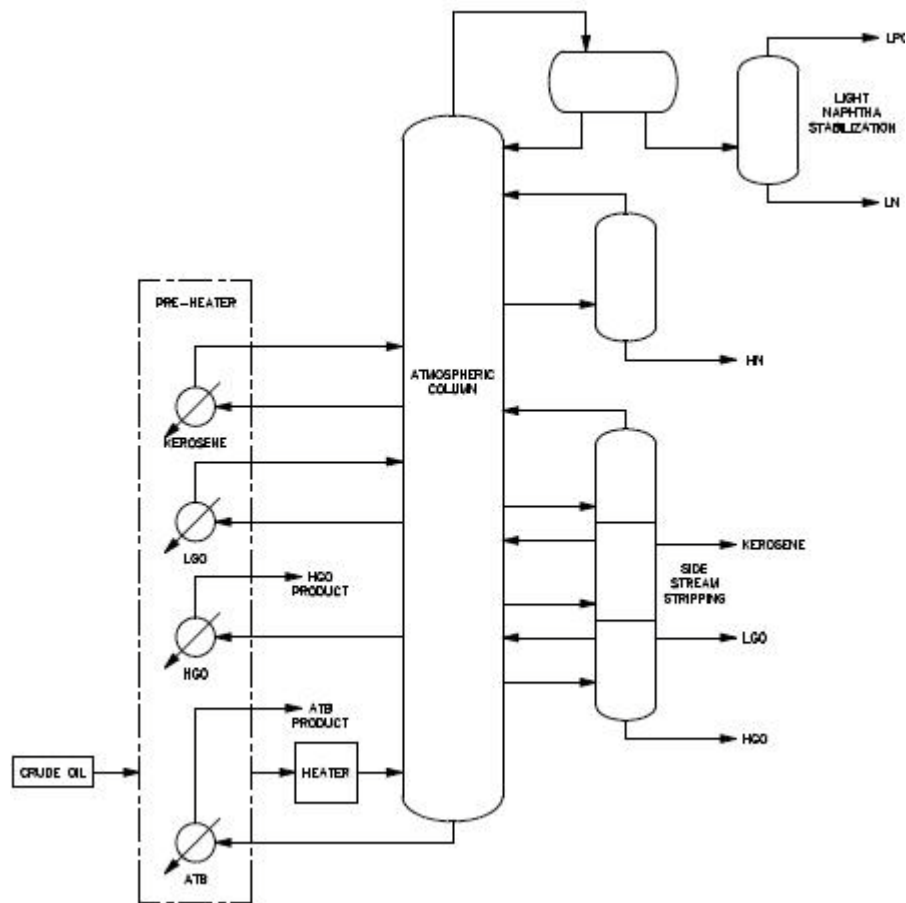
กระบวนการกลั่นหลักจะเกิดขึ้นที่หอกลั่นบรรยากาศ โดยก่อนที่จะเข้าสู่ หอกลั่นนั้นจะต้องได้รับการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิแฟลชโซน(Flash Zone) ที่เตาเผาเสียก่อน ซึ่งเมื่อเข้าสู่หอกลั่นน้ำมันที่ได้รับความร้อนก็จะเกิดการเป็นไอทั้งหมดไหลผ่านไปนในหอกลั่นแล้วทำการแยกผลิตภัณฑ์ออกไปเช่น โอเวอร์เฮด(Over Head) และ ไซด์คัท(Side Cut) ต่างๆ ปริมาณของไอทั้งหมดนี้ ก็คือโอเวอร์แฟลชซึ่งจะนำเอาความร้อนจากชั้น(Tray) ด้านล่างๆ ระบายไปสู่ชั้นด้านบนแล้วเกิดการควบแน่นไหลย้อนกลับลงในชั้นต่างๆภายใน หอกลั่น เช่นนี้จึงทำให้สามารถที่จะแยกคุณสมบัติออกมาตามชั้นของจุดเดือดได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะมี โลท์แนพทา,เฮฟวีแนพทา,เคโรซิน ,โลท์แก๊สออยล์ และ เฮฟวีแก๊สออยล์ ช่วงของจุดเดือดของสารเหล่านี้จะเป็นตัวแยกคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สัดส่วนของการแยกจะถูกกำหนดโดยการควบคุมที่หอกลั่นและยังสามารถปรับเปลี่ยนไปได้ตามความต้องการ

2.5.3 ไซด์สตริมสตรipping(Side Steam Stripping)

ผลิตภัณฑ์อีก 4 ชนิด คือ เฮฟวีแนพทา เคโรซิน โลท์แก๊สออยล์ และเฮฟวีแก๊สออยล์ ที่ถูกดึงออกทางด้านข้างของหอกลั่นบรรยากาศจะถูกส่งเข้าหอกลั่นไซด์สตริมสตรipping(Side Stripping Column) ทำให้สารประกอบบางส่วนกลายเป็นไอ โดยเฉพาะส่วนประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เบาเป็นการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มจุดวาบไฟ(Flash Point) ของผลิตภัณฑ์โดยทำการแยกตัวเบาออกไป ส่วนไอที่ออกมาจะถูกส่งกลับเข้าหอกลั่นบรรยากาศหลักอีกครั้ง

2.5.4 หอเสถียรแนพทา (Light Naphtha Stabilization)

ในส่วนของโอเวอร์เฮดทั้งหมดจากจะประกอบไปด้วยโลท์แก๊สและโลท์แนพทา ทั้งหมดนี้จะถูกส่งเข้าสู่หอเสถียรแนพทาเพื่อกำจัดแก๊สที่เบาว่าออกไปเข้าระบบของเชื้อเพลิงแก๊ส(Fuel Gas) ส่วนผลิตภัณฑ์ ที่แยกออกมาได้ก็จะเป็น แอลพีจี และโลท์แนพทา ส่งเข้าสู่ถังเก็บต่อไป



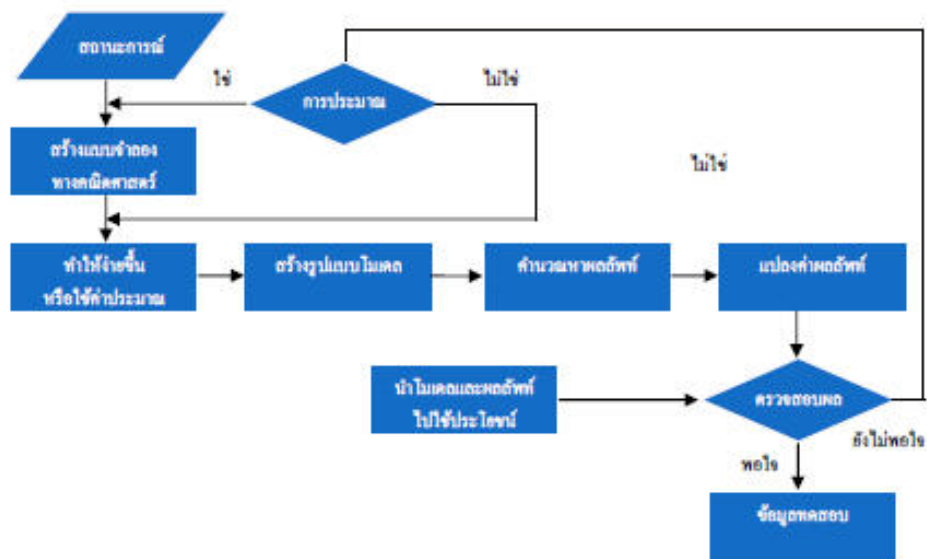
รูปที่ 2.16 หน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศ

(อ้างอิงจาก หน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศของบริษัทไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน))

2.6 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ แบบจำลองที่ใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับการอธิบายพฤติกรรมต้นแบบกระบวนการที่สนใจศึกษา ในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายกระบวนการเริ่มต้นจากการศึกษาปัญหาของกระบวนการจริงที่ได้ศึกษา โดยทั้งนี้ทั้งนั้นต้องเลือกแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนและสามารถอธิบายกระบวนการได้ใกล้เคียงมากที่สุด หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ ที่ยังไม่ทราบค่าในระบบ การจำลองทั่วไปเกี่ยวข้องกับตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก ในการหาพฤติกรรมพลวัตของกระบวนการสามารถทำได้โดยพัฒนาแบบจำลองซึ่งใช้สมการทางคณิตศาสตร์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาเข้า กับตัวแปรขาออกดังวิธีการตามแผนผังรูปที่ 2.17 ได้อธิบายลำดับขั้นตอนการนำแบบจำลองมาใช้ในการงานวิจัยนี้ที่ได้ใช้แบบจำลองหรือสมการในการประมาณการ (Approximation) ของกระบวนการจริง

แบบจำลองใช้สำหรับทำความเข้าใจกระบวนการ ที่ซึ่งอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ ที่บรรยาย การเปลี่ยนแปลงและความสัมพันธ์ของตัวแปรของกระบวนการซึ่งสามารถใช้แบบจำลองได้ในงานหลาย ประเภทได้แก่ ใช้แบบจำลองในการทดสอบระบบควบคุมแบบต่าง ๆ การเลือกพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ผ่านการซิมูเลท (Simulation) ในระบบควบคุมหรือจากโมเดลของกระบวนการ การออกแบบตัวควบคุม และการออปติไมซ์กระบวนการ เพื่อปรับค่าสถานะการดำเนินงานการผลิต ซึ่งสามารถปรับค่าตัวแปรได้ ในแบบจำลองกระบวนการโดยไม่ต้องใช้กระบวนการจริงที่มีความยุ่งยากมากกว่า ค่าใช้จ่ายสูงกว่า และ อาจก่อให้เกิดอันตรายได้



รูปที่ 2.17 แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย

แบบจำลองกระบวนการถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการ โดยในส่วนของ การปฏิบัติ นั้นจะไม่สามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ได้อย่างสมบูรณ์ครบถ้วนสำหรับใช้อธิบายกระบวนการจริง ซึ่งมีความซับซ้อนหรือปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จึงกำหนดสมมติฐานต่าง ๆ เพื่อพัฒนาแบบจำลองได้ง่ายแต่ยังคงเป็นตัวแทนของกระบวนการจริงได้ ทั้งนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะกำหนดสมมติฐานมากหรือน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงานศึกษาวิจัย เช่น เพื่อทำความเข้าใจกระบวนการโดยไม่ต้องใช้กระบวนการจริง เพื่อทดสอบ ออกแบบรวมทั้งเลือกค่าพารามิเตอร์เพื่อออกแบบระบบ และข้อกำหนดต่าง ๆ ที่ใช้ในการควบคุม เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของการดำเนินการผลิตให้ได้กำไรสูงสุด เป็นต้น

2.6.1 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Estimate parameter)

การสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ระบบด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กลายมาเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการดำเนินงานวิจัย สำหรับกรณีที่ปัญหามีคำตอบหรือทางเลือกที่เป็นไปได้จำนวนมาก การวิเคราะห์หาคำตอบด้วยการจำลองสถานการณ์สามารถที่จะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากที่ผ่านมามีเทคนิคการจำลองสถานการณ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นเครื่องมือในการประเมินผลลัพธ์ อาทิเช่น จะเกิดอะไรขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับระบบ เป็นต้น โดยมีความคาดหวังว่าผลประเมินที่ได้จะนำมาซึ่งการตัดสินใจหรือเลือกใช้อะไรมาแก้ปัญหของระบบ

การจำลองสถานการณ์ (Simulation) จำเป็นต้องมีขั้นตอนการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุด ระบบจะอาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินโดยการจำลองสถานการณ์ซึ่งถูกใช้เป็นตัววัดถึงความเหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้า (Input) และนำมาประมวลผลร่วมกับผลที่ได้จากการประเมินในครั้งที่ผ่านมา แล้วทำการกำหนดชุดของตัวแปรนำเข้าสู่ชุดใหม่เพื่อป้อนเข้าระบบการจำลองสถานการณ์อีกครั้ง โดยกระบวนการทั้งหมดจะดำเนินไปจนกระทั่งระบบบรรลุเงื่อนไขของการหยุดหาคำตอบ ด้วยเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง เป็นต้นว่า ได้ผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เบื้องต้น หรือบรรลุตามเงื่อนไขของระยะเวลาที่กำหนด

ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคใหม่ ๆ เข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคและวิธีในการค้นหา (Search methodologies) ซึ่งปัจจุบันทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพโดยทั่วไป เทคนิคการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุด Simulation- optimization มักถูกนำไปใช้สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ เพื่อใช้คำนวณหาค่าของชุดตัวแปรตัดสินใจที่จะทำให้ค่าผลลัพธ์ของระบบตามที่ต้องการ ตัวอย่างของการนำเทคนิคนี้ไปใช้ได้แก่ ใช้เพื่อกำหนดและควบคุมกระบวนการ (Process Control Optimization) การออกแบบงานทางวิศวกรรม (Engineering Design Optimization) นอกจากนี้ยังพบว่ามีการนำ Simulation – optimization ไปใช้ในงานด้านการจำลองทางภูมิศาสตร์ และพยากรณ์อื่น ๆ อีกด้วย

เทคนิคที่ใช้ในการหาคำตอบในกรณีที่ปัญหามีพื้นที่คำตอบที่เป็นขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถประเมินผลในทุก ๆ คำตอบที่เป็นไปได้ เมื่อเป็นเช่นนี้เทคนิคในกลุ่มนี้จึงมีการนำเอาวิธีค้นหาคำตอบ (Search Method) แบบต่าง ๆ เข้ามาเพื่อช่วยทำออฟติไมซ์เซชันด้วย

สำหรับเทคนิคที่นำมาใช้ในการค้นหาคำตอบตัวแปรพารามิเตอร์ในงานวิจัยนี้คือ เทคนิคการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search) เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้กับการทำออฟติไมซ์เซชันของปัญหาที่เซตคำตอบที่เป็นไปได้มีขนาดใหญ่มาก และเป็นไปไม่ได้ที่ประเมินทางเลือก หรือคำตอบทุก ๆ คำตอบในเซต ดังนั้นเทคนิคในกลุ่มนี้มีขั้นตอนที่นำมาช่วย เพื่อพิจารณาว่าในกลุ่มของคำตอบที่เป็นไปได้ คำตอบใดควรจะถูกนำไปประเมินผลด้วยการจำลองสถานการณ์ ซึ่งขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่จะอาศัยวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search)

ค่าที่ใช้ในการบอกราคาที่ทำการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search) นั้นเป็นค่าตัวแปรที่อยู่ในช่วงเหมาะสม ซึ่งทำให้ค่าแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริงกับข้อมูลที่ได้จำลองมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ใช้วิธีการเทียบค่าความต่างโดยอาศัยค่า Root Mean Square Error (RMSE) เป็นค่าที่บอกความแม่นยำ ความเที่ยงตรงการทำนาย หากค่าที่ได้จากการคำนวณ RMSE มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง (obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงมากนั่นเอง RMSE คำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum (obs - predict)^2}}{N} \quad (2.17)$$

เมื่อ

obs คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate) จากข้อมูลจริง

predict คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate) จากแบบจำลอง

N คือ จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด

บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Anwar K.S. และคณะ (2000) ได้นำเสนอแบบจำลองสมการของการเกิดตะกรันบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เพื่อนำมาใช้เป็นรูปแบบลักษณะการเกิดตะกรันเฉพาะของกระบวนการโดยศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิสายร้อนขาออกและอุณหภูมิสายเย็นขาออก ทั้งนี้ได้วิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการเกิดตะกรันที่มีลักษณะเฉพาะทั้งหมด 4 รูปแบบคือ สมการการเกิดตะกรันแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการการเกิดตะกรันแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการการเกิดตะกรันแบบอัตราลดลง (Falling rate fouling model) และสมการการเกิดตะกรันแบบเอกโปรเนนเชียล (Asymptotic fouling model) ทั้งนี้ได้ศึกษาแนวโน้มของการเกิดตะกรันที่เกิดขึ้น และเมื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ของสมการทั้ง 4 รูปแบบ โดยใช้รูปแบบจากผลการจำลองมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนกระบวนการผลิต

Polley G.T. และคณะ (2002) ทำการศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองของ Ebert – Panchal และทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองของ Ebert-Panchal กับข้อมูลจากการทดลองของ Knudsen ในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) โดยผลตอนแรกมีความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองแต่พอหลังจากปรับแก้ค่าของพลังงานกระตุ้น (Activate energy, E) ทำให้แบบจำลองของ Ebert-Panchal มีความแม่นยำมากขึ้น และสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลอื่นได้

Javier H. และคณะ (2004) ได้นำเสนอแบบจำลองโดยการใช้ Mixed integer linear programming (MILP) โดยใช้สำหรับการวางแผนในการทำความสะอาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมเคมีโดยแบบจำลองแสดงถึงฐานข้อมูลต้นทุนของการทำความสะอาดและต้นทุนของพลังงานที่ใช้ในการผลิตและการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยมีความสำคัญสำหรับการกลับที่มีส่วนประกอบต่างกันในน้ำมันดิบ

Nasr และคณะ (2006) ได้นำเสนอแบบจำลองของการเกิดตะกรันในหน่วยอุ่นน้ำมันดิบของโรงกลั่นน้ำมันดิบ (Crude distillation unit) โดยใช้ผลการทดลองของ Australian light crude กับอุณหภูมิพื้นที่ผิวของและความเร็วของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยในแบบจำลองจะรวมความเกี่ยวข้องการก่อตัวของตะกรันโดยแบบจำลองของ Mohammad และคณะเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \frac{\exp(-E)}{RT_f} - \gamma Re^{0.4}$$

โดยที่ $\alpha = 10.98(\text{m}^2 \text{K}/\text{kJ})$

$$\beta = -1.547$$

$$\gamma = 0.96 \times 10^{-4} \text{ (m}^2 \text{ K/kJ)}$$

$$E = 22.618 \text{ (kJ/mol)}$$

และทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดตะกรันที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

Radhakrishnan V.R. และคณะ (2007) ได้พัฒนาแบบจำลองทำนายอัตราการเกิดตะกรันโดยใช้วิธีสถิติข่ายงานนิวรัล(Neural network)อันซึ่งสามารถหาอัตราการเกิดอัตราการเกิดตะกรันและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน(Heat transfer efficiency)ที่ลดลง แบบจำลองข่ายงานนิวรัลพัฒนาโดยใช้ข้อมูลจากการผลิตจริงและมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิขาออกฝั่งท่อและเซลล์ มีค่าเท่ากับ 1.83 % และ 0.93 % และมีค่า Correlation coefficient(R²) มีค่าเท่ากับ 0.98 และมีค่า Correct direction change (CDC) มากกว่า 92 % ซึ่งถือว่ามีความแม่นยำสูงและแบบจำลองนี้สามารถนำไปพัฒนาการวางแผนซ่อมบำรุงของกระบวนการจริงได้(Preventive maintenance)

ประพิศพรรณ เตชะวานิชชัย (2008) ศึกษางานวิจัยการเกิดตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหน่วยกำจัดซัลเฟอร์โดยนำแบบจำลองของข่ายงานนิวรัล (Neural network) มาทำนายโพรไฟล์ของการเกิดตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งข่ายงานนิวรัลสามารถหาแบบจำลองที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาทำการบำรุงรักษา

Javad และ Shahrokh (2008) นำเสนองานวิจัยแบบจำลอง Artificial neural network เพื่อทำนายโพรไฟล์ของการเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของหน่วยกลั่นน้ำมันดิบ(Crude distillation unit) และนำผลของแบบจำลอง Artificial neural network ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง(Experimental data)เพื่อที่จะคำนวณหา Overall mean relative error(OMRE) และทำการเปรียบเทียบกับ 3 แบบจำลองซึ่งได้แก่ Panchal,Polley และ Nasr สรุปผลเปรียบเทียบแบบจำลอง Artificial neural network ได้ค่า OMRE เท่ากับ 26.23% และแบบจำลองของ Panchal,Polley และ Nasr ได้ค่า OMRE เท่ากับ 47.9%,60.68% และ 75.36% ตามลำดับ

Javad และ Shahrokh (2009) นำเสนองานวิจัยการใช้ Artificial neural network(ANN) มากำหนดเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical formulation) มีชื่อเรียกว่า Neuro based formulation prediction และในงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลของอัตราการเกิดตะกรัน (Fouling rate) ของ Neuro based formation กับห้องปฏิบัติการและแบบจำลองของ Panchal,Polley และ Nasr ตามลำดับโดยการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในค่า Absolute mean relative error และผลจากงานวิจัยพบว่าแบบจำลอง Neuro based formulation, Panchal,Polley และ Nasr มีค่า Absolute mean relative error เท่ากับ 15.83%,52.04%,92.77% และ 61.43% ตามลำดับซึ่งสามารถสรุปได้ว่า Neuro based formation สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหน่วยกลั่นน้ำมันดิบ(Crude distillation unit)ได้

วารกรณ์ ศรีสุขเจริญปัญญา (2011) นำเสนองานวิจัยการศึกษาการเกิดตะกรัน และผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 ตัวที่ต่อเนื่องกัน โดยใช้แบบจำลองการเกิดตะกรันแบบเชิงเส้น แบบกฏยกกำลัง แบบอัตราลดลง และแบบเอกโปรเนนเชียล เพื่อเทียบกับรูปแบบการเกิดตะกรันจริงในกระบวนการ พบว่าส่วนใหญ่ที่ 42 เปอร์เซ็นต์ของขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีพฤติกรรมการเกิดตะกรันแบบอัตราลดลง นอกจากนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองการเกิดตะกรันที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน จนกระทั่งทำให้ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการหลัก

บทที่ 4

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย โดยงานวิจัยครั้งนี้แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบการจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่สนใจนำมาศึกษาและสร้างแบบจำลอง ส่วนที่ 2 นำแบบจำลองที่พัฒนาแล้วมาใช้กับข้อมูลชุดที่ 2 เพื่อสอบทานความเที่ยงตรงของแบบจำลอง

4.1 การศึกษารูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการศึกษารูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาทำการวิจัยนั้น เบื้องต้นจะต้องเริ่มศึกษารูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการก่อตัวของตะกรัน(Fouling rate) โดยคัดเลือกความเหมาะสมจากแบบจำลองใน 4 รูปแบบจำลองคือ

1.Panchal Model

รูปแบบสมการคือ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma\tau \quad (4.1)$$

โดยที่

$$\frac{dR_f}{dt} = \text{อัตราการก่อตัวของตะกรัน(Fouling rate), (m}^2 \text{ h K/kJ)/h}$$

Re = Reynolds number

R = Universal gas constant (8.314 kJ/kg mol K)

Pr = Prandtl number

T_f = อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

τ = Shear stress

α, β, γ = ค่าพารามิเตอร์

2. Polley Model

รูปแบบสมการคือ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.8} \quad (4.2)$$

โดยที่

$$\frac{dR_f}{dt} = \text{อัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate), (m}^2 \text{ h K/kJ)/h}$$

Re = Reynolds number

R = Universal gas constant (8.314 kJ/kg mol K)

Pr = Prandtl number

T_f = อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ = ค่าพารามิเตอร์

3. Saleh Model

รูปแบบสมการคือ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha P^\beta V^\gamma \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) \quad (4.3)$$

โดยที่

$$\frac{dR_f}{dt} = \text{อัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate), (m}^2 \text{ h K/kJ)/h}$$

Re = Reynolds number

R = Universal gas constant (8.314 kJ/kg mol K)

P = ความดัน (kPa)

V = ความเร็วของของไหล (m/s)

T_f = อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ = ค่าพารามิเตอร์

4.Nasr Model

รูปแบบสมการคือ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4} \quad (4.4)$$

โดยที่

$$\frac{dR_f}{dt} = \text{อัตราการก่อตัวของตะกรัน(Fouling rate), (m}^2 \text{ h K/kJ)/h}$$

Re = Reynolds number

R = Universal gas constant (8.314 kJ/kg mol K)

T_f = อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ = ค่าพารามิเตอร์

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองของ Nasr ตามสมการที่ 4.4 ซึ่งมีความเหมาะสมเนื่องจากเป็นรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนและสามารถอธิบายกระบวนการได้ใกล้เคียงมากที่สุดเนื่องจากสามารถแทนค่าตัวแปรจากการเก็บข้อมูลในกระบวนการผลิตจริงได้โดยตรงโดยมีค่าตัวแปรจากกระบวนการผลิตจริงที่แบบจำลองต้องการคือ

- ค่าความหนืดของน้ำมันดิบ
- ค่าความหนาแน่นของน้ำมันดิบ
- ค่าความเร็วของน้ำมันดิบ
- อุณหภูมิเข้าและออกของสายร้อนและสายเย็น

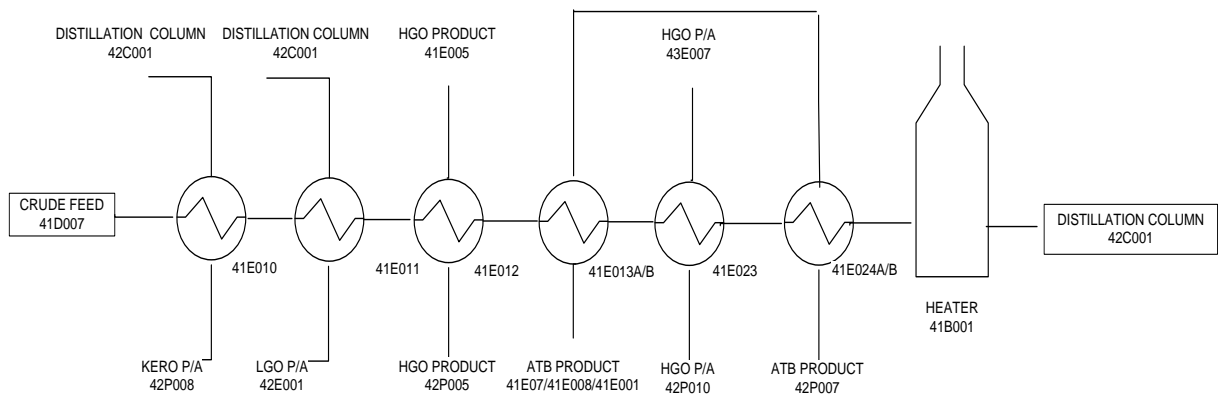
นอกจากนี้ผลของค่าความเค้นเฉือน(Shear stress) ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความหนืดและค่าความเร็วของน้ำมันดิบนั้นถูกรวมด้วยค่า Reynolds number จากแบบจำลองแล้วทำให้รูปแบบจำลองไม่มีความจำเป็นต้องใช้สมการที่เกี่ยวข้องกับค่าความเค้นเฉือนอีก

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง

Panchal	Polley	Saleh	Nasr
Film temperature	Film temperature	Film temperature	Film temperature
Reynold number -Velocity -Viscosity	Reynold number -Velocity -Viscosity	Velocity Pressure	Reynold number -Velocity -Viscosity
Prandlt number -Specific heat -Thermal conductivity	Prandlt number -Specific heat -Thermal conductivity		
Shear stress -Force applied -Cross section area	Shear stress -Force applied -Cross section area		

4.1.1 ศึกษากระบวนการของข่่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheat train) มีขั้นตอนการดำเนินงานโดยเริ่มจากการรับน้ำมันดิบ (Crude oil) ซึ่งน้ำมันดิบจะถูกเก็บไปตรวจคุณภาพทางกายภาพ และเคมี ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อเป็นการอุ่นให้ความร้อนกับน้ำมันให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ซึ่งจะใช้สำหรับการกลั่นตามข้อกำหนดการดำเนินการที่ออกแบบไว้ ทั้งนี้ในระบบข่่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่ 2 ที่นำมาศึกษาประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 6 เครื่องต่อเนื่องกันดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพข่่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา (อ้างอิงจาก ข่่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน))

4.2 รวบรวมข้อมูลจากโรงงานจริง

การศึกษาช่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ใช้ข้อมูลค่าคงที่ต่าง ๆ จากหน่วยอุ่นน้ำมันดิบลำดับที่ 2 ของหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศของบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด(มหาชน) ดังแสดงในตารางที่ 4.1-4.6 เป็นค่าสภาวะการดำเนินการจริงที่โรงงานได้ออกแบบไว้ใช้สำหรับระบบขายแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ A คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เริ่มต้นดำเนินการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ตารางที่ 4.2 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	2.366	kJ/kg K
A	671	m^2
U	1735	kJ/ m^2 h K
μ	0.00050	kg/m s

ตารางที่ 4.3 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	2.414	kJ/kg K
A	601	m^2
U	1630	kJ/ m^2 h K
μ	0.00044	kg/m s

ตารางที่ 4.4 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E012

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	2.458	kJ/kg K
A	394	m^2
U	1742	kJ/ m^2 h K
μ	0.00040	kg/m s

ตารางที่ 4.5 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	2.508	kJ/kg K
A	1216	m ²
U	1864	kJ/ m ² h K
μ	0.00036	kg/m s

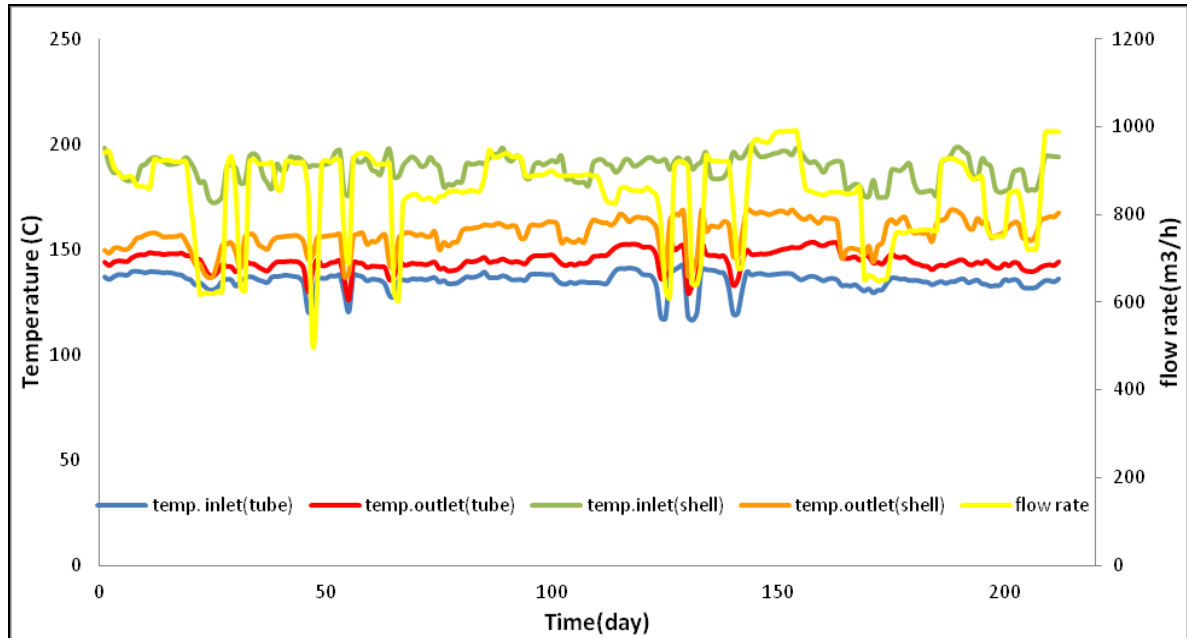
ตารางที่ 4.6 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E023

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	2.780	kJ/kg K
A	491	m ²
U	1940	kJ/ m ² h K
μ	0.00022	kg/m s

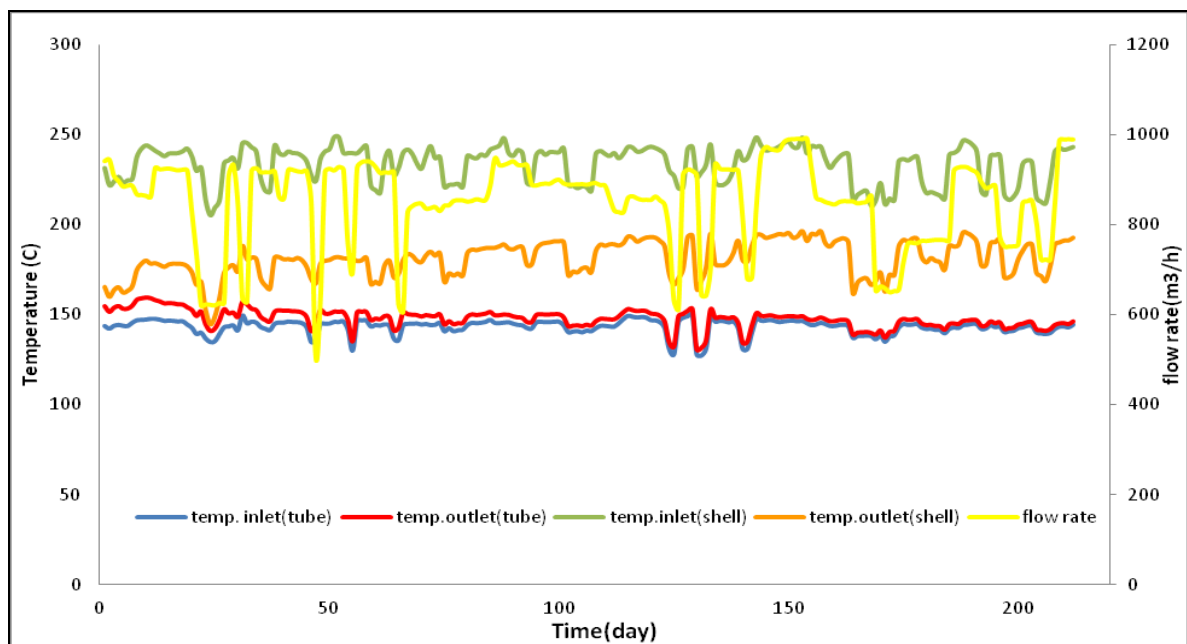
ตารางที่ 4.7 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	2.842	kJ/kg K
A	1350	m ²
U	1904	kJ/ m ² h K
μ	0.00023	kg/m s

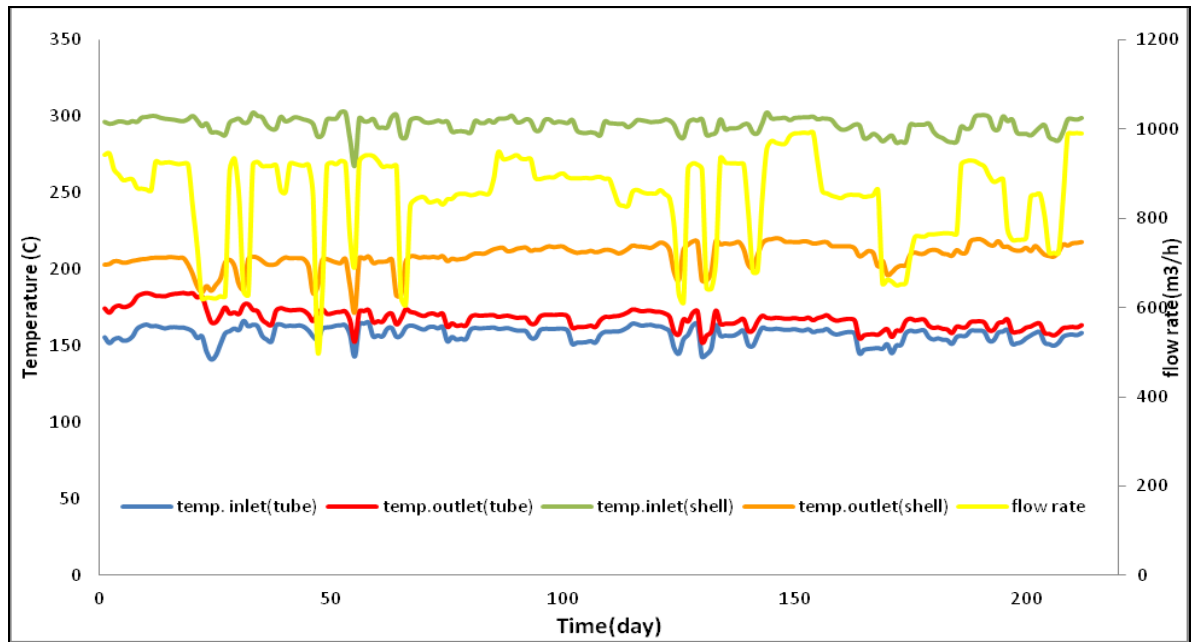
ค่าอุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มาจากโรงงานจริงในระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่องที่ 212 วันที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการสำหรับนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของระบบข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่ยกนำมาศึกษาดังแสดงรูปที่ 4.2 ถึง 4.7



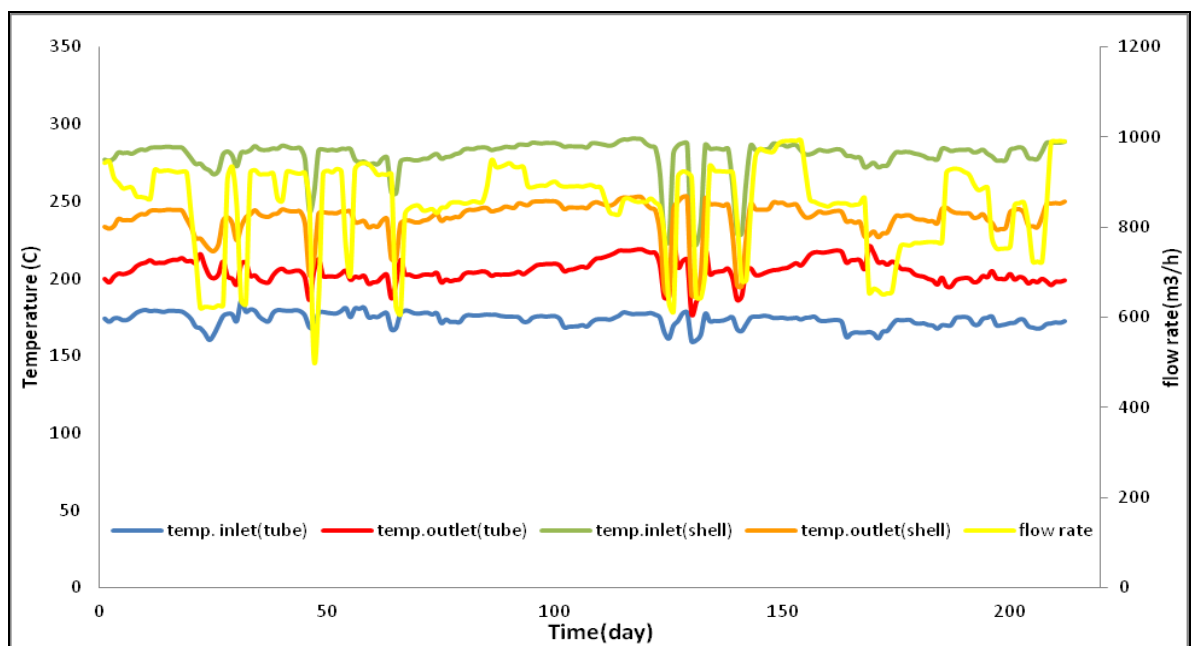
รูปที่ 4.2 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010



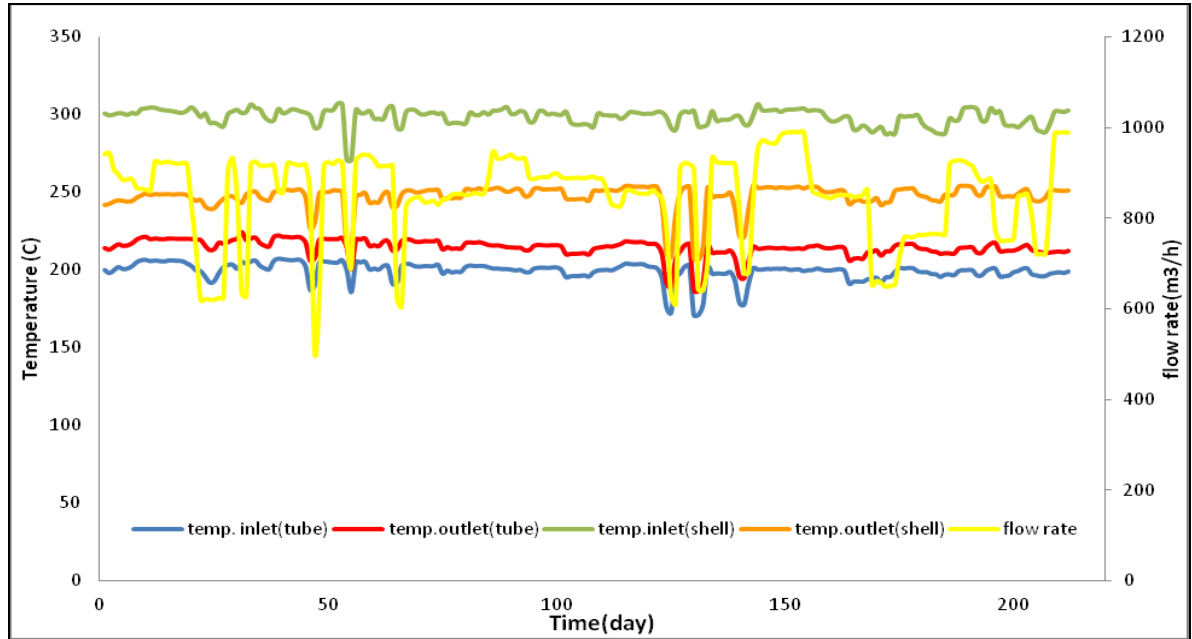
รูปที่ 4.3 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011



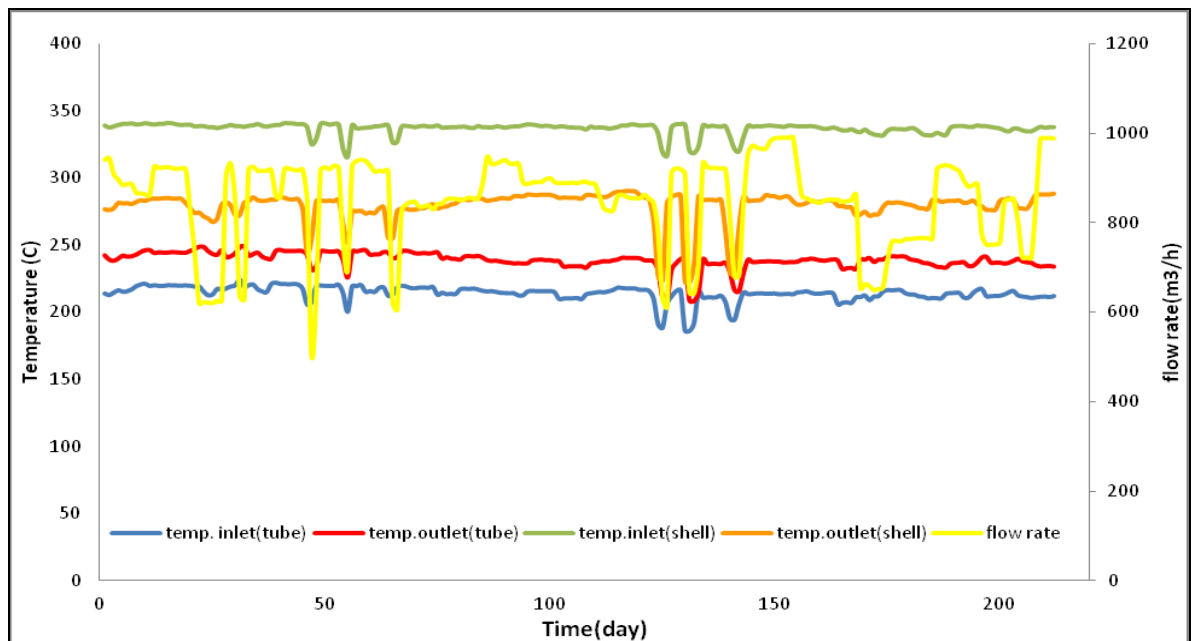
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E012



รูปที่ 4.5 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E023



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันของน้ำมันดิบที่อธิบายพฤติกรรมพลวัตได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด โดยพิจารณาจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จริงจากโรงงาน เพื่อใช้อธิบายแนวโน้มการก่อตัวของตะกรันที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน

เนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการจริงในโรงงานนั้นไม่ได้มีการเก็บข้อมูลจนครอบคลุมทั้งหมดเพื่อใช้ในการจำลอง จึงมีข้อกำหนดที่ใช้ในการจำลองขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละตัวรวมจำนวน 6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (41E010, 41E011, 41E012A/B, 41E013, 41E023 และ 41E024A/B)

- ไม่มีการสูญเสียพลังงานออกนอกระบบ
- ค่าความจุความร้อนของสายร้อนและสายเย็นคงที่
- พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่
- ของไหลที่พิจารณาเป็นของเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยส่วนของการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 6 ส่วนร้อน (41E010, 41E011, 41E012A/B, 41E013, 41E023 และ 41E024A/B) เชื่อมกันและมีการเข้า-ออกต่อเนื่องกันจนกระทั่งดำเนินการเสร็จกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของขำงานในระบบแสดงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถสร้างแบบจำลองโดยพัฒนามาจากแบบจำลองของ Nasr โดยปรับค่าพารามิเตอร์ (α, β และ λ) ให้เหมาะสมกับกระบวนการของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4} \quad (4.5)$$

โดยที่

$$\frac{dR_f}{dt} = \text{อัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate), (m}^2 \text{ h K/kJ)/h}$$

$$Re = \text{Reynolds number}$$

$$R = \text{Universal gas constant (8.314 kJ/kg mol K)}$$

$$T_f = \text{อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)}$$

$$\alpha, \beta, \gamma = \text{ค่าพารามิเตอร์}$$

และ

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (4.6)$$

Re	=	Reynolds number
D	=	รัศมีของท่อ (m)
V	=	ความเร็วของของไหล (m/s)
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
μ	=	ความหนืดของของไหล (kg/m s)

4.4 การหาค่าพารามิเตอร์

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงาน หากดำเนินไปในระยะหนึ่งจะทำให้เกิดตะกรันเกาะอยู่บริเวณผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้การนำความร้อนลดลงและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient) ลดลง เนื่องจากเกิดความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น การติดตามการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิต และติดตามอัตราการก่อตัวของตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีความสำคัญมากในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าของแบบจำลองทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันจึงมีความจำเป็นเพื่อปรับปรุงและทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากสมการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา คือ α, β, γ ทั้งนี้เพื่อนำมาแทนในแบบจำลองของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 6 เครื่อง และหาค่าอัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate, dR_f/dt) ของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบทีละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน เมื่อป้อนค่าเข้าไปในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะทำให้ได้คำตอบออกมาอย่างรวดเร็ว และสามารถใส่ข้อมูลใหม่ที่ต้องการไปได้เรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบออกมาอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ หรือสามารถนำค่าที่เป็นการคำนวณปริมาณค่าข้อมูลขาเข้า (Input) ที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้อ้างอิงในงานวิจัยได้ เมื่อค้นหาตัวแปรแบบสุ่มตามขั้นตอนจะทำให้ทราบค่าของช่วงค่าพารามิเตอร์ α, β, γ ที่เหมาะสมทำให้ค่าแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง กับข้อมูลที่ได้จากการจำลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ทั้งนี้ใช้การเทียบค่าความต่างโดยอาศัยผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error) เป็นค่าที่บ่งบอกความแม่นยำ ความเที่ยงตรงของการทำนาย ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้จะต้องแทนค่าพารามิเตอร์ α, β, γ เพื่อให้ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองเกิดความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างค่าที่ได้จากการจำลอง (predict) เทียบกับค่าที่ได้จริงจากโรงงาน (obs) ซึ่งแสดงว่ามีความเที่ยงตรงมากนั่นเอง การคำนวณหาค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง หรือ Root Mean Square Error (RMSE) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum (\text{obs}-\text{predict})^2}}{N} \quad (4.7)$$

เมื่อ

obs คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate) จากข้อมูลจริง

predict คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate) จากแบบจำลอง

N คือ จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด

โดยที่ ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate, dR_f/dt) จากข้อมูลจริงได้จากการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ของอุณหภูมิสายร้อน อุณหภูมิของสายเย็น อัตราการไหลของสายร้อนและอัตราการไหลของสายเย็นและคำนวณตามสมการ

$$Q_c = m_c C_{c,p} (T_{c,out} - T_{c,in}) = Q_h = m_h C_{c,p} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (4.8)$$

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ/h)
 m = อัตราการถ่ายเทมวล (kg/s)
 C_p = ค่าความจุความร้อน (kJ/kg K)
 T = อุณหภูมิ (K)

และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient, U) จากสมการ

$$m_c C_{p,c} (T_{h,in} - T_{h,out}) = UA \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln[(T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in})]} \quad (4.9)$$

และไปคำนวณค่าคงที่การเกิดตะกรัน (Fouling factor, $R_{f(i)}$) จากสมการ

$$R_{f(i)} = \frac{1}{U_{(i)}} - \frac{1}{U_c} \quad (4.10)$$

โดยที่

$R_{f(i)}$ = ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกรัน (Fouling factor) ที่ i ($m^2 h K/kJ$)

$U_{(t)}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($kJ/m^2 h K$)

U_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ผิวท่อซึ่งไม่มีตะกรัน ($kJ/m^2 h K$)

A คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน m คืออัตราการไหล C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ ตัวห้อย c และ h เป็นพารามิเตอร์แสดงถึง สายเย็น (c) สายร้อน (h) ในส่วนของ in และ out เป็นพารามิเตอร์แสดงถึง สายขาเข้า (in) สายขาออก (out)

นำค่าคงที่การเกิดตะกรัน (Fouling factor, $R_{f(i)}$) ไปคำนวณอัตราการเกิดตะกรันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Fouling rate, dR_f/dt) ของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการ

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{Rf_{(i+1)} - Rf_{(i-1)}}{2 \times \Delta t} \quad (4.11)$$

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ = ค่าการเกิดตะกรันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Fouling rate), ($m^2 h K/kJ$)/h

$Rf_{(i+1)}$ = ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกรัน (Fouling factor) ที่ $i + 1$, ($m^2 h K/kJ$)

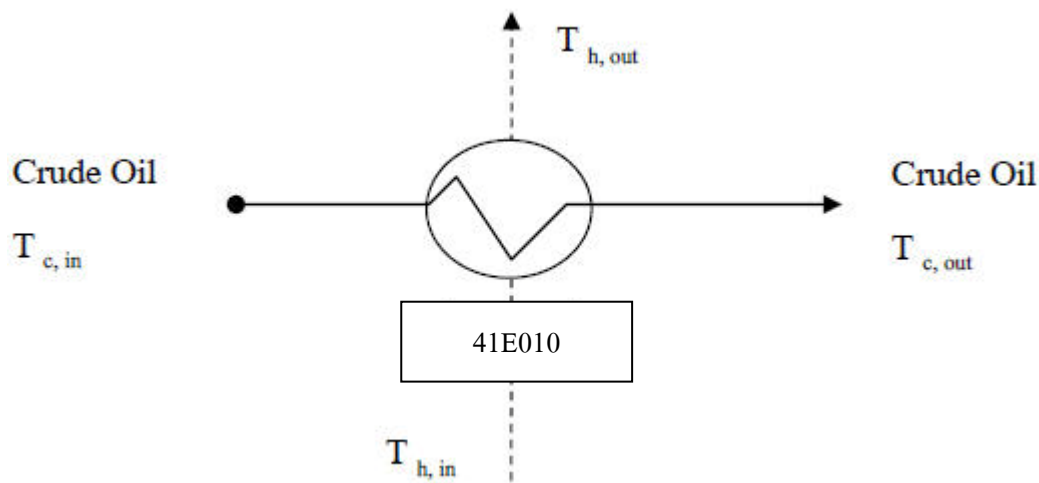
$Rf_{(i-1)}$ = ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกรัน (Fouling factor) ที่ $i - 1$, ($m^2 h K/kJ$)

Δt = เวลา (h)

4.5 การสอบทานแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถพิสูจน์ความถูกต้องโดยทำการเปรียบเทียบกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจาก

ดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4.8 แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010

$$Q_c = m_c C_{c,p} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (4.12)$$

$$Q_h = m_h C_{c,p} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (4.13)$$

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ)
 m = อัตราการถ่ายเทมวล (kg/s)
 C_p = ค่าความจุความร้อน (kJ/kg K)
 T = อุณหภูมิ (K)

$$m_c C_{p,c} (T_{h,in} - T_{h,out}) = UA \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln[(T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in})]} \quad (4.14)$$

และ

$$m_h C_{p,h} (T_{h,in} - T_{h,out}) = UA \frac{(T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,out} - T_{c,in})}{\ln[(T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in})]} \quad (4.15)$$

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

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient, U) ของแบบจำลอง

เมื่อได้แบบจำลองคณิตศาสตร์ของอัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate model) ต้องมีการสอบทานความถูกต้องโดยนำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient, U)

ที่ซึ่ง

$$R_{f(i)} = R_{f(i-1)} + \Delta t \times \left. \frac{dR_f}{dt} \right|_{(i-1)} \quad (4.16)$$

โดยที่ $R_{f(i)}$ = ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกรัน (Fouling factor) ที่ i ($\text{m}^2 \text{ h K/kJ}$)
 $R_{f(i-1)}$ = ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกรัน (Fouling factor) ที่ $i-1$ ($\text{m}^2 \text{ h K/kJ}$)
 Δt = เวลา (h)
 $\left. \frac{dR_f}{dt} \right|_{(i-1)}$ = อัตราการเกิดตะกรัน ($\text{m}^2 \text{ h K/kJ/h}$)

จาก

$$R_{f(i)} = \frac{1}{U_{(t)}} - \frac{1}{U_c} \quad (4.17)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $U_{(t)}$ จากสมการ

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_{(t)}} &= R_f(t) + \frac{1}{U_c} \\ U_{(t)} &= \frac{1}{R_f(t) + \frac{1}{U_c}} \end{aligned} \quad (4.18)$$

บทที่ 5

ผลการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการดำเนินการวิจัย แบ่งได้เป็น สอง ส่วน ส่วนที่หนึ่ง คือสร้างแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate, dR_f/dt) ที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงานในระบบ และส่วนที่สองคือนำแบบจำลองที่สร้างไปใช้กับข้อมูลชุดที่สองเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากโรงงานจริงจากข้อมูลชุดที่สอง

5.1 การสร้างแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate, dR_f/dt) ที่เหมาะสมกับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบที่ยกมาศึกษานั้น ประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 6 เครื่อง (เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010 ถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B) เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาสร้างโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการจำลอง และเลียนแบบกระบวนการโดยใช้แบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันของ Nars ตามสมการที่ 4.4 มาทำการพัฒนาเพื่อใช้กับงานวิจัยนี้

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4}$$

โดยที่

$$\frac{dR_f}{dt} = \text{อัตราการก่อตัวของตะกรัน(Fouling rate), (m}^2 \text{ h K/kJ)/h}$$

$$Re = \text{Reynolds number}$$

$$R = \text{Universal gas constant (8.314 kJ/kg mol K)}$$

$$T_f = \text{อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)}$$

$$\alpha, \beta, \gamma = \text{ค่าพารามิเตอร์}$$

และ

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

$$Re = \text{Reynolds number}$$

$$D = \text{รัศมีของท่อ (m)}$$

$$V = \text{ความเร็วของของไหล (m/s)}$$

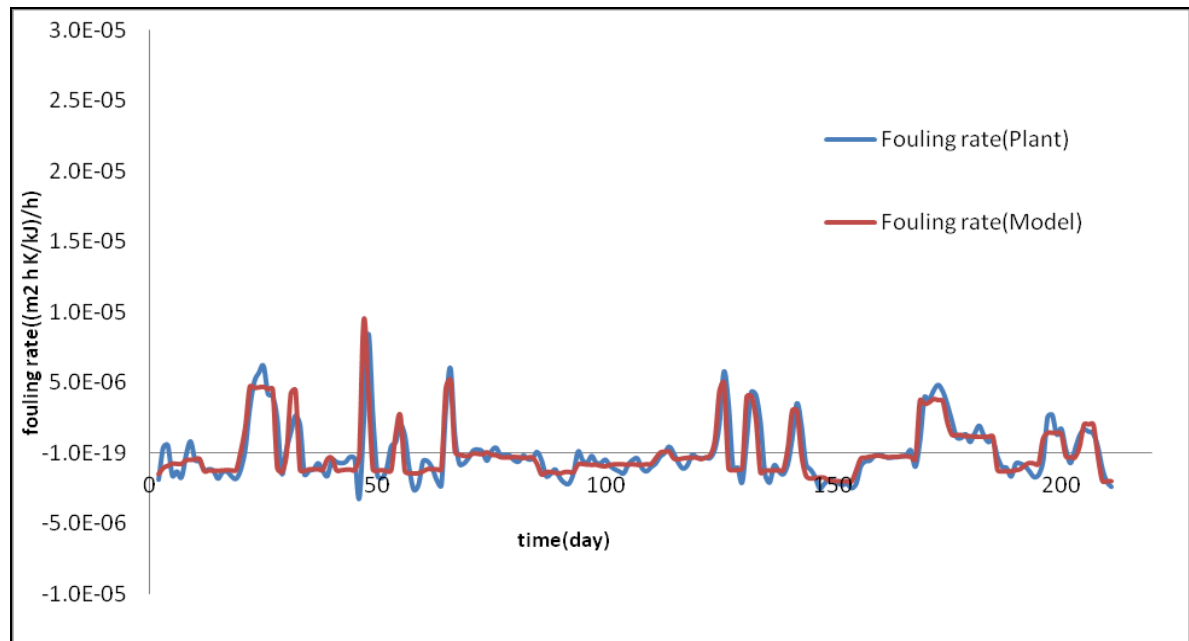
$$\rho = \text{ความหนาแน่นของของไหล (kg/m}^3\text{)}$$

μ = ความหนืดของของไหล (kg/m s)

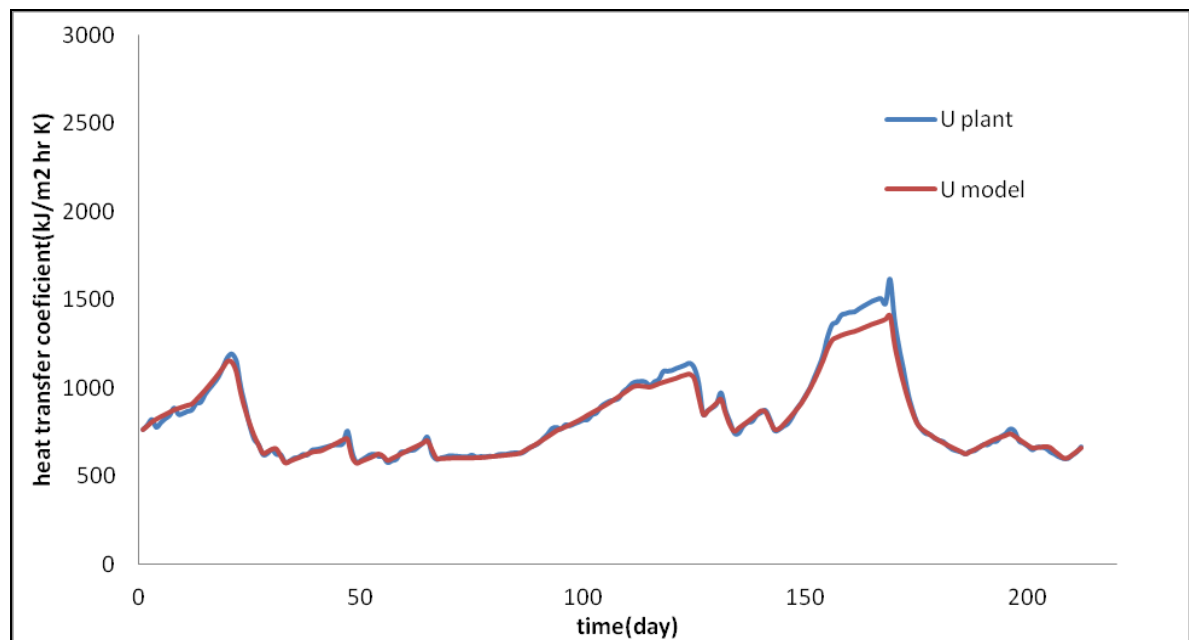
โดยเทียบจากค่าอัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate, dR_f/dt) ของสายน้ำมันดิบ ที่ซึ่งพารามิเตอร์ที่ต้องการหาคือ α , β และ γ ที่เหมาะสมในกระบวนการจริงที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง และสามารถอธิบายรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันได้ใกล้เคียงกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการจริงมากที่สุด เพื่อให้ได้ความใกล้เคียง และเกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากการสุ่มหาค่าตัวแปรจำเป็นต้องอาศัยค่าความคลาดเคลื่อนผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง โดยเทียบค่าความต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งให้ได้ค่าจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนผลต่างเฉลี่ยกำลังสองมีค่าแตกต่างกันน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง (obs) ตามสมการที่ 4.4

ทั้งนี้ได้แสดงผลการจำลองรายงานแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ โดยแบ่งการแสดงผลการจำลองเรียงตามเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มต้น จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ ตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010 จนกระทั่งถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B ตลอดช่วงระยะเวลาดำเนินการ 212 วัน ตามลำดับดังนี้

5.1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของ 41E010



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ 41E010

จากผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์คือ α , β และ γ โดยการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่

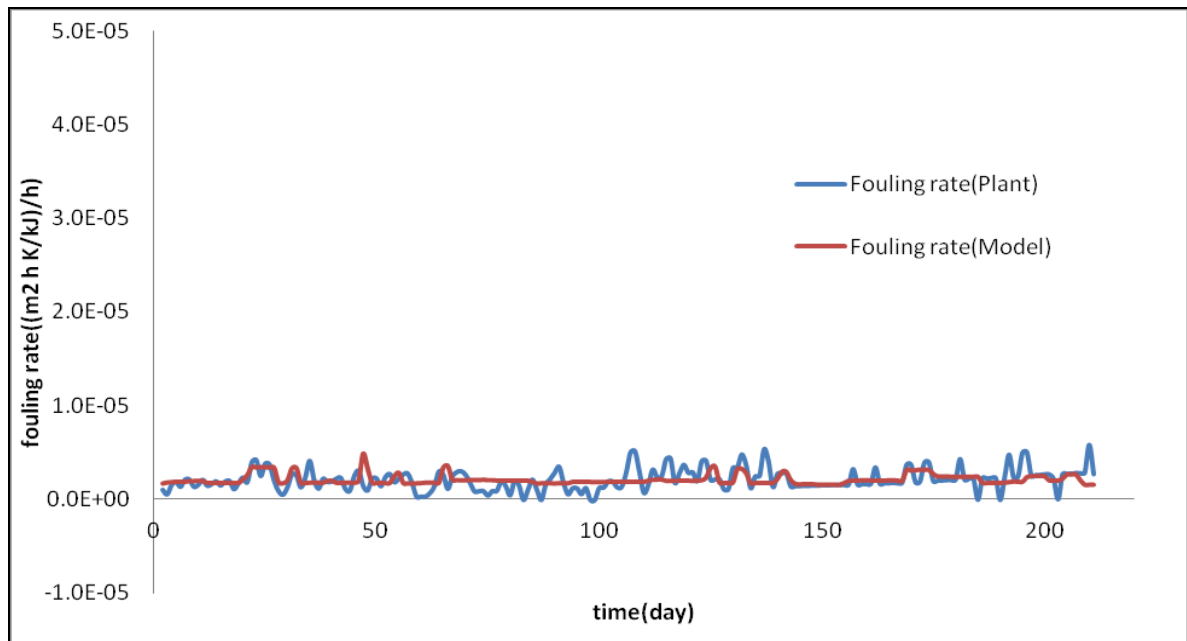
$$\begin{aligned}\alpha &= 200.52 \text{ m}^2 \text{ K/kJ} \\ \beta &= -1.71 \\ \gamma &= 1.06 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในแบบจำลองจะทำให้รูปแบบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 212 วันดำเนินการต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยสังเกตได้จากค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง(obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

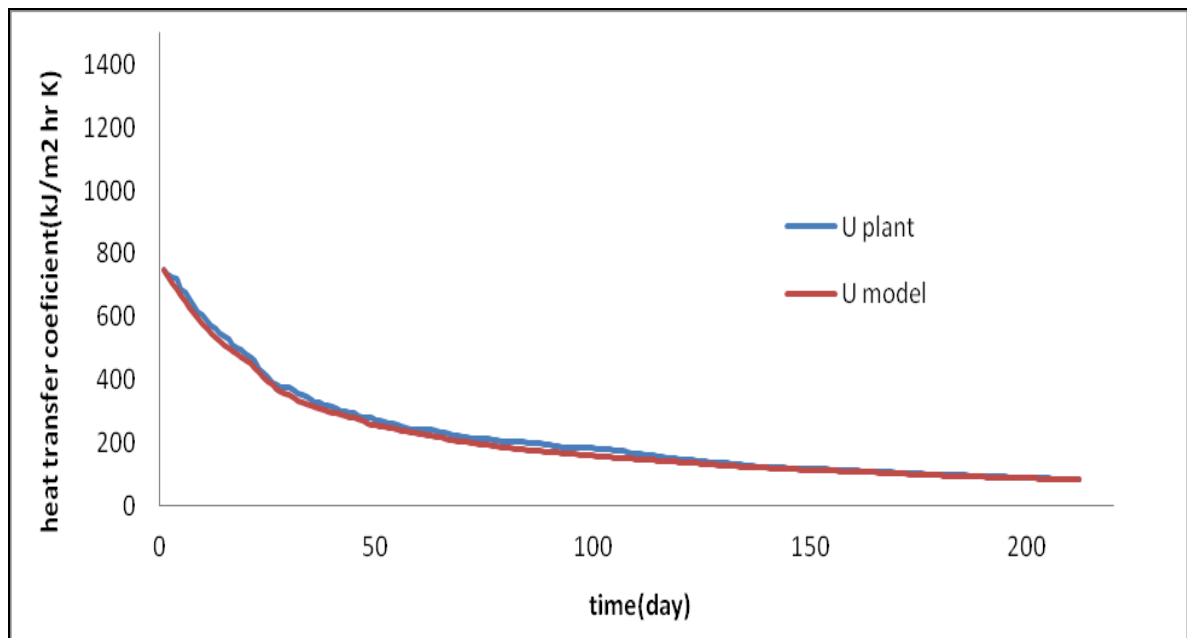
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010 ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 200.52 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.71$ และ $\gamma = 1.06 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกรัน	2.03×10^{-6}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	39

5.1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของ 41E011



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E011

จากผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์คือ α , β และ γ โดยการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่

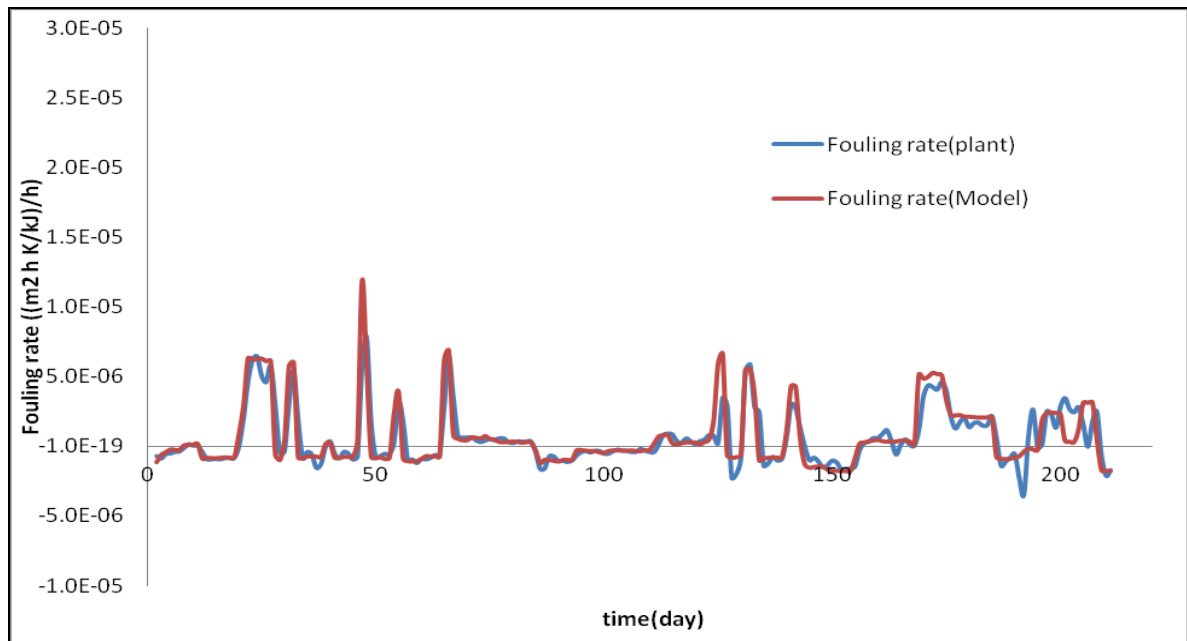
$$\begin{aligned}\alpha &= 76.71 \text{ m}^2 \text{ K/kJ} \\ \beta &= -1.69 \\ \gamma &= 9.85 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในแบบจำลองจะทำให้รูปแบบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 212 วันดำเนินการต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยสังเกตได้จากค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง(obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

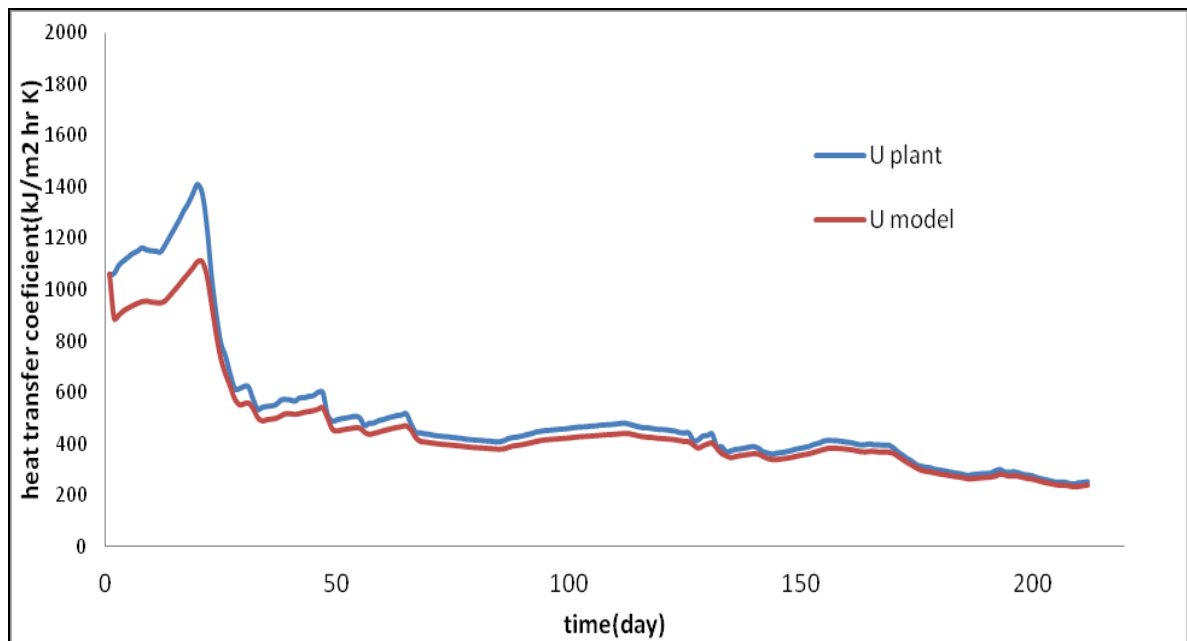
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011 ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 76.71 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.69$ และ $\gamma = 9.85 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกรัน	1.64×10^{-5}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	15

5.1.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E012



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของ 41E012



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E012

จากผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์คือ α , β และ γ โดยการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่

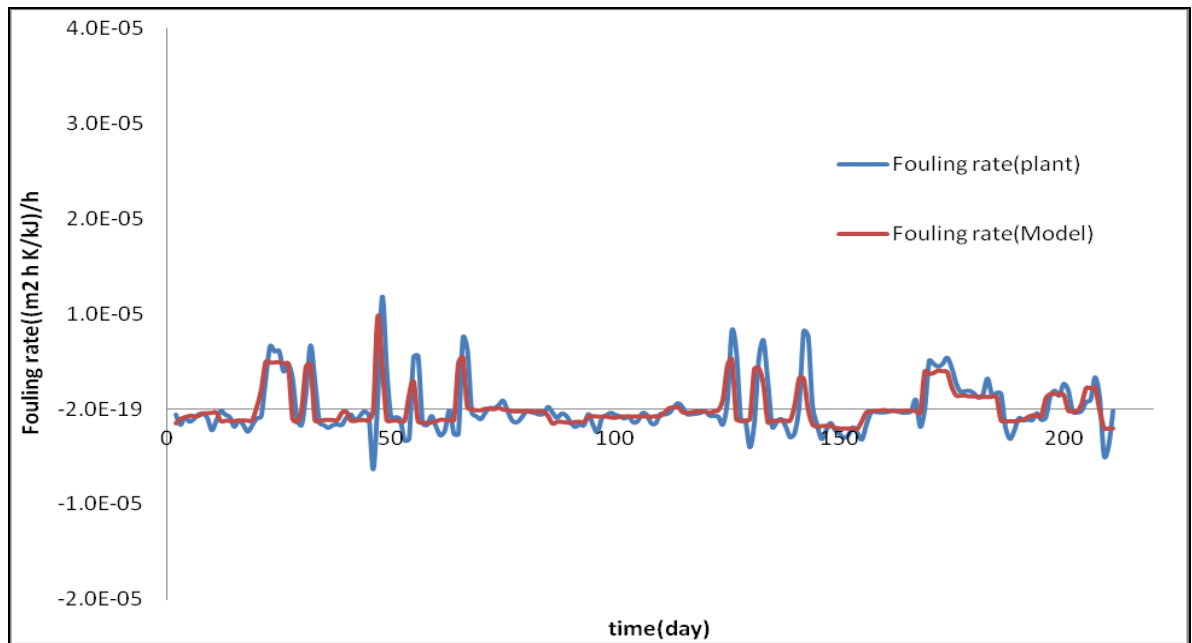
$$\begin{aligned}\alpha &= 270.81 \text{ m}^2 \text{ K/kJ} \\ \beta &= -1.60 \\ \gamma &= 9.60 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในแบบจำลองจะทำให้รูปแบบค่าอัตราการก่อตัวของตะกอนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 212 วันดำเนินการต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยสังเกตได้จากค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง(obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

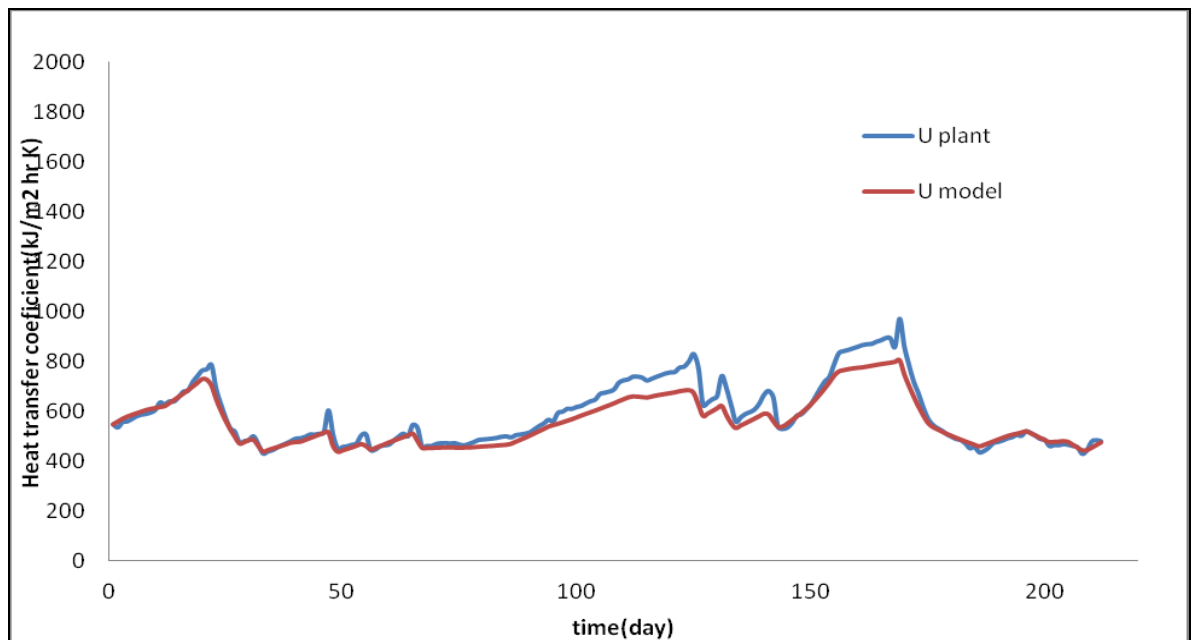
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E012 ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 270.81 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.60$ และ $\gamma = 9.60 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกอน	4.97×10^{-6}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	80

5.1.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B



รูปที่ 5.7 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของ 41E013A/B



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E013A/B

จากผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์คือ α , β และ γ โดยการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่

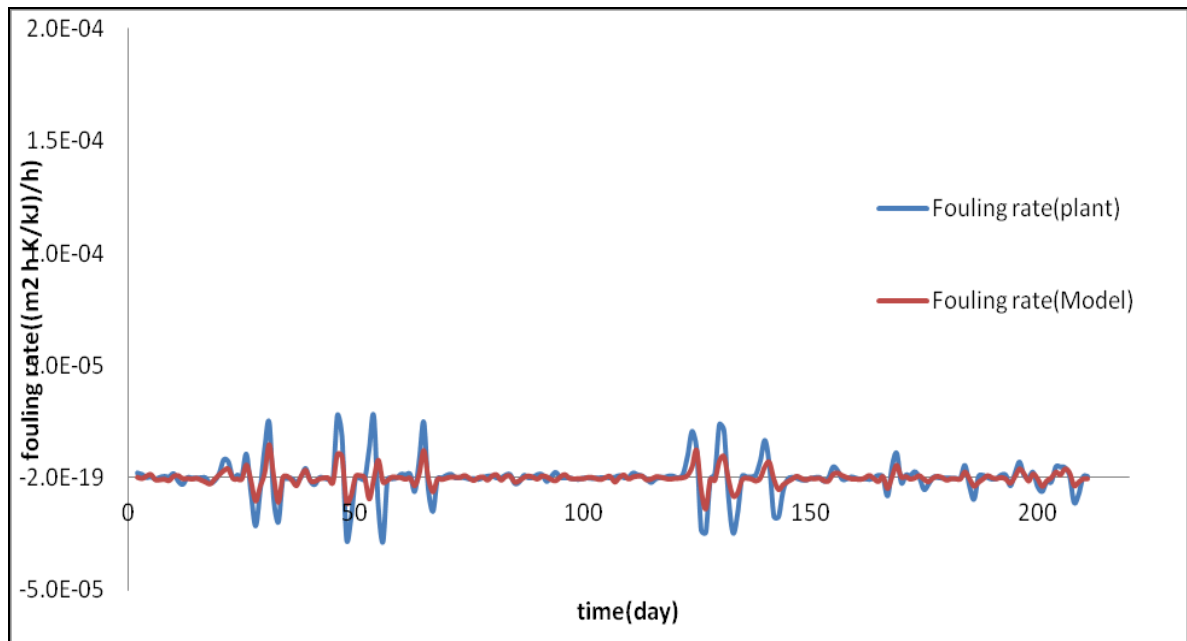
$$\begin{aligned}\alpha &= 149.70 \text{ m}^2 \text{ K/kJ} \\ \beta &= -1.61 \\ \gamma &= 9.98 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในแบบจำลองจะทำให้รูปแบบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 212 วันดำเนินการต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยสังเกตได้จากค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง(obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

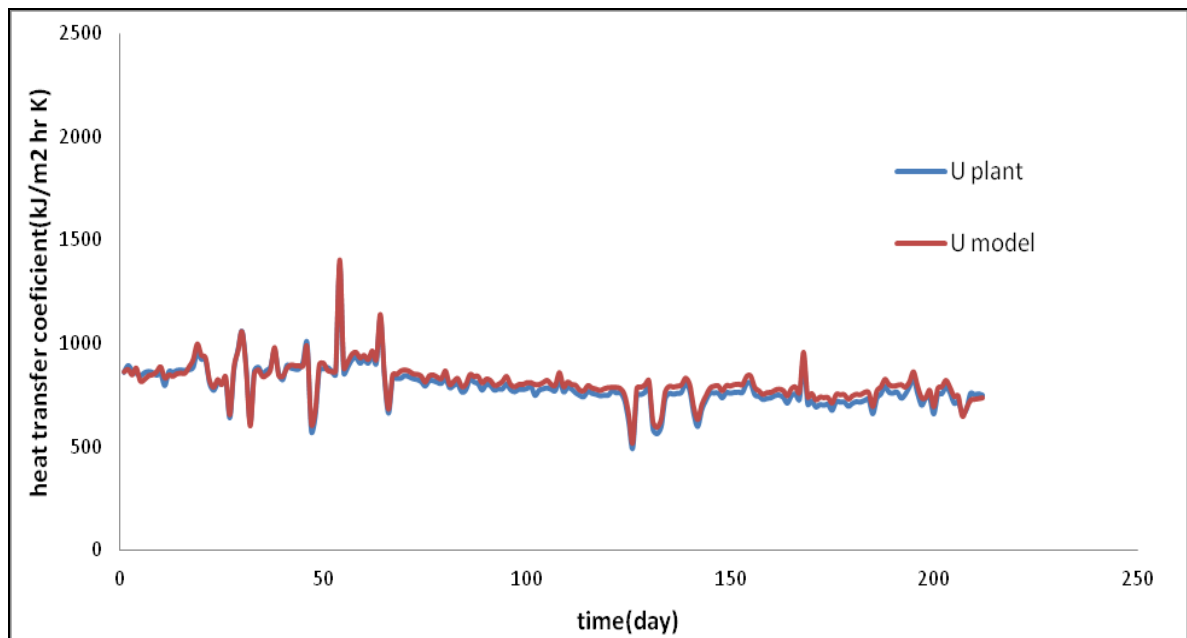
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 149.70 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.61$ และ $\gamma = 9.68 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกรัน	3.48×10^{-6}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	48

5.1.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E023



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของ 41E023



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E023

จากผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์คือ α , β และ γ โดยการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่

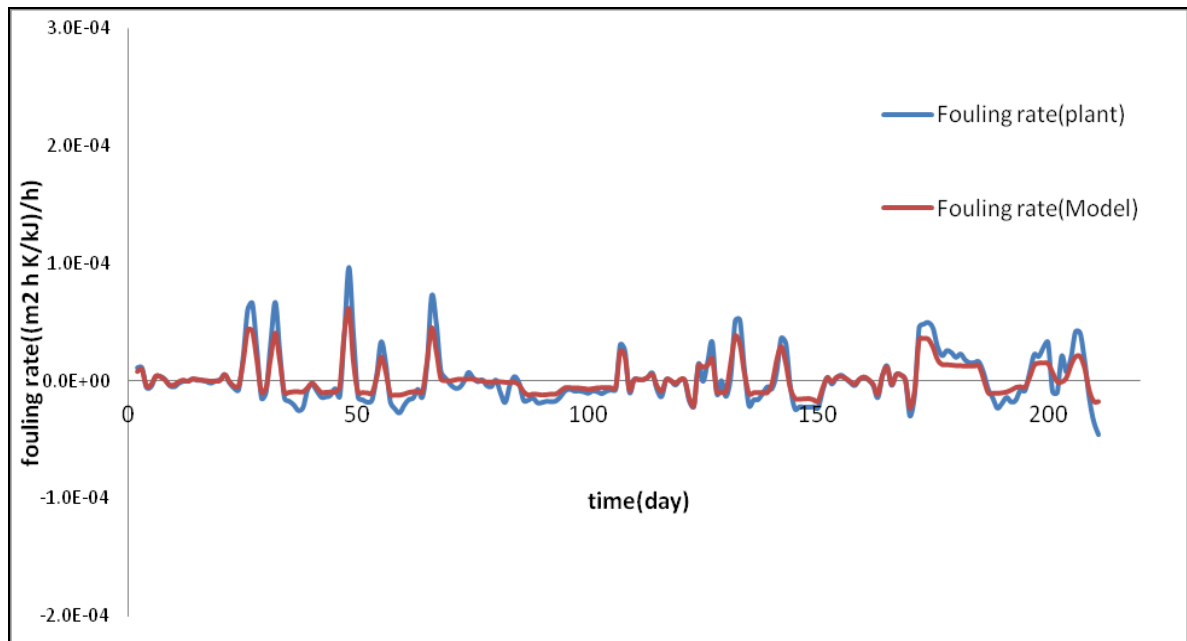
$$\begin{aligned}\alpha &= 214.81 \text{ m}^2 \text{ K/kJ} \\ \beta &= -1.00 \\ \gamma &= 9.60 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในแบบจำลองจะทำให้รูปแบบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 212 วันดำเนินการต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยสังเกตได้จากค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง(obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

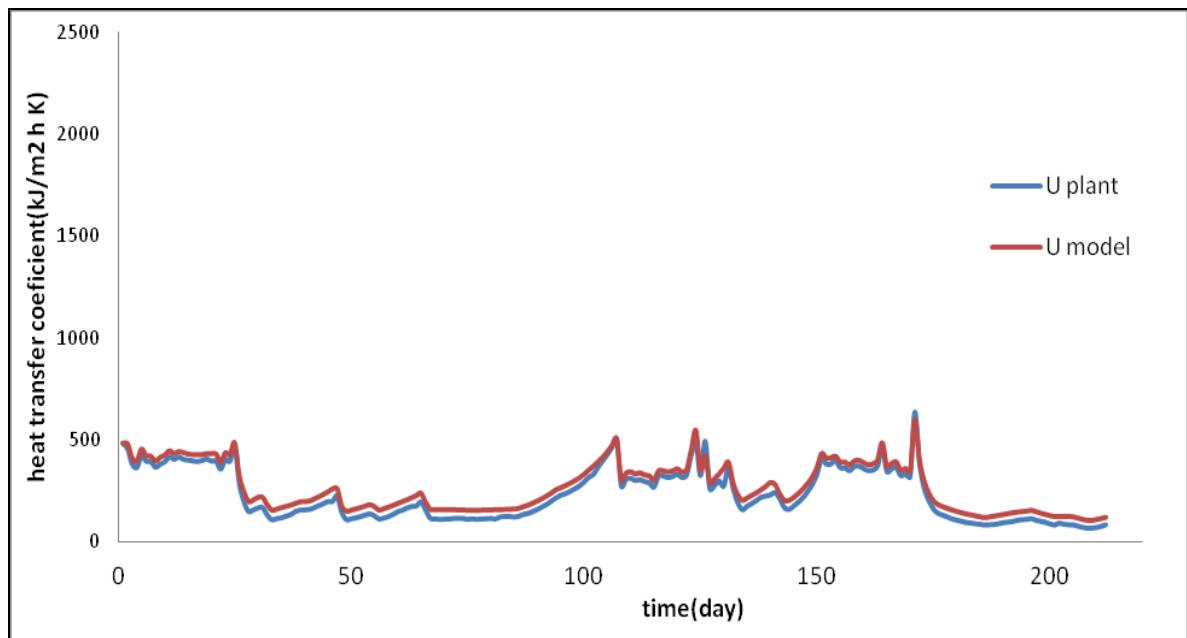
ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E023 ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 214.81 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.00$ และ $\gamma = 9.60 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกรัน	5.82×10^{-6}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	27

5.1.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของ 41E024A/B



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 41E024A/B

จากผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์คือ α , β และ γ โดยการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่

$$\begin{aligned}\alpha &= 99 \text{ m}^2 \text{ K/kJ} \\ \beta &= -1.32 \\ \gamma &= 9.60 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรลงในแบบจำลองจะทำให้รูปแบบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 212 วันดำเนินการต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยสังเกตได้จากค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง(obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 99 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.32$ และ $\gamma = 9.60 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกรัน	1.03×10^{-5}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	164

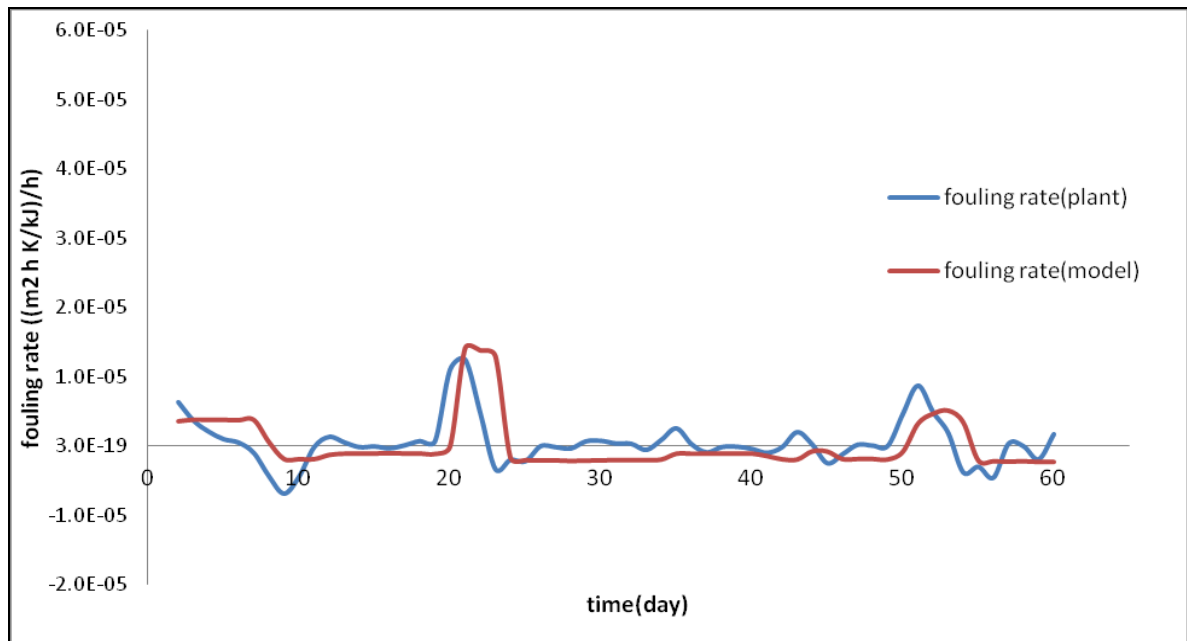
ตารางที่ 5.7 แสดงผลอัตราการทำตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเปรียบเทียบระหว่างโรงงานจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง

Heat exchanger	Parameter			RMSE	
	A	β	λ	dR_r/dt	U
41E010	200.52	-1.71	1.06×10^{-7}	2.03×10^{-6}	39
41E011	76.71	-1.69	9.58×10^{-8}	1.64×10^{-5}	15
41E012	270.81	-1.60	9.60×10^{-8}	4.97×10^{-6}	80
41E013A/B	149.70	-1.61	9.98×10^{-8}	3.48×10^{-6}	48
41E023	214.81	-1.00	9.60×10^{-8}	5.82×10^{-6}	27
41E024A/B	99.00	-1.32	9.60×10^{-7}	1.03×10^{-5}	35

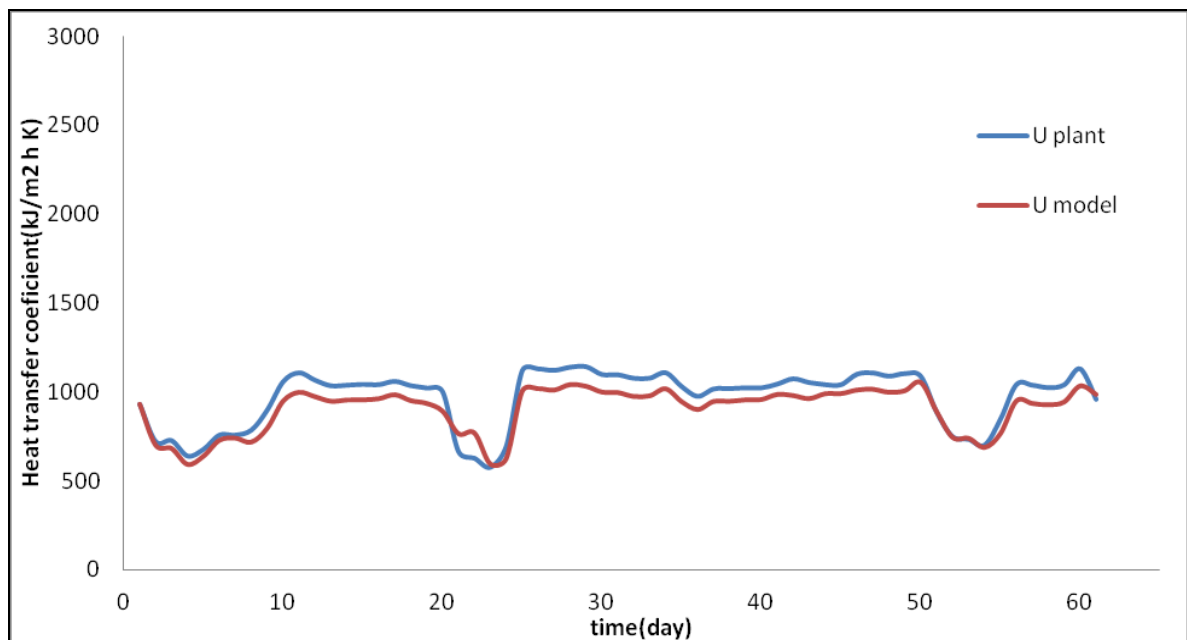
5.2 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถสอบทานความถูกต้องโดยทำการเปรียบเทียบกับค่าการอัตราทำตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(41E010 ถึง 41E024A/B) มาใช้กับข้อมูลจากโรงงานจริงชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาดำเนินการผลิต 61 วัน โดยแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงผลตามลำดับดังนี้

5.2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E010

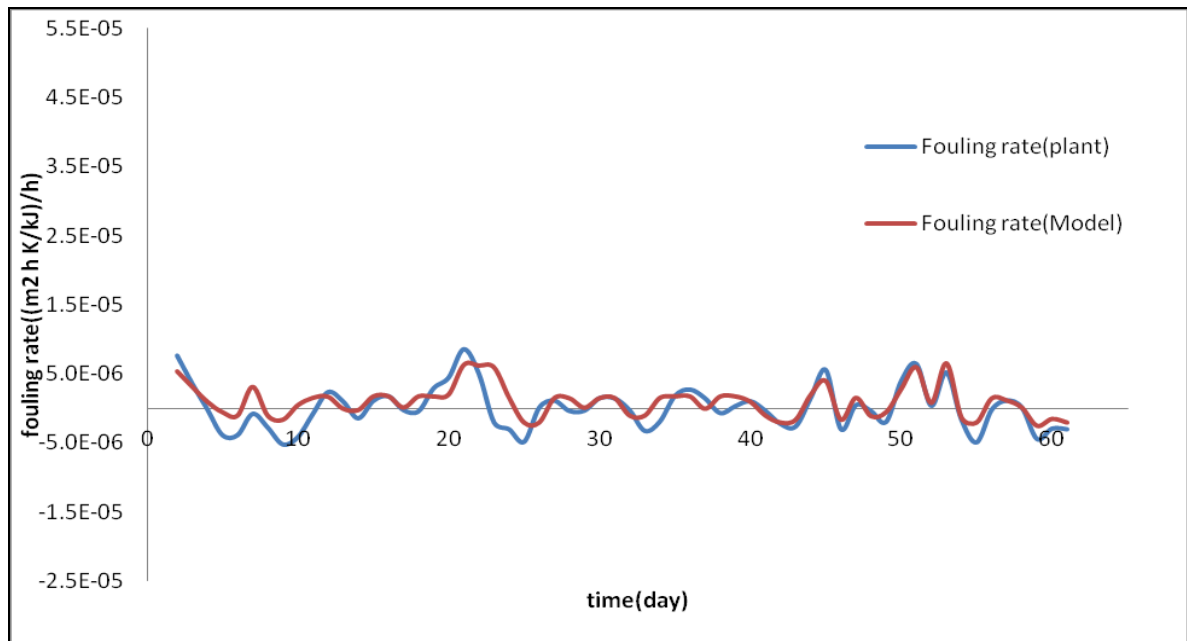


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันจากข้อมูลชุดที่ 2 ของ 41E010

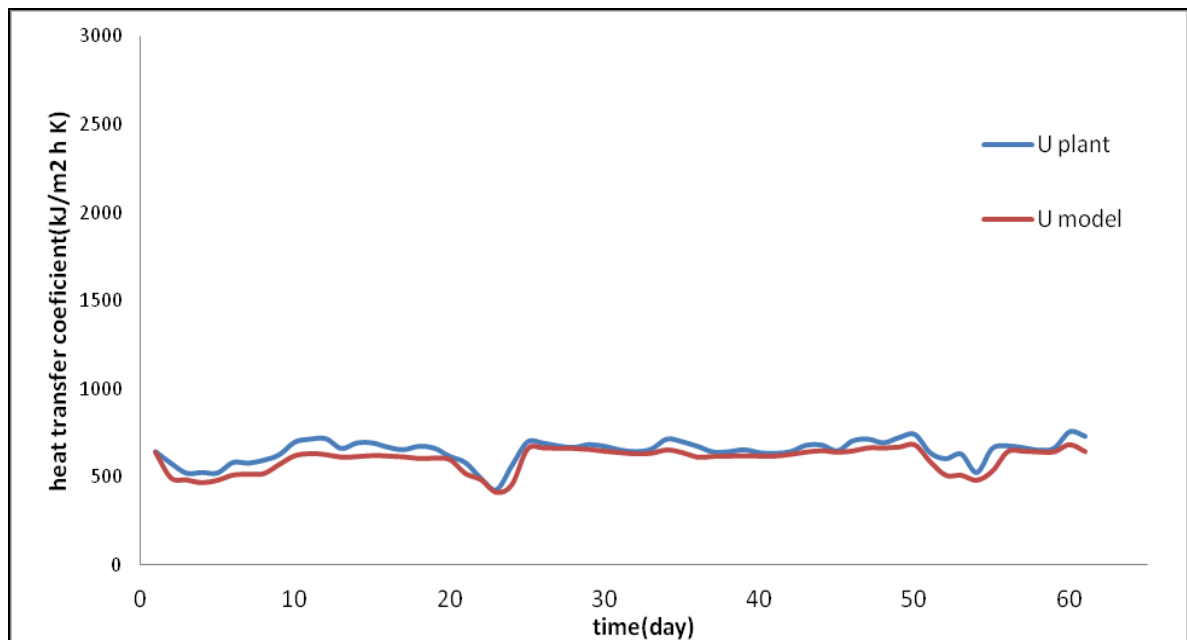


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E010

5.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011

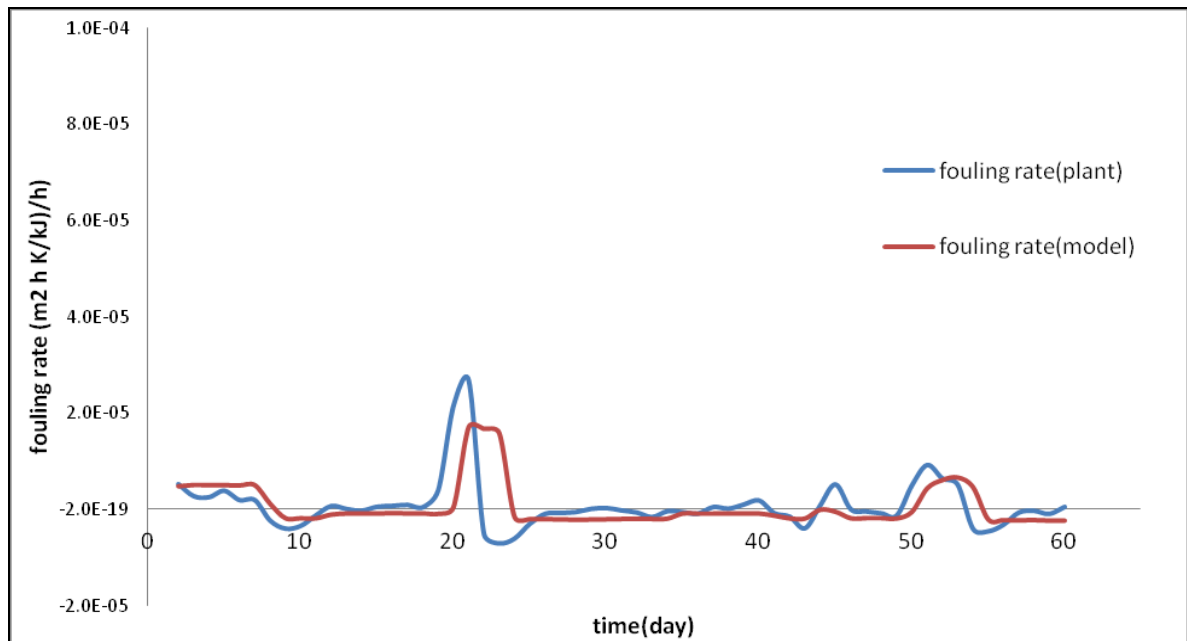


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันจากข้อมูลชุดที่ 2 ของ 41E011

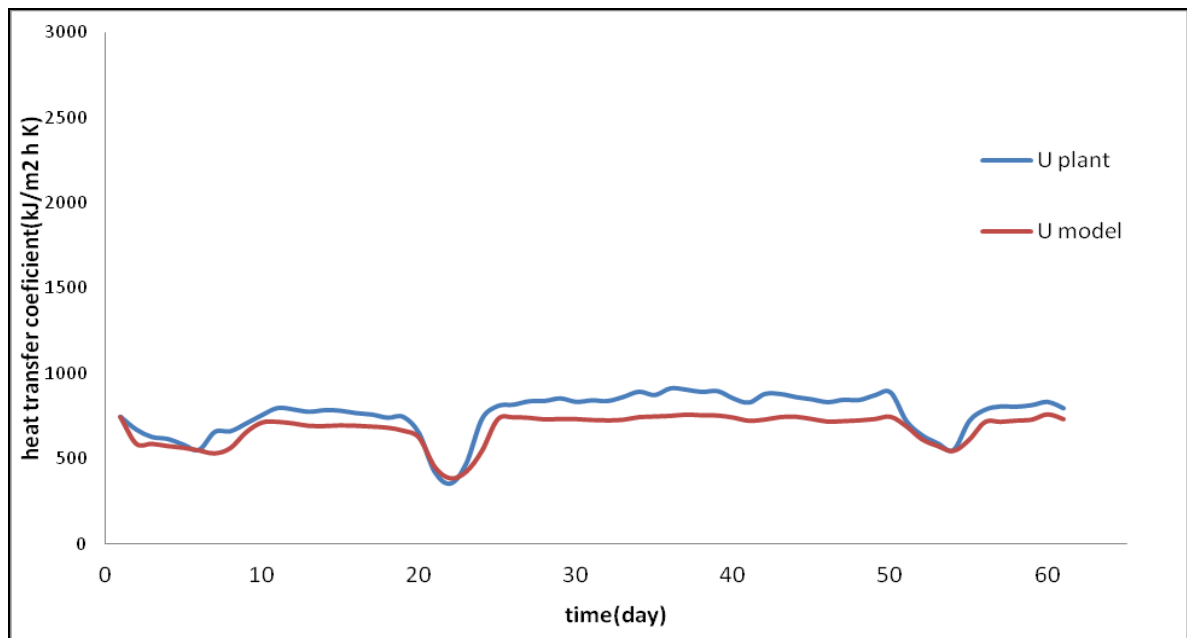


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E011

5.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E012

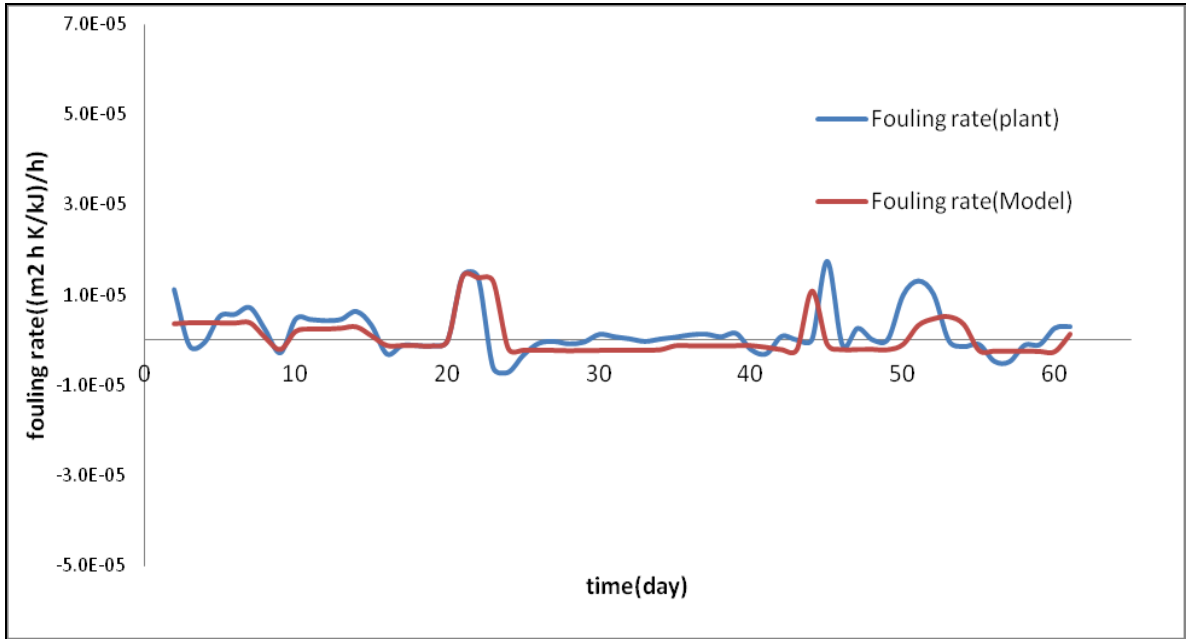


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของข้อมูลชุดที่ 2 41E012

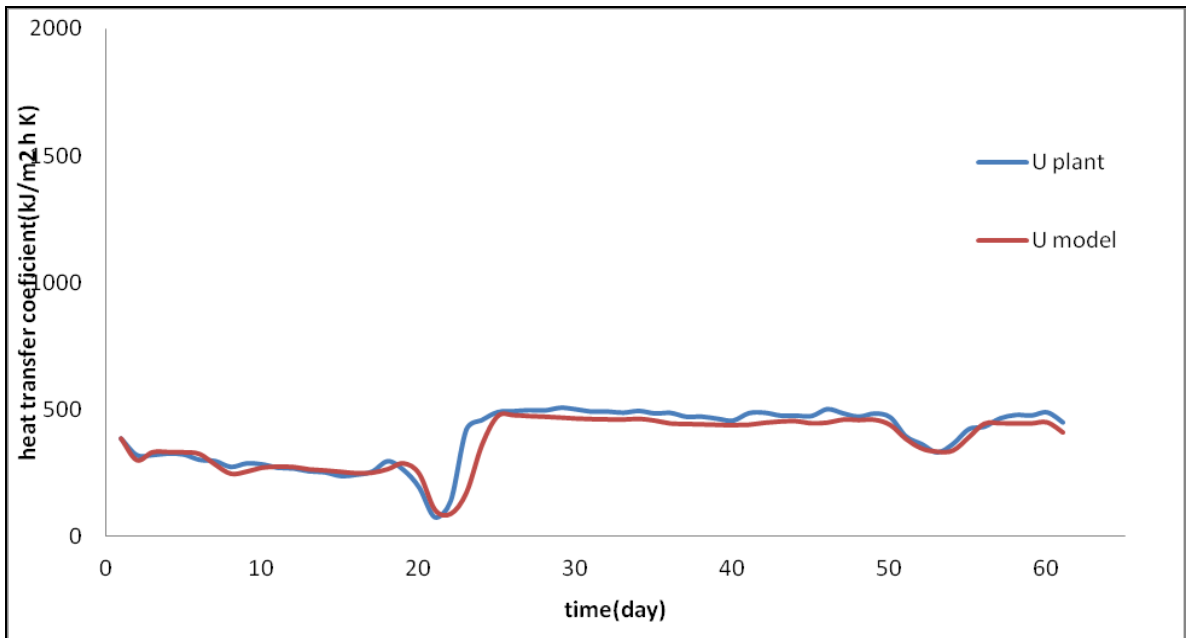


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E012

5.2.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013A/B

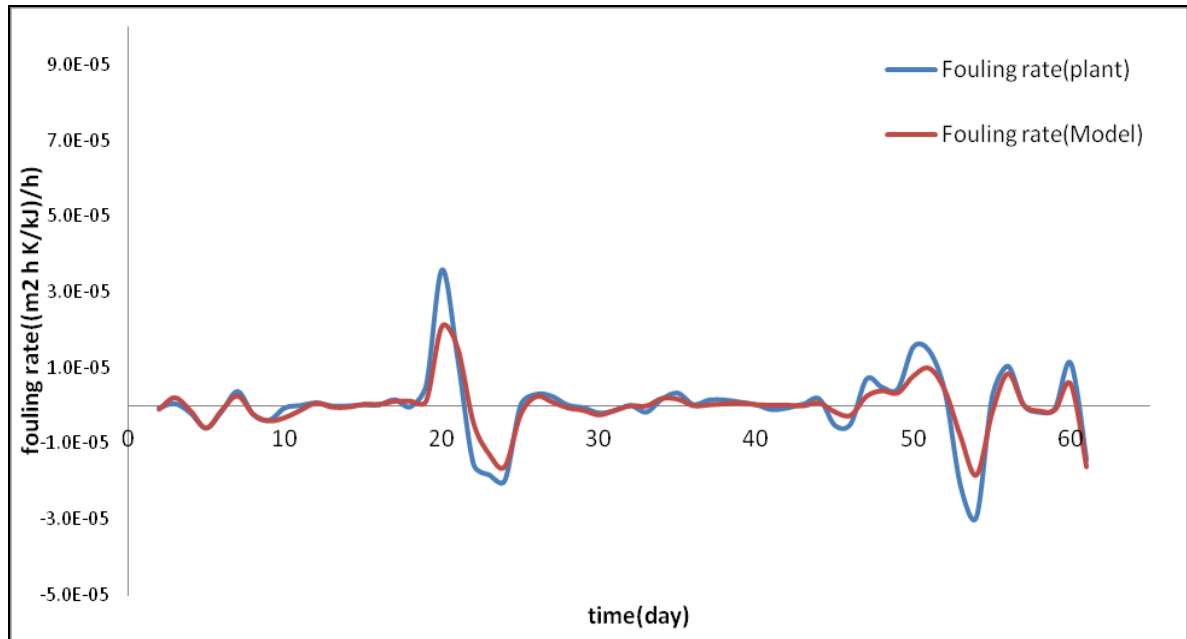


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของข้อมูลชุดที่ 2 41E013A/B

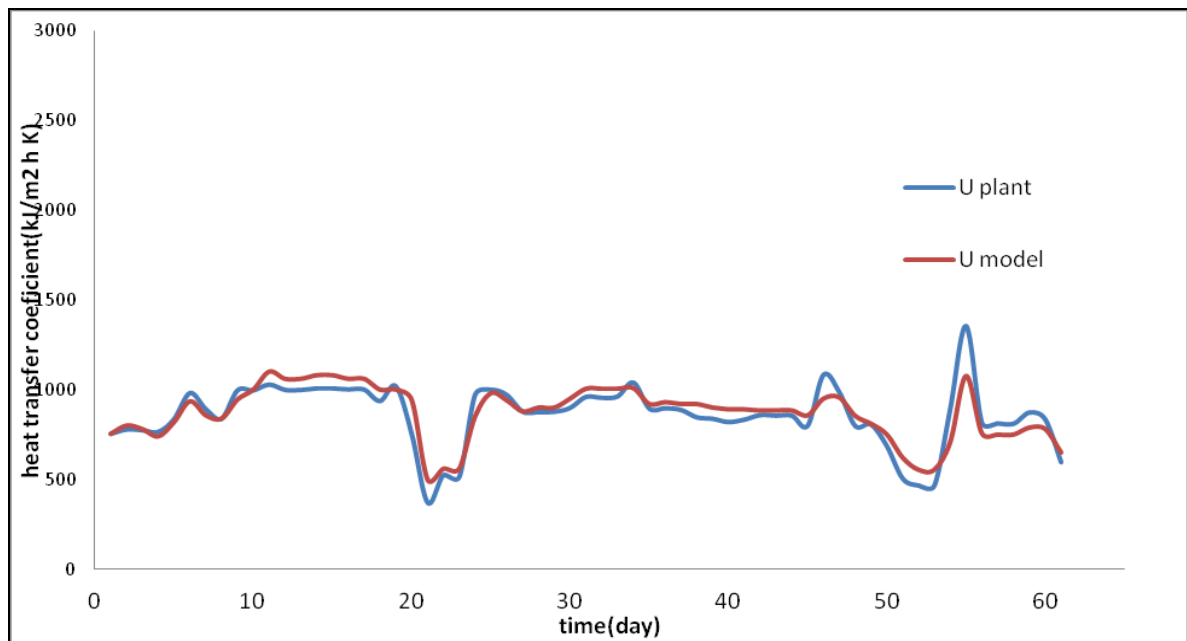


รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E013A/B

5.2.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E023

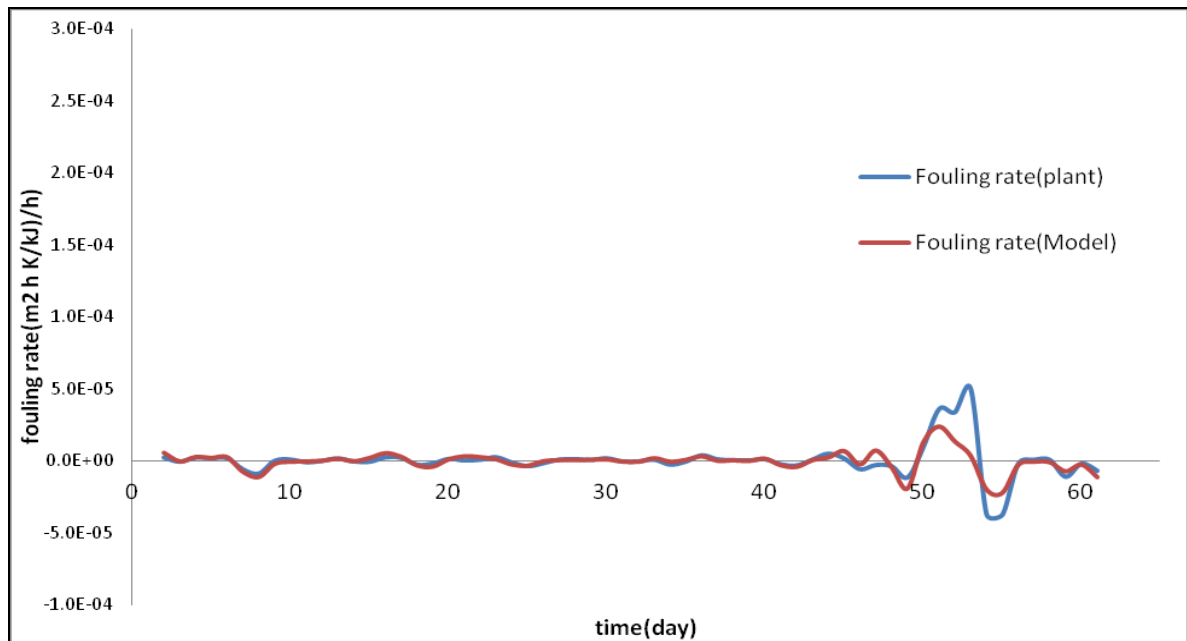


รูปที่ 5.21 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันเกิดตะกรันของข้อมูลชุดที่ 2 41E023

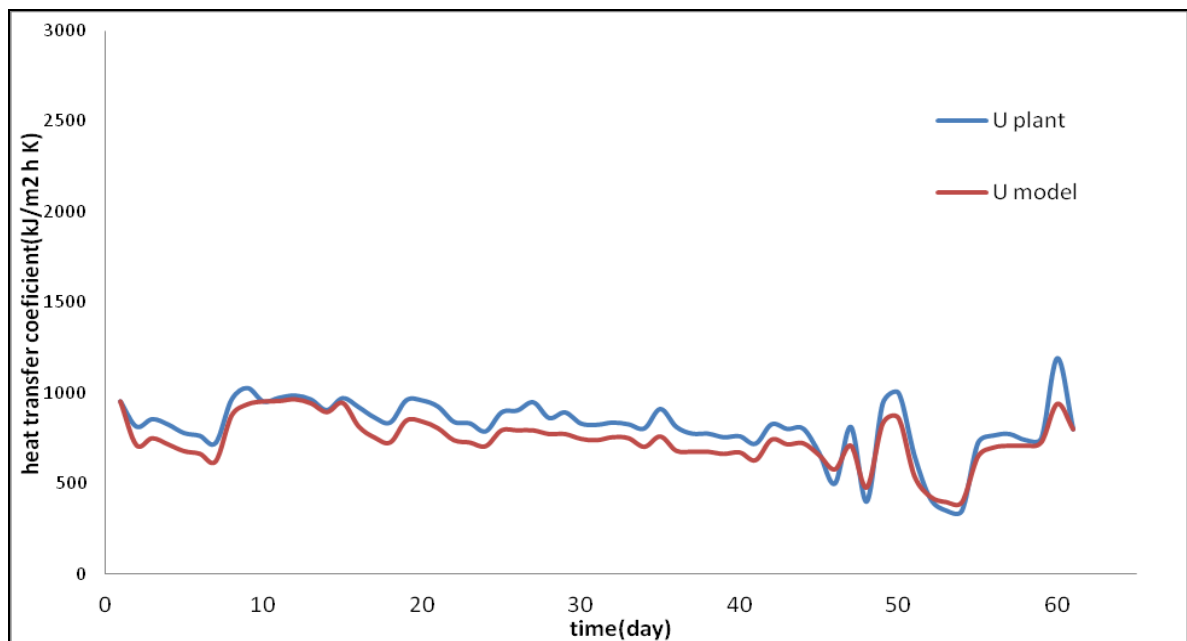


รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E023

5.2.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E024A/B



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงอัตราการก่อตัวของตะกรันของข้อมูลชุดที่ 2 41E024A/B



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข้อมูลชุดที่ 2 41E024A/B

ตารางที่ 5.8 แสดงผลอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลชุดที่ 2 ของโรงงานจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง

Heat exchanger	Parameter			RMSE	
	A	β	λ	dR_r/dt	U
41E010	200.52	-1.71	1.06×10^{-7}	4.26×10^{-7}	82
41E011	76.71	-1.69	9.58×10^{-8}	3.36×10^{-6}	52
41E012	270.81	-1.60	9.60×10^{-8}	6.18×10^{-6}	97
41E013A/B	149.70	-1.61	9.98×10^{-8}	8.16×10^{-6}	43
41E023	214.81	-1.00	9.60×10^{-8}	3.92×10^{-6}	75
41E024A/B	99.00	-1.32	9.60×10^{-7}	7.62×10^{-6}	94

ผลจากการจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องในข่ายงานรวม 6 เครื่อง ซึ่งได้แสดงกราฟที่ใช้เทียบข้อมูลอัตราการก่อตัวของตะกรันและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ได้จากโรงงาน(ข้อมูลชุดที่ 2) และจากแบบจำลองในระยะดำเนินการต่อเนื่อง 61 วัน ลักษณะของเส้นกราฟทั้ง 2 เส้นมีลักษณะเพิ่มและลดไปในทิศทางเดียวกันและลักษณะของกราฟที่มีระยะของช่องว่างระหว่างกราฟ 2 เส้นน้อยมากอีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสอง (RMSE) มีค่าน้อย ที่เป็นเช่นนั้นแสดงว่าแบบจำลองอัตราการเกิดตะกรันและค่าพารามิเตอร์ (α , β และ γ) มีความเหมาะสมกับกระบวนการจากโรงงานจริงและสามารถนำไปใช้ในการทำนายอัตราการเกิดตะกรันของกระบวนการจริงจากโรงงานได้อย่างเหมาะสม

ผลจากการจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำการศึกษาพบว่ารูปแบบของการเกิดตะกรันเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล(Asymptotic fouling model)หรือแบบมีเส้นแนวโน้ม ลักษณะการเกิดตะกรันคล้ายรูปแบบอัตราลดลง (Falling rate fouling model) คือ ตะกรันจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นช่วงแรก ๆ จากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปในช่วงหนึ่งตะกรันจะค่อย ๆ เริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ แต่ต่างกันที่ลักษณะการเกาะยึดของตะกรัน กล่าวคือ การหลุดตัวของตะกรันออกจากพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนการหลุดของตะกรันเกิดเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตะกรันด้วยกันเองหรือตะกรันกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าแรงตัดเฉือนของของไหล ก่อให้เกิดการละลายกลับไปยังของไหลและปัจจัยที่ผลต่อทำให้อัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลจากโรงงานอธิบายได้ดังนี้

- องค์ประกอบของสายน้ำมันดิบ(Crude feed) เนื่องจากสายป้อนน้ำมันดิบที่ส่งผ่านเข้าทำงานในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องนั้น ล้วนมีองค์ประกอบที่อยู่ในสายป้อนหลากหลายชนิด และสัดส่วนองค์ประกอบนั้น ๆ มากน้อยแตกต่างกันไป โดยองค์ประกอบเหล่านั้นสามารถเกิดการพัดพา ตกค้าง และสะสมเกิดเป็นตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
 - ความเข้มข้นของสารที่เป็นตะกรันในของไหล เป็นไปได้ว่าปริมาณของสารที่ไหลผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่อง จะทำให้เกิดตะกรันมีความแตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารที่เป็นตะกรันปนอยู่ในของไหล ซึ่งหากมีความเข้มข้นของสารที่เป็นตะกรันมาก อาจส่งผลให้ปริมาณตะกรันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
 - อุณหภูมิ (Temperature) ทั้งนี้ในองค์ประกอบที่ทำให้เกิดตะกรันได้นั้น สามารถเกิดตะกรันที่สถานะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน หรือเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของสารบางตัวเมื่อไปรวมเข้ากับสารประกอบตัวอื่น ๆ ก็อาจสามารถเกิดปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นตะกรันที่สถานะอุณหภูมิแตกต่างกันไปจากเดิมได้เช่นกัน
 - ระยะเวลาเฉลี่ยของสารป้อนที่อยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Resident time) ในส่วนนี้เวลาที่ใช้งานสามารถทำให้เกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับองค์ประกอบบางตัวอาจจำเป็นต้องใช้เวลามากพอในการเกิดตะกรัน หรือบางตัวอาจใช้เวลาเพียงไม่นานก็สามารถเกิดการสะสมของตะกรันได้
 - แรงเฉือนกระทำของสารป้อน (Shear force) อัตราการหลุดของตะกรันเนื่องจากแรงเฉือนกระทำของสารป้อน เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีต่อความแตกต่างของรูปแบบการเกิดตะกรันในขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งหากการเกาะตัวของตะกรันมีลักษณะยึดเกาะแบบหลวม ๆ จนไม่สามารถเอาชนะแรงเฉือนของสารป้อนที่ส่งผ่านเข้ามายังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ก็มีผลทำให้ตะกรันเหล่านั้นหลุดหายไป หรือเมื่ออัตราการเกิดตะกรัน และแรงเฉือนกระทำของสารป้อน(Share force) โกล้เคียงกันทำให้ค่าความต้านทานความร้อนลงที่ เป็นต้น
 - ตัวเร่งอัตราการเกิดตะกรัน เช่น วัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบเกิดการเกิดตะกรันบางตัว สามารถเกิดตะกรันได้ดีที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- นอกจากนี้ในน้ำมันดิบ (Crude Oil) ยังประกอบไปด้วย น้ำ โลหะที่ละลายน้ำได้ ของแข็งแขวนลอย

อนุภาคของแข็ง อาทิเช่นสารพวกเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salts) ได้แก่ โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียมรวมปะปนอยู่ ดังนั้นสารประกอบเหล่านี้จึงมีผลทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดการกัดกร่อนเกิดการอุดตัน สิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดตะกรันขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีผลทำให้ลักษณะการเกิดตะกรันแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้จากขบวนการที่ยกนำมาศึกษานั้น อาศัยกลไกการเกิดตะกรันที่ต่างกันออกไปด้วย โดยตะกรันที่เกิดขึ้นสามารถเกิดรวมกันได้หลาย ๆ แบบ หรือในบางครั้งการ

เกิดตะกรันชนิดหนึ่ง สามารถจะใช้ส่งเสริมให้อัตราการเกิดตะกรันอีกชนิดหนึ่งเกิดได้เร็วขึ้น เป็นต้น โดยจากข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ สามารถแยกลักษณะการเกิดตะกรันได้ดังนี้

ตะกรันจากการเกิด (Crystallization Fouling) หรือการเกิดอนุภาคของแข็งภายในของไหล เป็นตะกรันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความสามารถของการละลายของของไหลเนื่องจากอุณหภูมิและค่า pH ที่เปลี่ยนไป เมื่อความสามารถในการละลายลดลงจนทำให้ของไหลกลายเป็นของแข็งหรือเกิดผลึกขึ้นได้ จนทำให้เกิดการสะสมของของแข็งและผลิตภัณฑ์บริเวณชั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับอนุภาคของแข็งที่ปนเปื้อนอยู่ในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบนี้ที่พบมาก ได้แก่ จำพวกเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salts Deposit) ที่ละลายหลงเหลืออยู่ในสารป้อน อะโรมาติกส์ แนพทาลิน และไข

ตะกรันจากการตกตะกอน (Particulate Fouling or Sedimentation Fouling) ตะกรันที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เกิดจากของไหลมีอนุภาคแขวนลอยอยู่มาก เช่น การตกตะกอนของอนุภาคของโลหะในส่วนผสมที่ปะปนมาคบน้ำมันดิบ หรือการตกตะกอนของอนุภาคทราย หิน เป็นต้น ทั้งนี้ในข่างานกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบมักจะพบการตกตะกอนของแอสฟัลทีน (Asphaltene Precipitation) มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งแขวนลอย มีสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนและมีขั้วสูง (Complex compound, highest polarity) และเป็นตัวทำให้เกิดความข้นหนืด (Viscosity) ในแอสฟัลท์ หรือ ยางมะตอย

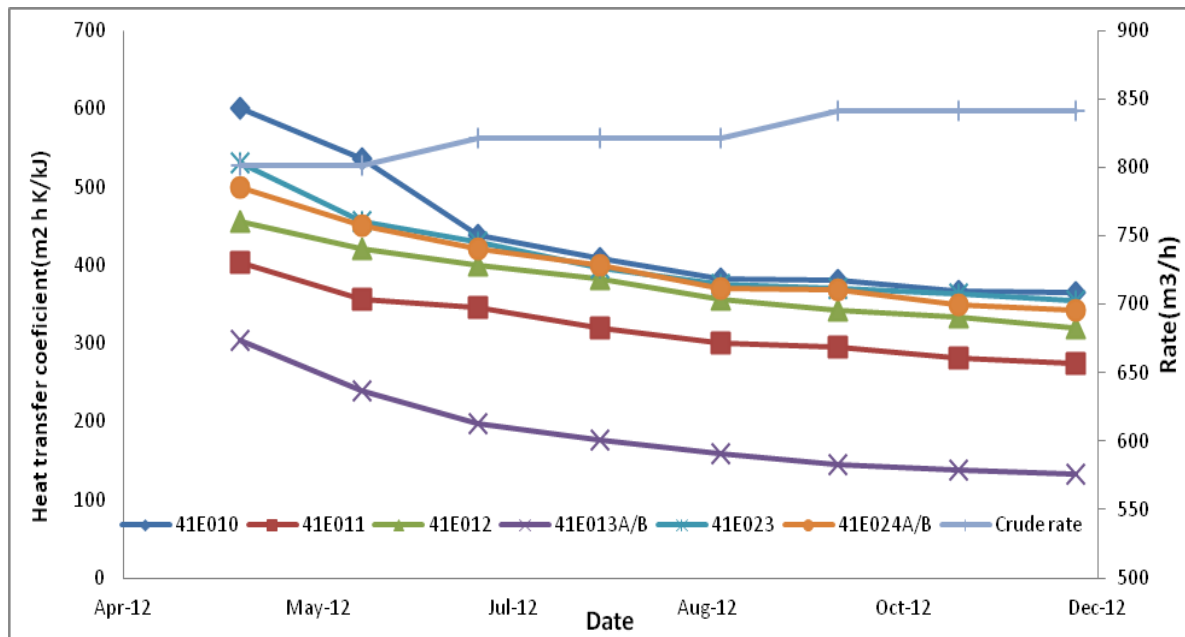
ตะกรันที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction Fouling) ตะกรันประเภทนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีของของไหลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ตัวใหม่ที่สามารถยึดติดกับพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ และเมื่อผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาเหล่านี้เคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้เกิดการสะสมของตะกรันได้ ทั้งนี้สารประกอบทำให้เกิดตะกรันจากปฏิกิริยา ได้แก่ โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic, Aromatic, Hydrocarbon) หรือ พีเอเอช เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน ส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ กลไกการเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างกับการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Polymerisation)

ตะกรันที่เกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion Fouling) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนระหว่างของของไหลกับพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแล้วสะสมอยู่บริเวณพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อน (Corrosion by Production) ซึ่งเป็นการกัดกร่อนหรือการเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนสภาพไป (Under Deposit Corrosion) จนกระทั่งเกิดการก่อตัวและสะสมของตะกรันได้

จากการจำลองเลียนแบบกระบวนการจริงของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงมากที่สุดรองลงไปให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยน

ความร้อน 41E011 41E012 41E024A/B 41E023 และ 41E010 ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนที่ลดลงแปรผกผันกับอัตราการก่อตัวของตะกรันอันเนื่องมาจากค่าความเร็วของน้ำมันดิบที่ต่ำทำให้มีแนวโน้มของการเกิดตะกรันที่สูง และจากผลการจำลองเลียนแบบกระบวนการสาเหตุที่ค่าของอัตราการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางเครื่องไม่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องมาจากแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน

สำหรับการศึกษาและสร้างแบบจำลองทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันในขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสายน้ำมันดิบ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจ วางแผน ปรับปรุง ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และควบคุมการดำเนินงานในกระบวนการผลิตต่อไปดังแสดงในรูปที่ 5.25 แสดงถึงปริมาณการผลิตของโรงกลั่นที่เป็นแผนการผลิตในปี พ.ศ. 2555 เปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 5.25 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เปรียบเทียบกับแผนการกลั่นน้ำมันในอนาคต

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรัน และผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของข่ಾಯงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 6 เครื่อง โดยศึกษาจากกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบในโรงงานอุตสาหกรรมจริงและพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งต้องพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์(α, β และ λ) ที่เหมาะสมกับกระบวนการดำเนินงานจริง ทั้งนี้เพื่อนำไปปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลอง และสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดตะกรัน ได้ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับกระบวนการดำเนินงานจริงมากที่สุด อีกทั้งสามารถทำนายอัตราการเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ಾಯงานทั้งระบบของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษาได้

การศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยนำข้อมูลของอัตราการก่อตัวของตะกรันของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 6 เครื่องในข่ಾಯงานมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการก่อตัวตะกรันที่ได้จากการจำลอง อีกทั้งมีการสอบทานย้อนกลับโดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของข้อมูลจากกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบจากโรงงานจริงกับแบบจำลอง ทั้งนี้ในการจำลองต้องผ่านกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์(α, β และ λ) ด้วยวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search)

จากแบบจำลองทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันเมื่อแทนค่าคงที่ตัวแปรซึ่งได้แก่ค่า α, β และ λ ลงในแบบจำลองและนำไปเปรียบเทียบค่าอัตราการก่อตัวตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับข้อมูลจากกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบชุดที่สองจากโรงงานจริงพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) มีค่าไม่เกิน 97 และสามารถยอมรับได้โดยรูปแบบการก่อตัวของตะกรันเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียลซึ่งแบบจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E13A/B มีความแม่นยำที่สุด (RMSE U เท่ากับ 43) รองลงมาคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011 (RMSE U เท่ากับ 52), 41E023 (RMSE U เท่ากับ 75), 41E010 (RMSE U เท่ากับ 82), 41E024A/B (RMSE U เท่ากับ 94) และ 41E012 (RMSE U เท่ากับ 97) ตามลำดับซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองกับข้อมูลจากโรงงานจริงเนื่องมาจากองค์ประกอบหลากหลายชนิดของสายน้ำมันดิบและสัดส่วนองค์ประกอบและความเข้มข้นแตกต่างกันออกไป

จากการจำลองเลียนแบบกระบวนการดำเนินงานจริงจากข้อมูลชุดที่สองของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E013 มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงมากที่สุด รองลงไปได้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 41E011 41E012 41E024A/B 41E023 และ 41E010 ตามลำดับ ทำให้มีผลให้ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องสูญเสียให้กับระบบมีค่ามากยิ่งขึ้นตามลำดับ

จากการศึกษาการเกิดตะกรัน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของข่ಾಯงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองค่าอัตราการก่อตัวตะกรันของสาย

น้ำมันดิบทำให้สามารถทำนายค่าอัตราการก่อตัวของตะกอนของขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสามารถนำข้อมูลที่ได้มาช่วยกำหนดช่วงเวลาการล้างทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียผลิตภัณท์ที่ไม่ได้คุณภาพ ลดการสูญเสียพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และค่าใช้จ่ายในการล้างทำความสะอาด

ทั้งนี้สามารถนำรูปแบบสมการจำลองทำนายค่าอัตราการก่อตัวของตะกอนของสายน้ำมันดิบไปใช้กับกระบวนการผลิตจริงเพื่อคาดการณ์ล่วงหน้าสำหรับล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม และควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมจริง

6.1 ข้อเสนอแนะ

- 1.แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สำหรับเลียนแบบกระบวนการจริง หากต้องการทราบผลที่แม่นยำ ที่เที่ยงตรง และใกล้เคียงกระบวนการจริงมากยิ่งขึ้น ควรเก็บค่าจริงที่เป็นข้อมูลในระยะเวลาสั้นๆ เพื่อนำไปพัฒนาเป็นแบบจำลองที่มีความแม่นยำขึ้น
- 2.แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้จำลอง ทำนาย หรือคาดการณ์ล่วงหน้า สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการปิโตรเลียมและปิโตรเคมีอื่น ๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าที่จำเป็นในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาปรับปรุงให้สอดคล้องกับกระบวนการนั้น ๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด, 2542.

วราภรณ์ ศรีสุขเจริญปัญญา. การศึกษาการเกิดฟาวลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของ
ข่ายงาน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการอุ่นน้ำมันดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภาษาอังกฤษ

Anwar,K.S., Syed, M.Z., Younas,M., and Budair ,M.O. A risk base heat exchanger analysis subject to fouling part II. Economics of heat exchanger cleaning.Energy fuel 25 (2000) : 445-461.

Javad Aminian and Shahrokh Shahhosseini, Evaluation of ANN modeling for prediction of crude oil fouling behavior. Applied Thermal Engineering 28 (2008) : 668-674.

Javad Aminian and Shahrokh Shahhosseini. Evaluation of ANN modeling for prediction of crude oil fouling behavior. Applied Thermal Engineering 28 (2008) : 668-674.

Javad Aminian and Shahrokh Shahhosseini. Neuro-based formulation to predict fouling threshold in crude preheater. International Communication in Heat and Mass Transfer 36 (2009) : 525-531.

Javier H.Lavaja and Miguel J.Bagajewicz. On a new model for the planning of heat exchanger network Cleaning. Oklahoma University (2004) : 3924-3938.

Mohammad Reza, Jarari Nasr and Mehdi Majidi Givi. Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units. Applied Thermal Engineering 26 (2006) : 1572-1577.

Polley, G.T., Wilson, D.I.,Yeap, B.L. and Pugh, S.J. Use of crude oil fouling threshold data in heat exchanger Design. Applied Thermal Engineering 22 (2002) : 763-776.

Prapitpan Techawanitchai.The impact of heat exchanger fouling in Hydrotreating unit on the optimum operation and maintenance. Master' s Thesis, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2008.

Radhakrishnan, V.R., Ramasamy, M., Zabiri, H., Thanh, N.M., Tahir,H., Mukhtar, M.R., Hamdi , N.
and

Ramli. Heat exchanger fouling model and preventive maintenance scheduling tool. Applied ThermalEngineering 27 (2007) : 2791-2802.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก คุณสมบัติของน้ำมันดิบ

น้ำมันปิโตรเลียมดิบ หรือที่เรียกง่าย ๆ ว่า น้ำมันดิบเป็นสารผสมที่สลับซับซ้อนองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่สุดได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่โมเลกุลเล็กที่สุดจนถึงพวกโมเลกุลใหญ่นอกจากนี้ก็มีสารอินทรีย์ที่มีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบอีกหลายชนิด น้ำมันดิบอาจมีแก๊สละลายอยู่ และอาจมีสารประกอบโลหะบางชนิดเจือปนอยู่ด้วย น้ำมันดิบจะมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปมาก ทั้งนี้เพราะสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนประเภทต่าง ๆ ที่มีอยู่จะแตกต่างกันออกไปอย่างมากแล้วแต่ที่มา ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญในการกำหนดคุณค่าของน้ำมันดิบ และกำหนดวิธีการ และกระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการกลั่นน้ำมันต่อไป

น้ำมันดิบมีไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนอยู่เป็นส่วนใหญ่ ไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันดิบทุกชนิดมี 3 ประเภท

- 1) พาราฟิน (Paraffins or Alkanes)
- 2) แนฟทีน (Naphthenes or Cyclo Alkanes)
- 3) อะโรแมติก (Aromatic)

นอกจากสามประเภทใหญ่ดังกล่าวแล้ว ยังมีประเภทที่ผสมกันระหว่างประเภทต่าง ๆ ด้วย เช่น สารประเภทที่มีแกนเป็นอะโรแมติก และมีแขน (Side Chain) เป็นพาราฟิน เป็นต้น

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญอีกประเภทหนึ่ง คือ โอลิฟิน (Olefins or Alkenes) ไม่เคยมีอยู่ในน้ำมันดิบเลย แต่จะเกิดขึ้นในกระบวนการแตกตัว (Cracking) ต่าง ๆ ที่ใช้ในโรงกลั่น สารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอนแต่ก็จะถูกมองว่าเป็นสิ่งปฏิทิน ส่วนใหญ่ก็เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีธาตุอื่นปนอยู่ด้วย โดยเฉพาะกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน นอกจากนี้ สารอินทรีย์ที่มีโลหะ (Organometallic) ก็มีปนอยู่ด้วย สำหรับพวกสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำมันดิบ ได้แก่ น้ำ เกลือ คลอไรด์ของโซเดียม แมกนีเซียม และ แคลเซียม

โดยที่มีสารประกอบต่าง ๆ กันมากมาย ดังกล่าว น้ำมันดิบจึงมีลักษณะแตกต่างกันมาก ส่วนใหญ่มีสีค่อนข้างดำและหนืด แต่น้ำมันดิบบางอย่างอาจมีสีน้ำตาลอ่อนและใสคล้ายน้ำ มีกลิ่นต่าง ๆ กันออกไป อาจเหม็นฉุนเพราะมีแก๊สไข่น้ำและสารประกอบกำมะถันอื่น ๆ ปนอยู่

การแยกประเภทน้ำมันดิบ

น้ำมันดิบอาจแยกประเภทออกตามองค์ประกอบทางเคมี หรือตามความหนักเบา(โดยใช้ API Gravity) หรือตามปริมาณกำมะถันที่มีอยู่

- 1) ตามองค์ประกอบ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนสามประเภทที่มีอยู่ในน้ำมันดิบนั้นโดยทั่วไปมัก

มีพาราฟินและแนฟทีนอยู่มากกว่าตัวอื่นจนอาจใช้แยกประเภทน้ำมันได้ อะโรแมติก มักไม่ค่อยมีมาก ดังนั้นการแยกออกเป็นสามจำพวกคือ

น้ำมันดิบพื้นฐานพาราฟิน (Paraffinic Base Crudes) ดังตัวอย่าง ได้แก่ น้ำมันดิบจาก Kirkuk, Minas

น้ำมันดิบพื้นฐานแนฟทีน (Naphthenic Base Crudes) ดังตัวอย่าง ได้แก่ น้ำมันดิบจาก Tia Juana, Bachaquero

น้ำมันดิบพื้นฐานผสม (Mixed Base Crude) ดังตัวอย่าง ได้แก่ น้ำมันดิบจาก Kuwait, Nigeria น้ำมันดิบส่วนใหญ่จะเป็นน้ำมันดิบพื้นฐานผสม

การแบ่งนี้เป็นการแบ่งหยาบ ๆ โดยจุดประสงค์ด้านการปฏิบัติในการแยกว่าน้ำมันดิบชนิดไหน เหมาะสำหรับการผลิตน้ำมันสำเร็จรูปอะไร ดังตัวอย่าง

- ก) น้ำมันดิบพาราฟิน มักมีพาราฟินชนิดแขนตรงมากคือ ไม่แตกออกเป็นกิ่ง ดังนั้นน้ำมันเบนซินที่ได้จะมีค่าออกเทนที่ต่ำแต่น้ำมันก๊าดมีคุณภาพสูงไม่มีเขม่า น้ำมันดีเซลที่ได้ก็มีค่าซีเทนสูงเหมาะสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลความเร็วสูง น้ำมันหล่อลื่นที่ได้ก็จะมีดัชนีความหนืด (Viscosity Index) สูง
 - ข) น้ำมันดิบพื้นฐานแนฟทีน น้ำมันเบนซินที่มีแนฟทีนอยู่ด้วย จะมีค่าออกเทนสูงกว่าพาราฟิน น้ำมันก๊าดที่ได้มีคุณภาพปานกลาง เช่นเดียวกับน้ำมันดีเซลซึ่งปานกลาง น้ำมันหล่อลื่นที่ได้จะมีดัชนีความหนืดต่ำจนถึงปานกลาง กากที่ได้จากการกลั่นภายใต้สุญญากาศไปทำยางมะตอยได้ เพราะมี Asphaltenes ซึ่งเป็น Polyaromatics ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 50,000 เป็นองค์ประกอบอยู่มาก
 - ค) น้ำมันดิบพื้นฐานผสม มีทั้งพาราฟิน,แนฟทีน และอะโรแมติก กระจายอยู่ในส่วนต่าง ๆ ไม่เท่ากัน เช่น ส่วนเบาที่พาราฟินมาก ส่วนหนักมีอะโรแมติกมาก เป็นต้น
- 2) ตามความหนักเบาวัดด้วยความถ่วงเอพียู (API Gravity) ซึ่งเป็นวิธีการของสถาบันปิโตรเลียม

สหรัฐอเมริกา โดยที่

$${}^{\circ} API = \frac{141.5}{S.G.60/60^{\circ} F} - 131.5$$

ค่าความถ่วงเอพียูสูงน้ำมันก็ยิ่งเบา ซึ่งหมายความว่าน้ำมันเบนซินปนอยู่ด้วยมากกว่าน้ำมันที่หนักกว่า และจึงมีคุณค่าสูงกว่าด้วย แบ่งออกเป็น Light Crude, Medium Crude และ Heavy Crude เช่น

Arabian Light	มีค่า API Gravity 34
Arabian Medium	มีค่า API Gravity 30

Arabian Heavy มีค่า API Gravity 28

- 3) ตามปริมาณกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันดิบ แบ่งออกเป็น
 น้ำมันที่มีกำมะถันต่ำ คือ มีกำมะถันอยู่น้อยกว่า 0.1% wt.
 น้ำมันที่มีกำมะถันปานกลาง คือ มีกำมะถันอยู่น้อยกว่า 0.1 – 2 % wt.
 น้ำมันที่มีกำมะถันสูง คือ มีกำมะถันอยู่น้อยกว่า 2 % wt.

คุณสมบัติของน้ำมันดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

จากการออกแบบกระบวนการผลิตของช่างงานแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ยกนำมาศึกษานั้น น้ำมันดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต ได้รับน้ำมันดิบมาจากแหล่งน้ำมันดิบแถบตะวันออกกลาง (Arabian Light Crude Oil) ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งน้ำมันดิบที่มีคุณภาพดี ไม่มีไขมาก และมีสิ่งปนเปื้อนน้อย (Paraffin base) มีคุณสมบัติโดยรวมดังตาราง

Feedstock Properties	
Feed origin	Arabian light
Gravity, °API	33.00
Ash,ppm mass	50.00
Pour point, °C	-32.00
Hydrogen Sulfide,ppm	4.00
Salt as NaCl,pptb	2.00
Sediment & Water,Vol %	0.05
Sulfur,Wt.%	1.83
Nitrogen,ppm mass	1064.00
Nickel,ppm mass	4.33
Vanadium,ppm mass	16.20
Sodium,ppm mass	0.87

ภาคผนวก ข

การทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1. การทำความสะอาดโดยวิธีไม่ถอดออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่เกาะติด และตกค้างอยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ต้องถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่องนั้นเป็นวิธีที่ง่าย และทำได้สะดวก ส่วนใหญ่ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น เพื่อชำระสิ่งสกปรกจากผิวผนังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

หลักการทำความสะอาดวิธีนี้ จะเป็นการใช้สารเคมีเติมเข้าไปภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแทนของเหลวที่ใช้ในกระบวนการผลิตและแช่ทิ้งไว้ สารเคมีจะไปชะล้าง สิ่งสกปรกโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี แต่การสะสมสิ่งสกปรกมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ดังนั้น การทำความสะอาดด้วยสารเคมีต้องพิจารณาว่า ใช้สารเคมีที่เป็นอินทรีย์หรืออนินทรีย์ในการทำความสะอาดเนื่องจากอาจทำให้เกิดคราบหรือทำปฏิกิริยากับโลหะหรือสิ่งสกปรกนั้นได้ และมีอีก หลายกรณีที่ควรพิจารณาด้วย เช่น ความหนืดของสิ่งสกปรก การเป็นคราบไขมัน และการเกิดสนิม การเลือกใช้สารเคมีในการทำความสะอาดนั้นขึ้นอยู่กับรายละเอียดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งอาจใช้สารเคมีที่เป็นความแข็งหรืออ่อนนุ่ม ส่วนผสมที่เป็นอินทรีย์หรือส่วนผสมประเภทกรดธรรมชาติ โดยเฉพาะภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางชนิด ไม่สามารถใช้วิธีทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้ อาจจะต้องเลือกใช้อื่นในการทำความสะอาด ซึ่งวิธีการสลับช่องการไหลก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถทำความสะอาดได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การใช้วิธีนี้เมื่อของไหลฝั่งหนึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดคราบ สิ่งสกปรก และของไหลฝั่งหนึ่งเป็นของไหลที่สะอาด ดังนั้นการสลับช่องทางการไหลจึงสามารถกำจัดสิ่งสกปรกที่ตกค้างได้ ส่วนวิธีการใช้ฟองน้ำชนิดยางที่มีลักษณะเป็นลูกบอลกลม สามารถครูดกับผิวผนังแลกเปลี่ยนความร้อนได้ แต่ก็มีขอบเขตการใช้งานกับระบบน้ำเย็นเป็นส่วนใหญ่และในระบบของน้ำมีอีกวิธีที่ใช้คือ วิธีการใช้เม็ดทรายในการทำ ฟลูอิดไดเบด เพื่อขัดถูผิวผนังภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั้งหมดนี้เป็นการทำความสะอาดแบบไม่ถอดอุปกรณ์ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2. การทำความสะอาดด้วยวิธีถอดล้างออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทำความสะอาดแบบนี้ใช้ในกรณีเมื่อการทำ ความสะอาดด้วยวิธีไม่ถอดออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่สามารถชำระสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างออกมาได้ หรือในระบบไม่สามารถใช้วิธีต่าง ๆ ในวิธีไม่ถอดล้างมาทำความสะอาดได้ อีกกรณีหนึ่งคือ สิ่งสกปรกที่ตกค้างอยู่ด้านล่างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและแข็งตัวเกาะติดอยู่ สารเคมีหรือวิธีอื่น ๆ ไม่สามารถทำความสะอาดส่วนนี้ได้ ดังนั้น จึงมีวิธีการใช้แรงดันสูงของน้ำโดยมีหัวฉีดทำให้เกิดแรงดันของน้ำ และในการทำความสะอาดนั้นต้องถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนออกเพื่อทำความสะอาด ส่วนประสิทธิผลในการทำความสะอาดวิธีนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของสิ่งสกปรกที่เกาะติดนั้น ในบางครั้งอาจใช้แปรง

ขีดบริเวณพื้นผิวที่สิ่งสกปรกเกาะติดได้ซึ่งความยากง่ายขึ้นอยู่กับ การเข้าถึงในการทำความสะอาดและกำลังแรงคน

การทำความสะอาดโดยวิธีขัดถูหรือครูดสิ่งสกปรกเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับสำหรับทำความสะอาดผิวผนังแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดโลหะที่มีการเคลือบผิว วัสดุจะเป็นชนิดแบบครูดได้ โดยใช้แรงดันสูงของอากาศที่ส่งวัสดุที่สามารถถูด หรือขูดสิ่งสกปรกที่เกาะติดที่ผิวผนังแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับเทคโนโลยีที่ดีสำหรับทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ต้องไม่สมควรมีค่าใช้จ่ายในส่วน ของแรงงาน เช่นวิธีเป่าลม ซึ่งเป็นการทำความสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำและ ขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อได้ก๊าซ สำหรับใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การทำความสะอาด สิ่งสกปรกเล็ก ๆ หรือฝุ่นละอองที่เกาะติด โดยใช้อากาศหรือไอน้ำก็ได้ไปทำลายไม่ให้เกาะติด ด้วย ความเร็วที่สูงกว่าความเร็วของไอน้ำที่มีการทำงานปกติ ส่วนไอน้ำที่ใช้ทำความสะอาดมีประโยชน์ทำ ความสะอาดพวกคาร์บอนขนาดเล็ก ๆ ภายในอุตสาหกรรมที่มีหม้อไอน้ำ

การแก้ปัญหาสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้าง ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น วิศวกรและ เจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง จำเป็นต้องมีประสบการณ์ในการทำงานร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจาก ต้องทราบแหล่งที่มาและสาเหตุที่เกิดการสะสมของสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างภายในเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุ นั้น ๆ เช่นการเกิดคราบสกปรกชนิดจำพวกสิ่งมีชีวิต ขนาดเล็กเกาะติดอยู่ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เหล่านี้มีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อย ๆ จนเป็น แผ่นฟิล์ม บางและหนาขึ้น จนขวางทางการไหลของของเหลวทำให้อุณหภูมิ, ความดันของของไหล เปลี่ยนแปลงไป และตัวแปรอื่น ๆ ด้วย และยังส่งผลถึงคุณภาพของกระบวนการผลิตและคุณภาพของ ผลิตภัณฑ์ ดังนั้น สิ่งที่ต้องชี้ได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำลง โดยสังเกตจากตัวแปร ต่าง ๆ คือ อุณหภูมิและความดันของของไหล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นหรือต่ำลงผิดปกตินั้นอาจวิเคราะห์ ได้ว่าเกิดสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่กระบวนการผลิตยัง ทำงานอยู่อย่างต่อเนื่องนั้นจึงไม่สามารถถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ มาพิสูจน์ได้ ซึ่งถ้าหยุดการทำงานหมายถึง ต้องเสียค่าใช้จ่ายของระบบการผลิต ดังนั้น ส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ได้จากเครื่องมือวัดอุณหภูมิและความดัน ของของไหลที่ติดตั้งไว้กับระบบท่อส่งของของไหล อีกตัวแปรหนึ่งที่นำมาวิเคราะห์เบื้องต้น โดยต้องมี ความชำนาญการและขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเป็นประจำ คือ การวิเคราะห์จากอัตราการไหลของของ ไหล เนื่องจากทำให้ปริมาณการผลิตต่ำกว่าปกติในระยะเวลาที่เท่ากัน อัตราการไหลจะแยกวิเคราะห์ ตัวแปรออกเป็น 2 ตัวแปร คือ ความเร็วและพื้นที่หน้าตัด ของการไหลผ่าน โดยต้องหยุดกระบวนการผลิต เพื่อถอดอุปกรณ์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาวิเคราะห์

ก่อนจะแก้ไขปัญหาล้างสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าเป็นไปได้ การวางแผนในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในขั้นตอนแรกควรเน้นเรื่องจุดที่ทำให้เกิดสิ่ง สกปรกที่เกาะติดและตกค้างเพื่อลดปัญหาในระดับหนึ่ง เหมือนการเลือกใช้วัสดุของเครื่องแลกเปลี่ยน

ความร้อนและเลือกวัสดุในส่วนของการผลิต โดยวัสดุนั้นต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีและไม่ทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้าง

ภาคผนวก ค

วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม(Random Search)

การสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ระบบด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กลายมาเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการดำเนินงานวิจัย สำหรับในกรณีที่ปัญหามีคำตอบหรือทางเลือกที่เป็นไปได้จำนวนมาก การวิเคราะห์หาคำตอบด้วยการจำลองสถานการณ์ไม่สามารถจะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากที่ผ่านมามีเทคนิคการจำลองสถานการณ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินผลลัพธ์

กระบวนการจำลองสถานการณ์(Simulation) จำเป็นต้องมีขั้นตอนการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุด ระบบจะอาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินโดยการจำลองสถานการณ์ซึ่งถูกใช้เป็นตัววัดถึงความเหมาะสมของตัวแปรเข้า (Input) และนำมาประมวลผลร่วมกับผลที่ได้จากการประเมินในครั้งที่ผ่าน ๆ มา แล้วทำการกำหนดชุดของตัวแปรนำเข้าชุดใหม่เพื่อป้อนเข้าระบบของการจำลองสถานการณ์อีกครั้ง โดยกระบวนการทั้งหมดจะดำเนินไปจนกระทั่งระบบบรรลุเงื่อนไขของการหยุดหาคำตอบ ด้วยเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งเป็นต้นว่าได้ผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เบื้องต้น หรือบรรลุตามเงื่อนไขของระยะเวลาที่กำหนด

ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคใหม่ ๆ เข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคและวิธีการในการค้นหา(Search methodologies) ซึ่งปัจจุบันสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปเทคนิคการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุด Simulation optimization มักถูกนำไปใช้สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ เพื่อใช้คำนวณหาค่าของชุดตัวแปรตัดสินใจที่จะทำให้ได้ค่าผลลัพธ์ของระบบตามที่ต้องการ ตัวอย่างการนำเทคนิคนี้ไปใช้ ได้แก่ ใช้เพื่อควบคุมกระบวนการ (Process control optimization) การออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering design optimization)

เทคนิคที่ใช้ในการหาคำตอบในกรณีที่ปัญหามีพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถที่จะประเมินผลในทุก ๆ คำตอบที่เป็นไปได้ เมื่อเช่นนี้ เทคนิคในกลุ่มนี้จึงจะมีการนำเอาวิธีการค้นหาคำตอบ (Search method) แบบต่าง ๆ เข้ามาช่วยในการทำออฟติไมซ์เซชันด้วย

เทคนิคการค้นหาแบบสุ่ม(Random search) เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้กับการทำออฟติไมซ์เซชันของปัญหาที่เซตคำตอบที่เป็นไปได้มีขนาดใหญ่มาก และเป็นไปได้ที่ประเมินทางเลือก หรือคำตอบทุก ๆ คำตอบในเซต ดังนั้นเทคนิคในกลุ่มนี้จึงมีขั้นตอนที่นำเข้ามาช่วย เพื่อพิจารณาในกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ คำตอบใดควรที่จะนำไปประเมินผลด้วยการจำลองสถานการณ์ ซึ่งขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่จะอาศัยวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random search)

โดยทั่วไปวิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการที่ละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน ซึ่งคาดว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นกระบวนการเหล่านี้สามารถจำแนกขั้นตอนได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 0 กำหนด $k = 0$ เลือกคำตอบเริ่มแรก (Initial solution) จากเซตคำตอบที่เป็นไปได้ กำหนดให้มีสัญลักษณ์เป็น $\Theta^{(0)}$ แล้วทำการประเมินผลลัพธ์ที่ได้จากคำตอบดังกล่าวโดยการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ผลที่ได้กำหนดให้มีค่าเป็น $X(\Theta^{(0)})$

ขั้นตอนที่ 1 เลือกคำตอบที่เป็นไปได้ขึ้นมาอีก 1 คำตอบจาก $N(\Theta^{(k)})$ ซึ่งเป็นเซตของคำตอบที่อยู่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน (Neighbourhood solution) กำหนดค่าเป็น $\Theta^{(C)}$ แล้วทำการประเมินค่าผลลัพธ์ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ค่าผลลัพธ์ที่ได้กำหนดให้มีค่าเป็น $X(\Theta^{(C)})$

ขั้นตอนที่ 2 ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ (Simulation) ของคำตอบ $\Theta^{(0)}$ 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 $k = k+1$ แล้วย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) ที่ได้รับการตีพิมพ์อยู่ในปัจจุบัน มีความหลากหลายและมีความแตกต่างกัน เนื่องจากวิธีการในการระบุของจุดคำตอบใกล้เคียงที่อยู่ในขอบเขตการเคลื่อนที่ของการค้นหา (neighbourhood solution) วิธีการที่ใช้ในการยอมรับ (candidate selection method) ว่าผลการประเมินที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีการปรับปรุงที่ดีขึ้น (acceptance criterion) และเงื่อนไขที่ใช้เพื่อหยุดการค้นหา (stopping criterion)

จากวิธีการที่กล่าวมานั้นเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากวิธีการไม่ซับซ้อนมากนักและสามารถหาคำตอบได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม วิธีการค้นหาคำตอบโดยใช้เทคนิคนี้ยังมีอุปสรรคที่สำคัญคือ เรื่องของเวลาซึ่งใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่ค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะได้รับการพัฒนาให้สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วก็ตาม ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วเทคนิคการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดี และเหมาะสมที่สุดนั้นอาศัยหลักการเดียวกัน คือ การใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ เพื่อการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยความแตกต่างระหว่างเทคนิคมักเกิดขึ้นจากความแตกต่างของวิธีการที่ใช้เพื่อการหาจุดคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งหากต้องการนำเทคนิคนี้ไปใช้งานยังมีความจำเป็นที่ต้องให้ความสำคัญกับขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง ส่วนในขั้นตอนของการหาคำตอบที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา หรือตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ภาคผนวก ง
การประชุมวิชาการ

เอนก ประสิทธิ์ และ สุรเทพ เขียวหอม. การจำลองการเกิดตะกรันในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหน่วยกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, จังหวัดสงขลา, ประเทศไทย, 10-11 พฤศจิกายน 2554:T57

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอนก ประสิทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 17 มกราคม พ.ศ. 2525 อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก เข้าศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนภัทรพิทยาคาร จังหวัดนครนายก สำเร็จการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อดิศรวิทยาสถา ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคนอกเวลาราชการ ในปีการศึกษา 2551 ปัจจุบันทำงานที่บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่งวิศวกร