

การสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกอนสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
ในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน

นางสาววรรณทิพา โอภาปัญญาโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

MODELLING OF FOULING FORMATION FOR HEAT EXCHANGER
IN PROPYLENE PRODUCTION PROCESS

Ms. Wantipa Opapanyachod

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

วรรณทิพา โอภาปัญญาโชติ: การสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกรันสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน. (MODELLING OF FOULING FORMATION FOR HEAT EXCHANGER IN PROPYLENE PRODUCTION PROCESS)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 74 หน้า.

ในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนมีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันเพื่อควบคุมอุณหภูมิ โดยโพลีเมอร์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกทำให้เย็นลงเพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุล ปัญหาหลักที่พบในการดำเนินงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเกิดตะกรันขึ้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยตะกรันจะไปลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและลดสมรรถนะในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายร้อนและสายเย็นลง ปัญหานี้ถูกแก้ไขโดยการทำความสะอาดพื้นผิวที่ใช้ถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างสม่ำเสมอ ในงานวิจัยนี้ศึกษาการก่อตัวของตะกรันและสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอัตราการการก่อตัวของตะกรันจะสัมพันธ์กับระยะเวลาในการดำเนินงาน อุณหภูมิพื้นผิวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการไหลของของไหล ความหนาแน่นของของไหลและความหนืดของของไหล แบบจำลองการก่อตัวของตะกรันที่พัฒนาขึ้น ได้นำไปสอบทานกับข้อมูลการผลิตอีกชุดหนึ่งและพบว่าข้อมูลจากการทำนายโดยแบบจำลองที่สร้างขึ้นและข้อมูลจากการผลิตจริงมีความสอดคล้องกันดี

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2556.....

5271502021 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MODELLING OF FOULING/ HEAT EXCHANGER/ POLYMERIZATION
SECTION PROCESS/ PROPYLENE

WANTIPA OPAPANYACHOD: MODELLING OF FOULING FORMATION FOR
HEAT EXCHANGER IN PROPYLENE PRODUCTION PROCESS.

ADVISOR: ASST. PROF.SOORATHEP KHEAWHOM, Ph.D., 74 pp.

Polypropylene production process used heat exchangers in the polymerization process in order to control temperature. The polymer leaving the reactor is cooled to maintain its molecular weight. The main problem regarding the operation of heat exchanger is the formation and deposition of fouling at the heat transfer surface inside the heat exchanger. The fouling accumulated reduces heat transfer efficiency and heat transfer performance between hot and cold streams. This problem can be solved by regularly cleaning the heat transfer area of the heat exchanger. This research aims to investigate the fouling formation to model and fouling formation of heat exchanger. The rate of fouling formation and deposition depend on operating time, temperature of heat transfer surface, fluid flow rate, fluid density and viscosity. The fouling model developed is compared with another different set of real operation data. The results show that the data predicted by using the model developed agree well with the real operation data.

Department : Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study : Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : ... 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์สำหรับการอบรมสั่งสอนในการปฏิบัติงาน คำแนะนำแนวทางในการพัฒนางานวิจัยและความช่วยเหลือในด้านอื่นๆมาโดยตลอดจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิธิศ หนูทอง ประธานกรรมการ, อาจารย์ ดร. ชุติมณฑน์ สธิรพีพัฒนกุลและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกร รามกุล ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) และพี่ๆพนักงานทุกท่านสำหรับคำแนะนำข้อมูลและความช่วยเหลือในทุกๆด้านด้วยดีตลอดมา

ขอบคุณเพื่อนรุ่นพี่และรุ่นน้องสำหรับความช่วยเหลือในหลายๆด้านและกำลังใจที่มีให้ในการทำงานวิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและพี่น้องในครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 กระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน.....	8
3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	10
3.3 การถ่ายเทความร้อน.....	12
3.4 ตะกรัน.....	24
3.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	31
4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	33
4.1 ศึกษาช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน.....	33
4.2 รวบรวมข้อมูลสถานะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโรงงาน...	34
4.3 การศึกษารูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน.....	35

	หน้า
4.4 การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการก่อตัวของตะกอนที่เหมาะสมกับ ขำงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	39
4.5 การหาค่าพารามิเตอร์.....	41
4.6 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	44
5 ผลการดำเนินการวิจัย.....	47
5.1 การสร้างแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกอนที่เหมาะสมกับขำงานเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน.....	47
5.2 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์.....	55
6 สรุปผลการวิจัย.....	61
6.1 ข้อเสนอแนะ.....	62
รายการอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	70
ภาคผนวก ค.....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	Typical fouling coefficients	20
4.1	สภาวะดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A	34
4.2	สภาวะดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B.....	35
4.3	การเปรียบเทียบข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง.....	39
5.1	ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองของค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 550 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.75$ และ $\gamma = 9.60 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	52
5.2	ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองของค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 650 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.71$ และ $\gamma = 1.06 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$	55
5.3	การเปรียบเทียบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากโรงงานจริงกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ Nasr Model ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B ที่ค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ต่างกัน....	55
5.4	การเปรียบเทียบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากข้อมูลชุดที่ 2 ค่าจากโรงงานจริงกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ Nasr Model ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B ที่ค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ต่างกัน.....	58
ก-1	ค่าคงที่ต่างๆ.....	66
ก-2	Operating Condition of stream in 4 th reactor	67
ก-3	Operating Condition of reactor in Polymerization section	68
ก-4	Operating condition design data for E-204A	69
ก-5	Operating condition design data for E-204B	69

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	ผังกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน.....	9
3.2	ผังกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B	9
3.3	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อที่ใช้ในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน...	10
3.4	ทิศทางการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ.....	11
3.5	การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ 1 shell pass and 1 tube pass (1-1 exchanger).....	11
3.6	การถ่ายเทความร้อน.....	12
3.7	การนำความร้อนผ่านผนังหนา ΔX	14
3.8	ทิศทางการไหลของความร้อน.....	14
3.9	ชั้นขอบเขตความร้อนสำหรับการไหล.....	15
3.10	การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อ	16
3.11	ลักษณะการเกิดตะกอนที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก.....	17
3.12	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหล ไหลสวนทางกัน.....	22
3.13	ค่า ΔT_1 และ ΔT_2 ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง	23
3.14	อัตราการก่อตัวความต้านทานตะกอนตามเวลา	24
3.15	Precipitation Fouling or Crystallization Fouling	25
3.16	พัฒนาการของความต้านทานตะกอนจากการตกตะกอนและการตกผลึกร่วมกัน.....	25
3.17	Particulate Fouling	26
3.18	Chemical reaction fouling	26
3.19	Corrosion fouling	27
3.20	Solidification fouling	27
3.21	Biological fouling	27
3.22	พัฒนาการของความต้านทานตะกอนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	28
3.23	Linear fouling model, Falling rate fouling model and Asymptotic fouling model.....	29
3.24	ความต้านทานตะกอนที่ความเร็วต่างๆของของไหลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงตามเวลา..	30
3.25	พัฒนาการของความต้านทานตะกอนแสดงให้เห็นช่วงเวลาพักตัวสำหรับเหล็กกล้า คาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิมและทองเหลือง.....	30

รูปที่	หน้า	
3.26	แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย.....	31
4.1	ผังกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B.....	33
4.2	แผนภาพแสดงการดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, B	44
5.1	อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของ โพลีโพรพิลีนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A.....	49
5.2	อัตราการก่อตัวของตะกรันของ E-204A.....	49
5.3	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ E-204A	50
5.4	ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204A	50
5.5	ราคาค่าน้ำที่ใช้ไปในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204A	51
5.6	อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของ โพลีโพรพิลีน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B.....	52
5.7	อัตราการก่อตัวของตะกรันของ E-204B.....	53
5.8	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ E-204B	53
5.9	ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204B	54
5.10	ราคาค่าน้ำที่ใช้ไปในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204B	54
5.11	อัตราการก่อตัวของตะกรันจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204A.....	56
5.12	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204A.....	56
5.13	อัตราการก่อตัวของตะกรันจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204B	57
5.14	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204B	57

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน	(m ²)
C _p	ค่าความจุความร้อน	(kJ/kgK)
dR _f /dt	อัตราการก่อตัวของตะกรัน	(m ² hK/hkJ)
R _f	ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกรัน	(hrm ² K/kJ)
k	ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง	(kJ/hrmK)
L	ความยาวของพื้นที่การถ่ายเทความร้อน	(m)
LMTD	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอกกาลีทิมของของเหลว	(K)
P	ค่าความดันในระบบ	(kg/cm ²)
Pr	Prandtl number	
R	Universal gas constant	(kJ/kg molK)
Re	Reynolds number	
R _f	ค่าความต้านทานตะกรันรวม	(m ² hrK/kJ)
T	เวลา	(s)
T _{film}	อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม	(K)
T _w	อุณหภูมิของพื้นผิว	(K)
T _{c, in}	อุณหภูมิทางเข้าของน้ำเย็น	(K)
T _{c, out}	อุณหภูมิทางออกของโพรวิน	(K)
T _{h, in}	อุณหภูมิทางเข้าของโพรวิน	(K)
T _{h, out}	อุณหภูมิทางออกน้ำร้อน	(K)
u	ความเร็ว	(m/s)
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	(kJ/hr m ² K)
U _c	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวท่อไม่มีตะกรัน	(kJ/hr m ² K)

คำอธิบายสัญลักษณ์

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
U_d	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวท่อมีตะกรัน	(kJ/hr m ² K)
W	ความกว้างของพื้นที่การถ่ายเทความร้อน	(m)
x	ความหนาของการถ่ายเทความร้อน	(m)
α	ค่าคงที่ตัวแปร	
β	ค่าคงที่ตัวแปร	
γ	ค่าคงที่ตัวแปร	
ρ	ค่าความหนาแน่น	(kg/m ³)
μ	ความหนืดของของเหลว	(kg/ms)

คำอธิบายคำย่อ

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
cnd	การนำความร้อน	-
cnv	การพาความร้อน	-
f	ตะกรัน	-
r_i	รัศมีภายใน	-
n	จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด	-
r_o	รัศมีภายนอก	-
r	แนวแกนรัศมี	-
rad	การแผ่รังสีความร้อน	-
s	พื้นผิว	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกผลิตให้ตรงตามคุณสมบัติที่ต้องการและใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งในกระบวนการผลิตจะต้องใช้ความร้อนและความเย็นเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างสมบูรณ์ รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังการผลิต เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญต่อระบบการผลิต และเมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ การเกิดตะกรัน โดยตะกรันจะมีผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงทำให้ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนลดลง จึงมีผลต่อกระบวนการผลิต ส่งผลให้ต้องการพลังงานทดแทนมากขึ้นและ ลดปริมาณการผลิตหรือหยุดการผลิตเพื่อทำการบำรุงรักษาและทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นการก่อตัวของตะกรันจึงเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน

การแก้ปัญหาการเกิดตะกรันสามารถทำได้โดย การล้างทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการทำความสะอาดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น การทำความสะอาดมีความจำเป็นต้องหยุดระบบการทำงานซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการวางแผนหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อีกทั้งการทำนายแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกและอัตราการก่อตัวของตะกรันจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการผลิต

งานวิจัยนี้ศึกษาการก่อตัวของตะกรันในระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ โดยสายร้อนคือโพลีโพรพิลีน สายเย็นคือน้ำและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายการก่อตัวของตะกรันตามเวลา โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการก่อตัวของตะกรันได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน อัตราการไหลของโพลีโพรพิลีน ความหนาแน่นของของไหลและความหนืดของของไหล ในการสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกรันนั้น ได้ใช้ข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริงในช่วงระยะเวลา 141 วัน ตั้งแต่วันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2551 ถึงวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2552

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลในการก่อตัวของตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบการผลิตโพลีโพรพิลีน
- 2) ศึกษาผลกระทบของตะกรันที่มีต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบการผลิตโพลีโพรพิลีน
- 3) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการก่อตัวของตะกรันโดยใช้แบบจำลองของ Panchal, Polley, Saleh และ Nasr เพื่อทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบการผลิตโพลีโพรพิลีน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) ศึกษากระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน
- 2) ระบุตัวแปรที่ศึกษาที่มีผลกระทบต่อการศึกษาเกิดตะกรัน
- 3) ใช้แบบจำลอง Nasr ในการทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบการผลิตโพลีโพรพิลีน
- 4) ใช้แบบจำลอง 2 ชุด ในการสร้างแบบจำลองและการสอบทานแบบจำลอง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) ได้ข้อมูลการเกิดและอัตราการก่อตัวของตะกรันตามสภาพการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบการผลิตโพลีโพรพิลีน
- 2) ได้ข้อมูลพฤติกรรมและสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบการผลิตโพลีโพรพิลีนอันเป็นผลมาจากตะกรัน แบบจำลองสามารถทำนายช่วงระยะเวลาการผลิตจนถึงช่วงหยุดการผลิตลงเพื่อสามารถวางแผนการซ่อมบำรุงได้

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อนและบทความวิจัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Panchal, Polley, Saleh และ Nasr
- 2) ศึกษากระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนและทำการรวบรวมข้อมูลการดำเนินการของกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน มาสร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 3) ออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน
- 4) พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของการก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน
- 5) นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับข้อมูลจากการผลิตจริง
- 6) ปรับปรุงแบบจำลองให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตจริง
- 7) สรุปและวิจารณ์ผลการทำวิจัย
- 8) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องที่ใช้เป็นแหล่งข้อมูลที่สำคัญสำหรับการศึกษาทฤษฎีและแนวทางในการทำงานวิจัย โดยเอกสารและงานวิจัยที่ทำการศึกษามีดังต่อไปนี้ Ebert and Panchal (1997) [1] ได้สร้างรูปแบบสมการเพื่อหาค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันสำหรับ crude oil systems โดยรูปแบบสมการอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ในพจน์ของ Arrhenius จะถูกพิจารณา รวมถึงปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดด้วย ไม่พิจารณาผลกระทบของค่าการนำความร้อนของ crud oil และค่าความร้อนจำเพาะของสารแต่พิจารณาถึงผลกระทบของค่าความหนาแน่นของ crud oil และค่าความหนืดของสาร โดยแสดงผ่านค่า Reynolds number จากความสัมพันธ์ร่วมกันของค่าการส่งผ่านความร้อน Ebert and Panchal จึงกำหนดให้ Prandtl number [2] มีค่าเท่ากับ -0.33

ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิของชั้นฟิล์ม, wall shear stress และ Reynolds number จุดเริ่มต้นในการคำนวณหาค่าดังกล่าวจะกำหนดให้ค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ โดยตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่อตัวของตะกรันคือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์มและความเร็วของไหล โดยมีรูปแบบดังสมการ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma\tau \quad (2.1)$$

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อตัวของตะกรัน, (m^2hK/hkJ)

Re คือ Reynolds number

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

P_r คือ Prandtl number

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

τ คือ Shear stress

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

ในปี 2002 Polley et al. และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองของ Ebert – Panchal โดยทำการเปรียบเทียบผลแบบจำลองของ Ebert-Panchal กับข้อมูลจากผลการทดลองของ Knudsen [4] ในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) พบว่าผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน แต่เมื่อทำการปรับแก้ค่าพลังงานกระตุ้น (Activate energy, E) ทำให้แบบจำลองของ Ebert-Panchal มีความแม่นยำมากขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลอื่นได้

แบบจำลองของ Polley มีความแตกต่างไปจากแบบจำลองของ Ebert-Panchal ตรงที่แบบจำลองของ Polley พิจารณาอุณหภูมิที่ผนัง ส่วนแบบจำลองของ Ebert-Panchal พิจารณาอุณหภูมิที่ชั้นฟิล์ม อีกทั้งแบบจำลองของ Polley ค่า Reynolds number จะถูกพิจารณามากกว่าค่าของ wall shear stress เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Ebert – Panchal

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่ตัวของตะกรันมีดังนี้ อุณหภูมิที่ผนัง Reynolds number ความเร็วของไหล ความหนืดของไหล Prandtl number ค่าความร้อนจำเพาะของสาร และค่าการนำความร้อน โดยมีรูปแบบอัตราการก่ตัวของตะกรันแสดงดังสมการ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.8} \quad (2.2)$$

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่ตัวของตะกรัน (m^2hK/hkJ)

Re คือ Reynolds number

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

P_r คือ Prandtl number

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

ในปี 2003 Saleh et al. และคณะ (2003) [5] ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองของ Polley et al. โดยทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง Polley et al. กับผลการทดลองของ Australian light crude oil โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองคือ อุณหภูมิชั้นฟิล์ม ความเร็วของไหลและ Physical properties ของ Australian light crude oil [5] (Density (g/ml) 0.792, Viscosity (MPa s) 1.969, Asphaltenes (wt.%) 0.05) เป็นหลัก โดยใช้เครื่องมือวัด portable fouling research unit (PFRU) วัดค่าการถ่ายเทความร้อน (heat flux) เทียบกับเวลา ช่วงระยะเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลคือ transition region ซึ่งเครื่องมือวัดจะมี probe เป็นตัววัดค่าตัวแปร

จากผลการทดลองของ Australian crude oil [5] พบว่าในแต่ละแบบจำลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนดังแสดง (Summation of squares of errors : Polley $1.0560E10^{-11}$, Saleh $1.2869E10^{-13}$) ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Saleh มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองของ Polley

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่อตัวของตะกรันมีดังนี้ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม ความเร็วของไหลและความดันในระบบ โดยมีรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันแสดงดังสมการ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha P^\beta V^\gamma \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) \quad (2.3)$$

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อตัวของตะกรัน (m^2hK/hkJ)

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

P คือ ค่าความดันในระบบ (kg/cm^2)

u คือ ความเร็ว (m/s)

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

ในปี 2006 Nasr และคณะ (2006) [6] ได้เสนอแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันใน Preheat exchangers ของโรงกลั่นน้ำมันดิบ (Crude distillation unit) ซึ่งแบบจำลองอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าไม่พิจารณา Prandtl number โดยสมมติว่า Prandtl number เป็นค่าอิสระกับแบบจำลอง โดยศึกษาหา

ความสัมพันธ์จากค่าอุณหภูมิ พื้นที่ผิวและความเร็วของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [7] โดยเทียบผลความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองของ Australian light crude แบบจำลองของ Nasr ได้มีการประมาณค่าคงที่ตัวแปรดังแสดงในสมการ

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่อก้อนของตะกรันมีดังนี้ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม ความเร็วของไหล ความหนาแน่นและความหนืดของไหลในระบบ เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดตะกรันที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองของ Nasr และคณะมีรูปแบบอัตราการก่อก้อนของตะกรันแสดงดังสมการ

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4} \quad (2.4)$$

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อก้อนของตะกรัน (m^2hK/hkJ)

Re คือ Reynolds number

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

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ การถ่ายเทความร้อน อัตราการเกิดตะกรัน และรูปแบบสมการการเกิดตะกรันบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

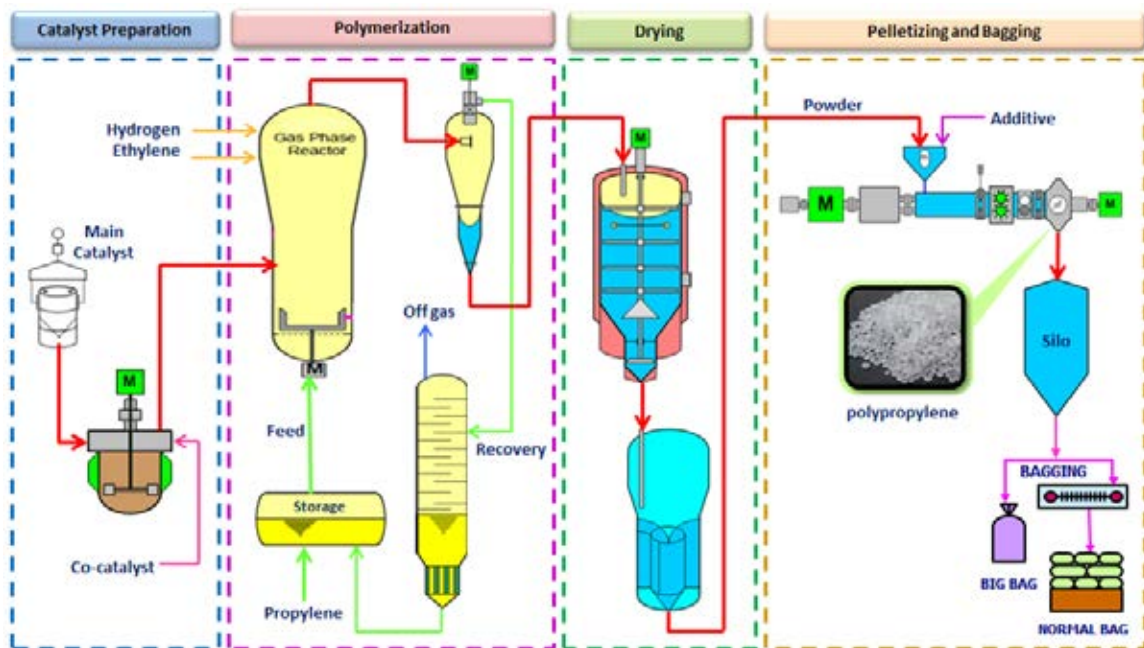
3.1 กระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน

โพลีโพรพิลีนผลิตมาจากแก๊สโพรพิลีนและแก๊สเอทิลีน กระบวนการผลิตอยู่ในรูปสารแขวนลอยในเฟสแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ ปฏิกริยาอยู่ในรูป fluidized bed ของโพลีโพรพิลีน ซึ่งมี 3 ชนิด

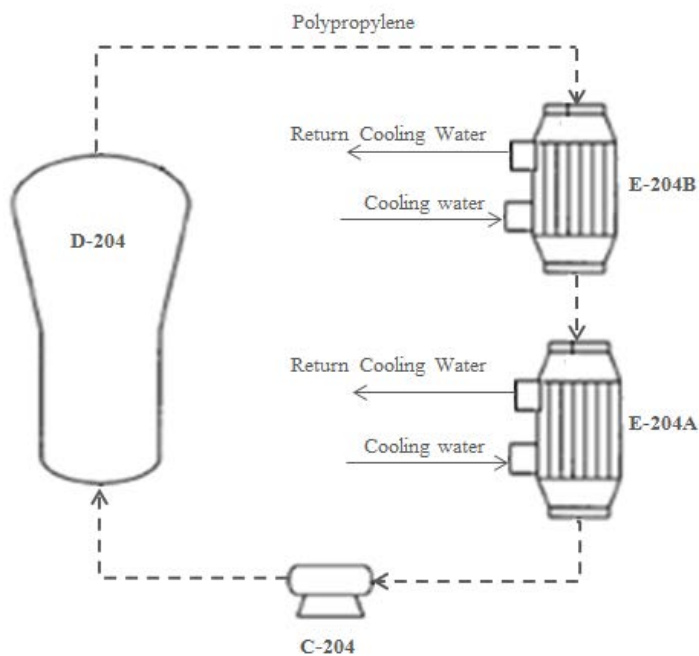
- 1) Homopolymer : No ethylene การนำไปใช้งานเช่น film, carpet fiber, non-woven cloth
- 2) Random copolymer : 3% ethylene การนำไปใช้งานเช่น ตู้แช่แข็งและในอุตสาหกรรมยา
- 3) Block copolymer : 10-12% ethylene การนำไปใช้งานเช่น ชิ้นส่วนอัตโนมัติ อุปกรณ์ไฟฟ้าและตู้ควบคุม

กระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ตามลำดับดังต่อไปนี้ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา, polymerization, การทำให้แห้ง, ตัดเม็ด, homogeneous และบรรจุผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตเป็นแบบต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตมี 4 เครื่องโดยป้อนโพรพิลีนเข้าในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 4 และป้อน ethylene เข้าในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่ 4 เพื่อควบคุมเปอร์เซ็นต์ของยาง เครื่องปฏิกรณ์ถูกกำหนดโดยปริมาณที่ป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา ไฮโดรเจนถูกป้อนเพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุล polymerization มีสถานะอุณหภูมิ ความดัน ค่าความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาที่ถูกควบคุม ปฏิกริยาเป็น exothermic พลัง polymer ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ถูกทำให้เย็นลงโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พลัง polymer ถูกปล่อยออกจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยมีการตรวจสอบ melt flow rate ของ polymer ทุก 4 ชั่วโมงทุกเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของโพลีโพรพิลีน polymer พลัง polymer ถูกทำให้แห้งโดย stream และถูกส่งไปที่

เครื่องตัดเม็ดโดยใช้แก๊สไนโตรเจน ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายจะถูกตรวจสอบโดยหน่วยงาน QA โดยตรวจค่า impact strength, flexural modulus, melt flow rate



รูปที่ 3.1 ฟังก์ชันการการผลิตโพลิโพรพิลีน



รูปที่ 3.2 ฟังก์ชันการแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B

3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน เพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนหรือแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิดที่เป็นของไหลร้อน (โพรพิลีน) และของไหลเย็น (cooling water) ซึ่งในระบบใช้เครื่องแลกเปลี่ยน 2 เครื่องคือ E-204A, E-204B ต่อกันแบบอนุกรมดังแสดงดังรูปที่ 3.2 การเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องคำนึงถึงเรื่องสมรรถนะและความประหยัดด้านพลังงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งสำคัญ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่างประสบกับปัญหาเกี่ยวกับด้านพลังงานเป็นอย่างมาก ดังนั้นการออกแบบระบบและการควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญ อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบจะต้องมีเรื่องความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนร่วมอยู่ด้วยเสมอ ขนาดความแตกต่างของอุณหภูมินี้สามารถลดให้น้อยลงได้ด้วยการนำเอาอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นมาใช้แทน แต่ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงความสะอาดภายในผิวท่อซึ่งมีผลกระทบต่อแลกเปลี่ยนความร้อน ความประหยัดและการลงทุนในด้านพลังงานด้วย

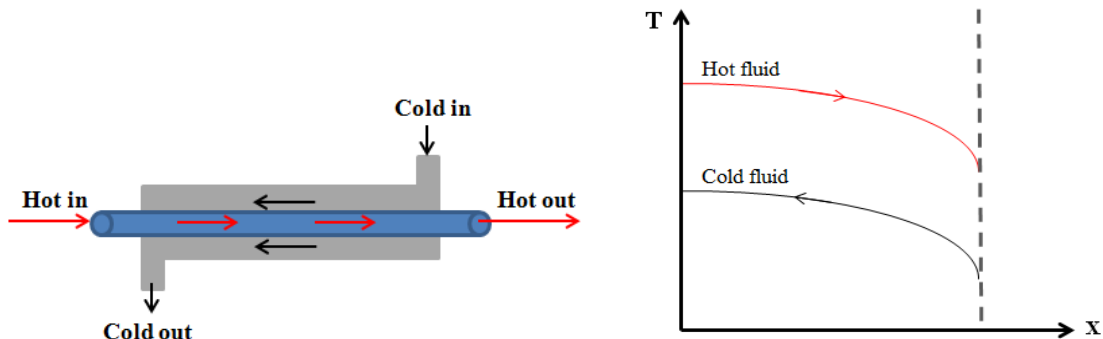
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายประเภท โดยระบบในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell and Tube Exchanger) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อที่ใช้ในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน

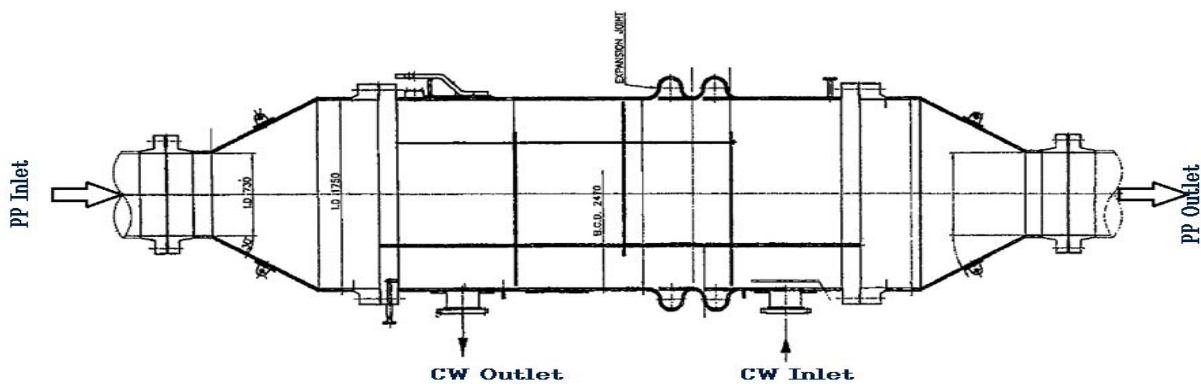
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการวางกลุ่มท่อเป็นจำนวนมากซึ่งการถ่ายเทความร้อนเกิดจากพื้นที่ผิวของกลุ่มท่อดังกล่าว โดยกลุ่มท่อเหล่านี้จะถูกบรรจุในท่อทรงกระบอกที่เรียกว่าเชลล์ของไหลที่ไหลในกลุ่มท่อนี้คือ cooling water

ส่วนของไหลที่ไหลรอบกลุ่มท่อที่อยู่ภายในเชลล์คือ โพรพิสึนจะไหลภายใน Tube ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ของไหลภายในท่อจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลภายในเชลล์ ในระหว่างที่ของไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอก



รูปที่ 3.4 ทิศทางการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อมีการถ่ายเทความร้อนแบบ One Tube Pass ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งหมายความว่าของเหลวจะไหลภายในท่อในทิศทางสวนทางกันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทางเข้า tube จะติดตั้งตัวแยกเพื่อแยกของเหลวที่ไหลเข้าและไหลกลับมา ตัวกั้น (Baffles) จะทำหน้าที่เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านท่อได้หลายๆครั้งก่อนที่จะออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.5 การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ 1 shell pass and 1 tube pass (1-1 exchanger)

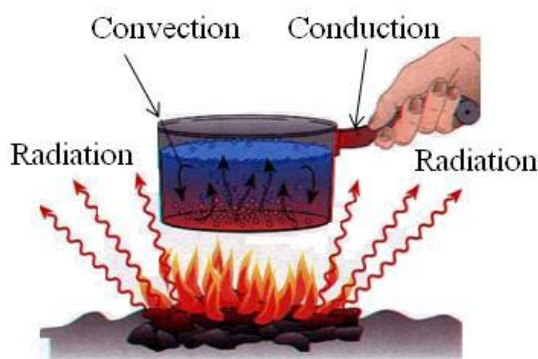
3.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อน คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้น แต่กลไกในการที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนแต่ละวิธีแตกต่างกัน

1) การนำความร้อน (Heat Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุที่เป็นของแข็งภายในวัตถุหนึ่งๆ หรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกัน โดยมีทิศทางของการเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพการนำความร้อนแตกต่างกัน โดยโลหะจะนำความร้อนได้ดีที่สุด

2) การพาความร้อน (Heat Convection) การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างผิวของแข็งและของเหลวหรือก๊าซที่อยู่ติดกับพื้นผิวนั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนแบ่งออกเป็น การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) และการพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection or Natural convection) อัตราการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ และสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling)

3) การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง เช่น พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์เดินทางผ่านสุญญากาศมายังโลก



รูปที่ 3.6 การถ่ายเทความร้อน

3.3.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนคือ การถ่ายเทอนุภาคของสารที่มีพลังงานสูงไปสู่อนุภาคใกล้เคียงที่มีพลังงานต่ำกว่า การนำความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยที่การนำความร้อนในของเหลวและก๊าซเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกัน (Collisions) และการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุล ในขณะที่โมเลกุลเหล่านั้นมีการเคลื่อนที่ ส่วนการนำความร้อนในของแข็งเกิดจากการสั่นของโมเลกุล (Vibrations of Molecules) ในแลตทิซ (Lattice) และการขนถ่ายพลังงานโดยอิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons)

การนำความร้อนที่สภาวะคงที่ (Steady state heat conduction) คือการนำความร้อนที่อุณหภูมิทุกๆจุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่โดยไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา โดยที่ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านวัตถุพื้นที่หนึ่งหน่วยในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่

การนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady state heat conduction) คืออัตราการนำความร้อนของวัตถุที่เปลี่ยนค่าตามเวลา โดยทั่วไปการนำความร้อนในอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถือว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงที่และปัจจัยสำคัญที่มีส่วนกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือผลต่างของอุณหภูมิ รูปร่างของวัตถุและคุณสมบัติของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งแสดงการนำความร้อนในสภาวะคงที่ผ่านผนังเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบนำ จะพบว่าผนังด้าน X_1 มีค่าอุณหภูมิเป็น T_1 ส่วนทางด้าน X_2 มีอุณหภูมิเป็น T_2 โดยมีระยะห่างระหว่างด้าน X_1 ไปยังด้าน X_2 ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากกฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์แสดงดังสมการที่ 3.2 ส่วนรูปที่ 3.8 แสดงทิศทางการไหลของความร้อนซึ่งสรุปได้ว่าอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาและพื้นที่การนำความร้อนเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของตัวกลางดังสมการ

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (3.1)$$

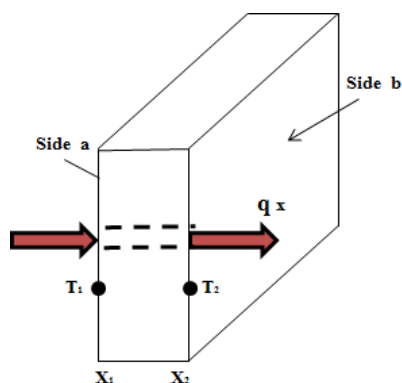
ในกรณีที่ $\Delta X \rightarrow 0$ สมการ (3.1) สามารถทำให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยได้ดังสมการที่ 3.2 เรียกว่ากฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier' s Law of Heat Conduction)

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dX} \quad (3.2)$$

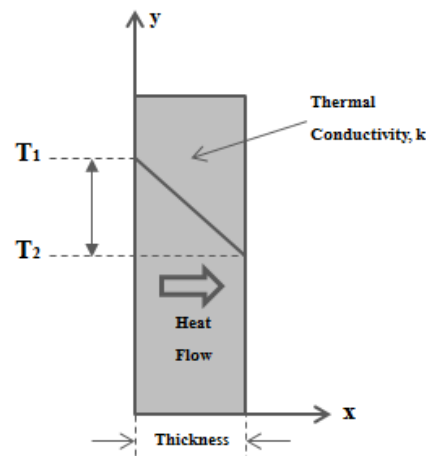
Q_{cond} = อัตราการนำความร้อน (kJ/h)

k = ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง (kJ/hm K)

dT/dX = เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางการนำความร้อน (K/m)



รูปที่ 3.7 การนำความร้อนผ่านผนังหนา ΔX



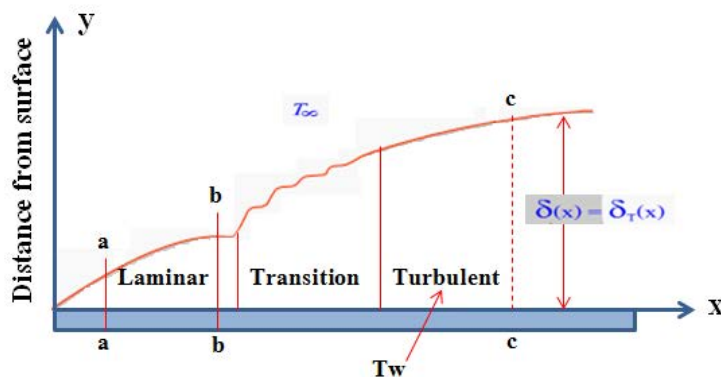
รูปที่ 3.8 ทิศทางการไหลของความร้อน

3.3.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) เป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจากผิวความร้อนไปยังของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ และการพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection or Natural convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างผิวของแข็ง ของเหลว ก๊าซ ที่อยู่ติดกับพื้นผิวนั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล โดยการเคลื่อนที่ของไหลถูกทำโดยใช้พัดลมหรือโบลเวอร์ กลุ่มตัวแปรไร้มิติของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน Nu_x จะเป็นฟังก์ชันของ Re และ Pr ค่าความสัมพัทธ์ที่ถูกต้องจะขึ้นอยู่กับการสมมาตรของพื้นผิวลักษณะการไหลไม่ว่าจะเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน สภาพของชั้นขอบเขตความร้อนบนพื้นผิว ชั้นขอบเขตความร้อนโดยปกติจะใช้ที่อุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่

อัตราการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ ดังแสดงดังรูปที่ 3.9 และสามารถเขียนสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ได้ดังสมการที่ 3.3



รูปที่ 3.9 ชั้นขอบเขตความร้อนสำหรับการไหล

$$Q_{\text{conv}} = hA(T_w - T_{\infty}) \quad (3.3)$$

$$Q_{\text{conv}} = hA(T_{\infty} - T_w) \quad (3.4)$$

โดยที่

Q_{conv} = อัตราการพาความร้อน (kJ/h)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (kJ/h m² K)

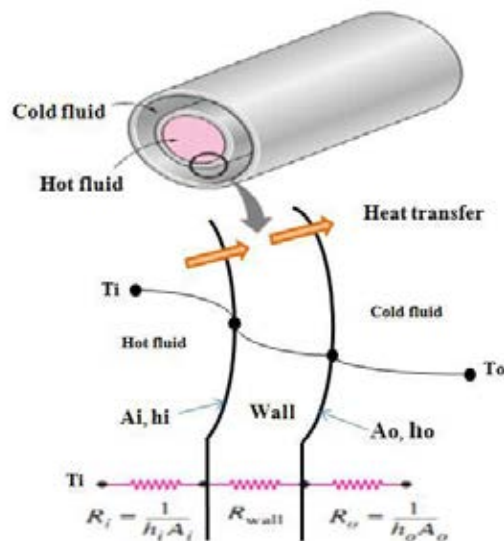
A = พื้นที่ผิวของการพาความร้อน (m²)

T_w = อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

T_{∞} = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว (K)

3.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat-transfer coefficient)

ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเซลล์ในเชิงความร้อนคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหล 2 ชนิด ซึ่งนิยามความหมายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิเป็น T_h กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น T_c กัน โดยผนังที่



รูปที่ 3.10 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อ

เมื่อพิจารณาแบบท่อดังแสดงในรูปที่ 3.10 ท่อด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลร้อน T_i อีกด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลเย็น T_o ค่าการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$q = h_i A_i (T_i - T_1) = 2\pi k_x L \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_1/r_2)} = 2\pi k_y L \frac{(T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)} = 2\pi k_z L \frac{(T_3 - T_4)}{\ln(r_4/r_3)} = h_o A_o (T_o - T_4) \quad (3.5)$$

สามารถ (3.5) เขียนสมการถ่ายเทความร้อนใหม่ได้เป็น

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{\left(\frac{1}{h_i A_i} \right) + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_x L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_z L} + \left(\frac{1}{h_o A_o} \right)} \quad (3.6)$$

หรือ

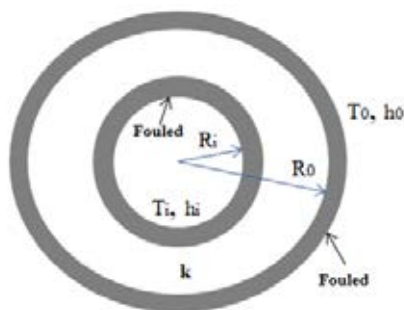
$$q = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.6), (3.7) เราสามารถเขียนค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบได้เป็น

$$R = \left(\frac{1}{h_i A_i} \right) + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_x L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_z L} + \left(\frac{1}{h_o A_o} \right) \quad (3.8)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้เป็นดังนี้

$$q = UA(T_i - T_o) = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.11 ลักษณะการเกิดตะกอนที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก

จากสมการที่ (3.7), (3.8) และ (3.9) พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของพื้นที่ผิวท่อด้านนอกพบว่าจะมีค่า

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_a L} + \frac{A_o \ln(r_3/r_2)}{2\pi k_b L} + \frac{A_o \ln(r_4/r_3)}{2\pi k_c L} + \left(\frac{1}{h_o} \right)} \quad (3.10)$$

ความสัมพัทธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) และค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{1}{U_o A_o} \quad (3.11)$$

ในกรณีที่มีตะกอนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอกต่อดังรูปที่ 3.11 ค่าความร้อนในกรณีที่มีตะกอนนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_r = \left(\frac{1}{h_i A_i} \right) + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \left(\frac{1}{h_o A_o} \right) \quad (3.12)$$

เมื่อ

i และ o = สภาวะที่เกิดตะกรันด้านในและด้านนอกตามลำดับ

$R_{f,i}, R_{f,o}$ = ค่าความต้านทานตะกรันที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ

สมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในสภาวะอื่นเนื่องมาจากการเกิดตะกรันที่ผิวได้เป็นดังนี้

$$\frac{1}{U_{f,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o} \right) + R_f \quad (3.13)$$

เมื่อ

ตัวห้อย i และ o = สภาวะที่เกิดตะกรันด้านในและด้านนอกตามลำดับ

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

เมื่อพิจารณาในสภาวะที่ไม่มีตะกรันเกิดขึ้นที่ผิวท่อจะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะหาได้จากสมการ

$$U_{c,o} = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o} \right)} \quad (3.14)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{U_{c,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o} \right) \quad (3.15)$$

เมื่อ

c,i และ c,o = สภาวะที่ไม่มีตะกรันด้านในและด้านนอกตามลำดับ

นำสมการที่ 3.15-3.13 จะได้สมการการหาค่าความต้านทานตะกรันรวมดังแสดง

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (3.16)$$

เมื่อ

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

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

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

ค่าความต้านทานตะกรันรวมสามารถหาได้จากการนำส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ผิวท่อมีตะกรันลบกับส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ยังไม่เกิดตะกรันดังแสดงในสมการที่ 3.16

3.3.4 Fouling Factor

เมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไประยะหนึ่ง สิ่งสกปรกจากของไหลจะเริ่มจับติดกับผิวของโลหะ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวของโลหะต่ำลง ดังนั้นหากทำการคำนวณออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยไม่ได้คำนึงถึงค่าของความต้านทานอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรกเหล่านี้ที่ผนังของโลหะ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่สามารถถ่ายเทความร้อนตามที่ได้ทำนายไว้ ด้วยเหตุนี้ การคำนึงถึงผลเสียของสิ่งสกปรกที่เกาะติดผิวของโลหะไว้ล่วงหน้าจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง

ปริมาณที่บ่งบอกถึงสิ่งสกปรกเหล่านี้ เรียกว่า Fouling Factor (R_f) หมายถึง ค่าความต้านทานอันเกิดจากสิ่งสกปรกที่ผนัง ($m^2 K/W$)

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (3.17)$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{di}} + \frac{(r_o - r_i) A_i}{k_A A_A \ln m} + \frac{A_i}{A_o h_o} + \frac{A_i}{A_o h_{do}}} \quad (3.18)$$

ตารางที่ 3.1 Typical fouling coefficients

Item	hd (W/m ² K)	hd (btu/h ft ² F)
Distilled and seawater	11,350	2,000
City water	5,680	1,000
Muddy water	1,990-2,840	350-500
Gases	2,840	500
Vaporizing liquids	2,840	500
Vegetable and gas oils	1,990	300

3.3.5 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Analysis of heat exchangers)

ในการออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในงานทางวิศวกรรม จะต้องมีความสามารถในการคาดคะเนอุณหภูมิตรงทางออกของของไหลร้อนและเย็นและสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างของของไหลร้อนและเย็นได้ เมื่อทราบอัตราการไหลของมวลของของไหล ในที่นี้จะกล่าวถึงการหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (Log Mean Temperature Difference, or LMTD) และวิธีประสิทธิภาพ NTU (Effectiveness-NTU)

อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยปกติมักใช้เป็นเวลาานาน โดยไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทำงาน ดังนั้นอาจสมมุติว่าอุปกรณ์มีการไหลแบบสภาวะคงที่ คุณสมบัติของไหล เช่น อุณหภูมิ ความเร็วที่ทางออก หรือทางเข้ามีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ความร้อนจำเพาะของของไหลจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าคงที่ การนำความร้อนตามแนวแกนของท่อไม่ค่อยมีความสำคัญและจะไม่นำมาคิด สุดท้ายสมมุติให้ผิวนอกสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนเป็นอย่างดีจนไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่ร้อนเท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของไหลเย็น ดังสมการ

$$Q = m_c C_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (3.19)$$

และ

$$Q = m_h C_{ph} (T_{h,out} - T_{h,in}) \quad (3.20)$$

เมื่อตัวห้อย h และ c สำหรับของไหลร้อนและของไหลเย็นตามลำดับ

m_c, m_h = อัตราการไหลของมวล (mass flow rates)

C_{pc}, C_{ph} = ความร้อนจำเพาะ (specific heats)

$T_{c,out}, T_{h,out}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกจากท่อ (outlet temperature)

$T_{c,in}, T_{h,in}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าท่อ (inlet temperature)

ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อความสะดวกมักรวมอัตราการไหลของมวลและความร้อนจำเพาะของของไหลเข้าด้วยกันเป็นจำนวนหนึ่งที่เรียกว่า อัตราความจุความร้อน (Heat Capacity Rate) ดังนี้

$$C = mC_p \quad (3.21)$$

$$\text{สำหรับของไหลร้อน } C_h = m_h C_{ph} \text{ และสำหรับของไหลเย็น } C_c = m_c C_{pc} \quad (3.22)$$

เขียนสมการ (3.21) และ (3.22) ในรูปของอัตราความจุความร้อน คือ

$$Q = C_c (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (3.23)$$

$$Q = C_h (T_{c,in} - T_{h,out}) \quad (3.24)$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่ากับอัตราความจุความร้อนของของไหลคูณกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหล อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้ในรูปของความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลที่ร้อนและเย็นโดยที่

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (3.25)$$

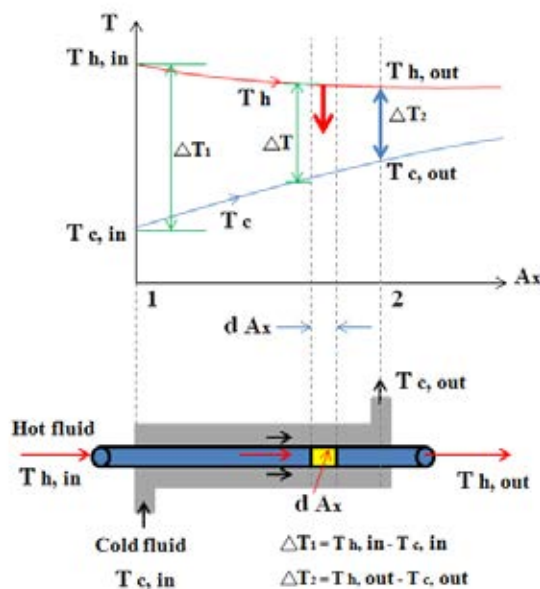
อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้หาจากกฎการเย็นตัวของนิวตันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แต่เนื่องจาก ΔT อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีรูปสมการเป็น

$$Q = UA_s \Delta T_m \quad (3.26)$$

เมื่อ A พื้นที่การถ่ายเทความร้อนและความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมระหว่างของไหล 2 ชนิด

3.3.6 วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (The log mean temperature difference (LMTD) method)

อุณหภูมิของของไหลต่าง ๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นปกติแล้วจะมีค่าไม่คงที่ แต่จะแปรค่าจากจุดหนึ่งไปจุดหนึ่งเมื่อมีความร้อนไหลจากของไหลที่ร้อนไปของไหลที่เย็นกว่า ดังนั้นถึงแม้ว่าความต้านทานความร้อนตามทางของไหลจะมีค่าคงที่ก็ตาม อัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามเส้นกราฟไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้เพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรค่าตามความแตกต่างของอุณหภูมิของไหลร้อนและของไหลเย็นที่แต่ละหน้าตัด ดังรูปที่ 3.12 ระยะห่างระหว่างเส้นกราฟทั้งสองจะเป็นความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลทั้งสอง



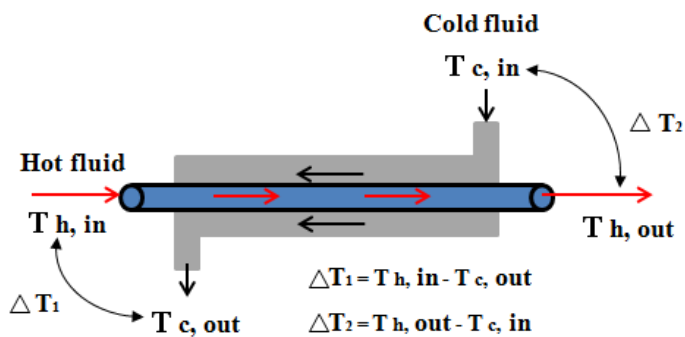
รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลไหลสวนทางกัน

รูปที่ 3.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลไหลสวนทางกัน เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็นมีค่าสูงที่ทางเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลกับทางออก และอุณหภูมิของของเหลวร้อนจะลดลงขณะที่อุณหภูมิของของเหลวเย็นเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของของเหลวเย็นไม่สามารถเพิ่มสูงเกินอุณหภูมิของของเหลวที่ร้อนได้ไม่ว่าจะอยู่ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนานแค่ไหนก็ตาม

ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ นั้นล้วนแต่ต้องหาโดยการอินทิเกรตจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่ไหลผ่านพื้นที่ dA ซึ่งเป็นพื้นที่เล็กๆให้ทั่วพื้นที่ A ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนตลอดความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการที่ (3.27)

$$Q = UA_s \Delta T_m \quad (3.27)$$

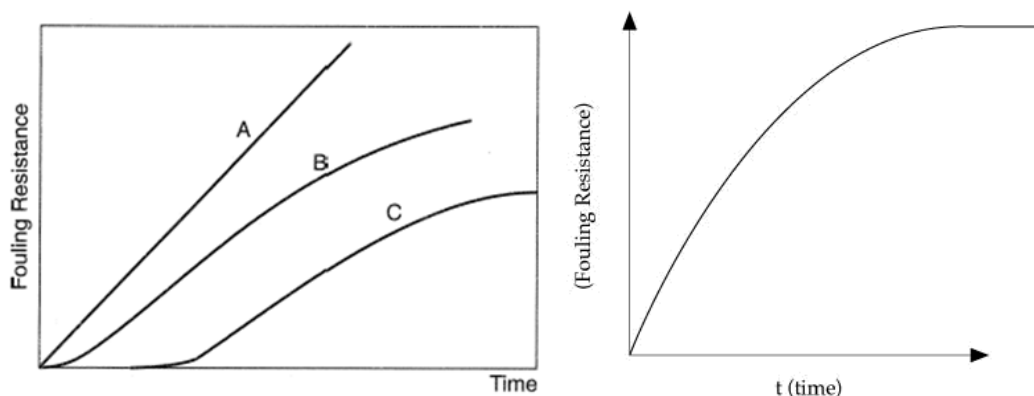
$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (3.28)$$



รูปที่ 3.13 ค่า ΔT_1 และ ΔT_2 ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง

3.4 ตะกรัน (Fouling)

การบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนจำเป็นต้องใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันเพื่อควบคุมอุณหภูมิ โดยโพลีเมอร์ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ถูกทำให้เย็นลงเพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุล ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือตะกรัน โดยตะกรันจะไปลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและลดความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายร้อนและสายเย็นลง การสังเกตความต้านทานตะกรันเป็นไปได้หลายลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.14 เส้นกราฟ A แสดงสภาพผิวที่ไม่มีมีความต้านทานตะกรัน เส้นกราฟ B แสดงอัตราค่าความต้านทานตะกรันจนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง สำหรับกราฟ C แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของความต้านทานทางความร้อนเป็นแบบก้าวหน้าไปสู่ค่าคงที่



รูปที่ 3.14 อัตราการก่อตัวความต้านทานตะกรันตามเวลา

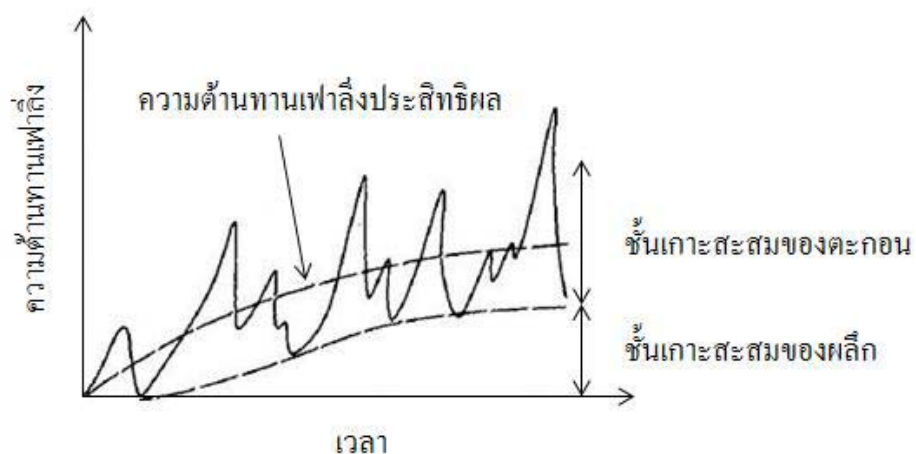
3.4.1 ประเภทของตะกรัน

การเกิดตะกรันภายในผิวท่อของอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งประเภทการเกิดตะกรันออกเป็น 6 ประเภทดังนี้

- 1) ตะกรันที่เกิดจากการตกตะกอน (Precipitation Fouling or Crystallization Fouling) คือ ตะกรันที่เกิดจากการตกตะกอนของสารละลายที่เป็นของเหลวหรือแก๊ส ตะกรันจะเกิดที่บริเวณพื้นที่ผิวสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.15 Precipitation Fouling or Crystallization Fouling



รูปที่ 3.16 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันจากการตกตะกอนและการตกผลึกร่วมกัน

2) ตะกรันที่เกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ (Particulate Fouling) ตะกรันที่เกิดจากสารละลายที่เป็นของเหลวหรือแก๊สที่มีของแข็งแขวนลอย (small particle) อยู่บนพื้นผิวของอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตะกรันประเภทนี้จะไม่จับตัวเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวแต่มีแรง gravity ในการเกาะที่ผิวของ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวอย่างตะกรันประเภทนี้ เช่น ฝุ่นผงหรือทราย



รูปที่ 3.17 Particulate Fouling

3) ตะกรันที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction fouling) ตะกรันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันภายในสารละลายที่เป็นของเหลว เกิดจากคุณสมบัติการรวมตัวกันทางเคมีส่งผลเกี่ยวข้องกับพื้นผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน ตะกรันประเภทนี้จะพบมากในอุตสาหกรรม petroleum refining or polymer production เป็นส่วนมาก



รูปที่ 3.18 Chemical reaction fouling

4) ตะกรันที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา (Corrosion fouling) ตะกรันประเภทนี้สาเหตุเกิดจากการทำปฏิกิริยาจาก corrosion products โดยสารละลายที่เป็นของเหลวหรือแก๊สกับพื้นผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.19 Corrosion fouling

5) ตะกรันที่เกิดจากการแข็งตัวของไพล (Solidification fouling) ตะกรันประเภทนี้จะเกิดเมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนในปริมาณน้อย การไหลของของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของไหลจะแข็งตัวบริเวณพื้นผิวที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเมื่อของไหลเป็นแก๊ส



รูปที่ 3.20 Solidification fouling

6) ตะกรันทางชีววิทยา (Biological fouling) เกิดจากมีสิ่งมีชีวิตทั้งที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ macro-organisms เช่น เพรียง หอย และแบบโครงสร้างขนาดเล็ก biological micro เช่น แบคทีเรีย ไพลีดิติคและเจริญเติบโตที่บริเวณผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



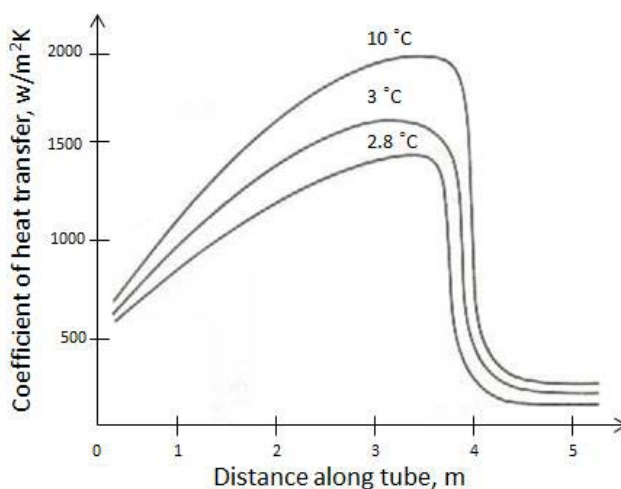
รูปที่ 3.21 Biological fouling

3.4.2 ผลกระทบจากการถ่ายเทความร้อน

การควบคุมอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน และเมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อเนื่องเป็นเวลานาน ปัญหาที่พบคือ การเกิดตะกรัน โดยตะกรันจะไปลดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในระบบ ทำให้ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนลดลง ส่งผลให้ต้องใช้พลังงานทดแทนมากขึ้นหรือลดปริมาณการผลิตหรืออาจหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นปัญหาตะกรันเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน

3.4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับใช้ทำนายอัตราการก่อตัวตะกรันได้ ซึ่งแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับอัตราการก่อตัวตะกรันดังรูปที่ 3.22 อัตราการก่อตัวตะกรันและระดับตะกรันที่เสถียรแปรผันตามค่าอุณหภูมิของไหล



รูปที่ 3.22 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาวิจัยของ Anwar K. และคณะ (2000) พบว่าการเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำแนกรูปแบบของการเกิดตะกรันออกเป็น 4 ลักษณะคือ สมการเส้นตรง

(Linear fouling model : $R_f(t) = R_{f,c} [t/t_{p,c}]$) สมการยกกำลัง (Power-law fouling model : $R_f(t) = R_{f,c} [t/t_{p,c}]^n$)
 สมการอัตราลดลง (Falling rate fouling model : $R_f(t) = R_{f,c} [\ln(t)/\ln(t/t_{p,c})]$) และสมการเอกซ์โปเนนเชียล (Asymptotic fouling model : $R_f(t) = R_{f,c} [1 - \exp(-t/t_{p,c})]$)

เมื่อ

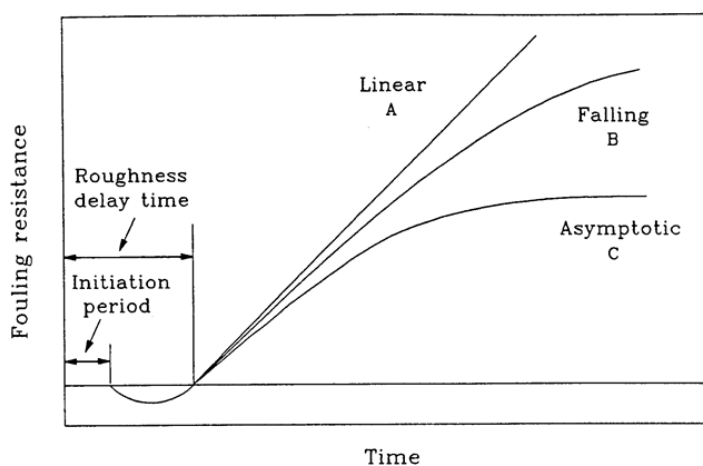
$R_f(t)$ คือ การเกิดตะกอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (m^2hK/kJ)

$R_{f,c}$ คือ ค่าคงที่ของการเกิดตะกอน (m^2hK/kJ)

t คือ เวลา (day)

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

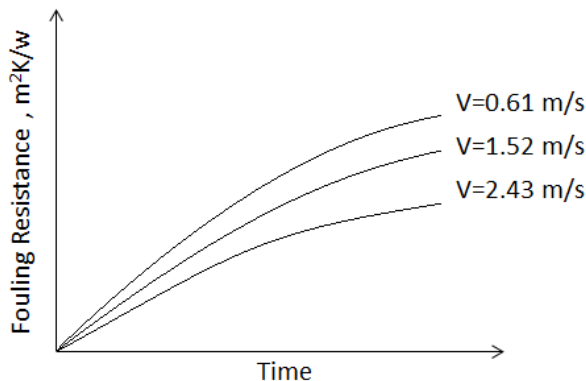
n คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น



รูปที่ 3.23 Linear fouling model, Falling rate fouling model and Asymptotic fouling model

3.4.4 ผลกระทบจากความเร็วของไหล

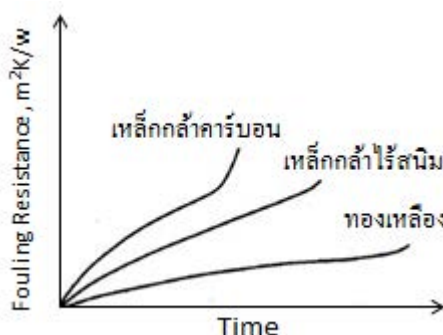
จากรูปที่ 3.24 พบว่าความเร็วของของไหลเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดต่อการเกิดตะกอน โดยการเพิ่มความเร็วจะลดอัตราการก่อตัวของตะกอนและค่าความต้านทานตะกอนระดับสุดท้ายที่คงที่ นอกเหนือจากการลดการเกิดตะกอนแล้วความเร็วที่สูงขึ้นจะไปเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อน ซึ่งอาจจะมีผลให้สามารถลดทั้งขนาดและราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ เมื่อตะกอนลดลงทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาได้ด้วย



รูปที่ 3.24 ความต้านทานตะกรันที่ความเร็วต่างๆของไหลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

3.4.5 ผลกระทบจากวัสดุและโครงสร้างพื้นผิว

การเลือกวัสดุที่ใช้ทำพื้นผิวสำหรับถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญมากในช่วงเวลาเกิดตะกรันปกคลุมที่พื้นผิว วัสดุต่างชนิดกันจะให้ผลในการเร่งการเกิดปฏิกิริยากับของไหลต่างๆ ไม่เหมือนกัน ซึ่งอาจจะช่วยเร่งหรือยับยั้งการเกิดตะกรันก็ได้ รูปที่ 3.25 แสดงพัฒนาการของตะกรันในระหว่างช่วงเวลาก่อตัวสำหรับผิวเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และทองเหลือง

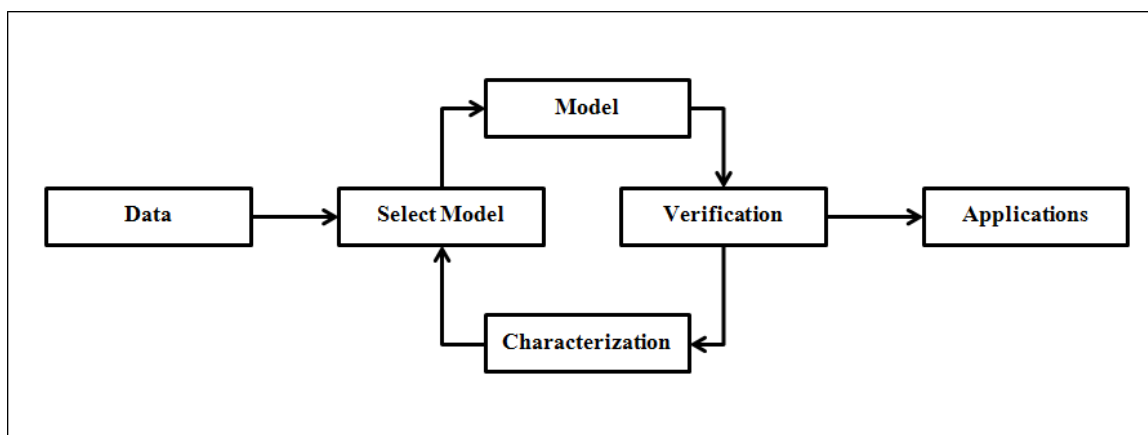


รูปที่ 3.25 พัฒนาการของความต้านทานตะกรันแสดงให้เห็นช่วงเวลาก่อตัวสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าไร้สนิม และทองเหลือง

3.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ การนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์มาใช้จำลองสถานการณ์และอธิบายพฤติกรรมในกระบวนการที่ศึกษา การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยวิเคราะห์ระบบทำให้ได้รับข้อมูลในเชิงลึกและสามารถประเมินระบบได้ว่ามีความคุ้มค่าต่อการลงทุนมากน้อยเพียงใด อีกทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคาดการณ์สิ่งที่อาจจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและทันการณ์ โดยไม่ต้องรอให้สถานการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นจริง ในการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นใช้ 5 กระบวนการดังนี้

1. การกำหนดปัญหา
2. การแปลงปัญหาให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
4. การทดสอบผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
5. การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง



รูปที่ 3.26 แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย

3.5.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ (Estimation of Parameters)

การวิเคราะห์ระบบด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปัญหาที่พบส่วนใหญ่คือ มีคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมาก การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการหาคำตอบที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุด โดยมี 3 เทคนิคที่นิยมใช้ในการหาคำตอบมีดังนี้

1) Simulation Optimization ใช้คำนวณหาค่าตัวแปรกับระบบที่มีความซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ เช่น ใช้ควบคุมกระบวนการ (Process Control Optimization) การออกแบบงานทางวิศวกรรม (Engineering Design Optimization) ใช้กับการจำลองทางภูมิศาสตร์และพยากรณ์อื่นๆ

2) Search Method ใช้คำนวณหาค่าตัวแปรกับระบบที่มีพื้นที่คำตอบขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถประเมินผลในทุกๆคำตอบที่เป็นไปได้

3) Random Search หรือเทคนิคการค้นหาแบบสุ่ม ใช้คำนวณหาค่าตัวแปรกับระบบที่มีเซตคำตอบที่เป็นไปได้และมีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถประเมินคำตอบทุกๆคำตอบในเซตได้ โดยคำนวณค่าในช่วงที่เหมาะสม โดยคำนวณหาค่าความเที่ยงตรงจากการทำนาย Root Mean Square Error (RMSE) เป็นค่าที่บอกความแม่นยำ โดยคำนวณจากค่าความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริงกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ค่า RMSE คำนวณได้จากสมการ 3.29

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum (obs-predict)^2}}{N} \quad (3.29)$$

เมื่อ

obs คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกอนที่คำนวณได้จากข้อมูลจริง

predict คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกอนที่คำนวณได้จากแบบจำลอง

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาใช้ในการคำนวณ

สำหรับเทคนิคที่นำมาใช้ในการหาค่าตอบตัวแปรในงานวิจัยนี้คือ เทคนิคการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search)

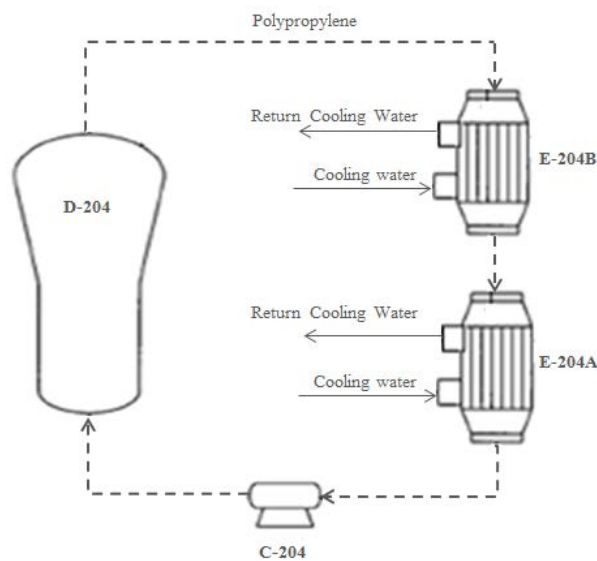
บทที่ 4

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการก่อตัวของตะกั่วเทียบกับเวลา ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ (E-204A, E-204B) เป็นหลัก โดยศึกษารูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกั่วที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยรวบรวมข้อมูลจากโรงงานจริงและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริงเป็นพื้นฐานในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำนายอัตราการก่อตัวของตะกั่วเทียบกับเวลา นำแบบจำลองที่พัฒนาแล้วมาใช้กับข้อมูลกระบวนการผลิตจริงชุดที่ 2 เพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงของแบบจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

4.1 ศึกษาขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน

กระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ตามลำดับดังต่อไปนี้ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา, polymerization, การทำให้แห้ง, ตัดเม็ดและบรรจุผลิตภัณฑ์ กระบวนการผลิตเป็นแบบต่อเนื่อง งานวิจัยนี้ศึกษาในส่วน polymerization เป็นหลัก ซึ่งกระบวนการ polymerization นี้ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์ (D-204) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 2 เครื่อง (E-204A, E-204B) ต่ออนุกรมกันดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ฟังก์ชันการแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E-204A, E-204B) เป็นชนิดเชลล์และท่อมี 2 สายคือ สายร้อน และสายเย็นสำหรับใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยของไหลที่อยู่ในสายร้อนคือ โพลีโพรพิลีน และของไหลที่อยู่ในสายเย็นคือน้ำ โพลีโพรพิลีน ถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (D-204) เครื่องปฏิกรณ์ถูกควบคุมโดยปริมาณที่ป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่ใช้เป็น Exothermic มีสถานะอุณหภูมิ ความดัน และค่าความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยาของที่ โพลีโพรพิลีน ที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ถูกทำให้เย็นลงโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยตะกอนที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณผิวท่อด้านใน tube ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E-204A, E-204B)

4.2 รวบรวมข้อมูลสถานะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากโรงงาน

การศึกษาข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ใช้ข้อมูลค่าคงที่ต่าง ๆ จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนของบริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด ดังแสดงในตารางที่ 4.1, 4.2 เป็นค่าสถานะการดำเนินการจริงที่โรงงานได้ออกแบบไว้ใช้สำหรับระบบข่าแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ A คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เริ่มต้นดำเนินการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและ μ คือค่าความหนืด

ตารางที่ 4.1 สถานะดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	1.00	kcal/kg ⁰ C
A	681.00	m ²
U	250.53	Kcal/m ² hr ⁰ C
μ	0.01	kg/m s

ตารางที่ 4.2 สภาวะดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
C_p	1.00	kcal/kg ⁰ C
A	409.00	m ²
U	376.70	Kcal/m ² hr ⁰ C
μ	0.01	kg/m s

4.3 การศึกษารูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการศึกษารูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน เบื้องต้นจะศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเกิดตะกรันจากค่าอุณหภูมิขาออกของสายโพลีโพรพิลีน หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าตะกรันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้ระยะเวลาดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเวลาต่อเนื่อง 141 วัน โดยคัดเลือกความเหมาะสมจากสมการการเกิดตะกรันทั้งหมด 4 รูปแบบดังนี้

1) แบบจำลองของ Ebert and Panchal

Ebert and Panchal (1997) [1] ได้สร้างรูปแบบสมการเพื่อหาค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันสำหรับ crude oil systems โดยรูปแบบสมการอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ในพจน์ของ Arrhenius จะถูกพิจารณาจนถึงปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดด้วย ไม่พิจารณาผลกระทบของค่าการนำความร้อนของ crud oil และค่าความร้อนจำเพาะของสาร แต่พิจารณาถึงผลกระทบของค่าความหนาแน่นของ crud oil และค่าความหนืดของสาร โดยแสดงผ่านค่า Reynolds number จากความสัมพันธ์ร่วมกันของค่าการส่งผ่านความร้อน Ebert and Panchal จึงกำหนดให้ Prandtl number [2] มีค่าเท่ากับ -0.33

ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิของชั้นฟิล์ม, wall shear stress และ Reynolds number จุดเริ่มต้นในการคำนวณหาค่าดังกล่าวจะกำหนดให้ค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ โดยตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่อตัวของตะกรันคือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์มและความเร็วของไหล โดยมีรูปแบบดังสมการที่ 4.1

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

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อดั้วของตะกรัน ($m^2 h K/hkJ$)

Re คือ Reynolds number

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

P_r คือ Prandtl number

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

τ_w คือ wall shear stress

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

2) แบบจำลองของ Polley

Polley et al. และคณะ (2002) [3] ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองของ Ebert – Panchal โดยทำการเปรียบเทียบผลแบบจำลองของ Ebert-Panchal กับข้อมูลจากผลการทดลองของ Knudsen [4] ในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) พบว่าผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อน แต่เมื่อทำการปรับแก้ค่าพลังงานกระตุ้น (Activate energy, E) ทำให้แบบจำลองของ Ebert-Panchal มีความแม่นยำมากขึ้นและสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลอื่นได้

แบบจำลองของ Polley มีความแตกต่างไปจากแบบจำลองของ Ebert-Panchal ตรงที่แบบจำลองของ Polley พิจารณาอุณหภูมิที่ผนัง ส่วนแบบจำลองของ Ebert-Panchal พิจารณาอุณหภูมิที่ชั้นฟิล์ม อีกทั้งแบบจำลองของ Polley ค่า Reynolds number จะถูกพิจารณามากกว่าค่าของ wall shear stress เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ Ebert – Panchal

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่อดั้วของตะกรันมีดังนี้ อุณหภูมิที่ผนัง Reynolds number ความเร็วของไหล ความหนืดของไหล Prandtl number ค่าความร้อนจำเพาะของสาร และค่าการนำความร้อน โดยมีรูปแบบอัตราการก่อดั้วของตะกรันแสดงดังสมการที่ 4.2

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

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อตัวของตะกรัน ($m^2 h K/hkJ$)

Re คือ Reynolds number

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

P_r คือ Prandtl number

T_w คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

3) แบบจำลองของ Saleh

Saleh et al. และคณะ (2003) [5] ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองของ Polley et al. โดยทำการเปรียบเทียบผลของแบบจำลอง Polley et al. กับผลการทดลองของ Australian light crude oil โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อแบบจำลองคือ อุณหภูมิชั้นฟิล์ม ความเร็วของไหลและ Physical properties ของ Australian light crude oil [5] (Density (g/ml) 0.792, Viscosity (Mpa s) 1.969, Asphaltenes (wt.%) 0.05) เป็นหลัก โดยใช้เครื่องมือวัด portable fouling research unit (PFRU) วัดค่าการถ่ายเทความร้อน (heat flux) เทียบกับเวลา ช่วงระยะเวลาที่ใช้เก็บข้อมูลคือ transition region ซึ่งเครื่องมือวัดจะมี probe เป็นตัววัดค่าตัวแปร

จากผลการทดลองของ Australian crude oil [5] พบว่าในแต่ละแบบจำลองจะมีค่าความคลาดเคลื่อนดังแสดง (Summation of squares of errors : Polley $1.0560E10^{-11}$, Saleh $1.2869E10^{-13}$) ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ Saleh มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองของ Polley

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่อตัวของตะกรันมีดังนี้ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม ความเร็วของไหลและความดันในระบบ โดยมีรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันแสดงดังสมการที่ 4.3

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

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อดังของตะกรัน (m^2hK/hkJ)

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

P คือ ความดัน (kPa)

u คือ ความเร็ว (m/s)

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

4) แบบจำลองของ Nasr

Nasr และคณะ (2006) [6] ได้เสนอแบบจำลองอัตราการก่อดังของตะกรันใน Preheat exchangers ของโรงกลั่นน้ำมันดิบ (Crude distillation unit) ซึ่งแบบจำลองอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าไม่พิจารณาค่า Prandtl number โดยสมมติว่า Prandtl number เป็นค่าอิสระกับแบบจำลอง โดยศึกษาหาความสัมพันธ์จากค่าอุณหภูมิ พื้นที่ผิวและความเร็วของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [7] โดยเทียบผลความคลาดเคลื่อนกับผลการทดลองของ Australian light crude แบบจำลองของ Nasr ได้มีการประมาณค่าคงที่ตัวแปรดังแสดงในสมการที่ 4.4

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่ออัตราการก่อดังของตะกรันมีดังนี้ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม ความเร็วของไหล ความหนาแน่นและความหนืดของไหลในระบบ เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดตะกรันที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองของ Nasr และคณะมีรูปแบบอัตราการก่อดังของตะกรันแสดงดังสมการที่ 4.4

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

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อดังของตะกรัน (m^2hK/hkJ)

Re คือ Reynolds number

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

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

จากสมการคำนวณหาค่าอัตราการก่อดังของตะกรันทั้งหมด 4 รูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น สามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง

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

4.4 การเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการก่อดังของตะกรันที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

งานวิจัยนี้ศึกษารูปแบบการก่อดังของตะกรันที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหารูปแบบอัตราการก่อดังของตะกรันของ โพลี โพรพิลีนที่อธิบายพฤติกรรมพลวัตได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด โดยพิจารณาจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่

เหมาะสม เพื่อให้เกิดค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จริงจากโรงงาน เพื่อใช้อธิบายแนวโน้มการก่อตัวของตะกรันที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน

เนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการจริงในโรงงานนั้นไม่ได้มีการเก็บข้อมูลจนครอบคลุมทั้งหมดเพื่อใช้ในการออกแบบจำลอง จึงมีข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบจำลองข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 2 เครื่อง (E-204A, E-204B) ดังนี้ ไม่มีการสูญเสียพลังงานออกนอกระบบพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ ของไหลที่พิจารณาเป็นของเหลวไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน และค่าความจุความร้อนของสายร้อนและสายเย็นคงที่

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยส่วนของการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 2 ส่วนคือ (E-204A, E-204B) เชื่อมกันและมีการเข้า-ออกต่อเนื่องกันจนกระทั่งดำเนินการเสร็จกระบวนการผลิต แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของข่างานในระบบแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองของ Nasr model มาทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน production process เนื่องจากเป็นรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนและสามารถอธิบายกระบวนการเกิดตะกรันได้ใกล้เคียงมากที่สุด รวมทั้งตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการเกิดตะกรันในสมการที่ 4.4 คือ ค่าความหนืด, ค่าความหนาแน่น, ค่าความเร็วของ โพลีโพรพิลีน, อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของสายร้อนและสายเย็น สามารถหาข้อมูลได้จากกระบวนการผลิตจริง

จากแบบจำลองพบว่าค่าความเค้นเฉือน (Shear stress) ไม่มีความสัมพันธ์กับรูปแบบจำลองการก่อตัวของตะกรันของ Nasr Model เนื่องจากค่าความเค้นเฉือนสามารถคำนวณหาค่าแทนได้จากค่า Reynolds number คือ ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่นและค่าความเร็วของโพลีโพรพิลีน ซึ่งสามารถหาค่านี้ได้จากกระบวนการผลิตจริง

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

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อตัวของตะกรัน ($m^2 h K/hkJ$)

Re คือ Reynolds number

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

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

และ

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

Re = Reynolds number

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

u = ความเร็ว (m/s)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

μ = ความหนืดของของไหล ($kg/m s$)

4.5 การหาค่าพารามิเตอร์

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

จากสมการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา คือ α, β, γ ทั้งนี้เพื่อนำมาแทนในแบบจำลองของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 2 เครื่อง และหาค่าอัตราการก่อ

ตัวของตะกรัน (Fouling rate, dR/dt) ของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบทีละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน เมื่อป้อนค่าเข้าไปในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะทำให้ได้คำตอบออกมาอย่างรวดเร็ว และสามารถใส่ข้อมูลใหม่ที่ต้องการไปได้เรื่อยๆ จนกระทั่งได้ค่าตัวแปรออกมาอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ หรือสามารถนำค่าที่เป็นการคำนวณปริมาณค่าข้อมูลขาเข้า (Input) ที่ต้องการเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้อ้างอิงในงานวิจัยได้ เมื่อกันหาตัวแปรแบบสุ่มตามขั้นตอนจะทำให้ทราบค่าของช่วงค่าพารามิเตอร์ 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

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

เมื่อ

obs คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกรันจากข้อมูลจริง

predict คือ ค่าอัตราการก่อตัวตะกรันจากแบบจำลอง

N คือ จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด

โดยที่ค่าอัตราการก่อตัวตะกรัน (Fouling rate, dR/dt) จากข้อมูลจริงได้จากการเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ของอุณหภูมิสายร้อน อุณหภูมิของสายเย็น อัตราการไหลของสายร้อนและอัตราการไหลของสายเย็นคำนวณดังสมการ

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

โดยที่

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ/h)

m คือ อัตราการถ่ายเทมวล (kg/s)

C_p คือ ค่าความจุความร้อน (kJ/kg K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

และหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient, U) จากสมการ

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

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

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

โดยที่

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

$U_{(i)}$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($\text{kJ/m}^2 \text{ h K}$)

U_c คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ผิวท่อที่ยังไม่มีตะกรัน ($\text{kJ/m}^2 \text{ h K}$)

A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)

m คือ อัตราการถ่ายเทมวล (kg/s)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

ตัวห้อย c และ h เป็นพารามิเตอร์แสดงถึง สายเย็น (c) สายร้อน (h) ในส่วนของ in และ out เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงสายขาเข้า (in) สายขาออก (out)

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

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

โดยที่

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

$R_{f(i+1)}$ คือ ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกอน (Fouling factor) ที่ $i+1$, ($m^2 h K/kJ$)

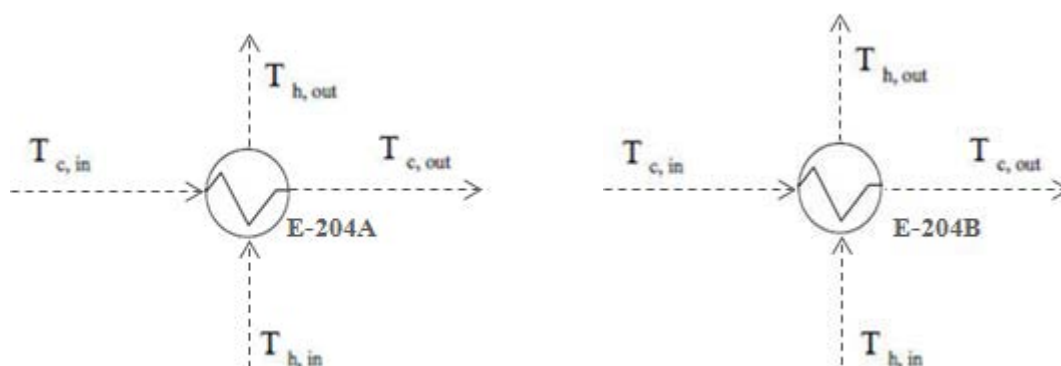
$R_{f(i-1)}$ คือ ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกอน (Fouling factor) ที่ $i-1$, ($m^2 h K/kJ$)

Δt คือ เวลา (h)

4.6 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถสอบทานความถูกต้องโดยทำการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและค่าอัตราการไหลของโพลีโพรพิลีน โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E-204A, E-204B) มาใช้กับข้อมูลจากโรงงานจริงชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาดำเนินการผลิต 91 วัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถพิสูจน์ความถูกต้องโดยทำการเปรียบเทียบกับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน

4.6.1 การหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงการดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A,B

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

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

โดยที่

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (kJ)

m คือ อัตราการถ่ายเทมวล (kg/s)

C_p คือ ค่าความจุความร้อน (kJ/kg K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

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

และ

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

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

4.6.2 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

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

$R_{f(i-1)}$ คือ ค่าแฟคเตอร์ของการเกิดตะกรัน (Fouling factor) ที่ $i-1$ ($m^2 h K/kJ$)

Δt คือ เวลา (h)

$\left. \frac{dR_f}{dt} \right|_{(i-1)}$ คือ อัตราการเกิดตะกรัน ($m^2 h K/kJ/h$)

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

หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $U_{(t)}$ จากสมการ

$$\frac{1}{U_{(t)}} = R_f(t) + \frac{1}{U_c}$$

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

บทที่ 5

ผลการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการดำเนินการวิจัย แบ่งได้เป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งคือ การสร้างแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate, dR_f/dt) ที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงานในระบบ และส่วนที่สองคือ การนำแบบจำลองที่สร้างไปใช้กับข้อมูลชุดที่ 2 เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากโรงงานจริงจากข้อมูลชุดที่ 2

5.1 การสร้างแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบที่ยกมาศึกษานั้น ประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 2 เครื่อง (E-204A, E-204B) เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาสร้างโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการจำลองและเลียนแบบกระบวนการ โดยเลือกใช้แบบจำลองอัตราการก่อตัวของ Nars model ดังแสดงในสมการที่ 5.1 มาทำการพัฒนาเพื่อใช้กับงานวิจัยนี้

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma Re^{0.4} \quad (5.1)$$

โดยที่

$\frac{dR_f}{dt}$ คือ อัตราการก่อตัวของตะกรัน (m^2hK/hkJ)

Re คือ Reynolds number

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

T_{film} คือ อุณหภูมิของชั้นฟิล์ม (K)

α, β, γ คือ ค่าคงที่ตัวแปร

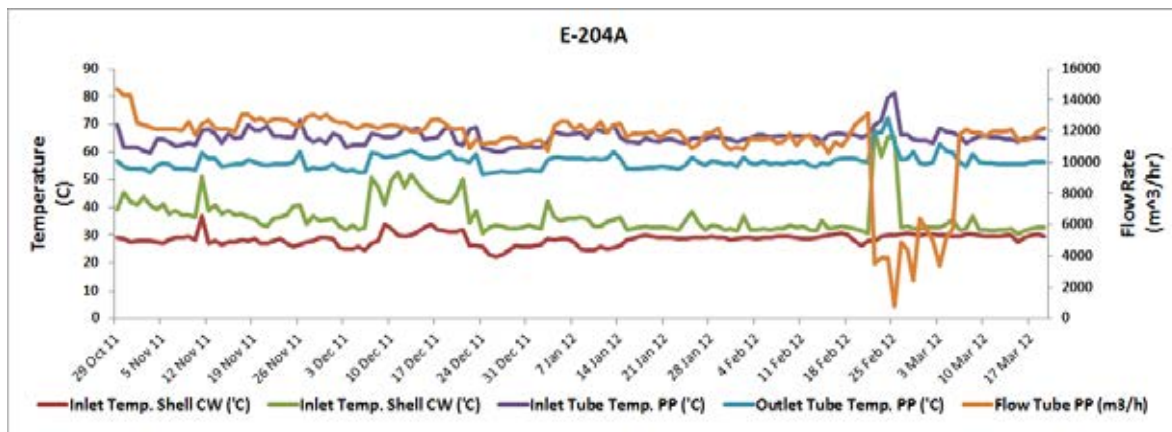
$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (5.2)$$

Re	คือ Reynolds number
D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
u	คือ ความเร็ว (m/s)
ρ	คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
μ	คือ ความหนืดของของไหล (kg/m s)

โดยเทียบจากค่าอัตราการก่อตัวของตะกรัน (Fouling rate, dR_f/dt) ของสายผลิตภัณฑ์ โพลีโพรพิลีน ซึ่งพารามิเตอร์ที่ต้องการหาคือ α , β และ γ ที่เหมาะสมในกระบวนการจริงที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง และสามารถอธิบายรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันได้ใกล้เคียงกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการจริงมากที่สุด และเกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากการสุ่มหาค่าตัวแปรจำเป็นต้องอาศัยค่าความคลาดเคลื่อนผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง โดยเทียบค่าความต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งให้ได้ค่าจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนผลต่างเฉลี่ยกำลังสองมีค่าแตกต่างกันน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง ทั้งนี้ได้แสดงผลการจำลองข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิต โพลีโพรพิลีน (E-204A, E-204B) ตลอดช่วงระยะเวลาดำเนินการ 141 วัน ตามลำดับดังนี้

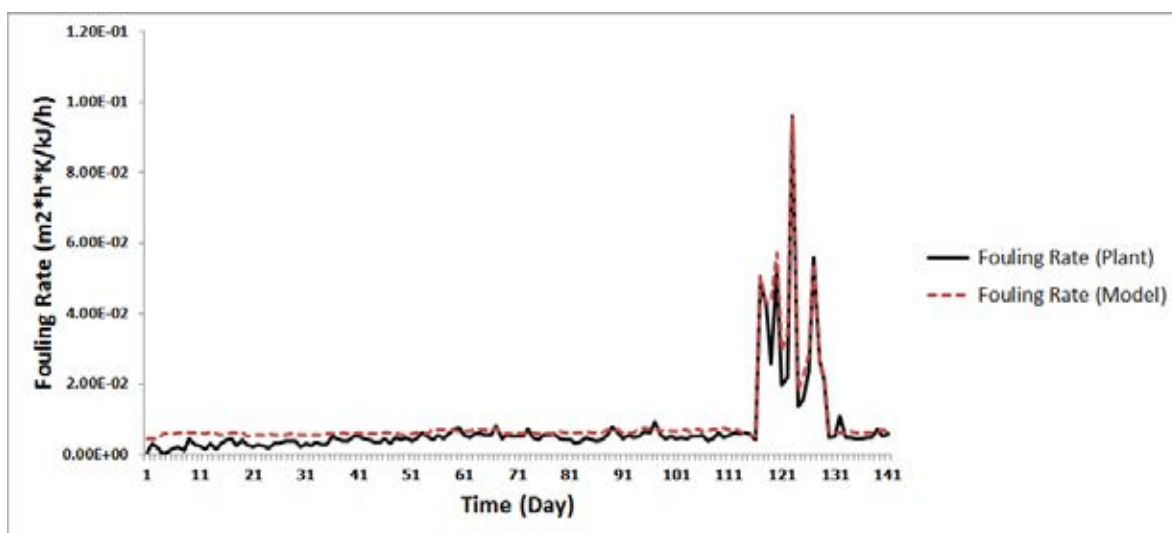
5.1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A

อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของโพลีโพรพิลีนที่ใช้ในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ข้อมูลที่ใช้มาจากกระบวนการผลิตจริงเป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการสำหรับนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



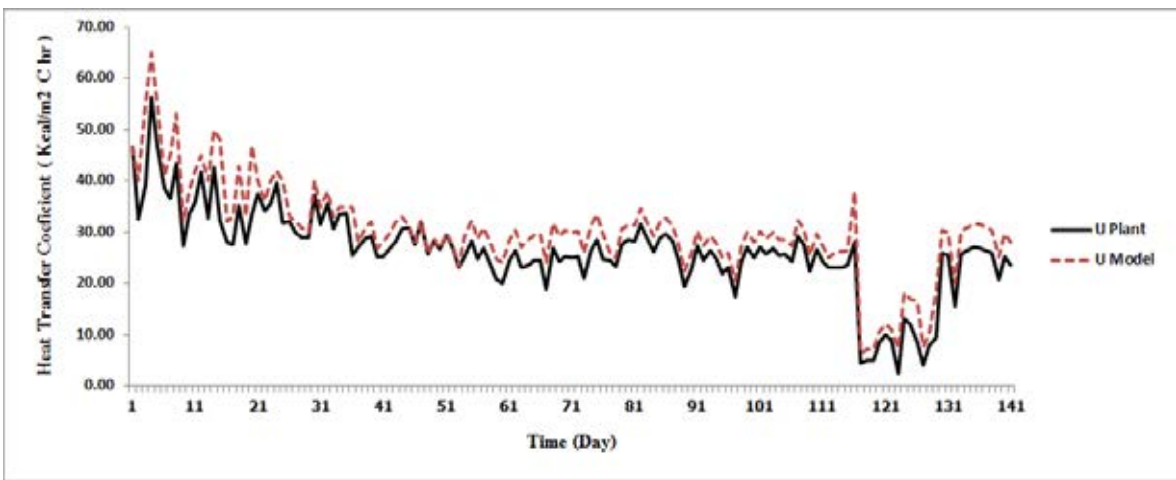
รูปที่ 5.1 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของ โพลีโพรพิลีนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A

จากผลการทดลองเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ให้มีความเหมาะสมใน กระบวนการผลิตจริงที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องพบว่าค่าอัตราการก่อตัวของ ตะกรันของสายผลิตภัณฑ์โพลีโพรพิลีนมีรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันแสดงดังรูปที่ 5.2



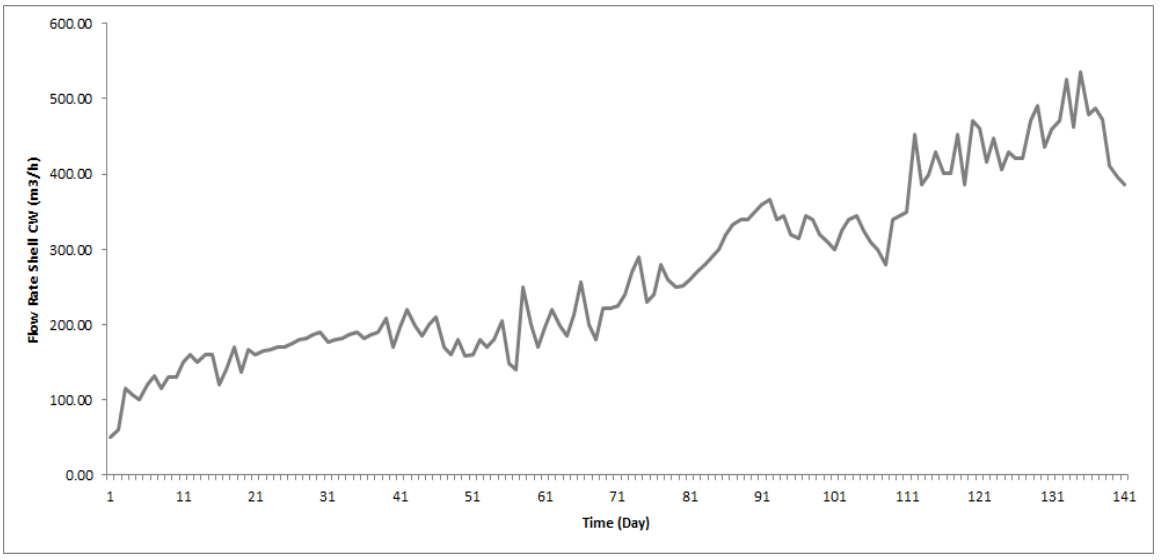
รูปที่ 5.2 อัตราการก่อตัวของตะกรันของ E-204A

เมื่อได้แบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่มีความเหมาะสมกับระบบแล้ว ต้องมีการสอบ ทานความถูกต้องโดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูปที่ 5.3



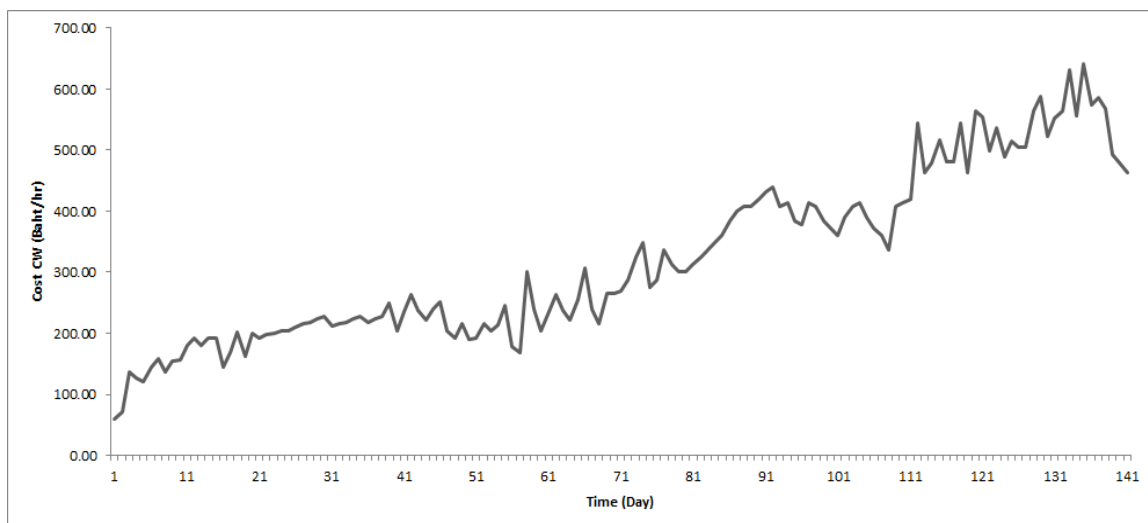
รูปที่ 5.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ E-204A

จากผลการทดลองเมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไปช่วงหนึ่งพบว่าค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงและต้องใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งปริมาณของน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204A

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกรันที่เพิ่มขึ้นสามารถคำนวณเป็นราคาค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ราคาบน้ำที่ใช้ไปในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204A

ในการหาค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ที่ใช้กับแบบจำลองของ Nasr Model โดยใช้วิธีการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับหาค่าพารามิเตอร์ดังแสดง

$$\alpha = 550 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$$

$$\beta = -1.75$$

$$\gamma = 9.60 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$$

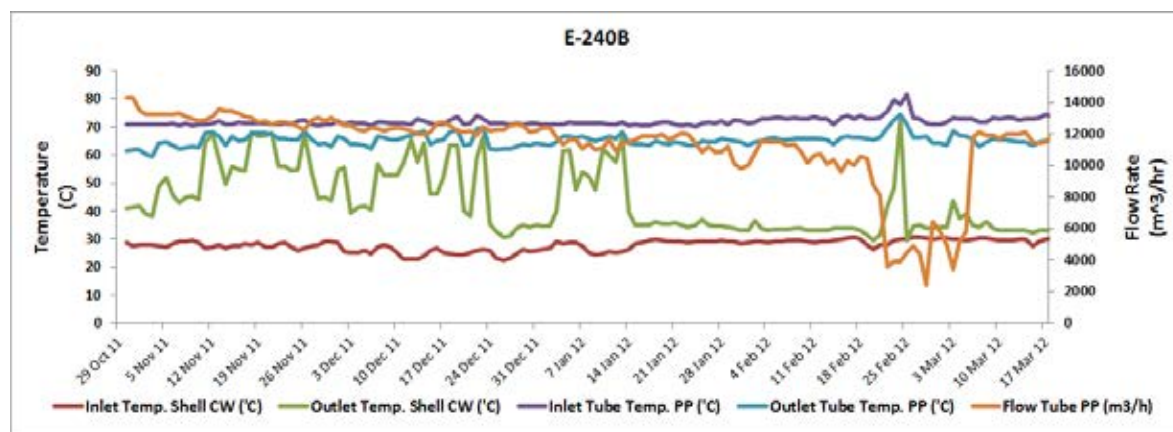
เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่ปรับได้ลงในแบบจำลองของ Nasr Model จะพบว่าค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยเทียบจากผลต่างของค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ให้ค่ามีความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง ถ้าค่า RMSE ให้ค่ามีความแตกต่างน้อยที่สุด แสดงว่าแบบจำลองที่ได้มีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

ตารางที่ 5.1 ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองของค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 550 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.75$ และ $\gamma = 9.60 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

E-204A	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกรัน	2.03×10^{-4}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	2.35

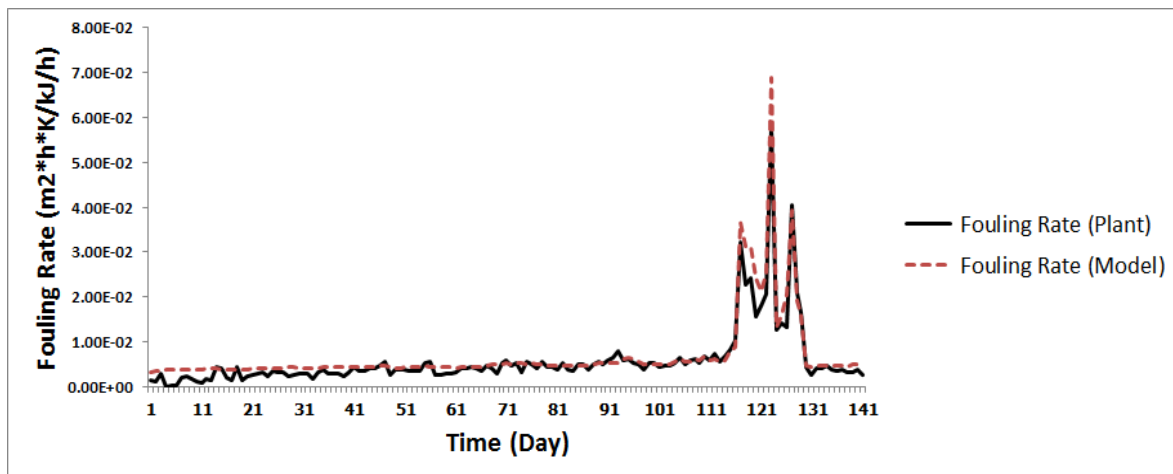
5.1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B

อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของโพลีโพรพิลีน ที่ใช้ในขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ข้อมูลที่ใช้มาจากกระบวนการผลิตจริง เป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการสำหรับนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



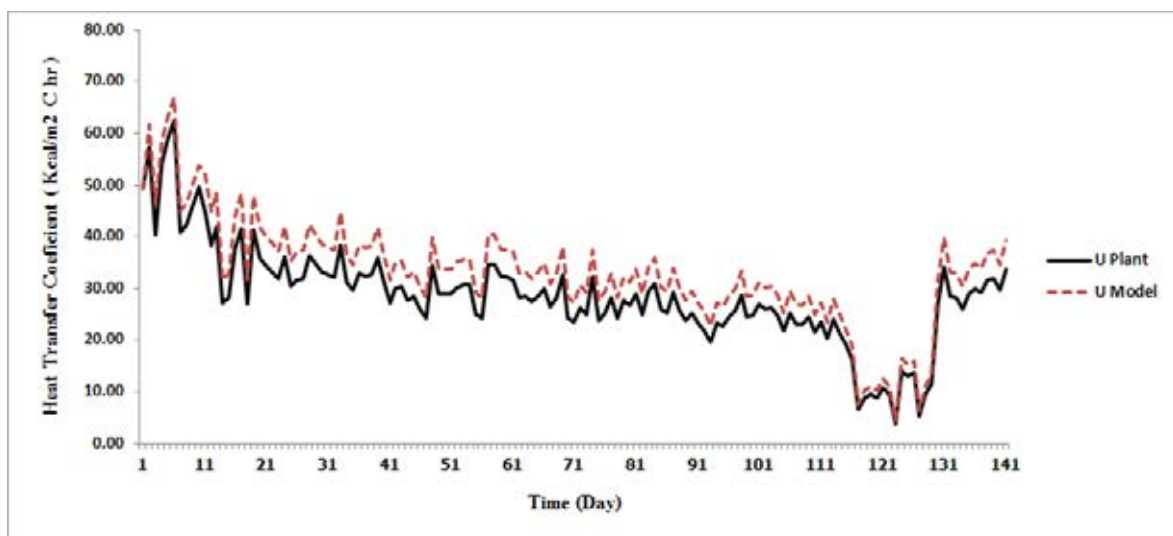
รูปที่ 5.6 อุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็นกับอัตราการไหลของโพลีโพรพิลีนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B

จากผลการทดลองเมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ให้มีความเหมาะสมในกระบวนการผลิตจริงที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้องพบว่าค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันของสายผลิตภัณฑ์โพลีโพรพิลีนมีรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันแสดงดังรูปที่ 5.7



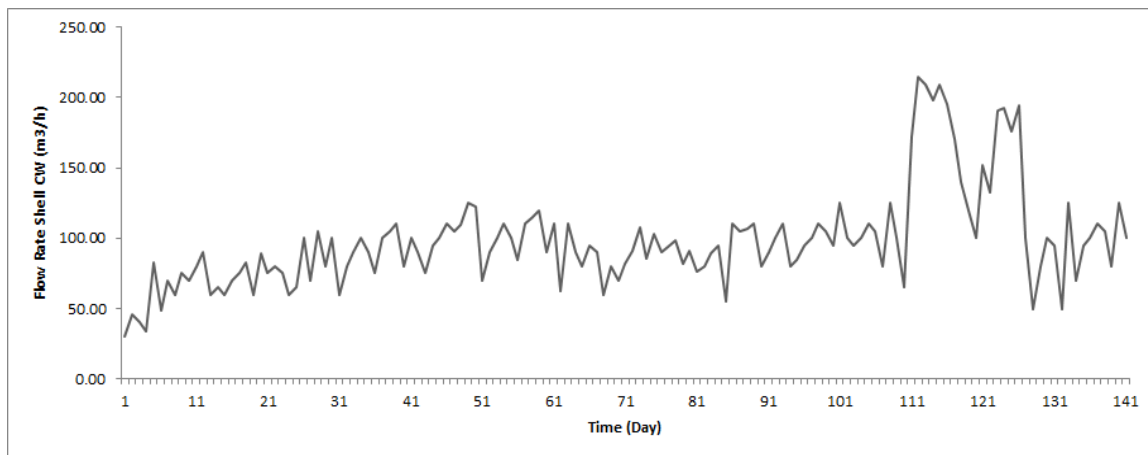
รูปที่ 5.7 อัตราการก่อตัวของตะกรันของ E-204B

เมื่อได้แบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่มีความเหมาะสมกับระบบแล้ว ต้องมีการสอบทานความถูกต้องโดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแสดงดังรูปที่ 5.8



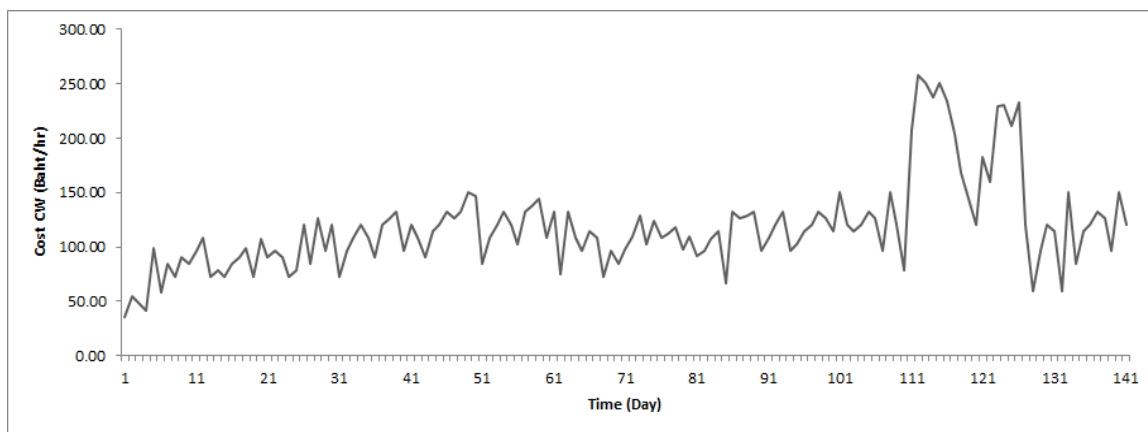
รูปที่ 5.8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ E-204B

จากผลการทดลองเมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไปช่วงหนึ่งพบว่าค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงและต้องใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งปริมาณของน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204B

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณตะกอนที่เพิ่มขึ้นสามารถคำนวณราคาค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ราคาค่าน้ำที่ใช้ไปในการแลกเปลี่ยนความร้อนของ E-204B

จากผลการจำลองการหาค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ที่ใช้กับแบบจำลองของ Nasr Model โดยใช้วิธีการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับหาค่าพารามิเตอร์ดังแสดง

$$\alpha = 650 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$$

$$\beta = -1.71$$

$$\gamma = 1.06 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่ปรับได้ลงในแบบจำลองของ Nasr Model จะพบว่าค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยเทียบจากผลต่างของค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ให้ค่ามีความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลองกับข้อมูลจริง ถ้าค่า RMSE ให้ค่ามีความแตกต่างน้อยที่สุด แสดงว่าแบบจำลองที่ได้มีความเที่ยงตรงและใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

ตารางที่ 5.2 ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองของค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B ที่ค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 650 \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$, $\beta = -1.71$ และ $\gamma = 1.06 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ K/kJ}$

E-204B	RMSE
อัตราการก่อตัวของตะกรัน	1.60×10^{-4}
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	0.39

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากโรงงานจริงกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ Nasr Model ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B ที่ค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ต่างกัน

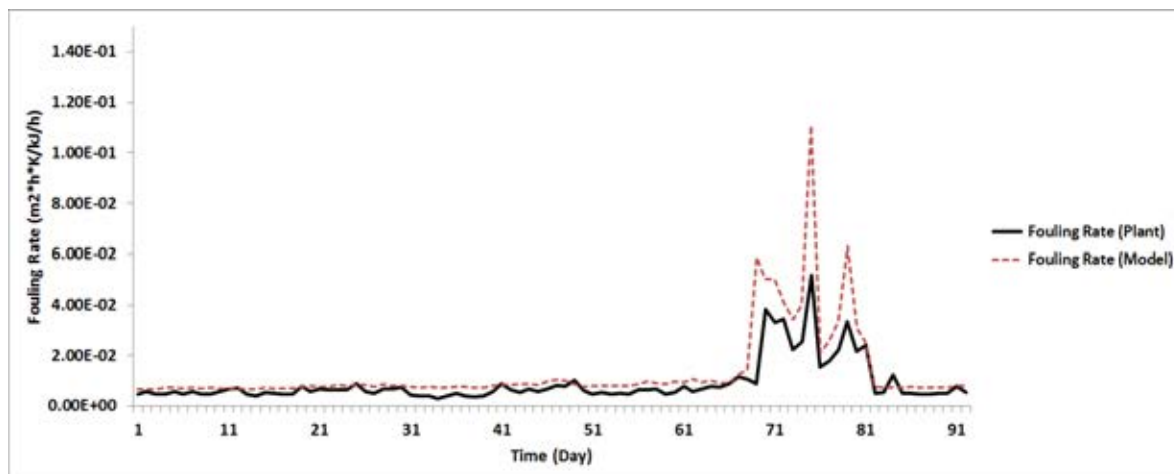
Heat exchanger	Parameter			RMSE	
	α	β	γ	dR_f/dt	U
E-204A	550	-1.75	9.60×10^{-7}	2.03×10^{-4}	46.60
E-204B	650	-1.71	1.06×10^{-7}	1.60×10^{-4}	49.30

5.2 การสอบทานความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถสอบทานความถูกต้องโดยทำการเปรียบเทียบกับอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E-204A, E-204B) มาใช้กับข้อมูลจากโรงงานจริงชุดที่ 2 ที่ระยะเวลาดำเนินการผลิต 91 วัน โดยแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงผลตามลำดับดังนี้

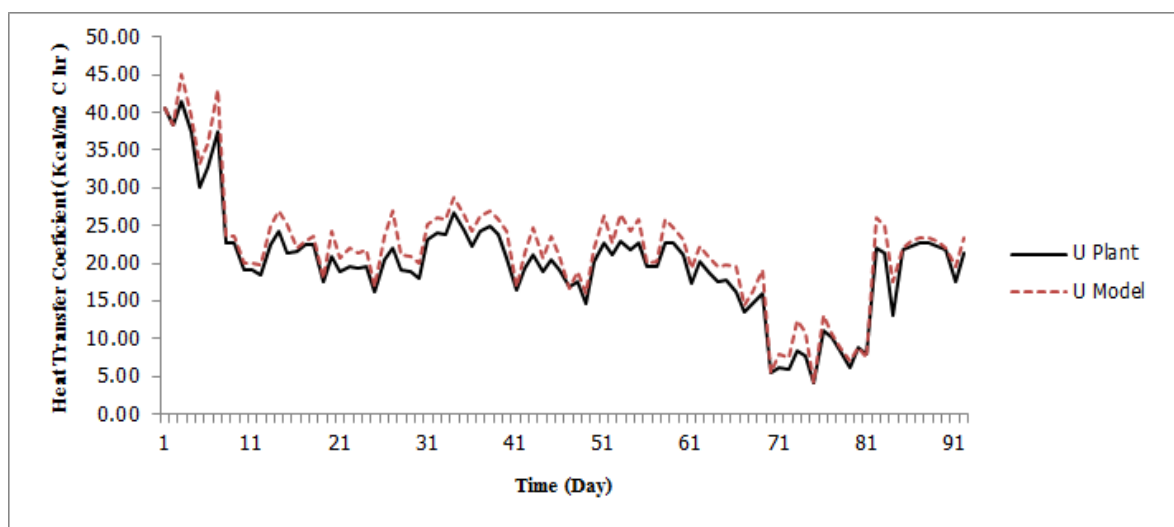
5.2.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A

เมื่อทำการสอบทานความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับอัตราการก่อตัวของตะกรันให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตจริง พบว่าอัตราการก่อตัวของตะกรันของสายผลิตภัณฑ์โพลีโพรพิลีนมีรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 อัตราการก่อตัวของตะกรันจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204A

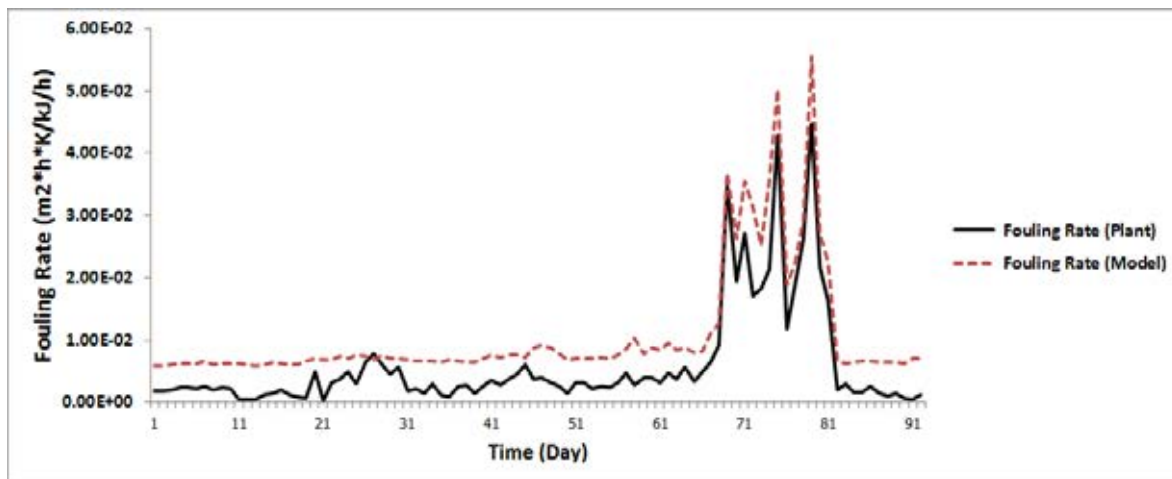
เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 ทำการสอบทานความถูกต้องจากผลการทดลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่ได้จากแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตจริง โดยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204A

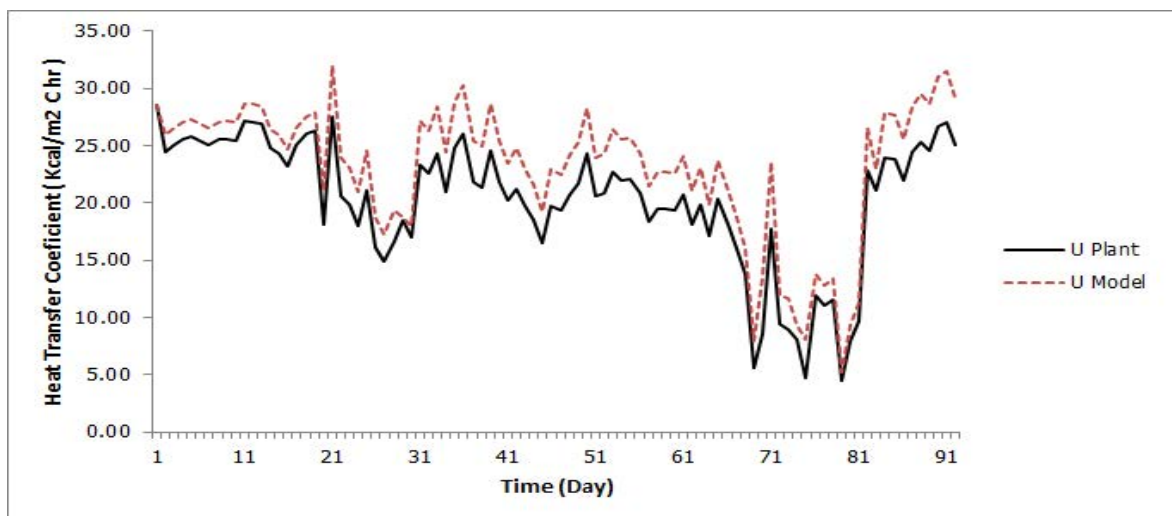
5.2.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B

เมื่อทำการสอบทานความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับอัตราการก่อตัวของตะกรันให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตจริง พบว่าอัตราการก่อตัวของตะกรันของสายผลิตภัณฑ์โพลีโพรพิลีนมีรูปแบบอัตราการก่อตัวของตะกรันแสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 อัตราการก่อตัวของตะกรันจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204B

เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลโดยใช้ข้อมูลชุดที่ 2 ทำการสอบทานความถูกต้องจากผลการทดลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่ได้จากแบบจำลองให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตจริง โดยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แสดงดังรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลชุดที่ 2 E-204B

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากข้อมูลชุดที่ 2 ค่าจากโรงงานจริงกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ Nasr Model ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B ที่ค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ ต่างกัน

Heat exchanger	Parameter			RMSE	
	α	β	γ	dR_f/dt	U
E-204A	300	-1.79	9.60×10^{-7}	1.41×10^{-1}	17.11
E-204B	689.7	-1.75	1.06×10^{-7}	9.58×10^{-2}	34.58

จากผลการทดลองการสร้างแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A, E-204B นั้น ผลที่ได้แสดงดังกราฟ สอบทานข้อมูลโดยการเปรียบเทียบข้อมูลอัตราการก่อตัวของตะกรันและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโรงงาน (ข้อมูลชุดที่ 2) ในระยะดำเนินการต่อเนื่อง 91 วัน พบว่าลักษณะของเส้นกราฟทั้ง 2 เส้นคือ actual, model มีลักษณะเพิ่มและลดลงไปในทิศทางเดียวกันและลักษณะของกราฟมีระยะห่างของช่องว่างระหว่างกราฟ 2 เส้นน้อยมากอีกทั้งค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสอง (RMSE) มีค่าน้อย ลักษณะกราฟที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองอัตราการเกิดตะกรันและค่าพารามิเตอร์ α , β และ γ มีความเหมาะสมกับกระบวนการจากโรงงานจริงและสามารถนำไปใช้ในการทำนายอัตราการเกิดตะกรันของกระบวนการจริงจากโรงงานได้อย่างเหมาะสม

จากผลการจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันของขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำการศึกษาพบว่า รูปแบบของการเกิดตะกรันเป็นแบบก้าวหน้า คือตะกรันจะค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปในช่วงหนึ่งตะกรันจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ลักษณะที่แตกต่างกันของการยึดเกาะของตะกรันคือ การหลุดตัวของตะกรันออกจากพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน การหลุดของตะกรันเกิดเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตะกรันด้วยกันเองหรือตะกรันกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าแรงตึงผิวของของไหล ก่อให้เกิดการละลายกลับไปยังของไหลและปัจจัยที่ผลต่อทำให้อัตราการก่อตัวของตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับข้อมูลจากโรงงานอธิบายได้ดังนี้

- องค์ประกอบของโพลีโพรพิลีน เนื่องจากโพลีโพรพิลีน ที่ส่งผ่านเข้าข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องนั้น ส่วนมีองค์ประกอบที่อยู่ในสายป้อนหลากหลายชนิดและสัดส่วนองค์ประกอบนั้น ๆ มากน้อยแตกต่างกันไป โดยองค์ประกอบเหล่านั้นสามารถเกิดการพดพาทดค้าง และสะสมเกิดเป็นตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- ในของไหลมีค่าความเข้มข้นของสารที่เป็นตะกรันอยู่สูง ปริมาณของสารที่ไหลผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่อง ซึ่งหากสารมีความเข้มข้นที่เป็นตะกรันมาก อาจส่งผลให้ปริมาณตะกรันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
- องค์ประกอบที่ทำให้เกิดตะกรัน สามารถเกิดตะกรันได้ที่สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน หรือเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของสารบางตัวเมื่อไปรวมเข้ากับสารประกอบตัวอื่น ๆ ก็อาจสามารถเกิดปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นตะกรันที่สภาวะอุณหภูมิแตกต่างไปจากเดิมได้เช่นกัน
- ระยะเวลาที่ใช้จนสามารถทำให้เกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Resident time) องค์ประกอบของสารบางตัวอาจต้องใช้เวลานานในการเกิดตะกรัน หรือบางสารอาจใช้เวลาเพียงไม่นานก็สามารถเกิดการสะสมของตะกรันได้
- อัตราการเกาะของตะกรันเนื่องจากแรงเฉือนกระทำของสารป้อน (Shear force) เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีต่อความแตกต่างของรูปแบบการเกิดตะกรันในข่างานแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งหากการเกาะตัวของตะกรันมีลักษณะยึดเกาะแบบหลวม ๆ จนไม่สามารถเอาชนะแรงเฉือนของสารป้อนที่ส่งผ่านเข้ามาข่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ก็มีผลทำให้ตะกรันเหล่านั้นหลุดหายไป
- ตัวเร่งอัตราการเกิดตะกรัน เช่น วัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบการเกิดตะกรันบางตัว สามารถเกิดตะกรันได้ดีที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ดังนั้นองค์ประกอบเหล่านี้จึงมีผลทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดการกัดกร่อน เกิดการอุดตัน สิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดตะกรันขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งมีผลทำให้ลักษณะการเกิดตะกรันแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้จากข่างานที่ยกนำมาศึกษานั้น อาศัยกลไกการเกิดตะกรันที่ต่างกันออกไปด้วย โดยตะกรันที่เกิดขึ้นสามารถเกิดรวมกันได้หลาย ๆ แบบ หรือในบางครั้งการเกิดตะกรันชนิดหนึ่ง สามารถจะใช้ส่งเสริมให้อัตราการเกิดตะกรันอีกชนิดหนึ่งเกิดได้เร็วขึ้นเป็นต้น จากข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิต โพลีโพรพิลีน สามารถระบุลักษณะการเกิดตะกรันได้เป็น ตะกรันจากการตกตะกอน (Particulate Fouling or Sedimentation Fouling) ตะกรันที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เกิดจากของไหลมีอนุภาคแขวนลอยอยู่มาก

จากการจำลองเลียนแบบกระบวนการจริงของกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204A มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดรองลงไปให้แก่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E-204B ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนที่ลดลงแปรผกผันกับอัตราการก่อตัวของตะกรันอันเนื่องมาจากค่าความเร็วของโพลีโพรพิลีน ที่ต่ำทำให้มีแนวโน้มของการเกิดตะกรันที่สูง และจากผลการจำลองเลียนแบบกระบวนการ สาเหตุที่ค่าของอัตราการก่อตัวของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางเครื่อง ไม่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องมาจากแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน

สำหรับการศึกษาและสร้างแบบจำลองทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันในขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและดูผลการเปลี่ยนแปลงของอัตราการก่อตัวตะกรันและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสายโพลีโพรพิลีน เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจ วางแผนปรับปรุง ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และควบคุมการดำเนินงานในกระบวนการผลิตต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างแบบจำลองทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรัน และผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 2 เครื่อง ในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนในโรงงานอุตสาหกรรมและพัฒนาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งต้องพิจารณาหาค่าพารามิเตอร์ (α , β และ λ) ที่เหมาะสมกับกระบวนการดำเนินงานจริง ทั้งนี้เพื่อนำไปปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลอง และสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดตะกรันได้แม่นยำกับกระบวนการผลิตจริงมากที่สุด อีกทั้งสามารถทำนายอัตราการเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนที่นำมาศึกษาได้

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยนำข้อมูลอัตราการก่อตัวของตะกรันของสายผลิตภัณฑ์โพลีโพรพิลีน ที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 เครื่อง ในข่างานมาเปรียบเทียบกับค่าอัตราการก่อตัวตะกรันที่ได้จากการจำลอง อีกทั้งมีการสอบทานย้อนกลับโดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของข้อมูลจากกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน จากโรงงานจริงกับแบบจำลอง ทั้งนี้ในการจำลองต้องผ่านกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ (α , β และ λ) ด้วยวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search)

จากการศึกษาการเกิดตะกรันและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีน ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันของสายโพลีโพรพิลีน ทำให้สามารถทำนายค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสามารถนำข้อมูลที่ได้มาช่วยกำหนดช่วงเวลาการล้างทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม เพื่อลดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ลดการสูญเสียพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และค่าใช้จ่ายในการล้างทำความสะอาด

ทั้งนี้สามารถนำรูปแบบสมการจำลองทำนายค่าอัตราการก่อตัวของตะกรันของสายโพลีโพรพิลีนไปใช้กับกระบวนการผลิตจริงเพื่อคาดการณ์ล่วงหน้าสำหรับล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม และควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมจริง

6.1 ข้อเสนอแนะ

สำหรับแบบจำลองอัตราการก่อตัวของตะกรันที่ใช้ในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิตโพลีโพรพิลีนที่ถูกสร้างขึ้นนั้น ใช้สำหรับทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรันและศึกษาการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตจริง หากต้องการผลของแบบจำลองที่ถูกต้องหรือมีความใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุดนั้น ควรคำนึงถึงคุณสมบัติของสารเคมี (chemical properties) ร่วมด้วยเช่น composition ของสารเปลี่ยนเมื่อเปลี่ยน grade ในกระบวนการผลิต ซึ่งในแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ได้พิจารณาปัจจัยดังกล่าวเป็นค่าคงที่

รายการอ้างอิง

- [1] W.A. Ebert, C.B. Panchal. Analysis of Exxon crude slip stream coking data, in: C.B. Panchal, et al. (Eds.), Fouling Mitigation of Industrial Heat-Exchange Equipment, Begell House (1997) : 451–460.
- [2] C.B. Panchal, W.C. Kuru, C.F. Liao and W.A. Ebert. Threshold conditions of crude oil fouling, in : Proceedings of Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation, Barga, Italy (May 1997) : 11–16.
- [3] G.T. Polley, D.I. Wilson, B.L. Yeap, S.J. Pugh. Evaluation of laboratory crude oil threshold fouling data for application to refinery preheat trains Applied Thermal Engineering 22 (2002) : 777–788.
- [4] J.G. Knudsen, L. Dahcheng, W.A. Ebert. The determination of the threshold fouling curve for a crude oil, in : T.R. Bott et al. (Eds.), Understanding Heat Exchanger Fouling and its Mitigation, Begell House, New York (1999) : 265–272.
- [5] Z. Saleh, R. Sheikholeslami, A.P. Watkinson. Heat exchanger fouling by a light Australian crude oil, in : Heat Exchanger Fouling and Cleaning Fundamentals and Applications. Santa Fe, New Mexico, USA : 2003.
- [6] M.R.J. Nasr, M.M. Givi. Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units Applied Thermal Engineering 26 (2006) : 1572–1577.
- [7] Z. Saleh, R. Sheikholeslami, A.P. Watkinson. Fouling characteristics of a light Australian crude oil, ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning : Fundamentals and Applications. Santa Fe, New Mexico, USA : 2003.
- [8] K.S. Anwar, M.Z. Syed, M. Younas and M.O. Budair. A risk base heat exchanger analysis subject to fouling part II. Economics of heat exchanger cleaning. Energy fuel 25 (2000) : 445-461.

- [9] J. Aminian and S. Shahhosseini. Evaluation of ANN modeling for prediction of crude oil fouling behavior. Applied Thermal Engineering 28 (2008) : 668-674.
- [10] J. Aminian and S. Shahhosseini. Neuro-based formulation to predict fouling threshold in crude preheater. International Communication in Heat and Mass Transfer 36 (2009) : 525-531.
- [11] H. Javier, J. Miguel and Lavaja. On a new model for the planning of heat exchanger network Cleaning. Oklahoma University (2004) : 3924-3938.
- [12] M.R.J. Nasr, M.M. Givi. Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units. Applied Thermal Engineering 26 (2006) : 1572-1577.
- [13] G.T. Polley, D.I. Wilson, B.L. Yeap, and S.J. Pugh. Use of crude oil fouling threshold data in heat exchanger Design. Applied Thermal Engineering 22 (2002) : 763-776.
- [14] T. Prapitpan. 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.
- [15] V.R. Radhakrishnan, M. Ramasamy, H. Zabiri, V. Do Thanh, N.M. Tahir, H. Mukhtar, M.R. Hamid, N. Ramli. Heat exchanger fouling model and preventive maintenance scheduling tool Applied Thermal Engineering 27 (2007) : 2791-2802.
- [16] พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : ส.เอเชียเพรส, 2542.
- [17] วราภรณ์ ศรีสุขเจริญปัญญา. การศึกษาการเกิดฟาวลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของข่่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการอุ่นน้ำมันดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ตารางที่ ก-1 ค่าคงที่ต่างๆ

คุณสมบัติ	ค่าคงที่
Universal gas constant (kJ/kg mol K)	8.314
Activation Energy (kJ/mol)	22.61
The overall heat transfer coefficient of water (W/m ² K)	850-1700
Plate heat exchanger design fouling factor (total)	0.0001 to 0.0002
Density of water @ T=40 °C (kg/m ³)	992
Density of propylene @ T=40 °C (kg/m ³)	486
SG of cooling water	0.995
SG of propylene	0.516
Cp of cooling water (kcal/kg °C)	1.000
Cp of propylene (kcal/kg °C)	0.396
Viscosity of propylene (kg/m s)	0.000011
Viscosity of cooling water (kg/m s)	0.000656

ตารางที่ ก-2 Operating Condition of stream in 4th reactor

Process Description	Temp °C	Pressure kg/cm ²	Flow rate	Component
<u>Input</u>				
1. Powder from 3 rd reactor	80	17	13,000-17,000 kg/hr	6%Propane, 94%C ₃
2. Gas Recycle & N ₂	125	20	1,400-2,000 nm ³ /hr	25%C ₂ ,65%C ₃ ,10%Propane
3. Hydrogen	–	22	0-2.3 nm ³ /hr	100% H ₂
4. Gas Ethylene	–	22	1,000-1,350 nm ³ /hr	100% C ₂
5. Gas Propylene	–	20-22	150-1,100 nm ³ /hr	100% C ₃
6. Gas recycle in reactor	50-60	15	15,000 nm ³ /hr	25%C ₂ ,65%C ₃ ,10%Propane
7. Cooling water to E-204A	30	6	250-600 t/hr	100% water
8. Cooling water to E-204B	30	6	100-350 t/hr	100% water
<u>Output</u>				
9. Powder to drying section	70	12	15,000-19,500 kg/hr	25%C ₂ ,65%C ₃ ,10%Propane

ตารางที่ ก-3 Operating Condition of reactor in Polymerization section

Process Description	D-204
Temperature (°C)	70
Pressure (kg/cm²)	11.5-12.5
Level (%)	38-55
Production rate (kg/hr)	1,600-2,600
%H₂/C₂+C₃ (%mol)	1-2
%C₂/C₂+C₃ (%mol)	28-29
Gas Component (%mol)	
-Hydrogen	1.5-2.4
-Methane	0
-Ethylene	19-26
-Ethane	0.4-1.2
-Propylene	50-60
-Propane	6-17
-Nitrogen	4-10

ตารางที่ ก-4 Operating condition design data for E-204A

Item	Data
Surface area (m ²)	681
Flow rate of cooling water shell side (Kg/Hr)	348,320
Temperature inlet/outlet shell side (°C)	90
Flow rate of propylene tube side (Kg/Hr)	240,456
Temperature inlet tube side (°C)	150
Temperature outlet tube side (°C)	100
Q, (M kcal/hr)	4.76
DT _{LMTD} (°C)	27.90
U (Kcal/m ² °C hr)	250.53

ตารางที่ ก-5 Operating condition design data for E-204B

Item	Data
Surface area (m ²)	409
Flow rate of cooling water shell side (Kg/Hr)	350,000
Temperature inlet shell side (°C)	80
Temperature outlet shell side (°C)	100
Flow rate of propylene tube side (Kg/Hr)	380,800
Temperature inlet tube side (°C)	150
Temperature outlet tube side (°C)	110
Q, (M kcal/hr)	6.032
DT _{LMTD} (°C)	39.152
U (Kcal/m ² °C hr)	376.680

ภาคผนวก ข

วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search)

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ระบบนั้น เป็นวิธีที่สำคัญอย่างหนึ่งในการดำเนินงานวิจัย แบบจำลองที่ได้อาจมีคำตอบหรือทางเลือกที่เป็นไปได้จำนวนมาก วิธีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมและแม่นยำนั้น ไม่สามารถจะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากเทคนิคที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินผลลัพธ์สำหรับการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมเท่านั้น

ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมกับระบบนั้น จำเป็นต้องมีขั้นตอนการหาคำตอบที่ดีและเหมาะสมที่สุด โดยตัวแปรที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดให้กับระบบคือ ตัวแปรขาเข้า (Input) ซึ่งถูกใช้เป็นตัวชี้วัดถึงความเหมาะสมของระบบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดของระบบนั้น จะนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลร่วมกับผลที่ได้จากการประเมินในครั้งที่ผ่านมา โดยทำการเลือกชุดข้อมูลขาเข้าของตัวแปรชุดใหม่สำหรับป้อนเข้าระบบของแบบจำลองอีกครั้ง โดยกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดจะดำเนิน ไปจนกระทั่งระบบบรรลุเงื่อนไขของการหยุดหาคำตอบ ด้วยเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งเป็นต้นว่าได้ผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เบื้องต้นหรือบรรลุตามเงื่อนไขของระยะเวลาที่กำหนด

ปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคใหม่ ๆ เข้ามาช่วยในการค้นหาคำตอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิคในการค้นหา (Search methodologies) ซึ่งปัจจุบันสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปเทคนิคในการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดีและเหมาะสมที่สุด (Simulation optimization) มักถูกนำไปใช้สำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนและข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ เพื่อใช้คำนวณหาค่าของชุดตัวแปร เพื่อให้ได้ค่าผลลัพธ์ของระบบตามที่ต้องการ เทคนิคนี้จะนำไปใช้ สำหรับควบคุมกระบวนการ (Process control optimization) และการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering design optimization)

เทคนิคที่ใช้ในการหาคำตอบในกรณีที่มีปัญหามีหลายคำตอบที่อาจเป็นไปได้ ซึ่งไม่สามารถที่จะประเมินผลในทุก ๆ คำตอบได้ จึงใช้เทคนิคที่ว่า วิธีค้นหาคำตอบ (Search method) แบบต่างๆเข้ามาช่วยในการทำออปติไมซ์เซชันด้วย

เทคนิคการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) สามารถนำไปใช้กับการทำออปติไมซ์เซชันของปัญหาที่เซตคำตอบที่เป็นไปได้มีขนาดใหญ่มาก และเป็นไปได้ที่คำตอบทุกๆคำตอบในเซต ดังนั้นเทคนิคกลุ่มนี้จึงมีขั้นตอนที่นำเข้ามาช่วยพิจารณาในกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ คำตอบใดควรที่จะนำไปประเมินผลด้วยการจำลองสถานการณ์ ส่วนใหญ่ในขั้นตอนนี้จะอาศัยวิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการที่ละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน ซึ่งคาดว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น กระบวนการเหล่านี้สามารถจำแนกขั้นตอนได้ดังนี้

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 $\Theta^{(k+1)} = \Theta^{(C)}$ แต่ถ้าไม่เป็นเช่นนั้นให้กำหนดค่า $\Theta^{(k+1)} = \Theta^{(k)}$

ขั้นตอนที่ 3 ถ้ากระบวนการค้นหาคำตอบ (Search method) บรรลุตามเงื่อนไขของการหยุดการค้นหา (stopping criterion) ให้หยุดกระบวนการค้นหาคำตอบและถือว่าคำตอบที่ดีที่สุดคือ $\Theta^{(k)}$ ถ้าไม่เช่นนั้นให้กำหนด $k = k+1$ แล้วย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง

สำหรับงานวิจัยที่ใช้วิธีการค้นหาแบบสุ่ม (Random search) จะได้รับการตีพิมพ์อย่างหลากหลายและมีความแตกต่างกันอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากวิธีการในการระบุของจุดคำตอบใกล้เคียงที่อยู่ในขอบเขตการเคลื่อนที่ของการค้นหา (neighbourhood solution) วิธีการที่ใช้ในการยอมรับ (candidate selection method) ว่าผลการประเมินที่ได้จากการจำลองสถานการณ์มีการปรับปรุงที่ดีขึ้น (acceptance criterion) และเงื่อนไขที่ใช้เพื่อหยุดการค้นหา (stopping criterion)

วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้มากในปัจจุบันนี้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนมากและสามารถหาคำตอบได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตามวิธีการค้นหาคำตอบยังมีอุปสรรคคือเรื่องเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบค่อนข้างใช้ระยะเวลาานาน ถึงแม้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะได้รับการพัฒนาให้สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วก็ตาม เทคนิคที่ใช้หาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ถูกต้องและเหมาะสมที่สุดนั้น จะใช้หลักการเดียวกันคือ การใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์เพื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยความแตกต่างระหว่างเทคนิคมักเกิดขึ้นจากความแตกต่างของวิธีการที่ใช้เพื่อการหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งหากต้องการนำเทคนิคนี้ไปใช้งานยังมีความจำเป็นที่ต้องให้ความสำคัญกับขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง ส่วนในขั้นตอนของการหาคำตอบที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา หรือตัวแปรที่ต้องการให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

ภาคผนวก ก

การประชุมวิชาการ

วรรณทิพา โอภาปัญญาโชติ และ สุรเทพ เขียวหอม. การสร้างแบบจำลองการก่อดั้วของ ตะกรันสำหรับข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิต โพลีโพรพิลีน. การประชุม วิชาการและเสนอผลงานวิจัยสร้างสรรค์ระดับชาติและนานาชาติ ศิลปากรวิจัยและสร้างสรรค์ ครั้งที่ 6 : บูรณาการศาสตร์และศิลป์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, จังหวัดนครปฐม, ประเทศไทย, 16-18 มกราคม 2555

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรณทิพา โอภาปัญญาโชติ เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2527 อำเภอเมือง จังหวัดระยอง เข้าศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนระยองวิทยาคม จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคนอกเวลาราชการ ในปีการศึกษา 2553 ปัจจุบันทำงานที่บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่งวิศวกร