

การศึกษาการเกิดฟาวลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยน
ความร้อนในการอุ่นน้ำมันดิบ

นางสาว วราภรณ์ ศรีสุขเจริญปัญญา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STUDY OF FOULING FORMATION AND IMPACT ON THERMAL PERFORMANCE OF
HEAT EXCHANGER NETWORK IN PREHEATING CRUDE OIL



Miss Waraporn Srisukcharoenpanya

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการเกิดฟาวลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะทาง
ความร้อนของข่ായงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการ
อุ่นน้ำมันดิบ

โดย

นางสาววราภรณ์ ศรีสุขเจริญปัญญา


สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. กษิตศ หนูทอง)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์)

วารสารศรี ศรีสุขเจริญปัญญา: การศึกษาการเกิดฟาวลิงและผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการอุ่นน้ำมันดิบ. (STUDY OF FOULING FORMATION AND IMPACT ON THERMAL PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGER NETWORK IN PREHEATING CRUDE OIL) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. สุรเทพ เขียวหอม, 157 หน้า.

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อให้ น้ำมันดิบ มีอุณหภูมิสูงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นที่จะใช้สำหรับการกลั่น ปัญหาที่พบคือเมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะหนึ่งฟาวลิงจะเกิดการสะสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน และทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายร้อนและสายเย็นลดลง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดฟาวลิง และผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 ตัวที่ต่อเนื่องกัน โดยใช้แบบจำลองการเกิดฟาวลิงแบบเชิงเส้น แบบกฏยกกำลัง แบบอัตราลดลง และแบบมีเส้นแนวโน้ม เพื่อเทียบกับรูปแบบการเกิดฟาวลิงจริงในกระบวนการ พบว่าส่วนใหญ่ที่ 42 เปอร์เซ็นต์ข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีพฤติกรรมการเกิดฟาวลิงเป็นแบบอัตราลดลง นอกจากนี้ยังได้พัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน จนกระทั่งทำให้ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำมันดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการหลัก พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ระบบข่างานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุดเมื่อปริมาณฟาวลิงเพิ่มสูงขึ้นคือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 โดยสูญเสียพลังงานความร้อนเท่ากับ 9.30×10^7 กิโลวัตต์ และ 5.48×10^8 กิโลวัตต์ ตามลำดับที่เวลาดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....^๑ศรีสุขเจริญปัญญา.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....^๑.....
 ปีการศึกษา...2553.....

5171457321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FOULING/ THERMAL EFFECT / HEAT EXCHANGER NETWORK

WARAPORN SRISUKCHAROENPANYA: STUDY OF FOULING FORMATION AND IMPACT ON THERMAL PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGER NETWORK IN PREHEATING CRUDE OIL. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, Ph. D., 157 pp.

Heat exchangers are widely used in the oil refining industry to preheat crude oil to the temperature suitable for the refining process. After operating the heat exchanger for a certain period of time, fouling will start to accumulate on its surface. As a result, the efficiency of heat transfer in cold tube and hot tube decreases substantially.

This research is conducted to study fouling formation and the effect on the thermal performance of 19 heat exchangers network by using linear fouling model, power-law fouling model, falling-rate fouling model and asymptotic fouling model in order to compare the result with that of actual fouling which occurs in the process. The results obtained shows that 42 percent of heat exchanger network obey the falling-rate fouling model. Additionally, this research has developed the fouling model that illustrates the effect of fouling on the thermal performance which causes the loss of heat used to increase the temperature of crude oil before entering the subsequent main process. The finding indicates that heat exchanger which causes network to lose the heat at the maximum level when the fouling increases are heat exchanger E3 and E2. The loss of heat is 9.30×10^7 kW and 5.48×10^8 kW in 600 consecutive days.

Department : Chemical Engineering

Student's Signature Waraporn Srisukcharoenpanya

Field of Study : Chemical Engineering

Advisor's Signature Soorathep Kheawhom

Academic Year : ..2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ต้องขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความรู้ ความกรุณา ความช่วยเหลือ และคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแนวทางการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. กษิติศ หนูทอง กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพล เกียรติกิตติพงษ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ข้อคิดคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นแหล่งให้ศึกษา วิชาความรู้ ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ เชื้อเพื่อเอกสาร และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานให้แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อนๆ พี่ๆ วิศวกรรมเคมีทุกท่าน ที่ให้ทั้งคำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติ พี่ น้อง ทุกคนที่ให้ความรัก กำลังใจ และการสนับสนุนในการศึกษามาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
3.1 กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ.....	8
3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	9
3.3 ฟาวลิ่งแฟกเตอร์.....	11
3.4 การถ่ายเทความร้อน.....	14
3.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
3.6 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม.....	24
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	28
4.1 การศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิ่งที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน.....	28
4.2 การพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิ่งที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และ การเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ.....	47

	หน้า
บทที่ 5 ผลการดำเนินการวิจัย.....	52
5.1 ผลการศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับข่างานเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน.....	52
5.2 ผลการพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ.....	116
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	141
รายการอ้างอิง.....	145
ภาคผนวก.....	147
ภาคผนวก ก: คุณสมบัติของน้ำมันดิบ.....	148
ภาคผนวก ข: การทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	151
ภาคผนวก ค: การประชุมทางวิชาการ.....	156
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	157


 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.19	เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อน E19.....	108
ตารางที่ 5.20	แสดงผลจากการจำลองรูปแบบการเกิดฟาวลิงเทียบระหว่างกับข้อมูล อุณหภูมิขาออกน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานกับค่าที่ได้จากการจำลอง.....	111
ตารางที่ 5.21	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองที่ค่าซึ่งขึ้นกับ ส่วนประกอบสายร้อนและสายเย็นคงที่.....	132
ตารางที่ 5.22	แสดงผลจากการจำลองค่าพลังงานที่ต้องสูญเสียในระบบ กรณีที่ กำหนดให้ลดค่าคงเวลาการเกิดฟาวลิง 10 เปอร์เซ็นต์.....	133
ตารางที่ 5.23	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองที่ค่าเวลาการเกิด ฟาวลิงคงที่.....	136
ตารางที่ 5.24	แสดงผลจากการจำลองค่าพลังงานที่ต้องสูญเสียในระบบ กรณีที่ กำหนดให้เพิ่มค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบสายร้อนสายเย็น 10 เปอร์เซ็นต์..	137

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 3.1	แผนภาพถ่ายภาพงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ... 9
ภาพที่ 3.2	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซชล์และท่อ..... 10
ภาพที่ 3.3	แสดงทิศทางการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซชล์และท่อ..... 10
ภาพที่ 3.4	การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสองกลับ..... 11
ภาพที่ 3.5	การเกิดฟาวลิงบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซชล์และท่อ..... 12
ภาพที่ 3.6	ลักษณะการถ่ายเทอุณหภูมิ (ก) ไหลแบบขนาน (ข) ไหลแบบสวนทาง..... 16
ภาพที่ 3.7	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม..... 18
ภาพที่ 3.8	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 19
ภาพที่ 3.9	แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย..... 21
ภาพที่ 3.10	แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1.. 22
ภาพที่ 4.1	แผนภาพแสดงถ่ายภาพงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 29
ภาพที่ 4.2	อุณหภูมิสายเย็นขาเข้าของถ่ายภาพงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E1-E19)... 37
ภาพที่ 4.3	อุณหภูมิสายร้อนขาเข้าของถ่ายภาพงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E1-E19)... 38
ภาพที่ 4.4	แผนภาพกระบวนการหลัก 3 กระบวนการในถ่ายภาพงานแลกเปลี่ยนความร้อน.. 48
ภาพที่ 5.1	กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E1 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง..... 53
ภาพที่ 5.2	กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E2 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง..... 56
ภาพที่ 5.3	กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E3 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง..... 58
ภาพที่ 5.4	กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E4 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง..... 61
ภาพที่ 5.5	กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E5 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง..... 64
ภาพที่ 5.6	กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E6 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง..... 67
ภาพที่ 5.7	กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน E7 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง..... 70

	หน้า
ภาพที่ 5.22 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียในข่างาน เมื่อเพิ่มค่าที่ซึ่งขึ้นกับ ส่วนประกอบของสัรร้อนและสายเย็นขึ้น 10 เปอร์เซนต์.....	138
ภาพที่ 5.23 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียในข่างาน เมื่อเพิ่มค่าที่ซึ่งขึ้นกับ ส่วนประกอบของสัรร้อนและสายเย็นขึ้นทุกๆ 1 เปอร์เซนต์.....	139



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	m^2
$C_{p,c}$	ค่าความจุความร้อนของสายเย็น	$kJ/kg^\circ C$
$C_{p,h}$	ค่าความจุความร้อนของสายร้อน	$kJ/kg^\circ C$
F_c	อัตราการไหลของสายเย็น	kg/s
F_h	อัตราการไหลของสายร้อน	kg/s
h_i	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายใน	$W/m^2^\circ C$
h_o	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก	$W/m^2^\circ C$
\dot{m}	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
n	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น	-
Q	การถ่ายเทความร้อน	kW
$R_{f,c}$	ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่ง	$m^2^\circ C/W$
$R_{f(t)}$	ค่าการเกิดฟาวลิ่งที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	$m^2^\circ C/W$
t	เวลา	day
$t_{p,c}$	ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง	day
$T_{c,in}$	อุณหภูมิสายเย็นขาเข้า	$^\circ C$
$T_{c,out}$	อุณหภูมิสายเย็นขาออก	$^\circ C$
$T_{h,in}$	อุณหภูมิสายร้อนขาเข้า	$^\circ C$
$T_{h,out}$	อุณหภูมิสายร้อนขาออก	$^\circ C$
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2^\circ C$
U_c	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เริ่มต้น	$W/m^2^\circ C$
$U_{(t)}$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	$W/m^2^\circ C$
ΔT	ค่าต่างอุณหภูมิ	$^\circ C$
ΔT_{lm}	ค่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม	$^\circ C$

คำอธิบายคำย่อ

ตัวแปร	ความหมาย	หน่วย
N	จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด	-
$predict$	ค่าที่ได้จากข้อมูลโรงงาน	-
obs	ค่าที่ได้จากการจำลอง	-
$RMSE$	ค่าความคลาดเคลื่อนผลต่างกำลังสอง	-



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (Oil Refinery) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของผสมของสารประกอบที่อยู่ในน้ำมันดิบเพื่อให้ได้น้ำมันผลิตภัณฑ์ตามคุณสมบัติที่ต้องการ โดยน้ำมันดิบที่เข้ากระบวนการกลั่นนี้เองจะต้องผ่านเข้ากระบวนการเพิ่มความร้อน (Crude preheat train) หรือกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อให้มีอุณหภูมิสูงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นที่จะใช้สำหรับการกลั่นตามข้อกำหนดสภาวะการดำเนินการที่ออกแบบไว้ โดยนำน้ำมันดิบผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ซึ่งใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างผลิตภัณฑ์น้ำมันที่กลั่นได้จากหอกลั่นกับน้ำมันดิบที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิก่อนป้อนเข้าสู่หอกลั่นต่อไป

เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการใช้งานอยู่ตลอดเวลา ระยะเวลาการทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ปัญหาสำคัญที่พบคือการเกิดฟาวลิง (Fouling) ฟาวลิงที่เกิดขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เกิดการสูญเสียพลังงานและส่งผลทำให้อัตราการผลิตลดลง ดังนั้นเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพคงเดิมจำเป็นต้องทำการกำจัดฟาวลิงด้วยวิธีการล้าง ซึ่งการล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องหยุดการทำงานของระบบ ทว่าหากล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบ่อยเกินไป ส่งผลให้ต้องสูญเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งสูญเสียโอกาสในการผลิตอีกด้วย ดังนั้นหากสามารถทราบแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์ตามระยะเวลาภายใต้สภาวะที่มีฟาวลิง จะสามารถนำมาทำนายช่วงเวลาการล้างทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมได้ เพื่อลดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ลดการสูญเสียพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ค่าใช้จ่ายในการล้างทำความสะอาด

การศึกษากการเกิดฟาวลิงและสมรรถนะทางความร้อน (Thermal performance) ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ช่วยให้สามารถจำลองและติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการถ่ายเทความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบหลังการแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถทำนายระยะเวลาดำเนินการที่เหมาะสม และทำนายปริมาณพลังงานที่สูญเสียจากข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้สภาวะการเกิดฟาวลิงที่เวลาเปลี่ยนไปในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดฟาวลิ่ง และประสิทธิภาพทางความร้อน ข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เปลี่ยนไปตามเวลา
2. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การเกิดฟาวลิ่ง และผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. นำข้อมูลการแลกเปลี่ยนความร้อน ของข่ายงานกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB (Building Model)
2. ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากข้อมูลโรงงานจริงกับค่าที่ได้จากผลการจำลอง โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น (Assess the model)
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายปริมาณพลังงานที่สูญเสียจากข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้สภาวะการเกิดฟาวลิ่งที่เวลาเปลี่ยนไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำการวิจัยนี้คือ

1. สามารถจำลองสถานการณ์ (Simulation) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาการเกิดฟาวลิ่งในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการเกิดฟาวลิ่ง และประสิทธิภาพทางความร้อนของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ
3. นำไปใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐาน เพื่อใช้สำหรับพัฒนาข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อน และใช้จำลองระบบ

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี และบทความวิจัยที่ผ่านมาเรื่องกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell and tube exchanger) รูปแบบอัตราการเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. ศึกษากระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheat train) จากโรงงาน และนำข้อมูลที่เป็นในการนำมาใช้สำหรับสร้าง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้สำหรับศึกษาการเกิดฟาวลิงของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบที่เลือกนำมาวิจัย และเขียนโปรแกรมแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB
4. ทำการจำลอง (Simulation) เพื่อเลียนแบบกระบวนการ วิเคราะห์ และเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง
5. พัฒนา และปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)
6. นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพข่างานการแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheat train)
7. สรุป และวิจารณ์ผลการทำการวิจัย
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

เนื้อหาของงานวิจัยนี้แบ่งออกได้เป็น 6 บท ประกอบด้วย

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากทำงานวิจัย และขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงบทความวิจัยที่ผ่านมาในหัวข้อที่เกี่ยวกับ อัตราการเกิดฟาวลิงบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ การแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบจำลอง การเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 3 อธิบายทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ การถ่ายเทความร้อน อัตราการเกิดฟาวลิง และรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิง บนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 4 อธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัย และอภิปรายผลการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 6 สรุปผลการทำการวิจัย และข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ จำเป็นต้องผ่านการเพิ่มความร้อนให้กับน้ำมันดิบ (Crude Preheat train) ซึ่งมักนิยมให้ความร้อนโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์ และท่อ (Shell and tube exchanger) Joana L. และคณะ (2009) ศึกษาเกี่ยวกับการทำน้ำมันดิบ (Petroleum) ให้บริสุทธิ์ด้วยการกลั่นซึ่งในกระบวนการดังกล่าวจะใช้พลังงานสูงมาก ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยการนำกลับพลังงานโดยนำกระบวนการให้ความร้อนเบื้องต้น (Preheat) มาใช้ในระบบซึ่งจะทำให้การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันเป็นไปได้เร็วขึ้นก่อนจะให้ความร้อนในกระบวนการถัดไป หลักการดังกล่าวจะช่วยให้อุณหภูมิของน้ำมันเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้นก่อนจะให้ความร้อนในกระบวนการถัดไป หลักการดังกล่าวจะช่วยให้อุณหภูมิของน้ำมันเป็นไปได้อย่างรวดเร็วขึ้นก่อนจะให้ความร้อนในกระบวนการถัดไป หากบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าวนี้มีฟาวลิงเกิดขึ้นจะส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย

การศึกษากการเกิดฟาวลิงและผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพทางความร้อนสำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบจำลองของอัตราการเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ผ่านมานั้น Smali F. และคณะ (1999) ศึกษาอัตราการเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร โดยทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นหลังจากที่มีการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบ่อยครั้ง ซึ่งทั้งนี้ในการทำความสะอาดแต่ละครั้งมักพบปัญหาในการวางแผนทำความสะอาดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิต ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีผลมากต่อการถ่ายเทความร้อนในระบบ ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ MINLP โดยนำแบบจำลองดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการอุ่นวัตถุดิบก่อนที่จะส่งเข้าผลิตน้ำตาลเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป ซึ่งอาศัยรูปแบบสมการอัตราการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model) ในการจำลอง

Anwar K. และคณะ (2000) ได้นำเสนอแบบจำลองสมการของการเกิดฟาวลิงบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เพื่อนำมาใช้เป็นรูปแบบลักษณะการเกิดฟาวลิงเฉพาะของกระบวนการโดยศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิสายร้อนขาออกและอุณหภูมิสายเย็นขาออก ทั้งนี้ได้วิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการเกิดฟาวลิงที่มีลักษณะเฉพาะทั้งหมด 4 รูปแบบคือ สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) และสมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปรเนนเชียล (Asymptotic fouling model) ทั้งนี้ได้ศึกษาแนวโน้มของการเกิดฟาวลิงที่เกิดขึ้น และเมื่อทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าตัว

แปรพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ของสมการทั้ง 4 รูปแบบสมการการเกิดฟาวลิง โดยใช้รูปแบบจากผลการจำลองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนกระบวนการผลิต ก่อนที่ฟาวลิงจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในเวลาต่อมา Anwar K. และคณะ (2000) ก็ได้ศึกษาเพิ่มต่อจากเดิมแต่เน้นมาที่ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวก โดยศึกษาช่วงระยะเวลาการทำความสะดวกที่เหมาะสม รวมทั้งเพื่อเสียค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนน้อยที่สุด (Economics) เพื่อใช้เป็นทางเลือกและแนวทางในการดำเนินการสำหรับกระบวนการผลิตต่อไป

Meriusz M. และคณะ (2004) ศึกษาช่ยงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้เน้นศึกษาค่าพลังงานที่สูญเสียไปในการดำเนินงาน โดยเปรียบเทียบกับการหยุดดำเนินงานของช่ยงานเพื่อทำความสะดวกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดการอุดตันของฟาวลิงในระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจำลองหาค่าออฟติไมซ์ผ่านการจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าตอบเพื่อเปรียบเทียบเชิงต้นทุนและนำมาใช้เป็นข้อมูลในการเลือกตัดสินใจ

กัลยลักษณ์ เอากะลินธิ (2006) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาระเบียบวิธีออฟติไมซ์ชันแบบพลวัตของการทำความสะดวกช่ยงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้วิธีการสร้างปัญหาเวลาต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองเลียนแบบช่ยงานแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเดียว ทั้งนี้ใช้แบบจำลองสมการของการเกิดฟาวลิง 2 รูปแบบคือสมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model) และสมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปรเนนเชียล (Asymptotic fouling model) ในการศึกษา และศึกษาผลปริมาณการเกิดฟาวลิง ศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลารวมทั้งอุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อนและสายเย็น ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ สามารถทราบแนวโน้มหรือรูปแบบของอัตราการเกิดฟาวลิง และนำรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงดังกล่าวมาใช้เพื่อหาราวงเวลาในการทำความสะดวกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม พร้อมทั้งได้ระยะเวลาการล้างที่เหมาะสมในแต่ละครั้ง โดยใช้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อยที่สุด

ประพิศพรณ เตชะวานิชชัย (2006) ทำการศึกษาผลกระทบของการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ซึ่งพบว่า เมื่อเกิดฟาวลิงเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ต้องการใช้พลังงานทดแทนมากขึ้นตามไปด้วยในการดำเนินงานและอาจทำให้การดำเนินการผลิตต้องหยุดลง จึงได้นำแบบจำลองของช่ยงานนิรวัลแทนการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่า โดยนำมาใช้ในการประยุกต์สำหรับทำนายลักษณะการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อใช้ในการหาระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม

Rodriguez C. และคณะ (2007) ได้เสนอการลดอัตราการผลิตฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยได้ศึกษาข้อมูลพื้นฐานของตัวแปรการดำเนินงานจริง ซึ่งเก็บข้อมูลจากอุณหภูมิผนังท่อและความเร็วในการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากการศึกษาวิจัยพบว่าตัวแปรเหล่านี้มักแปรผันตามอัตราการเกิดฟาวลิง อีกทั้งยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดการตารางเวลาในการดำเนินการผลิต รวมทั้งได้ตารางเวลาในการทำความสะอาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการ ซึ่งพิจารณาเรื่องของการประหยัดพลังงาน การลดค่าใช้จ่าย หรือแม้กระทั่งการลดเวลาในการทำความสะอาดเป็นหลักด้วย

Kumar A. และคณะ (2007) เสนอผลกระทบของช่องทางการไหลเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่งผลต่อสมรรถนะของเครื่องภายใต้สภาวะการไหลที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าการไหลมีผลต่อสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้ในการวิจัยได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นข้อมูลทางทฤษฎี และสร้างชุดทดลองจริงขึ้นเพื่อศึกษาการตอบสนองของผลอุณหภูมิขาออกที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นได้เปรียบเทียบค่าของผลสมรรถนะที่ได้จากแบบจำลองทางทฤษฎี กับค่าของผลสมรรถนะที่ได้จากชุดทดลองจริงที่สร้างขึ้น ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าสมรรถนะที่ได้ระหว่างแบบจำลองกับชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งชุดจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้ในการทำนายสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ยกนำมาศึกษาได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

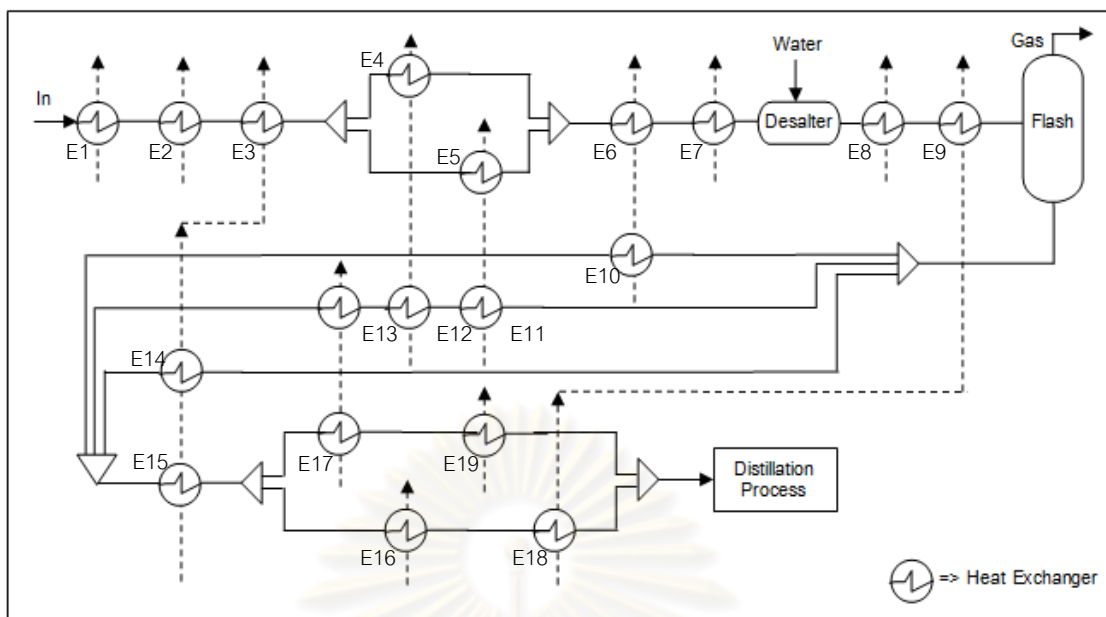
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซลล์และท่อ การถ่ายเทความร้อน อัตราการเกิดฟาวลิง และรูปแบบสมการของการเกิดฟาวลิงบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.1 กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheat train)

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบคือ ขั้นตอนแรกก่อนที่จะนำน้ำมันดิบเข้ายังหอกลั่น เพื่อทำการกลั่นให้ได้น้ำมันผลิตภัณฑ์ตามคุณสมบัติที่ต้องการ ทั้งนี้ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการกลั่นนั้นต้องนำน้ำมันดิบผ่านเข้าไปยังกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheat train) เพื่อเป็นการอุ่นให้ความร้อนกับน้ำมันให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นที่จะใช้สำหรับการกลั่นต่อไป ตามข้อกำหนดของการดำเนินงานของกระบวนการที่ได้ออกแบบไว้ โดยการนำน้ำมันดิบผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อให้ น้ำมันดิบแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่กลั่นได้จากหอกลั่น ซึ่งกำหนดให้ค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 300-350 °C (ทั้งนี้ขึ้นกับคุณภาพของน้ำมันดิบ และผลผลิตที่ต้องการ)

สำหรับระบบขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่ได้ยกนำมาศึกษา นี้ประกอบด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่อง ทั้งนี้ขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีการดำเนินงานที่ต่อเนื่องซึ่งกันและกัน โดยแสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบดังรูปที่ 3.1 เริ่มจากการส่งน้ำมันดิบ (Crude Oil) ผ่านเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 ตามลำดับ ซึ่งในระหว่างการเดินทางน้ำมันดิบไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องนั้น น้ำมันดิบจะต้องผ่านเข้าสู่กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalt) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับแยกเกลือออกจากน้ำมันดิบ โดยใช้น้ำทำการละลายเกลือที่ผสมอยู่ในน้ำมันดิบ และแยกน้ำซึ่งจะละลายเกลือออกจากกันป้องกันไม่ให้เกลือแฉะหลุดออกไปทำปฏิกิริยากลายเป็นกรดทำให้เกิดการกัดกร่อนกับระบบซึ่งเป็นโลหะ อีกกระบวนการหนึ่งที่น้ำมันดิบต้องผ่านคือ กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash Vessel) ด้วยการลดความดัน ซึ่งในตอนนี้บางส่วนจะระเหยออกไปเมื่อความดันลดลง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแยก (Separation) ป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนหรือจับตัวเป็นผลึก เพื่อให้ได้น้ำมันดิบที่มีคุณสมบัติตามต้องการก่อนที่น้ำมันดิบผลิตภัณฑ์จะถูกส่งเข้าสู่หอกลั่น (Distillation) ต่อไป

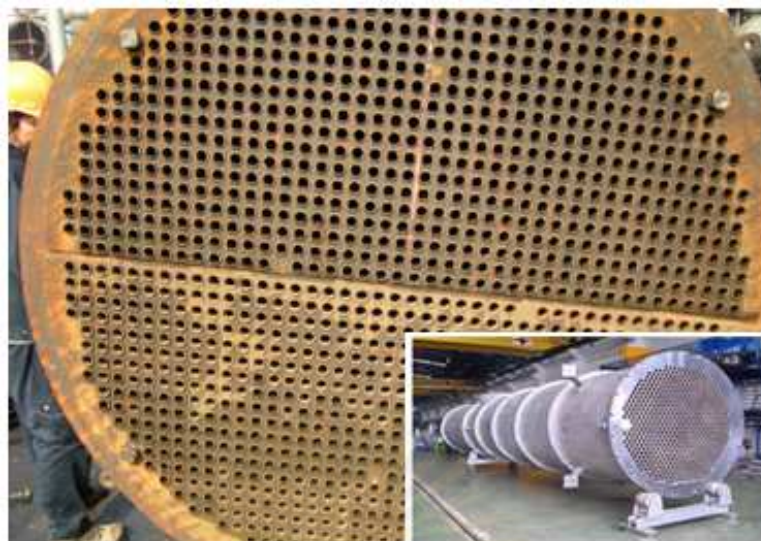


รูปที่ 3.1 แผนภาพข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา

3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger)

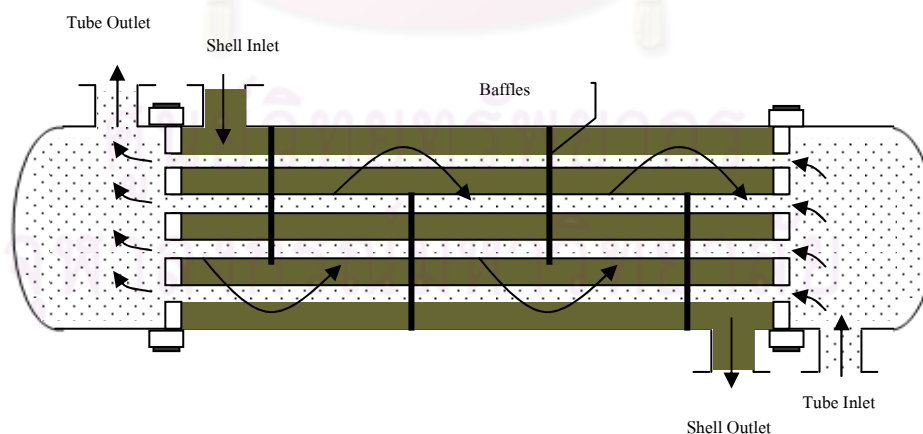
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่วิศวกรเคมีใช้ ในการออกแบบโรงงานอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป มิได้ออกแบบใดแบบหนึ่ง โดยความเป็นจริงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีมากมายหลายประเภท ลักษณะที่เหมือนกันส่วนใหญ่ที่ใช้ในระบบงานทางวิศวกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อน หรือแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่เป็นของไหลร้อนและของไหลเย็น ซึ่งทั้งสองส่วนนี้แยกจากกันโดยมีผนังกัน

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



รูปที่ 3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ ที่ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

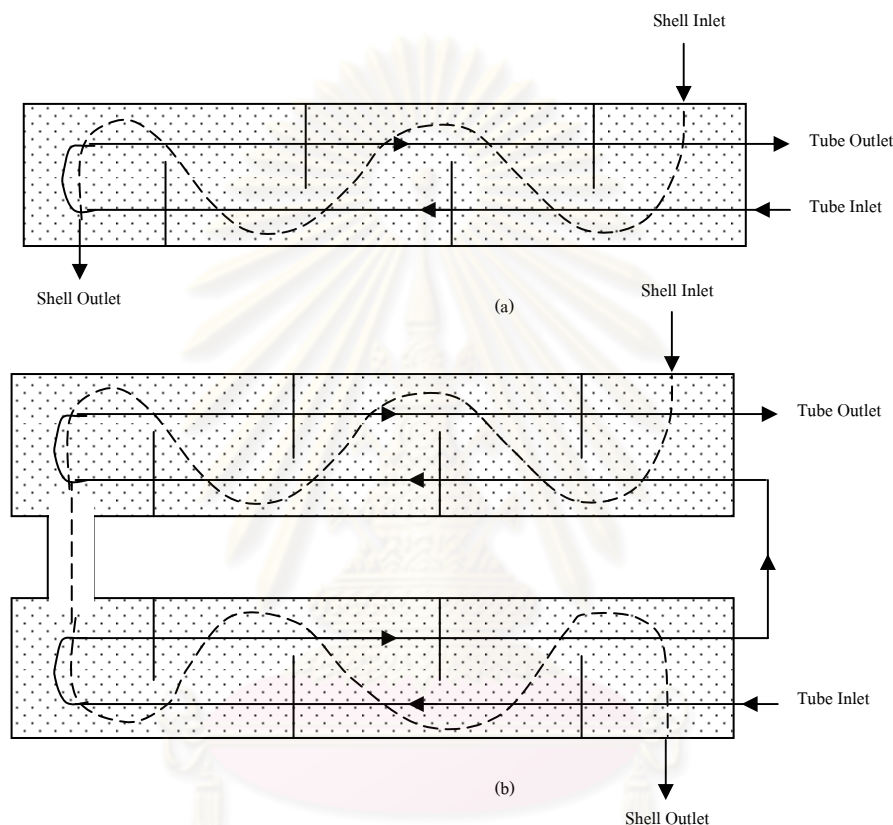
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนมีค่ามากซึ่งเกิดจากการวางกลุ่มท่อ โดยกลุ่มท่อเหล่านี้จะบรรจุในกรอบทรงกระบอกที่เรียกว่า เชลล์ (Shell) ของไหลชนิดแรกไหลในกลุ่มท่อ ส่วนของไหลชนิดที่สองไหลรอบกลุ่มท่อที่อยู่ภายในเชลล์ เส้นทางการไหลภายในท่อ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



รูปที่ 3.3 แสดงทิศทางการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์ และท่อ

ดัดแปลงมาจาก : J.P.Holman (1992)

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



รูปที่ 3.4 การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสองกลับ (Two tube passes)

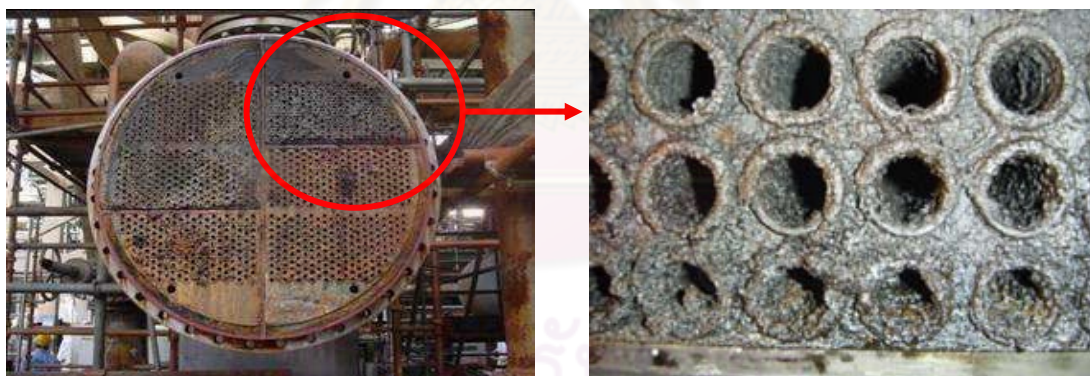
ดัดแปลงมาจาก : J.P.Holman (1992)

3.3 ฟาวลิงแฟกเตอร์ (Fouling factors)

ในระหว่างการใช้งานปกติพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มักถูกปกคลุมด้วยสิ่งเจือปนในของไหลหรือเกิดการสึกกร่อนด้วยปฏิกิริยาระหว่างของไหล และผนังวัสดุที่ใช้สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ เป็นสาเหตุทำให้ค่าความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล และผนังมีค่าสูงขึ้นทำให้สมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.5

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

$$R_{f(t)} = \frac{1}{U_{(t)}} - \frac{1}{U_c} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.5 การเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ
ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

การเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือรูปแบบการเกิดฟาวลิง (Fouling growth model) บนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของของไหล อัตราการไหล และคุณสมบัติของของไหล ซึ่งผลของคุณสมบัติของของไหลที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสายร้อนและสายเย็นมีผลกระทบต่ออัตราการตกตะกอน และการเกาะตัวของฟาวลิงมากที่สุด รูปแบบของการเกิดฟาวลิงตามที่ได้ศึกษาในงานวิจัยของ Anwar K. และคณะ (2000) จำแนกออกได้ 4

ลักษณะคือ สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) และสมการการเกิดฟาวลิ่งแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model) ดังแสดงในสมการ (3.2), (3.3), (3.4) และ (3.5) ดังนี้

- 1.) สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

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

- 2.) สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)

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

- 3.) สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)

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

- 4.) สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)

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

เมื่อ $R_f(t)$ คือ การเกิดฟาวลิ่งที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($m^2 K/W$)
 $R_{f,c}$ คือ ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิ่ง ($m^2 K/W$)
 t คือ เวลา (day)
 $t_{p,c}$ คือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง (day)
 n คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น

3.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer)

กลไกการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเซล์และท่อนั้นประกอบไปด้วยการนำความร้อนและการพาความร้อน ซึ่งเกิดจากความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิของเหลวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

3.4.1 อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer, Q)

สมการของอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมอธิบายได้ดังนี้ คือ

$$Q = UA\Delta T_{lm} \quad (3.6)$$

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (kW)
 U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($kW / m^2 K$)
 A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)
 ΔT_{lm} = ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม (K)

ค่าผลต่างของอุณหภูมิกำหนดจากความแตกต่างของค่าอุณหภูมิเฉลี่ย การคำนวณหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ต้องคำนึงถึงทิศทางของการไหลซึ่งเป็นไปได้ทั้งแบบขนานกันและสวนทางกัน เมื่อพิจารณา ดูรูปที่ 3.6 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่แตกต่างกันระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็น ในขณะที่ไหลเข้า-ออก และต้องการหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำมาใช้กับสมการ (3.6) เพื่อคำนวณหาการถ่ายเทความร้อน สำหรับกรณีที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลเป็นขนานโดยแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิจากของไหลร้อนและเย็นที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดในช่วงระหว่างทางเข้าและทางออก สำหรับการไหลแบบขนานหรือการไหลตามกันสำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นที่เล็ก ๆ (dA) นำมาเขียนได้สมการดังนี้

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

ที่ซึ่งสัญลักษณ์ h และ c แทนของไหลร้อนและเย็นตามลำดับ การถ่ายเทความร้อนสามารถแสดงได้สมการดังนี้

$$dq = U(T_h - T_c)dA \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.7) จะได้

$$dT_h = -\frac{dq}{m_h c_h} \quad (3.9)$$

$$dT_c = -\frac{dq}{m_c c_c} \quad (3.10)$$

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

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -dq \left[\frac{1}{m_h c_h} + \frac{1}{m_c c_c} \right] \quad (3.11)$$

แทนค่า dq จากสมการ (3.8) ลงในสมการ (3.11) จะได้

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -U \left[\frac{1}{m_h c_h} + \frac{1}{m_c c_c} \right] dA \quad (3.12)$$

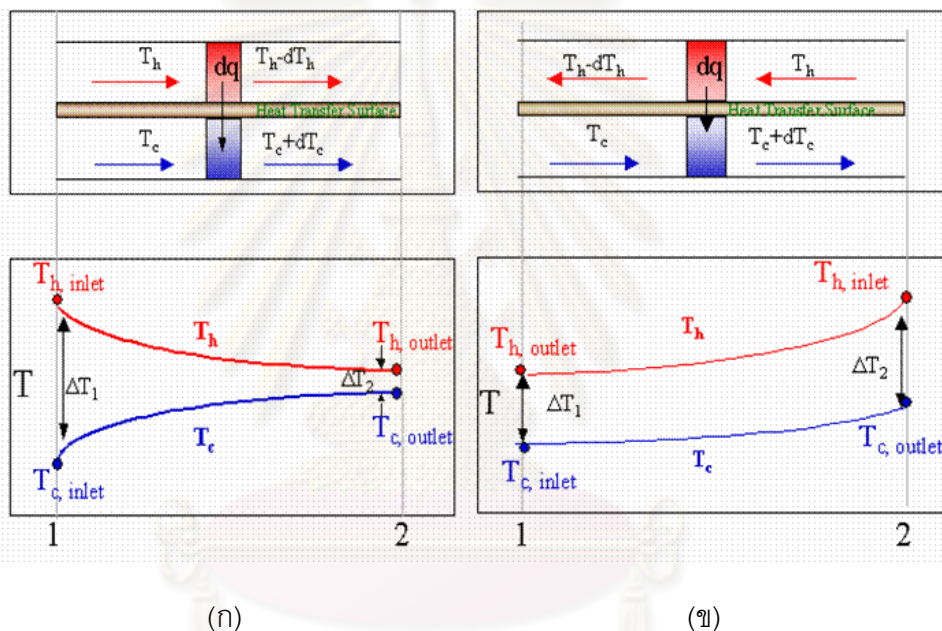
อินทิเกรตสมการอนุพันธ์ระหว่างสภาวะที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะได้สมการ

$$\ln \frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}} = -UA \left[\frac{1}{m_h c_h} + \frac{1}{m_c c_c} \right] \quad (3.13)$$

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

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

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



รูปที่ 3.6 ลักษณะภาพการถ่ายเทอุณหภูมิ (ก) การไหลแบบขนาน (ข) การไหลแบบสวนทาง
ที่มา : Queen’s University (2002)

แทนความสัมพันธ์เหล่านี้ลงในสมการ (3.13) จะได้ความสัมพันธ์ใหม่ดังนี้

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

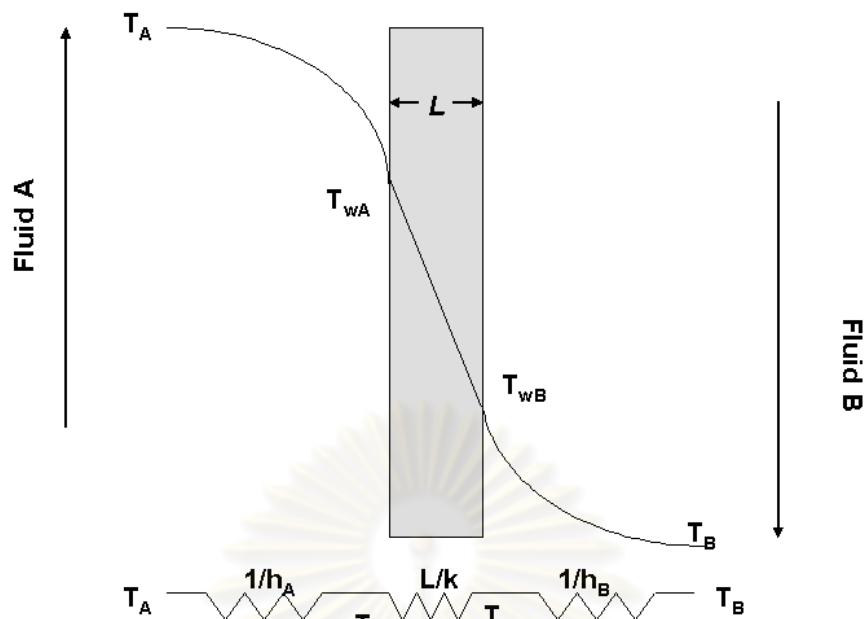
เปรียบเทียบระหว่างสมการ (3.16) และสมการ (3.6) จะได้

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

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

3.4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient, U)

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



รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของผนังราบ
ที่มา : J.P.Holman (1992)

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

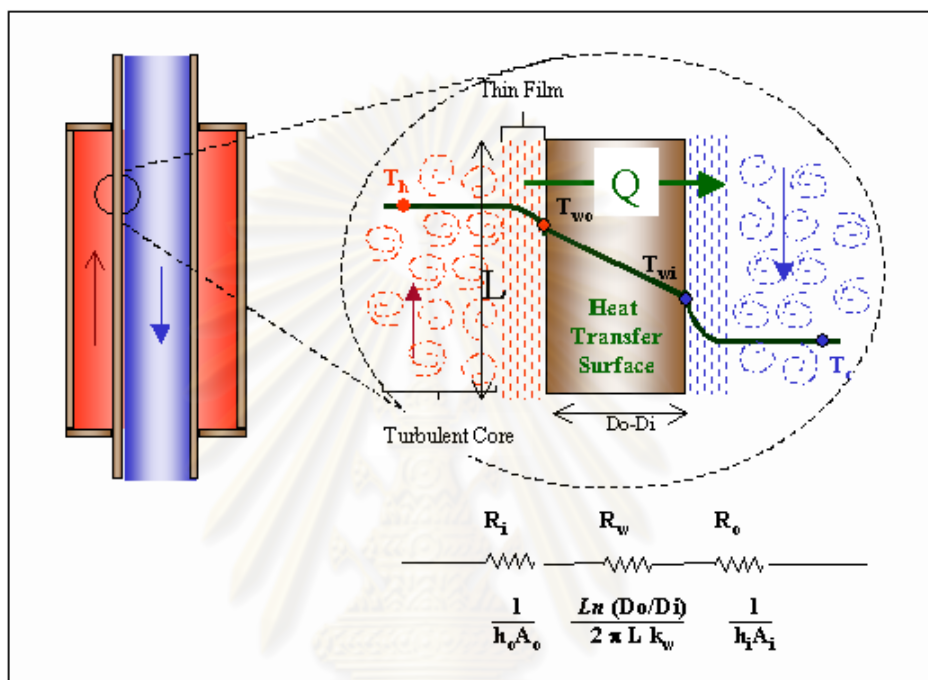
$$U_o A_o = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,i} A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_{c,o} A_o}} \tag{3.18}$$

ที่ซึ่งหา U_o จะได้

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{h_{c,i} A_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_{c,o} A_o}} \tag{3.19}$$

แต่ถ้าหากคิดจาก A_i ซึ่งเป็นพื้นที่ด้านในก็มีค่าเป็น

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



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

หากทราบอุณหภูมิเข้า และขาออกของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังนี้

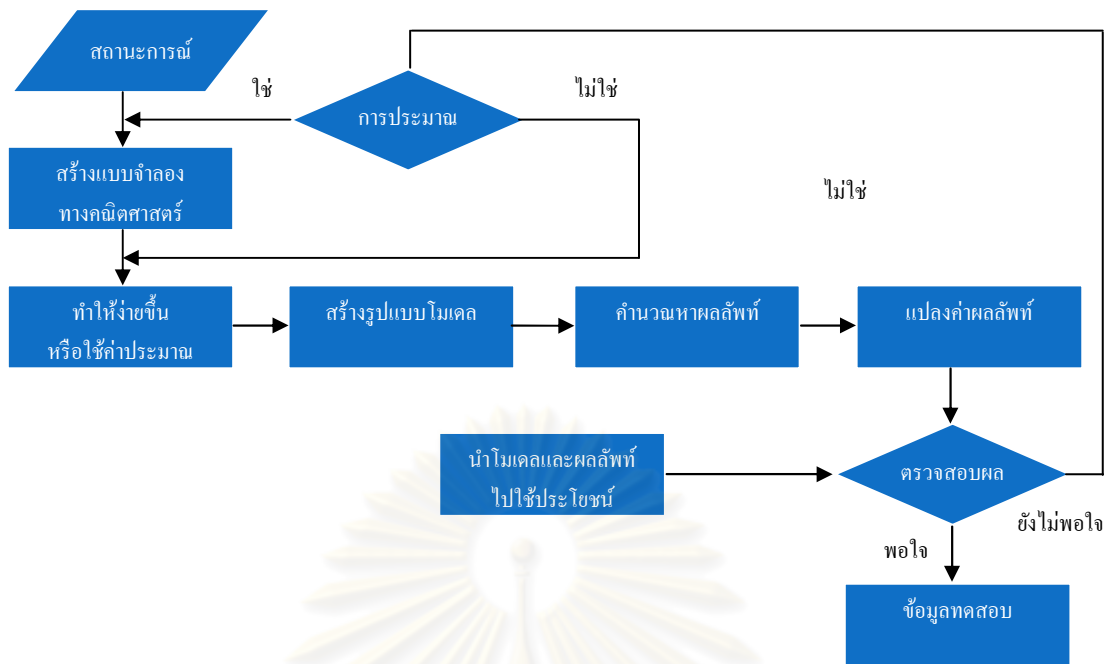
$$UA = \frac{m_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o})}{\Delta T_{lm}} = \frac{m_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})}{\Delta T_{lm}} \tag{3.21}$$

ถึงแม้ว่าการออกแบบที่มีระมัดระวังและถูกต้องนั้น จะต้องคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแต่ละค่าก็ตาม แต่สำหรับการออกแบบขั้นต้นนั้นก็ต้องมีค่าของ U โดยประมาณที่ใช้ในงานจริง ๆ ก่อนค่า U สำหรับการใช้งานต่าง ๆ นั้นได้มีผู้รวบรวมไว้ในตาราง จะเห็นได้ว่ามีอยู่หลาย ๆ กรณีด้วยกันที่เกือบจะหาค่า U ได้จากความต้านทานจากการพาความร้อนที่ผิววัตถุกับของไหล

3.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

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

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

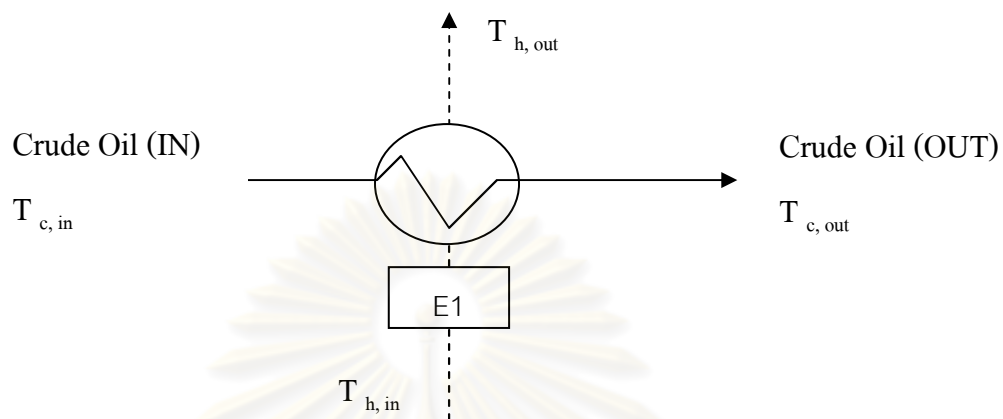


รูปที่ 3.9 แผนผังขั้นตอนการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการวิจัย

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

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

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



รูปที่ 3.10 แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1

ที่ซึ่งจากสมการ (3.6) หากกำหนดให้ในระบบไม่มีการสูญเสียพลังงานจะได้สมดุลพลังงานของสายร้อน และสายเย็นดังนี้

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

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

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (kW)
 F = อัตราการถ่ายเทมวล (kg / s)
 C_p = ค่าความจุความร้อน (kJ / kgK)
 T = อุณหภูมิ (K)

ซึ่งสัญลักษณ์ตัวห้อย c และ h กำหนดให้เป็นของไหลสายเย็นและสายร้อนตามลำดับ

ที่ซึ่ง

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

และ

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

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

การจำลองกระบวนการโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรขาเข้าและตัวแปรขาออก การหาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างไร เมื่อตัวแปรขาเข้าเปลี่ยนแปลงค่าไปจากเดิม ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาออกหรือตัวแปรขาเข้า ซึ่งในงานวิจัยนี้เน้นตัวแปรที่เป็นอุณหภูมิ ขาออกของสายร้อนและสายเย็น โดยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้จากสมการนี้คือ

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

ที่ซึ่ง

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

ทั้งนี้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการทราบค่าในกระบวนการ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ในการทำนายรูปแบบสมการที่เหมาะสมในการเกิดฟาว ลิงบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงานในระบบที่นำมาศึกษาได้อีกด้วย

3.6 การหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (Estimate parameter)

การสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ระบบด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้กลายมาเป็นเครื่องมือที่สำคัญอย่างหนึ่งของการดำเนินงานวิจัย สำหรับในกรณีที่ปัญหามีคำตอบหรือทางเลือกที่เป็นไปได้จำนวนมาก การวิเคราะห์หาคำตอบด้วยการจำลองสถานการณ์ไม่สามารถที่จะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ เนื่องจากที่ผ่านมามีเทคนิคการจำลองสถานการณ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นเครื่องมือในการประเมินผลลัพธ์ อาทิเช่น จะเกิดอะไรขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ กับระบบ เป็นต้น โดยมีความคาดหวังว่าผลการประเมินที่ได้จะนำมาซึ่งการตัดสินใจหรือเลือกใช้อะไรมาแก้ปัญหาของระบบ

กระบวนการจำลองสถานการณ์ (Simulation) จำเป็นต้องมีขั้นตอนการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดีที่สุดและเหมาะสมที่สุด ระบบจะอาศัยผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินโดยการจำลองสถานการณ์ ซึ่งถูกใช้เป็นตัววัดถึงความเหมาะสมของตัวแปรป้อนเข้า (Input) และนำมาประมวลผลร่วมกับผลที่ได้จากการประเมินในครั้งที่ผ่านมา แล้วทำการกำหนดชุดของตัวแปรนำเข้าสู่ชุดใหม่เพื่อป้อนเข้าระบบของการจำลองสถานการณ์อีกครั้ง โดยกระบวนการทั้งหมดจะดำเนินไปจนกระทั่งระบบบรรลุเงื่อนไขของการหยุดหาคำตอบ ด้วยเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่ง เป็นต้นว่า ได้ผลลัพธ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เบื้องต้น หรือบรรลุตามเงื่อนไขของระยะเวลาที่กำหนด

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

เทคนิคที่ใช้ในการหาคำตอบในกรณีที่มีพื้นที่คำตอบที่เป็นไปได้ขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถที่จะประเมินผลในทุก ๆ คำตอบที่เป็นไปได้ เมื่อเป็นเช่นนี้ เทคนิคในกลุ่มนี้จึงจะมีการนำเอาวิธีการค้นหาคำตอบ (Search Method) แบบต่าง ๆ เข้ามาเพื่อช่วยในการทำออฟติไมซ์เซชันด้วย

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

โดยทั่วไปวิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบทีละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่อยู่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน ซึ่งคาดว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นกระบวนการเหล่านี้สามารถจำแนกขั้นตอนได้ดังนี้

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

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

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

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

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

จากวิธีการที่กล่าวมานั้นเป็นวิธีการที่ได้ความนิยมนำมาใช้มากที่สุด เนื่องจากวิธีการไม่ซับซ้อนมากนักและสามารถหาคำตอบได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตาม วิธีการค้นหาคำตอบโดยใช้เทคนิคนี้ยังมีอุปสรรคที่สำคัญคือ เรื่องของเวลาซึ่งใช้ในการค้นหาคำตอบที่ค่อนข้างสูง ถึงแม้ว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะได้รับการพัฒนาให้สามารถประมวลผลได้อย่างรวดเร็วก็ตาม ซึ่งโดยพื้นฐานแล้วเทคนิคการหาคำตอบหรือผลลัพธ์ที่ดี และเหมาะสมที่สุดนั้นอาศัยหลักการเดียวกัน คือ การใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ เพื่อการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดโดยความแตกต่างระหว่างเทคนิคมักเกิดขึ้นจากความแตกต่างของวิธีการที่ใช้เพื่อการหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งหากต้องการจะนำเทคนิคนี้ไปใช้งานจึงยังมีความจำเป็นที่จะต้องให้ความสำคัญกับขั้นตอนในการสร้างแบบจำลอง ส่วนในขั้นตอนของการหาคำตอบที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการเลือกวิธีการที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา หรือตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการหาค่าผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

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

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

เมื่อ

obs คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากการจำลอง

predict คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากข้อมูลโรงงาน

N คือ จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย โดยงานวิจัยครั้งนี้แบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ศึกษาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่สนใจนำมาศึกษา ส่วนที่ 2 เป็นการพัฒนาแบบจำลองของการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนเข้าสู่กระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการกลั่นแยกเบื้องต้น (Flash Vessel) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ตามลำดับ ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

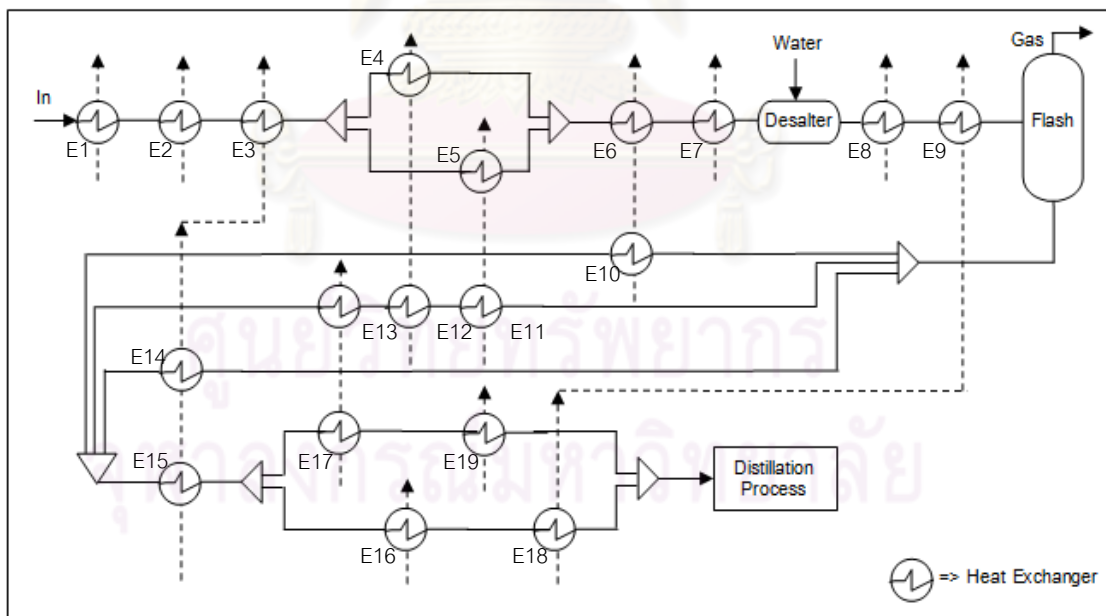
4.1 การศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาทำการวิจัยนั้น เบื้องต้นจะต้องเริ่มศึกษาผลของการเกิดฟาวลิงต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา แล้วนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการการเกิดฟาวลิง (Fouling growth model) ตามที่ได้ศึกษาในงานวิจัยของ Anwar K. และคณะ (2000) ซึ่งมีรูปแบบการเกิดฟาวลิงทั้งหมด 4 รูปแบบสมการ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบหรือสายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อมูลโรงงานจริงมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ หรือสายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการจำลองตามสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ทั้งนี้จากการศึกษาจะทำให้สามารถเทียบเคียงและสามารถทำนายรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงได้ว่ารูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงรูปแบบสมการใด มีความเหมาะสมกับขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจากสมการอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบหรือสายผลิตภัณฑ์นั้นจะแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าการเกิดฟาวลิงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยศึกษาที่ระยะเวลาขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน

4.1.1 ศึกษาขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ (Crude preheats train) มีการขั้นตอนการดำเนินงานโดยเริ่มจากการรับน้ำมันดิบ (Crude oil) ซึ่งน้ำมันดิบจะถูกเก็บไปตรวจคุณภาพทางด้านกายภาพ และเคมี ก่อนที่จะนำเข้าสู่กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อเป็นการอุ่นให้ความร้อนกับน้ำมันให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้น ที่ซึ่งจะใช้สำหรับการกลั่นตามข้อกำหนดการดำเนินการที่

กระบวนการได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้ในระบบช่วยงานเครื่องแลกเปลี่ยนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษาประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่องต่อเนื่องกันดังแสดงในรูปที่ 4.1 น้ำมันดิบถูกลำเลียงมาตามท่อเพื่อเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ซึ่งน้ำมันดิบจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่กลั่นได้จากหอกลั่น (เส้นประ) ต่อด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2, E3, E4, E5, E6, E7 ตามลำดับก่อนที่จะถูกส่งเข้าไปในกระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) เป็นกระบวนการที่ใช้น้ำละลายเกลือในน้ำมันดิบ เพื่อแยกน้ำซึ่งจะละลายเกลือออกจากกันป้องกันไม่ให้เกิดโอเวอร์โหลดออกไปทำปฏิกิริยากลายเป็นกรด ทำให้เกิดการกัดกร่อนกับระบบซึ่งเป็นโลหะ ต่อมาน้ำมันดิบที่ผ่านการกำจัดเกลือจะถูกส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8, E9 แล้วส่งผ่านไปยังกระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash Vessel) ด้วยการลดความดัน ซึ่งในตอนนี้บางส่วนจะระเหยออกไปเมื่อความดันลดลง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแยก (Separation) ป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนหรือจับตัวเป็นผลึก หลังจากผ่านกระบวนการดังกล่าวน้ำมันดิบจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10, E11, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E18 และ E19 ตามลำดับ เพื่อให้ได้น้ำมันดิบที่มีคุณสมบัติและอุณหภูมิตามต้องการ ก่อนที่น้ำมันดิบผลิตภัณฑ์จะถูกส่งเข้าสู่หอกลั่น (Distillation) ต่อไป



รูปที่ 4.1 แผนภาพช่วยงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

4.1.2 รวบรวมข้อมูลจากโรงงานจริง

การศึกษาข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เพื่อนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ได้ใช้ข้อมูลค่าคงที่ของตัวแปรต่าง ๆ จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 – 4.19 เป็นค่าสภาวะการดำเนินการจริงที่โรงงานได้ออกแบบไว้ใช้สำหรับระบบข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ F คืออัตราการไหล, C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ, A คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อน, U_c คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เริ่มต้นดำเนินการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและ $R_{f(t)}$ พาวลิ่งแฟกเตอร์หรือค่าความต้านทานของพาวลิ่ง ที่ซึ่งมีตัวห้อย c และ h เป็นพารามิเตอร์แสดงถึงสายเย็น (c) และสายร้อน (h)

ตารางที่ 4.1 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	243	kg/s
F_c	232	kg/s
$C_{p,h}$	2.47	kJ/kg K
$C_{p,c}$	1.99	kJ/kg K
A	440	m ²
U_c	0.73	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.000944	m ² K/kW

ตารางที่ 4.2 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	82	kg/s
F_c	232	kg/s
$C_{p,h}$	2.51	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.09	kJ/kg K
A	228	m ²
U_c	0.77	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.000951	m ² K/kW

ตารางที่ 4.3 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	44	kg/s
F_c	232	kg/s
$C_{p,h}$	2.48	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.21	kJ/kg K
A	321	m ²
U_c	0.44	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.001413	m ² K/kW

ตารางที่ 4.4 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	17.36	kg/s
F_c	69.62	kg/s
$C_{p,h}$	2.61	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.26	kJ/kg K
A	70	m ²
U_c	0.92	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.000958	m ² K/kW

ตารางที่ 4.5 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	41.54	kg/s
F_c	162.33	kg/s
$C_{p,h}$	2.7	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.31	kJ/kg K
A	146	m ²
U_c	0.79	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.000988	m ² K/kW

ตารางที่ 4.6 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	92.04	kg/s
F_c	232	kg/s
$C_{p,h}$	2.66	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.4	kJ/kg K
A	311	m ²
U_c	0.83	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.000969	m ² K/kW

ตารางที่ 4.7 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	27.78	kg/s
F_c	232	kg/s
$C_{p,h}$	2.69	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.48	kJ/kg K
A	244	m ²
U_c	0.8	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.001059	m ² K/kW

ตารางที่ 4.8 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	131.88	kg/s
F_c	230.31	kg/s
$C_{p,h}$	2.65	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.53	kJ/kg K
A	441	m ²
U_c	0.73	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.00113	m ² K/kW

ตารางที่ 4.9 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	50.68	kg/s
F_c	230.41	kg/s
$C_{p,h}$	2.51	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.62	kJ/kg K
A	940	m ²
U_c	0.28	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.002564	m ² K/kW

ตารางที่ 4.10 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	92.04	kg/s
F_c	66.75	kg/s
$C_{p,h}$	2.84	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.7	kJ/kg K
A	600	m ²
U_c	0.77	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.001006	m ² K/kW

ตารางที่ 4.11 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	41.54	kg/s
F_c	50.46	kg/s
$C_{p,h}$	2.87	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.67	kJ/kg K
A	183	m ²
U_c	0.76	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.001001	m ² K/kW

ตารางที่ 4.12 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	17.36	kg/s
F_c	50.46	kg/s
$C_{p,h}$	2.85	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.75	kJ/kg K
A	162	m ²
U_c	0.83	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.000992	m ² K/kW

ตารางที่ 4.13 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	9.64	kg/s
F_c	50.46	kg/s
$C_{p,h}$	2.72	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.77	kJ/kg K
A	147	m ²
U_c	0.39	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.002212	m ² K/kW

ตารางที่ 4.14 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	136.16	kg/s
F_c	102.84	kg/s
$C_{p,h}$	2.75	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.69	kJ/kg K
A	1509	m ²
U_c	0.45	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.00134	m ² K/kW

ตารางที่ 4.15 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	136.16	kg/s
F_c	220.03	kg/s
$C_{p,h}$	2.87	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.84	kJ/kg K
A	1374	m ²
U_c	0.58	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.001315	m ² K/kW

ตารางที่ 4.16 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	16.2	kg/s
F_c	142.94	kg/s
$C_{p,h}$	2.91	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.89	kJ/kg K
A	125	m ²
U_c	0.67	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.001185	m ² K/kW

ตารางที่ 4.17 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	9.64	kg/s
F_c	77.09	kg/s
$C_{p,h}$	2.86	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.89	kJ/kg K
A	98.2	m ²
U_c	0.54	kW/m ² K
$R_{f,c}$	0.002011	m ² K/kW

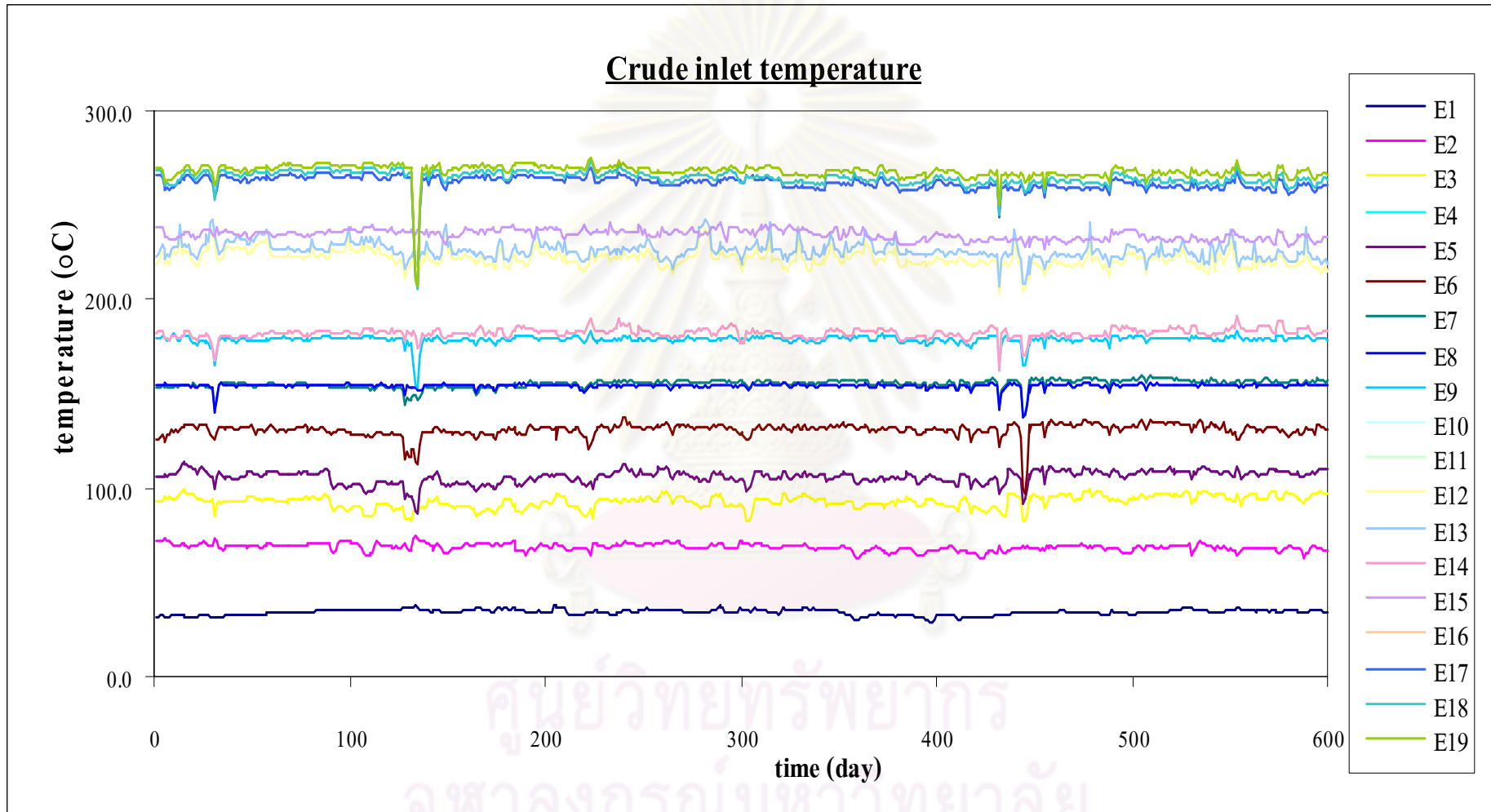
ตารางที่ 4.18 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	52.42	kg/s
F_c	142.94	kg/s
$C_{p,h}$	2.77	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.95	kJ/kg K
A	1424	m^2
U_c	0.74	$kW/m^2 K$
$R_{f,c}$	0.003348	$m^2 K/kW$

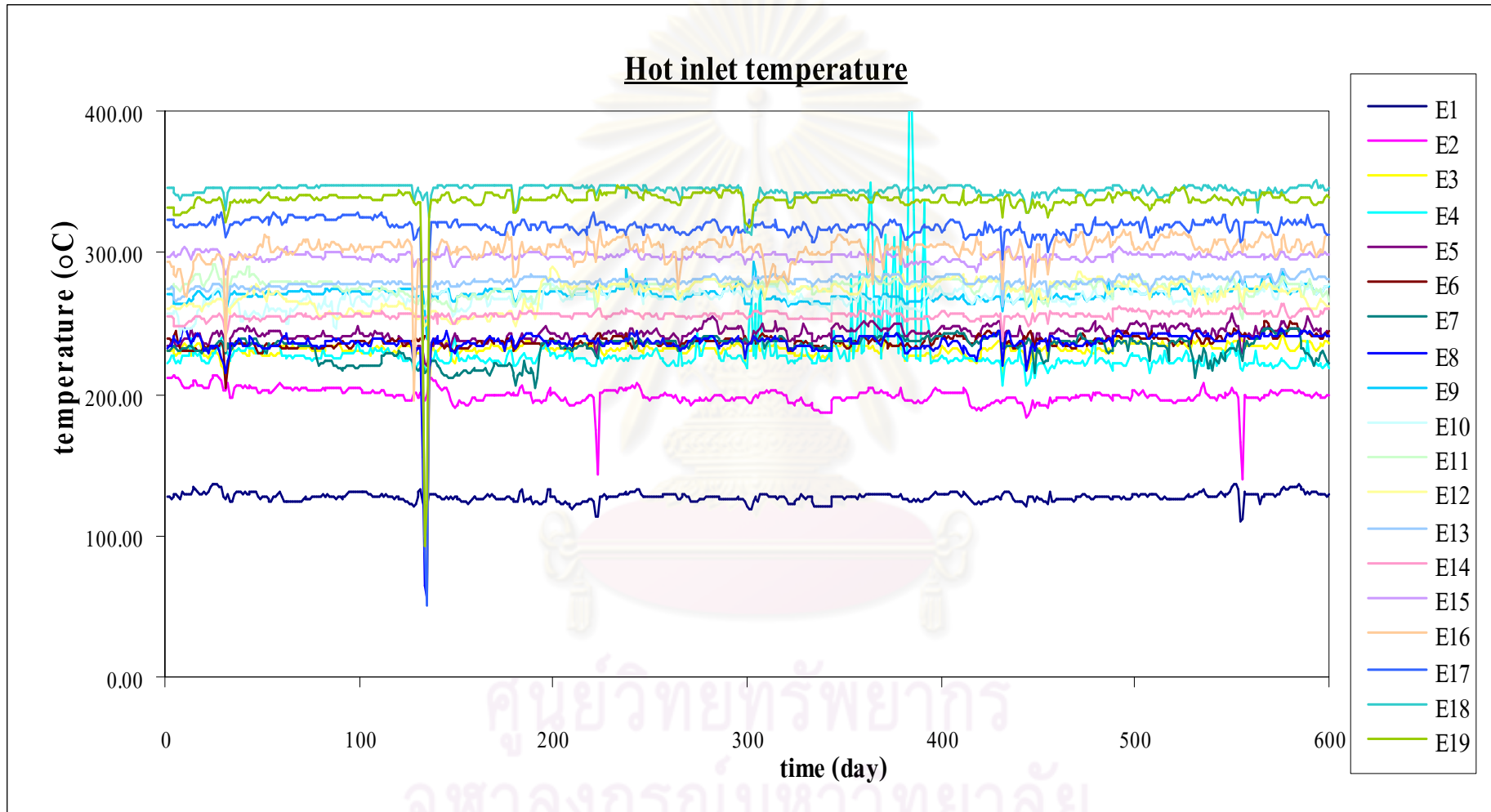
ตารางที่ 4.19 สภาวะการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
F_h	28.04	kg/s
F_c	77.09	kg/s
$C_{p,h}$	2.81	kJ/kg K
$C_{p,c}$	2.95	kJ/kg K
A	1028	m^2
U_c	0.27	$kW/m^2 K$
$R_{f,c}$	0.002099	$m^2 K/kW$

ค่าอุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งสายร้อน และสายเย็นของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่องที่ 600 วัน ดังแสดงรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ในส่วนนี้แสดงผลข้อมูลอุณหภูมิขาเข้าของสายเย็น (Crude Inlet Temperature) และ อุณหภูมิขาเข้าของสายร้อน (Hot Inlet Temperature) ที่ได้มาจากโรงงานจริง เพื่อสำหรับนำมาหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า รวมทั้งใช้เป็นค่าเริ่มต้นของกระบวนการสำหรับนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำไปศึกษา รูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ของระบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่ยกนำมาศึกษา



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิสายเย็นขาเข้าของช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึง E19



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิสายร้อนขาเข้าของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1ถึง E19

4.1.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

งานวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิ่งที่เหมาะสมกับขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีจุดประสงค์เพื่อหารูปแบบของอุณหภูมิขาออกของน้ำมันดิบที่อธิบายพฤติกรรมพลวัตได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด โดยพิจารณาจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างการจำลองตามแบบจำลองสมการการเกิดฟาวลิ่ง 4 รูปแบบกับข้อมูลที่ได้จริงจากโรงงาน เพื่อใช้อธิบายแนวโน้มของการเกิดฟาวลิ่งที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อน

แบบจำลองของขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้จากการทำสมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบบจำลองเชิงพลวัตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความจำเป็นสำหรับการศึกษาและควบคุมกระบวนการ แบบจำลองที่ไม่มีความซับซ้อนสามารถเลียนแบบและสามารถจำลองกระบวนการได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงจึงเป็นสิ่งจำเป็นและตอบสนองความต้องการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการที่สุด

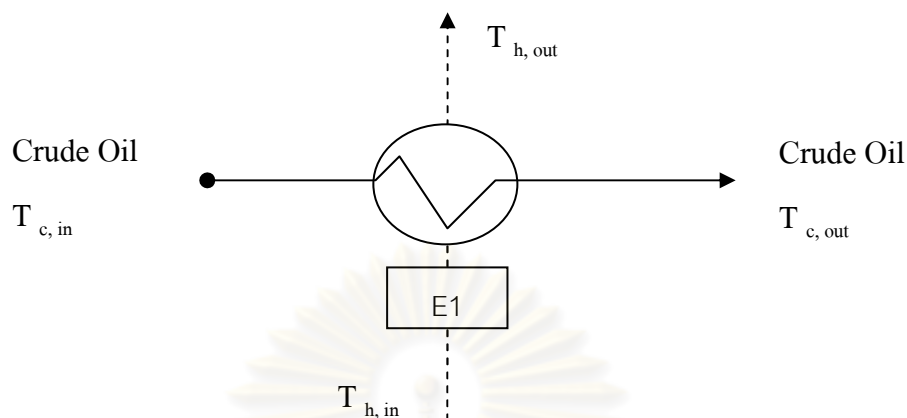
เนื่องจากข้อมูลที่ได้มาจากกระบวนการจริงในโรงงานนั้นไม่ได้มีการเก็บข้อมูลจนครอบคลุมทั้งหมดเพื่อใช้ในการจำลอง จึงมีข้อกำหนดที่ใช้ในการจำลองขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละตัวรวมจำนวน 19 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E1 ถึง E19) ดังนี้

- ไม่มีการสูญเสียพลังงานออกนอกระบบ
- อัตราการไหลของสายร้อนและสายเย็นคงที่
- ค่าความจุความร้อนของสายร้อนและสายเย็นคงที่
- พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่
- ของไหลที่พิจารณาเป็นของเหลวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยส่วนของการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 19 ส่วน (E1 ถึง E19) เชื่อมกันและมีการเข้า-ออกต่อเนื่องกัน จนกระทั่งดำเนินการเสร็จกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ แผนภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของขายงานในระบบแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถสร้างแบบจำลองได้จากการสมดุลพลังงานแสดงได้ดังนี้

ดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

E1



สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ (สายเย็น) ได้จากสมการ

$$T_{c,out} = \frac{[F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}] (e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1})}{e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1} - [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}]} T_{h,in} + \frac{(1 - [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}]) e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1}}{e^{[-UA / F_h C_{p,h}] (F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}) - 1} - [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}]} T_{c,in} \quad (4.1)$$

และ

$$T_{h,out} = T_{h,in} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (4.2)$$

โดยที่ $T_{c,out}$ = อุณหภูมิสายเย็นขาออก ($^{\circ}C$)

F_h = อัตราการไหลของสายร้อน (kg/s)

F_c = อัตราการไหลของสายเย็น (kg/s)

$C_{p,h}$ = ค่าความจุความร้อนของสายร้อน (kJ/kgK)

$C_{p,c}$ = ค่าความจุความร้อนของสายเย็น (kJ/kgK)

U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (kW/m^2K)

$$\begin{aligned}
 A &= \text{พื้นที่ถ่ายเทความร้อน (m}^2\text{)} \\
 T_{h,in} &= \text{อุณหภูมิสายร้อนขาเข้า (}^\circ\text{C)} \\
 T_{c,in} &= \text{อุณหภูมิสายเย็นขาเข้า (}^\circ\text{C)}
 \end{aligned}$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned}
 a_o &= F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c} \\
 a_1 &= A / F_h C_{p,h} \\
 a_2 &= [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}] - 1 \\
 a &= a_1 a_2
 \end{aligned}$$

แทน a_o , a_1 , a_2 และ a ในสมการ (4.1)

$$T_{c,out} = \frac{a_o (e^{[-Ua_1][a_2]} - 1)}{e^{[-Ua_1][a_2]} - a_o} T_{h,in} + \frac{(1 - a_o) e^{[-Ua_1][a_2]}}{e^{[-Ua_1][a_2]} - a_o} T_{c,in} \quad (4.3)$$

เมื่อ $a = a_1 a_2$ จะได้

$$T_{c,out} = \frac{a_o (e^{[-Ua]} - 1)}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} + \frac{(1 - a_o) e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in} \quad (4.4)$$

จากสมการ $a_2 = [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}] - 1$ หรือ $a_2 = a_o - 1$ จะได้

$$T_{c,out} = \frac{a_o (e^{[-Ua]} - 1)}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_2 e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in}$$

$$T_{c,out} = \frac{a_o e^{[-Ua]} - a_o}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_2 e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in}$$

$$T_{c,out} = \frac{a_o e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_o}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} - \frac{a_2 e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{c,in}$$

$$\begin{aligned}
 T_{c,out} &= \frac{e^{[-Ua]}}{e^{[-Ua]} - a_o} [a_o T_{h,in} - a_2 T_{c,in}] - \frac{a_o}{e^{[-Ua]} - a_o} T_{h,in} \\
 T_{c,out} &= \frac{1}{1 - \frac{a_o}{e^{[-Ua]}}} [a_o T_{h,in} - a_2 T_{c,in}] - \frac{1}{\frac{e^{[-Ua]}}{a_o} - 1} T_{h,in} \\
 T_{c,out} &= \frac{1}{1 - a_o e^{[Ua]}} [a_o T_{h,in} - a_2 T_{c,in}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[Ua]}}} T_{h,in} \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

ที่ซึ่ง

$$T_{h,out} = T_{h,in} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (4.6)$$

จากสมการ (4.5) ค่าตัวแปรที่ทราบและเป็นค่าคงที่ ได้แก่ a_o , a_1 , a_2 , a ที่ซึ่ง $T_{h,in}$ และ $T_{c,in}$ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (ในช่วงเวลาดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน) เป็นค่าที่ทราบได้จากข้อมูลโรงงาน สำหรับค่าตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่ามีดังนี้ คือ U หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยสามารถหาค่าตัวแปรดังกล่าวได้ดังนี้

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Overall heat transfer coefficient, U)

เมื่อกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนดำเนินการไปในช่วงระยะเวลานาน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) จะมีค่าลดลงและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา จากสมการ (4.5) หากต้องการทราบค่า $T_{c,out}$ จะต้องหาค่า U มาแทนในสมการ ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สามารถคำนวณได้จากค่าแฟคเตอร์การเกิดฟาวลิ่งหรือค่าความต้านทานของการเกิดฟาวลิ่ง $R_f(t)$ เป็นการรวมความต้านทานการเกิดฟาวลิ่งของการแลกเปลี่ยนความร้อนอื่น ๆ กับค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนรวมที่มีการพิจารณาผลของฟาวลิ่งที่เกาะอยู่ที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน แฟคเตอร์ฟาวลิ่งหาได้จากการหาค่าของความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ($U_{(t)}$) กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตอนเริ่มต้นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (U_c) ดังสมการ (4.7)

จาก

$$R_f(t) = \frac{1}{U_{(t)}} - \frac{1}{U_c} \quad (4.7)$$

หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา $U_{(t)}$ จากสมการ

$$\begin{aligned} \frac{1}{U_{(t)}} &= R_f(t) + \frac{1}{U_c} \\ U_{(t)} &= \frac{1}{R_f(t) + \frac{1}{U_c}} \\ U_{(t)} &= \frac{U_c}{1 + U_c R_f(t)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

การหาค่าแฟคเตอร์การเกิดฟาวลิง (Fouling factor, R_f)

การเกิดฟาวลิงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลงที่ตามระยะเวลาการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากเกิดความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น สำหรับสมการที่ใช้อธิบายการเกิดฟาวลิงที่นำมาศึกษามี 4 รูปแบบ คือ

1. สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

$$R_f(t) = R_{f.c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right) \quad (4.9)$$

แทนสมการ (4.9) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)} \quad (4.10)$$

2. สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)^n \quad (4.11)$$

แทนสมการ (4.11) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)^n} \quad (4.12)$$

3. สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right) \quad (4.13)$$

แทนสมการ (4.13) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (4.14)$$

4. สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)

$$R_f(t) = R_{f,c}(1 - e^{-t/t_{p,c}}) \quad (4.15)$$

แทนสมการ (4.15) ในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c}(1 - e^{-t/t_{p,c}})} \quad (4.16)$$

- เมื่อ $R_f(t)$ คือ การเกิดฟาวลิงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ($m^2 K / W$)
 $R_{f,c}$ คือ ค่าคงที่ของการเกิดฟาวลิง ($m^2 K / W$)
 t คือ เวลา (day)
 $t_{p,c}$ คือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง (day)
 n คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น

จากสมการข้างต้นสามารถนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมด 7 สมการ ได้แก่ สมการ (4.5), (4.6), (4.8), (4.10), (4.12) (4.14) และ (4.16) นำมาเขียนโปรแกรมแบบต่อเนื่อง และมีการรับส่งค่าที่สัมพันธ์กันโดยการทำสมดุลพลังงานของทั้งสายร้อนและสายเย็น ซึ่งเป็นการให้และรับความร้อนผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งข่ายงานในระบบทั้งหมดรวม 19 เครื่อง ตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 ดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานสำหรับนำไปเขียนโปรแกรม เพื่อใช้ สำหรับทำนายค่าตัวแปรอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ $T_{c,out}$ ที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อน ในการอุ่นน้ำมันดิบ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากการจำลองของการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ มาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ที่ได้ข้อมูลมาจากโรงงานจริง และสามารถนำแบบจำลองที่เหมาะสมกับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด มาพัฒนาต่อเพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบนี้ได้ต่อไป

4.1.4 การหาค่าพารามิเตอร์

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่ಾಯงาน หากดำเนินการไปในระยะหนึ่งจะทำให้เกิดฟาวลิ่งเกาะอยู่บริเวณผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้การนำความร้อนลดลง ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เนื่องจากเกิดความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น การติดตามการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการผลิต และติดตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีความสำคัญมากในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังนั้นการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เพื่อทำการปรับปรุงและทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากสมการจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา คือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง ($t_{p,c}$) และค่าที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ทั้งนี้เพื่อนำมาแทนในแบบจำลอง แล้วหาค่ารูปแบบของอุณหภูมิขาออกที่สามารถใช้อธิบายลักษณะการเกิดฟาวลิ่งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ เป็นช่ಾಯงานการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่อง (E1-E19) โดยแต่ละเครื่องจะมีผลต่อเนื่องกันจากเครื่องแรกซึ่งส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องต่อไปเป็นลำดับ ดังนั้นการหาค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง ($t_{p,c}$) และค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 เป็นอันดับแรก เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 นี้ก่อน และหลังจากนั้นถัดมาจะหาค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง ($t_{p,c}$) และค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อน และสายเย็น (n) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวถัด ๆ ไปตามลำดับ สำหรับการหาค่าตัวแปรค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง ($t_{p,c}$) และค่าตัวแปรค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) นั้น สามารถหาได้จากวิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม ผ่านการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม MATLAB เขียนสมการที่มีความสัมพันธ์กันต่อเนื่องกันทั้งหมด

วิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search) เป็นวิธีการที่มีลักษณะเป็นกระบวนการแบบทีละขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนการค้นหาคำตอบจะย้ายจุดไปยังจุดคำตอบใหม่ที่อยู่ใกล้เคียงกับคำตอบในปัจจุบัน เมื่อป้อนค่าเข้าไปในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์จะทำให้ได้คำตอบออกมาอย่างรวดเร็ว และสามารถใส่ข้อมูลใหม่ที่ต้องการไปได้เรื่อย ๆ จนกระทั่งได้คำตอบออกมาอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ หรือสามารถนำค่าที่เป็นการคำนวณปริมาณค่าข้อมูลขาเข้า (Input) ที่ต้องการ

เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ในระดับที่ต้องการ และสามารถนำไปใช้อ้างอิงในงานวิจัยได้ เมื่อค้นหาตัวแปรแบบสุ่มตามขั้นตอนจะทำให้ทราบช่วงของค่าตัวแปร $t_{p,c}, n$ ที่เหมาะสมทำให้ค่าแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง กับข้อมูลที่ได้จากการจำลองนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ทั้งนี้ใช้การเทียบค่าความต่างโดยอาศัยค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error) เป็นค่าที่บ่งบอกความแม่นยำ ความเที่ยงตรงของการทำนาย ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้จะต้องแทนตัวแปร $t_{p,c}, n$ เพื่อให้ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองเกิดความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างค่าที่ได้จากการจำลอง (predict) เทียบกับค่าที่ได้จริงจากโรงงาน (obs) ซึ่งแสดงว่ามีความเที่ยงตรงมากนั่นเอง การคำนวณหาค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง หรือ Root Mean Square Error (RMSE) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (obs - predict)^2}{N}} \quad (4.17)$$

เมื่อ

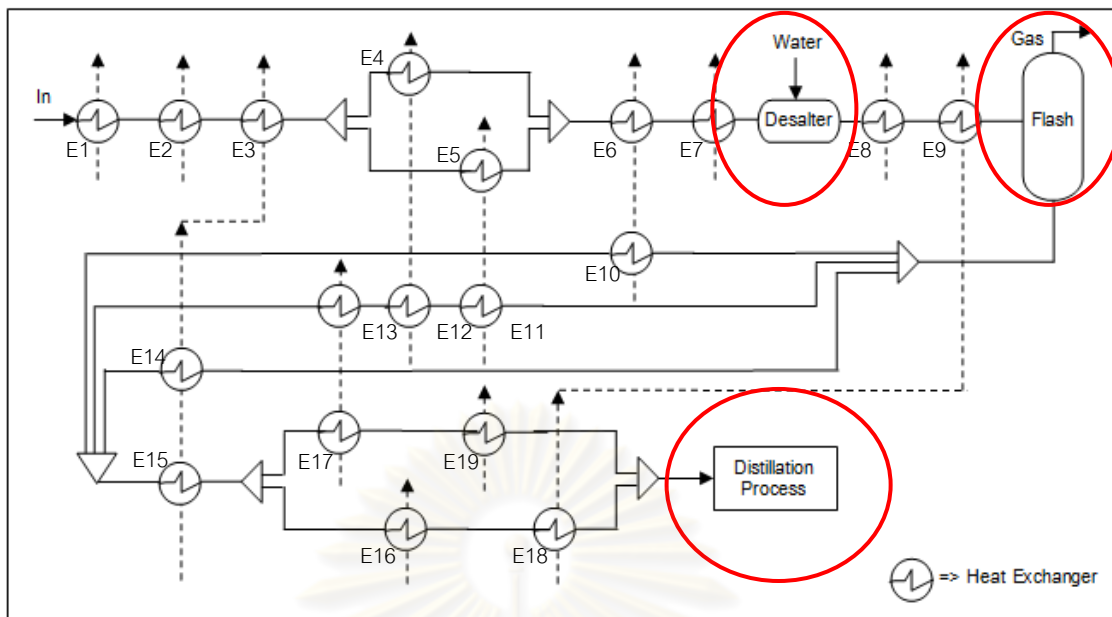
obs คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากการจำลอง

predict คือ ค่าอุณหภูมิสายเย็นขาออกที่ได้จากข้อมูลโรงงาน

N คือ จำนวนค่าการเทียบทั้งหมด

4.2 การพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ

เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการจำลองเลียนแบบกระบวนการ ของช่ಾಯงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา ผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าจากโรงงานจริง จะทำให้ได้รูปแบบจำลองของการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมแล้วนั้น ในส่วนนี้จะเป็นการพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ



รูปที่ 4.4 แผนภาพกระบวนการหลัก 3 กระบวนการในข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

กระบวนการอุ่นน้ำมันดิบมีกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งกระบวนการเหล่านี้หากอุณหภูมิของน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดจะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบไม่ได้คุณภาพและยังต้องสูญเสียพลังงานสำหรับการให้ความร้อนกับน้ำมันดิบ การหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นคอขวด (Critical Heat Exchanger) ของข่ายงานในระบบ โดยวิธีการนำรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับการเกิดฟาวลิงจริงของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบมาพัฒนาแบบจำลอง เมื่อลดค่าตัวแปรพารามิเตอร์ $t_{p,c}, n$ ที่หามาได้จากข้างต้น (หัวข้อ 4.1) ลงมา 10% ของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงาน เพื่อหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ระบบข่ายงานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด ในการเพิ่มค่าอุณหภูมิน้ำมันดิบให้สามารถส่งเข้าสู่กระบวนการทั้ง 3 กระบวนการหลักได้ตามค่าที่กำหนดตามพื้นฐานคุณภาพ เนื่องจากที่เวลาการทำงานต่อเนื่องที่ 600 วัน หากค่าตัวแปรพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจนมีผลทำให้แฟคเตอร์การเกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มขึ้นนั้น จากความสัมพันธ์ของสมการจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนรวม $U_{(t)}$ มีค่าลดลง และส่งผลให้อุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ $T_{c,out}$ มีค่าลดลงตามไปด้วย ทั้งนี้การพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวจะทำให้ทราบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวใดในข่ายงานที่เป็นคอขวด (Critical Heat Exchanger) และควรดูแลมากเป็นพิเศษ เพื่อให้ไม่เกิดผลกระทบกับผลิตภัณฑ์และข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ

เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ $t_{p,c}$ และ n เพื่อนำมาแทนในแบบจำลองการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 แบบจำลอง จนกระทั่งได้ทราบรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 19 เครื่องในช่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา ให้นำแบบจำลองที่ได้มาตั้งเป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลอง เพื่อใช้ในการหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นคอขวดของช่ายงาน (Critical Heat Exchanger) โดยเน้นที่อุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการหลัก 3 กระบวนการได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ทั้งนี้สามารถหาได้จากค่าพลังงานความร้อนที่ต้องเพิ่มให้กระบวนการ เมื่อเกิดฟาวลิงเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาจนกระทั่งส่งผลกระทบให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง และมีผลทำให้อุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ลดลง หรือกล่าวได้ว่าสมรรถนะทางความร้อนลดลงนั่นเอง

จากสมการ (4.10), (4.12), (4.14) และ(4.16) อธิบายความสัมพันธ์ของการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบได้แก่ สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) และสมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model) ซึ่งจากสมการตัวแปรที่มีผลทำให้เกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มสูงขึ้นที่เวลาเปลี่ยนแปลงไปก็คือ $t_{p,c}$ และ n จากความสัมพันธ์ของสมการหากต้องการให้ค่าฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มสูงขึ้นนั้นจะต้องทำให้ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) ลดลง สำหรับสมการที่มีค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) หากต้องการให้ค่าฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มสูงขึ้นนั้น สามารถทำได้โดยเพิ่มค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ให้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน

การพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน จนกระทั่งส่งผลให้ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำมันผลิตภัณฑ์ เพื่อให้สามารถเทียบหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานในส่วนนี้เพิ่มมากที่สุด จึงได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรพารามิเตอร์ $t_{p,c}$ และ n โดยกำหนดให้ค่า $t_{p,c}$ ลดลง 10 % และค่า n เพิ่มขึ้น 10 % เช่นเดียวกัน ซึ่งค่าตัวแปร $t_{p,c}$ และ n ที่ลดและเพิ่มดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ต้องส่งเข้าทั้ง 3 กระบวนการ เพื่อให้เกิดการเทียบต่างของค่าการสูญเสียพลังงาน (Q) จึงใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\Delta Q = Q_{Desalt} + Q_{Preflash} + Q_{Distillation} \quad (4.18)$$

ที่ซึ่ง

$$\Delta Q = \Sigma [\dot{m} C_p (\Delta T)_{Desalt} + \dot{m} C_p (\Delta T)_{Preflash} + \dot{m} C_p (\Delta T)_{Distillation}] \quad (4.19)$$

เมื่อ	ΔQ	คือ พลังงานความร้อน (kW)
	\dot{m}	คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg / s)
	C_p	คือ ค่าความจุความร้อน (kJ / kgK)
	ΔT	คือ ผลต่างอุณหภูมิขาออกระหว่าง Model Basis กับ New Model (K)

แบบจำลองของขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการเทียบหารูปแบบสมการ การเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9 จะถูกนำมาเขียนแบบจำลองเรียงต่อกัน จากนั้นเพิ่มสมการ (4.18) และ (4.19) เพื่อหาค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียไป เมื่อค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มขึ้น โดยการลดค่า $t_{p,c}$ และเพิ่มค่า n ที่ 10 % ที่เวลาการดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน ในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 19 เครื่อง โดยในแต่ละเครื่องจะมีผลต่อเนื่องกันจากส่วนแรก ซึ่งส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของส่วนต่อไปเป็นลำดับ สำหรับการลดค่า $t_{p,c}$ และเพิ่มค่า n นั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงไปที่ละเครื่อง โดยเริ่มต้นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 เป็นอันดับแรกก่อน แต่ละเครื่องก็จะแบ่งเป็น 2 กรณีของการเปลี่ยนแปลง กรณีแรกเปลี่ยนแปลงค่าของ $t_{p,c}$ ที่ค่า n คงที่ กรณีที่สองเปลี่ยนแปลงค่าของ n ที่ค่า $t_{p,c}$ หลังจากนั้นก่อนจะเริ่มดำเนินการในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวต่อไปก็ให้เริ่มที่แบบจำลองเดิมที่ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ และเริ่มเปลี่ยนแปลงค่า $t_{p,c}$ และค่า n เช่นเดียวกันกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ตามลำดับ ทำซ้ำที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวถัด ๆ ไปจนกระทั่งครบทั้งขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ตั้งแต่ E1 ถึง E19)

หลังจากที่ทราบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวใดในขบวนการที่เป็นคอขวดทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อน (Q) มากที่สุด ซึ่งอาจจะขึ้นอยู่กับกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่า $t_{p,c}$ หรือกรณีของการเปลี่ยนแปลงค่า n ในส่วนนี้จะนำมาศึกษาสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด (Critical Heat Exchanger) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า ค่า

$t_{p,c}$ หรือค่า n โดยลดค่าเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง $t_{p,c}$ และเพิ่มค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น n ทุก ๆ 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองกับค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับช่างาน ที่มีผลต่อค่าการสูญเสียพลังงานความร้อน (Q) ในการทำให้สมรรถนะทางความร้อนของช่างานกลับมาอยู่ในสภาวะเดิม ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $t_{p,c}$ และ n ดังกล่าว จะทำให้สามารถนำลักษณะแนวโน้มที่เกิดขึ้นมาอธิบายความสัมพันธ์ที่ได้มาจากผลการทำนายปริมาณพลังงานที่สูญเสีย จากช่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้สภาวะของการเกิดฟาวลิ่งที่เวลาเปลี่ยนไป



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการดำเนินการวิจัย

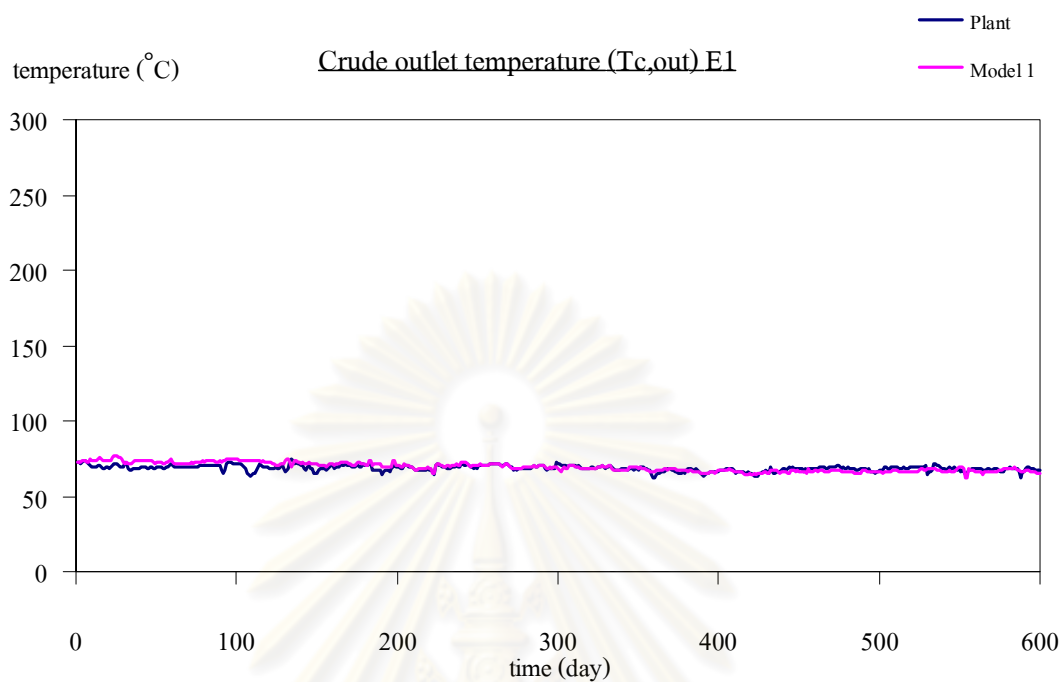
ในบทนี้กล่าวถึงผลการดำเนินการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการดำเนินการวิจัย แบ่งได้เป็นสองส่วน คือ ผลการศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่างานในระบบ ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ระหว่างผลที่ได้จากการจำลองเทียบกับค่าที่ได้จากโรงงานจริง โดยอาศัยสมการการเกิดฟาวลิง 4 รูปแบบสำหรับใช้จำลองในงานวิจัยนี้ ส่วนที่หนึ่งต่อเนื่องมาถึงส่วนที่สอง คือ ผลการพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ

5.1 การศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

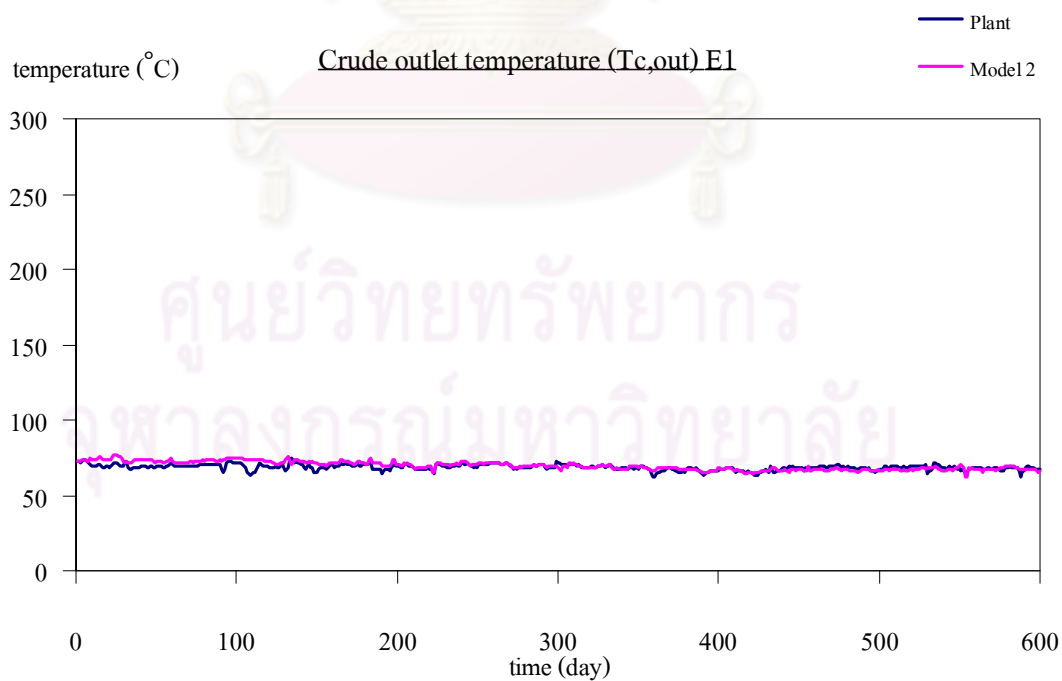
ข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของระบบที่ยกนำมาศึกษานั้น ประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่อง (เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19) เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อทำการจำลอง และเลียนแบบกระบวนการ โดยเทียบจากค่าอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา $T_{c,out}$ ที่ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา คือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) และค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ที่เหมาะสมในกระบวนการจริงที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง และสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงได้ใกล้เคียงกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการจริงมากที่สุด เพื่อให้ได้ความใกล้เคียง และเกิดค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดจากการสุ่มหาค่าตัวแปรจำเป็นต้องอาศัยค่าความคลาดเคลื่อนผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง โดยเทียบค่าความต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริงกับข้อมูลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งให้ได้ค่าจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนผลต่างเฉลี่ยกำลังสองมีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง (obs)

ทั้งนี้ได้แสดงผลการจำลองข่างานแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ โดยแบ่งการแสดงผลการจำลองเรียงตามเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มต้น จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ ตั้งแต่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 จนกระทั่งถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 ตามลำดับดังนี้

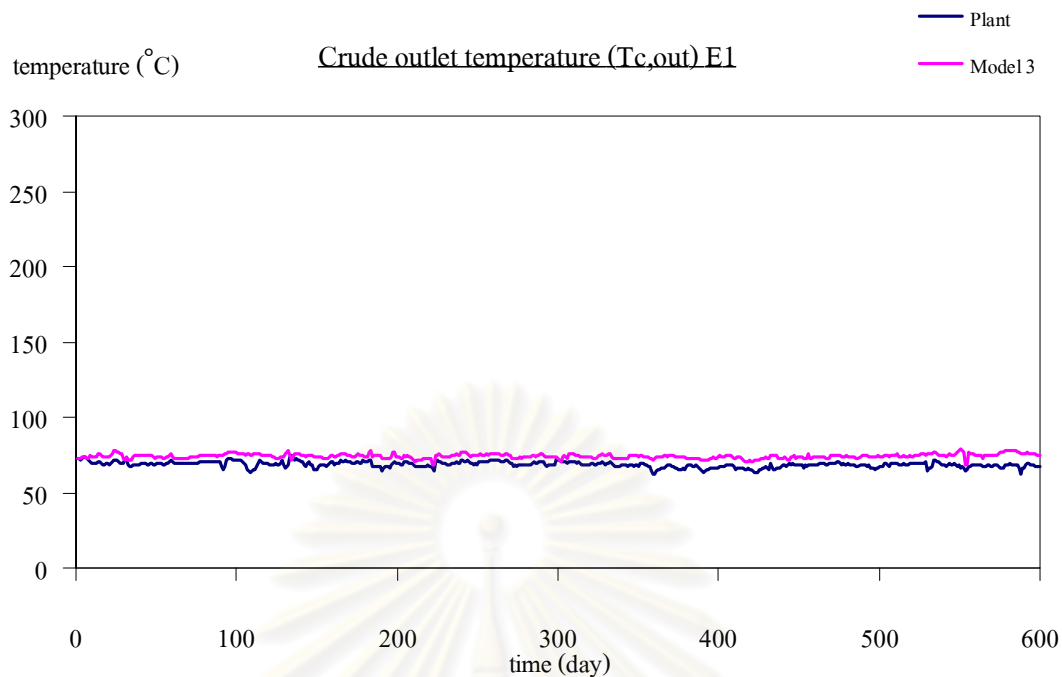
5.1.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1



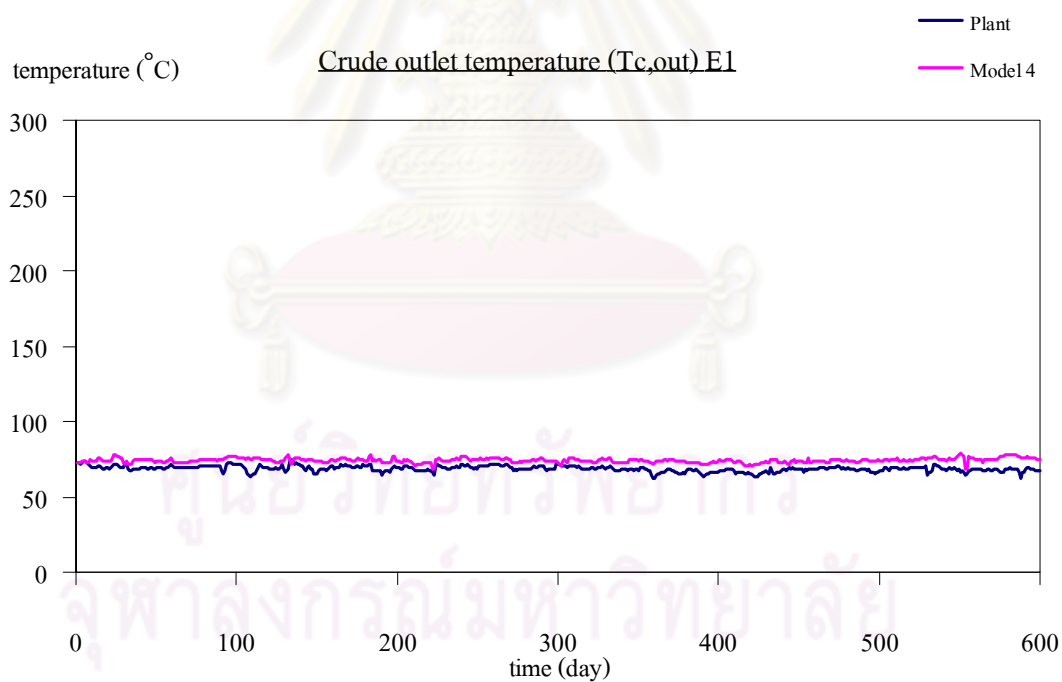
(ก) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบเอกโปเนนเชียล

รูปที่ 5.1 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

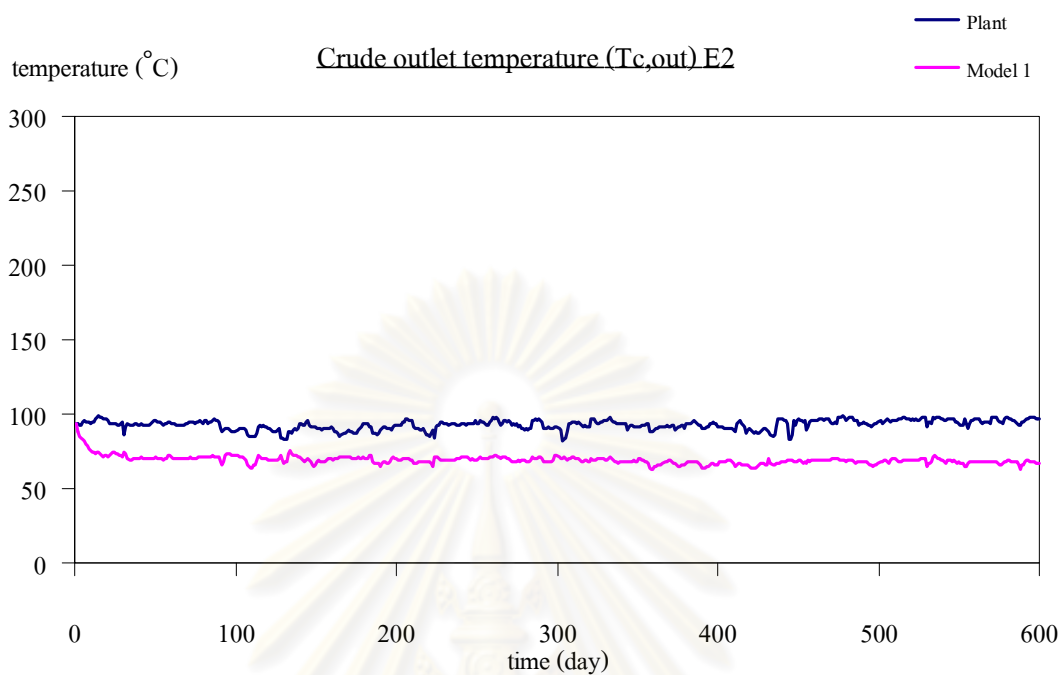
จากผลการจำลองการหาค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) และค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) โดยการออปติไมซ์ผ่านค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เมื่อใช้ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) ที่ 0.9 day และค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ที่ 0.99 เมื่อแทนค่าลงในแบบจำลองจะทำให้รูปแบบอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบทั้ง 600 วันดำเนินการต่อเนื่องมีค่าใกล้เคียงกันกับข้อมูลที่ได้จากโรงงานจริง โดยสังเกตได้จากค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ที่ได้ค่าออกมาไม่แตกต่างกันมากนัก อีกทั้งเมื่อแทนค่าตัวแปรพารามิเตอร์ดังกล่าวลงไปในแบบจำลองยังทำให้ได้ค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสองมีค่าความแตกต่างน้อยที่สุดระหว่างแบบจำลอง (predict) กับข้อมูลจริง (obs) แสดงว่ามีความเที่ยงตรง และใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.9$ day และ $n = 0.99$

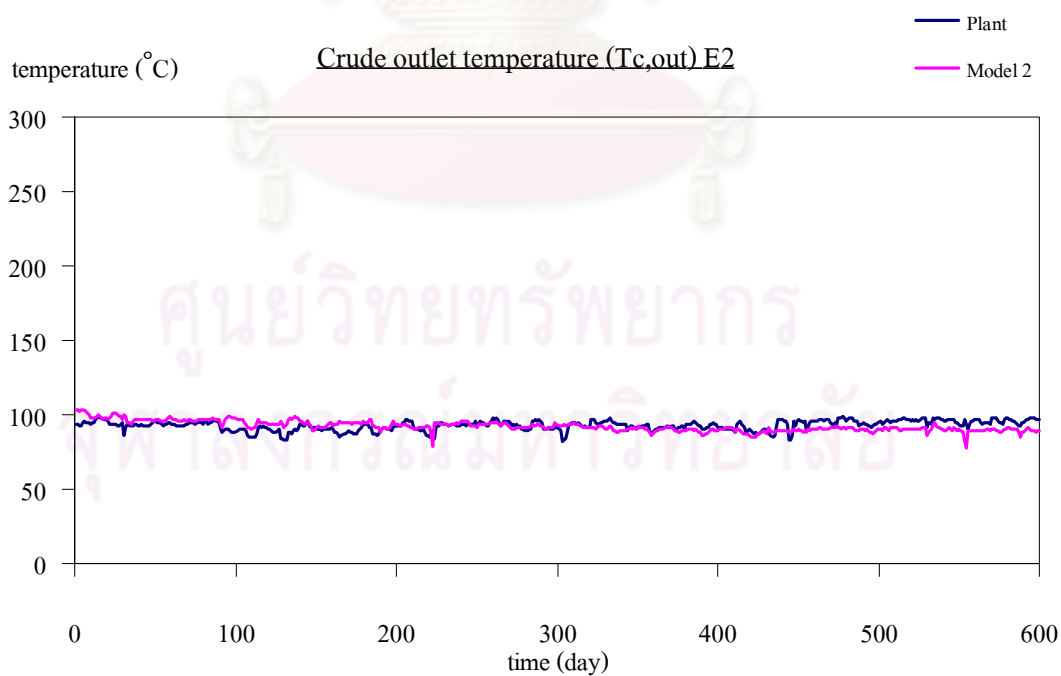
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	2.4535
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	2.4483
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	5.8281
สมการแบบเอกไปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	5.8249

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบได้แก่ สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) และสมการแบบเอกไปเนนเชียล (Asymptotic fouling model) ดังแสดงในตารางที่ 5.1 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลังมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.4483 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

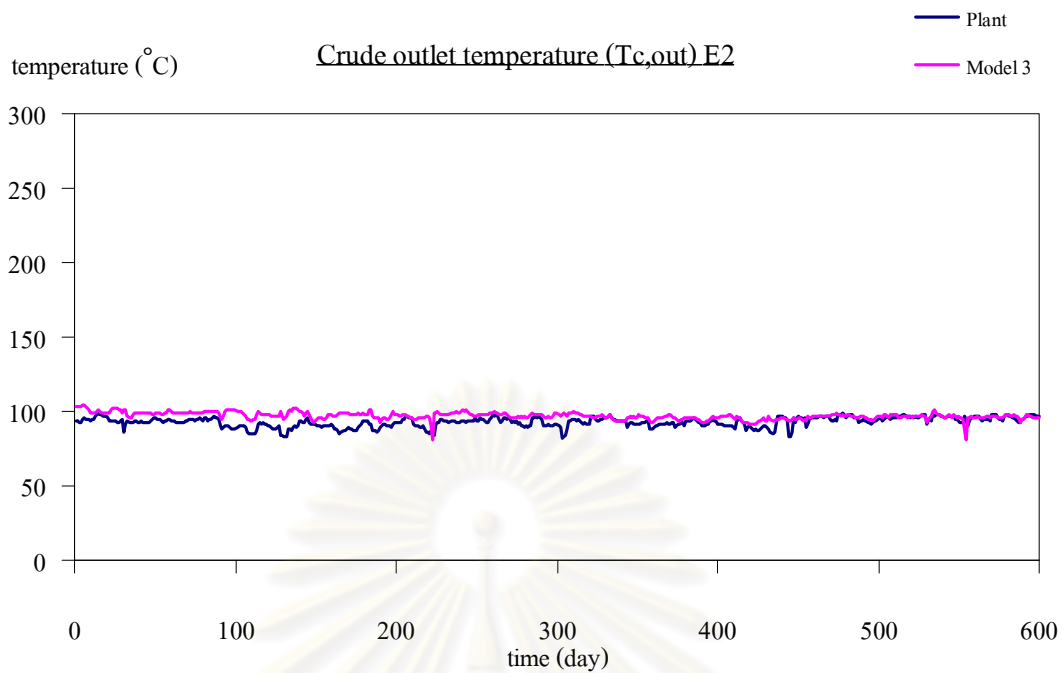
5.1.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2



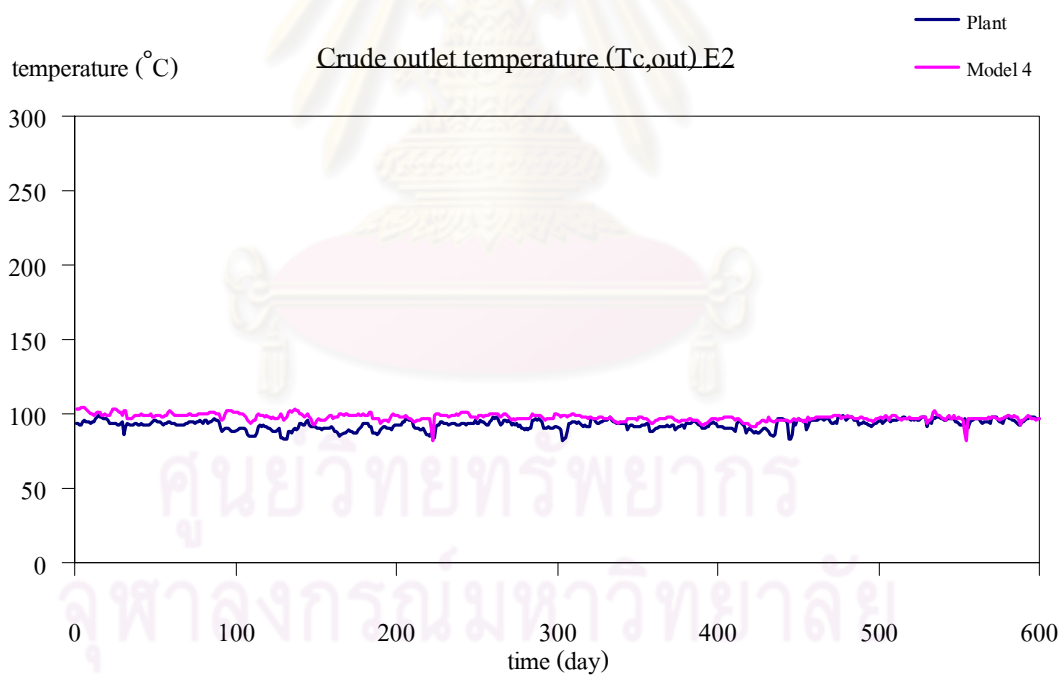
(ก) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

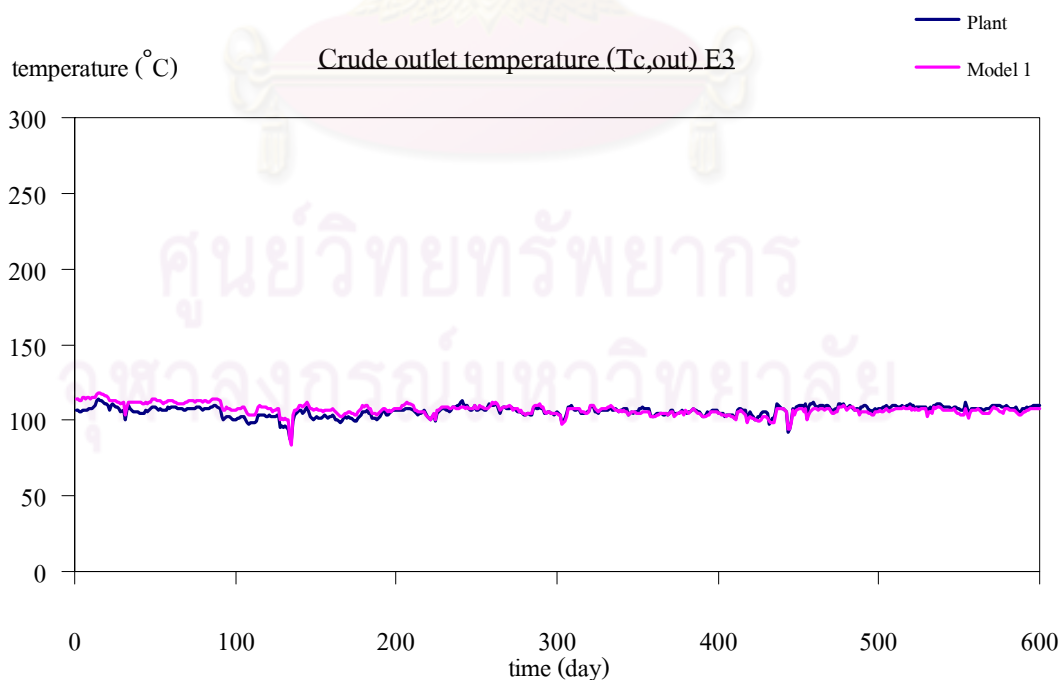
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.00098$ day และ $n = 0.5$

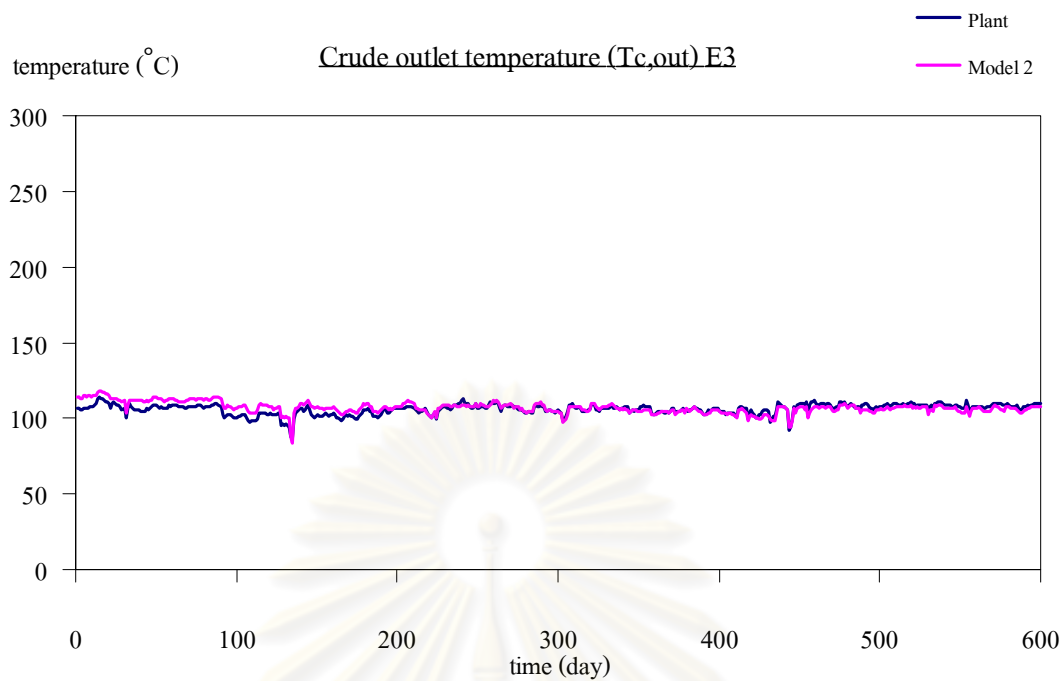
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	23.9662
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	4.6881
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	5.5253
สมการแบบเอกไปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	5.9704

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลังมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 4.6881 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

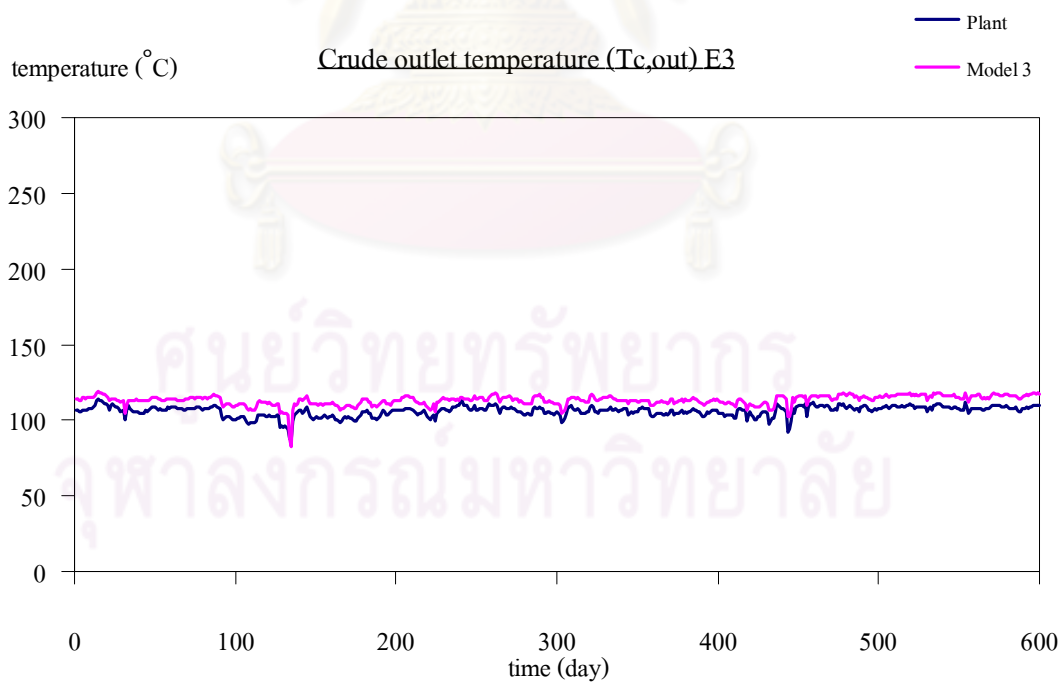
5.1.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3



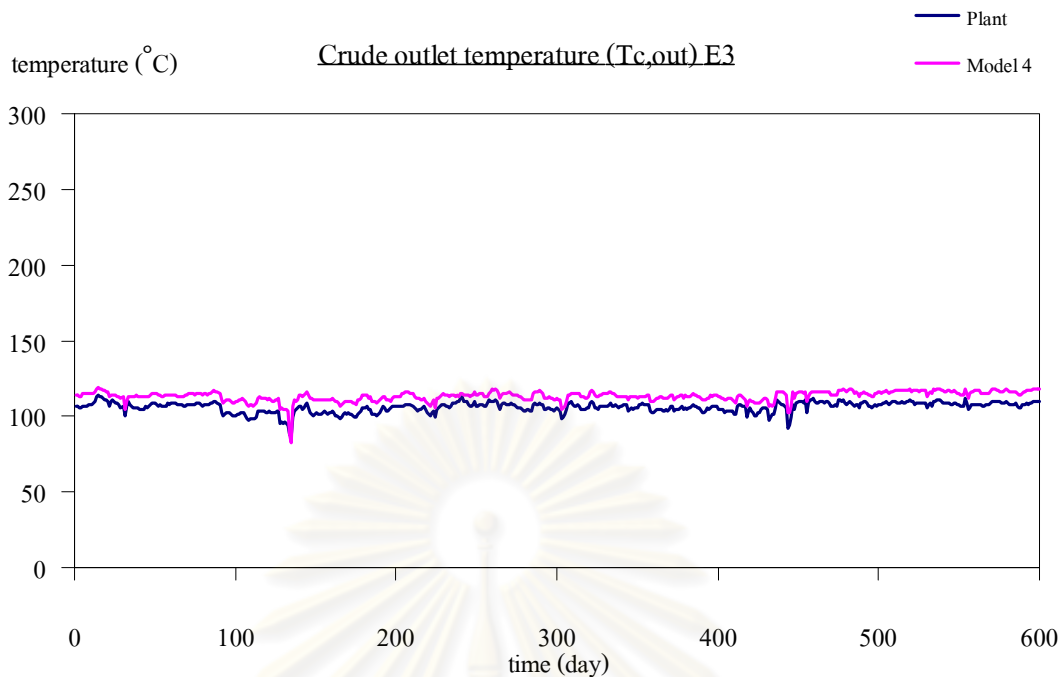
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฏยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

รูปที่ 5.3 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

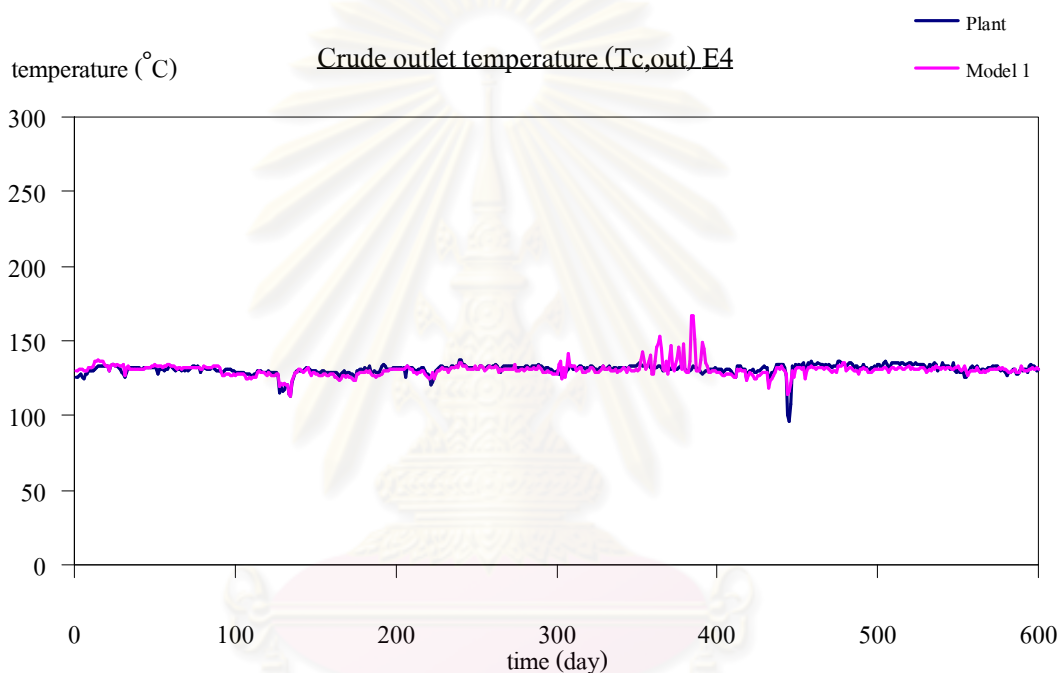
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.19$ day และ $n = -$

	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	3.1443
สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)	3.1444
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	7.2579
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	7.3786

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงใน

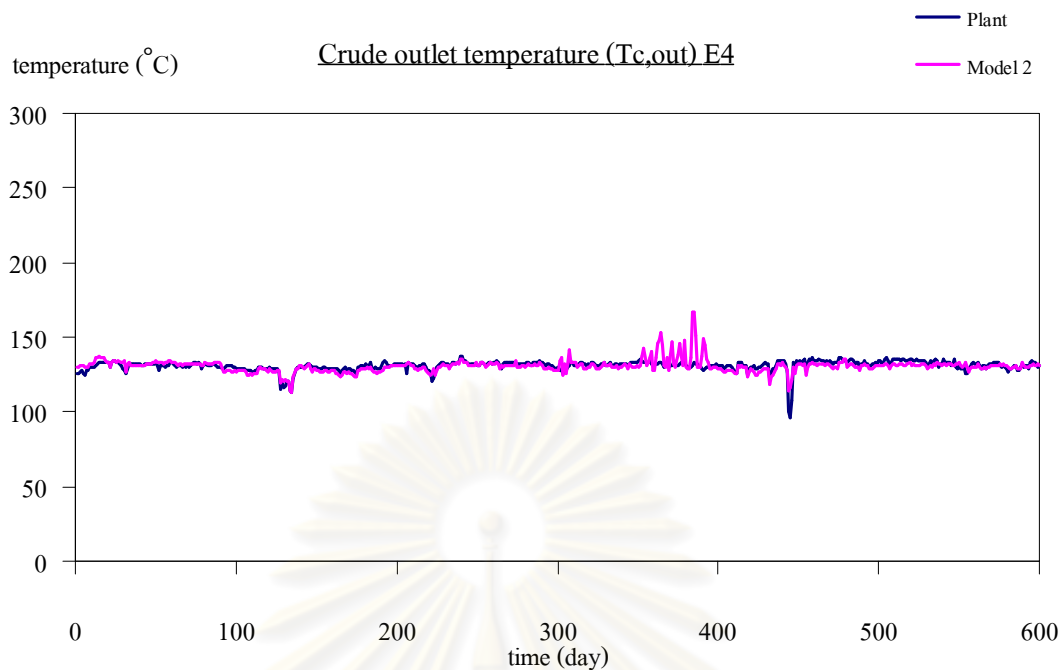
ตารางที่ 5.3 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 3.1443 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

5.1.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4

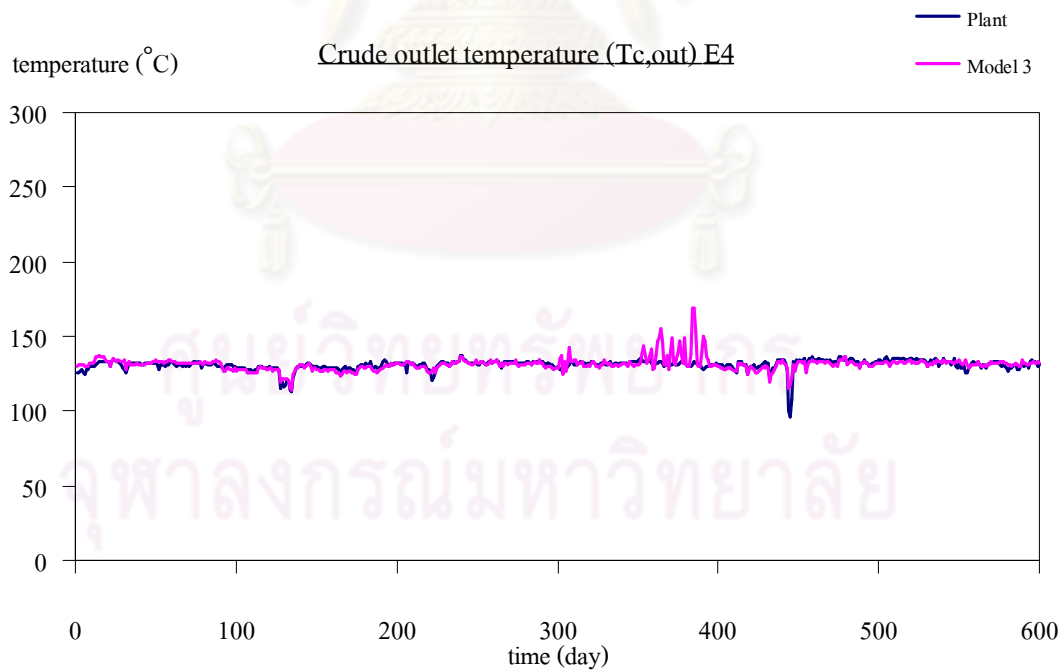


(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง

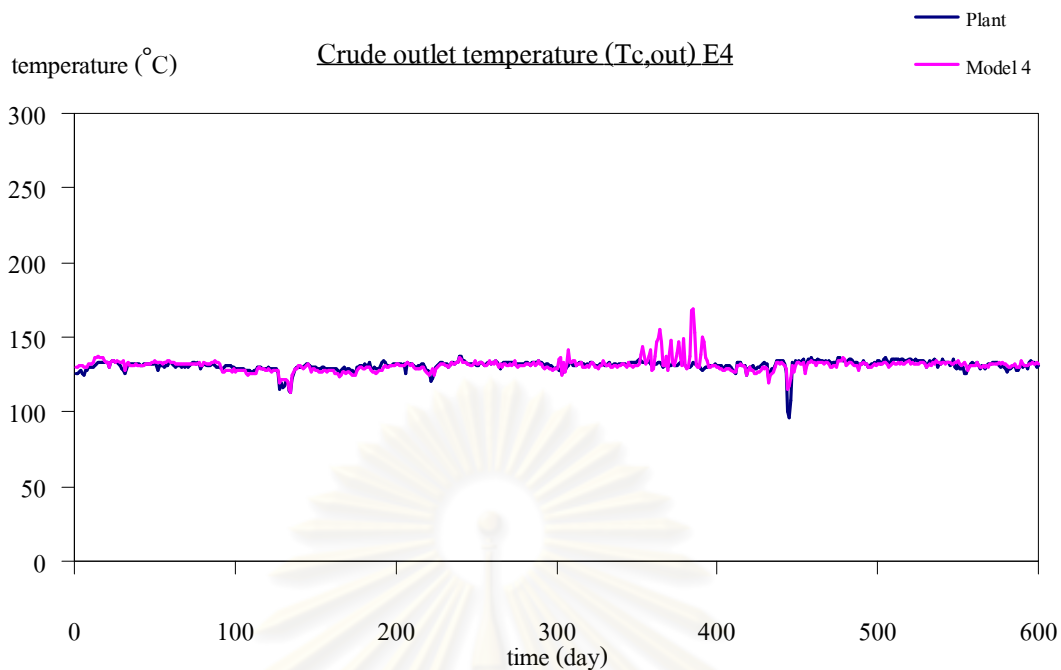
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

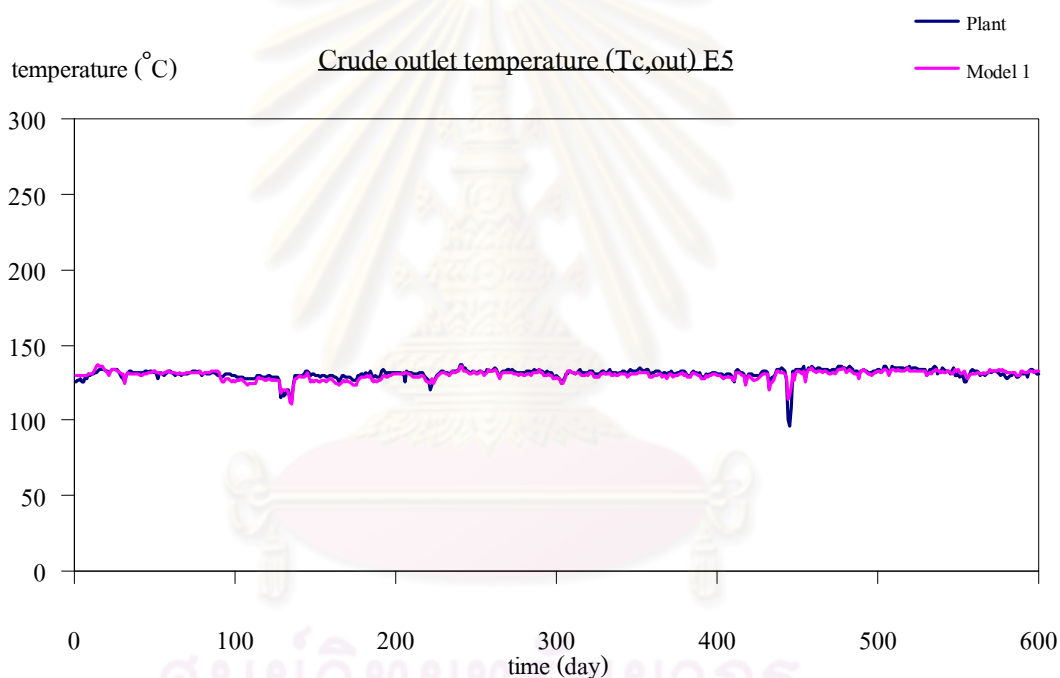
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 5$ day และ $n = -$

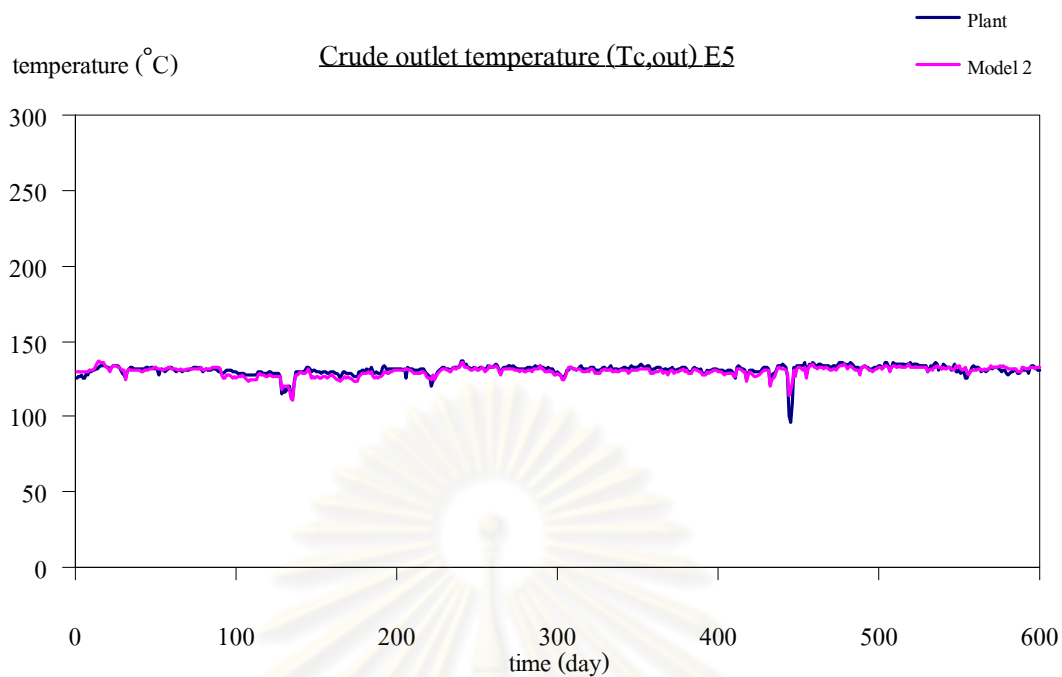
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	3.9525
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	3.9625
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	4.0331
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	4.0133

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 3.9525 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

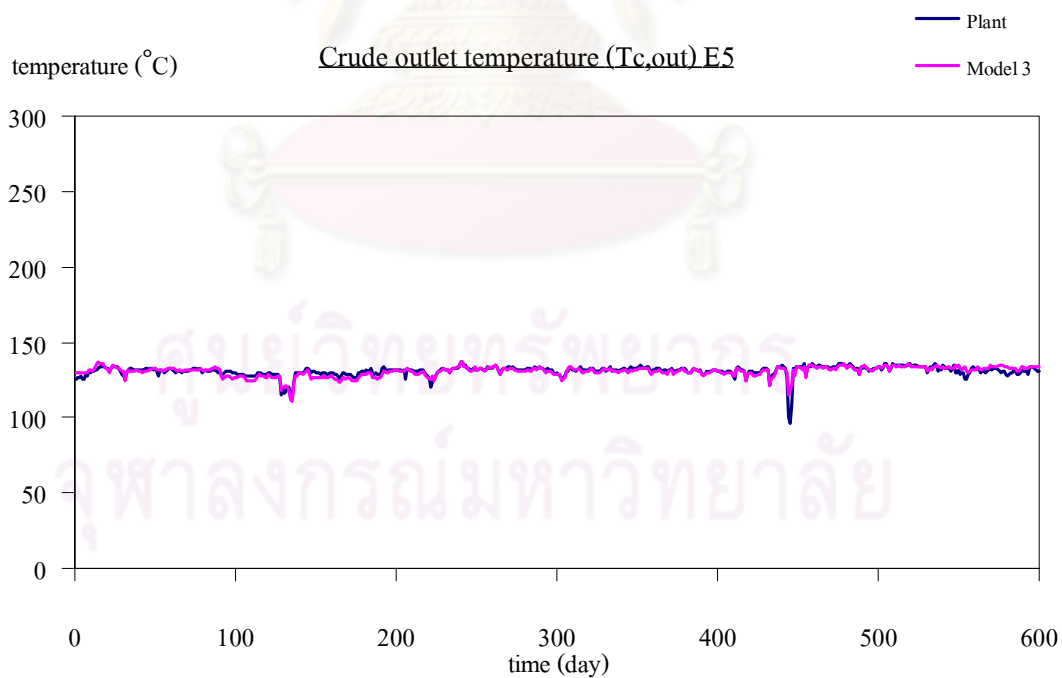
5.1.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5



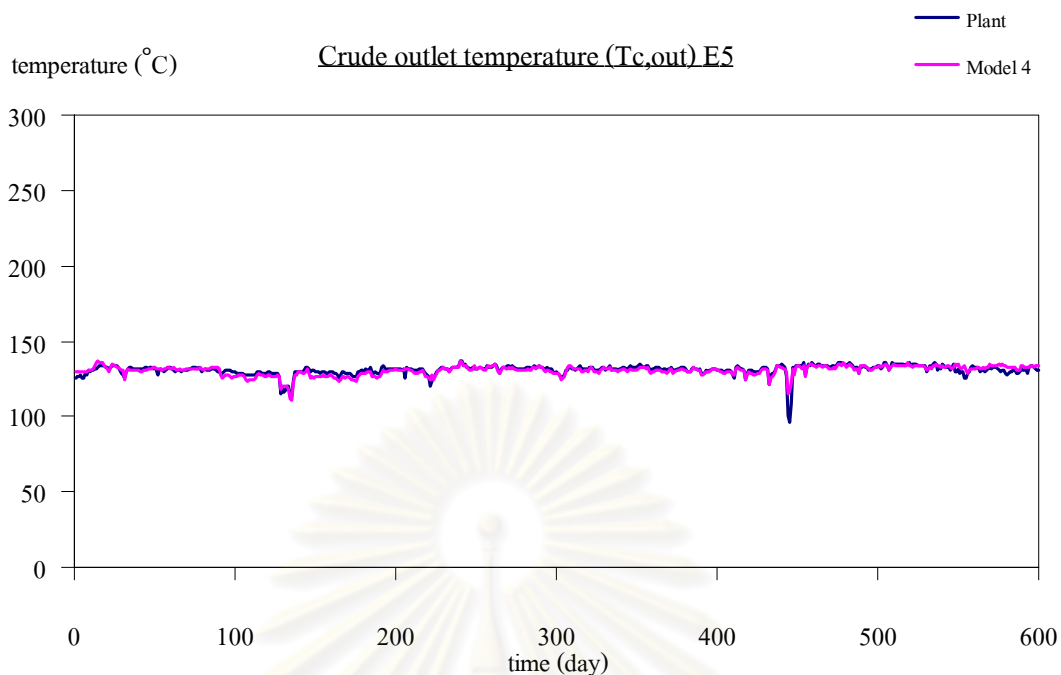
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

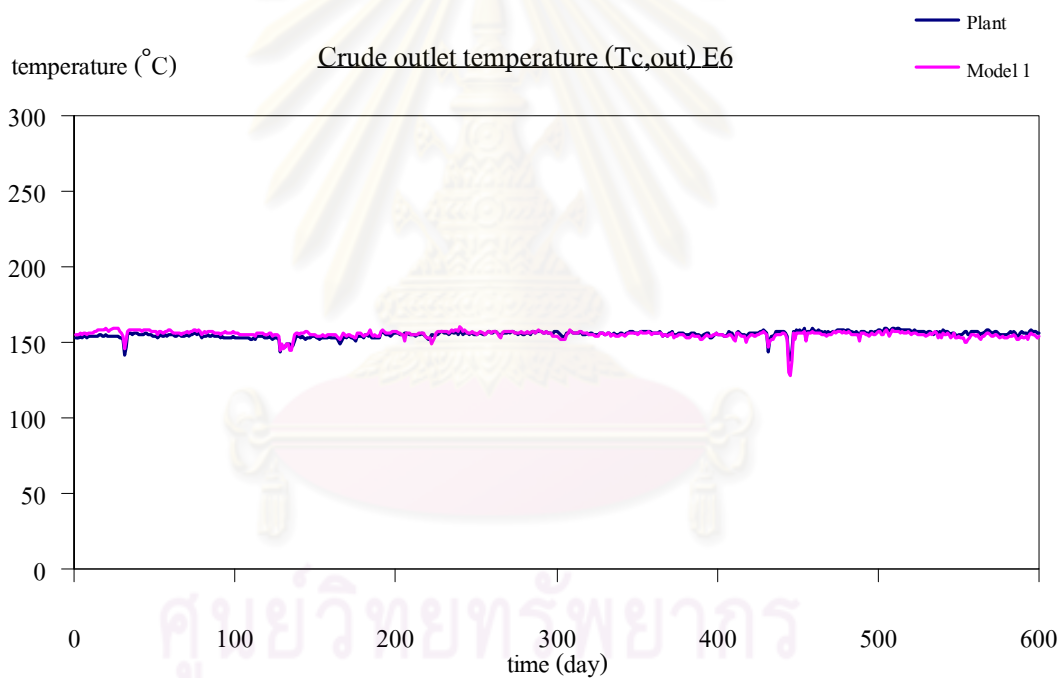
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 6$ day และ $n = -$

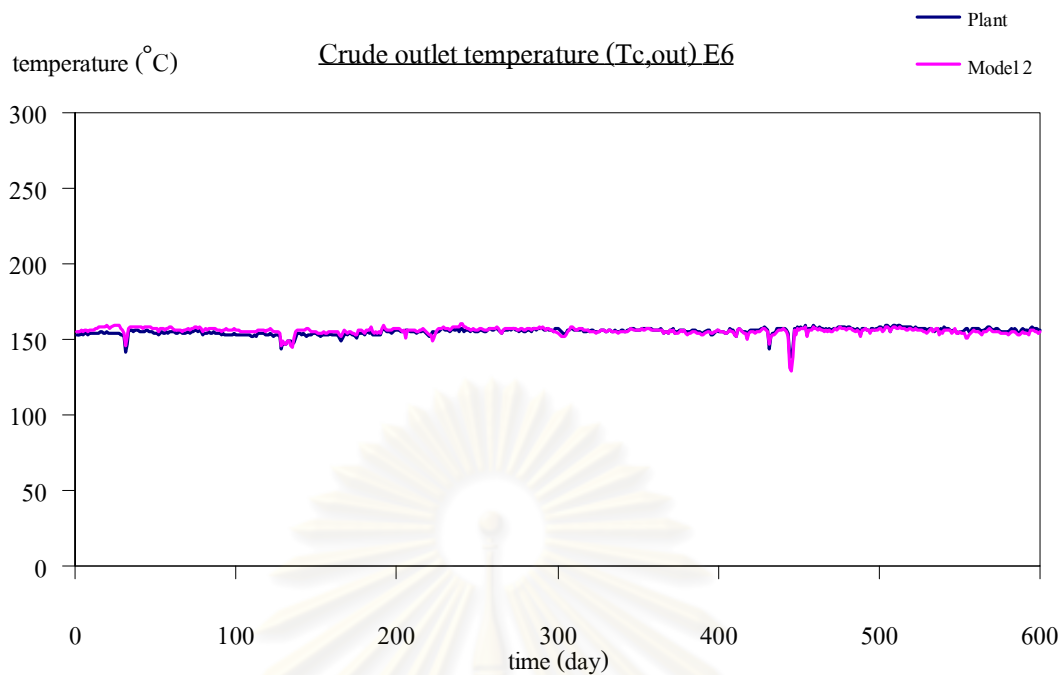
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	2.2724
สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)	2.2724
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	2.1269
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	2.1507

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.5 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.1269 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลง (Falling-rate fouling model)

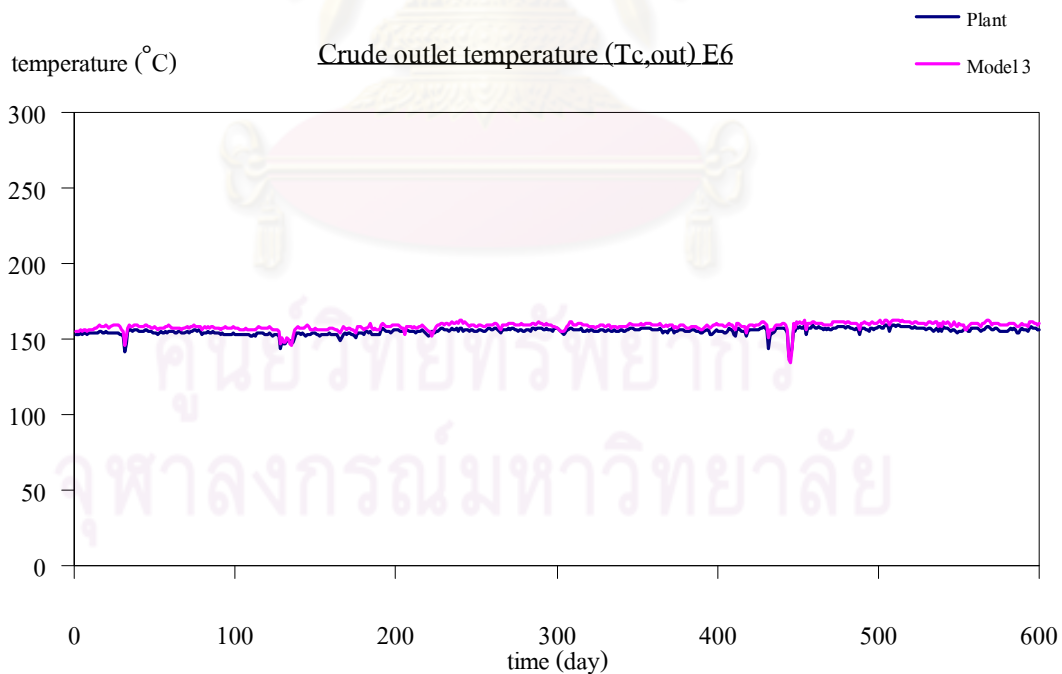
5.1.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6



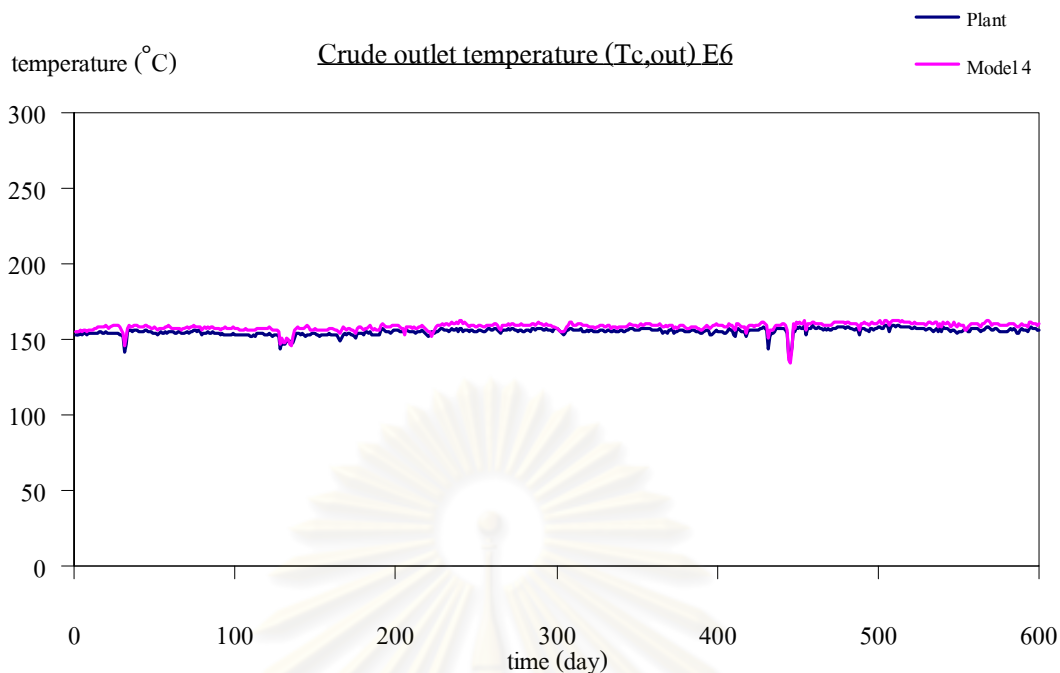
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

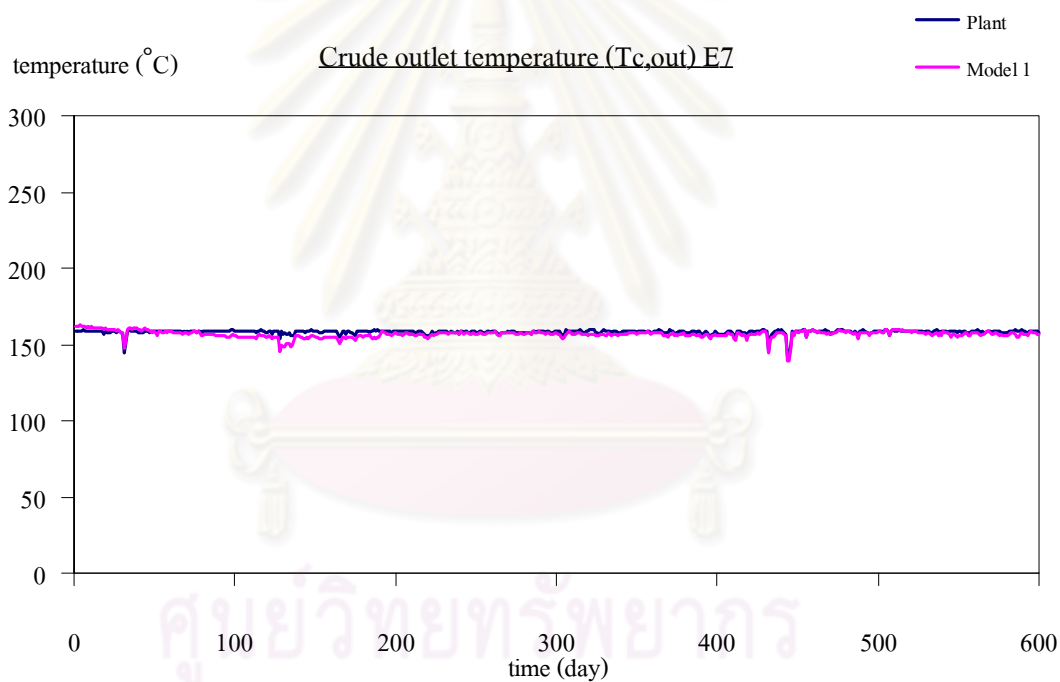
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 1$ day และ $n = 0.977$

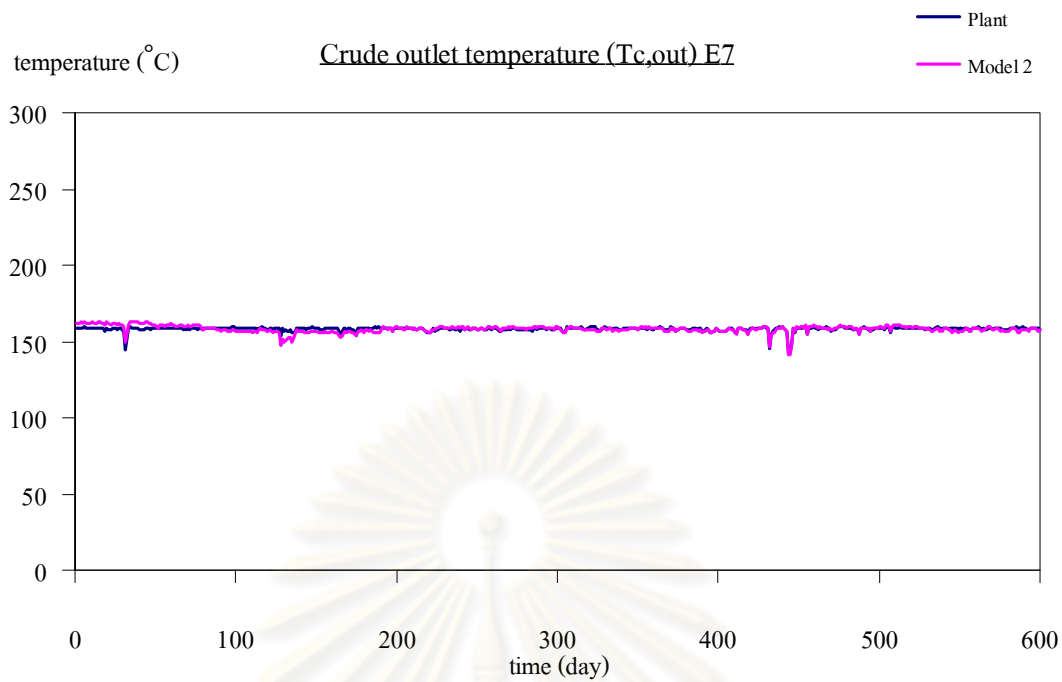
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	2.0018
สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)	1.8765
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	3.3433
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	3.3319

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.6 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลังมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.8765 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)

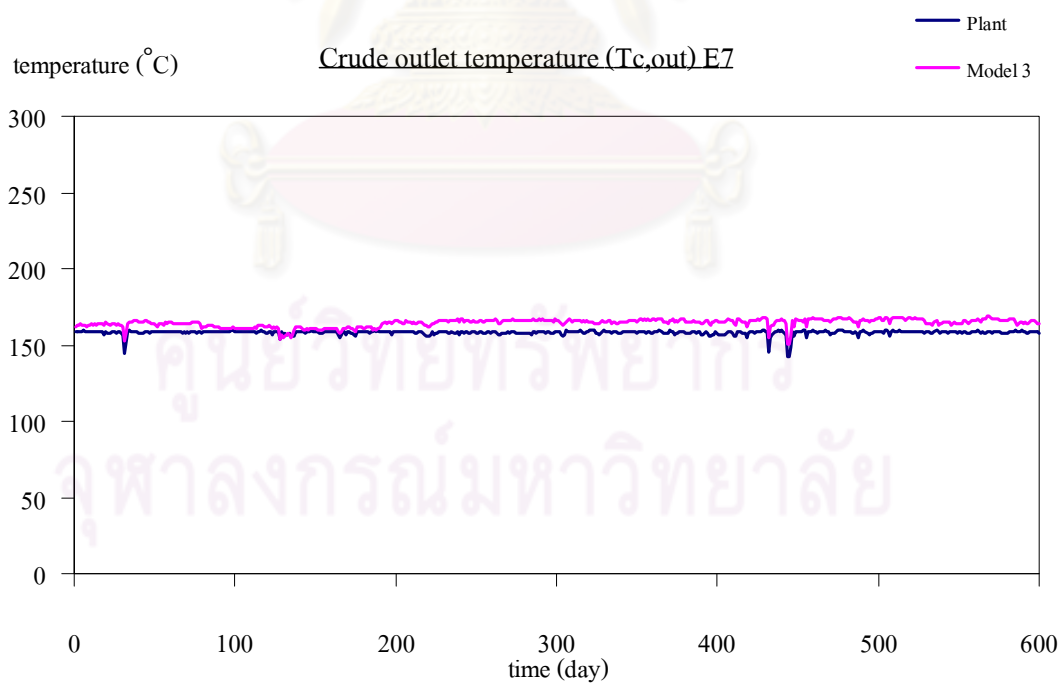
5.1.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7



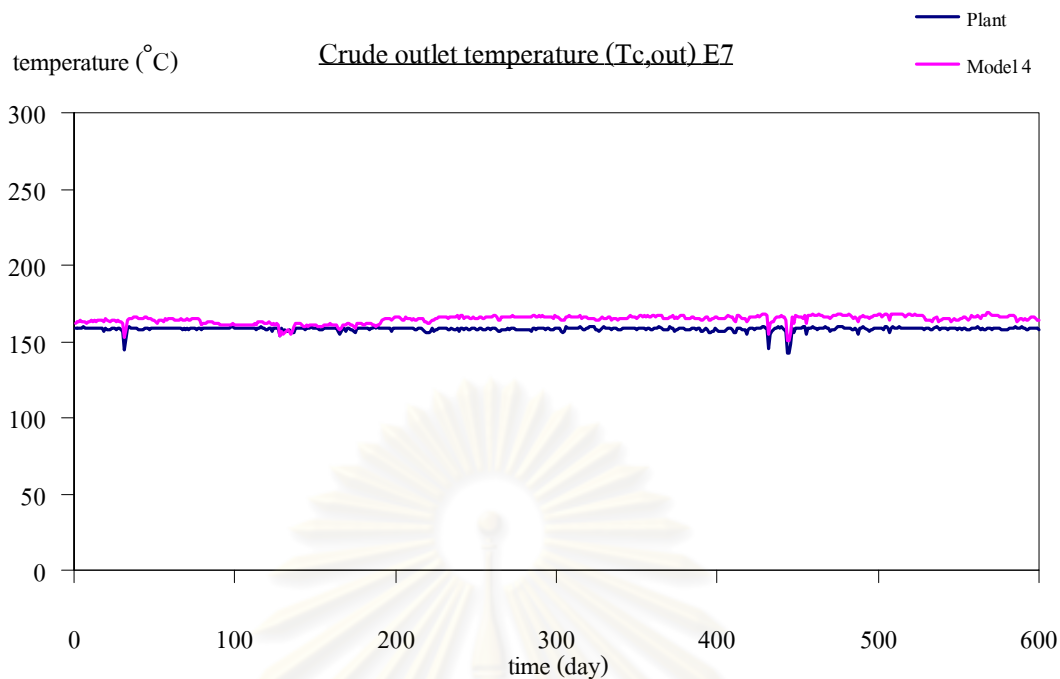
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

รูปที่ 5.7 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

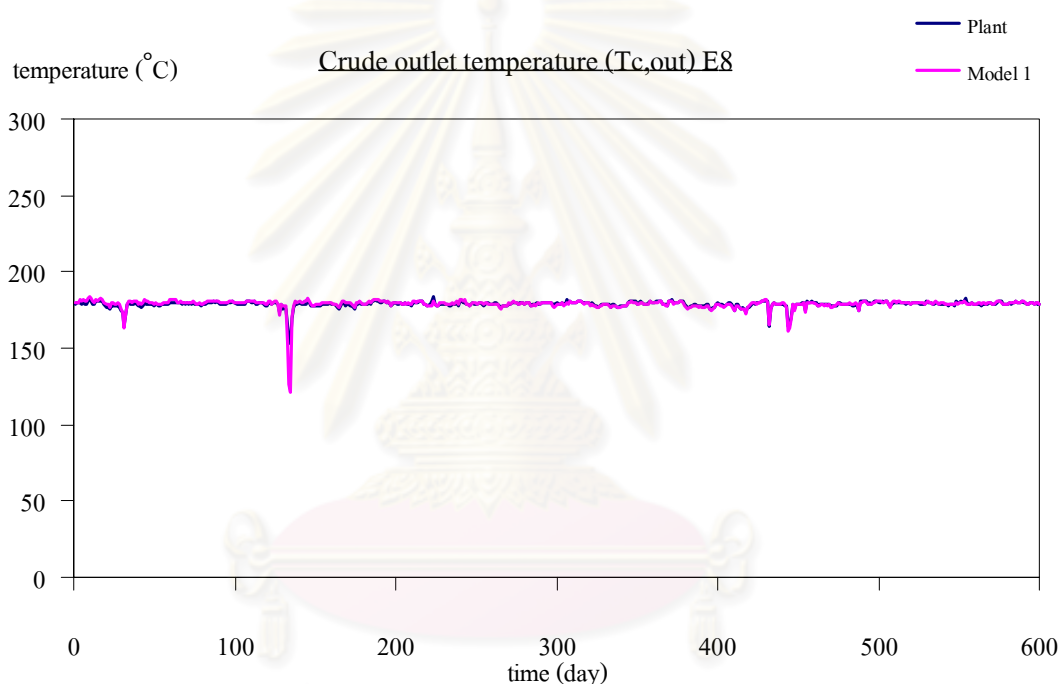
ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.009$ day และ $n = 0.89$

	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	2.2807
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	1.7087
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	6.5181
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	6.5748

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงใน

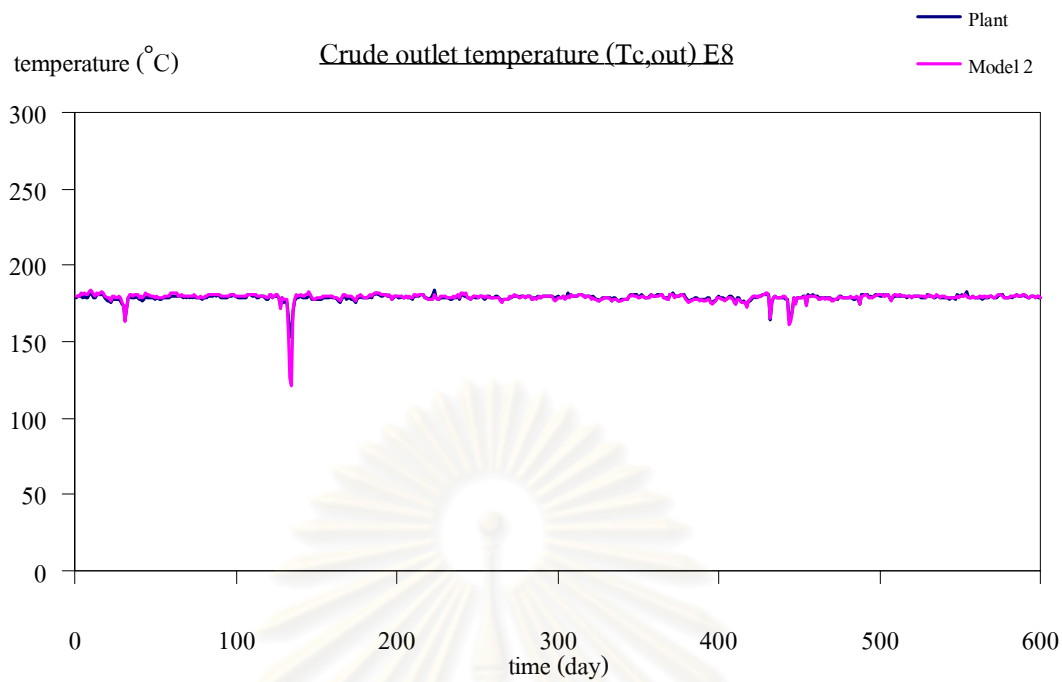
ตารางที่ 5.7 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลังมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.7087 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)

5.1.8 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8

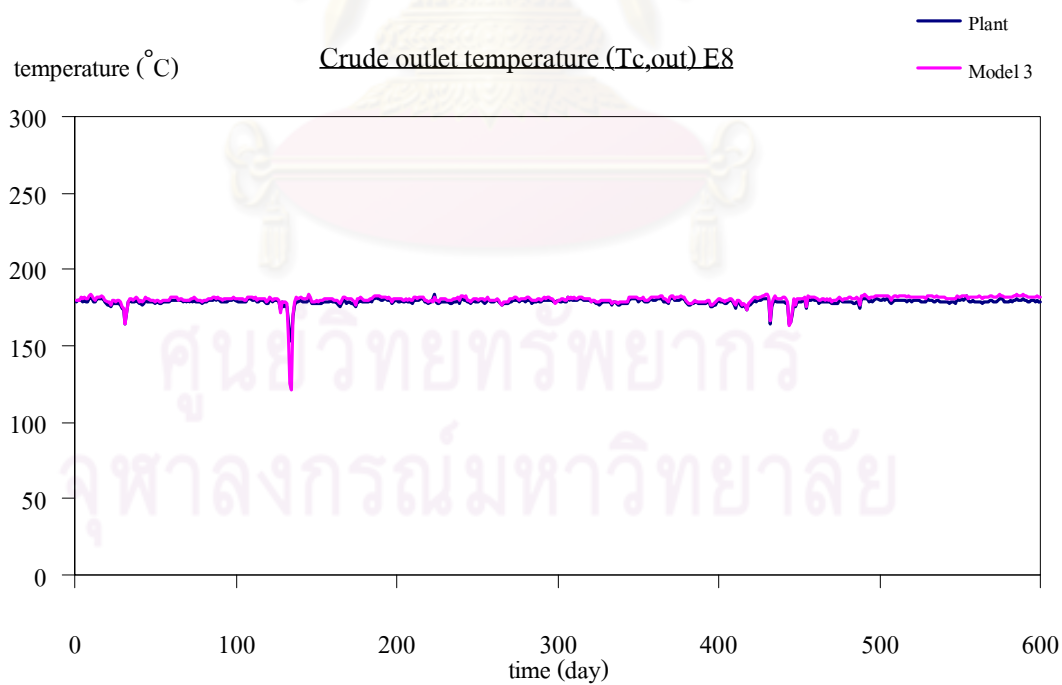


(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง

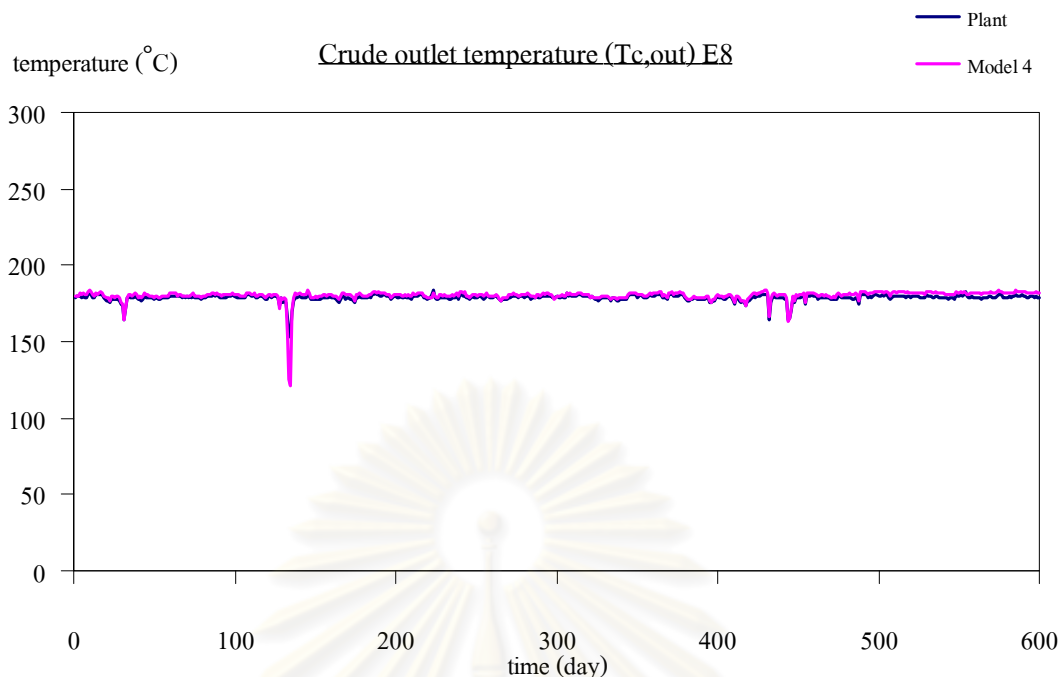
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฏยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

รูปที่ 5.8 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

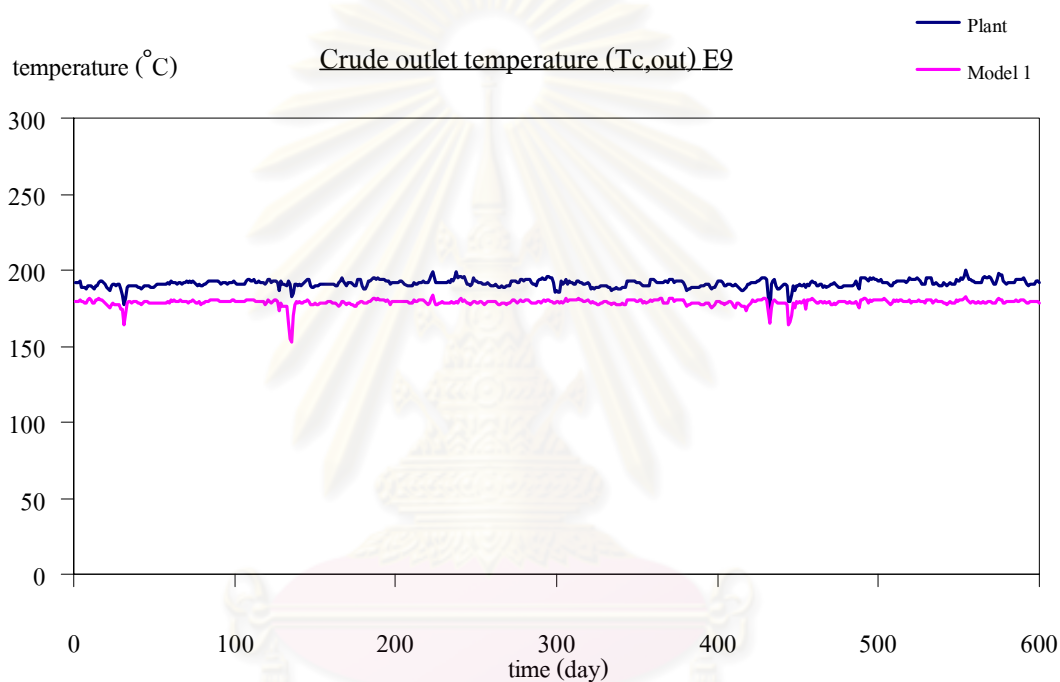
ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 2.6$ day และ $n = -$

	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	1.9702
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	1.9748
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	2.5914
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	2.5231

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงใน

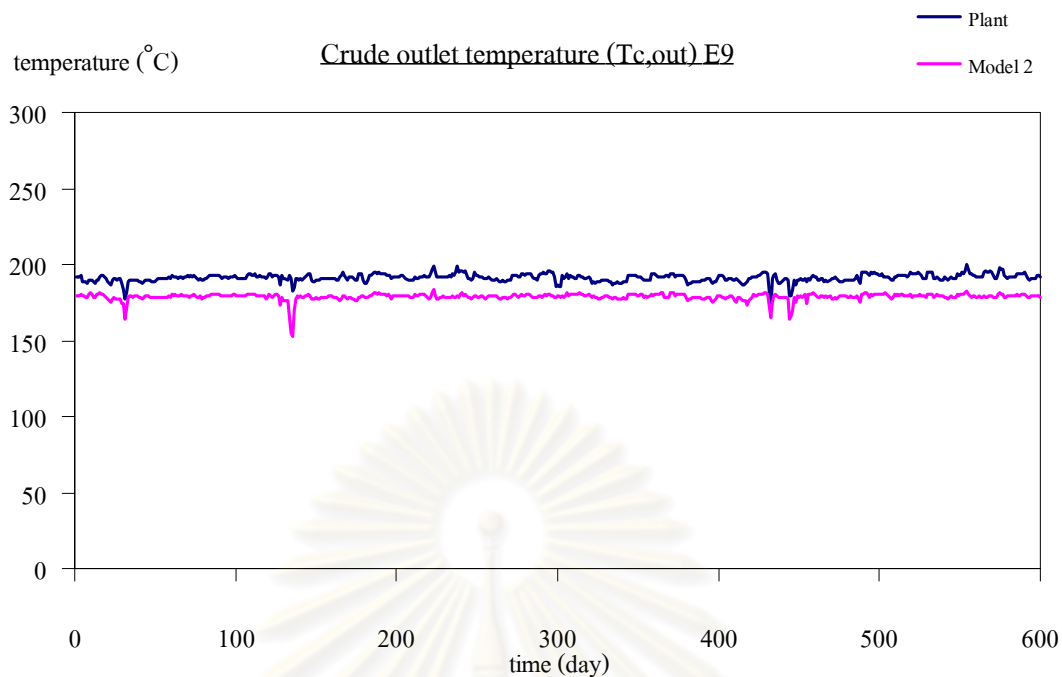
ตารางที่ 5.8 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.9702 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model)

5.1.9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9

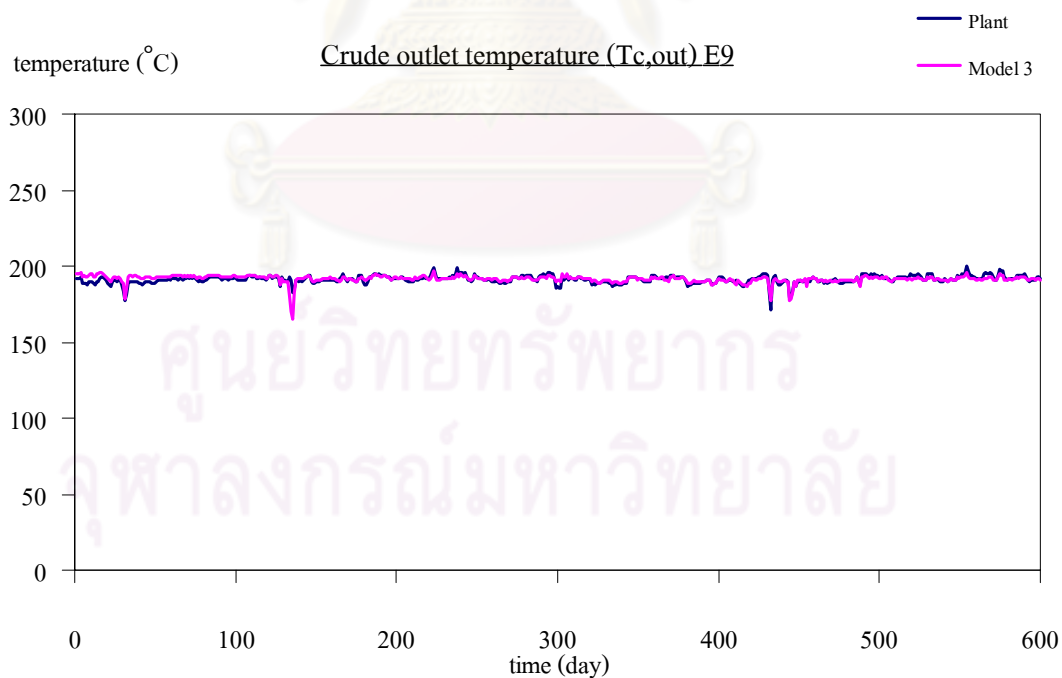


(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง

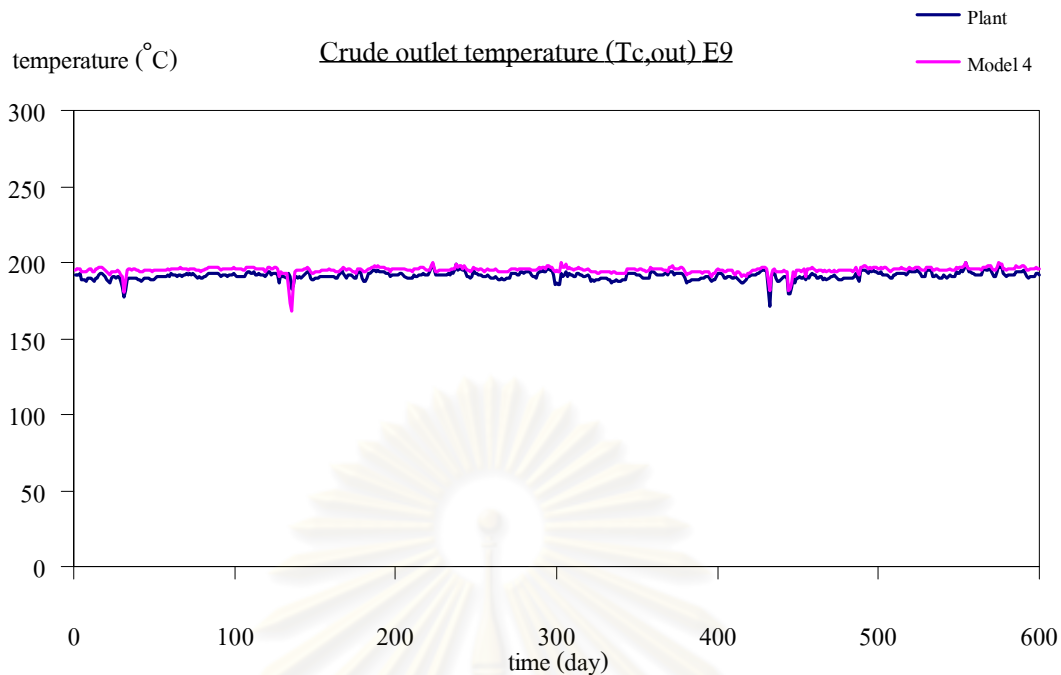
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฏยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

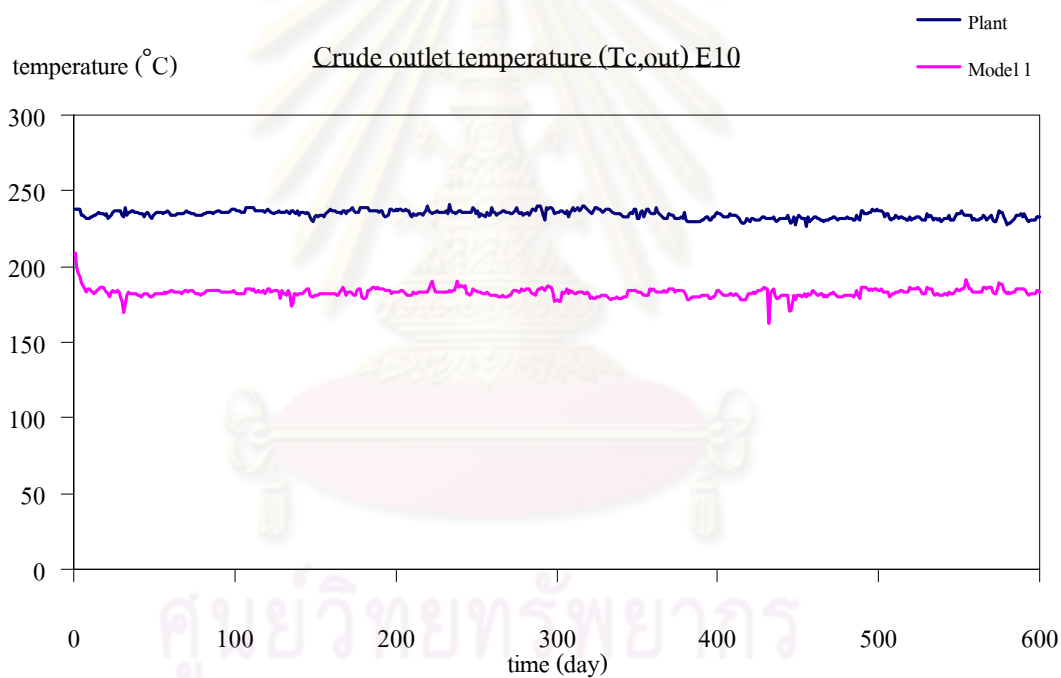
รูปที่ 5.9 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.0000000000000032$ day และ $n = -$

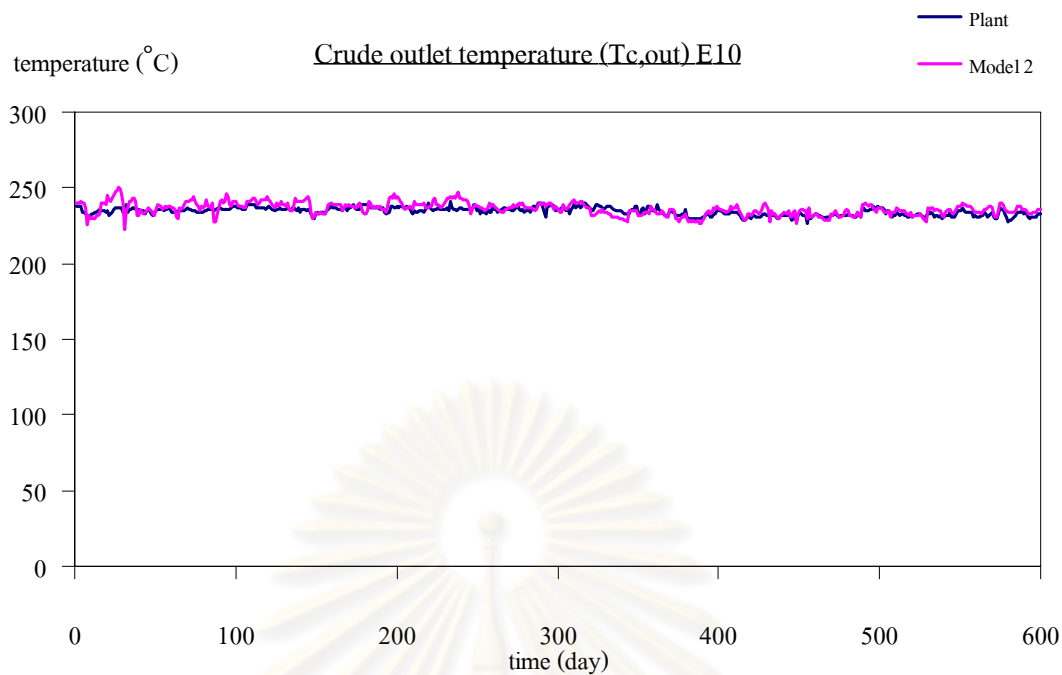
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	12.6375
สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)	12.6375
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	2.0875
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	4.1617

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.9 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.0875 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลง (Falling-rate fouling model)

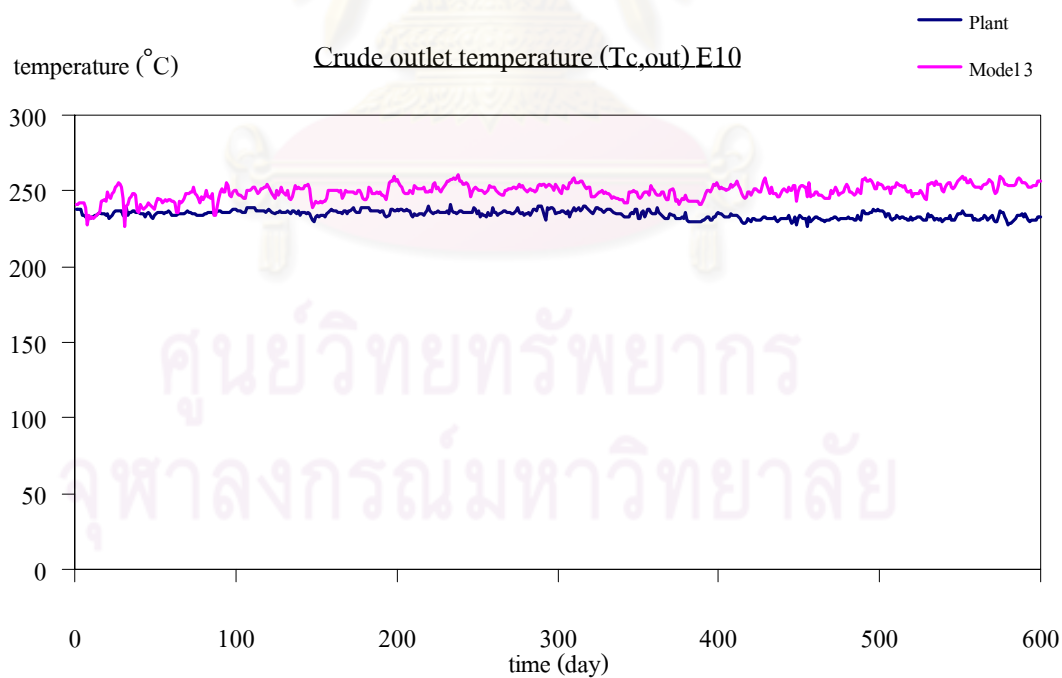
5.1.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10



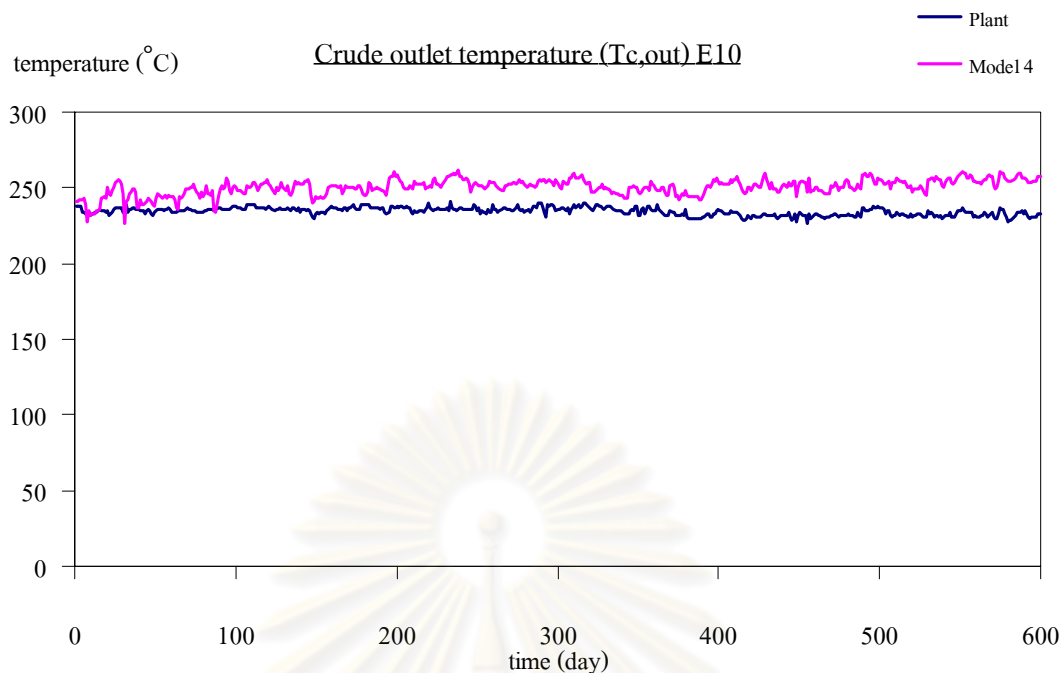
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

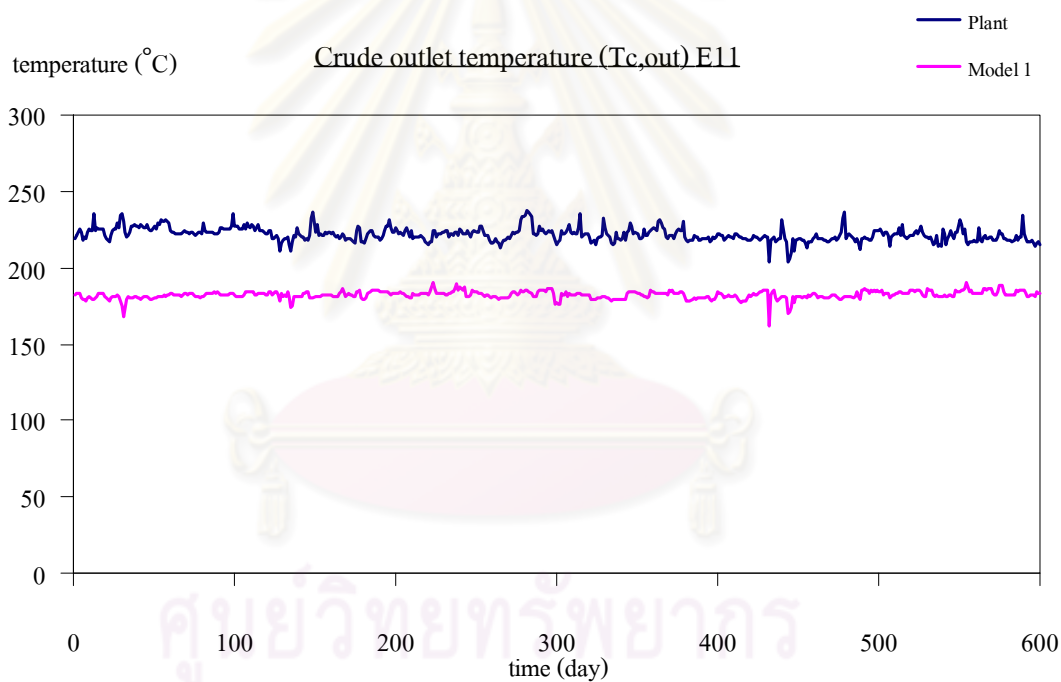
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.0002$ day และ $n = 0.5$

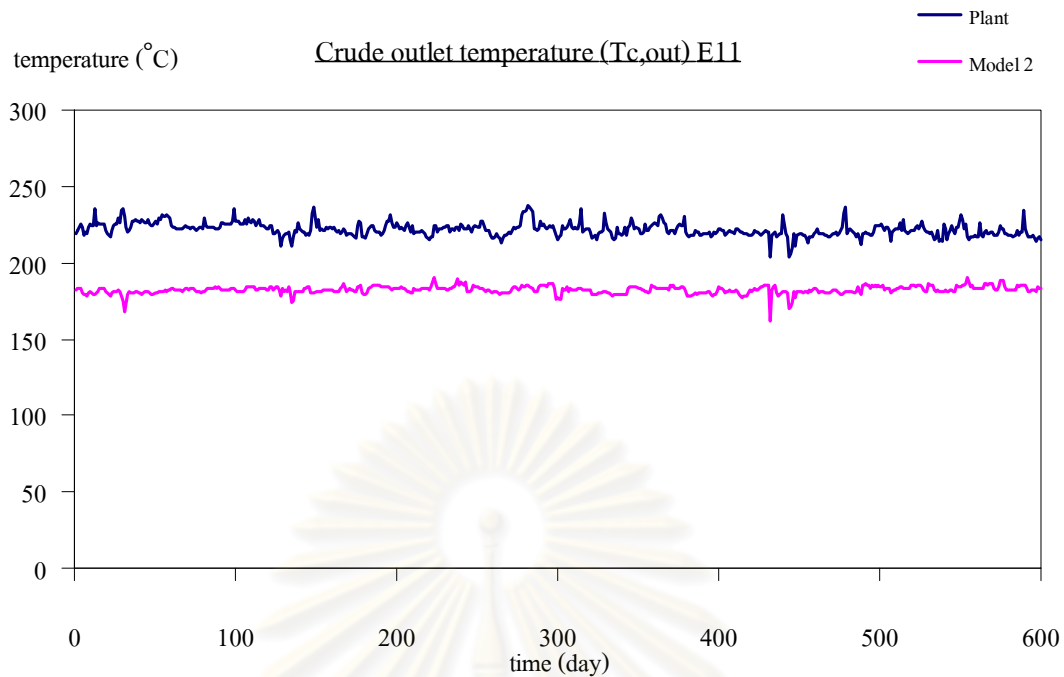
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	51.7420
สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)	3.7013
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	16.0545
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	17.0163

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.10 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลังมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 3.7013 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

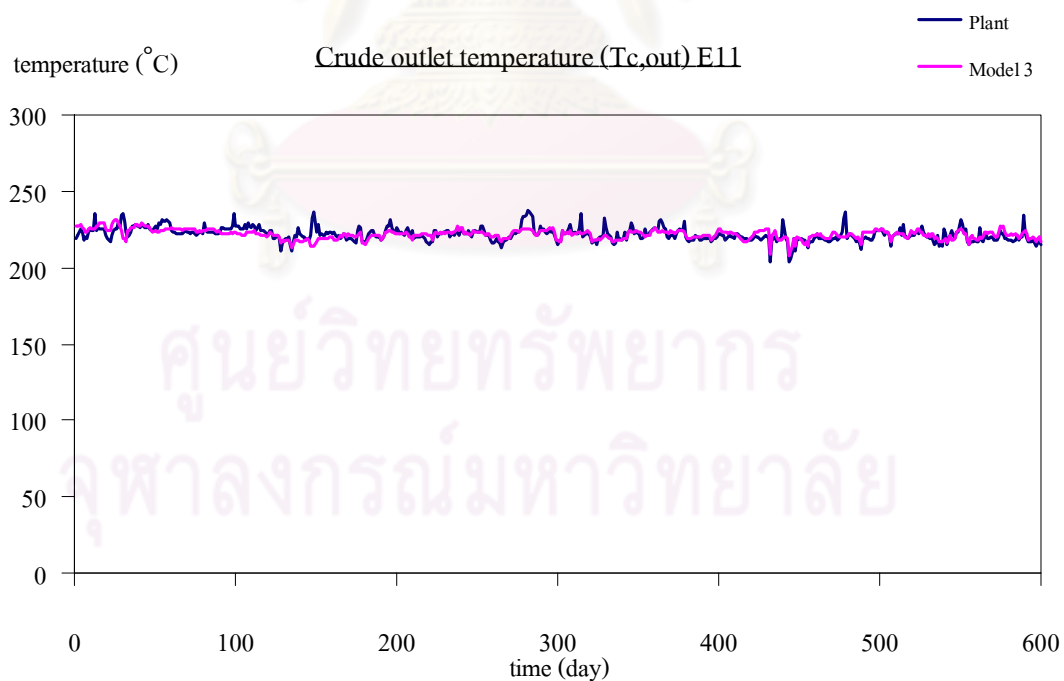
5.1.11 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11



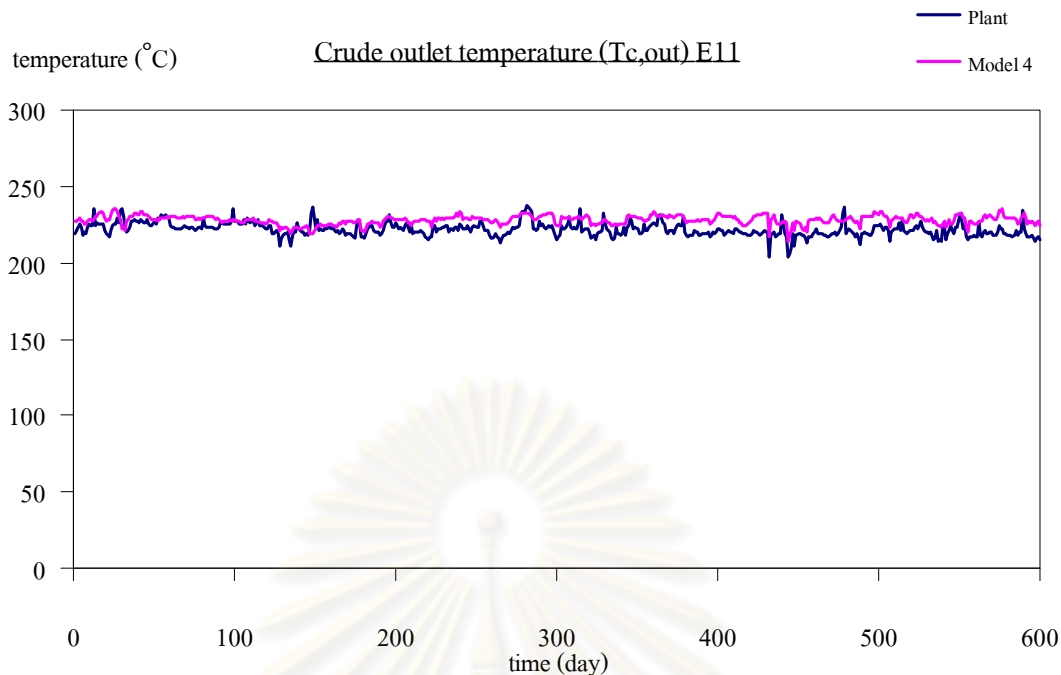
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

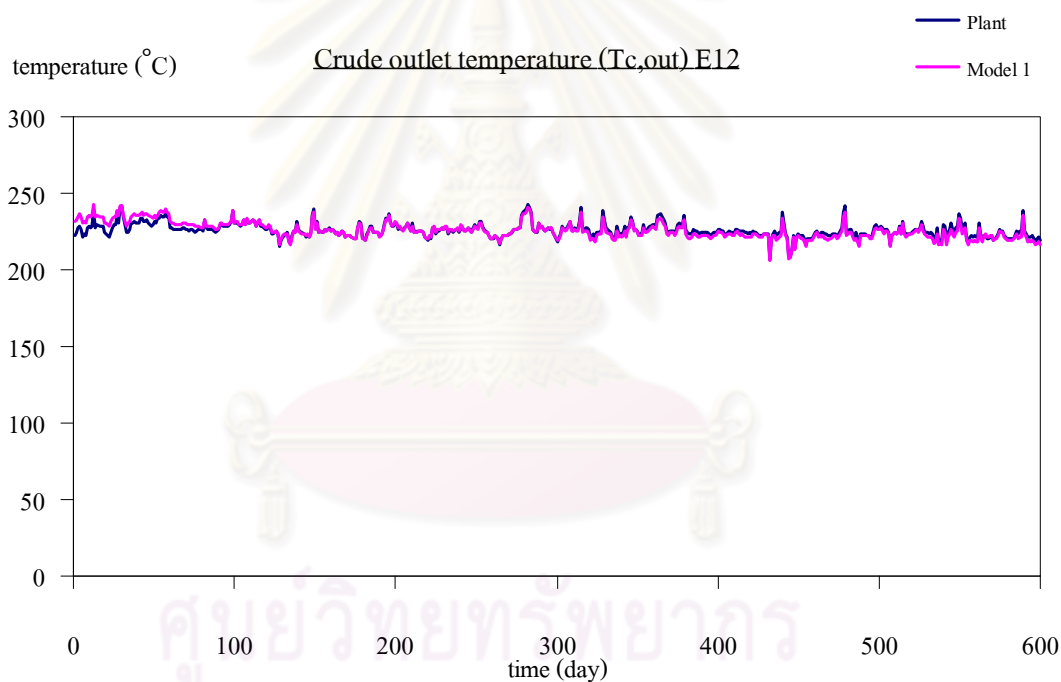
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.00000000009$ day และ $n = -$

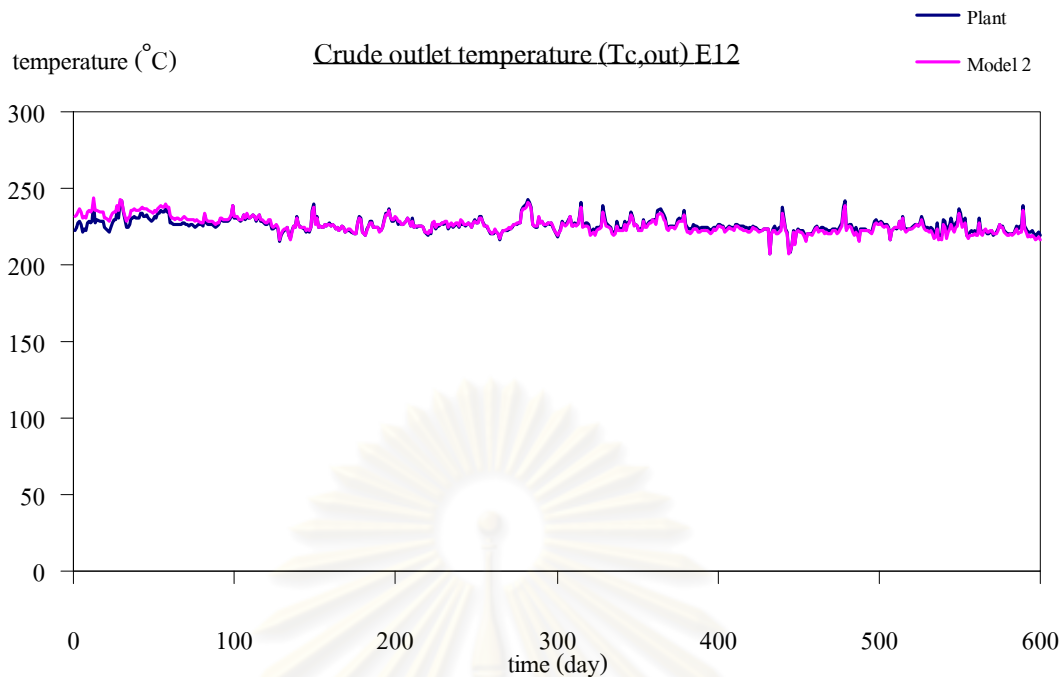
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	39.8001
สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)	39.8001
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	3.6787
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	7.4157

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.11 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 3.6787 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลง (Falling-rate fouling model)

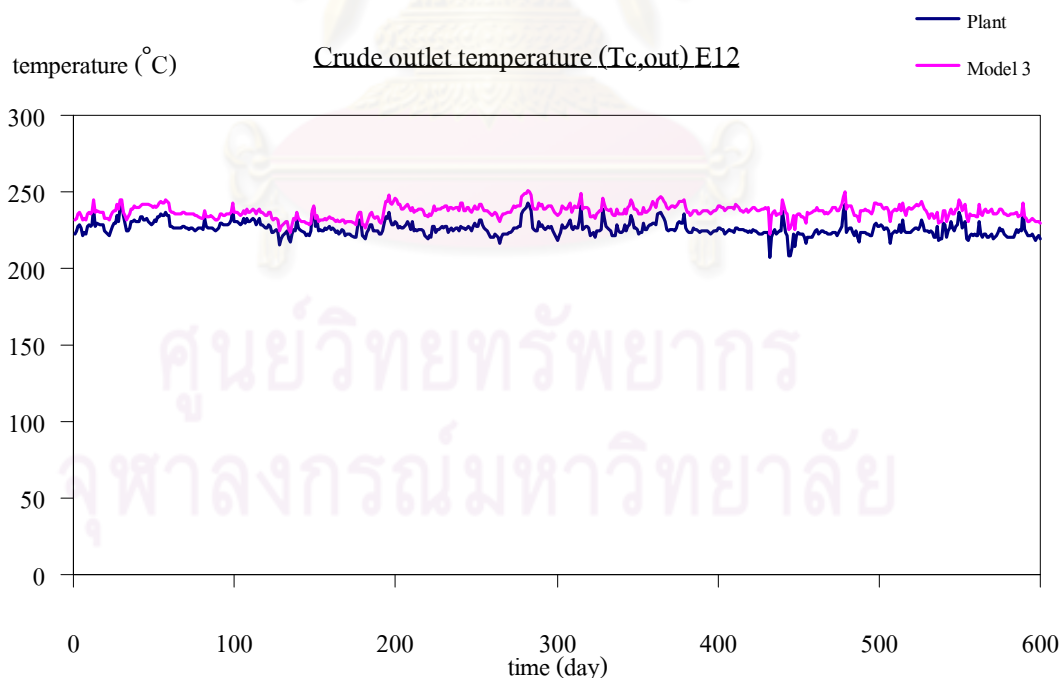
5.1.12 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12



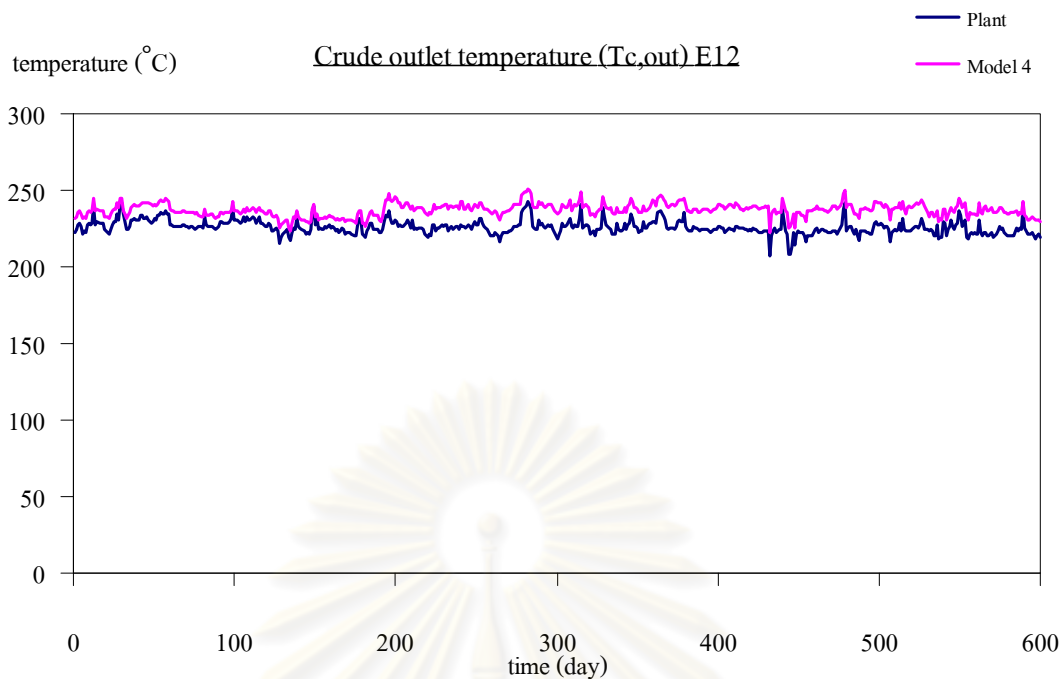
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

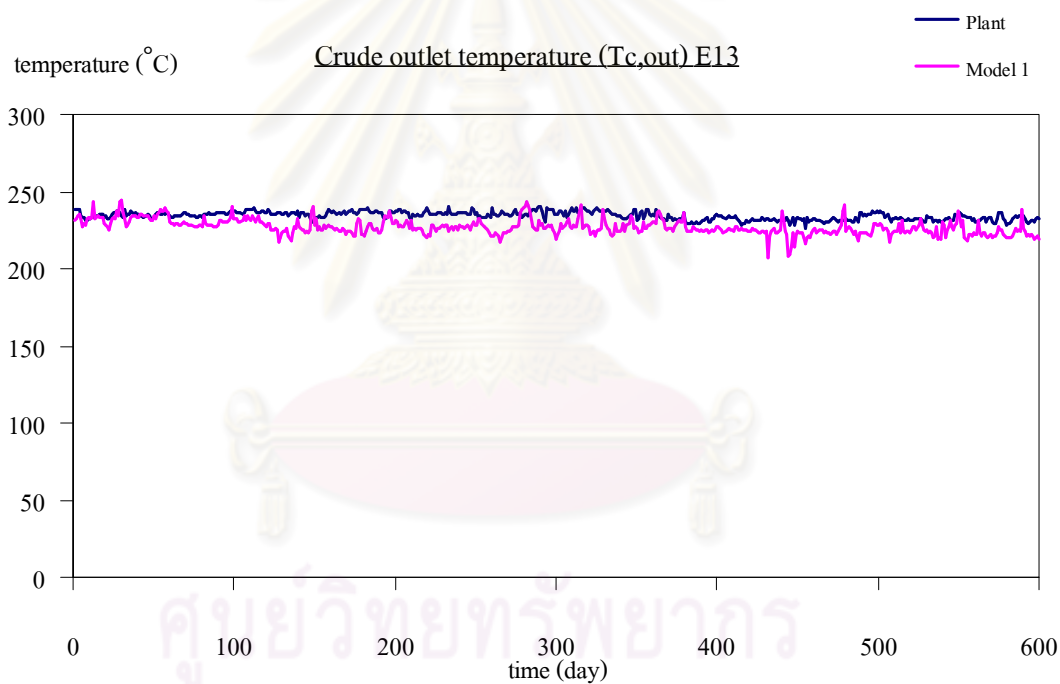
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.12 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.02$ day และ $n = 0.99$

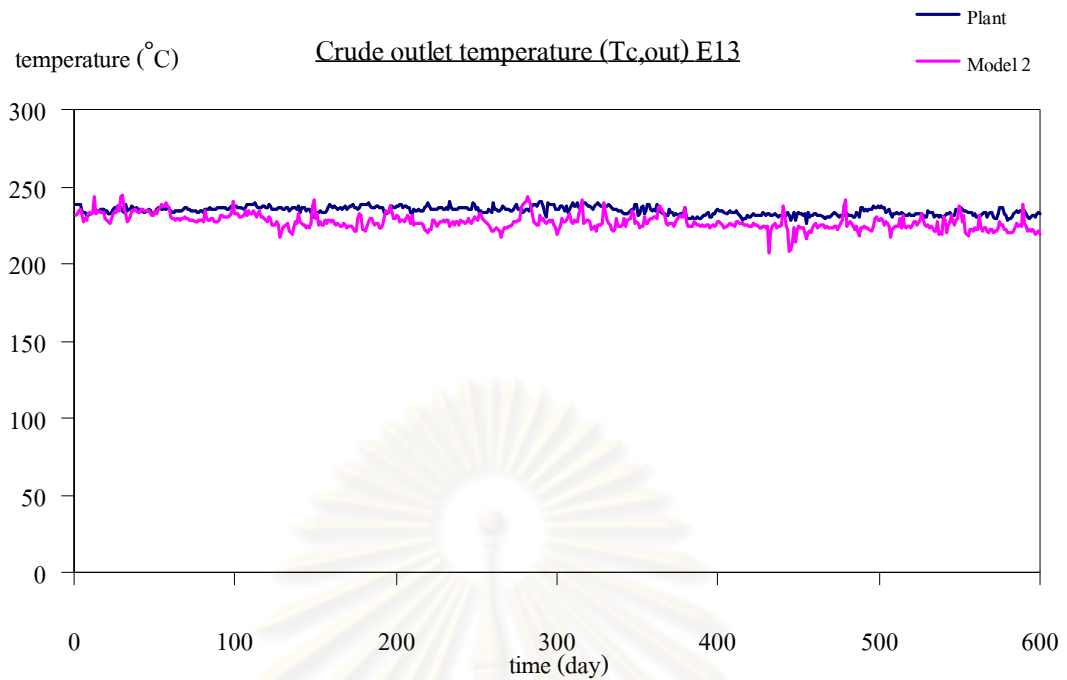
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	2.3827
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	2.3593
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	11.5948
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	11.6841

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.12 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลังมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.3593 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

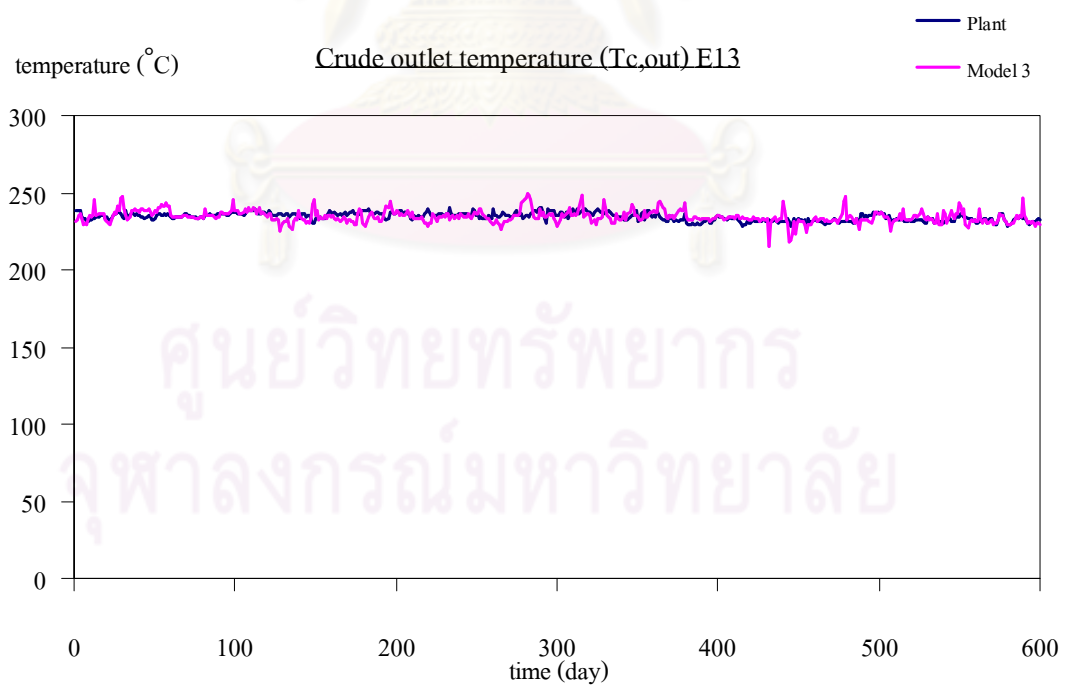
5.1.13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13



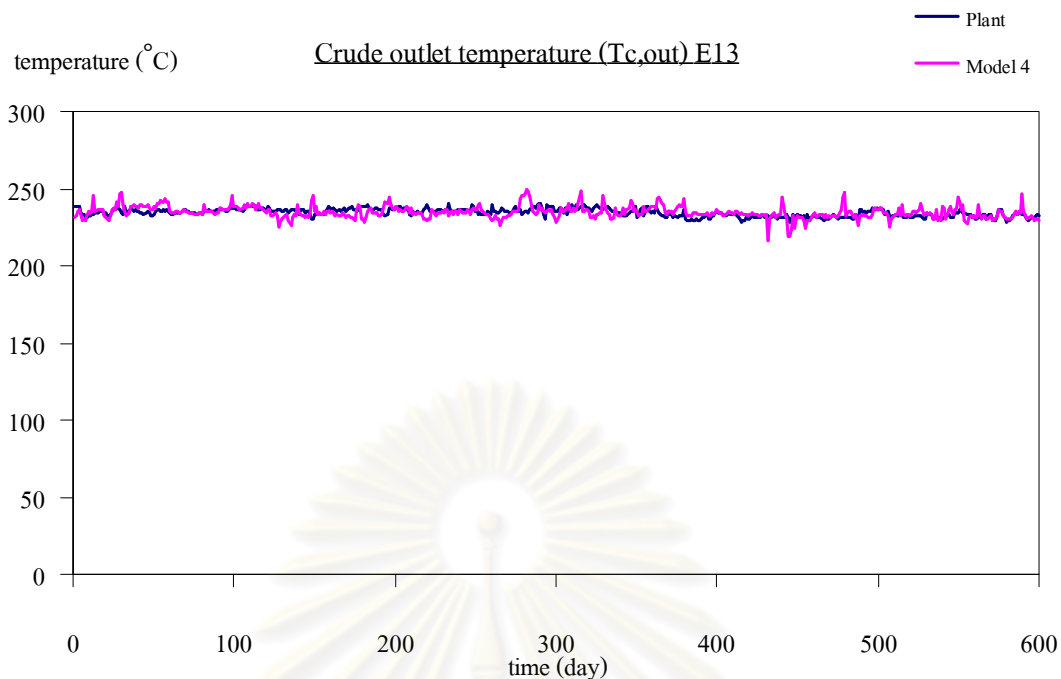
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

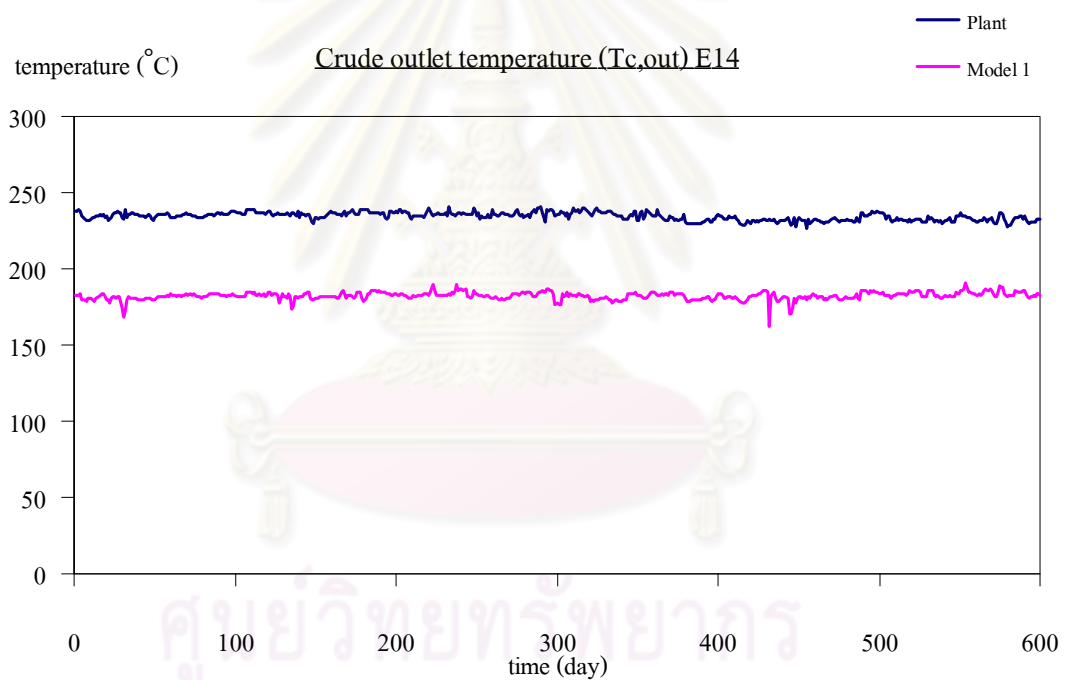
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.13 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.0077$ day และ $n = -$

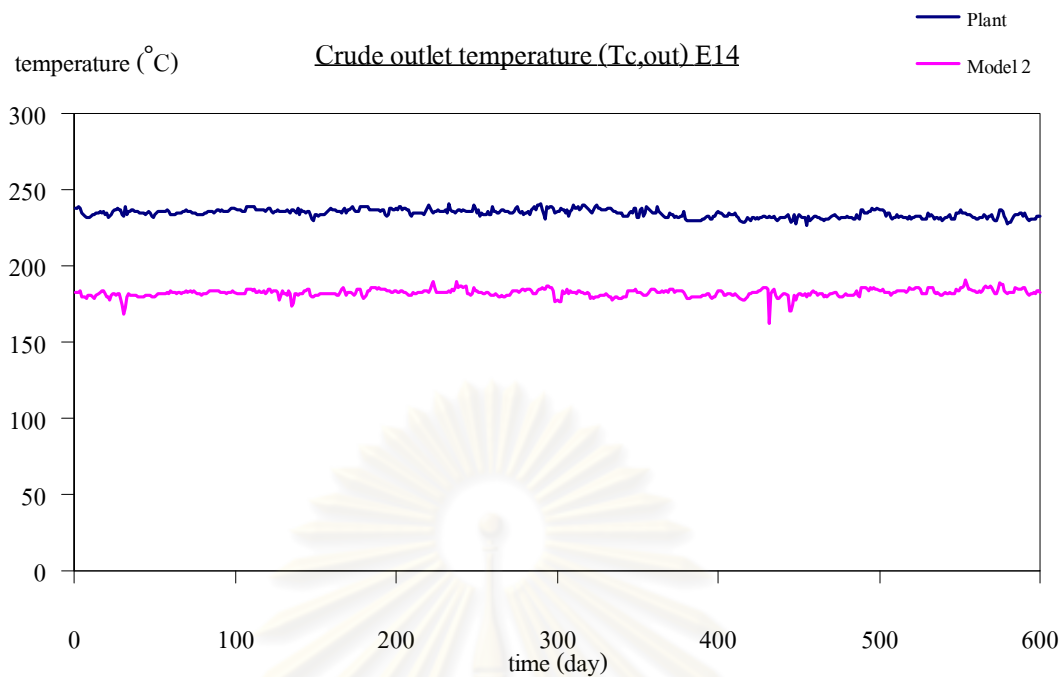
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	8.8048
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	8.7434
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	4.0653
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	4.0664

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.13 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 4.0653 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลง (Falling-rate fouling model)

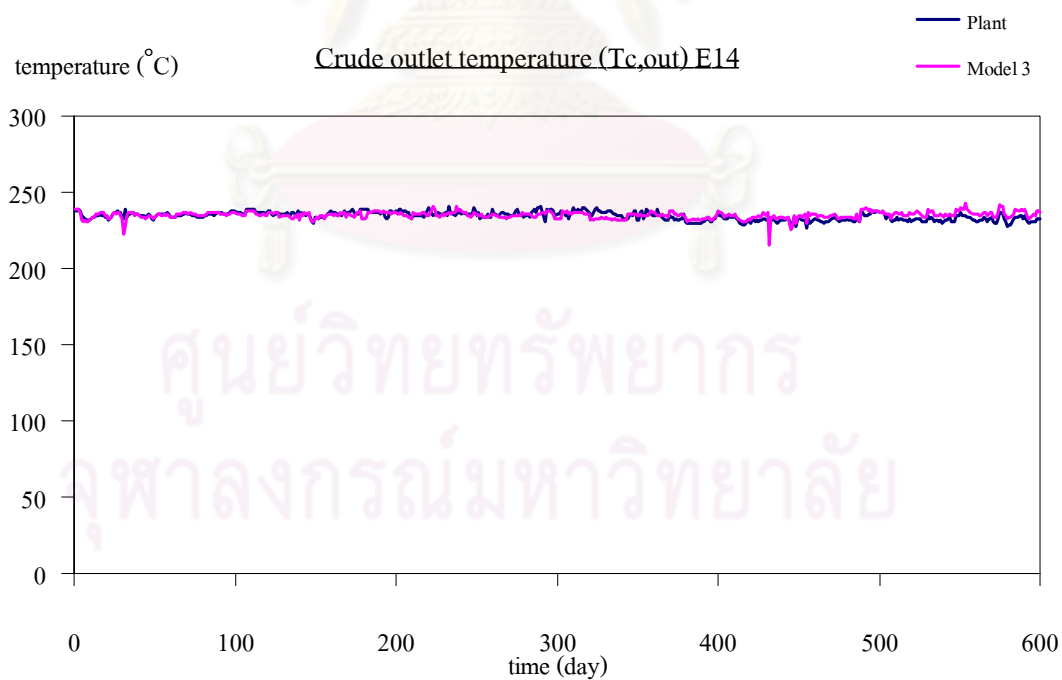
5.1.14 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14



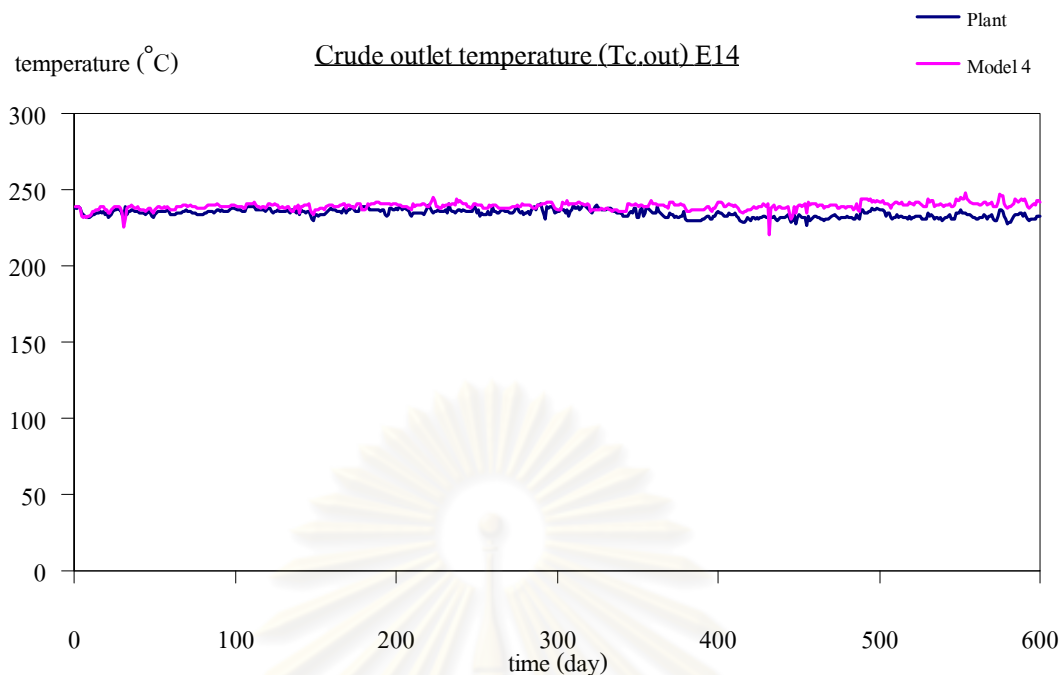
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

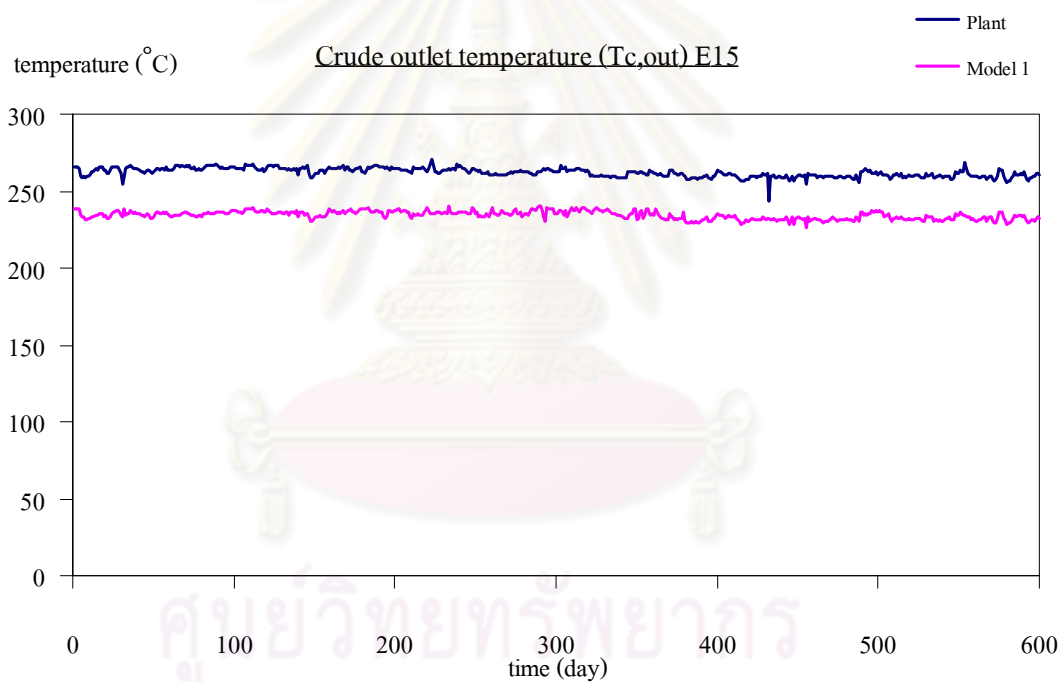
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.14 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.00000000000009$ day และ $n = -$

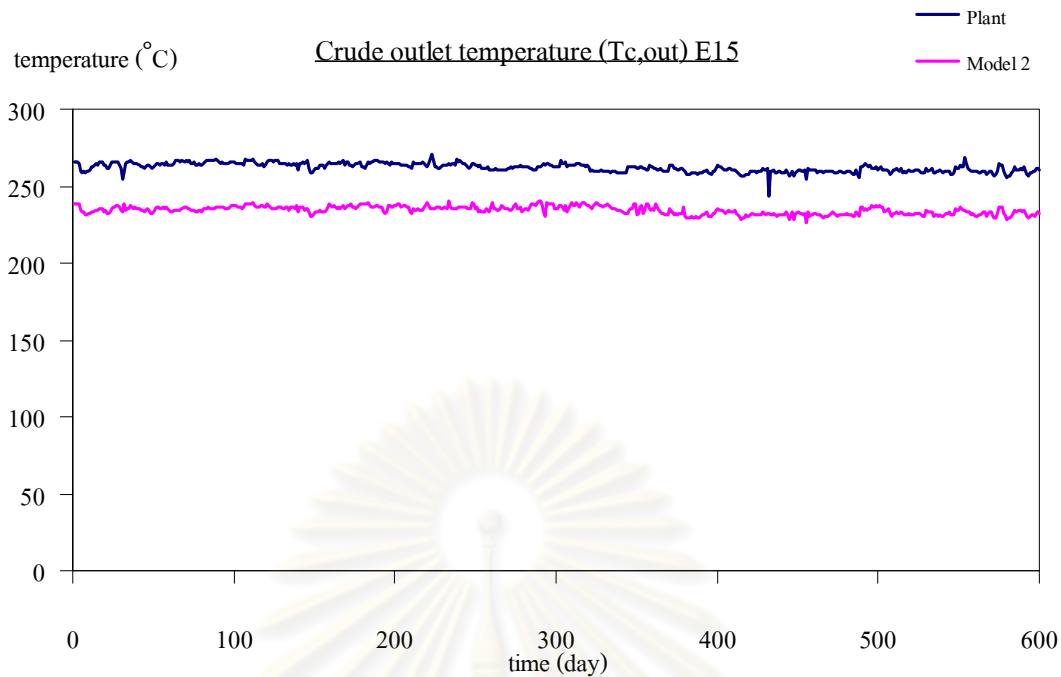
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	52.2636
สมการแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model)	52.2636
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	2.7362
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	5.6336

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.14 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 2.7362 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลง (Falling-rate fouling model)

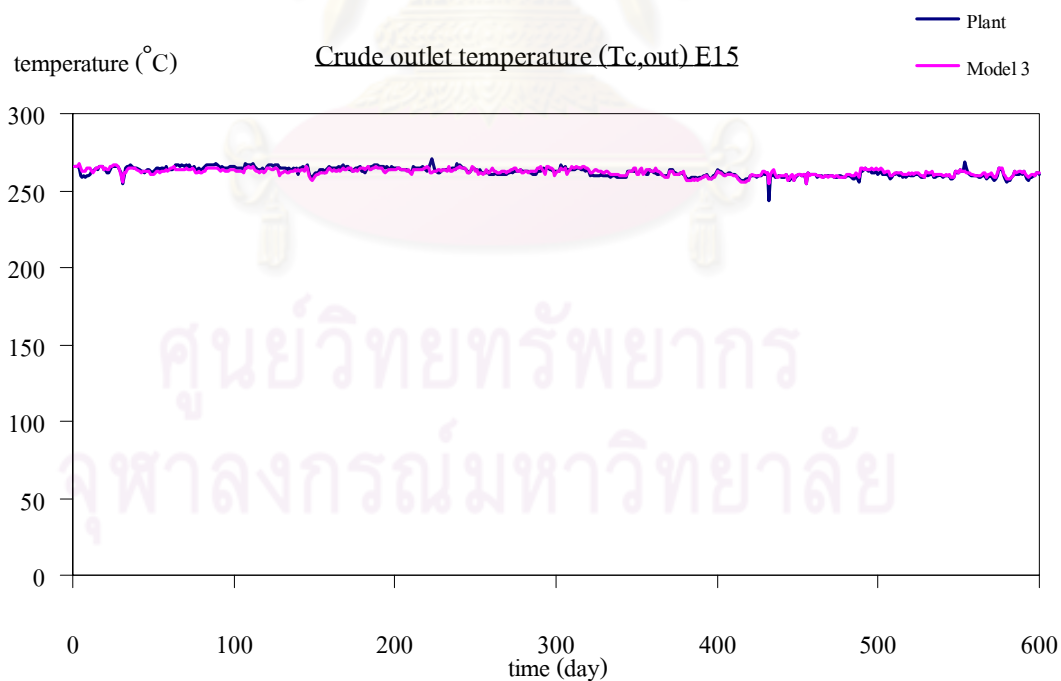
5.1.15 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15



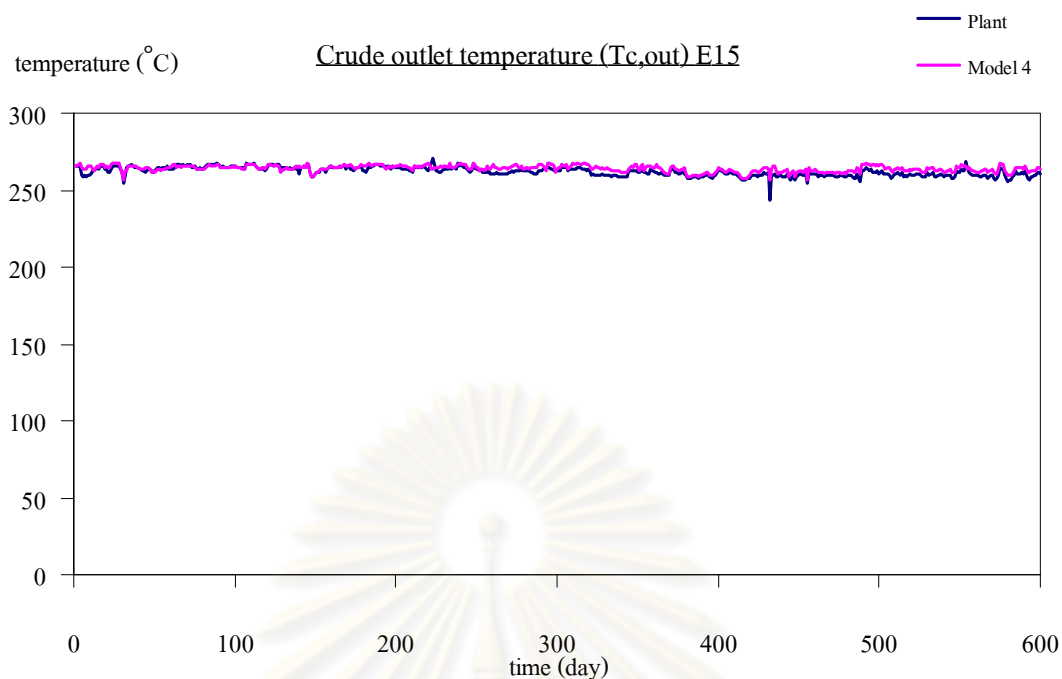
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

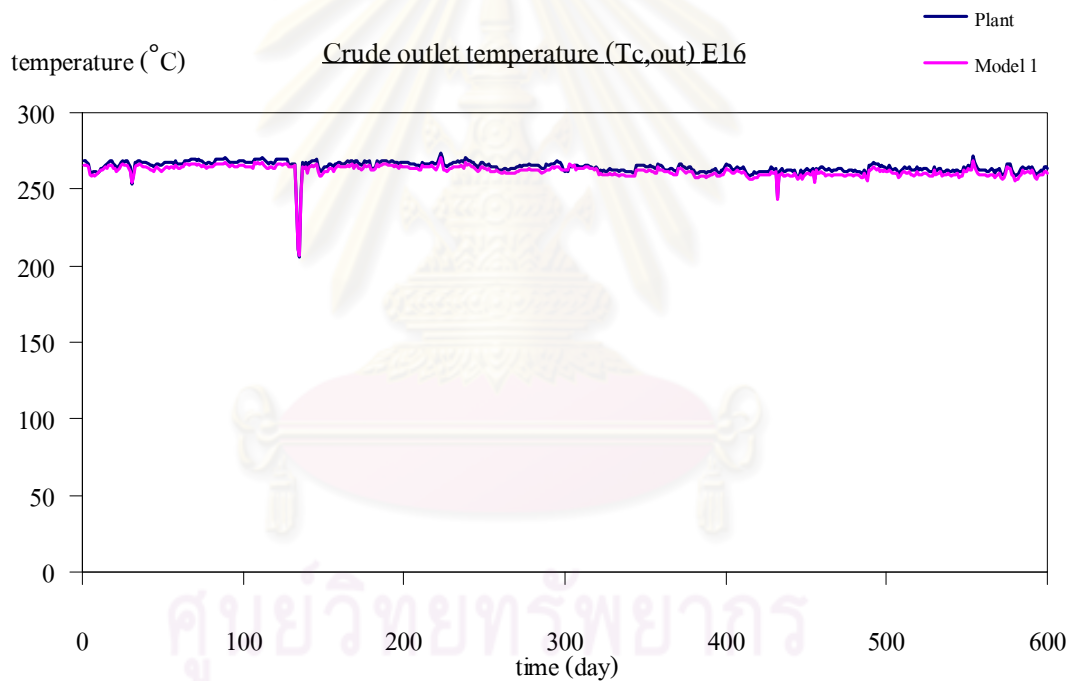
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.0000000001$ day และ $n = -$

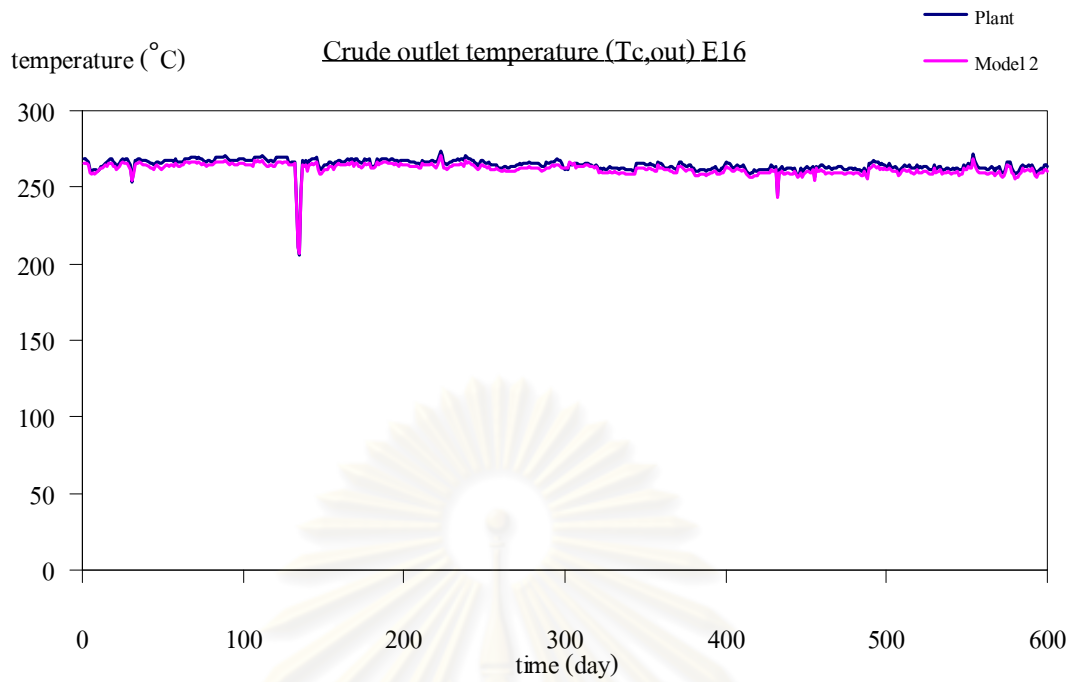
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	27.7906
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	26.7906
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	1.7029
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	2.6185

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.15 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.7029 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลง (Falling-rate fouling model)

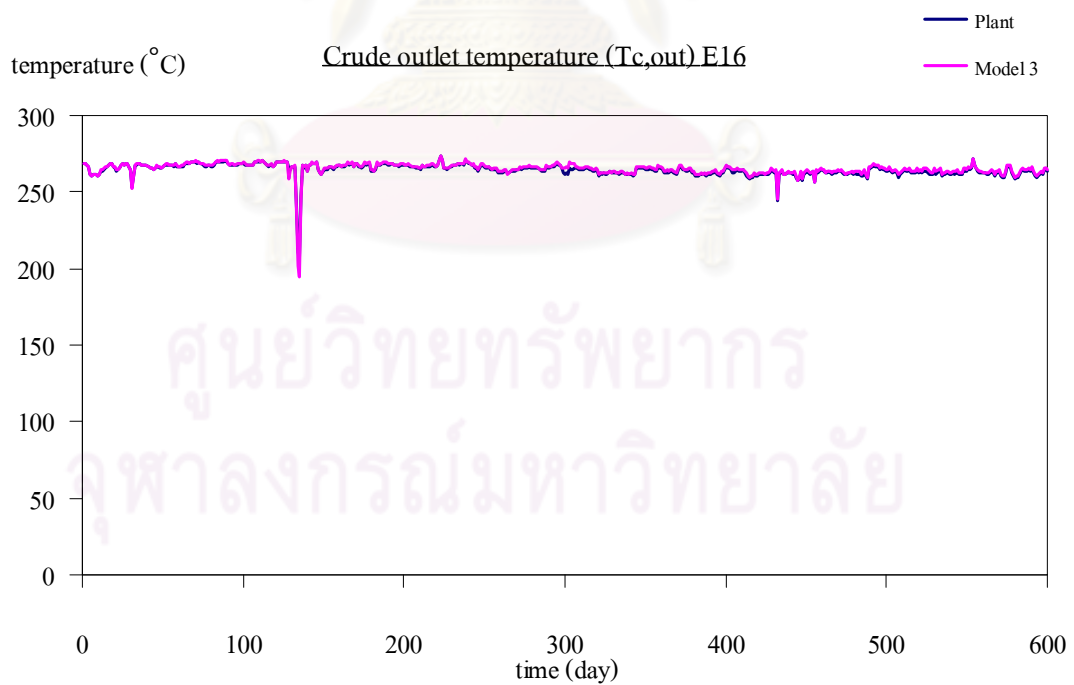
5.1.16 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16



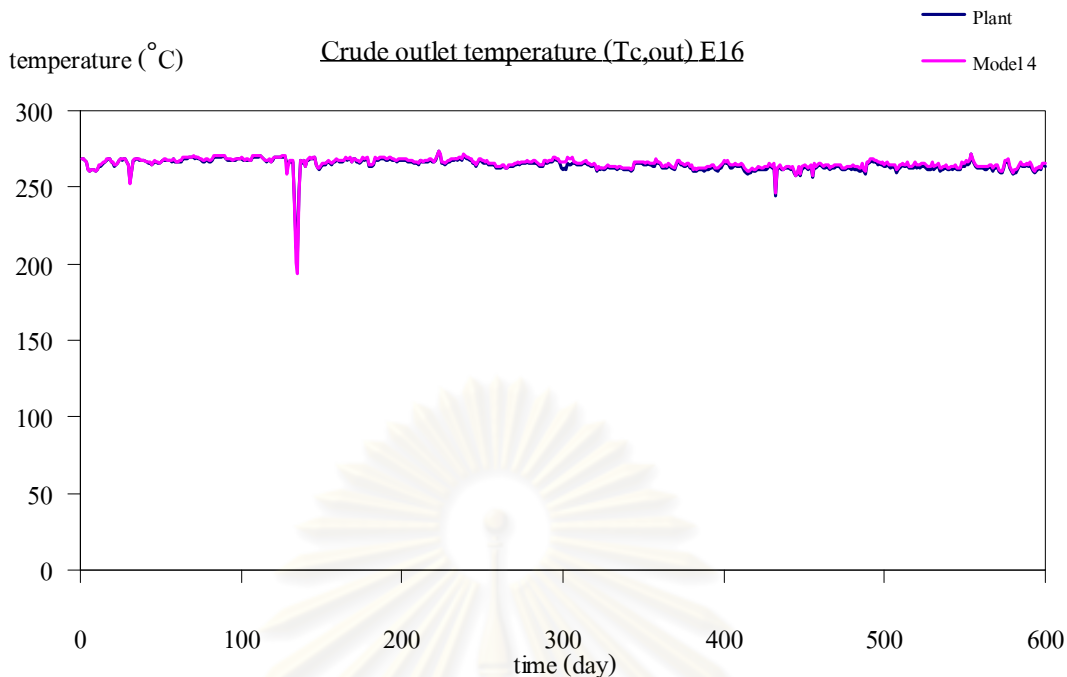
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

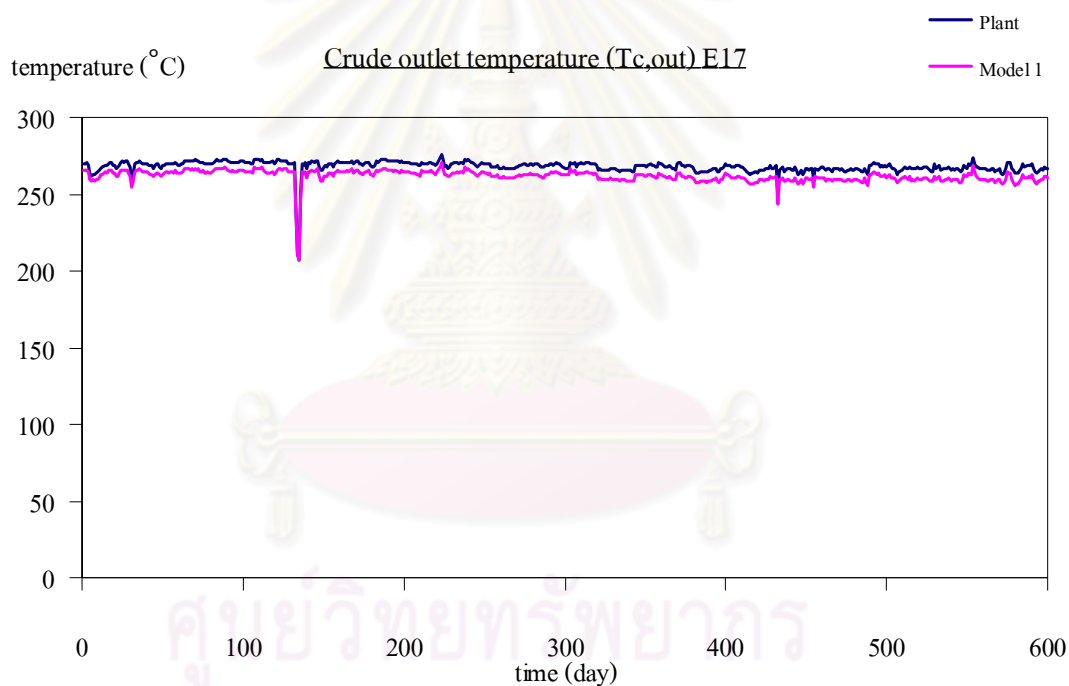
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.00000000000002$ day และ $n = -$

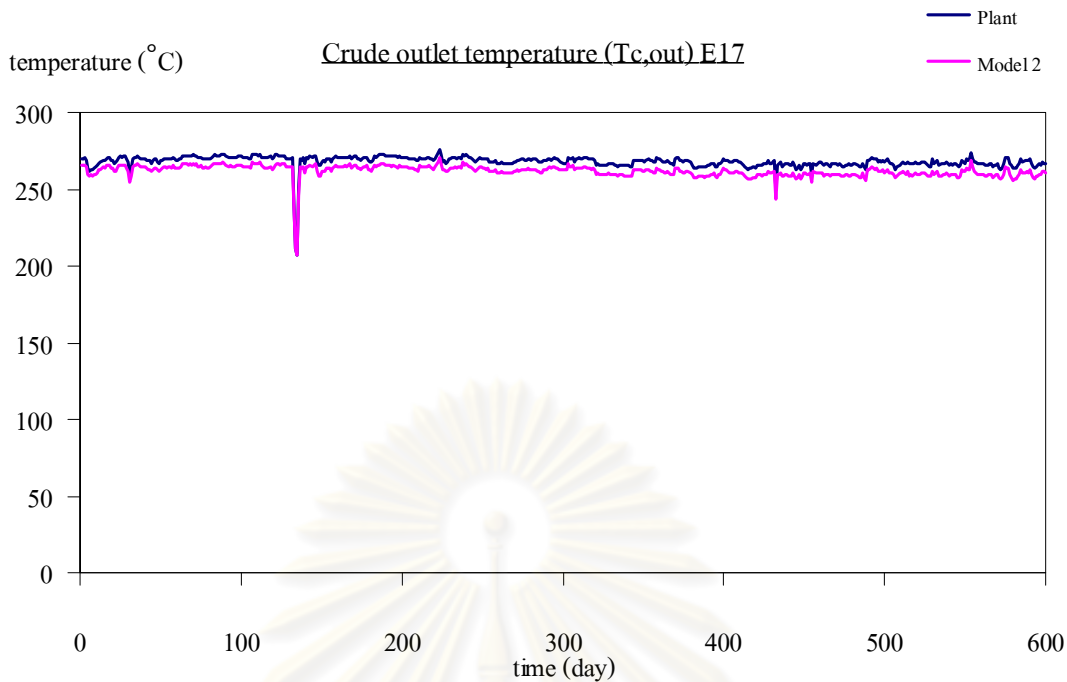
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	2.7048
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	2.7048
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	1.1299
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	1.4094

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.16 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.1299 จากผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราการลดลง (Falling-rate fouling model)

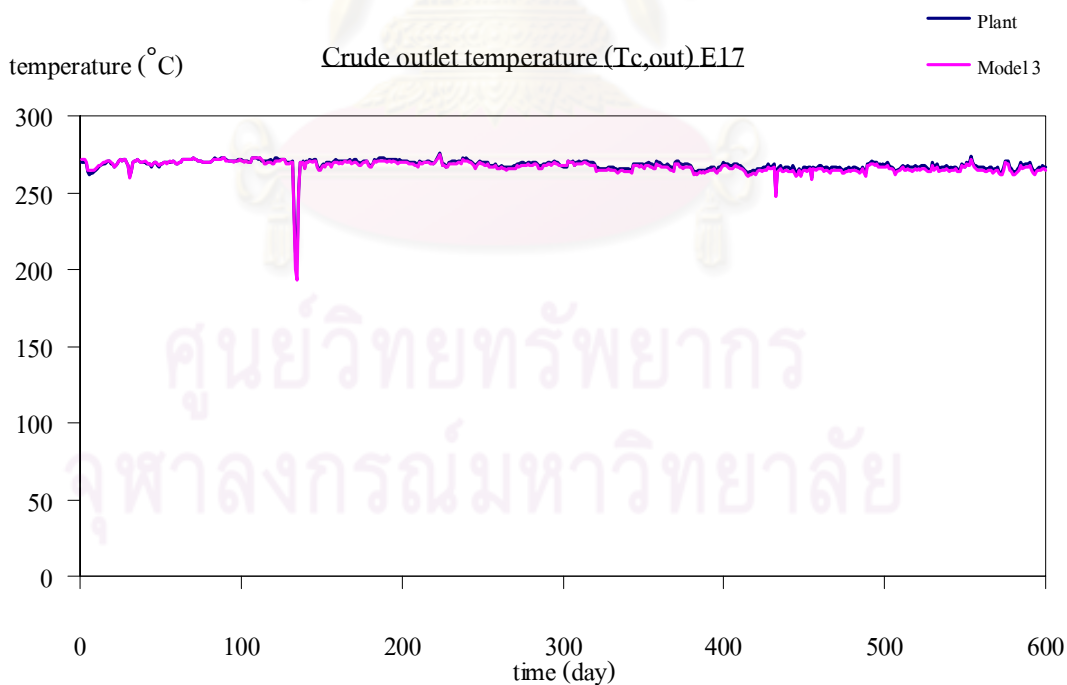
5.1.17 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17



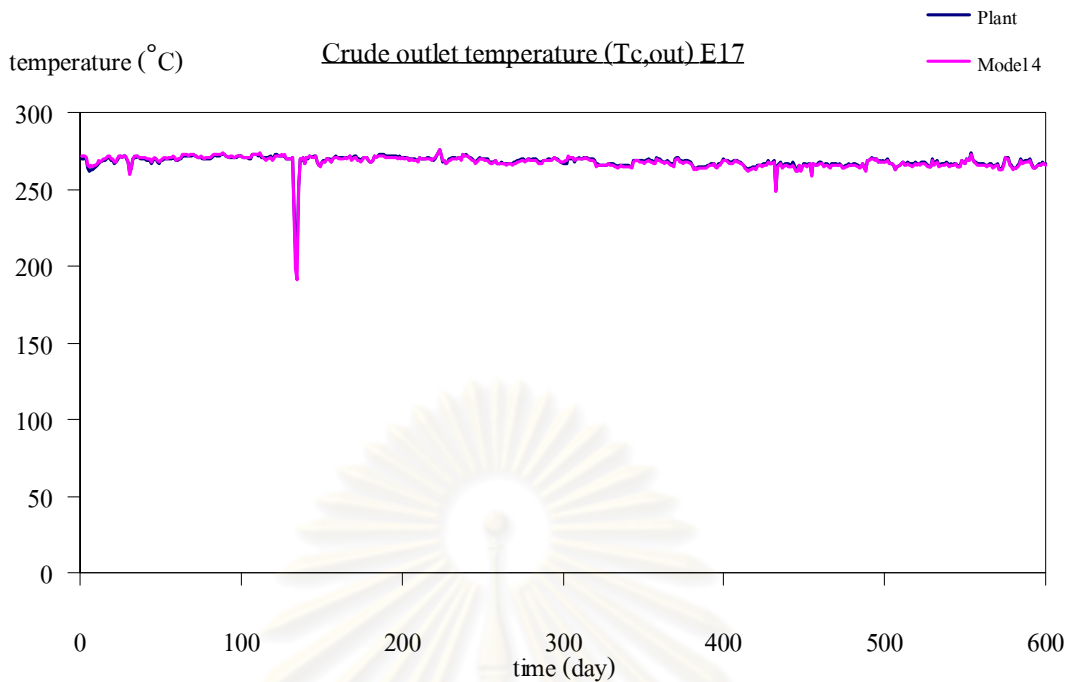
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฎยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

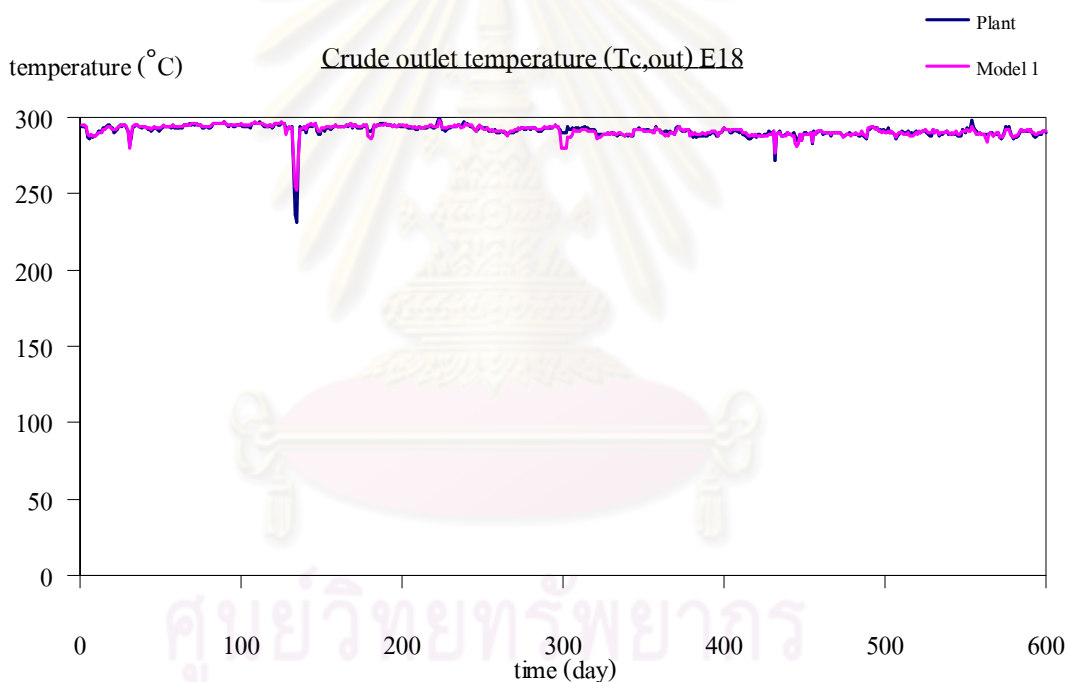
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.00000000000009$ day และ $n = -$

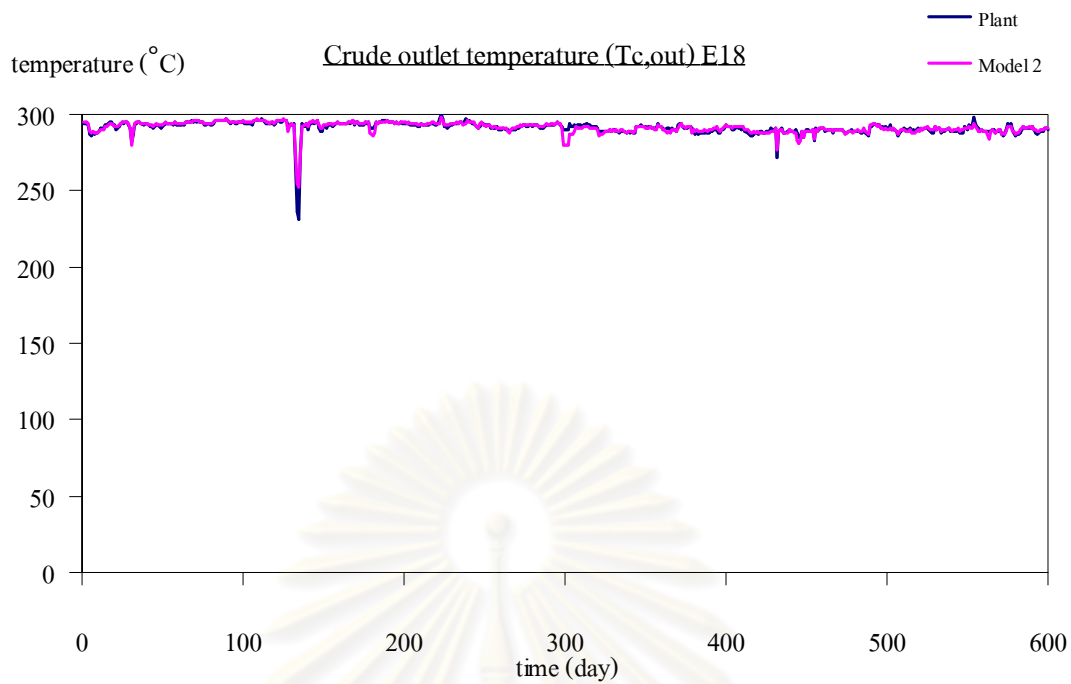
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	6.1941
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	6.1941
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	1.5715
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	1.1130

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 5.17 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียลมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.1130 ผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)

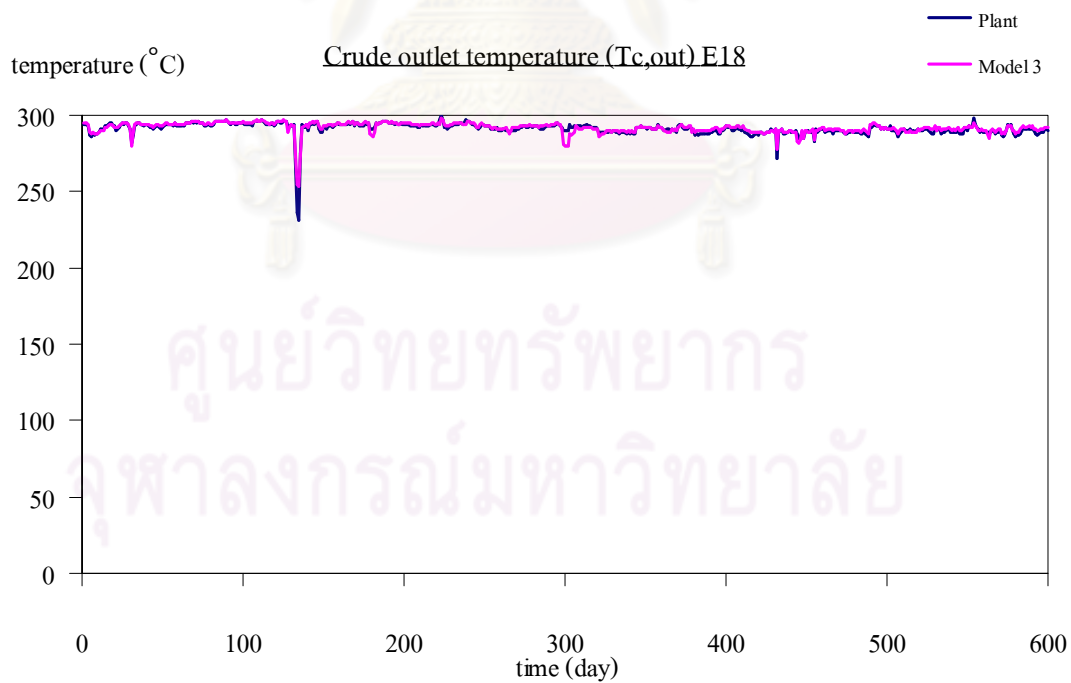
5.1.18 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18



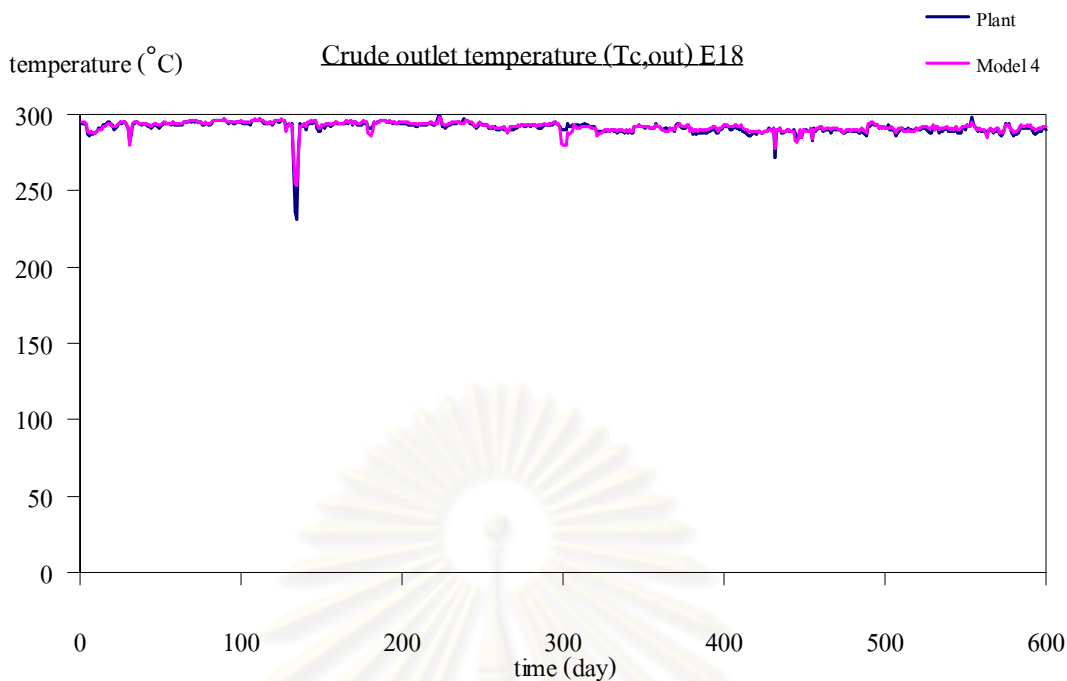
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฏยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

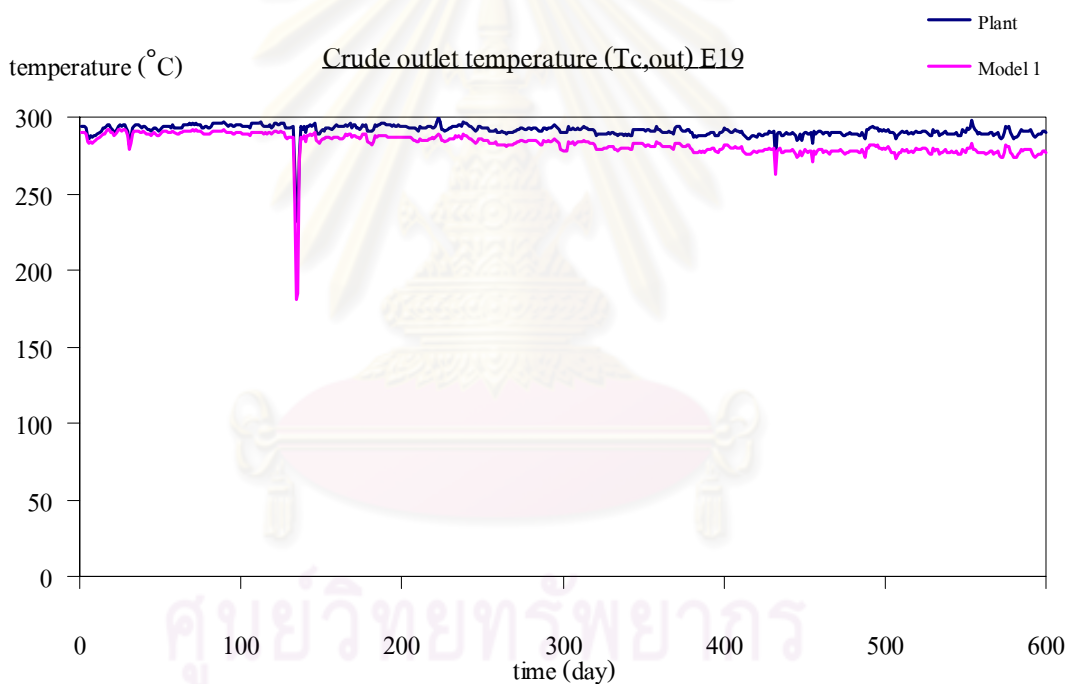
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.18 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 2$ day และ $n = 0.99$

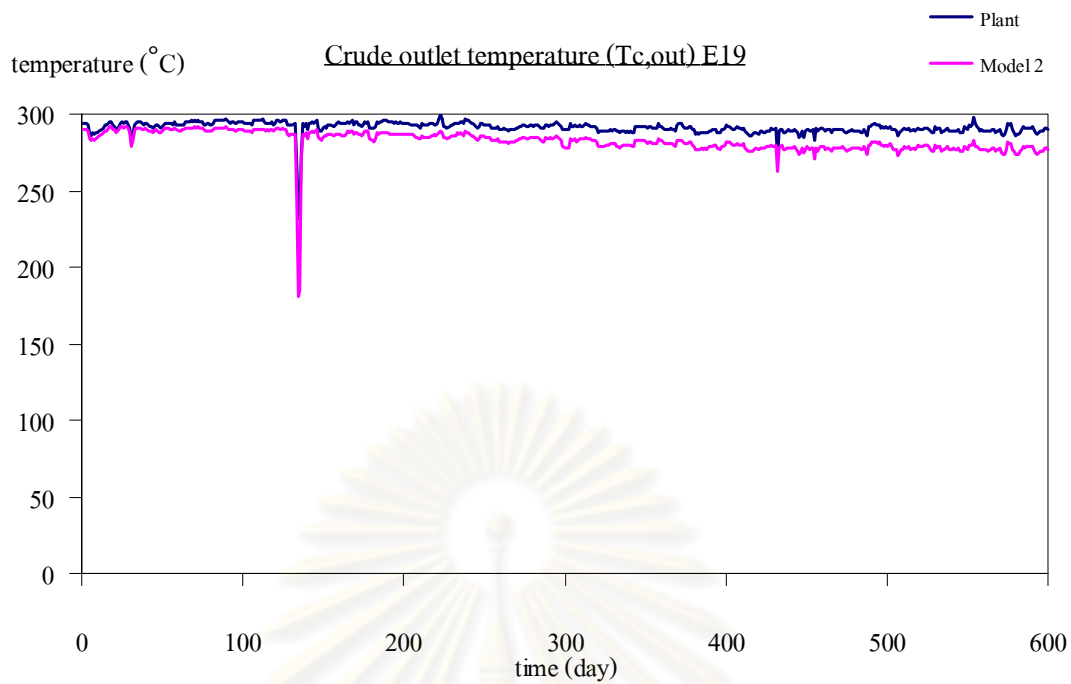
	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	1.8288
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	1.8244
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	1.9222
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	1.9184

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบที่แสดงในตารางที่ 5.18 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลังมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.8244 ผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)

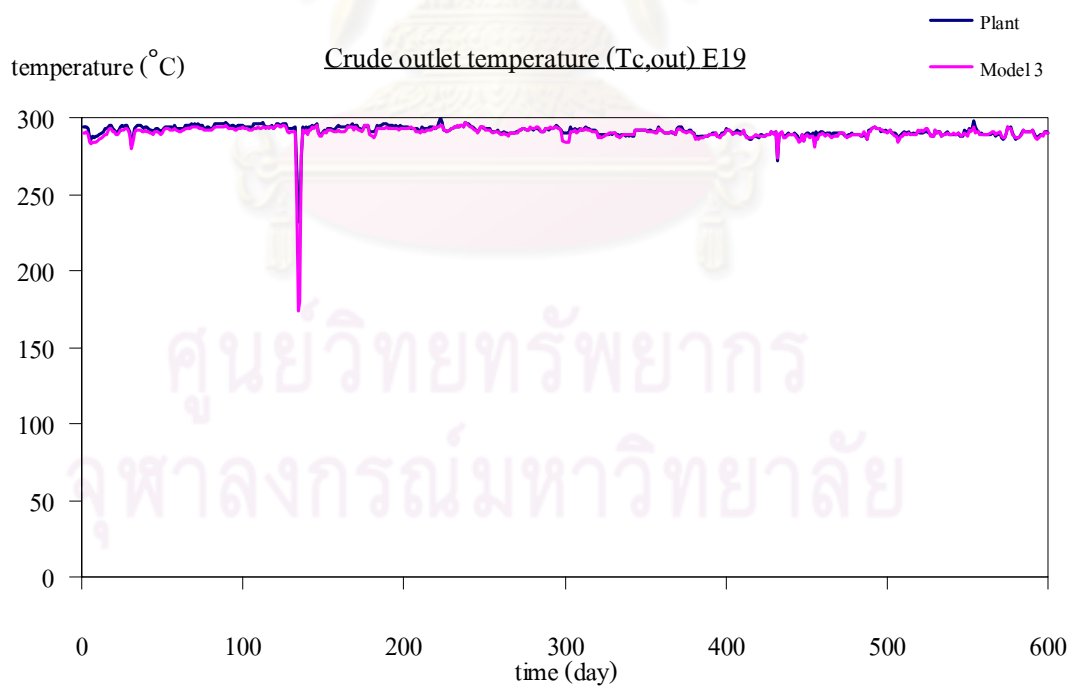
5.1.19 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19



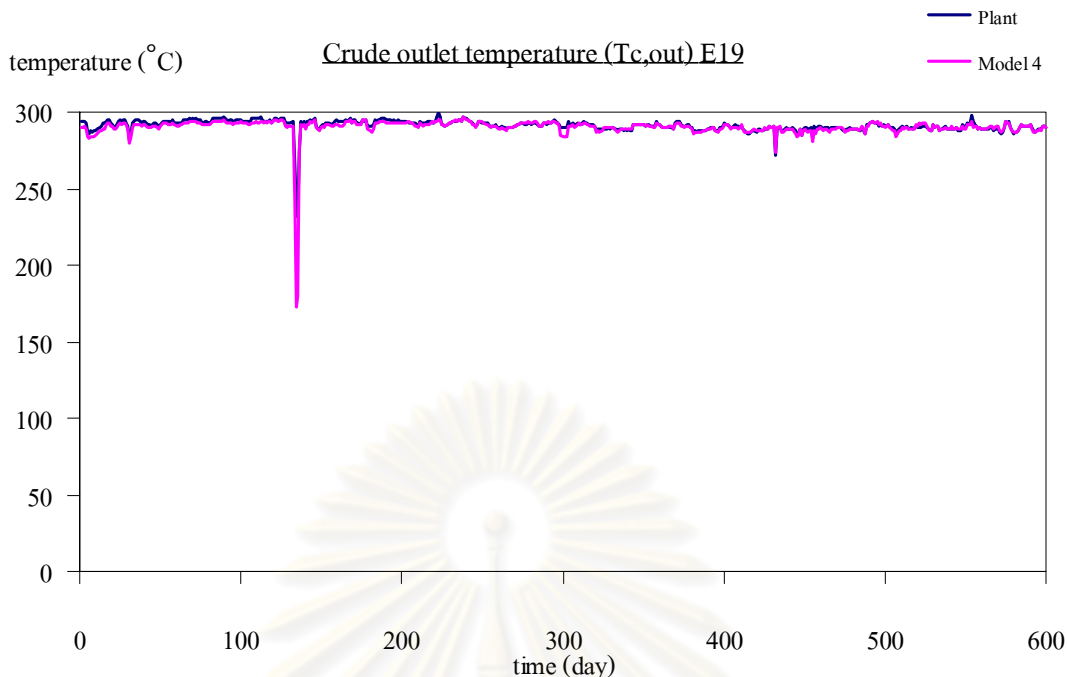
(ก) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง



(ข) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบกฏยกกำลัง



(ค) สมการการเกิดฟาวลิ่งแบบอัตราลดลง



(ง) สมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล

รูปที่ 5.19 กราฟแสดงอุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลในโรงงานกับผลการจำลอง

ตารางที่ 5.19 เปรียบเทียบค่าข้อมูลจากโรงงานกับค่าจากการจำลองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 ที่พารามิเตอร์ $t_{p,c} = 0.066$ day และ $n = -$

	RMSE
สมการแบบเส้นตรง (Linear fouling model)	9.6207
สมการแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model)	9.6207
สมการแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)	1.7252
สมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model)	2.7117

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการจำลองระหว่างอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยเทียบผ่านสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ดังแสดงใน

ตารางที่ 5.19 พบว่าสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงใกล้เคียงกับสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลงมากที่สุด ซึ่งมีค่าผลต่างเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเท่ากับ 1.7252 ผลการจำลองสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 ได้จากความสัมพันธ์ของสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model)

ผลจากการจำลอง เพื่อหาลักษณะรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องในข่ายงานรวม 19 เครื่อง ซึ่งได้แสดงกราฟที่ใช้เทียบข้อมูลระหว่างข้อมูลอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ได้จากโรงงาน และข้อมูลอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ได้จากการจำลองในเวลการดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน ลักษณะของกราฟที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงาน และข้อมูลที่ได้จากการจำลองรูปแบบการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 แบบ พบว่าเกิดขึ้นที่ 2 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะการเกิดช่องว่างระหว่างเส้นกราฟสองเส้นที่มีช่วงระยะห่างกันของทั้งสองเส้น และลักษณะของกราฟที่มีระยะของช่องว่างระหว่างเส้นกราฟสองเส้นน้อยมากจนเหมือนจะทับกันสนิท ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบโดยตรง และถัดมาคือค่าที่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น n โดยมีผลกับการจำลองในสมการการเกิดฟาวลิงแบบยกกำลังเท่านั้น อธิบายได้จากทอมสมการของการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ ที่อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม $U_{(t)}$ จากสมการเมื่อแทนค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ เพื่อหารูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมจากทั้ง 4 แบบ จำเป็นต้องแทนค่าแล้วให้ผลค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยยกกำลังสอง (RMSE) ของรูปแบบการเกิดฟาวลิงภายใน 4 แบบ จนกระทั่งมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ ที่แทนลงในแบบจำลองใดๆ แล้วทำให้ค่า RMSE มีค่าน้อยใกล้เคียงศูนย์มากที่สุด ในแบบจำลองนั้นๆ ก็จะเป็นเหตุให้แบบจำลองอื่น ๆ ที่ไม่ได้เลือกมีความต่างของค่าอุณหภูมิตั้งระยะห่างที่แสดงจากกราฟ ตามค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ยิ่งค่า RMSE มีค่ามากเท่าไรของระยะห่างของเส้นกราฟก็มากขึ้นเท่านั้น ซึ่งหากจำเป็นต้องการลดช่องระยะห่างของเส้นกราฟนั้นสามารถทำได้เช่นเดียวกัน แต่ผลที่ได้คือค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ที่ใช้สำหรับเลือกรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมก็จะมีค่าความแม่นยำน้อยลงด้วยเช่นเดียวกัน ฉะนั้นเพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีค่าความใกล้เคียงกับข้อมูลการดำเนินงานจริงมากที่สุดงานวิจัยจึงเลือกรูปแบบการเกิดฟาวลิงด้วยการแทนค่าพารามิเตอร์ ที่ทำให้รูปแบบจำลองใด ๆ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุดเป็นหลัก อีกทั้งจากผลการหาพารามิเตอร์ของค่าเวลาคงที่การเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ ข้อสังเกตที่พบคือ ค่าเวลาคงที่การเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ ที่ได้จากการแทนลงในสมการ

การเกิดฟาวลิงใด ๆ แล้วทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด นั่นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบในหน่วยของวัน (day) ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าข้อมูลของคุณหมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่นำมาใช้ในการจำลองและนำมาเปรียบเทียบในช่วงระยะเวลาการดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน นั้นเป็นข้อมูลที่ไม่สอดคล้องกับค่าคงที่ที่ใช้ในสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม $U_{(t)}$ ที่มีการเกิดฟาวลิงเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา $R_{f(t)}$ ทั้ง 4 รูปแบบสมการ ได้แก่ ค่าคงที่การเกิดฟาวลิง $R_{f,c}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่จุดเริ่มต้น U_c เนื่องจากค่าเวลาคงที่การเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ คือค่าช่วงเวลาที่ทำให้ค่าการเกิดฟาวลิงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาใด ๆ $R_f(t)$ เข้าใกล้ค่าคงที่ในการเกิดฟาวลิง $R_{f,c}$ ที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นหากข้อมูลคุณหมิขาออกสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบในช่วงระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน ไม่ได้เป็นข้อมูลที่ได้ ณ วันที่เริ่มต้นหลังจากผ่านการทำความสะอาดซึ่งมีค่าคงที่การเกิดฟาวลิง $R_{f,c}$ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่จุดเริ่มต้น U_c เท่ากับค่าที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองแล้วนั้น จะมีผลทำให้ค่าเวลาคงที่การเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ น้อยลงไปด้วยเช่นเดียวกัน

การจำลองรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงานกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษาในระยะเวลาการดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน พบว่าเมื่อค่าความต้านทานฟาวลิงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา มีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและคุณหมิขาออกของน้ำมันดิบลดลง ที่ซึ่งในข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 19 เครื่อง มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 8 เครื่องหรือ คิดเป็น 42 เปอร์เซ็นต์ สำหรับรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับข่ายงานมากที่สุด คือสมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5 E9 E11 E13 E14 E15 E16 E19 ดังแสดงในตารางที่ 5.20 เป็นตารางสรุปผลการจำลองรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องในข่ายงานการอุ่นน้ำมันดิบที่ยกนำมาศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.20 แสดงผลของการจำลองรูปแบบการเกิดฟาวลิงเทียบระหว่างอุณหภูมิขาออกน้ำมันดิบที่ได้จากโรงงานจริงกับค่าที่ได้จากการจำลอง

Heat Exchanger	Parameter		RMSE	Fouling Model
	$t_{p,c}$	n		
E1	0.9	0.99	2.4483	Power-law
E2	0.00098	0.5	4.6881	Power-law
E3	0.19	-	3.1443	Linear
E4	5	-	3.9525	Linear
E5	6	-	2.1269	Falling-rate
E6	1	0.977	1.8765	Power-law
E7	0.009	0.89	1.7087	Power-law
E8	2.6	-	1.9702	Linear
E9	0.000000000000032	-	2.0875	Falling-rate
E10	0.0002	0.5	3.7013	Power-law
E11	0.000000000009	-	3.6787	Falling-rate
E12	0.02	0.99	2.3593	Power-law
E13	0.0077	-	4.0653	Falling-rate
E14	0.0000000000009	-	2.7362	Falling-rate
E15	0.0000000001	-	1.7029	Falling-rate
E16	0.0000000000002	-	1.1299	Falling-rate
E17	0.0000000000009	-	1.1130	Asymptotic
E18	2	0.99	1.8244	Power-law
E19	0.066	-	1.7252	Falling-rate

สำหรับลักษณะของการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) ในรูปแบบนี้ฟาวลิงจะการเปลี่ยนแปลงของฟาวลิงนั้นค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาแรก และเมื่อเวลาผ่านไปฟาวลิงก็ค่อย ๆ เริ่มมีค่าคงที่ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนใหญ่ในข่ายงานที่เมื่อดำเนินงานต่อเนื่องไปในช่วงระยะเวลาหนึ่งจะมีฟาวลิงไปเกาะอยู่บนพื้นผิวของการถ่ายเทความร้อน จนกระทั่งค่าฟาวลิงเกาะตัวเคลือบบนพื้นผิวหน้าการถ่ายเททั้งหมดในช่วงระยะเวลาหนึ่งค่าการเกิดฟาวลิงก็เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ เนื่องจากลักษณะการเกาะยึดตัวกันระหว่างฟาวลิงด้วยกันเอง หรือฟาวลิงกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงทำให้เอาชนะแรงตัดเฉือนของของไหล และฟาวลิงที่เข้ามาใหม่ไม่สามารถเกาะยึดกับฟาวลิงกลุ่มเดิมได้ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 7 เครื่อง หรือคิดเป็น 37 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ E1 E2 E6 E7 E10 E12 E18 มีลักษณะการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง (Power-law fouling model) เป็นการเกิดฟาวลิงที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องสาเหตุมาจากการดำเนินงานติดต่อกันตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ส่วนค่าของการสะสมฟาวลิงขึ้นอยู่กับค่าส่วนประกอบของทั้งสายร้อนและสายเย็น (n) ที่ผ่านเข้ามาในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจับตัวกันตกตะกอนอยู่บนผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและเพิ่มปริมาณการสะสมไปเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง สำหรับรูปแบบการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model) ประกอบไปด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 3 เครื่อง หรือคิดเป็น 16 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ E3 E4 E8 จากสมการอธิบายการเกิดฟาวลิงจะเพิ่มขึ้นกับเวลามีลักษณะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไป ค่าการเกิดฟาวลิงก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามไปด้วยแบบเชิงเส้น ดังนั้นยิ่งดำเนินการต่อเนื่องมากเท่าไร ฟาวลิงก็จะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นมากตามระยะเวลาการดำเนินการ และสุดท้ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 1 เครื่อง หรือคิดเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ E17 เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะรูปแบบสมการแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model) หรือแบบมีเส้นแนวโน้ม ลักษณะการเกิดฟาวลิงคล้ายกับรูปแบบอัตราลดลง (Falling rate fouling model) คือฟาวลิงจะค่อยเพิ่มขึ้นในช่วงแรก ๆ จากนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปในช่วงหนึ่งฟาวลิงจะค่อย ๆ เริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ แต่ต่างกันในลักษณะการเกาะยึดของฟาวลิง กล่าวคือ การหลุดตัวของฟาวลิงออกจากพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน การหลุดของฟาวลิงเกิดเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างฟาวลิงด้วยกันเองหรือฟาวลิงกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าแรงตัดเฉือนของของไหล ก่อให้เกิดการละลายกลับไปยังของไหล

จากการจำลองรูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 รูปแบบ พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบทั้งหมด 19 เครื่อง มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมและแตกต่างกัน ปัจจัยที่มีผลอธิบายได้ดังนี้

- องค์ประกอบของสายป้อน (Feeder) เนื่องจากสายป้อนน้ำมันดิบที่ส่งผ่านเข้าทำงานในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องนั้น ล้วนแล้วมีองค์ประกอบที่อยู่ในสายป้อนหลากหลายชนิดและสัดส่วนขององค์ประกอบนั้น ๆ มากน้อยแตกต่างกันไป โดยองค์ประกอบเหล่านั้นสามารถเกิดการพัดพา ตกค้าง และสะสมเกิดเป็นฟาวลิงในแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะแตกต่างกันได้
- ความเข้มข้นของสารที่เป็นฟาวลิงในของไหล เป็นไปได้ว่าปริมาณของสารที่ไหลผ่านเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่อง จะทำให้การเกิดฟาวลิงมีความแตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารที่เป็นฟาวลิงปนอยู่ในของไหล ซึ่งหากมีความเข้มข้นของสารที่เป็นฟาวลิงมาก อาจส่งผลให้ปริมาณฟาวลิงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย
- อุณหภูมิ (Temperature) ทั้งนี้ในองค์ประกอบที่ทำให้เกิดฟาวลิงได้นั้น สามารถเกิดฟาวลิงที่มีสภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน หรือเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของสารบางตัวเมื่อไปรวมเข้ากับสารประกอบตัวอื่น ๆ ก็อาจสามารถเกิดปฏิกิริยากันจนเกิดเป็นฟาวลิงที่สภาวะอุณหภูมิแตกต่างไปจากเดิมได้เช่นกัน
- ระยะเวลาเฉลี่ยของสารป้อนที่จะอยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Resident time) ในส่วนนี้เวลาที่ใช้จนสามารถทำให้เกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับองค์ประกอบบางตัวอาจจำเป็นต้องใช้เวลามากพอในการเกิดฟาวลิง หรือบางตัวอาจใช้เวลาเพียงไม่นานก็สามารถเกิดการสะสมตัวของฟาวลิงได้
- แรงเฉือนกระทำของสารป้อน (Shear force) อัตราการหลุดของฟาวลิงเนื่องจากแรงเฉือนกระทำของสารป้อน เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อความแตกต่างของรูปแบบการเกิดฟาวลิงในขायงานแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งหากการเกาะตัวของฟาวลิงมีลักษณะยึดเกาะกันแบบหลวม ๆ จนไม่สามารถเอาชนะแรงเฉือนของสารป้อนที่ส่งผ่านเข้ามายังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ก็มีผลทำให้ฟาวลิงเหล่านั้นหลุดหายไป หรือเมื่ออัตราการเกิดฟาวลิง และอัตราการหลุดของฟาวลิง (Shear force) ใกล้เคียงกัน ทำให้ค่าความต้านทานความร้อนคงที่ เป็นต้น
- ตัวเร่งอัตราการเกิดฟาวลิง เช่น วัสดุที่ใช้ในการทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของการเกิดฟาวลิงบางตัว สามารถเกิดฟาวลิงได้ดีที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

นอกจากนี้ในน้ำมันดิบ (Crude Oil) ยังประกอบไปด้วย น้ำ โลหะที่ละลายน้ำได้ ของแข็งแขวนลอย อนุภาคของแข็ง อาทิเช่น ทราย หิน และสารพวกเกลืออนินทรีย์ (Inorganic salts) ได้แก่ โซเดียม แคลเซียม แมกนีเซียมรวมปะปนอยู่ ดังนั้นสารประกอบเหล่านี้จึงมีผลทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดการกัดกร่อน เกิดการอุดตัน สิ่งสกปรกต่าง ๆ ที่จะทำให้เกิดฟาวลิงขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งอาจมีผลต่อลักษณะการเกิดฟาวลิงที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้จากข่างานที่ยกนำมาศึกษานั้น อาศัยกลไกในการเกิดฟาวลิงที่แตกต่างกันออกไปได้ด้วย โดยฟาวลิงที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นร่วมกันได้หลาย ๆ แบบ หรือในบางครั้งการเกิดฟาวลิงชนิดหนึ่ง สามารถจะใช้ส่งเสริมให้อัตราการเกิดฟาวลิงอีกชนิดหนึ่งเกิดได้เร็วขึ้น เป็นต้น โดยจากข่างานแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการขุ่นน้ำมันดิบ สามารถแยกตามลักษณะการเกิดฟาวลิงได้ดังนี้

ฟาวลิงจากการเกิดผลึก (Crystallization Fouling) หรือการเกิดอนุภาคของแข็งภายในของไหล เป็นฟาวลิงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความสามารถของการละลายของของไหลเนื่องจากอุณหภูมิและค่า pH ที่เปลี่ยนไป เมื่อความสามารถในการละลายลดลงจนทำให้ของไหลกลายเป็นสภาพเป็นของแข็งหรือเกิดผลึกขึ้นได้ จนทำให้เกิดการสะสมของของแข็งและผลึกบริเวณชั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับอนุภาคของแข็งที่ปนเปื้อนอยู่ในกระบวนการขุ่นน้ำมันดิบที่พบมาก ได้แก่ จำพวกเกลืออนินทรีย์ (Inorganic Salts Deposit) ที่ละลายหลงเหลืออยู่ในสารป้อน อะโรมาติกส์ แนฟทาไลน์ และไซ

ฟาวลิงจากการตกตะกอน (Particulate Fouling or Sedimentation Fouling) ฟาวลิงที่เกิดขึ้นในลักษณะเช่นนี้เกิดจากในของไหลมีอนุภาคแขวนลอยอยู่มาก เช่น การตกตะกอนของอนุภาคของโลหะในส่วนผสมที่ปะปนมากับน้ำมันดิบ หรือการตกตะกอนของอนุภาคทราย หิน เป็นต้น ทั้งนี้ในข่างานกระบวนการขุ่นน้ำมันดิบมักจะพบการเกิดการตกตะกอนของแอสฟัลทีน (Asphaltene Precipitation) มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งแขวนลอย มีสีน้ำตาลเข้มเกือบดำ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนและมีขั้วสูง (Complex compound, highest polarity) และเป็นตัวที่ทำให้เกิดความข้นหนืด (viscosity) ในแอสฟัลท์ หรือ ยางมะตอย

ฟาวลิงที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical Reaction Fouling) ฟาวลิงประเภทนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีของของไหลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตัวใหม่ที่สามารยยึดติดกับพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ และเมื่อผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาเหล่านี้เคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้เกิดการสะสมตัวของฟาวลิงได้ ทั้งนี้สารประกอบทำให้เกิดฟาวลิงจากปฏิกิริยา ได้แก่ โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน

(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon) หรือ พีเอเอช เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป จัดเรียงเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม มีเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอน ส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ กลไกการเกิดปฏิกิริยาไม่แตกต่างกับการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Polymerisation)

ฟาวลิงที่เกิดจากการกัดกร่อน (Corrosion Fouling) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนระหว่างของไหลกับพื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแล้วสะสมอยู่บริเวณพื้นที่ผิวของการแลกเปลี่ยนความร้อน (Corrosion by Production) ซึ่งเป็นการกัดกร่อนหรือการเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะเปลี่ยนแปลงสภาพไป (Under Deposit Corrosion) จนกระทั่งเกิดการก่อตัวและสะสมของฟาวลิงได้

สำหรับการศึกษา และจำลองรูปแบบการเกิดฟาวลิงในขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่องในระบบการใด ๆ สามารถนำมาใช้ในการทำนายรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เกิดขึ้น ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วงระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน และดูผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการตัดสินใจ วางแผน ปรับปรุง ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และควบคุมการดำเนินงานในระบบการผลิตต่อไป ทั้งนี้ผลการจำลองรูปแบบการเกิดฟาวลิงจะใช้อ้างอิงเฉพาะการหารูปแบบที่เหมาะสม สำหรับการเกิดฟาวลิงโดยอาศัยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ที่เทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากโรงงานและข้อมูลที่ได้จาแบบจำลองแล้วมีค่าน้อยที่สุดเท่านั้น ส่วนลักษณะการเกิดหรือกลไกการเกิดฟาวลิงในแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของขบวนการนั้น ต้องได้รับการศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่อ้างอิงได้ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

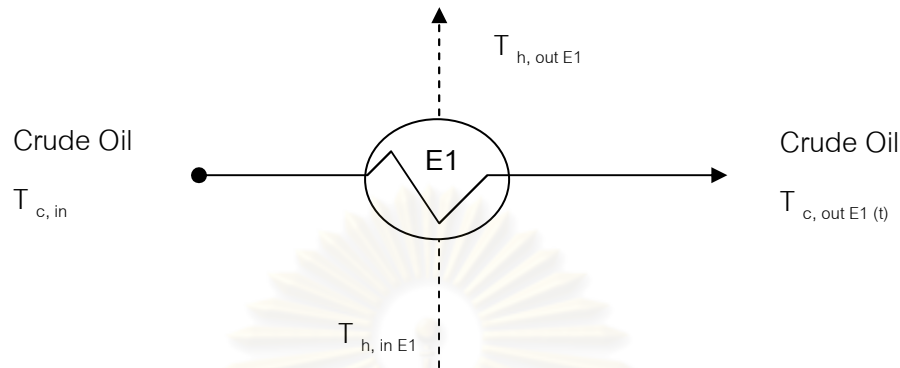
5.2 การพัฒนาแบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ

หลังจากศึกษาารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับขำยงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สนใจได้แก่ อุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา $T_{c,out}$ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหาคือ ค่าคงที่ของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) และค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ที่เหมาะสมในกระบวนการจริงที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความถูกต้อง และสามารถอธิบายรูปแบบการเกิดฟาวลิงได้ใกล้เคียงกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการจริงดังแสดงในตารางที่ 5.20 เมื่หาค่าพารามิเตอร์ $t_{p,c}$, n เพื่อนำมาแทนในแบบจำลองการเกิดฟาวลิงทั้ง 4 แบบจำลอง จนกระทั่งได้ทราบรูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 19 เครื่องในขำยงานแลกเปลี่ยนความร้อนกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษา ให้นำแบบจำลองที่ได้มาตั้งเป็นพื้นฐานในการพัฒนาแบบจำลองใช้ในการหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นคอขวดของขำยงาน (Critical Heat Exchanger) เพื่อหาค่าพลังงานความร้อน (Q) ที่สูญเสียไป เมื่อค่าการเกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มขึ้นโดยการลดค่า $t_{p,c}$ และเพิ่มค่า n ที่ 10 % ที่เวลาการดำเนินงานต่อเนื่อง 600 วัน โดยเน้นที่อุณหภูมิขาออกสายน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการกำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash) และกระบวนการกลั่น (Distillation) ทั้งนี้สามารถหาได้จากค่าพลังงานความร้อนที่ต้องเพิ่มให้กระบวนการ เมื่ออุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบผลิตภัณฑ์ลดลงจากเดิม

จากหัวข้อ 5.1 เมื่อได้รูปแบบสมการการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละเครื่อง รวม 19 เครื่องแล้วนั้น จะนำแบบจำลองรูปแบบสมการที่เหมาะสมของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตั้งแต่ E1 ถึง E19 ดังกล่าวมาเขียนแบบจำลองแบบต่อเนื่องกันทั้งขำยงาน ดังแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองให้สามารถใช้จำลองขำยงานแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งระบบได้จริง เพื่อใช้ในการจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน และการเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังนี้

ดุลพลังงาน (Energy balance) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งระบบในข่ายงานรวม 19 ตัว

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1



สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E1 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)^n} \quad (5.1)$$

$$T_{c, out E1(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, in E1} - a_2 T_{c, in}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, in E1} \quad (5.2)$$

ทั้งนี้กำหนดให้

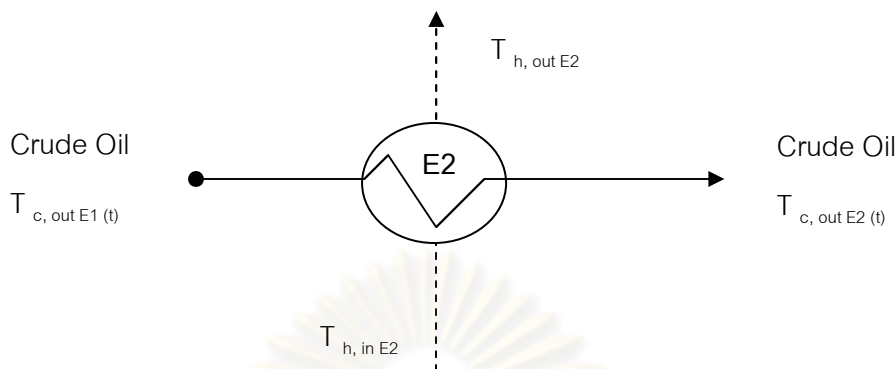
$$a_o = F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}$$

$$a_1 = A / F_h C_{p,h}$$

$$a_2 = [F_h C_{p,h} / F_c C_{p,c}] - 1$$

$$a = a_1 a_2$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2

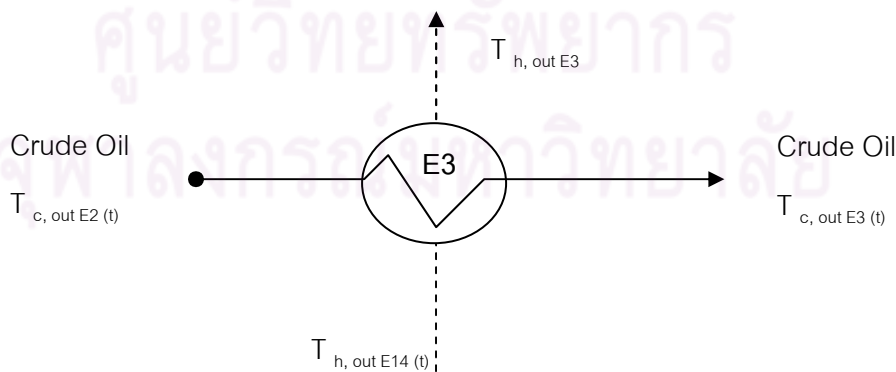


สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E2 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)^n} \tag{5.3}$$

$$T_{c,out E2(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h,inE2} - a_2 T_{c,outE1(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h,inE2} \tag{5.4}$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3

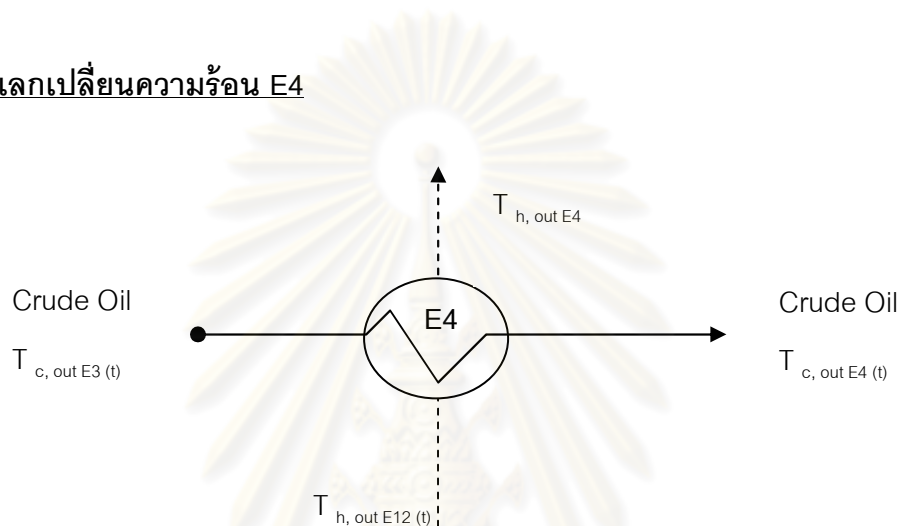


สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E3 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)} \tag{5.5}$$

$$T_{c,out E3(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)}a]}} [a_o T_{h,outE14(t)} - a_2 T_{c,outE2(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)}a]}}} T_{h,outE14(t)} \tag{5.6}$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E4

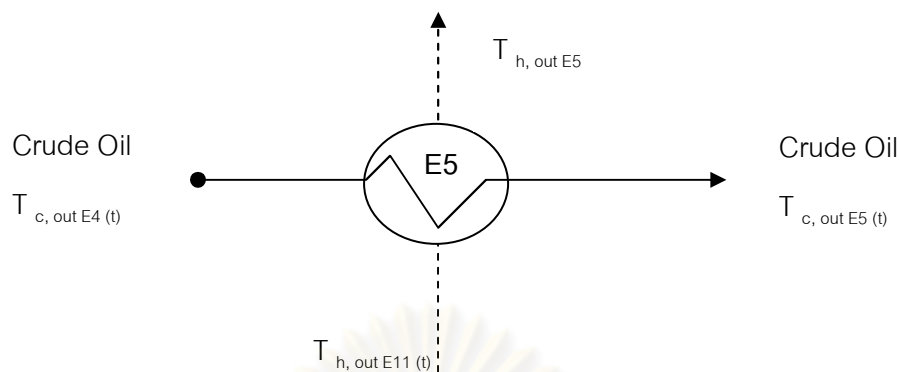


สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E4 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)} \tag{5.7}$$

$$T_{c,out E4(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)}a]}} [a_o T_{h,outE12(t)} - a_2 T_{c,outE3(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)}a]}}} T_{h,outE12(t)} \tag{5.8}$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E5

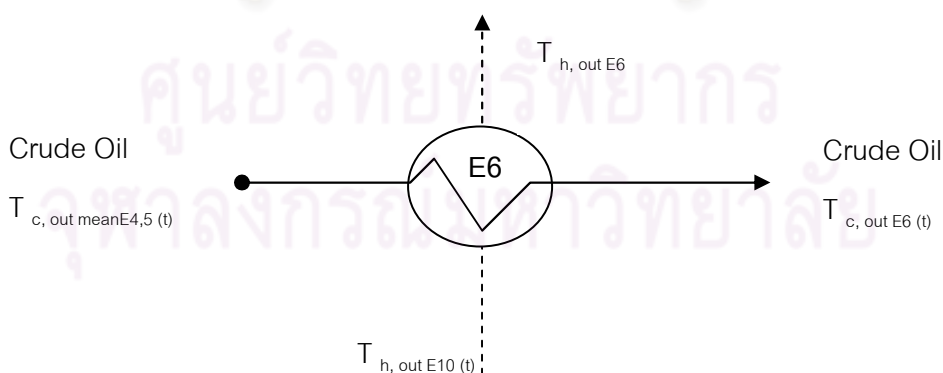


สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E5 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (5.9)$$

$$T_{c, out E5(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, out E11(t)} - a_2 T_{c, out E4(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, out E11(t)} \quad (5.10)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6



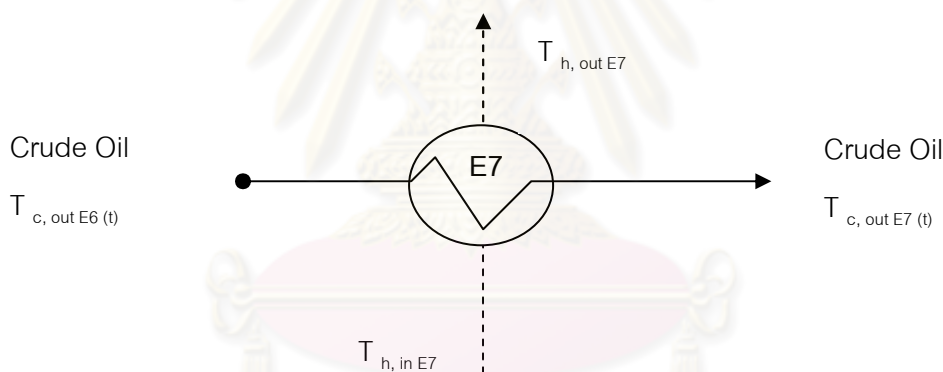
สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E6 ได้จากสมการ

$$T_{c,outmeanE4,5(t)} = \frac{T_{c,outE4(t)} + T_{c,outE5(t)}}{2} \quad (5.11)$$

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)^n} \quad (5.12)$$

$$T_{c,out E6(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)}a]}} [a_o T_{h,outE10(t)} - a_2 T_{c,outmeanE4,5(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)}a]}}} T_{h,outE10(t)} \quad (5.13)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E7

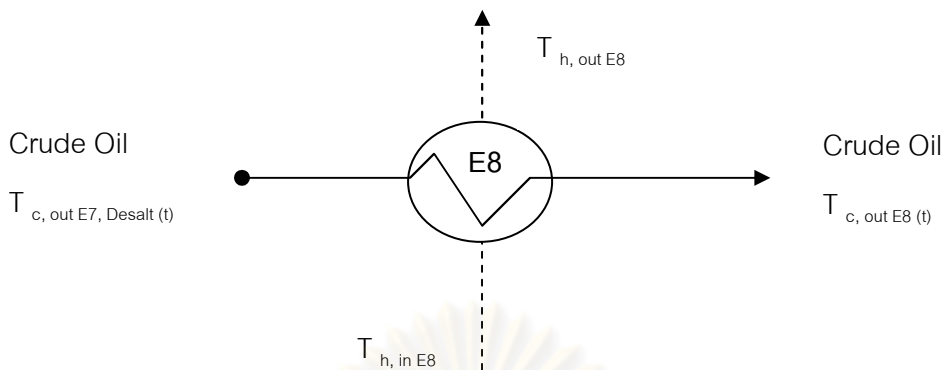


สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E7 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)^n} \quad (5.14)$$

$$T_{c,out E7(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)}a]}} [a_o T_{h,inE7} - a_2 T_{c,outE6(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)}a]}}} T_{h,inE7} \quad (5.15)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8



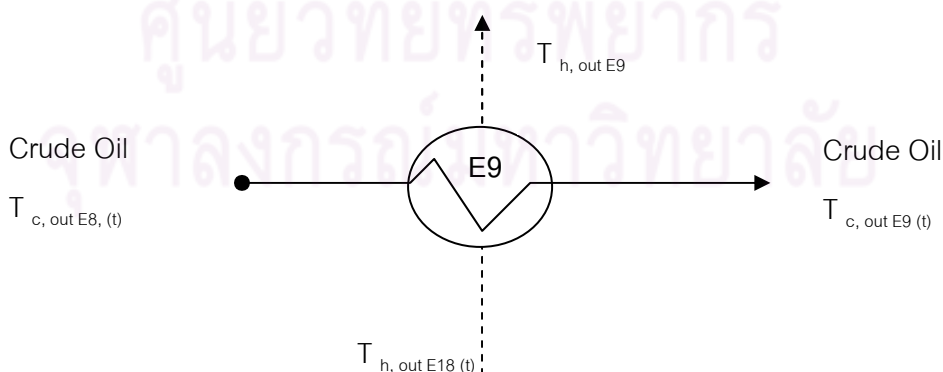
สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E8 ได้จากสมการ

$$T_{c, out E7, Desalt (t)} = T_{c, out E7 (t)} - 4 \tag{5.16}$$

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)} \tag{5.17}$$

$$T_{c, out E8 (t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, in E8} - a_2 T_{c, out E7, Desalt (t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, in E8} \tag{5.18}$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9

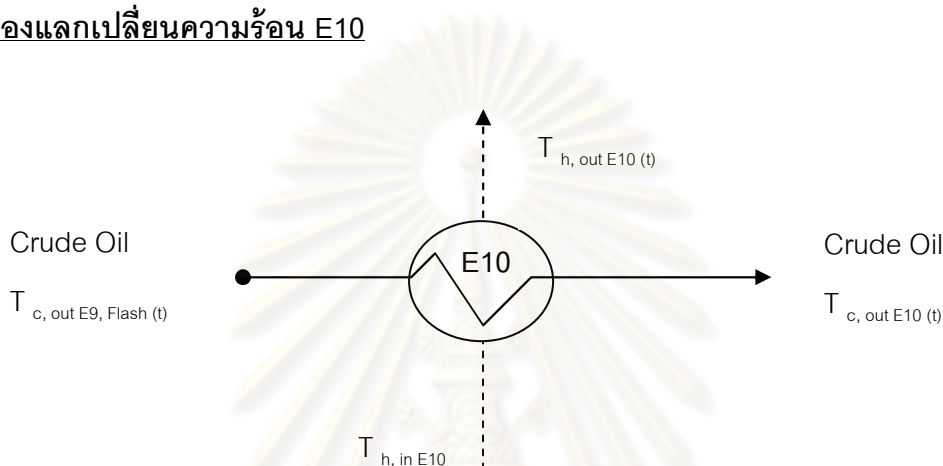


สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E9 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (5.19)$$

$$T_{c,out E9(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h,out E18(t)} - a_2 T_{c,out E8(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h,out E18(t)} \quad (5.20)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10



สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์ที่นำมันดิบจาก E10 ได้จากสมการ

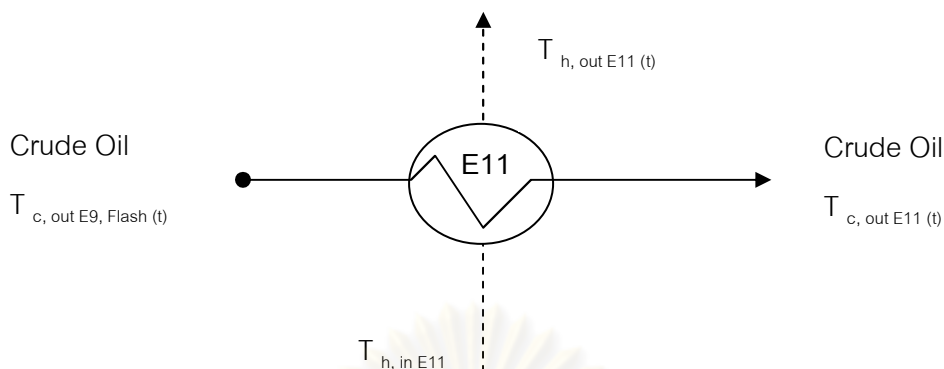
$$T_{c,out E9, Flash (t)} = T_{c,out E9(t)} - 9 \quad (5.21)$$

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}} \right)^n} \quad (5.22)$$

$$T_{c,out E10(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h,in E10} - a_2 T_{c,out E9, Flash(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h,in E10} \quad (5.23)$$

$$T_{h,out E10(t)} = T_{h,in E10} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,out E10(t)} - T_{c,out E9, Flash(t)}) \quad (5.24)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11



สามารถหาคอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E11 ได้จากสมการ

$$T_{c, out E9, Flash (t)} = T_{c, out E9 (t)} - \theta \quad (5.25)$$

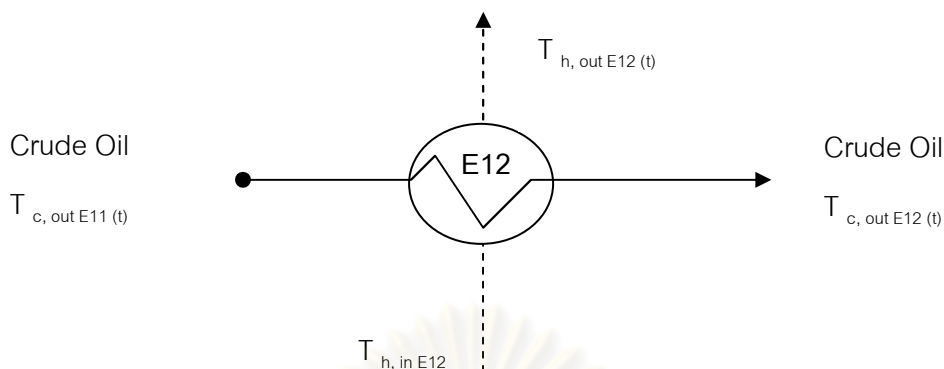
$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (5.26)$$

$$T_{c, out E11 (t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, in E11} - a_2 T_{c, out E9, Flash (t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, in E11} \quad (5.27)$$

$$T_{h, out E11 (t)} = T_{h, in E11} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c, out E11 (t)} - T_{c, out E9, Flash (t)}) \quad (5.28)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E12



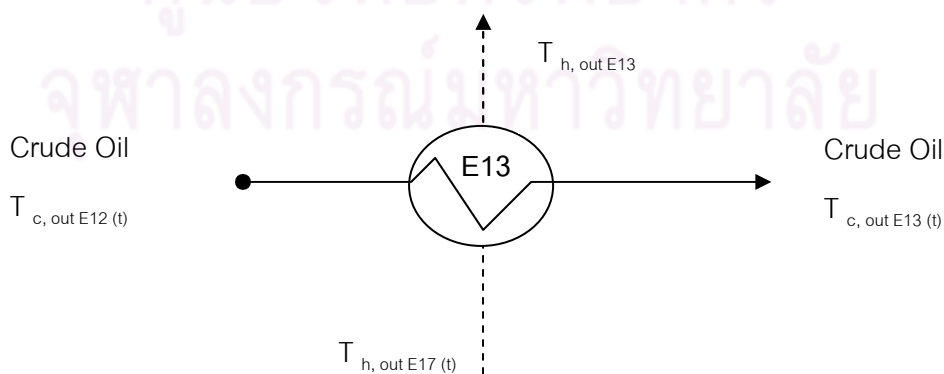
สามารถหาคูณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E12 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)^n} \quad (5.29)$$

$$T_{c, out E12(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, in E12} - a_2 T_{c, out E11(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, in E12} \quad (5.30)$$

$$T_{h, out E12(t)} = T_{h, in E12} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c, out E12(t)} - T_{c, out E11(t)}) \quad (5.31)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E13

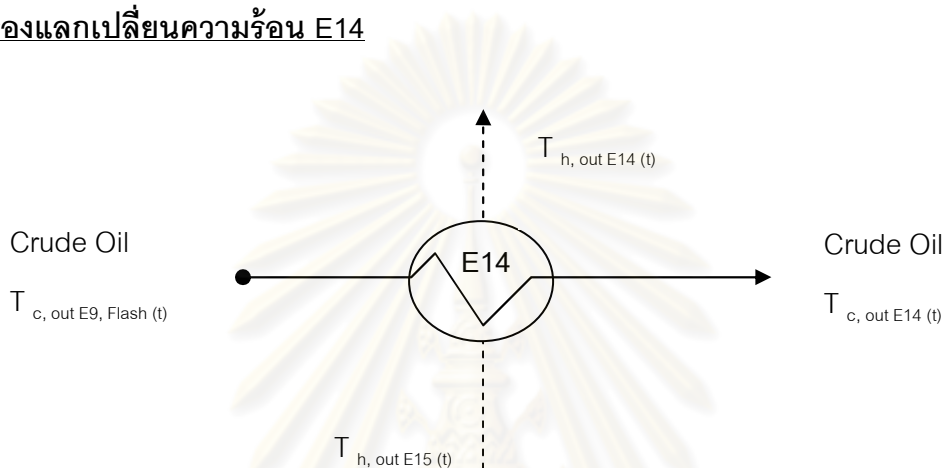


สามารถหาคูณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E13 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (5.32)$$

$$T_{c,out E13(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h,out E17(t)} - a_2 T_{c,out E12(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h,out E17} \quad (5.33)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14



สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์ที่นำมันดิบจาก E14 ได้จากสมการ

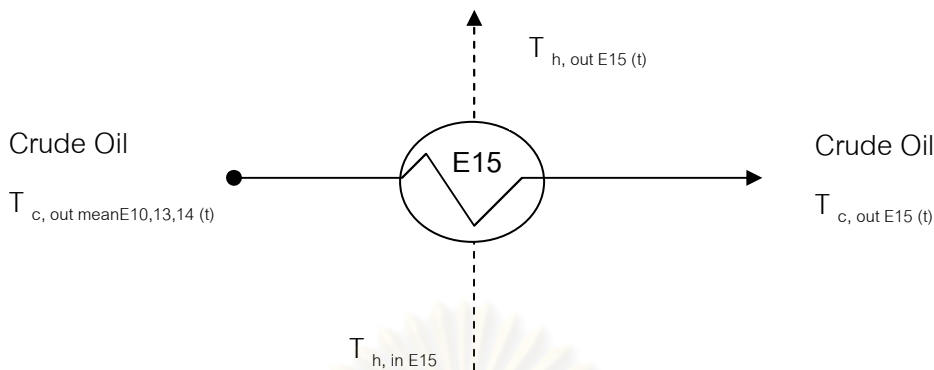
$$T_{c,out E9, Flash (t)} = T_{c,out E9(t)} - 9 \quad (5.34)$$

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (5.35)$$

$$T_{c,out E14(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h,out E15(t)} - a_2 T_{c,out E9, Flash(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h,out E15(t)} \quad (5.36)$$

$$T_{h,out E14(t)} = T_{h,out E15(t)} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,out E14(t)} - T_{c,out E9, Flash(t)}) \quad (5.37)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E15



สามารถหาคุนหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E15 ได้จากสมการ

$$T_{c, out mean E10,13,14}(t) = \frac{T_{c, out E10}(t) + T_{c, out 13}(t) + T_{c, out 14}(t)}{3} \tag{5.38}$$

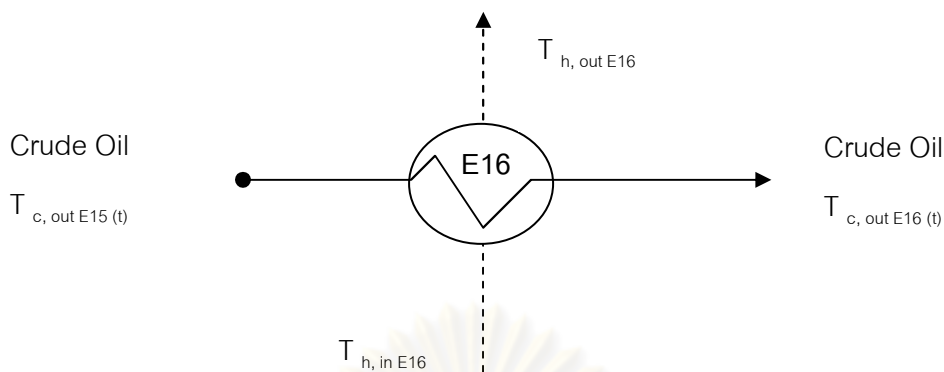
$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \tag{5.39}$$

$$T_{c, out E15}(t) = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, in E15} - a_2 T_{c, out mean E10,13,14}(t)] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, in E15} \tag{5.40}$$

$$T_{h, out E15}(t) = T_{h, in E15} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c, out E15}(t) - T_{c, out mean E10,13,14}(t)) \tag{5.41}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16

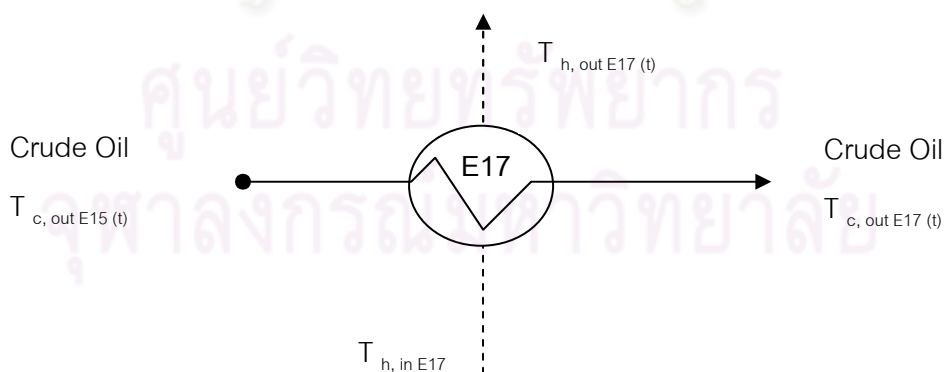


สามารถหาคูณหภูมิกว้างออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E16 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \quad (5.42)$$

$$T_{c, out E16(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, in E16} - a_2 T_{c, out E15(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, in E16} \quad (5.43)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E17



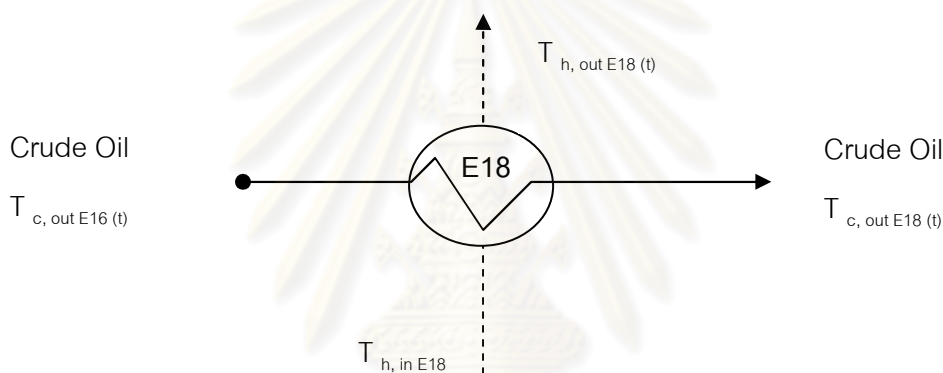
สามารถหาคูณหภูมิกว้างออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E17 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} (1 - e^{-t/t_{p,c}})} \quad (5.44)$$

$$T_{c,out E17(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h,inE17} - a_2 T_{c,outE15(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h,inE17} \quad (5.45)$$

$$T_{h,outE17(t)} = T_{h,inE17} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,outE17(t)} - T_{c,outE15(t)}) \quad (5.46)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18



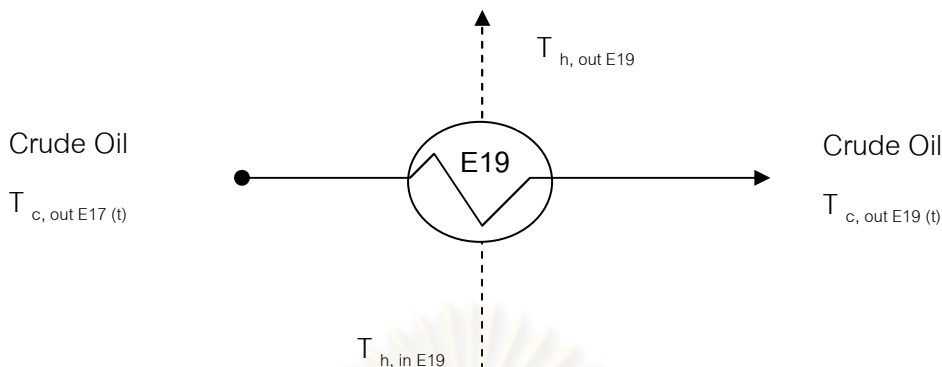
สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์ที่นำมันดิบจาก E18 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{t}{t_{p,c}}\right)^n} \quad (5.47)$$

$$T_{c,out E18(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h,inE18} - a_2 T_{c,outE16(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h,inE18} \quad (5.48)$$

$$T_{h,outE18(t)} = T_{h,inE18} - [F_c C_{p,c} / F_h C_{p,h}] (T_{c,outE18(t)} - T_{c,outE16(t)}) \quad (5.49)$$

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19



สามารถหาอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบจาก E19 ได้จากสมการ

$$U_{(t)} = \frac{U_c}{1 + U_c R_{f,c} \left(\frac{\ln t}{\ln t_{p,c}} \right)} \tag{5.50}$$

$$T_{c, out E19(t)} = \frac{1}{1 - a_o e^{[U_{(t)} a]}} [a_o T_{h, in E19} - a_2 T_{c, out E17(t)}] + \frac{1}{1 - \frac{1}{a_o e^{[U_{(t)} a]}}} T_{h, in E19} \tag{5.51}$$

โดยที่อุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการกลั่น (Distillation) คือ

$$T_{c, out mean E18.19(t)} = \frac{T_{c, out E18(t)} + T_{c, out E19(t)}}{2} \tag{5.52}$$

เพื่อให้สามารถเทียบหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้เกิดความสูญเสียพลังงานในส่วนนี้เพิ่มมากที่สุด จึงได้ทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรพารามิเตอร์ $t_{p,c}$ และ n โดยกำหนดให้ค่า $t_{p,c}$ ลดลง 10 % และค่า n เพิ่มขึ้น 10 % เช่นเดียวกัน ซึ่งค่าตัวแปร $t_{p,c}$ และ n ที่ลดและเพิ่มดังกล่าว จะมีผลทำให้ค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ต้องส่งเข้าทั้ง 3 กระบวนการ เพื่อให้เกิดการเทียบต่างของค่าการสูญเสียพลังงาน (Q) จึงใช้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$(\Delta T)_{Desalt} = T_{c,outE7(t)_{model}} - T_{c,outE7(t)_{fouling}} \quad (5.53)$$

$$(\Delta T)_{preflash} = T_{c,outE9(t)_{model}} - T_{c,outE9(t)_{fouling}} \quad (5.54)$$

$$(\Delta T)_{Distillation} = T_{c,outmeanE18,19(t)_{model}} - T_{c,outmeanE18,19(t)_{fouling}} \quad (5.55)$$

ที่ซึ่ง

$$\Delta Q = \Sigma [\dot{m} C_p (\Delta T)_{Desalt} + \dot{m} C_p (\Delta T)_{Pre flash} + \dot{m} C_p (\Delta T)_{Distillation}] \quad (5.56)$$

$$\Delta Q = Q_{Desalt} + Q_{Pre flash} + Q_{Distillation} \quad (5.57)$$

เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามาเขียนโปรแกรม เพื่อให้สามารถนำมาจำลอง
 หน่วยงานของระบบที่ยกนำมาศึกษา ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีของการเปลี่ยนแปลง กรณีแรกเปลี่ยนแปลง
 ค่าของ $t_{p,c}$ ที่ค่า n คงที่ กรณีที่สองเปลี่ยนแปลงค่าของ n ที่ค่า $t_{p,c}$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB
 เพื่อทำการจำลอง และเขียนแบบกระบวนการได้ดังนี้

5.2.1 กำหนดให้ค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) คงที่

เป็นการจำลองหน่วยงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ โดยได้
 กำหนดให้ ลดค่าของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) ลง 10% โดยค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสาย
 ร้อนและสายเย็น (n) คงที่ ดังแสดงในตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองที่ค่า n คงที่

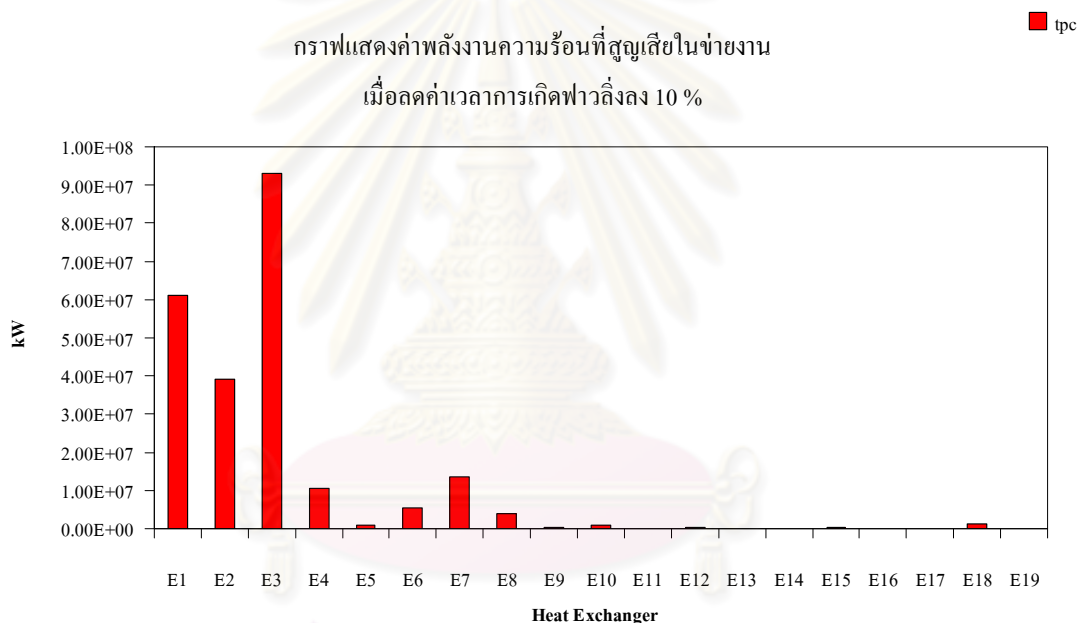
Heat Exchanger	Fouling Model	Parameter	
		$t_{p,c}$	n
E1	Power-law	0.81	0.99
E2	Power-law	0.000882	0.5
E3	Linear	0.171	-
E4	Linear	4.5	-
E5	Falling-rate	5.4	-
E6	Power-law	0.9	0.977
E7	Power-law	0.0081	0.89
E8	Linear	2.34	-
E9	Falling-rate	2.88E-14	-
E10	Power-law	0.00018	0.5
E11	Falling-rate	8.1E-11	-
E12	Power-law	0.018	0.99
E13	Falling-rate	0.00693	-
E14	Falling-rate	8.1E-13	-
E15	Falling-rate	9E-11	-
E16	Falling-rate	1.8E-13	-
E17	Asymptotic	8.1E-13	-
E18	Power-law	1.8	0.99
E19	Falling-rate	0.0594	-

ในส่วนนี้จะแสดงผลที่ได้จากการจำลอง เพื่อหาค่าพลังงานความร้อนสูญเสีย (Q) เมื่อค่าการเกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มขึ้นที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป โดยจากความสัมพันธ์ของสมการของการเกิดฟาวลิง เมื่อลดค่าของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) ลง จะทำให้ค่าการเกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง ทำให้อุณหภูมิของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ได้ไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของการรับเข้าสู่กระบวนการถัดไป จนกระทั่งต้องสูญเสียพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 5.22

ตารางที่ 5.22 แสดงผลจากการจำลองของค่าพลังงานที่ต้องสูญเสียในระบบ ในกรณีที่กำหนดให้ลดค่าของเวลาในการเกิดฟาวลิ่ง ($t_{p,c}$) ลง 10% โดยค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) คงที่

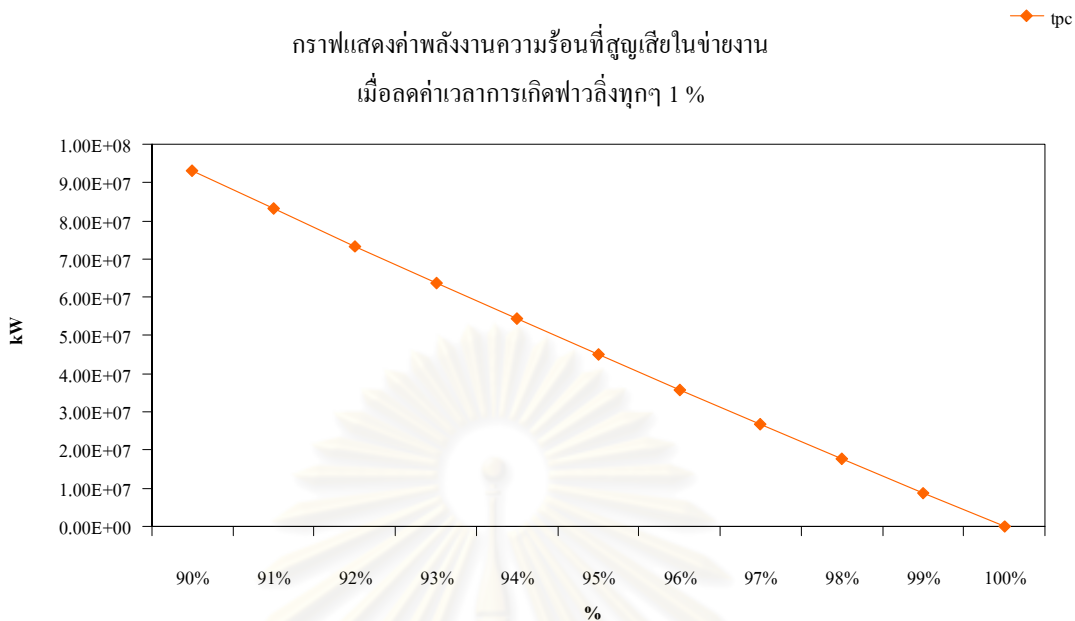
Heat Exchanger	Parameter		Loss Q (kW)
	$t_{p,c}$	n	
E1	0.81	0.99	6.11E+07
E2	0.000882	0.5	3.93E+07
E3	0.171	-	9.30E+07
E4	4.5	-	1.04E+07
E5	5.4	-	9.99E+05
E6	0.9	0.977	5.30E+06
E7	0.0081	0.89	1.36E+07
E8	2.34	-	3.77E+06
E9	2.88E-14	-	4.49E+05
E10	0.00018	0.5	7.93E+05
E11	8.1E-11	-	2.11E+04
E12	0.018	0.99	3.17E+05
E13	0.00693	-	8.38E+03
E14	8.1E-13	-	2.76E+04
E15	9E-11	-	1.75E+05
E16	1.8E-13	-	1.44E+04
E17	8.1E-13	-	6.11E+00
E18	1.8	0.99	1.33E+06
E19	0.0594	-	1.07E+05

จากผลการจำลอง เมื่อลดค่าของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) ลง 10 % พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ระบบข่างานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 (Critical Heat Exchanger) ที่ซึ่งเมื่อค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มมากขึ้นตามเวลา ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง เป็นผลจากฟาวลิงไปต้านทานการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายร้อนและสายเย็นลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง จนกระทั่งต้องเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ เพื่อให้ได้ค่าความร้อนของน้ำมันดิบที่เหมาะสม โดยมีค่าการสูญเสียพลังงานในการดำเนินการของข่างานเท่ากับ 9.30×10^7 กิโลวัตต์ ที่ระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อน (Q) ที่สูญเสียในข่างานแลกเปลี่ยนความร้อนรวม 19 เครื่อง เมื่อลดค่าเวลาการเกิดฟาวลิงลง 10%

จากกราฟพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ระบบข่างานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 (Critical Heat Exchanger) ดังนั้นเมื่อนำมาพิจารณาเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 5.21 โดยลดค่าเวลาการเกิด ฟาวลิงลงทุกๆ 1 % เพื่อทำนายลักษณะพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับข่างานเมื่อค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มสูงขึ้นจากการลดค่าเวลาการเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อน (Q) ที่สูญเสียในข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนรวม 19 เครื่อง เมื่อลดค่าเวลาการเกิดฟาวลิ่งลงทุกๆ 1 %

จากกราฟแสดงค่าพลังงานความร้อน (Q) ที่สูญเสียในข่ายงาน เมื่อลดค่าเวลาการเกิดฟาวลิ่งลงทุก ๆ 1% พบว่าลักษณะของกราฟเป็นเชิงเส้นตรง (Linear) อธิบายจากความสัมพันธ์ของสมการที่นำมาเขียนแบบจำลองได้ว่าเมื่อลดค่าเวลาการเกิดฟาวลิ่งลงนั้น จะมีผลทำให้ค่าการเกิดฟาวลิ่งเพิ่มสูงขึ้น โดยที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมก็มีค่าลดลงเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ได้ตามคุณภาพที่กำหนด และเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบมีคุณภาพตามที่กำหนด จึงจำเป็นต้องให้พลังงานความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบ ฉะนั้นผลจากการจำลองสามารถอธิบายได้ว่า ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาในการเกิดฟาวลิ่งยังมีค่าลดลง ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องสูญเสียให้กับระบบก็มีค่ามากยิ่งขึ้นเท่านั้นตามลำดับ

5.2.2 กำหนดให้ค่าของเวลาในการเกิดฟาวลิง ($t_{p,c}$) คงที่

เป็นการจำลองขบวนการเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ โดยได้กำหนดให้เพิ่มค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ขึ้น 10% โดยค่าของเวลาในการเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ คงที่ ดังแสดงในตารางที่ 5.23

ตารางที่ 5.23 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองที่ค่า $t_{p,c}$ คงที่

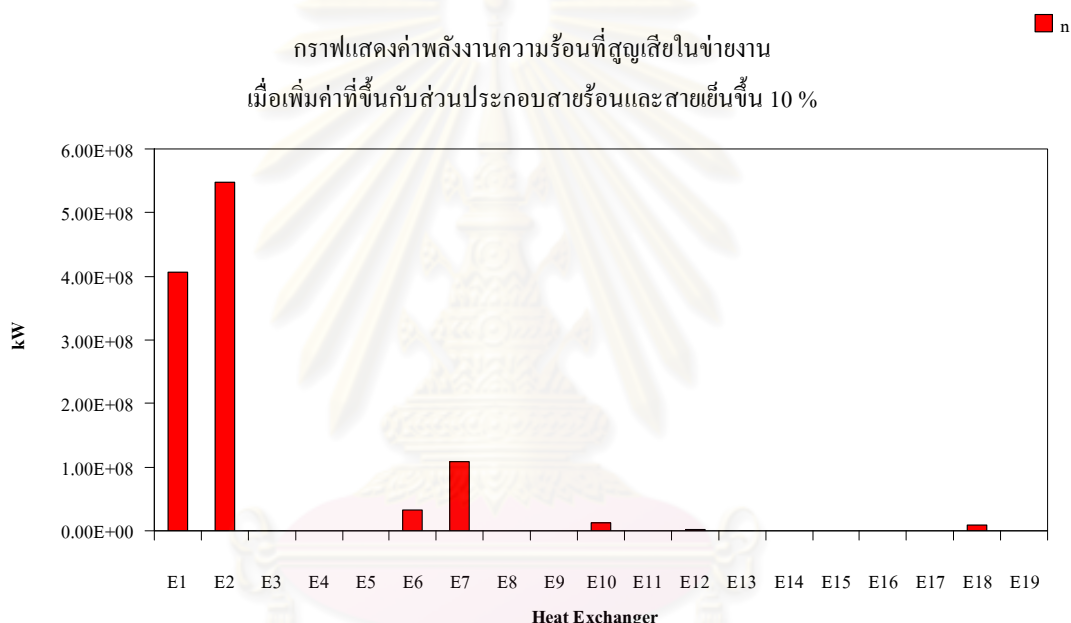
Heat Exchanger	Fouling Model	Parameter	
		$t_{p,c}$	n
E1	Power-law	0.9	1.089
E2	Power-law	0.00098	0.55
E3	Linear	0.19	-
E4	Linear	5	-
E5	Falling-rate	6	-
E6	Power-law	1	1.0747
E7	Power-law	0.009	0.979
E8	Linear	2.6	-
E9	Falling-rate	0.000000000000032	-
E10	Power-law	0.0002	0.55
E11	Falling-rate	0.00000000009	-
E12	Power-law	0.02	1.089
E13	Falling-rate	0.0077	-
E14	Falling-rate	0.000000000009	-
E15	Falling-rate	0.0000000001	-
E16	Falling-rate	0.000000000002	-
E17	Asymptotic	0.000000000009	-
E18	Power-law	2	1.089
E19	Falling-rate	0.066	-

จากความสัมพันธ์ของสมการของการเกิดฟาวลิง เมื่อเพิ่มค่าคงซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ขึ้น จะทำให้ค่าการเกิดฟาวลิง $R_f(t)$ เพิ่มขึ้นและส่งผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง ทำให้อุณหภูมิของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ได้ไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดของการรับเข้าสู่กระบวนการถัดไป จนกระทั่งต้องสูญเสียพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในตารางที่ 5.24

ตารางที่ 5.24 แสดงผลจากการจำลองของค่าพลังงานที่ต้องสูญเสียในระบบ ในกรณีที่กำหนดให้เพิ่มค่าคงซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ขึ้น 10% โดยค่าของเวลาในการเกิดฟาวลิง $t_{p,c}$ คงที่

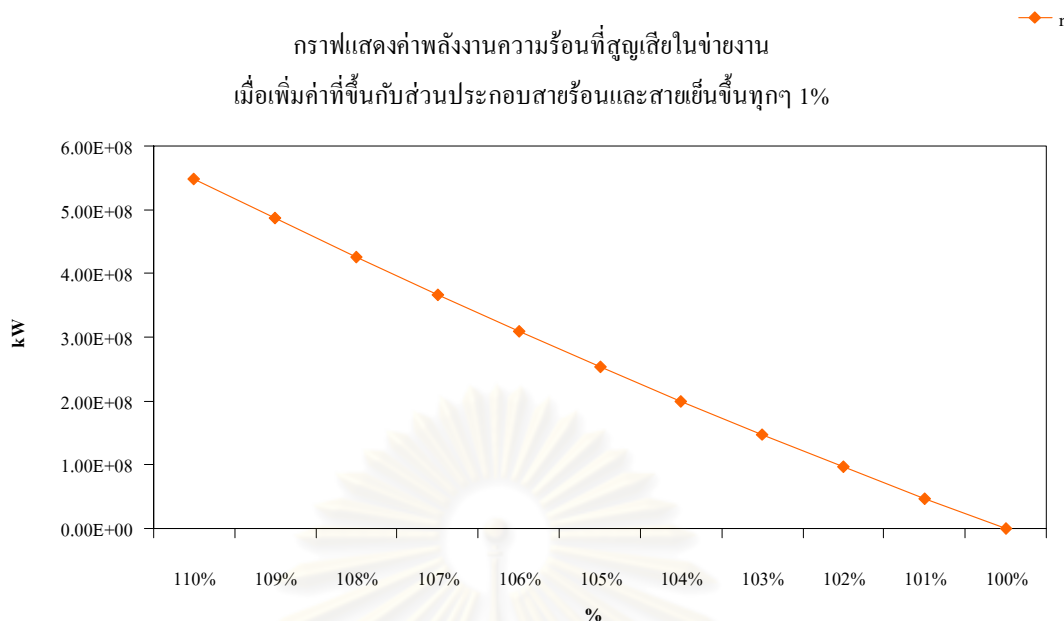
Heat Exchanger	Parameter		Loss Q (kW)
	$t_{p,c}$	n	
E1	0.9	1.089	4.07E+08
E2	0.00098	0.55	5.48E+08
E3	0.19	-	-
E4	5	-	-
E5	6	-	-
E6	1	1.0747	3.31E+07
E7	0.009	0.979	1.08E+08
E8	2.6	-	-
E9	0.000000000000032	-	-
E10	0.0002	0.55	1.25E+07
E11	0.000000000009	-	-
E12	0.02	1.089	2.23E+06
E13	0.0077	-	-
E14	0.0000000000009	-	-
E15	0.00000000001	-	-
E16	0.0000000000002	-	-
E17	0.0000000000009	-	-
E18	2	1.089	9.10E+06
E19	0.066	-	-

จากผลการจำลอง เมื่อเพิ่มค่าคงซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น (n) ขึ้น 10 % พบว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ระบบข้างงานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 (Critical Heat Exchanger) ที่ซึ่งเมื่อค่าการเกิดฟาวลิ่งเพิ่มมากขึ้นตามเวลา ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง เป็นผลจากฟาวลิ่งไปต้านทานการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายร้อนและสายเย็นลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง จนกระทั่งต้องเพิ่มพลังงานความร้อนให้กับระบบ เพื่อให้ได้ค่าความร้อนของน้ำมันดิบที่เหมาะสม โดยมีค่าการสูญเสียพลังงานในการดำเนินการของข้างงานเท่ากับ 5.48×10^8 กิโลวัตต์ ที่ระยะเวลาดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อน (Q) ที่สูญเสียในข้างงานแลกเปลี่ยนความร้อนรวม 19 เครื่อง เมื่อเพิ่มค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นขึ้น 10%

จากกราฟพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ระบบข้างงานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 (Critical Heat Exchanger) ดังนั้นเมื่อนำมาพิจารณาเฉพาะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 5.23 โดยเพิ่มค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นทุกๆ 1 % เพื่อทำนายลักษณะพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับข้างงาน เมื่อค่าการเกิดฟาวลิ่งเพิ่มสูงขึ้นจากการเพิ่มค่าซึ่งขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงค่าพลังงานความร้อน (Q) ที่สูญเสียในข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนรวม 19 เครื่อง เมื่อเพิ่มค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นทุกๆ 1%

จากกราฟแสดงค่าพลังงานความร้อน (Q) ที่สูญเสียในข่ายงาน เมื่อเพิ่มค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นขึ้นทุก ๆ 1% พบว่าลักษณะของกราฟเป็นเชิงเส้นตรง (Linear) เช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 5.2.1 อธิบายจากความสัมพันธ์ของสมการที่นำมาเขียนแบบจำลองได้ว่า เมื่อเพิ่มค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นขึ้น จะมีผลทำให้ค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มสูงขึ้นโดยที่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมก็มีค่าลดลงเป็นสาเหตุให้อุณหภูมิที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ได้ตามคุณภาพที่กำหนด และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบมีคุณภาพตามที่กำหนด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้พลังงานความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบ ผลจากการจำลองจึงสามารถอธิบายได้ว่าลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อน และสายเย็นยังมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องสูญเสียให้กับระบบก็มีค่ามากยิ่งขึ้นเช่นเดียวกัน

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบเทียบกับเวลา ในสถานะที่มีการเกิดฟาวลิงตามรูปแบบสมการจำลองที่เหมาะสม พบว่าในสถานะที่มีการเพิ่มขึ้นของค่าการเกิดฟาวลิง โดยการลดค่าเวลาการเกิดฟาวลิง และการเพิ่มค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ของแต่ละเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงาน มีผลทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานสำหรับเพิ่มค่าอุณหภูมิของสายน้ำมันดิบ เพื่อให้สามารถเข้าสู่กระบวนการหลักทั้ง 3 กระบวนการ

ตลอดช่วงเวลาดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน พบว่าเมื่อค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มมากขึ้นตามเวลา ทำให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง เป็นผลจากฟาวลิงไปต้านทานการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง สายร้อนและสายเย็นลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง จนกระทั่งต้องเพิ่ม พลังงานความร้อนให้กับระบบ เพื่อให้ได้ค่าความร้อนของน้ำมันดิบที่เหมาะสม จึงจำเป็นต้อง สูญเสียพลังงานในการดำเนินการของช่างงาน ซึ่งในสภาวะตามความเป็นจริงแล้วการลดค่าเวลา การเกิดฟาวลิง และการเพิ่มค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น หากเป็นการจำลอง เลียนแบบกระบวนการจริงนั้นสามารถทำได้ง่าย โดยการแทนค่าตัวเลขพารามิเตอร์ที่ต้องการลด หรือเพิ่มได้ในโปรแกรม แต่สำหรับกระบวนการดำเนินงานจริงนั้นหากต้องการเพิ่มเวลาในการเกิด ฟาวลิงก็อาจทำได้โดยการเติมสารกำจัด ป้องกัน ชะลอการเกิดฟาวลิง รวมทั้งสารที่ใช้ในการ เคลือบพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น หากต้องการลดค่าที่ขึ้นกับส่วนประกอบของสาย ร้อนและสายเย็นก็อาจทำได้โดย การคัดแยกคุณสมบัติของน้ำมันดิบที่ส่งเข้ามาในระบบของสาย เย็น รวมทั้งสารที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่งเข้ามาระบบของสายเย็น เป็นต้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเกิดฟาวลิง และผลกระทบต่อสมรรถนะทางความร้อนของข่ายงาน เครื่องเปลี่ยนความร้อนจำนวน 19 เครื่องที่การดำเนินงานเป็นเวลาต่อเนื่อง 600 วัน โดยศึกษาจากกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบในโรงงานอุตสาหกรรมจริง และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งต้องพิจารณาหาค่าเวลาการเกิดฟาวลิง และค่าซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นที่เหมาะสมกับกระบวนการดำเนินงานจริง ทั้งนี้เพื่อสามารถนำไปปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลอง และสามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดฟาวลิงได้ถูกต้องหรือใกล้เคียงกับกระบวนการดำเนินการจริงมากที่สุด อีกทั้งสามารถทำนายอัตราการเกิดฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงานทั้งระบบและยังหาสภาวะการดำเนินงานที่เหมาะสมสำหรับข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษาได้

การศึกษาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผ่านสมการการเกิดฟาวลิง 4 รูปแบบได้แก่ สมการการเกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง (Linear fouling model) สมการการเกิดฟาวลิงแบบกฏยกกำลัง (Power-law fouling model) สมการการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง (Falling-rate fouling model) และสมการการเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล (Asymptotic fouling model) โดยนำข้อมูลอุณหภูมิขาออกสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ออกมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรวมทั้ง 19 เครื่องในข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนมาเทียบกับผลอุณหภูมิขาออกที่ได้จากการจำลอง ทั้งนี้ในการจำลองต้องผ่านกระบวนการหาค่าเวลาในการเกิดฟาวลิง และหาค่าซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นที่เหมาะสมกับกระบวนการดำเนินงานจริง ด้วยวิธีการค้นหาตัวแปรแบบสุ่ม (Random Search)

ค่าความต่างคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ใช้ในการบ่งบอกความแม่นยำ ความเที่ยงตรงของการทำนายจากแบบจำลอง ซึ่งเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ได้แก่ ค่าเวลาในการเกิดฟาวลิง และค่าซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นลงในแบบจำลอง เพื่อให้รูปแบบอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบมีค่าความคลาดเคลื่อน หรือความต่างคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) น้อยที่สุด และผลจากการจำลองต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เก็บได้จากโรงงานอุตสาหกรรมจริง

จากการจำลองเลียนแบบกระบวนการดำเนินงานจริง พบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใน
 ช่างงานโดยส่วนใหญ่มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงแบบอัตราลดลง คิดเป็น 42 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ เครื่อง
 แลกเปลี่ยนความร้อน E5 (RMSE เท่ากับ 2.1269) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E9 (RMSE เท่ากับ
 2.0875) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E11 (RMSE เท่ากับ 3.6787) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
 E13 (RMSE เท่ากับ 4.0653) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E14 (RMSE เท่ากับ 2.7362) เครื่อง
 แลกเปลี่ยนความร้อน E15 (RMSE เท่ากับ 1.7029) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E16 (RMSE
 เท่ากับ 1.1299) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E19 (RMSE เท่ากับ 1.7252) ถัดมาคิดเป็น 37
 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีรูปแบบการเกิดฟาวลิงแบบกฎยกกำลัง ได้แก่
 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E1 (RMSE เท่ากับ 2.4483) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 (RMSE
 เท่ากับ 4.6881) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E6 (RMSE เท่ากับ 1.8765) เครื่องแลกเปลี่ยนความ
 ร้อน E7 (RMSE เท่ากับ 1.7087) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E10 (RMSE เท่ากับ 3.7013) เครื่อง
 แลกเปลี่ยนความร้อน E12 (RMSE เท่ากับ 2.3593) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E18 (RMSE
 เท่ากับ 1.8244) ทั้งนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในช่างงานคิดเป็น 16 เปอร์เซ็นต์ ที่มีรูปแบบการ
 เกิดฟาวลิงแบบเส้นตรง ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 (RMSE เท่ากับ 3.1443) เครื่อง
 แลกเปลี่ยนความร้อน E4 (RMSE เท่ากับ 3.9525) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E8 (RMSE
 เท่ากับ 1.9702) และรูปแบบสุดท้ายคือ การเกิดฟาวลิงแบบเอกโปเนนเชียล ได้แก่ เครื่อง
 แลกเปลี่ยนความร้อน E17 (RMSE เท่ากับ 1.1130)

หลังจากศึกษารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมกับกระบวนการดำเนินการจริง ได้พัฒนา
 แบบจำลองการเกิดฟาวลิงที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน ซึ่งจากช่างงานเครื่องแลกเปลี่ยน
 ความร้อนของกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบที่นำมาศึกษามี 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการ
 กำจัดเกลือ (Desalted) กระบวนการแยกลำดับส่วน (Flash) และกระบวนการกลั่น (Distillation)
 หากอุณหภูมิของน้ำมันดิบก่อนเข้ากระบวนการไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด มีผลทำให้ผลิตภัณฑ์
 น้ำมันดิบไม่ได้คุณภาพ และยังทำให้ต้องสูญเสียพลังงานสำหรับการให้ความร้อนกับน้ำมันดิบ
 แบบจำลองจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นคอขวด (Critical
 Heat Exchanger) ที่มีผลต้องให้เพิ่มพลังงานให้กับระบบมากที่สุด ทำการจำลองโดยทดลองเพิ่ม
 ค่าการเกิดฟาวลิงจากตัวแปรพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบจำลองก่อนหน้า ได้แก่ ค่าเวลาในการเกิด
 ฟาวลิง และค่าซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น จากความสัมพันธ์ของสมการ
 การเกิดฟาวลิง เพื่อให้สามารถเทียบหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้เกิดความสูญเสีย
 พลังงานเพิ่มมากที่สุด จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงให้ค่าเวลาในการเกิดฟาวลิงลดลง 10 เปอร์เซ็นต์
 และค่าซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นเพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าที่ลดและ

เพิ่มดังกล่าวจะมีผลทำให้ค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มขึ้น และส่งผลต่ออุณหภูมิสายผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบที่ต้องส่งเข้าทั้ง 3 กระบวนการหลัก จนกระทั่งสามารถแสดงผลการจำลองออกมาในรูปของพลังงานความร้อนที่ต้องสูญเสียในระบบ

ผลจากการพัฒนาแบบจำลอง พบว่าที่ระยะการดำเนินการต่อเนื่อง 600 วัน เมื่อลดค่าเวลาในการเกิดฟาวลิงลง 10 เปอร์เซ็นต์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ข่างานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด (Critical Heat Exchanger) คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 โดยสูญเสียพลังงานความร้อนเท่ากับ 9.30×10^7 กิโลวัตต์ และเมื่อเพิ่มค่าซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ข่างานต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด (Critical Heat Exchanger) คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E2 โดยสูญเสียพลังงานความร้อนเท่ากับ 5.48×10^8 กิโลวัตต์

จากนั้นได้นำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยลดค่าเวลาในการเกิดฟาวลิง และเพิ่มค่าซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลทำให้ต้องสูญเสียพลังงานความร้อนมากที่สุด (Critical Heat Exchanger) ได้แก่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E3 และ E2 ทุก ๆ 1 เปอร์เซ็นต์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองกับค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้กับข่างาน พบว่า ลักษณะความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเชิงเส้น (Linear) อธิบายจากความสัมพันธ์ของสมการที่นำมาเขียนแบบจำลองได้ว่า เมื่อลดค่าเวลาการเกิดฟาวลิงลงหรือเพิ่มค่าที่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็น จะมีผลทำให้ค่าการเกิดฟาวลิงเพิ่มสูงขึ้นโดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมก็จะมีค่าลดลง สามารถอธิบายได้ว่า ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาในการเกิดฟาวลิงยังมีค่าลดลง หรือค่าที่ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของสายร้อนและสายเย็นยังมีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ต้องสูญเสียให้กับระบบก็มีค่ามากยิ่งขึ้นเท่านั้นตามลำดับ

จากการศึกษาการเกิดฟาวลิง และสมรรถนะทางความร้อนของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการอุ่นน้ำมันดิบ ทำให้สามารถจำลองแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบภายใต้สภาวะที่มีการเกิดฟาวลิง รวมทั้งทำนายปริมาณพลังงานที่สูญเสียของข่างานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสามารถนำข้อมูลที่ได้มาช่วยในการกำหนดช่วงเวลาการล้างทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม และหากสามารถทราบแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขาออกของสายผลิตภัณฑ์ ตามเวลาภายใต้สภาวะที่มีการเกิดฟาวลิง จะสามารถนำมาทำนายช่วงระยะเวลาของการล้างทำความสะอาด บนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ที่เหมาะสมได้ เพื่อลดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ลดการสูญเสียพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ ค่าใช้จ่ายในการล้างทำความสะอาด

ทั้งนี้สามารถนำรูปแบบสมการจำลองการทำนายอุณหภูมิขาออกของสายน้ำมันดิบ และนำไปสู่การคาดการณ์ล่วงหน้าสำหรับการล้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม สำหรับนำไปใช้เป็นแบบจำลองพื้นฐานในการปรับปรุง ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมจริง

6.1 ข้อเสนอแนะ

1. แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สำหรับเลียนแบบกระบวนการจริงในอุตสาหกรรมนั้น หากต้องการทราบผลที่แม่นยำ เทียบตรง และมีความถูกต้องมากขึ้น ควรเก็บค่าจริงที่ได้จากโรงงานเพิ่มเติม ได้แก่ ค่าอัตราการไหลของสายร้อนและสายเย็น ค่าความจุความร้อนของสายร้อนและสายเย็นที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป เป็นต้น รวมทั้งต้องตรวจสอบข้อมูลสถานะในการดำเนินการจริงของระบบจากโรงงานที่นำมาอ้างอิงทั้งหมด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการดำเนินงานจริง และมีสอดคล้องกับกระบวนการในโรงงานจริงมากที่สุด
2. แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ให้นำมาศึกษากระบวนการดำเนินงานต่อเนื่องที่ 600 วัน ซึ่งหากเปลี่ยนขอบเขตระยะเวลาในการศึกษา ควรพิจารณารูปแบบการเกิดฟาวลิงที่เหมาะสมอีกครั้งให้กับขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการ
3. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้จำลอง ทำนาย หรือคาดการณ์ล่วงหน้า สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ โดยการเปลี่ยนแปลงค่าที่จำเป็นในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาปรับปรุงให้สอดคล้องกับกระบวนการนั้น ๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัลยลักษณ์ เอาเอกสินธุ์ . การพัฒนาระเบียบวิธีออฟติไมเซชันแบบพลวัตของการทำความสะอาด
ข่างานแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วิธีการสร้างปัญหาเวลาต่อเนื่อง, วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ประพิศพรรณ เตชะวานิชชัย. ผลกระทบของการเกิดฟาวลิงของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใน
หน่วยไฮโดรทรีตเตอร์ต่อการปฏิบัติการและการบำรุงรักษาที่เหมาะสม, วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

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

David, A.S. Water jetting technology. London: E&FN Spon, an imprint of Chapman Hall.
1995.

Field, R.W., and Howell, J.A. Process engineering in the food industry: developments
and opportunities. New York, Elsevier Science Publishers LTD, 1989.

Fraas, A.P. Heat exchanger design, 2nd ed. United States of America John Wiley & Sons,
Inc. 1989.

Joana L. et al., Fouling management in crude oil preheat trains through stream split
optimization. Chemical Engineering. 27(2009): 1587-1592.

Kumar, D.A., and Kumar, D.S. Dynamics of heat exchangers subject to flow variations.
International Journal of Heat and Mass. 14(2007): 2733-2743.

Mariusz M. et al., Optimal cleaning schedule for heat exchangers in a heat exchanger
network. App. Therm. Eng. 25(2004): 1019-1032.

- Petermeier H. et al., Hybrid model of the fouling process in tubular heat exchangers for the dairy industry. Journal of Food Engineering. 55(2002): 9-17.
- Rodriguez C., Smith R, Optimization of operating conditions for mitigating fouling in heat exchanger networks. Chemical Engineering Research and Design. 85(2007):839-851.
- Smaili, F., Vassiliadis, V.S. and Wilson, D.I., Optimization of scheduling of cleaning in heat exchanger networks subject to fouling. Food and Bioproducts Processing. 77(1999):159-164.
- Syed, M.Z., Anwar, K.S., Younas, M., and Budair, M.O. A risk based heat exchanger analysis subject to fouling Part I: Performance evaluation. Energy Fuels. 25(2000): 427-443



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของน้ำมันดิบ

น้ำมันดิบ (Crude Oil) มาจากใต้ดิน มีลักษณะเป็นของเหลวสีดำ ๆ จึงสูบขึ้นมาได้ มีสารไฮโดรคาร์บอนอยู่มากมาย จึงเผาแล้วได้พลังงานสูง ถ้ามีสิ่งเจือปนมาก เช่น มีกำมะถันมาก หากเผาแล้วจะเกิดก๊าซพิษมาก ก็ถือว่าเป็นน้ำมันดิบเกรดต่ำ ส่วนน้ำมันดิบที่มีกำมะถันเจือปนน้อยถือว่าเป็นน้ำมันดี จึงมีราคาแพง น้ำมันดิบนี้จะเอามาใช้โดยตรงไม่ได้ ต้องเอาไปกลั่นที่โรงกลั่นน้ำมัน ทำเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เอาไว้เติม รถยนต์ รถดีเซล เรือ รถไฟ หรือเครื่องบิน น้ำมันเหล่านี้มีสมบัติต่างๆ กันไปและราคาก็ไม่เท่ากัน

น้ำมันดิบประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน และคาร์บอน รวมตัวกันเป็นไฮโดรคาร์บอนอะตอม ซึ่งส่วนใหญ่จะมีจำนวนตั้งแต่ 4 อะตอมขึ้นไป นอกจากนี้ยังมีธาตุหรือสารอื่นๆ ประกอบอยู่ด้วย เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน กำมะถัน วานาเดียม เหล็ก และนิกเกิล น้ำมันดิบที่เกิดขึ้นในแหล่งกำเนิดที่ต่าง ๆ กัน อาจมีคุณสมบัติแตกต่างกัน จึงได้มีการจัดประเภทน้ำมันดิบตามลักษณะหรือคุณสมบัติของน้ำมันดิบออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. น้ำมันดิบพื้นฐานชนิดที่ไม่มีไขมาก (paraffin base) เช่น น้ำมันดิบจากราชอาณาจักรซาอุดีอาระเบีย หรือพบได้ในประเทศไทยที่แหล่งน้ำมันดิบจากแหล่งสิริกิติ์ เป็นต้น
2. น้ำมันดิบพื้นฐานชนิดที่มียางมะตอยมาก (asphalt/naphthenic base) เช่น น้ำมันดิบจากแหล่งฝาง เป็นต้น
3. น้ำมันดิบพื้นฐานชนิดผสม (mixed base) เป็นน้ำมันดิบพื้นฐานชนิดผสมกันระหว่างพื้นฐานชนิดมีไขมากและชนิดที่มียางมะตอยมาก

ประโยชน์ของน้ำมันดิบ ภายหลังจากผ่านกระบวนการกลั่นน้ำมันแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันต่างๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ดังนี้ คือ เป็นก๊าซหุงต้ม (liquefied petroleum gas หรือ LPG) ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหุงต้ม เครื่องยนต์ รถยนต์ รวมทั้งเตาเผา และเตาอบต่างๆ เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ เบนซินและน้ำมันซูเปอร์สำหรับรถยนต์ นอกจากนี้ ยังมีน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินใบพัดและน้ำมัน เชื้อเพลิงเครื่องบินไอพ่น เป็นน้ำมันก๊าดใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงเครื่องบินใบพัดและน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินไอพ่น เป็นน้ำมันก๊าดใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับตะเกียง เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลง สีทาบ้าน น้ำมันชักเงา น้ำมันทำความสะอาด เป็นเชื้อเพลิง

บ่มยาสูบ อบพืชผล และใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก นอกจากนี้ ยังเป็นน้ำมันดีเซลหรือโซล่า น้ำมันเตา น้ำมันหล่อลื่น ยางมะตอย และจาระบี

น้ำมันดิบ คือปิโตรเลียมที่มีสถานะเป็นของเหลวในธรรมชาติ ส่วนมากมีสีดำหรือน้ำตาล มีลักษณะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ปะปนกันอยู่ และในบางครั้งอาจมีสารอื่น ๆ ปนอยู่ด้วย เช่น กำมะถัน (S), ไนโตรเจน (N), ออกซิเจน (O) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ น้ำมันดิบที่รับเข้ามาจากการขุดจะยังไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทันที จำเป็นต้องมีการนำเข้าสู่กระบวนการต่าง ๆ เพื่อนำมาแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ออกเป็น กลุ่ม ๆ ก่อน จึงจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ตามชนิดของสารเหล่านั้นได้

คุณสมบัติของน้ำมันดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

จากการออกแบบกระบวนการผลิตของข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อน ที่ยกนำมาศึกษานั้น น้ำมันดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต ได้รับน้ำมันดิบมาจากแหล่งน้ำมันดิบแถบตะวันออกกลาง (Arabian Light Crude Oil) ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งน้ำมันดิบที่มีคุณภาพดี ไม่มีไขมาก และมีสิ่งปนเปื้อนน้อย (paraffin base) มีคุณสมบัติโดยรวมดังตาราง

The feed origins are listed below:

Design Intent (Feed Origin)		
Design Crude	Other ME Crudes	FE Crudes
- Arabian Light	- Arabian Medium - Arabian Heavy - Kuwait - Kirkuk - Iranian Light - Basrah - Qatar - Oman - Murban	- Minas - Durri - Tapis - Bach Ho - Brunei Light - Gippsland

The feedstock properties are listed below:

Feedstock Properties		
Feed origin	-	Arabian Light
Crude pour point	max C	36
Nitrogen content bulk	max ppm wt	120
Nitrogen content waxy	max ppm wt	1800
Sulphur content	wt%	1.75
Salt content (as NaCl)	ppm	1.50
Acid value (TAN)	mg KOH/g	0.01
Density at 15 C	kg/m ³	852



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1. การทำความสะอาดโดยวิธีไม่ถอดออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่เกาะติด และตกค้างอยู่ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยไม่ต้องถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่องนั้นเป็นวิธีที่ง่าย และทำได้สะดวก ส่วนใหญ่การใช้วิธีนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจุดประสงค์การทำความสะอาดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น เพื่อชำระสิ่งสกปรกออกจากผิวผนังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

หลักการทำความสะอาดวิธีนี้ จะเป็นการใช้สารเคมีเติมเข้าไปภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แทนของเหลวที่ใช้ในกระบวนการผลิตและแช่ทิ้งไว้ สารเคมีจะไปชะล้าง สิ่งสกปรกโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี แต่การสะสมสิ่งสกปรกมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน ดังนั้น การทำความสะอาดด้วยสารเคมีต้องพิจารณาว่า ใช้สารเคมีที่เป็นอินทรีย์หรืออนินทรีย์ในการทำความสะอาดเนื่องจากอาจทำให้เกิดคราบ หรือทำปฏิกิริยากับโลหะหรือสิ่งสกปรกนั้นได้ และมีอีก หลายกรณีที่ควรพิจารณา ร่วม เช่น ความหนืดของสิ่งสกปรก การเป็นคราบไขมัน และการเกิดสนิม การเลือกใช้สารเคมีในการทำความสะอาดนั้นขึ้นอยู่กับรายละเอียดภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งอาจใช้ชนิดสารเคมีที่มีความแข็งหรืออ่อนนุ่ม ส่วนผสมที่เป็นอินทรีย์หรือส่วนผสมประเภทกรดธรรมชาติ โดยเฉพาะภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางชนิด ไม่สามารถใช้วิธีทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้ อาจจะต้องเลือกใช้วิธีอื่นในการทำความสะอาด ซึ่งวิธีการสลัดช่องทางการไหลก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำความสะอาดได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การใช้วิธีนี้เมื่อของไหลฝั่งหนึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดคราบ สิ่งสกปรก และของไหลฝั่งหนึ่งเป็นของไหลที่สะอาด ดังนั้นการสลัดช่องทางการไหลจึงสามารถกำจัดสิ่งสกปรกที่ตกค้างได้ ส่วนวิธีการใช้ฟองน้ำชนิดยางที่มีลักษณะเป็นลูกบอลกลม สามารถครูดกับผิวผนังแลกเปลี่ยนความร้อนได้ แต่ก็มีข้อขัดข้องกับการใช้งานกับระบบน้ำเย็นเป็นส่วนใหญ่และในระบบของน้ำวิธีที่ใช้ คือวิธีการใช้เม็ดทรายในการทำ ฟลูอิดไดเบด เพื่อขัดถูผิวผนังภายในของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั้งหมดนี้เป็นการทำความสะอาดแบบไม่ถอดอุปกรณ์ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2. การทำความสะอาดวิธีถอดล้างออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การทำความสะอาดแบบนี้ใช้ในกรณีเมื่อการทำ ความสะอาดด้วยวิธีไม่ถอดออกจากเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนไม่สามารถชำระสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างออกมาได้ หรือภายในระบบไม่สามารถใช้วิธีต่าง ๆ ในวิธีไม่ถอดล้างมาทำความสะอาดได้ อีกกรณีหนึ่งคือ สิ่งสกปรกที่ตกค้างอยู่ด้านล่างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและแข็งตัวเกาะติดอยู่ สารเคมีหรือวิธีอื่น ๆ ไม่สามารถทำความสะอาดส่วนนี้ได้ ดังนั้น จึงมีวิธีการใช้แรงดันสูงของน้ำโดยมีหัวฉีดทำให้เกิดแรงดันของน้ำ และในการทำความสะอาดนั้นต้องถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนออกเพื่อทำความสะอาด ส่วนประสิทธิผลในการทำความสะอาดวิธีนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของสิ่งสกปรกที่เกาะติดนั้น ในบางครั้งอาจใช้แปรงขัดบริเวณพื้นผิวที่สิ่งสกปรกเกาะติดได้ซึ่งความยากง่ายขึ้นอยู่กับ การเข้าถึงในการทำความสะอาดและกำลังของแรงคน ส่วนการเจาะท่อเพื่อทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่สะสม และมีคราบหินปูนมากที่อยู่ภายในระบบท่อไม่เป็นที่นิยม แต่สมควรเปลี่ยนท่อส่วนนั้น

การทำความสะอาดโดยวิธีขัดถูหรือครูดสิ่งสกปรกเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับผิวผนังแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดโลหะที่มีการเคลือบผิว วัสดุจะเป็นชนิดแบบครูดได้ โดยใช้แรงดันสูงของอากาศที่ส่งวัสดุที่สามารถขัดถู หรือครูดสิ่งสกปรกที่เกาะติดที่ผิวผนังแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับเทคโนโลยีที่ดีสำหรับการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ต้องไม่สมควรมีค่าใช้จ่ายในส่วนองแรงงาน เช่น วิธีการเป่าเขม่า ซึ่งเป็นการพัฒนาการทำความสะอาดสำหรับอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำและขบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อได้ก๊าซ สำหรับใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น การทำความสะอาดสิ่งสกปรกเล็ก ๆ หรือฝุ่นละอองที่เกาะติด โดยใช้อากาศหรือไอน้ำก็ได้ไปทำลายไม่ให้อะเอียด ด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วของไอน้ำที่มีการทำงานแบบปกติ ส่วนไอน้ำที่ใช้ทำความสะอาดจะมีประโยชน์ทำความสะอาดพวกสารคาร์บอนขนาดเล็กๆ ภายในอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อไอน้ำ

วิธีการใช้กับสัญญาณสั่นสะเทือน ซึ่งมีความพยายามใช้โดยประสบความสำเร็จในบางกรณีเท่านั้น จากการใช้วิธีคลื่นความร้อนในการทำความสะอาดภายในนั้นเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต้องมีค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสูงขึ้น ดังนั้น การทำความสะอาดเป็นปัจจัยหนึ่งของประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายต่าง ๆ รวมถึงต้นทุนการผลิตสินค้า

การแก้ปัญหาสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้าง ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น วิศวกร และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง จำเป็นต้องมีประสบการณ์ในการทำงานร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากต้องทราบแหล่งที่มาและสาเหตุที่เกิดการสะสมของสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้าง ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุนั้น ๆ เช่นการเกิดคราบสิ่งสกปรกชนิดจำพวกสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเกาะติดอยู่ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เหล่านี้จะทำให้มีการเจริญเติบโตอยู่เรื่อย ๆ จนเป็นแผ่นฟิล์ม บางและหนาขึ้น ๆ จนขวางทางการไหลของของเหลวทำให้อุณหภูมิ, ความดันของของไหลเปลี่ยนแปลงไป และตัวแปรอื่น ๆ ด้วย และยังส่งผลถึงคุณภาพของกระบวนการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น สิ่งที่ยังชี้ได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพต่ำลง โดยสังเกตจากตัวแปรต่างๆ คือ อุณหภูมิและความดันของของไหล เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นหรือต่ำลงผิดปกตินั้นอาจวิเคราะห์ได้ว่าเกิดสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่กระบวนการผลิตยังทำงานอยู่อย่างต่อเนื่องนั้นจะทำให้วิศวกร และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องไม่สามารถถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ มาพิสูจน์ดูได้ ซึ่งถ้าหยุดการทำงาน หมายถึงต้องเสียค่าใช้จ่ายของระบบการผลิต ดังนั้น ส่วนใหญ่จะวิเคราะห์ได้จากเครื่องมือวัดอุณหภูมิและ ความดันของของไหลที่ติดตั้งไว้กับระบบท่อส่งของของไหล อีกตัวแปรหนึ่งที่น่าสนใจคือ การวิเคราะห์เบื้องต้น โดยต้องมีความชำนาญการและขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตเป็นประจำ คือ การวิเคราะห์จากอัตราการไหลของของไหล เนื่องจากทำให้ปริมาณการผลิตลดต่ำกว่าปกติในระยะเวลาที่เท่ากัน อัตราการไหลจะแยกวิเคราะห์ตัวแปรออกเป็น 2 ตัวแปร คือ ความเร็วและพื้นที่หน้าตัดของการไหลผ่านโดยต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อถอดอุปกรณ์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาวิเคราะห์

ก่อนจะแก้ไขปัญหสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าเป็นไปได้ การวางแผนในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในขั้นตอนแรกควรเน้นเรื่องจุดที่ทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่ เกาะติดและตกค้างเพื่อลดปัญหาในระดับหนึ่ง เหมือนกับการเลือกใช้วัสดุของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการเลือกวัสดุในส่วนของระบบการผลิต โดยวัสดุนั้นต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีและไม่ทำให้เกิดสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้าง ส่วนการดำเนินงานก่อนการจัดสร้างโรงงานจำเป็นต้องมีแผนผังโรงงาน เพื่อเตรียมพร้อมในการจัดองค์ประกอบต่าง ๆ ทั้งระบบการผลิต แต่สำหรับทางอ้อมก็เป็นส่วนช่วยลดปัญหาสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างทั้งในระบบการผลิตและเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ด้านการสะสมของสิ่งสกปรกอยู่เรื่อย ๆ ขณะระบบการผลิตทำงาน ดังนั้นสิ่งสกปรกจะสะสมจนเกิดเป็นแผ่นฟิล์มบางและมีความหนาขึ้น ส่งผลถึงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตทั้งระบบ การทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ถือเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดของการรักษาประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้คงที่มากที่สุดเท่าที่ทำได้ และยืดอายุการใช้งานให้ยาวนาน ขึ้นตอนการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ง่ายและสะดวก โดยไม่ใช้ระยะเวลาอันยาวนานและไม่ซับซ้อนนั้น คือ การทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีไม่ถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่อง และการใช้สารเคมีก็เป็นวิธีแรกที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพื่อชำระล้างสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเคมี และรายละเอียดต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นวิธีสลับช่องทางการไหลก็เป็นวิธีการที่ใช้ได้ในบางกรณี โดยต้องวางแผนออกแบบมาเพื่อทำวิธีการนี้ซึ่งจะลดการใช้ยาได้พอสมควร แต่นักวิศวกรและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องต้องเข้าใจวิธีการนี้ วิธีต่อมาคือ วิธีการใช้ลูกบอลฟองน้ำชนิดยาง ซึ่งสามารถใช้ได้เฉพาะกับระบบน้ำเย็นและน้ำที่อุณหภูมิบรรยากาศเท่านั้น ซึ่งลูกบอลฟองน้ำชนิดยางจะถูกและครูดผิวผนังภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนวิธีใช้เม็ดทรายในการทำฟลูอิดไดเบดนั้นก็คล้ายกับวิธีใช้ลูกบอลฟองน้ำชนิดยาง ซึ่งทั้งหมดนี้มีจุดประสงค์เดียวกัน เพื่อทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีไม่ถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่อง อีกวิธีที่ตรงกันข้ามกับวิธีทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีไม่ถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่อง คือ วิธีทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่อง ซึ่งแน่นอนขึ้นตอนการถอดและประกอบนั้นยุ่งยาก ต้องใช้วิศวกรและเจ้าหน้าที่ที่มีความเชี่ยวชาญกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนั้น ๆ แต่ก็ก็เป็นวิธีที่ทำความสะอาดที่ดีที่สุด โดยการถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ มาทำการขัดถูโดยใช้แปรงขัด หรือใช้น้ำที่มีแรงดันสูง โดยมีหัวฉีดเป็นตัวทำให้เกิดแรงดันน้ำสูง เพื่อไปทำความสะอาด เมื่อทำการถอดก็จะสังเกตการสะสมสิ่งสกปรกได้ด้วยตา ดังนั้น จึงเป็นวิธีทำความสะอาดที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ในระดับที่ดี

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่ในปัจจุบัน ต้องมีการทำความสะอาดทุกเครื่อง เนื่องจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ มีการใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ตลอดเวลา จึงเป็นต้นกำเนิดที่สิ่งสกปรกมาสะสมจนเป็นคราบ และมีความหนาของสิ่งสกปรกเกาะติดและตกค้างภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การวิเคราะห์จากอุณหภูมิ ความดัน ความเร็ว และพื้นที่หน้าตัดของการไหลผ่านของของไหล จึงสามารถใช้เป็นการตรวจสอบได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนยังทำงานอย่างมีประสิทธิภาพคงที่อยู่ แต่ที่สำคัญสิ่งที่ควรดำเนินการก่อนเพื่อช่วยลดปัญหาสิ่งสกปรกที่เกาะติดและตกค้าง คือการวางแผนผังโรงงานการออกแบบและการเลือกใช้ชนิดของวัสดุมาทำโครงสร้าง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สุดท้ายเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็ยังคงมีการทำความสะอาดอยู่ แต่วิธีการทำความสะอาดสามารถดำเนินการ โดยต้องวิเคราะห์ถึงสาเหตุการเกิดสิ่งสกปรกให้ได้ ก่อนว่าจะใช้วิธีทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีไม่ถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่องหรือถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่อง ซึ่งแบ่งวิธีทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีไม่ถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่องได้ ดังนี้ การใช้สารเคมี การสลับช่องทางการไหล การใช้ลูกบอลฟองน้ำชนิดยาง และการใช้เม็ดทรายในการทำฟลูอิดไดเบด ส่วนการถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ มาทำการขัดถูโดยใช้แปรงขัด หรือใช้น้ำที่มีแรงดันสูงโดยมีหัวฉีด เป็นวิธีทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ออกจากเครื่อง ดังนั้น โรงงานควรมีการวางแผนบำรุงรักษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีวิศวกรและเจ้าหน้าที่ที่มีความเชี่ยวชาญช่วยในการบำรุงรักษาเพื่อให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพคงที่ และยังช่วยลดปัญหาอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค
การประชุมทางวิชาการ

1. Waraporn Srisukcharoenpanya and Soorathep Kheawhom. Study of fouling formation and the effect on thermal performance of heat exchanger network in preheating of crude oil. The 3rd SUT Graduate Conference, Nakhon Ratchasima, Thailand, November 21-23, 2010: GD32010160 (IN THAI)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววราภรณ์ ศรีสุขเจริญปัญญา เกิดเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม พ.ศ. 2526 อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาในระดับอุดมศึกษาโรงเรียนอุดรพัฒนาการ (วิทย์-คณิต) จังหวัดอุดรธานี, สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยรังสิต จังหวัดปทุมธานี และเข้าศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย