

การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ



นางสาว ธนภรณ์ หอมสุวรรณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FOULING FORMATION AND THE IMPACTS IN CRUDE OIL REFINERY PROCESS



Miss Thanaporn Homsuwan

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

การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของ
ตะกรันในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

โดย

นางสาว ธนภรณ์ หอมสุวรรณ

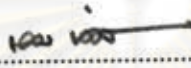
สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

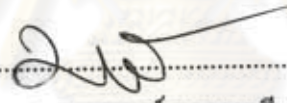
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

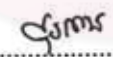
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

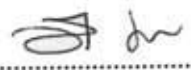

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กมิติศ หนูทอง)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข)

ธนภรณ์ หอมสุวรรณ: การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ. (FOULING FORMATION AND THE IMPACTS IN CRUDE OIL REFINERY PROCESS), อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 87 หน้า.

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความสำคัญมากในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ ซึ่งมีตะกรันเป็นปัญหาหลักขัดขวางการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณผิวของการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดความสูญเสียในทางเศรษฐศาสตร์ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเกิดตะกรัน ทางแก้ไขคือการทำความสะอาดผิวของการถ่ายเทความร้อนซึ่งควรมีการวางแผนล่วงหน้าเพื่อลดความสูญเสีย โดยงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบเพื่อนำมาวางแผนการทำความสะอาด ทำการทดลองโดยควบคุมความดันและควบคุมอุณหภูมิคงที่เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์ไปยังของเหลวโดยใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) เป็นตัวควบคุมและเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์และอุณหภูมิในน้ำมันดิบ และนำมาคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความต้านทานตะกรัน $R_f(T, t) = (0.0000000032e^{0.07T} + 0.000006) t$ สามารถใช้ทำนายที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 90 ถึง 130 องศาเซลเซียส และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS) พบว่าอุณหภูมิของน้ำมันดิบที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงเฉลี่ย 2% และสูญเสียค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.7 ล้านบาทต่อเดือน สาเหตุเกิดตะกรันมาขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิติศ. ธนภรณ์ หอมสุวรรณ
 สาขาวิชา..... วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... สุรเทพ
 ปีการศึกษา..... 2553.....

##5171492221: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FOULING, DISTILLATION, CRUDE OIL

THANAPORN HOMSUWAN: FOULING FORMATION AND THE IMPACTS IN
CRUDE OIL REFINERY PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. SOORATHEP
KHEAWHOM, Ph.D., 87 pp.

Heat exchanger is important and employed in most stages of industrial processing. Fouling of heat transfer surface is a major problem because it increases energy consumption resulting in economic losses. The fouling cause the reduction of heat transfer efficiency with time. Thus, the regular cleaning of fouled units is implemented to reduce these losses. In this work, the fouling testing apparatus used for test the fouling formation and set cleanliness scheduling in crude oil refinery process. The results are calculated from the difference temperature between transfer surfaces (inside the heater) and liquid phase (crude oil temperature) under constant pressure and temperature control reach to steady state. The temperature in system can be controlled and recorded by MATLAB program. The fouling resistance mathematics model is investigated $R_f(T,t) = (0.0000000032e^{0.07T} + 0.000006)t$ can use for predict in range of 90°C to 130°C and compare heat transfer efficiency by HYSYS program. The result show that the temperature of crude oil leaving heat exchanger decrease to 2% an average and operating cost increase to 2.7 million baht per month. The cause is coming from the heat exchanger was blocked by fouling.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department :..... Chemical Engineering..... Student's Signature..... Thanaporn Homsuwan
Field of Study :..... Chemical Engineering..... Advisor's Signature..... Soorathep Kheawhom
Academic Year :..... 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีต้องขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการอบรมสั่งสอนการปฏิบัติงาน คำแนะนำแนวทางในการพัฒนางานวิจัยและความช่วยเหลือในอีกหลายต่อหลายด้านจนสำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี ประธานกรรมการ อ.ดร.กษิตศ หนูทอง และอาจารย์ ดร.วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการ และได้เสียสละเวลาในการให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ บริษัทปตท. อะโรเมติกส์และการกลั่น จำกัด(มหาชน) และบริษัท ไอ อาร์ พี ซี จำกัด ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันดิบเพื่อใช้ในการศึกษาและทดลอง

ขอบคุณเพื่อน พี่และน้องทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการออกแบบเครื่องทดสอบตะกรัน และวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุม จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดาและมารดาที่เป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดจนทำให้สำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

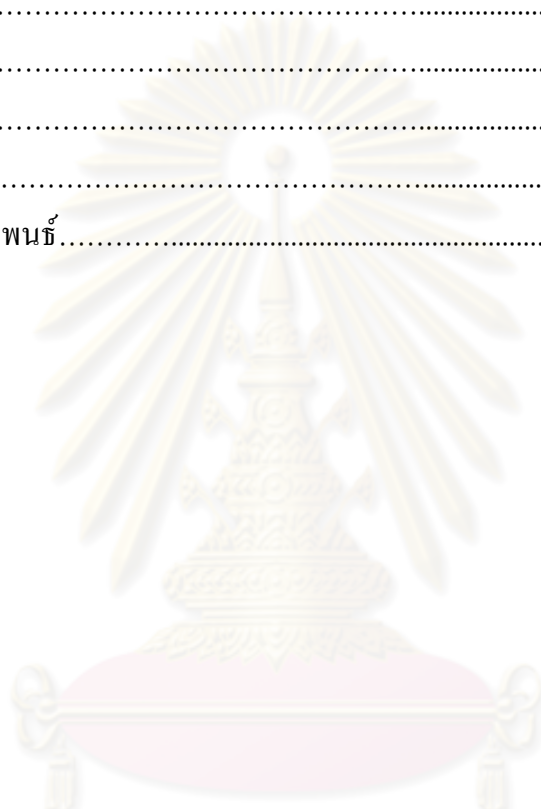
สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2. ทฤษฎี.....	4
2.1 ตะกรัน (Fouling).....	4
2.1.1 ประเภทของตะกรัน.....	5
2.1.2 การวัดผลกระทบของตะกรัน.....	5
2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer).....	9
2.2.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer).....	9
2.2.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer).....	11
2.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat-transfer coefficient).....	12
2.3 การกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Distillation).....	14
2.3.1 วิธีฮีตติง (Preheating).....	15
2.3.2 หอกกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Distillation Column).....	16

บทที่	หน้า
2.3.3 ไซค์สตีรมสตริปปิง (Side Steam Stripping).....	16
2.3.4 หอเสถียรเนพทา (Light Naphtha Stabilization).....	17
3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
4. การออกแบบและการทดลอง.....	22
4.1 การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน.....	22
4.1.1 การควบคุมอุณหภูมิของฮีทเตอร์.....	27
4.1.2 การวัดอุณหภูมิ.....	28
4.1.3 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเครื่องทดสอบ...	30
4.2 การทดลองการก่อตัวของตะกรัน.....	30
5. ผลการทดลองวิจารณ์ผลการทดลอง.....	33
5.1 ผลการทดลองการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ 90 °C.....	35
5.2 ผลการทดลองการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ 100 °C.....	36
5.3 ผลการทดลองการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ 120 °C.....	37
5.4 ผลการทดลองการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ 125 °C.....	38
5.5 ผลการทดลองการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ 130 °C.....	39
5.6 วิเคราะห์ผลการทดลองเทียบค่าความต้านทานตะกรันน้ำมันดิบที่ทดลองที่ 120 125 และ 130 °C.....	40
5.7 วิเคราะห์ผลการทดลองโดยเปรียบเทียบค่าความชันที่ได้จากการทดลองจากทั้ง 5 อุณหภูมิ	41
6. การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS)	43
6.1 สร้างแบบจำลองHYSYS.....	43
6.2 การจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรม HYSYS.....	46
6.2.1. ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่อุณหภูมิ 120 °C	47
6.2.2. ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่อุณหภูมิ 125 °C	48
6.2.3. ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่อุณหภูมิ 130 °C	49
6.2.4.ผลกระทบของตะกรันเมื่อเกิดตะกรันทดลองที่ 120°C.....	50
6.2.4.ผลกระทบของตะกรันเมื่อเกิดตะกรันทดลองที่ 125°C.....	51
6.2.4.ผลกระทบของตะกรันเมื่อเกิดตะกรันทดลองที่ 130°C.....	52
6.3 วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันของอุณหภูมิ 120 125 และ 130°C ด้วยโปรแกรมไฮซิส.....	53

บทที่	หน้า
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	54
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	54
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก ก	57
ภาคผนวก ข	67
ภาคผนวก ค	82
ภาคผนวก ง	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
6.1	ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 44
6.2	คุณสมบัติของน้ำมันดิบ ASTM D86..... 44
6.3	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่สายป้อนอุณหภูมิ 120°C..... 47
6.4	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่สายป้อนอุณหภูมิ 125°C..... 48
6.5	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่สายป้อนอุณหภูมิ 130°C..... 49
6.6	ผลกระทบของตะกรันจากการทดลองโดยอุณหภูมิสายป้อน 120°C..... 50
6.7	ผลกระทบของตะกรันจากการทดลองโดยอุณหภูมิสายป้อน 125°C..... 51
6.8	ผลกระทบของตะกรันจากการทดลองโดยอุณหภูมิสายป้อน 130°C..... 52
ก-1	ทดลองที่ 90 องศาเซลเซียส..... 57
ก-2	ทดลองที่ 100 องศาเซลเซียส..... 59
ก-3	ทดลองที่ 120 องศาเซลเซียส..... 61
ก-4	ทดลองที่ 125 องศาเซลเซียส..... 63
ก-5	ทดลองที่ 130 องศาเซลเซียส..... 65
ข-1	แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 90°C 67
ข-2	แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 100°C..... 70
ข-3	แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 120°C..... 73
ข-4	แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 125°C..... 76
ข-5	แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 130°C..... 79
ข-6	ค่าความต้านทานตะกรันจากการทดลองที่ 3 อุณหภูมิ เทียบกับเวลา..... 81
ค-1	ผลการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมไฮซิสที่อุณหภูมิ 120 °C..... 82
ค-2	ผลการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมไฮซิสที่อุณหภูมิ 125 °C..... 83
ค-3	ผลการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมไฮซิสที่อุณหภูมิ 130 °C..... 84

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ไมโครฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 4
2.2	ตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของโรงกลั่นน้ำมันดิบแบบไลท์ครูด (Light Crude) 4
2.3	ตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของโรงกลั่นน้ำมันดิบแบบซอลว์ครูด (Sour Crude) 5
2.4	รูปกราฟ Linear Falling rate และ Asymptotic Fouling 7
2.5	ผลกระทบของ Asymptotic Fouling กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม..... 8
2.6	ลักษณะการเกิดตะกรันที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก..... 9
2.7	การนำความร้อนผ่านผนังหนา Δx 10
2.8	แสดงทิศทางการไหลของความร้อน..... 11
2.9	การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (ซ้าย) $T_w > T_\infty$ (ขวา) $T_w < T_\infty$ 11
2.10	การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น..... 12
2.11	หน่วยพรีฮีตติง (Pre-heating Unit)..... 16
2.12	หน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศ..... 17
3.1	รูปแสดงเครื่องทดสอบการเกิดตะกรัน..... 18
3.2	รูปแสดงเครื่องทดสอบตะกรันของเหลวอินทรีย์ ที่อุณหภูมิและความดันสูง..... 19
3.3	รูปภาพตัดขวางของแผ่นป้องกันตะกรัน..... 20
3.4	รูปภาพตัดขวางขณะนำแผ่นป้องกันตะกรันออก..... 20
4.1	แผนผังเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน..... 22
4.2	ผังวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบการก่อตะกรัน..... 24
4.3	ผังวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้สัญญาณไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์..... 25
4.4	ผังวงจรการรับส่งสัญญาณจากกล่องรับส่งข้อมูล DAQ กับเทอร์โมคัปเปิล..... 26
4.5	ภาพเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน..... 27
4.6	เทอร์โมเวล และฮีทเตอร์..... 28
4.7	เครื่องปรับโวลท์ (Voltage Variable Transformer)..... 28
4.8	เทอร์โมคัปเปิล RTD 29

4.9	ตัวแปลงสัญญาณจากกระแส 4-20 มิลลิแอมป์ เป็น 0-5 โวลท์.....	29
4.10	กล่องรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ).....	29
4.11	เครื่องทำน้ำเย็น (Chilled Water Machine).....	30
5.1	กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 90 องศาเซลเซียส.....	35
5.2	กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 100 องศาเซลเซียส.....	36
5.3	กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 120 องศาเซลเซียส.....	37
5.4	กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 125 องศาเซลเซียส.....	38
5.5	กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 130 องศาเซลเซียส.....	39
5.6	แสดงค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ทดสอบที่อุณหภูมิ 120°C 125°C และ 130°C..	40
5.7	แสดงค่าความชันจากสมการกับเวลาทดสอบที่ 5 อุณหภูมิ.....	41
6.1	แบบจำลองหน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศด้วยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS).....	45

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

x_f	ความหนาของตะกรัน
K_f	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตะกรัน, $W/m^{\circ}C$
h	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวของตะกรันและของเหลว ณ เวลาใดๆ, W/m^2C
h_0	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวที่สะอาดและของเหลวที่ตำแหน่งการไหลต่างๆ, W/m^2C
U_f	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวมีตะกรัน, W/m^2C
U_c	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวยังไม่มีตะกรัน, W/m^2C
Q_{cond}	อัตราการนำความร้อน, W
k	ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง, $W/m^{\circ}C$
$\frac{dT}{dX}$	เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางการนำความร้อน, $^{\circ}C/m$
Q_{conv}	อัตราการพาความร้อน, W
A	พื้นที่ผิวของการพาความร้อน, m^2
T_w	อุณหภูมิของพื้นผิว, $^{\circ}C$
T_{∞}	อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว, $^{\circ}C$
R_f	ค่าความต้านทานตะกรันรวม, m^2C/W
R_{fi}	ค่าความต้านทานตะกรันที่ผิวด้านใน, m^2C/W
R_{fo}	ค่าความต้านทานตะกรันที่ผิวด้านนอก, m^2C/W
c	สภาวะที่ไม่มีตะกรันด้านในและด้านนอก
i	สภาวะที่เกิดตะกรันด้านใน
o	สภาวะที่เกิดตะกรันด้านนอก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำมันดิบคือสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนกับสารเคมีอื่นๆจำนวนเล็กน้อย เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยการที่จะนำสารต่างๆ เหล่านี้ไปใช้ได้ พวกมันจะต้องถูกแยกออกจากกันเสียก่อน กระบวนการแยกเรียกว่าการกลั่น (Refining) น้ำมันดิบจะขึ้นอยู่กับที่มาของแหล่งนั้นๆ สารไฮโดรคาร์บอนน้ำมันดิบ จะมีจุดเดือดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนและการจัดตัวในโมเลกุล การกลั่นลำดับส่วนใช้จุดเดือดที่แตกต่างกันในการแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันดิบ โดยที่คอลัมน์ด้านบนจะเย็นกว่าทางด้านล่าง ดังนั้นไอต่างๆ จึงเย็นตัวขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมันขึ้นสู่ด้านบน โดยไอเหล่านี้จะกลั่นตัวบนถาดเมื่อพวกมันมาถึงส่วนของคอลัมน์ที่เย็นกว่าจุดเดือดของมัน

กระบวนการกลั่นน้ำมัน คือการเปลี่ยนแปลงสภาพน้ำมันดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันสำเร็จรูปชนิดต่าง ๆ เพื่อความสะดวกและเหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ เช่น ก๊าซหุงต้ม น้ำมันเบนซินสำหรับรถยนต์ น้ำมันเครื่องบิน น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา นอกจากนี้ยังมีบางส่วนที่สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมันหล่อลื่น จาระบี ยางมะตอย และเคมีภัณฑ์ต่างๆ ได้อีกด้วย กระบวนการกลั่นน้ำมันของแต่ละโรงกลั่นอาจแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น คุณสมบัติของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เทคโนโลยีของกระบวนการ ที่ใช้ในการที่จะทำการกลั่นน้ำมันดิบจะต้องให้ความร้อนถึงจุดที่เพียงพอให้น้ำมันดิบที่ส่งเข้าไปในคอลัมน์ (Column) เกิดการระเหยตัวขึ้นไปในชั้นต่างๆภายในคอลัมน์ได้นั้น ความร้อนที่ได้จากกระบวนการผลิตจะถูกนำกลับมาให้ความร้อนกับน้ำมันดิบโดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบก่อนเข้าเตาเผา (Crude Charge Heater) ดังนั้นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีความสำคัญมากในการกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ

ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือการเกิดตะกรัน (Fouling) ซึ่งตะกรันของน้ำมันดิบส่วนใหญ่จะเกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของน้ำมันดิบที่มาจากผลิตภัณฑ์ที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (iron sulphide and rust) ได้แก่ น้ำ เหล็กไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมคลอไรด์ การตกตะกอนของแอสฟัลทีน (Asphaltenes) โดยตะกรันจะไปขัดขวางการถ่ายเทความร้อนทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Rate) ลดลง ส่งผลให้สูญเสียพลังงานและค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น และอาจถึงขั้นต้องลดปริมาณการผลิตหรือหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาด (Cleaning) บำรุงรักษา (Maintenance) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ฉะนั้นปัญหาตะกรันเป็นปัญหาที่สำคัญมากในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกรันบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาลักษณะการเกิดตะกรัน(Fouling) และอัตราการก่อตัวของตะกรันช่วงอุณหภูมิ 90 - 130 °C ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ (1 atm)
2. ศึกษาผลกระทบของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ โดยใช้โปรแกรม HYSYS

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับเครื่องทดสอบการก่อตัวตะกรัน ผลกระทบของตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิธีการยับยั้งการเกิดตะกรัน และทฤษฎีต่างๆ
2. ออกแบบ จัดหาอุปกรณ์ และสร้างอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการทดสอบการเกิดตะกรัน
3. ทำการทดลองเพื่อหาอัตราการเกิดตะกรัน
4. หาผลกระทบของตะกรันต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ
5. สรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. แบบจำลองในการทำนายอัตราการเกิดตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ
2. ทราบผลกระทบของตะกรันของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ
3. สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานและระยะเวลาในการวางแผนในการบำรุงรักษากระบวนการ



ต้นฉบับไม่มีหน้านี้

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกรัน (Fouling)

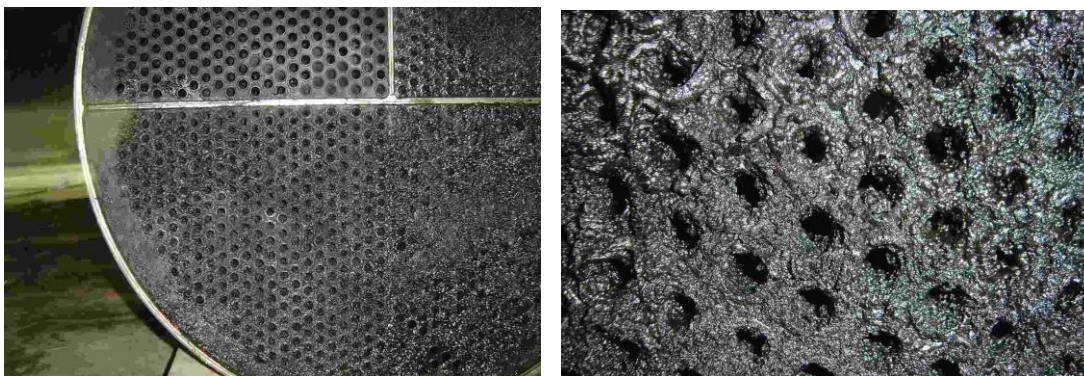
ตะกรันเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากเมื่อเกิดตะกรันขึ้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับผู้ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องคำนึงถึง และก็เป็นปัญหาสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำให้สมรรถนะลดลงได้ถึง 80% และอาจทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเสียหายได้ โดยทั่วไปผู้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ทำการสมมติให้การเสื่อมถอยของสมรรถนะคงที่ในแต่ละช่วงเวลา ทำให้ต้องเพิ่มพื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อนเพื่อชดเชยสมรรถนะที่สูญเสียไป บ่อยครั้งที่ต้องเพิ่มพื้นที่ผิวมากกว่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวที่คิดในกรณีมีสิ่งสกปรกเกาะอยู่ นั่นคือจะต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์เพิ่มขึ้น และอีกประการหนึ่งคือในช่วงเริ่มต้นการใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังสะอาดอยู่ทำให้สมรรถนะในการทำงานสูงกว่าที่ต้องการทำให้ยากต่อการออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหา



รูปที่ 2.1 ไมโครฟาวลิงในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของโรงไฟฟ้าพลังน้ำ



รูปที่ 2.2 ตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของโรงกลั่นน้ำมันดิบแบบไลท์ครูด (Light Crude)



รูปที่ 2.3 ตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของ โรงกลั่นน้ำมันดิบแบบซอลว์ครูด (Sour Crude)

2.1.1 ประเภทของตะกรัน

ตะกรันจะแบ่งประเภทตามลักษณะการเกิด หรือแบ่งตามกลไกของกระบวนการที่เกี่ยวข้อง ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผิวสัมผัสแบบของแข็งกับของเหลว นั้นจะทำการแบ่งออกได้ เป็น 4 กลุ่ม คือ

1) ตะกรันที่เกิดจากการตกตะกอน (Precipitation Fouling) คือ ตะกรันของตะกอนที่บริเวณ พื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนจากสารละลายที่เป็นของเหลว กลไกนี้มีความอันตรายสูงมากกับการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับหม้อไอน้ำ แต่ในขณะเดียวกันความอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นจากตะกรัน ประเภทนี้จะเกิดกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเฟสเดียวเท่านั้น

2) ตะกรันที่เกิดจากอนุภาคเล็กๆ (Particulate Fouling) จะเป็นของแข็งที่แขวนลอยอยู่บน พื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ตะกรันในกรณีนี้จะไม่จับตัวเกาะอยู่บริเวณพื้นผิว แต่ยังมีแรงในการยึดเกาะกันอยู่

3) ตะกรันที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reaction Fouling) เกิดจากคุณสมบัติการ รวมตัวกันทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นผิวในการถ่ายเทความร้อนด้วยตะกรันในกลุ่มนี้จะมี ความสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

4) ตะกรันทางชีววิทยา (Biological Fouling) เกิดจากการติดและการเจริญเติบโตของ สิ่งมีชีวิตทั้งที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ (เฟรียง หอย) และแบบโครงสร้างขนาดเล็ก (แบคทีเรีย)

2.1.2 การวัดผลกระทบของตะกรัน

ผลกระทบของสิ่งสกปรกที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงได้โดยใช้ความต้านทาน ความร้อนของสิ่งสกปรกนั้น คือ

$$R_f = \frac{x_f}{K_f} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 อัตราการเกิดตะกรัน แสดงได้ว่า

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{1}{K_f} \frac{dX_f}{dt} \quad (2.2)$$

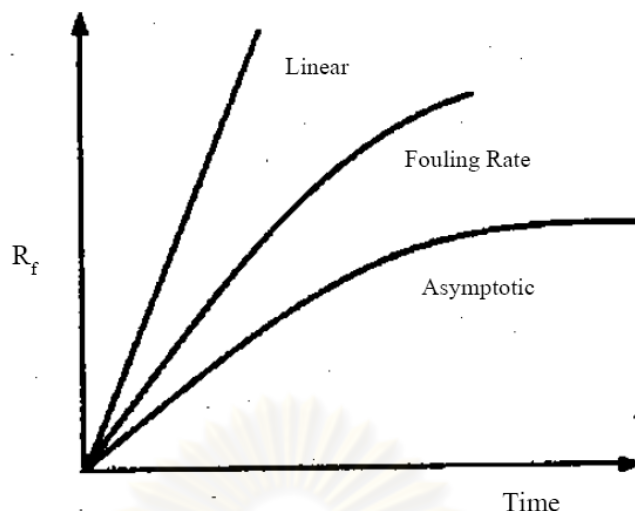
จากสมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์กันโดยตรงระหว่างความต้านทานตะกรัน (R_f) กับความหนาของชั้นตะกรัน โดยที่สมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความหนาของตะกรัน อย่างไรก็ตามวิธีการในการหาค่าความต้านทานตะกรันในทางปฏิบัติแล้วทำได้ไม่บ่อยเนื่องจากในการวัดความหนาของตะกรันจะต้องถอดชิ้นส่วนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนออกมาก่อน และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตะกรันที่ไม่รู้ค่าที่แน่นอนอีกทั้งยังเปลี่ยนแปลงตามความหนาของชั้นตะกรันด้วย

จากข้อจำกัดที่ได้กล่าวมาแล้ว วิธีการวัดทางความร้อนจึงถูกนำมาใช้แทนที่การวัดความหนา ซึ่งวิธีการนี้จะต้องทำการวัดค่าความต้านทานในตอนเริ่มต้นที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำงานเสียก่อน วิธีการวัดทางความร้อนมีความเหมาะสมอย่างมากที่จะนำมาใช้ในกรณีที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทำงานภายใต้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (heat flux) คงที่ ค่า R_f ของแต่ละตำแหน่งอาจจะหาได้จากการทำการวัดอุณหภูมิของพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิของของเหลวในแต่ละจุดที่ต่อเนื่องกัน และใช้ค่าการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ทราบค่าอยู่แล้วมาทำการคำนวณ ภายใต้สภาวะนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างผนังกับของเหลวสามารถแสดงได้เป็น

$$U_f = \left(R_f + \left(\frac{1}{h} \right) \right)^{-1} \quad (2.3)$$

ในทำนองเดียวกัน ภายใต้สภาวะเริ่มต้นยังไม่เกิดตะกรัน ค่าการนำความร้อนแสดงได้เป็น

$$U_c = h_0 \quad (2.4)$$



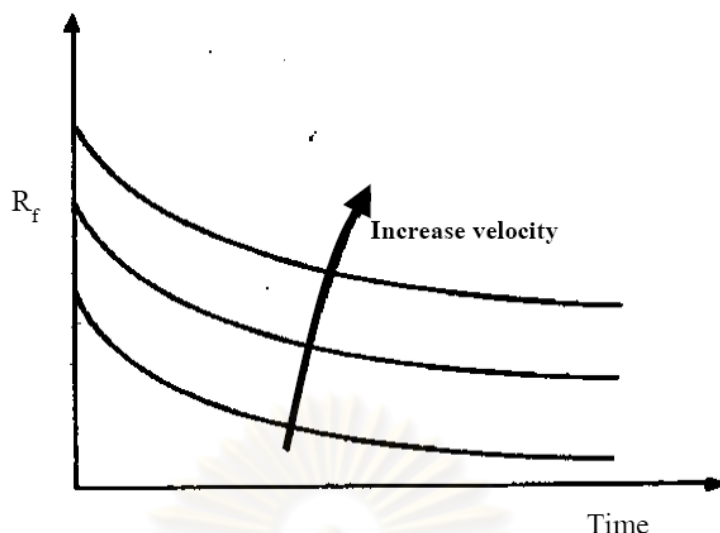
รูปที่ 2.4 รูปกราฟ Linear Fouling rate และ Asymptotic Fouling

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) ในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามการไหลหรือไม่มีผลกระทบจากพื้นผิวที่ขรุขระแล้วจะพบว่าค่าความต้านทานตะกรันรวม (R_f) จะสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$R_f = \left(\frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \right) \quad (2.5)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นถึงค่าความต้านทานตะกรันซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของผนังเมื่อค่าการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่คงที่ นั่นคือสมมติว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ การพาความร้อนระหว่างผิวของตะกรันและของเหลวที่เวลาใดๆ (h) เนื่องจากการไหลหรือไม่มีผลกระทบจากพื้นผิวที่ขรุขระของผนัง

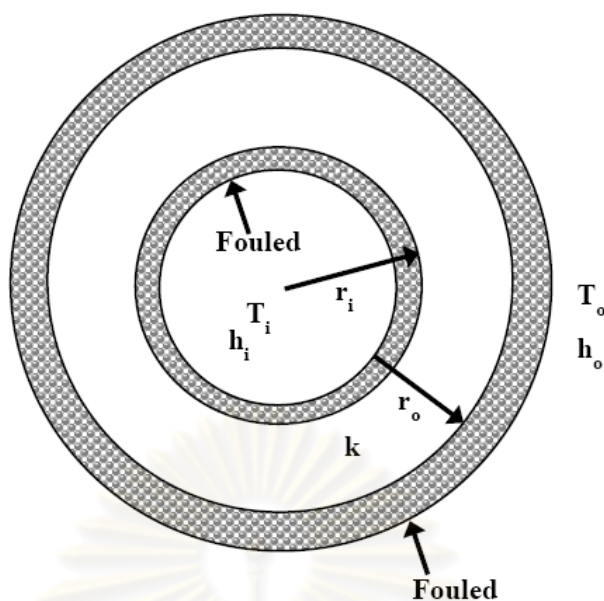
รูปที่ 2.4 แสดงรูปแบบของกราฟ 3 แบบ ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานตะกรันที่ได้จากการทดลอง พฤติกรรมทั้ง 3 แบบนั้นคือแบบ Linear แบบ Falling rate และ แบบ Asymptotic ตามลำดับ Asymptotic เป็นรูปแบบที่มีความสำคัญในการใช้งานจริงมากที่สุดคือเมื่อเพิ่มขึ้นถึงจุดจุดหนึ่งแล้วจะไม่มีการเพิ่มขึ้นอีกของสิ่งสกปรก



รูปที่ 2.5 ผลกระทบของ Asymptotic Fouling กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

รูปแบบ linear และ fouling rate อาจเกิดขึ้นได้ หลังจากพฤติกรรมแบบ asymptotic เกิดขึ้นก่อนจากเหตุผลข้อนี้การทำการทดลองเกี่ยวกับสิ่งสกปรกต้องทำในระยะเวลาที่นานมากๆ ก่อนที่จะแยกได้ว่าเป็นแบบ linear หรือ fouling rate ในรูปที่ 2.5 จะแสดงผลกระทบของสิ่งสกปรกแบบ asymptotic กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม การทำการทดลองเกี่ยวกับ Asymptotic Fouling ได้ทำกับอุปกรณ์ในแต่ละรูปแบบที่แตกต่างกันหลากหลายประเภท ซึ่งผลที่ได้ ออกมานั้นเป็นในทิศทาง เดียวกันนั่นคือ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของตะกรันแบบ Asymptotic Fouling จะลดลง จนแทบจะคงที่ เมื่อความเค้นเฉือนที่ผนังเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าการไหลของของเหลวทำการละลายตะกรันออกไปจากพื้นผิวการถ่ายเทความร้อนด้วย ยังมี ความเค้นเฉือนมากขึ้นก็ยิ่งทำให้อัตราการละลายเพิ่มสูงขึ้นด้วย

ในส่วนเพิ่มเติมของเรื่องของความเค้นเฉือนที่ผนังนั้น ความแข็งแรงของตะกรันก็มีผลกระทบกับระดับการเกิดตะกรันด้วย มีรายงานว่ายิ่งเวลาที่จะเป็น Asymptotic Fouling ยิ่งมากขึ้น ทำให้ตะกรันมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วยดังที่มีรายงานว่าได้ทำการสังเกตการเกิดคราบ ของหินปูน ซึ่ง พบว่า ต้องรอจนกระทั่งความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้นจนถึง 0.8 นิวตันต่อตารางเมตร จึงเข้าสู่ Asymptotic Fouling ซึ่งค่าของความเค้นเฉือนนี้สันนิษฐานว่าน่าจะสูงกว่าความคราก (yield strength) ของตะกรัน



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเกิดตะกรันที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก

2.2 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทของพลังงานจากตัวกลางหนึ่งไปสู่ตัวกลางหนึ่ง เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิของตัวกลางทั้งสอง โดยการถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดได้ 3 ทาง คือ การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) โดยทั้งสามทางที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้นต้องเกิดเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.2.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

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

ในกรณีการนำความร้อนถ้าอุณหภูมิที่ทุกๆจุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเรียกว่า การนำความร้อนที่สภาวะคงที่ (Steady state heat conduction) ในกรณีนี้ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่ ในทางตรงกัน

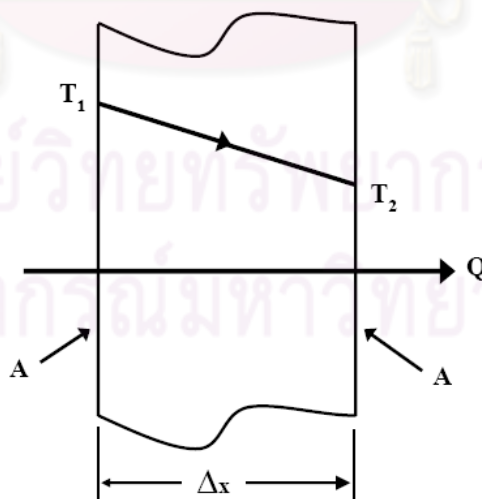
ข้ามถ้าอุณหภูมิของวัตถุทั้งชิ้นหรืออุณหภูมิของวัตถุส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา อัตราการนำความร้อนของวัตถุย่อมเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลาในกรณีนี้เรียกว่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady state heat conduction) โดยทั่วไปการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถถือได้ว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงที่และปัจจัยสำคัญที่มีส่วนกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือผลต่างของอุณหภูมิ มิติรูปร่างของวัตถุและคุณสมบัติของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงถึงการนำความร้อนในสภาวะคงตัวผ่านผนังซึ่งมีความหนา $\Delta X = L$ และพื้นที่ผิว A และผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาของผนังเป็น $\Delta T = T_2 - T_1$ ส่วนรูปที่ 2.8 แสดงทิศทางการนำความร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาและพื้นที่การนำความร้อนเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของตัวกลาง เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_{cond} = -kA\Delta T \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (2.6)$$

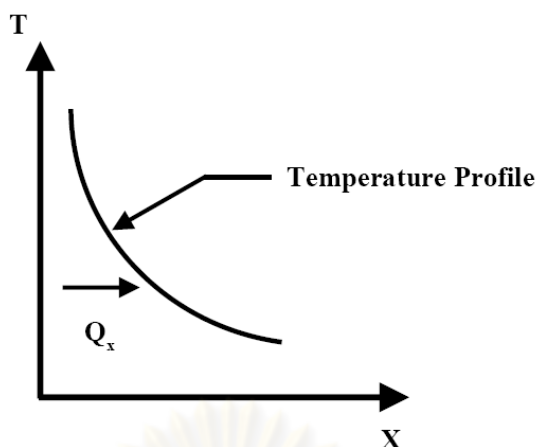
ในกรณีที่ $\Delta X \rightarrow 0$ สมการ(2.6) สามารถทำให้อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยได้เป็น

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dX} \quad (2.7)$$

สมการที่ (2.7) เรียกว่า กฎการนำความร้อนของฟูรีเยร์ (Fourier's Law of Heat Conduction)



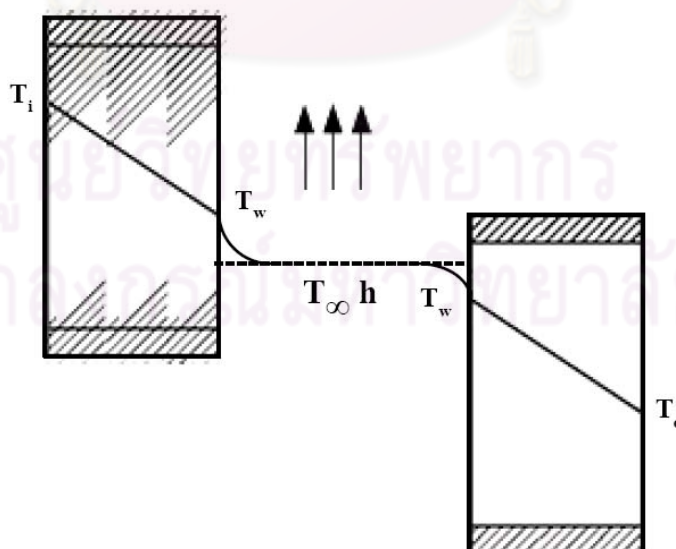
รูปที่ 2.7 การนำความร้อนผ่านผนังหนา ΔX



รูปที่ 2.8 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน

2.2.2 การพาความร้อน(Convection heat transfer)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างผิวของแข็งและของเหลวหรือก๊าซที่อยู่ติดกับพื้นผิวนั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนบ่าออกเป็น การพาความร้อนแบบบังคับ(Force convection) และการพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free convection or Natural convection) อัตราการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ และสามารถแสดงการถ่ายเทความร้อน โดยการพาดังแสดงดังรูปที่ 2.9 และสามารถเขียนสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ได้ดังสมการ



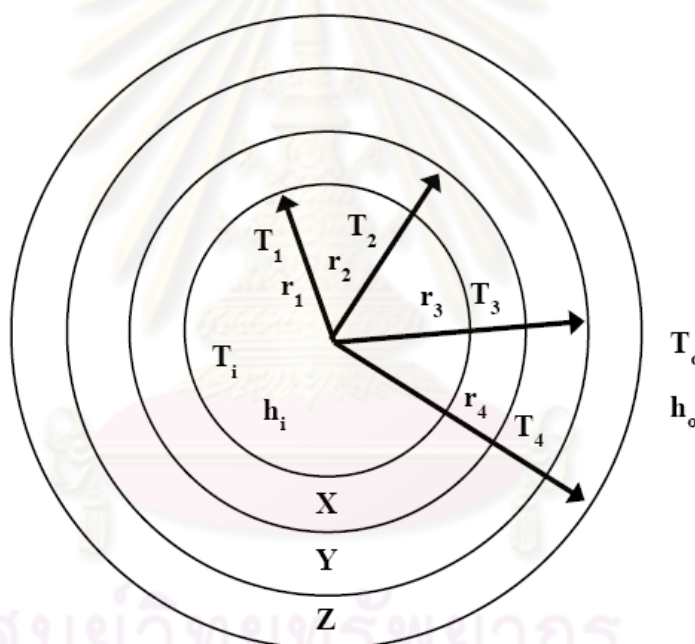
รูปที่ 2.9 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (ซ้าย) $T_w > T_\infty$ (ขวา) $T_w < T_\infty$

$$Q_{conv} = hA(T_w - T_\infty) \quad \text{ที่ } T_w > T_\infty \quad (2.8)$$

$$Q_{conv} = hA(T_\infty - T_w) \quad \text{ที่ } T_w < T_\infty \quad (2.9)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นไม่ใช่คุณสมบัติของของไหล แต่เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนเช่นรูปแบบการไหล (แบบลามินาร์ เทอบีวเลนต์ หรือทรานซิชัน) รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งตามผิววัตถุ กลไกการพาความร้อนเช่นการพาความร้อนแบบอิสระและการพาความร้อนแบบบังคับ

2.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat-transfer coefficient)



รูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น

เมื่อพิจารณาที่แสดงในรูปที่ 2.10 ท่อด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลร้อน T_i อีกด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลเย็น T_o ค่าการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$q = h_i A_i (T_i - T_1) = 2\pi k_x L \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_1/r_2)} = 2\pi k_y L \frac{(T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)} = 2\pi k_z L \frac{(T_3 - T_4)}{\ln(r_4/r_3)} = h A_o (T_o - T_4) \quad (2.10)$$

สามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อน (2.10) ใหม่ได้เป็น

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{\left(\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_x L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_z L} + \frac{1}{h_o A_o} \right)} \quad (2.11)$$

หรือ

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (2.12)$$

จากสมการที่(2.11) และสมการที่ (2.12) เราสามารถเขียนค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบได้เป็น

$$R = \left(\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_x L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_z L} + \frac{1}{h_o A_o} \right) \quad (2.13)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้เป็นดังนี้

$$q = UA(T_i - T_o) = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.12 สมการที่ 2.13 และสมการที่ 2.14 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของพื้นที่ผิวที่ด้านนอกพบว่าจะมีค่า

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i} + \frac{A_o \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_x L} + \frac{A_o \ln(r_3/r_2)}{2\pi k_y L} + \frac{A_o \ln(r_4/r_3)}{2\pi k_z L} + \frac{1}{h_o} \right)} \quad (2.15)$$

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(U_o) และค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{1}{U_o A_o} \quad (2.16)$$

ในกรณีที่มีตะกอนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวที่ทั้งด้านในและด้านนอกที่โครงสร้างรูปที่2.11 ค่าความร้อนในกรณีที่มีตะกอนนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_f = \left(\frac{1}{h_i A_i} \right) + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \left(\frac{1}{h_o A_o} \right) \quad (2.17)$$

สมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในสถานะอันเนื่องมาจากการเกิดตะกรันที่ผิว
ได้เป็นดังนี้

$$\frac{1}{U_{f,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o} \right) + R_f \quad (2.18)$$

เมื่อพิจารณาในสถานะที่ไม่มีตะกรันเกิดขึ้นที่ผิวท่อจะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม
จะหาได้จากสมการ

$$U_{c,o} = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o} \right)} \quad (2.19)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{U_{c,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o} \right) \quad (2.20)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.18) ลบด้วยสมการที่ (2.20) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานตะกรันรวมสามารถหาได้
จากการนำส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ผิวท่อที่มีตะกรันลบกลับส่วนกลับ
ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ยังไม่เกิดตะกรัน

2.3 การกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Distillation)

เป็นหน่วยการผลิตที่ทำหน้าที่กลั่นแยกน้ำมันดิบ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ กัน โดยอาศัย
คุณสมบัติทางกายภาพคือจุดเดือด ที่แตกต่างกันของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดที่
ประกอบอยู่ในน้ำมันดิบ โดยสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำ จะถูกแยกออกจากหอกกลั่นที่ด้านบน และ

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดสูงจะถูกแยกออกทางด้านล่าง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียงตามจุดเดือดย่อยไปมากได้ดังต่อไปนี้

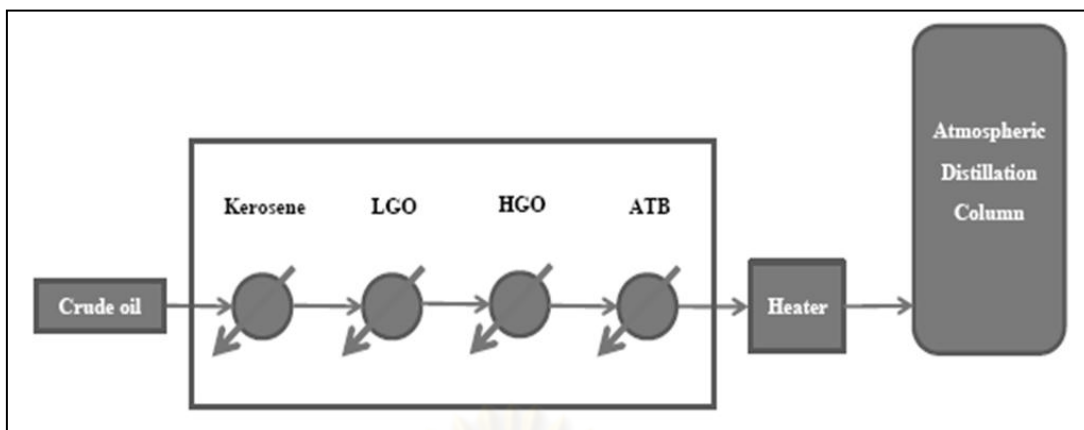
1. แอลพีจี (Liquid Petroleum Gas)
2. ไลท์แนพทา (Light Naptha)
3. เฮฟวีแนพทา (Heavy Naptha)
4. เคโรซีน (Kerosene)
5. ไลท์แก๊สออยล์ (Light Gas Oil)
6. เฮฟวีแก๊สออยล์ (Heavy Gas Oil)
7. เอทีบี (Atmosphere Tower Bottom) หรือ รีดิวซ์ครูด(Reduce Crude)

หลักในการแยกของผลิตภัณฑ์ต่างๆ อาศัยความแตกต่างระหว่างจุดเดือด หกกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศได้ถูกออกแบบให้เป็น 4 กระบวนการ คือ

1. พรีฮีตติง (Preheating)
2. หกกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Distillation Column)
3. ไซค์สตรึมสตริปปิง (Side Steam Stripping)
4. หอเสถียรแนพทา (Light Naptha Stabilization)

2.3.1 พรีฮีตติง (Preheating)

ในการที่จะทำการกลั่นน้ำมันดิบจะต้องให้ความร้อนถึงจุดที่เพียงพอให้น้ำมันดิบที่ส่งเข้าในหอกลั่นเกิดการระเหยตัวขึ้นไปในชั้นต่างๆภายในหอกลั่นได้นั้นความร้อนที่ได้จากกระบวนการผลิตจะถูกนำกลับมาให้ความร้อนกับน้ำมันดิบ ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนไปได้ไม่เช่นนั้นความร้อนเหล่านี้ก็จะสูญเสียไปเป็นจำนวนมาก น้ำมันดิบและคอนเดนเสทจะประกอบไปด้วยเกลืออนินทรีย์ ซึ่งจะถูกกำจัดออกก่อนที่จะทำการกลั่น น้ำมันดิบเหล่านี้จะถูกให้ความร้อนโดยผ่านชุดของพรีฮีทเทรน(Preheat train) จนมีความร้อนประมาณ 127 °C ก่อนจะเข้าดีซอลเตอร์ (Desalter) น้ำจะถูกผสมกับน้ำมันดิบเพื่อเข้าไปละลายเกลือและน้ำจะถูกแยกออกจากน้ำมันที่ดีซอลเตอร์ โดยใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้หยดน้ำรวมตัวและแยกตัวออกจากน้ำมันดิบ น้ำมันดิบที่แยกเกลือออกแล้วจะส่งผ่านเข้าพรีแฟลชดรัม (Preflash Drum) เพื่อช่วยลดภาระที่เตาเผาและความดันของระบบ หลังจากนั้นน้ำมันดิบจะถูกส่งต่อไปเพื่อรับความร้อนจากชุดพรีฮีทเทรน ชุดที่2 (Second preheat train) ก่อนที่จะเข้าสู่ฮีตเตอร์และเข้าหอกลั่นต่อไป



รูปที่ 2.11 หน่วยพรีฮีตติง (Pre-heating Unit)

2.3.2 หอกกลั่นภายใต้ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Distillation Column)

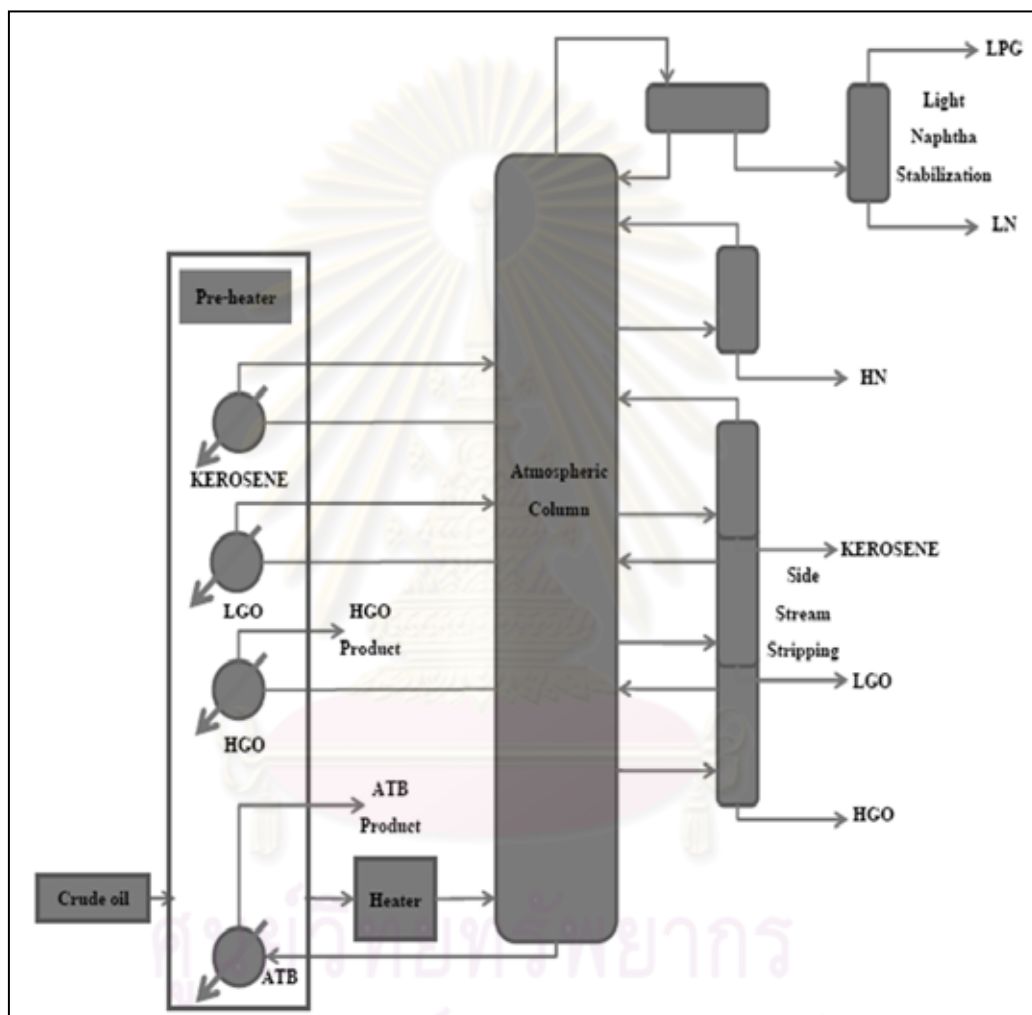
กระบวนการกลั่นหลักจะเกิดขึ้นที่หอกกลั่นความดันบรรยากาศ โดยก่อนที่จะเข้าสู่หอกกลั่นนั้นจะต้องได้รับการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิแฟลชโซน (Flash Zone) ที่เตาเผาเสียก่อน ซึ่งเมื่อเข้าสู่หอกกลั่นน้ำมันที่ได้รับความร้อนก็จะเกิดการเป็นไอทั้งหมดไหลผ่านไปนในหอกกลั่นแล้วทำการแยกผลิตภัณฑ์ออกไปเช่น โอเวอร์เฮด (Over Head) และ ไซด์คัท (Side Cut) ต่างๆ ปริมาณของไอทั้งหมดนี้ ก็คือ โอเวอร์แฟลชซึ่งจะนำเอาความร้อนจากถาดชั้นต่างๆ ระบายไปสู่ชั้นด้านบนแล้วเกิดการควบแน่นไหลย้อนกลับลงในชั้นต่างๆภายใน หอกกลั่น เช่นนี้จึงทำให้สามารถที่จะแยกคุณสมบัติออกมาตามชั้นของจุดเดือดได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะมี ไลท์แนพทา (LN) เฮฟวีแนพทา (HN) เคโรซีน (Kerosene) ไลท์แก๊สออยล์ (LGO) และ เฮฟวีแก๊สออยล์ (HGO) ช่วงของจุดเดือดของสารเหล่านี้จะเป็นตัวแยกคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สัดส่วนของการแยกจะถูกกำหนดโดยการควบคุมที่หอกกลั่นและยังสามารถปรับเปลี่ยนไปได้ตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

2.3.3 ไซด์สตรีมสตรipping (Side Steam Stripping)

ผลิตภัณฑ์ของหน่วยนี้มี 4 ชนิด คือ เฮฟวีแนพทา (HN) เคโรซีน (Kerosene) ไลท์แก๊สออยล์ (LGO) และ เฮฟวีแก๊สออยล์ (HGO) ที่ถูกดึงออกทางด้านข้างของหอกกลั่นความดันบรรยากาศจะถูกส่งเข้าหอกกลั่นไซด์สตรีม (Side Stripping Column) ทำให้สารประกอบบางส่วนกลายเป็นไอ โดยเฉพาะส่วนประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เบาเป็นการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มจุดวาบไฟ (Flash Point) ของผลิตภัณฑ์โดยทำการแยกตัวเบาออกไป ส่วนไอที่ออกมาจะถูกส่งกลับเข้าหอกกลั่นบรรยากาศหลักอีกครั้ง

2.3.4 หอเสถียรเนฟทา (Light Naphtha Stabilization)

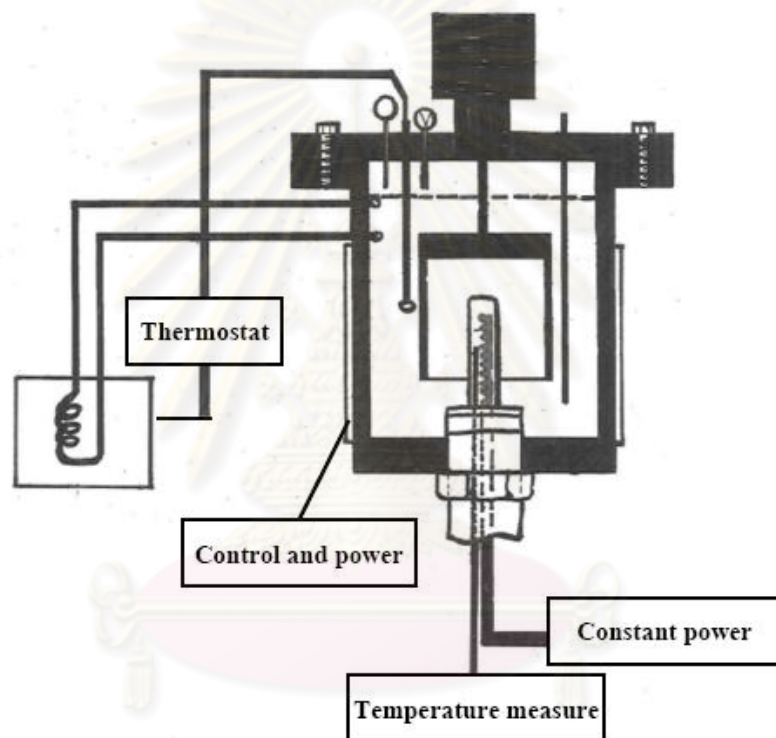
ในส่วนของโอเวอร์เฮดทั้งหมดจะประกอบไปด้วยไลต์แก๊สและไลต์เนฟทา ทั้งหมดนี้จะถูกส่งเข้าสู่หอเสถียรเนฟทาเพื่อกำจัดแก๊สที่เบากว่าออกไปเข้าระบบของเชื้อเพลิงแก๊ส (Fuel Gas) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่แยกออกมาได้ก็จะเป็น แอลพีจี และไลต์เนฟทา ส่งเข้าสู่ถังเก็บต่อไป



รูปที่ 2.12 หน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศ

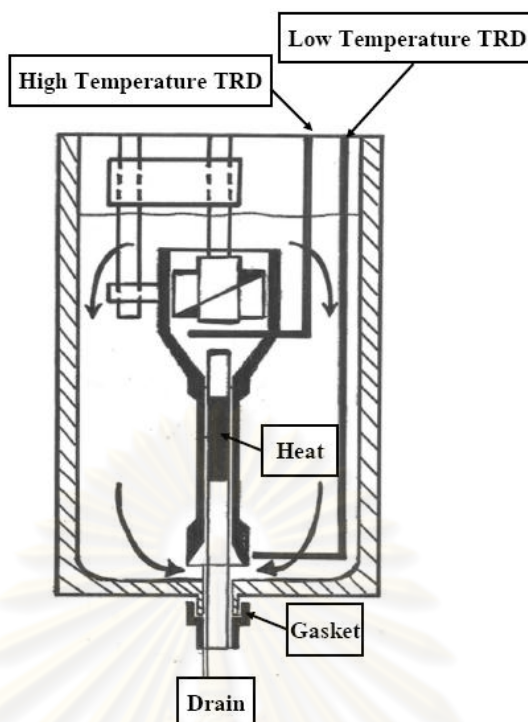
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Paul, E. (1981) [1] ได้ทำเครื่องทดสอบการเกิดตะกรัน โดยออกแบบให้อุณหภูมิของของเหลวมีค่าคงที่จากการควบคุมด้วยThermostat และมีใบกวนเพื่อให้อุณหภูมิทุกส่วนในเครื่องมีค่าเท่ากัน และใช้ชุดอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่จุดให้ความร้อนเพื่อวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีตะกรันมาเกาะที่ผนังแลกเปลี่ยนความร้อน (Thermowell) ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจะสามารถนำมาคำนวณหาอัตราการเกิดตะกรันได้ ซึ่งเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแสดงเครื่องทดสอบการเกิดตะกรัน [1]

Kuru, W.C. และ Panchal, C.B. (1997) [2] ได้พัฒนาเครื่องทดสอบการเกิดตะกรันที่ใช้สำหรับทดลองที่อุณหภูมิ 500 °C และความดัน 70 atm โดยมีการปรับปรุงภายใต้ 4 เงื่อนไขคือ ราคา ถูก ออกแบบง่ายต่อการบำรุงรักษา ใช้สำหรับอุณหภูมิและความดันสูงในการทดลองต้องทราบความเร็วของของเหลว มีการติดใบพัดในท่อและวัดตะกรันจากความเร็วของของเหลว ได้ทำการทดลองกับ อินดิน และเคโรซีน การทดลองนี้เหมาะกับการศึกษาการกัดกร่อนและปฏิกิริยาในห้องทดลองโดยแสดงดังรูปที่ 3.2



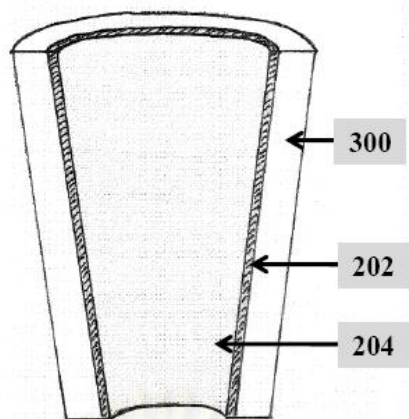
รูปที่ 3.2 รูปแสดงเครื่องทดสอบตะกรันของเหลวอินทรีย์ ที่อุณหภูมิและความดันสูง [2]

Abdulsalami, S. KOVO (2006) [3] ได้ออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อพยากรณ์การเกิดตะกรันของอุปกรณ์น้ำมันไนจีเรีย ตะกรัน(fouling) คือวัตถุที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง โดยสมการโมเดลจะตั้งอยู่บนหลักของระบบไม่คงที่ (Unsteady state) อัตราการเกิดตะกรันไม่เท่ากับอัตราการนำออก(Removal) หรือเกิดการสะสม (Accumulate) ของตะกรันขึ้น โดยสมการทางคณิตศาสตร์นี้จะเป็นตัวแทนที่สามารถอธิบายการเกิดตะกรันของอุปกรณ์น้ำมันไนจีเรียได้

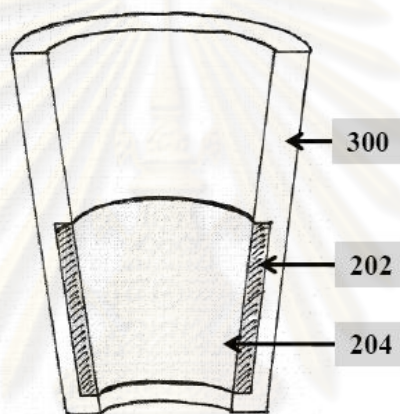
$$\frac{d}{dt} R_f = C_1 C_2 \exp\left(\frac{-E}{R_s T_s}\right) (C_r)^r - \frac{C_3 \cdot C_4}{\rho_f \cdot R_b} \left(\frac{W}{A_0}\right)^2$$

โดยโมเดลนี้จะใช้ Visual Basic 6.0 ในการจำลองการพยากรณ์การเกิดตะกรัน ผลที่ได้ของการกลั่นแนพทาหนักตะกรันจะลดลงเมื่อเพิ่มค่าการไหลและอุณหภูมิสายให้ความร้อน คุณสมบัติทางกลของตะกรันจากการกลั่นแนพทาเป็นปฏิกิริยาเคมีก่อเกิดโพลิเมอร์ (Chemical Polymerization)

Catherine Procik Dulka และคณะ (2008) [4] ศึกษาวิธีการป้องกันตะกรันของเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้แผ่นโลหะของธาตุทรานซิชันหมู่ 4 เช่น ไทเทเนียม (Titanium) เซอร์โคเนียม (Zirconium) หรือหมู่ 5 เช่น แทนทาลัม (Tantalum) ความหนาประมาณ 1-2 มิลลิเมตร ดัดที่ผนังเครื่องปฏิกรณ์เพื่อป้องกันตะกรันและสามารถนำออกมากำจัดตะกรันได้ง่าย



รูปที่ 3.3 รูปภาพตัดขวางของแผ่นป้องกันตะกรัน [4]



รูปที่ 3.4 รูปภาพตัดขวางขณะนำแผ่นป้องกันตะกรันออก [4]

Jeronimo, M.A. และคณะ [5] ได้ศึกษาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระหว่างการเกิดตะกรัน (fouling) โดยทำการศึกษากับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน ซึ่งเป็นโรงงานที่ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นจำนวนมาก โดยการหาค่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นได้ใช้วิธีการง่ายๆ โดยได้นำแนวความคิดมาจากประสิทธิภาพทางความร้อนและแนวคิดของเอ็นทียู (NTU) ในการหาค่าได้ใช้ข้อมูลอุณหภูมิขาเข้าและขาออกจำนวน 4 ค่า และค่าอัตราการไหลมาใช้ในการคำนวณหาค่าสมรรถนะในระหว่างเกิดตะกรัน จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธีการประมาณค่าแบบง่ายนี้กับผลจากการวัดจริงนั้นพบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าวิธีการในการประมาณค่านั้นเกิดจากสมมติฐานก็ตาม

Javad และ Shahrokh (2009) [6] ได้นำเสนองานวิจัยในการใช้ Artificial neural network (ANN) มากำหนดเป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematical formulation) มีชื่อเรียกว่า Neuro

based formulation prediction และในงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลของอัตราการขยายตัวของ ตะกรัน(Fouling rate)ของ Neuro based formation กับห้องปฏิบัติการและแบบจำลองของ Panchal Polley และ Nasr โดยการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในค่า Absolute mean relative error และผลจาก งานวิจัยพบว่า Neuro based formulation Panchal Polley และ Nasr มีค่า Absolute mean relative error เท่ากับ 15.83% 52.04% 92.77% และ 61.43% ตามลำดับโดยสรุปว่า Neuro based formation สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหน่วยกลั่นน้ำมันดิบ (Crude distillation unit)ได้

Mohammad และ Mehdi (2006)[8] ศึกษาหาโมเดลการก่อตัวของน้ำมันดิบในเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนพรีฮีท ใช้น้ำมันดิบไลท้อสเตอร์เลียนที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน 200-260 องศาเซลเซียส และมีช่วงความเร็วในการไหล 0.25-0.40 เมตรต่อวินาที สามารถหาอัตราการเกิด ตะกรันและได้เส้นเกณฑ์การบ่งชี้ตะกรันและช่วงที่จะไม่เกิดตะกรันได้



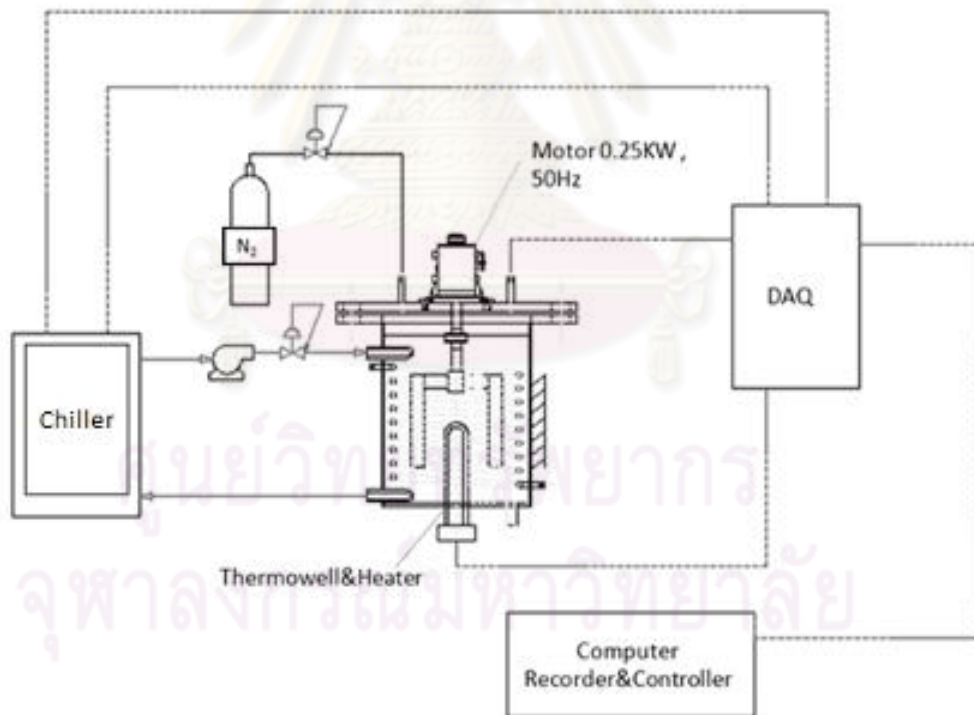
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การออกแบบและการทดลอง

4.1 การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อดั้วของตะกรัน

เครื่องทดสอบการก่อดั้วของตะกรันออกแบบโดยอาศัยหลักการออกแบบของ Paul, E. (1981) [1] การถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าที่ฮีตเตอร์ถ่ายเทไปสู่ของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งอยู่ในถังที่ใช้ทำการทดสอบ โดยใช้ระบบน้ำหล่อเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของเหลวให้คงที่และใช้ใบกวนเพื่อกระจายอุณหภูมิของเหลวทุกจุดในถังเท่ากัน การทดลองนี้จะทำให้ตะกรันเกิดขึ้นที่ผิวของเทอร์โมเวลซึ่งเป็นจุดถ่ายเทความร้อนที่ครอบฮีตเตอร์อยู่เท่านั้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์สู่ของเหลวเกิดยากขึ้นและมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นภายในเทอร์โมเวล เมื่ออุณหภูมิที่ถ่ายเทได้มีการเปลี่ยนแปลงทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของตะกรันที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งแบบของเครื่องทดสอบที่ออกแบบได้แสดงดังรูปที่ 4.1



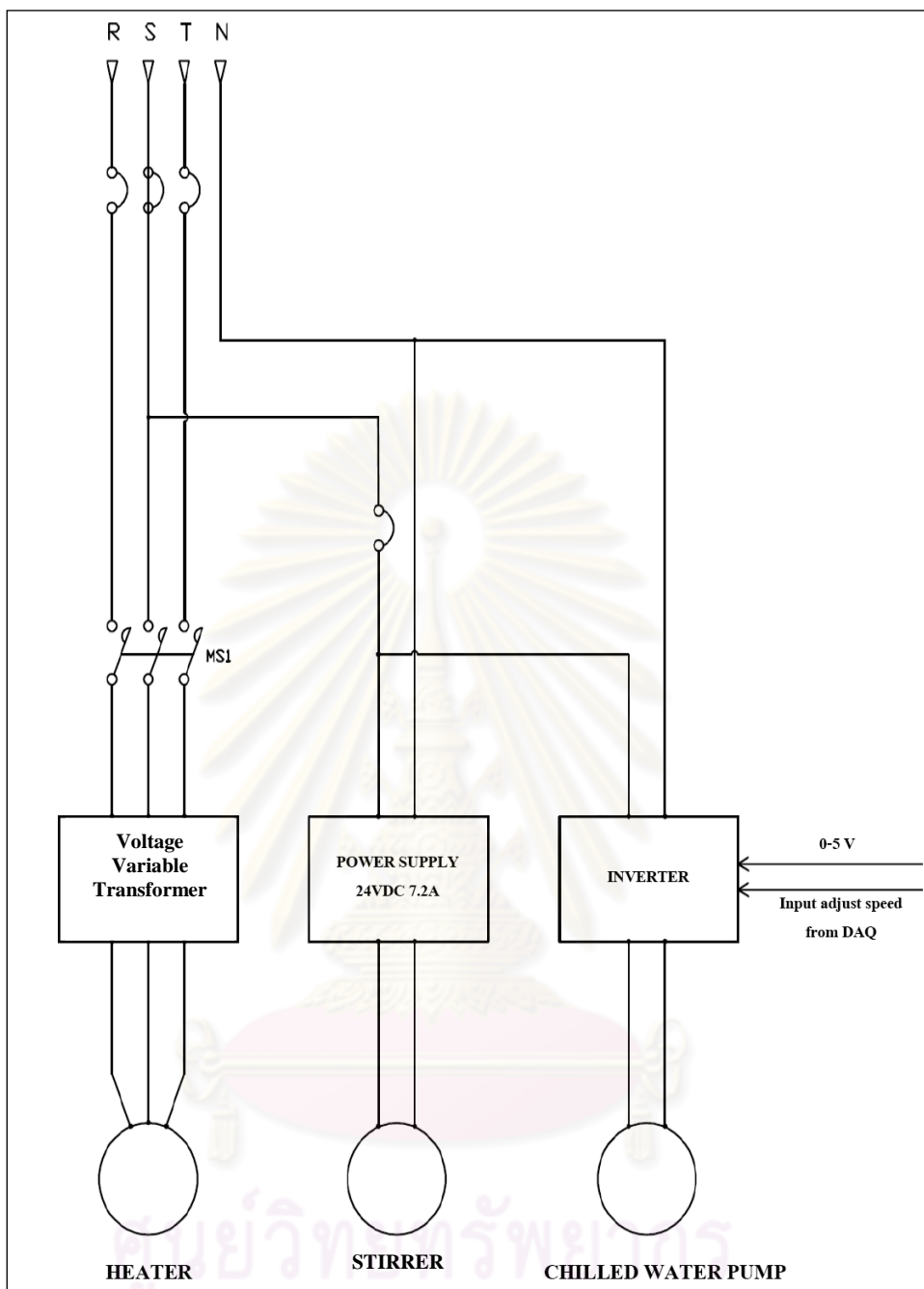
รูปที่ 4.1 แผนผังเครื่องทดสอบการก่อดั้วของตะกรัน

การสร้างเครื่องมือทดสอบเพื่อทดลองการเกิดตะกรันใช้ถังสแตนเลสที่มีความจุ 6 ลิตร ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำเย็นไหลผ่านท่อสแตนเลสเล็กๆ ที่อยู่บริเวณผนังของถัง ควบคุมความดัน และกำจัดก๊าซออกซิเจนในถังโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 1 บรรยากาศ ให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์ขนาด 1500 วัตต์ โดยสามารถปรับกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องปรับ โวลต์เพื่อให้สามารถปรับ กำลังไฟฟ้าให้ฮีทเตอร์ได้ ติดตั้งที่แกนกลางของถัง โดยมีเทอร์โมเวลครอบฮีทเตอร์อยู่เป็นผิวถ่ายเท ความร้อน มีใบกวนเพื่อช่วยกระจายความร้อนให้อุณหภูมิของเหลวในถังเท่ากันในทุกตำแหน่ง ใช้ เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิฮีทเตอร์อยู่ในเทอร์โมเวล 1 จุด และวัดอุณหภูมิของเหลว 1 จุด โดย ค่าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองตัวนี้เป็นค่า 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ ส่งผ่านตัวแปลงสัญญาณให้เป็น ค่า 0 ถึง 5 โวลต์ เพื่อส่งค่ามาที่กล่องรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ) และส่งเข้าคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ควบคุมการทำงานทั้งระบบ

การวางผังวงจรไฟฟ้าแยกตามส่วนของการควบคุมเครื่องทดสอบ คือผังวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบการก่อตะกรัน ได้แก่ ฮีทเตอร์ ใบกวน และปั้มน้ำเย็นตามรูปที่ 4.2

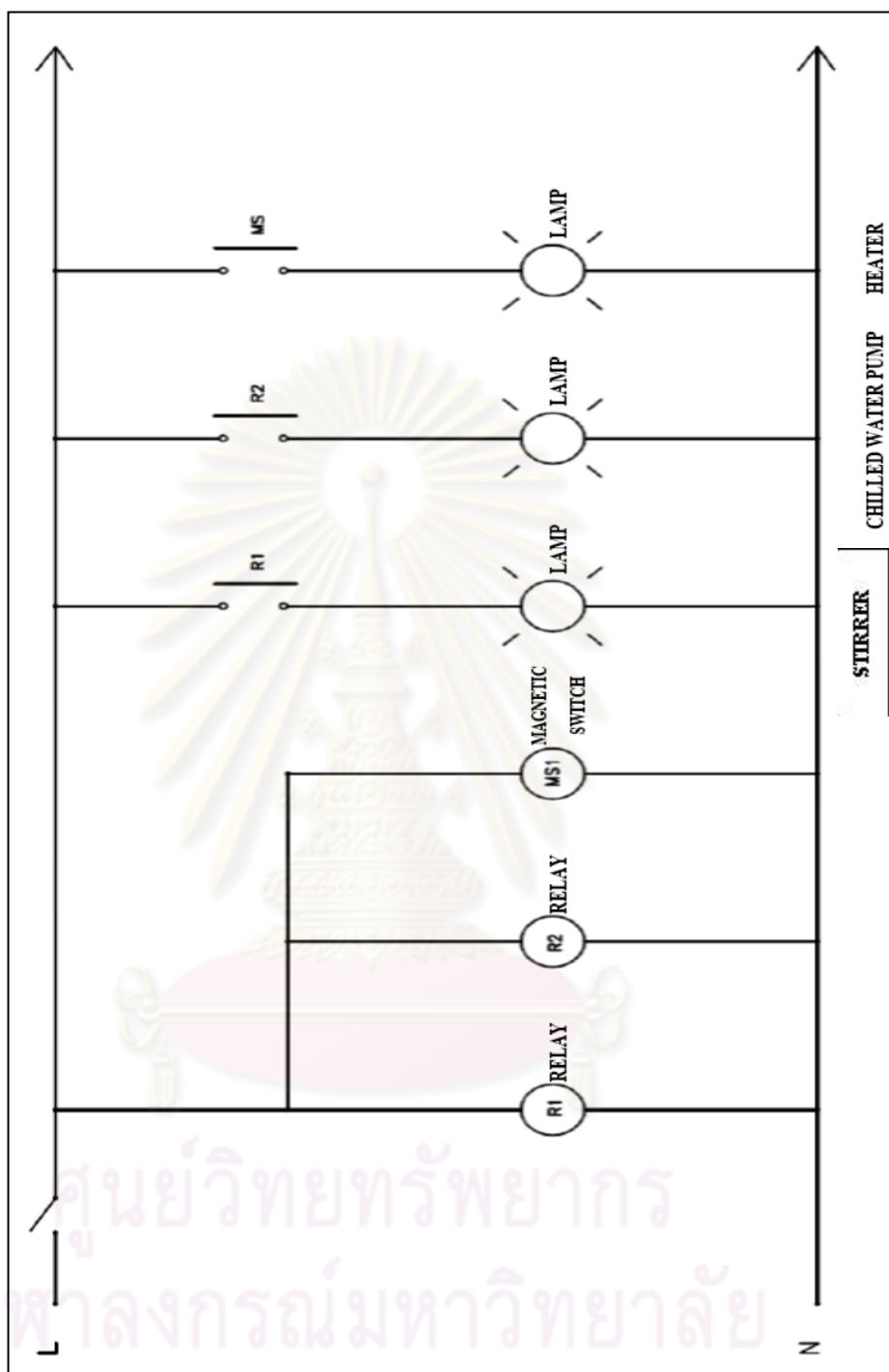


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



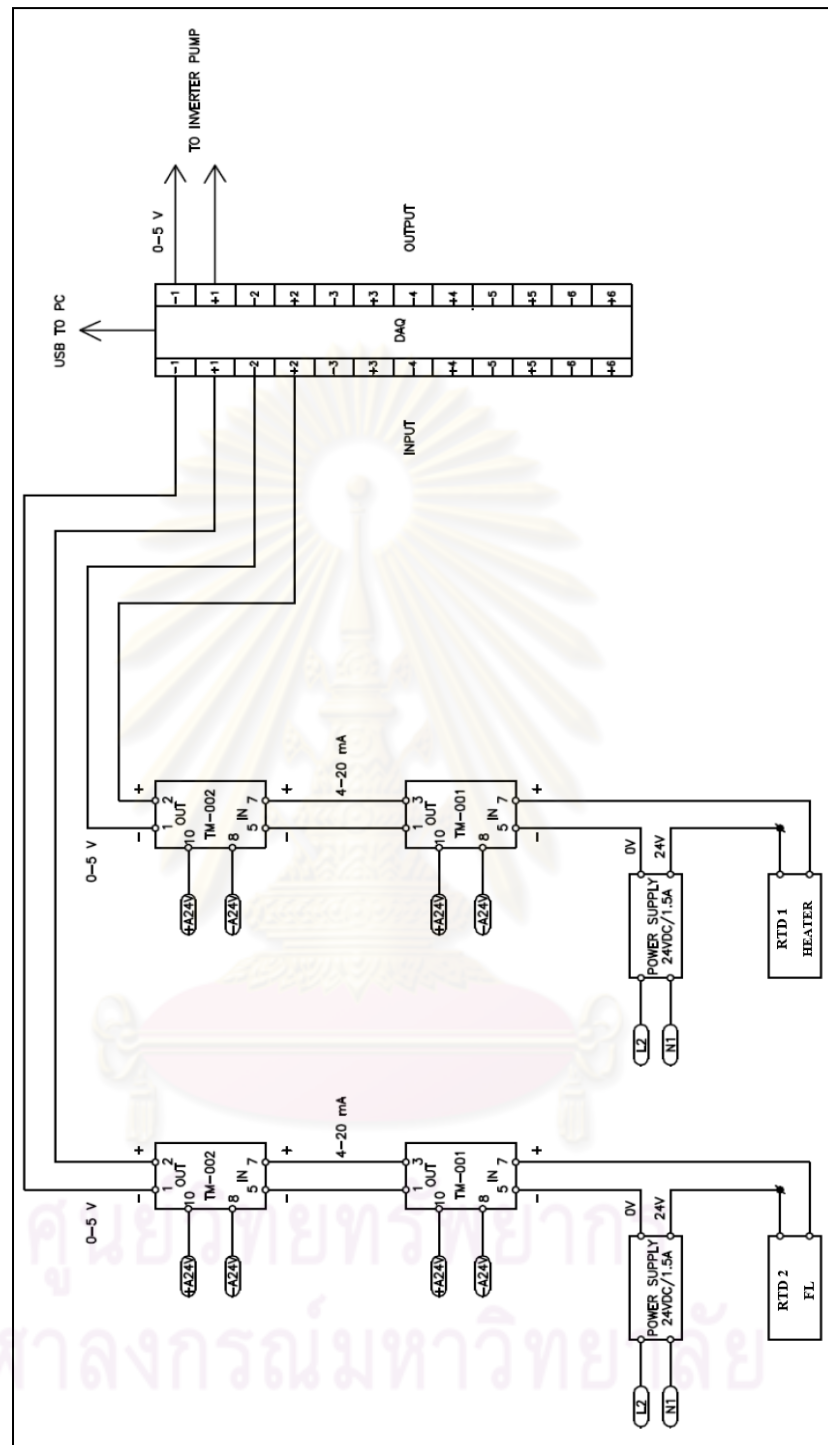
รูปที่ 4.2 ผังวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบการก่อดตะกอน

ผังวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้สัญญาณไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.3 เมื่อเปิดเครื่องทำงาน จะมีไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว ได้แก่ ไบคอน เครื่องทำน้ำหล่อเย็น และ ฮีทเตอร์



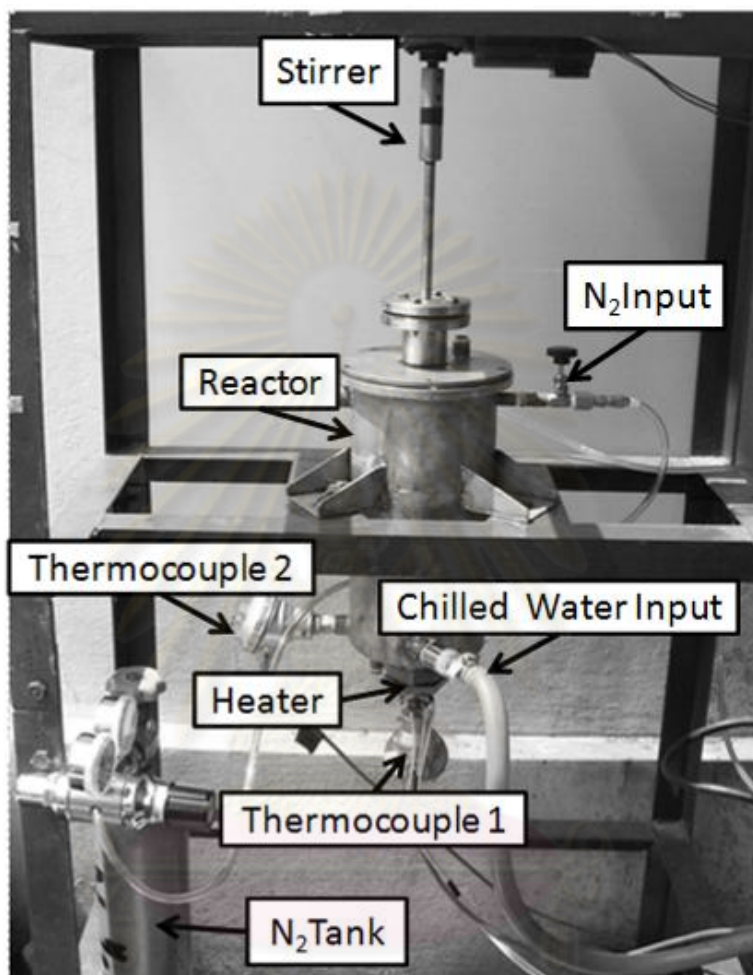
รูปที่ 4.3 แผงวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้สัญญาณไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์

แผงวงจรรับส่งสัญญาณจากกล่องรับส่งข้อมูล DAQ กับเทอร์โมคัปเปิลตามรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า RTD ทั้งสองตัวส่งสัญญาณผ่านตัวแปลงสัญญาณจาก 4-20 มิลลิแอมป์ เป็น 0-5 โวลต์ แล้วจึงส่งสัญญาณไปที่ DAQ ซึ่งเป็นกล่องรับส่งข้อมูลต่อเข้าคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB



รูปที่ 4.4 แผงวงจรรับส่งสัญญาณจากกล่องรับส่งข้อมูล DAQ กับเทอร์โมคัปเปิล

การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน แบ่งการควบคุมระบบออกเป็น 4 ส่วน คือ การควบคุมอุณหภูมิของฮีทเตอร์ การควบคุมการหมุนของใบกวน การควบคุมการวัดอุณหภูมิ และการควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเครื่องทดสอบ



รูปที่ 4.5 ภาพเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

4.1.1 การควบคุมอุณหภูมิของฮีทเตอร์

งานวิจัยนี้ต้องการให้ความร้อนน้ำมันดิบในช่วง 120 ถึง 130 องศาเซลเซียส ซึ่งต้องใช้ฮีทเตอร์ที่มีความสามารถให้อุณหภูมิสูงโดยเลือกใช้ฮีทเตอร์ที่ทำอุณหภูมิได้ถึง 500 องศาเซลเซียส เป็นฮีทเตอร์ที่ใช้ไฟฟ้า 3 เฟส กำลังไฟ 1500 วัตต์ ต่อวงจรผ่านเครื่องปรับโวลท์ (Voltage Variable Transformer) เพื่อให้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้ฮีทเตอร์ให้คงที่ได้โดยปรับโวลท์ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 500 โวลท์ ซึ่งการทดลองนี้ใช้ 320 โวลท์

ข้อควรระวัง เนื่องจากเครื่องทดสอบการก่อดะกรันนี้ใช้ฮีทเตอร์ที่มีความสามารถให้อุณหภูมิสูงได้ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส ดังนั้น ต้องระมัดระวังในการปรับโวลต์อย่าให้อุณหภูมิที่ฮีทเตอร์สูงเกินจะทำให้ฮีทเตอร์และเครื่องปรับโวลต์เสียหายได้



รูปที่ 4.6 เทอร์โมเวล และฮีทเตอร์



รูปที่ 4.7 เครื่องปรับโวลต์ (Voltage Variable Transformer)

4.1.2 การวัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ต้องการวัดในเครื่องทดสอบนี้บันทึกโดยใช้โปรแกรมแมทแลป(MATLAB) เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการเก็บค่าอุณหภูมิจึงต้องเลือกใช้เครื่องมือวัดเทอร์โมคัปเปิลแบบ RTD 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวน (Disturbance) ในการส่งสัญญาณ และเนื่องจากอุปกรณ์ในการรับส่งข้อมูลมีความสามารถในการรับส่งสัญญาณเป็นสัญญาณโวลต์ ดังนั้นต้องนำสัญญาณ 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์มาผ่านตัวแปลงสัญญาณ(Transmitter)เป็น 0 ถึง 5 โวลต์ เพื่อส่งเข้า

กล่องรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ) และส่งข้อมูลไปบันทึกใน โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ที่คอมพิวเตอร์ควบคุม เครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกอนนี้จะต้องวัดอุณหภูมิ 2 ตำแหน่ง คือ อุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ และอุณหภูมิในน้ำมันดิบ



รูปที่ 4.8 เทอร์โมคัปเปิลเปิด RTD



รูปที่ 4.9 ตัวแปลงสัญญาณจากกระแส 4-20 มิลลิแอมป์ เป็น 0-5 โวลต์



รูปที่ 4.10 กล่องรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ)

4.1.3 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเครื่องทดสอบ

งานวิจัยนี้พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนคือเทอร์โมเวลเท่านั้น การควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันดิบภายในเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันเพื่อไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในตำแหน่งอื่นและเป็นการควบคุมอุณหภูมิในน้ำมันดิบให้คงที่ การควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นใช้การเขียนคำสั่งในโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ควบคุมการเปิดปิดและความเร็วรอบของปั๊มน้ำเย็นโดยใช้ค่าอุณหภูมิของน้ำมันดิบที่ส่งค่าสัญญาณมาจากเทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2 เก็บบันทึกค่าทุก 10 วินาที และเขียนคำสั่งให้เพิ่มและลดความเร็วรอบของปั๊มขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดไว้คำสั่งของโปรแกรมแมทแลปที่ใช้ในการทดสอบ และคำสั่งการควบคุมระบบในภาคผนวก ก ตั้งค่าอุณหภูมิน้ำเย็นที่เครื่องทำน้ำเย็น 16 องศาเซลเซียส จะเหมาะสมกับการทดลองนี้



รูปที่ 4.11 เครื่องทำน้ำเย็น (Chilled Water Machine)

4.2 การทดลองการก่อตัวของตะกรัน

ใช้น้ำมันดิบที่ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงกลั่นน้ำมันในจังหวัดระยอง ทดสอบโดยใช้ข้อมูลกระบวนการผลิตจริงของน้ำมันดิบที่มาจากถังเก็บเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวแรกมีอุณหภูมิตั้งแต่ 31°C จนไปถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวสุดท้ายอุณหภูมิน้ำมันดิบจะอยู่ที่

ประมาณ 127°C ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันดิบก่อนที่จะเข้าเครื่องกำจัดเกลือ (Desalter) และเนื่องจากความสามารถของฮีตเตอร์ที่ทำความร้อนสูงสุดได้ไม่เกิน 500°C ซึ่งจะทำให้ น้ำมันดิบในถังมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยไม่เกิน 135°C งานวิจัยนี้จึงทำการทดลองโดยจำลองว่าเป็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวสุดท้ายของชุดพรีฮีตเทรนก่อนเข้าเครื่องกำจัดเกลือ ทำการทดลองที่ 5 อุณหภูมิคือ 90°C 100°C 120°C 125°C และ 130°C เพื่อนำผลที่ได้มาศึกษาความสัมพันธ์

เริ่มทำการทดลองโดยเติมน้ำมันดิบลงในเครื่องจำนวน 5 ลิตร ปิดฝาถังให้สนิท และ ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ปรับโวลท์ (Voltage Variable Transformer) ให้เริ่มต้นที่ 0 โวลท์ และปรับเพิ่ม หลังจากโปรแกรมแมทแลปทำการเก็บค่าได้ เพื่อทราบค่าอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์ทำได้ ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยปรับไปได้อุณหภูมิที่ต้องการทดลอง
- เปิดเครื่องทำน้ำเย็น และปรับตั้งค่าอุณหภูมิ 16°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จะไม่ทำให้ อุณหภูมิของน้ำมันดิบภายในถังเปลี่ยนแปลงมากเกินไปเมื่อปั้มน้ำเย็นทำงาน
- เปิดใบกวน ให้ทำงานตลอดเวลาเพื่อกระจายความร้อนให้อุณหภูมิในถังเท่ากันทุก จุด
- เปิดก๊าซไนโตรเจนและปรับความดันให้อยู่ที่ 1 บรรยากาศ เพื่อรักษาความดันใน ถังให้คงที่และกำจัดก๊าซออกซิเจนออกจากระบบ
- ควบคุมการทำงานของเครื่องโดยใช้โปรแกรมแมทแลป คำสั่งของโปรแกรมแสดง ในภาคผนวก ข

ทำการทดลองจนกว่าอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์เพิ่มขึ้นและสะสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การสะสมความร้อนนี้เกิดจากตะกรันที่เกาะที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและขัดขวางการถ่ายเทความร้อน เมื่ออัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์คงที่จึงหยุดการทดลอง

ทดลองที่ทุกอุณหภูมิที่ต้องการ โดยใช้ขั้นตอนเดียวกัน เปลี่ยนอุณหภูมิที่ต้องการทดลอง โดยต้องทำความสะอาดภายในถังทดสอบไม่ให้มีคราบและตะกรันน้ำมันดิบที่ทดลองที่อุณหภูมิ ก่อนหน้าค้างอยู่ โดยเฉพาะเทอร์โมเวลต้องนำมาขัดด้วยกระดาษทรายหรือส่งไปพันทรายเพื่อกำจัด คราบตะกรันก่อนทำการทดลองครั้งถัดไป ทดลองจนครบทั้ง 5 อุณหภูมิที่ต้องการ หลังจากนั้นนำ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองที่บันทึกไว้ด้วยโปรแกรมแมทแลปมาทำการคำนวณหาค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient: U) จากสมการ

$$q = UA(T_i - T_o) \quad (2.14)$$

และคำนวณหาค่าความต้านทานตะกรัน (fouling resistance: R_f) ของแต่ละอุณหภูมิ น้ำมันดิบที่ทำการทดลอง โดยสมการความแตกต่างของส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อเกิดตะกรันและส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อไม่มีตะกรันดังนี้

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (2.5)$$

นำค่าที่ได้จากการคำนวณไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนและผลกระทบของสภาวะที่เกิดตะกรัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองนี้ใช้หลักการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิสูงไปให้อุณหภูมิต่ำกว่า โดยตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิของฝั่งที่ต่ำกว่าคือน้ำมันดิบมีอุณหภูมิกงที่ ความร้อนที่จ่ายให้ระบบนี้คงที่ พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนคงที่

ผลการทดลองในบทนี้ได้จากเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ทดลองที่ 90°C 100°C 120°C 125°C และ 130°C ตามลำดับ แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานตะกรัน (R_f) เทียบกับเวลาเพื่อดูแนวโน้มการก่อตัวของตะกรัน ซึ่งนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความต้านทานตะกรันสัมพันธ์กับเวลา

วิจารณ์ผลการทดลองความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานตะกรันน้ำมันดิบที่ทดลองที่ 120°C 125°C และ 130°C สัมพันธ์กับเวลา

วิจารณ์ผลการทดลองโดยเปรียบเทียบค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองจากทั้ง 5 อุณหภูมิ โดยนำค่าคงที่ของสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ มาหาสมการความสัมพันธ์และหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ

ตะกรันที่เกิดขึ้นจากการทดลองนี้เป็นตะกรันที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีทำให้สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในน้ำมันดิบมาจับตัวที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเมื่อเวลาผ่านไปจะมีปริมาณของตะกรันเพิ่มขึ้นมาจับที่ผนังท่อโมเวลล์และขัดขวางการถ่ายเทความร้อนจนทำให้เกิดความร้อนสะสมที่ฮีตเตอร์ดังนั้นงานทดลองนี้จึงเก็บค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงนี้มาใช้ในการหาสมการค่าความต้านทานตะกรันที่มีความสัมพันธ์กับเวลา โดยเริ่มจากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขณะที่ไม่มีตะกรันและหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อมีตะกรันเกิดขึ้นซึ่งทราบได้จากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ฮีตเตอร์

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U)
ได้จากสมการ

$$Q = UA(T_i - T_o) = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (2.14)$$

T_i คือ อุณหภูมิด้านในฮีทเตอร์เมื่อเกิดตะกรัน
 T_o คือ อุณหภูมิในน้ำมันดิบเมื่อเกิดตะกรัน

จากสมการที่ 2.14 เมื่อย้ายข้างสมการพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่า

$$U = \frac{Q}{A(T_i - T_o)} \quad (5.1)$$

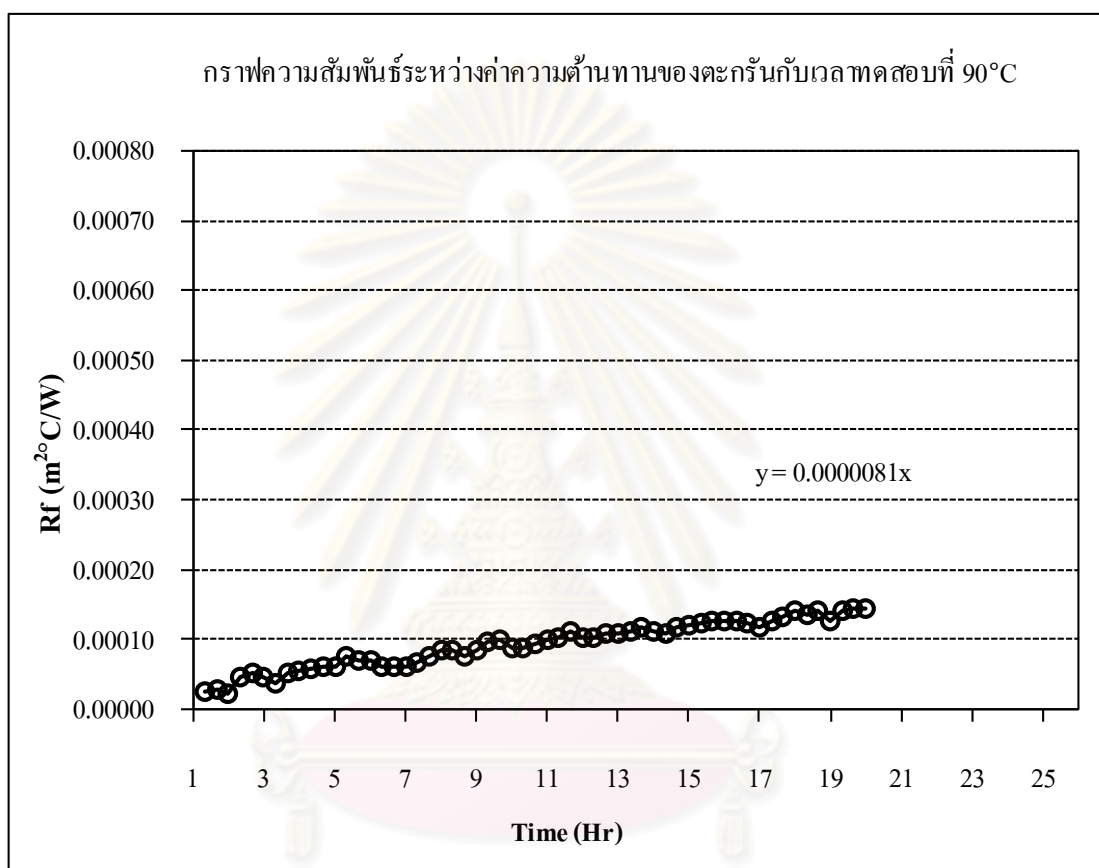
แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากโปรแกรมแมทแลป มาคำนวณหาค่า
ความต้านทานของตะกรัน (Fouling resistance: R_f) ได้จากสมการ

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (2.5)$$

ผลการทดลองที่ได้จากเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันที่ทดลองที่ 90°C 100°C 120°C
125°C และ 130°C แสดงในรูปที่ 5.1 ถึง 5.5 ตามลำดับ วิเคราะห์ผลการทดลองของทั้ง 5 อุณหภูมิโดย
ตั้งค่าเวลาเป็นหน่วยเดียวกันแสดงในรูปที่ 5.6 โดยค่าที่ได้การทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ ข-1
ถึง ข-6 ในภาคผนวก ข และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ทำการทดลองกับเวลา ณ จุดวิกฤต
ของแต่ละอุณหภูมิที่ทำการทดลอง
กำหนดให้ จุดวิกฤตคือค่าความต้านทานตะกรัน(R_f) เท่ากับ 0.0086 m²°C/W ซึ่งเป็นค่าที่แสดงว่า
เกิดตะกรันสูงสุดที่โรงงานอุตสาหกรรมจะต้องทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกลับมามีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนดั้งเดิม

5.1 ผลการทดลองการก่อดัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ 90 °C

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟค่าความต้านทานตะกรันเทียบกับเวลา จะเห็นว่าค่าความต้านทานของตะกรันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่ามีตะกรันเกิดขึ้นมาขัดขวางการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเทอร์โมเวลเพิ่มขึ้นและทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง



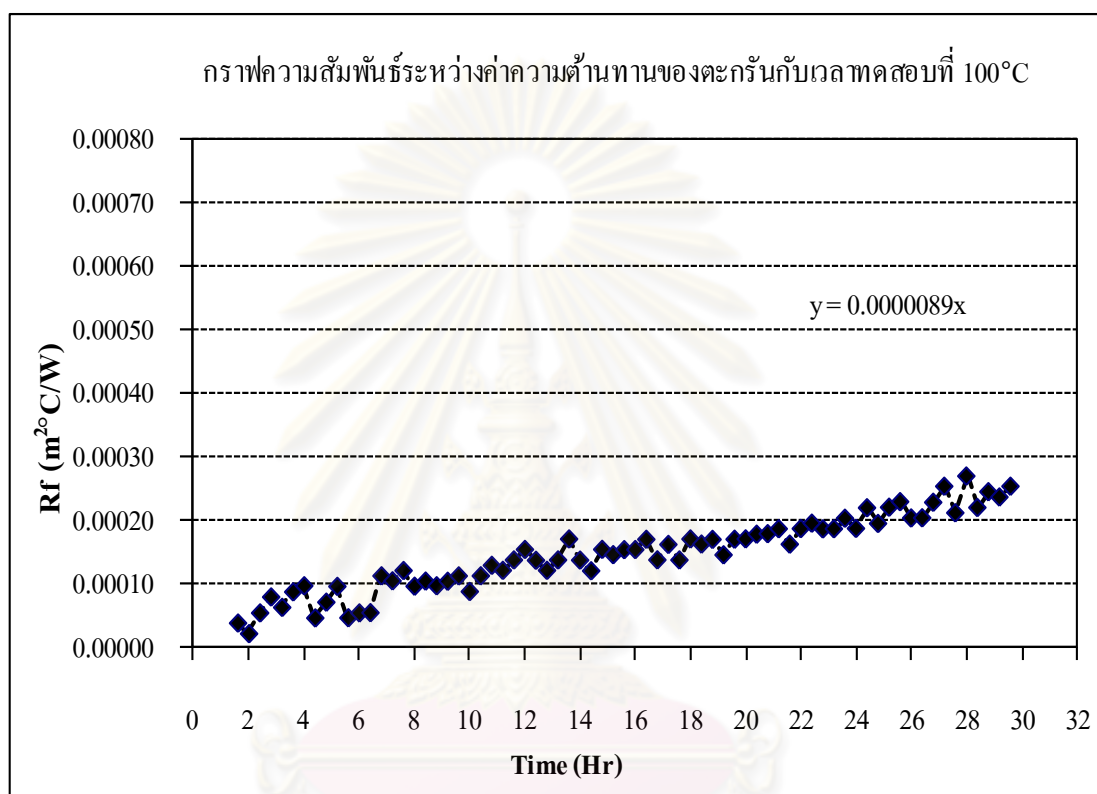
รูปที่ 5.1 กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 90 องศาเซลเซียส

จากกราฟเมื่อลากเส้นแนวโน้มของกราฟจะได้สมการกราฟเส้นตรง และนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$R_f(t) = 0.0000081t \quad \text{ที่ } 90^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

5.2 ผลการทดลองการก่อดั้วของตะกรันน้ำมันดิบที่ 100 °C

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟค่าความต้านทานตะกรันเทียบกับเวลา จะเห็นว่าค่าความต้านทานของตะกรันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่ามีตะกรันเกิดขึ้นมาชัดเจนการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเทอร์โมเวลเพิ่มขึ้นและทำให้ถ่ายเทความร้อนลดลง



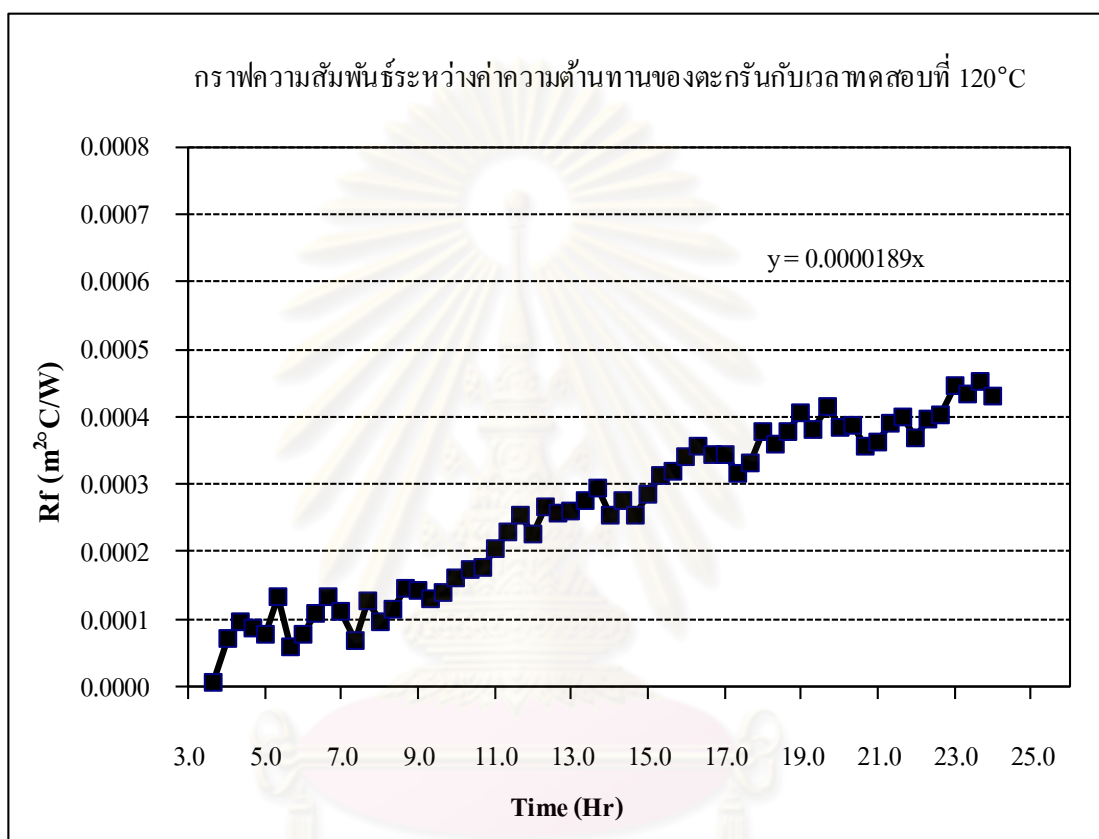
รูปที่ 5.2 กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 100 องศาเซลเซียส

จากกราฟเมื่อลากเส้นแนวโน้มของกราฟจะได้สมการกราฟเส้นตรง และนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$R_f(t) = 0.0000089t \quad \text{ที่ } 100^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

5.3 ผลการทดลองการก่อดั้วของตะกรันน้ำมันดิบที่ 120 °C

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟค่าความต้านทานตะกรันเทียบกับเวลา จะเห็นว่าค่าความต้านทานของตะกรันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่ามีตะกรันเกิดขึ้นมาชัดเจนการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเทอร์โมเวลเพิ่มขึ้นและทำให้ถ่ายเทความร้อนลดลง



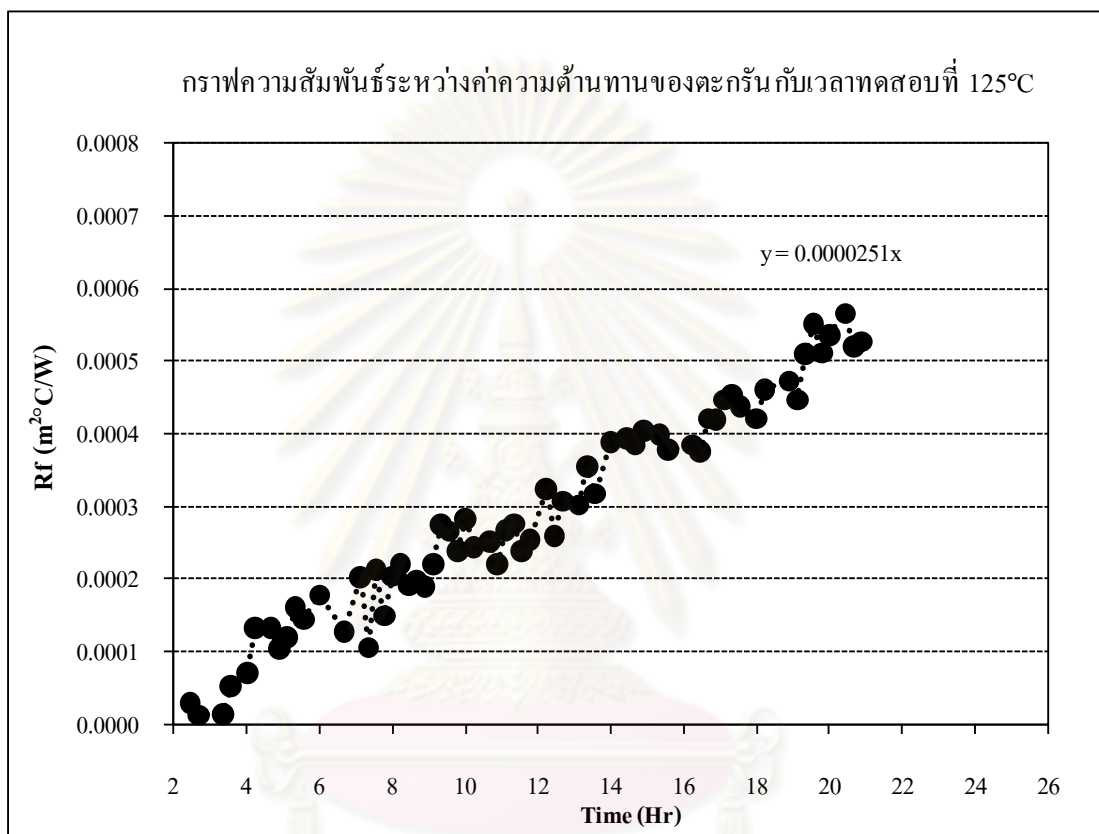
รูปที่ 5.3 กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 120 องศาเซลเซียส

จากกราฟเมื่อลากเส้นแนวโน้มของกราฟจะได้สมการกราฟเส้นตรง และนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$R_f(t) = 0.0000189t \quad \text{ที่ } 120^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

5.4 ผลการทดลองการก่อดั้วของตะกรันน้ำมันดิบที่ 125 °C

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟค่าความต้านทานตะกรันเทียบกับเวลา จะเห็นว่าค่าความต้านทานของตะกรันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่ามีตะกรันเกิดขึ้นมาขัดขวางการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเทอร์โมเวลเพิ่มขึ้นและทำให้ถ่ายเทความร้อนลดลง



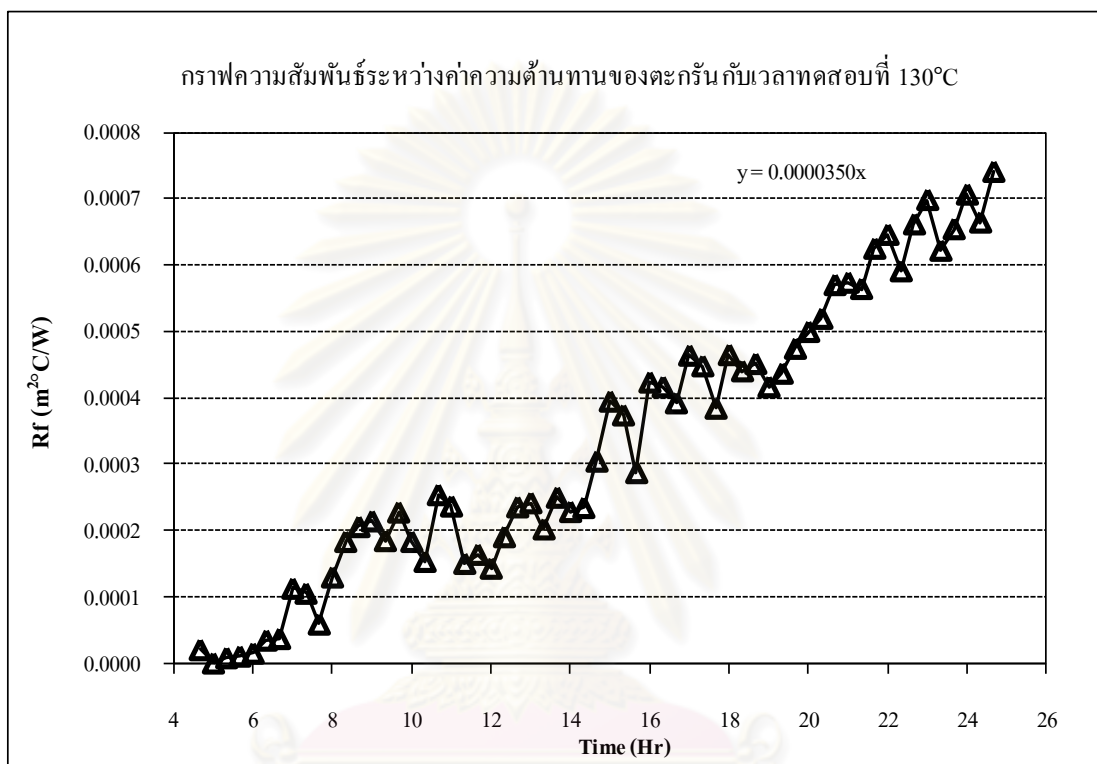
รูปที่ 5.4 กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 125 องศาเซลเซียส

จากกราฟเมื่อลากเส้นแนวโน้มของกราฟจะได้สมการกราฟเส้นตรง และนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$R_f(t) = 0.0000251t \quad \text{ที่ } 125^\circ\text{C} \quad (5.5)$$

5.5 ผลการทดลองการก่อดัวของตะกรันน้ำมันดิบที่ 130 °C

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟค่าความต้านทานตะกรันเทียบกับเวลา จะเห็นว่าค่าความต้านทานของตะกรันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่ามีตะกรันเกิดขึ้นมาชัดเจนการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของเทอร์โมเวลเพิ่มขึ้นและทำให้ถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 5.5 กราฟค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 130 องศาเซลเซียส

จากกราฟเมื่อลากเส้นแนวโน้มของกราฟจะได้สมการกราฟเส้นตรง และนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$R_f(t) = 0.0000350t \quad \text{ที่ } 130^\circ\text{C} \quad (5.6)$$

5.6 วิเคราะห์ผลการทดลองเทียบค่าความต้านทานตะกรันน้ำมันดิบที่ทดลองที่ 120°C 125°C และ 130°C

ผลที่ได้จากการทดลองการก่อตัวของตะกรันของน้ำมันดิบ (Crude oil) โดยใช้เครื่องทดลองการเกิดตะกรันที่ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 120°C 125 °C และ 130°C สามารถเขียนออกมาเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$R_f(t) = 0.0000081t \quad \text{ที่ } 90^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

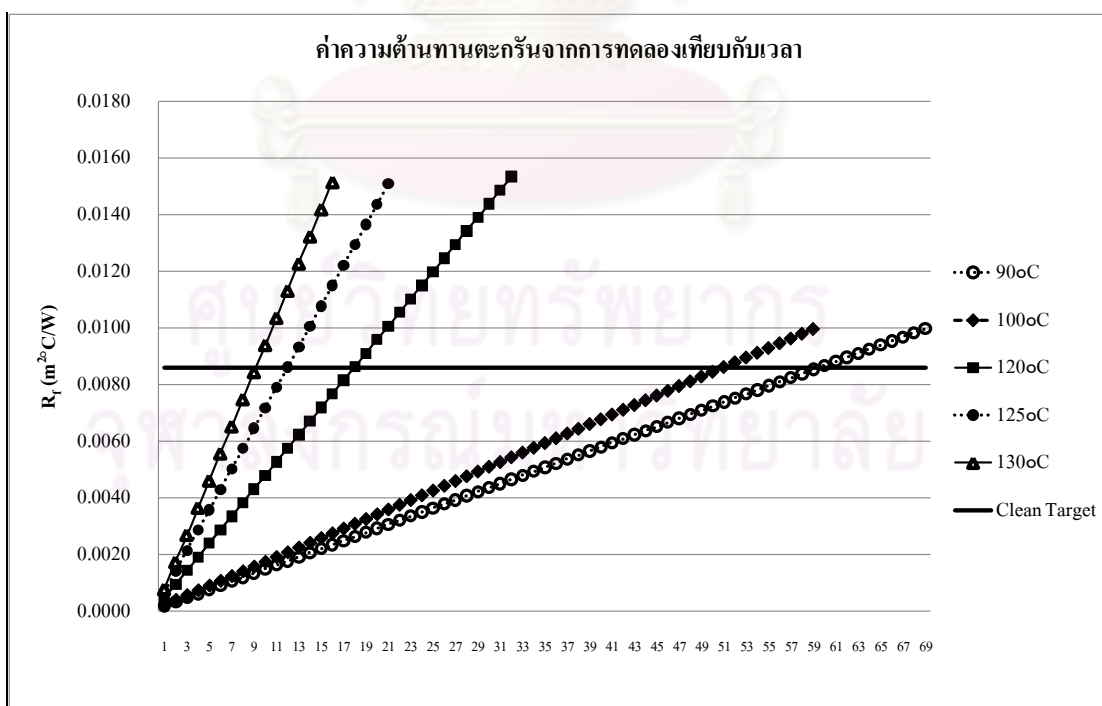
$$R_f(t) = 0.0000089t \quad \text{ที่ } 100^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

$$R_f(t) = 0.0000189t \quad \text{ที่ } 120^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

$$R_f(t) = 0.0000251t \quad \text{ที่ } 125^\circ\text{C} \quad (5.5)$$

$$R_f(t) = 0.0000350t \quad \text{ที่ } 130^\circ\text{C} \quad (5.6)$$

ค่าความชันของสมการที่ได้จากเครื่องทดสอบการก่อตัวตะกรันแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 90°C ค่าความชันของกราฟน้อยกว่า ที่อุณหภูมิ 100°C 120°C 125°C และ 130°C ตามลำดับ แต่ถ้าจะให้เห็นความแตกต่างชัดเจนยิ่งขึ้นต้องเปรียบเทียบที่เวลาการทดสอบเท่ากัน โดยแทนค่าเวลาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จากการทดสอบอุณหภูมิของน้ำมันดิบต่างกัน 5 อุณหภูมิ และนำไปแสดงความสัมพันธ์เพื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานตะกรัน ได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ทดสอบที่อุณหภูมิ 120°C 125°C และ 130°C

จากรูปที่ 5.5 กราฟเป็นแบบเส้นตรงและเปรียบเทียบกราฟทั้งสามแล้วพบว่าน้ำมันดิบที่ 120 °C จะเกิดตะกรันได้ช้ากว่าที่ 125 °C และ 130 °C และเส้นเรียบที่บคือจุดวิกฤตค่า R_f เท่ากับ $0.086 \text{ m}^2\text{C/W}$ เป็นเวลาที่โรงกลั่นน้ำมันต้องทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันดิบที่นำมาทำการทดลองนี้ น้ำมันดิบที่ทดลองที่ 120°C จะเกิดตะกรันจนต้องทำความสะอาดที่ 18 วัน ส่วนน้ำมันดิบที่ทดลองที่ 125°C จะเกิดตะกรันจนต้องทำความสะอาดที่ 12 วัน และน้ำมันดิบที่ทดลองที่ 130°C จะเกิดตะกรันจนต้องทำความสะอาดที่ 9 วัน ควรเลือกใช้อุณหภูมิให้เหมาะสมกับสารที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนเพราะเป็นตัวแปรสำคัญต่ออายุการใช้งานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นในการทดลองน้ำมันดิบตัวนี้ควรเลือกใช้อุณหภูมิ 120°C ในการผลิตเพื่อให้อัตราการเกิดตะกรันน้อยกว่าใช้อุณหภูมิ 125°C ร้อยละ 33 และน้อยกว่าใช้อุณหภูมิ 130°C ร้อยละ 50 และยี่เวลาในการทำทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในกระบวนการผลิตได้

5.7 วิจารณ์ผลการทดลองโดยเปรียบเทียบค่าความชันที่ได้จากการทดลองจากทั้ง 5 อุณหภูมิ

นำค่าความชันจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 90°C 100°C 120°C 125°C และ 130°C มาหาสมการความสัมพันธ์



รูปที่ 5.7 แสดงค่าความชันจากสมการกับเวลาทดสอบที่ 5 อุณหภูมิ

จากกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นกับอุณหภูมิในการทดสอบ สามารถใช้พยากรณ์ค่าความชื้นที่การทดสอบที่อุณหภูมิอื่นได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$y = 0.0000000032e^{0.07T} + 0.000006 \quad (5.7)$$

กำหนดให้ y คือ ความชื้นของสมการ
 T คือ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (°C)

เมื่อนำไปแทนค่าความชื้นในสมการค่าความต้านทานตะกรัน (R_p) ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความต้านทานตะกรันที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา ดังนี้

$$R_p(T,t) = (0.0000000032e^{0.07T} + 0.000006) t \quad (5.8)$$

สามารถใช้ทำนายที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 90 ถึง 130 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS)

การสร้างแบบจำลองหน่วยการผลิต ไม่มีความจำเป็นในการลงรายละเอียดทุกขั้นตอนตามแบบแผนภาพกระบวนการผลิตของหน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศแบบสมบูรณ์ เนื่องจากในการผลิตจริงนั้นใช้รายละเอียดเพื่อการควบคุมหน่วยการผลิต และปรับค่าพารามิเตอร์ แต่ในการสร้างแบบจำลองหน่วยการผลิตที่เป็นแบบสภาวะคงตัว ต้องลดความซับซ้อนของขั้นตอนในกระบวนการผลิตต่างๆ โดยจะคงไว้และให้ความสำคัญกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สำคัญของกระบวนการผลิตเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ยุ่งยากเกินความจำเป็นและสามารถตรวจสอบกลับได้ง่าย แต่ยังคงคงความเป็นตัวแทนของกระบวนการจริงเอาไว้ได้

เพื่อให้แบบจำลองตรงตามกระบวนการผลิตจริงผู้ออกแบบเลือกใช้สมการของสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์เป็นสมการสภาวะ (Equation of state) และสำหรับหน่วยกลั่นความดันบรรยากาศเลือกใช้สมการเพ็งโรบินสัน (Peng-Robinson) เพื่อให้เกิดความแม่นยำสำหรับการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในทุกสภาวะ ข้อมูลจากกระบวนการจริงที่มีสามารถใช้กำหนดเงื่อนไขในการจำลองเป็นกระบวนการที่สภาวะคงตัว (Steady State) อุณหภูมิในทุกหน่วยแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ ไม่มีการสูญเสียความร้อนและความดันของแต่ละอุปกรณ์คงที่

6.1. สร้างแบบจำลองHYSYS

ใช้โปรแกรมไฮซิส (HYSYS) สร้างแบบจำลองจากข้อมูลของกระบวนการอุตสาหกรรมจริง ซึ่งประกอบด้วย สายป้อนเข้า (Crude oil) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E1, E2, E3, E4) เครื่องฮีตเตอร์ (H1) หอกกลั่นความดันบรรยากาศ (Distillation Column) โดยตำแหน่งที่ใช้ในการจำลองกระบวนการเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกันคือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 (E4) เนื่องจากเป็นเครื่องที่มีอุณหภูมิในช่วงก่อนเข้าสู่ฮีตเตอร์ซึ่งได้ทดลองการก่อตัวของตะกัน 120-130 °C

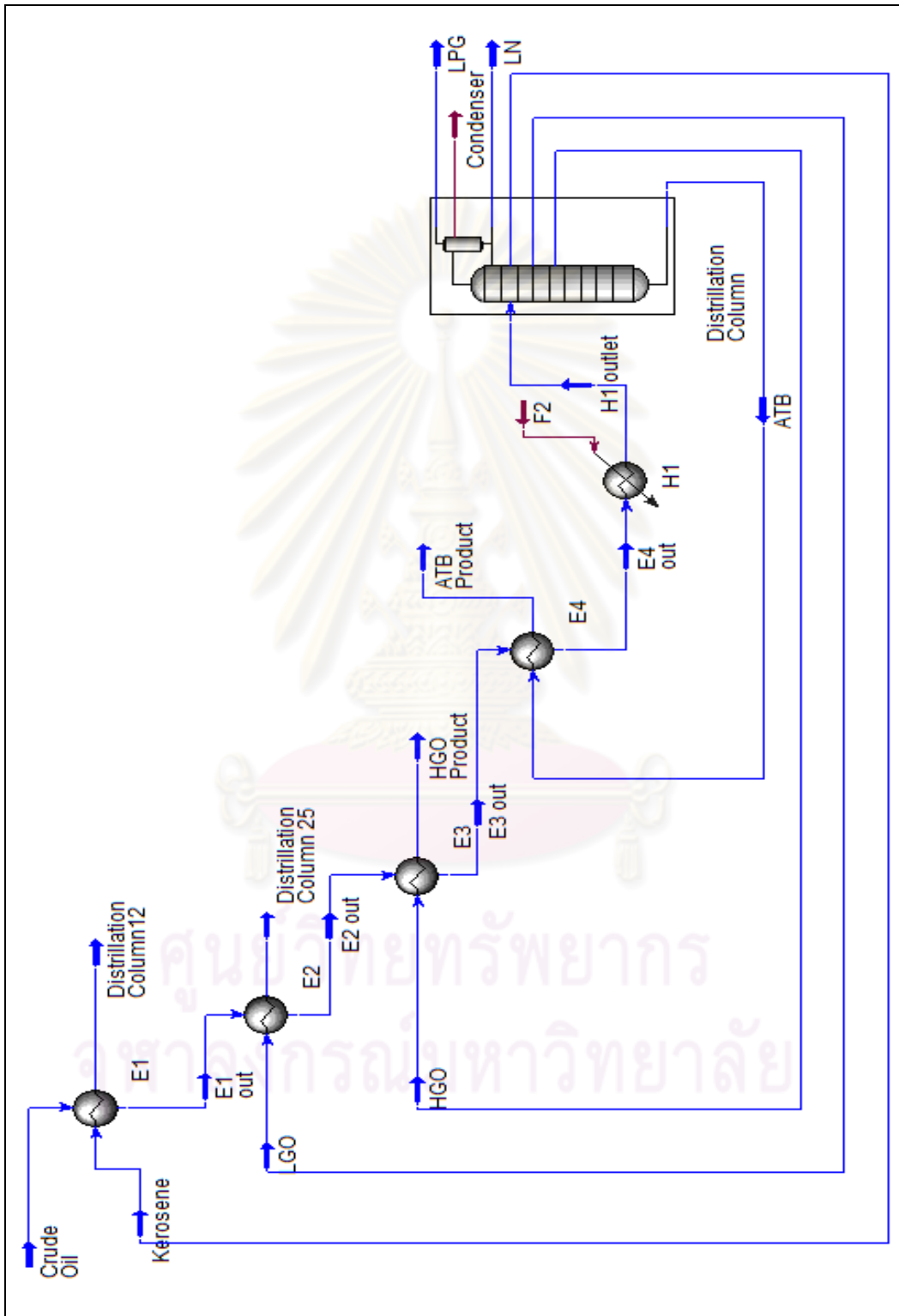
ตารางที่ 6.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สายป้อน Crude oil จากโรงกลั่นน้ำมันจังหวัดระยองจากถังก่อนส่งเข้าพรีฮีทเทรน	
Crude oil Feed Flow rate	150000 barrel/day หรือ 950 m ³ /hr
ความดัน	2bar
อุณหภูมิ	120, 125 และ 130 °C
สายให้ความร้อน ATB จากกันหอกกลับมาให้ความร้อนก่อนส่งไปถังเก็บ	
ATB Flow rate	100 m ³ /hr
ความดัน	1bar
อุณหภูมิ	430 °C

ตารางที่ 6.2 คุณสมบัติของน้ำมันดิบ ASTM D86

% Volume	°C	% Volume	°C
0	37.01	55	318.82
1	41.23	60	344.86
2	57.42	65	384.31
4	65.41	70	425.44
5	72.3	75	465.34
6	93.73	80	508.72
10	113.93	85	545.74
15	144.69	90	578.4
20	167.02	93	594.09
25	187.67	95	609.65
30	211.74	97	618.83
35	227.94	98	627.46
40	242.77	99	632.77
45	263.66	100	637.63
50	293.36		

จากข้อมูลในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 สามารถสร้างแบบจำลองหน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แบบจำลองหน่วยการกลั่นความดันบรรยากาศด้วยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS)

6.2. การจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรม HYSYS

จำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ก่อนเข้าสู่ฮีตเตอร์ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ เพื่อหาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อมีตะกรันเกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและหาพลังงานที่สูญเสียเมื่อเกิดตะกรัน โดยตั้งสมมติฐานว่าไม่มีตะกรันเกิดขึ้นในอุปกรณ์ตัวอื่นๆในระบบ อัตราการไหลของน้ำมันดิบคงที่ อัตราการไหลของสายให้ความร้อนทุกสายคงที่ อุณหภูมิของสายน้ำมันดิบที่ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 คงที่ ไม่มีการสูญเสียความร้อน และความดันตกคร่อมของอุปกรณ์ทุกตัว

ทำการทดลองโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อไม่มีตะกรัน (U_c) จากกระบวนการผลิตจริง มาคำนวณหาค่า U_f จากสมการ

$$R_f = \left(\frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \right) \quad (2.5)$$

ย้ายข้างสมการให้อยู่ในรูป U_f ดังนี้

$$U_f = \frac{1}{\left(R_f + \left(\frac{1}{U_c} \right) \right)} \quad (6.1)$$

โดยใช้ค่า R_f จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันของน้ำมันดิบที่ 3 อุณหภูมิทดสอบ สมการมีความสัมพันธ์กับเวลาดังนี้

$$R_f(t) = 0.0000189t \quad \text{ที่ } 120^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

$$R_f(t) = 0.0000251t \quad \text{ที่ } 125^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

$$R_f(t) = 0.0000350t \quad \text{ที่ } 130^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

ที่ได้จากการทดลองการก่อตัวตะกรันดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 แล้วนำมาแสดงประสิทธิภาพ เปรียบเทียบกันที่อุณหภูมิ 120 125 และ 130°C โดยจะแยกเป็นกรณีศึกษา ดังนี้

6.2.1. ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกอนที่อุณหภูมิ 120°

ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกอนที่ทดสอบที่อุณหภูมิน้ำมันดิบ สายป้อน 120°C เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 เก็บค่าอุณหภูมิสายออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 คำนวณอุณหภูมิที่แตกต่างไปจากอุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนความร้อน เริ่มต้นเมื่อยังไม่มีตะกอน เท่ากับ 125°C คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกอนที่สายป้อนอุณหภูมิ 120°

ค่าความต้านทาน ตะกอน R_f $(m^2 C/W)$	ค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนเมื่อ เกิดตะกอน U_f $(W/m^2 C)$	การเปลี่ยนแปลง ของค่า U_f $(\%)$	อุณหภูมิ น้ำมันดิบที่ออก จาก E4 $(^{\circ}C)$	การเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิ $(\%)$
0.00000	153.83	0.0%	125.0	0.00%
0.00100	133.32	13.3%	124.4	0.47%
0.00200	117.64	23.5%	123.9	0.87%
0.00300	105.26	31.6%	123.5	1.19%
0.00400	95.23	38.1%	123.2	1.42%
0.00500	86.95	43.5%	122.9	1.67%
0.00600	80.00	48.0%	122.7	1.80%
0.00700	74.07	51.8%	122.5	1.96%
0.00800	68.96	55.2%	122.3	2.15%
0.00900	64.51	58.1%	122.2	2.23%
0.01000	60.60	60.6%	122.0	2.36%
0.01100	57.14	62.9%	121.9	2.47%
0.01200	54.05	64.9%	121.8	2.54%

จากตารางจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง แสดงว่าเมื่อเกิดตะกอนจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง เมื่อจำลองกระบวนการที่ 120 °C โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเริ่มต้นจากกระบวนการผลิตจริง พบว่าจากตารางที่ 6.3 ที่ค่าความต้านทานตะกอนเท่ากับ 0.0086 $m^2 C/W$ ซึ่งเป็นจุดวิกฤตในการหยุดทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงถึง 2.19%

6.2.2. ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่อุณหภูมิ 125°C

ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันที่ทดสอบที่อุณหภูมิน้ำมันดิบสายป้อน 125°C เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 เก็บค่าอุณหภูมิสายออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 คำนวณอุณหภูมิที่แตกต่างไปจากอุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มต้นเมื่อยังไม่มีตะกรัน เท่ากับ 129.9°C คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่สายป้อนอุณหภูมิ 125°C

ค่าความต้านทานตะกรัน $R_f (m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W})$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อเกิดตะกรัน $U_f (W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$	การเปลี่ยนแปลงของค่า U_f (%)	อุณหภูมิน้ำมันดิบที่ออกจาก E_4 ($^\circ\text{C}$)	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (%)
0.00000	153.83	0.0%	129.9	0.00%
0.00100	133.32	13.3%	129.3	0.48%
0.00200	117.64	23.5%	128.8	0.85%
0.00300	105.26	31.6%	128.4	1.14%
0.00400	95.23	38.1%	128.1	1.38%
0.00500	86.95	43.5%	127.8	1.58%
0.00600	80.00	48.0%	127.6	1.75%
0.00700	74.07	51.8%	127.4	1.89%
0.00800	68.96	55.2%	127.2	2.02%
0.00900	64.51	58.1%	127.1	2.13%
0.01000	60.60	60.6%	127.0	2.21%
0.01100	57.14	62.9%	126.9	2.29%
0.01200	54.05	64.9%	126.8	2.39%

จากตารางจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง แสดงว่าเมื่อเกิดตะกรันจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง เมื่อจำลองกระบวนการที่ 125 °C โดยใช้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเริ่มต้นจากกระบวนการผลิตจริง พบว่าจากตารางที่ 6.4 ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ ซึ่งเป็นจุดวิกฤตในการหยุดทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงถึง 2.08%

6.2.3. ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่อุณหภูมิ 130°C

ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันที่ทดสอบที่อุณหภูมิน้ำมันดิบสายป้อน 130°C เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 เก็บค่าอุณหภูมิสายออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 คำนวณอุณหภูมิที่แตกต่างไปจากอุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนความร้อนเริ่มต้นเมื่อยังไม่มีตะกรัน เท่ากับ 134.8°C คิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันทดสอบที่สายป้อนอุณหภูมิ 130°

ค่าความต้านทาน ตะกรัน $R_f (m^2 C/W)$	ค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนเมื่อ เกิดตะกรัน U_f $(W/m^2 C)$	การเปลี่ยนแปลง ของค่า U_f $(\%)$	อุณหภูมิ น้ำมันดิบที่ออก จาก E4 $(^{\circ}C)$	การเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิ $(\%)$
0.00000	153.83	0.0%	134.8	0.00%
0.00100	133.32	13.3%	134.1	0.48%
0.00200	117.64	23.5%	133.7	0.78%
0.00300	105.26	31.6%	133.3	1.08%
0.00400	95.23	38.1%	133.0	1.30%
0.00500	86.95	43.5%	132.7	1.52%
0.00600	80.00	48.0%	132.5	1.67%
0.00700	74.07	51.8%	132.4	1.74%
0.00800	68.96	55.2%	132.2	1.89%
0.00900	64.51	58.1%	132.1	1.97%
0.01000	60.60	60.6%	131.9	2.12%
0.01100	57.14	62.9%	131.8	2.19%
0.01200	54.05	64.9%	131.7	2.24%

จากตารางจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่แลกเปลี่ยนได้ลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง แสดงว่าเมื่อเกิดตะกรันจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลง เมื่อจำลองกระบวนการที่ 130 °C โดยใช้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเริ่มต้นจากกระบวนการผลิตจริง พบว่าจากตารางที่ 6.5 ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 $m^2 C/W$ ซึ่งเป็นจุดวิกฤตในการหยุดทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงถึง 1.93%

6.2.4. ผลกระทบของตะกรันเมื่อเกิดตะกรันทดลองที่ 120 °C

การทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า 120 °C โดยใช้ค่า U_f ที่คำนวณได้จากสมการค่า R_f เริ่มต้นที่ 0.000 จนถึง 0.012 m^2C/W ซึ่งครอบคลุมค่าความต้านทานตะกรันที่จุดวิกฤตคือ 0.0086 m^2C/W เมื่อตะกรันทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง โดยทำการจำลองกระบวนการเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเกิดตะกรันขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ศึกษาผลกระทบของตะกรันที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้สูญเสียพลังงานที่จะทำให้อุณหภูมิกลับมาเท่ากับตอนที่ไม่มีตะกรัน และคำนวณค่าไฟฟ้าที่สูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรันขึ้นในระบบ โดยวิธีการคำนวณและอัตราค่าไฟฟ้าแสดงในภาคผนวก ง

ตารางที่ 6.6 ผลกระทบของตะกรันจากการทดลองโดยอุณหภูมิสายป้อน 120 °C

ค่าความต้านทาน ตะกรัน $R_f (m^2 C/W)$	อุณหภูมิน้ำมันดิบที่ ออกจากE4 (°C)	การเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิ (%)	กำลังไฟฟ้าที่ สูญเสีย (kW)	ค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย (บาท/เดือน)
0.00000	125.0	0.00%	0	0
0.00100	124.4	0.47%	315	612,360
0.00200	123.9	0.87%	560	1,088,640
0.00300	123.5	1.19%	755	1,467,720
0.00400	123.2	1.42%	915	1,778,760
0.00500	122.9	1.67%	1045	2,031,480
0.00600	122.7	1.80%	1155	2,245,320
0.00700	122.5	1.96%	1250	2,430,000
0.00800	122.3	2.15%	1335	2,595,240
0.00900	122.2	2.23%	1405	2,731,320
0.01000	122.0	2.36%	1470	2,857,680
0.01100	121.9	2.47%	1525	2,964,600
0.01200	121.8	2.54%	1575	3,061,800

จากตารางที่ 6.6 เป็นผลกระทบจากการจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ที่น้ำมันดิบสายป้อนอุณหภูมิ 120 °C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 m^2C/W สูญเสียค่าไฟฟ้า 2,676,888 บาทต่อเดือน

6.2.5. ผลกระทบของตะกรันเมื่อเกิดตะกรันทดลองที่ 125 °C

การทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า 125°C โดยใช้ค่า U_f ที่คำนวณได้จากสมการค่า R_f เริ่มต้นที่ 0.000 จนถึง 0.012 $m^2 C/W$ ซึ่งครอบคลุมค่าความต้านทานตะกรันที่กระบวนการผลิตต้องหยุดทำความสะอาดตะกรันคือ 0.0086 $m^2 C/W$ เพื่อไม่ให้ตะกรันทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง โดยจะทำการจำลองกระบวนการเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเกิดตะกรันขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ศึกษาผลกระทบของตะกรันที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้สูญเสียพลังงานที่จะทำให้อุณหภูมิกลับมาเท่าเดิมกับตอนที่ไม่มีตะกรัน และคำนวณค่าไฟฟ้าที่สูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรันขึ้นในระบบ

ตารางที่ 6.7 ผลกระทบของตะกรันจากการทดลองโดยอุณหภูมิสายป้อน 125°C

ค่าความต้านทาน ตะกรัน $R_f (m^2 C/W)$	อุณหภูมิน้ำมันดิบที่ ออกจากE4 (°C)	การเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิ (%)	กำลังไฟฟ้าที่ สูญเสีย (kW)	ค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย (บาท/เดือน)
0.00000	129.9	0.00%	0	0
0.00100	129.3	0.48%	310	602,640
0.00200	128.8	0.85%	560	1,088,640
0.00300	128.4	1.14%	760	1,477,440
0.00400	128.1	1.38%	920	1,788,480
0.00500	127.8	1.58%	1055	2,050,920
0.00600	127.6	1.75%	1165	2,264,760
0.00700	127.4	1.89%	1265	2,459,160
0.00800	127.2	2.02%	1345	2,614,680
0.00900	127.1	2.13%	1420	2,760,480
0.01000	127.0	2.21%	1485	2,886,840
0.01100	126.9	2.29%	1540	2,993,760
0.01200	126.8	2.39%	1590	3,090,960

จากตารางที่ 6.7 เป็นผลกระทบจากการจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ที่น้ำมันดิบสายป้อนอุณหภูมิ 125°C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 $m^2 C/W$ สูญเสียค่าไฟฟ้า 2,702,160 บาทต่อเดือน

6.2.6. ผลกระทบของตะกรันเมื่อเกิดตะกรันทดลองที่ 130 °C

การทดลองที่อุณหภูมิขาเข้า 125°C โดยใช้ค่า U_f ที่คำนวณได้จากสมการค่า R_f เริ่มต้นที่ 0.000 จนถึง 0.012 $m^2 C/W$ ซึ่งครอบคลุมค่าความต้านทานตะกรันที่กระบวนการผลิตต้องหยุดทำความสะอาดตะกรันคือ 0.0086 $m^2 C/W$ เพื่อไม่ให้ตะกรันทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง โดยจะทำการจำลองกระบวนการเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเกิดตะกรันขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ศึกษาผลกระทบของตะกรันที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้สูญเสียพลังงานที่จะทำให้อุณหภูมิกลับมาเท่าเดิมกับตอนที่ไม่มีตะกรัน และคำนวณค่าไฟฟ้าที่สูญเสียเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรันขึ้นในระบบ

ตารางที่ 6.8 ผลกระทบของตะกรันจากการทดลองโดยอุณหภูมิสายป้อน 130°C

ค่าความต้านทาน ตะกรัน $R_f (m^2 C/W)$	อุณหภูมิน้ำมันดิบที่ ออกจากE4 (°C)	การเปลี่ยนแปลง ของอุณหภูมิ (%)	กำลังไฟฟ้าที่ สูญเสีย (kW)	ค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย (บาท/เดือน)
0.00000	134.8	0.00%	0	0
0.00100	134.1	0.48%	305	592,920
0.00200	133.7	0.78%	558	1,084,752
0.00300	133.3	1.08%	758	1,473,552
0.00400	133.0	1.30%	923	1,794,312
0.00500	132.7	1.52%	1,058	2,056,752
0.00600	132.5	1.67%	1,173	2,280,312
0.00700	132.4	1.74%	1,280	2,488,320
0.00800	132.2	1.89%	1,360	2,643,840
0.00900	132.1	1.97%	1,440	2,799,360
0.01000	131.9	2.12%	1,500	2,916,000
0.01100	131.8	2.19%	1,555	3,022,920
0.01200	131.7	2.24%	1,606	3,122,064

จากตารางที่ 6.8 เป็นผลกระทบจากการจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ที่น้ำมันดิบสายป้อนอุณหภูมิ 130°C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 $m^2 C/W$ สูญเสียค่าไฟฟ้า 2,737,152 บาทต่อเดือน

6.3. วิจารณ์ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อเกิดตะกรันของอุณหภูมิ 120 °C และ 130 °C ด้วยโปรแกรมไฮซิส

นำอุณหภูมิของน้ำมันดิบที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 มาแสดงความสัมพันธ์เทียบกับค่าความต้านทานตะกรัน จากผลการทดลองที่สายป้อนมีอุณหภูมิ 120 °C อุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 เริ่มต้นที่ 125 °C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0 m^2C/W แล้วค่อยๆลดลงจนถึง 122.3 °C ที่จุดวิกฤตค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 m^2C/W ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง 2.19%

อุณหภูมิของการทดลองที่สายป้อนมีอุณหภูมิ 125 °C อุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 เริ่มต้นที่ 129.9 °C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0 m^2C/W แล้วค่อยๆลดลงจนถึง 127.2 °C ที่จุดวิกฤตค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 m^2C/W ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง 2.08%

อุณหภูมิของการทดลองที่สายป้อนมีอุณหภูมิ 130 °C อุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 เริ่มต้นที่ 134.8 °C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0 m^2C/W แล้วค่อยๆลดลงจนถึง 132.2 °C ที่จุดวิกฤตค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 m^2C/W ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง 1.93%

เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 อุณหภูมิ ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนแตกต่างกันเล็กน้อย แต่เมื่อนำมาคำนวณพลังงานความร้อนที่สูญเสียให้ที่น้ำมันดิบสายป้อนอุณหภูมิ 120 °C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 m^2C/W สูญเสียค่าไฟฟ้า 2,676,888 บาทต่อเดือน ที่น้ำมันดิบสายป้อนอุณหภูมิ 125 °C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 m^2C/W สูญเสียค่าไฟฟ้า 2,702,160 บาทต่อเดือน ที่น้ำมันดิบสายป้อนอุณหภูมิ 130 °C ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 m^2C/W สูญเสียค่าไฟฟ้า 2,737,152 บาทต่อเดือน โดยที่อุณหภูมิสายป้อน 130 °C จะสูญเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าที่อุณหภูมิสายป้อน 120 °C คิดเป็น 2.25% และที่อุณหภูมิสายป้อน 125 °C จะสูญเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าที่อุณหภูมิสายป้อน 120 °C คิดเป็น 0.94%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องทดลองการก่อตัวการเกิดตะกรัน โดยอาศัยอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างผิวของการถ่ายเทความร้อนและเมื่อผิวการถ่ายเทความร้อนเกิดตะกรันจะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงทำให้สามารถทดลองหาค่าความต้านทานของตะกรัน (R_f) บนผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันดิบที่ปกติในกระบวนการผลิตจริงใช้อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ 120-130 °C จึงทำการทดลองที่ 3 อุณหภูมิ 120 125 และ 130 °C จากการทดสอบการก่อตัวตะกรันน้ำมันดิบได้สมการทางคณิตศาสตร์ R_f มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวลาเป็นแบบเส้นตรง ดังสมการต่อไปนี้

$$R_f(t) = 0.0000189t \quad \text{ที่ } 120^\circ\text{C} \quad (5.4)$$

$$R_f(t) = 0.0000251t \quad \text{ที่ } 125^\circ\text{C} \quad (5.5)$$

$$R_f(t) = 0.0000350t \quad \text{ที่ } 130^\circ\text{C} \quad (5.6)$$

อัตราการเกิดตะกรันที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 120 °C จะช้ากว่าที่อุณหภูมิ 125 °C และอุณหภูมิ 130 °C แสดงว่าอุณหภูมิของน้ำมันดิบสูงขึ้นจะทำให้เกิดตะกรันเร็วขึ้น และเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นจะเกิดตะกรันเพิ่มขึ้น ควรเลือกใช้อุณหภูมิ 120°C เพื่อให้อัตราการเกิดตะกรันน้อยกว่าใช้อุณหภูมิ 125°C ร้อยละ 33 และน้อยกว่าใช้อุณหภูมิ 130°C ร้อยละ 50

ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความต้านทานตะกรันที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลา โดยสามารถใช้ทำนายที่อุณหภูมิของน้ำมันดิบ 90 ถึง 130 องศาเซลเซียส ดังนี้

$$R_f(T,t) = (0.0000000032e^{0.07T} + 0.000006)t \quad (5.8)$$

แบบจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS) ถูกใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิน้ำมันดิบสายป้อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ 120 125 และ 130 °C จากการศึกษพบว่า ที่ค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0086 $m^2\text{C/W}$ ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 4 ที่ทดลองที่ 120 °C 2.19 % และสูญเสียค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยน

ความร้อนเท่าตอนที่ยังไม่มีตะกรัน ประมาณ 2,676,888 บาทต่อเดือน ทดลองที่ 125 °C ลดลง 2.08% และสูญเสียค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่าตอนที่ยังไม่มีตะกรัน ประมาณ 2,702,160 บาทต่อเดือน และทดลองที่ 130 °C ลดลง 1.93% และสูญเสียค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่าตอนที่ยังไม่มีตะกรัน ประมาณ 2,737,152 บาทต่อเดือน ที่อุณหภูมิสายป้อน 130°C จะสูญเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าที่อุณหภูมิสายป้อน 120°C คิดเป็น 2.25% และที่อุณหภูมิสายป้อน 125°C จะสูญเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าที่อุณหภูมิสายป้อน 120°C คิดเป็น 0.94%

สาเหตุเกิดจากตะกรันมาขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อนและทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ดังนั้นเพื่อให้สูญเสียประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนและค่าไฟฟ้าต้องทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์จากงานวิจัยนี้คำนวณหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำมันดิบในการผลิตจริง

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) พิจารณาตัวแปรดำเนินงานอื่น เช่นอัตราการไหลของสายป้อน โดยเพิ่มสายป้อนเข้าและสายนำออกของเครื่องทดสอบการเกิดตะกรัน
- 2) การหาสภาวะที่เหมาะสมต้องขึ้นอยู่กับพื้นฐานการผลิตที่ทำให้ต้นทุนต่ำที่สุด ซึ่งต้องใช้ข้อมูลด้านค่าวัตถุดิบจากอุตสาหกรรม
- 3) การดึงสารจากหอกลับออกมาให้ความร้อนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ควรต้องคำนึงถึงสายนำกลับหอกลับที่มีอุณหภูมิลดลงจากเดิมตอนนำออกมา ดังนั้นควรมีการปรับความร้อนให้เพิ่มก่อนนำกลับไป หรือนำกลับไปในตำแหน่งอื่นที่อุณหภูมิเหมาะสม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Paul, E., Cedar Hill. Fouling Test Apparatus. United State Patent4,383,438. May 17, 1983.
- [2] Kuru, W.C., and Panchal, C.B. High-Temperature Organic-Fluid Fouling Unit. Argonne National Laboratory. May 1997.
- [3] Abdulsalami S. KOVO. Mathematical Modelling and Simulation of Fouling of Migerian Crude Oil Wquipment Installations. Department of Chemical Engineering, Federal University of Technology, Minna, pmb 65, Migeria. July-December 2006: 111-124.
- [4] Catherine Procik Dulka, Young Jim Kim. Method of Protecting Reactor Components from Fouling. Patent Application Publicstion Dulka et al.c., Mar4, 2010:1-6.
- [5] Jeronimo, M.A.S., Melo, L.F., Suosa Brga, A., Ferreira, P.J.B.F, Martins, C. Mornitoring the Thermal Efficiency of Fouled Heat Exchangers: A simplified Method. Experimental Thermal and Fluid Science, 14(1997): 455-463.
- [6] Javad Aminian, Shahrokh Shahhosseini “Neuro-based formulation to predict fouling threshold in crude preheater”International Communication in Heat and Mass Transfer, 36(2009):525-531.
- [7] Mohammad Reza Jafari Nasr, Mehdi Majidi Givi, Modeling of crude oil fouling in preheat exchangers of refinery distillation units. Applied Thermal Engineering 26: 1572–1577, 2006.
- [8] Bott, T.R., Fouling of Heat Exchangers, ELSEVIER, 1995.
- [9] Ishiyama, E.M., Heins, A.V., Paterson, W.R., Spinelli, L., Wilson, D.I., Scheduling cleaning in a crude oil preheat train subject to fouling: Incorporating desalter control. Applied ThermalEngineering 30 (2010):1852-1862.
- [10] Luiz O. de Oliveira Filho , Fábio S. Liporace , Eduardo M. Queiroz , André L.H. Costa, Investigation of an alternative operating procedure for fouling management in refinery crude preheat trains. Applied Thermal Engineering 29 (2009): 3073–3080.

ภาคผนวก ก

คำสั่งของโปรแกรมแมทแลปที่ใช้กับเครื่องทดสอบการก่อตัวตะกอนของน้ำมันดิบ

ตารางที่ ก-1 ทดลองที่ 90 ONGSAWAT CHEEYAT

```
ai=analoginput('nidaq','Dev2');
addchannel(ai,0:1);

ao=analogoutput('nidaq','Dev2');
addchannel(ao,0);

SP=90;
Kc=0.5;
Ti=0.3;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

MVss=1.0;
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(5);
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 129.65*(Temp(1))-65.634;
Temp(2) = 116.56*(Temp(2))-59.903;
CVss = [35 35];
CVss
MVss
sum=zeros(1,3);
j=zeros(final,1);%Temp Fluid%
k=zeros(final,1);%Temp Heater%
l=zeros(final,1);%Volt Pump%

for i=1:final

    %%%%%%%%%
    Temp1 = getsample(ai);
    Temp2 = getsample(ai);
    Temp3 = getsample(ai);
    Temp4 = getsample(ai);
    Temp5 = getsample(ai);
    Temp6 = getsample(ai);
    Temp7 = getsample(ai);
    Temp8 = getsample(ai);
    Temp9 = getsample(ai);
    Temp10 = getsample(ai);
    Temp11 = getsample(ai);
    Temp12 = getsample(ai);
    Temp13 = getsample(ai);
    Temp14 = getsample(ai);
    Temp15 = getsample(ai);
    Temp16 = getsample(ai);
    Temp17 = getsample(ai);
    Temp18 = getsample(ai);
    Temp19 = getsample(ai);
    Temp20 = getsample(ai);
    Temp21 = getsample(ai);
    Temp22 = getsample(ai);
    Temp23 = getsample(ai);
    Temp24 = getsample(ai);
```

```

Temp25 = getsample(ai);
Temp26 = getsample(ai);
Temp27 = getsample(ai);
Temp28 = getsample(ai);
Temp29 = getsample(ai);
Temp30 = getsample(ai);

TT1=[Temp1(1) Temp2(1) Temp3(1) Temp4(1) Temp5(1) Temp6(1)
Temp7(1) Temp8(1) Temp9(1) Temp10(1) Temp11(1) Temp12(1) Temp13(1)
Temp14(1) Temp15(1) Temp16(1) Temp17(1) Temp18(1) Temp19(1) Temp20(1)
Temp21(1) Temp22(1) Temp23(1) Temp24(1) Temp25(1) Temp26(1) Temp27(1)
Temp28(1) Temp29(1) Temp30(1)];
TT2=[Temp1(2) Temp2(2) Temp3(2) Temp4(2) Temp5(2) Temp6(2)
Temp7(2) Temp8(2) Temp9(2) Temp10(2) Temp11(2) Temp12(2) Temp13(2)
Temp14(2) Temp15(2) Temp16(2) Temp17(2) Temp18(2) Temp19(2) Temp20(2)
Temp21(2) Temp22(2) Temp23(2) Temp24(2) Temp25(2) Temp26(2) Temp27(2)
Temp28(2) Temp29(2) Temp30(2)];
V(1) = median(TT1,2);
V(2) = median(TT2,2);
%%%%%%

T(1) = 129.65*(V(1))-65.634;%Temp Fluid%
T(2) = 116.56*(V(2))-59.903;%Temp Heater%

X = [T(1) T(2)];

e = SP-T(1);
sum(1) =sum(1)+ e*st;

if (and(T(1)>(SP+1),T(1)<(SP+3)))
    MV=1;
elseif (and(T(1)>(SP+3),T(1)<(SP+5)))
    MV=1.5;
elseif (and(T(1)>(SP-2),T(1)<SP+1))
    MV=0;
elseif (T(1)<(SP-2))
    MV=0;
elseif (T(1)>(SP+5))
    MV=2;
end

putsample(ao,MV);
j(i)=X(1);%Temp Fluid%
k(i)=X(2);%Temp Heater%
l(i)=MV;%Volt Pump%

i
TT1
TT2
X
MV

pause(st);
save TestOil190
end
t=0:st:final;

```

ตารางที่ ก-2 ทดลองที่ 100 องศาเซลเซียส

```

ai=analoginput('nidaq','Dev2');
addchannel(ai,0:1);

ao=analogoutput('nidaq','Dev2');
addchannel(ao,0);

SP=100;
Kc=0.5;
Ti=0.3;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

MVss=1.0;
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(5);
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 129.65*(Temp(1))-65.634;
Temp(2) = 116.56*(Temp(2))-59.903;
CVss = [35 35];
CVss
MVss
sum=zeros(1,3);
j=zeros(final,1);%Temp Fluid%
k=zeros(final,1);%Temp Heater%
l=zeros(final,1);%Volt Pump%

for i=1:final

    %%%
    Temp1 = getsample(ai);
    Temp2 = getsample(ai);
    Temp3 = getsample(ai);
    Temp4 = getsample(ai);
    Temp5 = getsample(ai);
    Temp6 = getsample(ai);
    Temp7 = getsample(ai);
    Temp8 = getsample(ai);
    Temp9 = getsample(ai);
    Temp10 = getsample(ai);
    Temp11 = getsample(ai);
    Temp12 = getsample(ai);
    Temp13 = getsample(ai);
    Temp14 = getsample(ai);
    Temp15 = getsample(ai);
    Temp16 = getsample(ai);
    Temp17 = getsample(ai);
    Temp18 = getsample(ai);
    Temp19 = getsample(ai);
    Temp20 = getsample(ai);
    Temp21 = getsample(ai);
    Temp22 = getsample(ai);
    Temp23 = getsample(ai);
    Temp24 = getsample(ai);
    Temp25 = getsample(ai);
    Temp26 = getsample(ai);
    Temp27 = getsample(ai);
    Temp28 = getsample(ai);

```



```

Temp29 = getsample(ai);
Temp30 = getsample(ai);

TT1=[Temp1(1) Temp2(1) Temp3(1) Temp4(1) Temp5(1) Temp6(1)
Temp7(1) Temp8(1) Temp9(1) Temp10(1) Temp11(1) Temp12(1) Temp13(1)
Temp14(1) Temp15(1) Temp16(1) Temp17(1) Temp18(1) Temp19(1) Temp20(1)
Temp21(1) Temp22(1) Temp23(1) Temp24(1) Temp25(1) Temp26(1) Temp27(1)
Temp28(1) Temp29(1) Temp30(1)];
TT2=[Temp1(2) Temp2(2) Temp3(2) Temp4(2) Temp5(2) Temp6(2)
Temp7(2) Temp8(2) Temp9(2) Temp10(2) Temp11(2) Temp12(2) Temp13(2)
Temp14(2) Temp15(2) Temp16(2) Temp17(2) Temp18(2) Temp19(2) Temp20(2)
Temp21(2) Temp22(2) Temp23(2) Temp24(2) Temp25(2) Temp26(2) Temp27(2)
Temp28(2) Temp29(2) Temp30(2)];
V(1) = median(TT1,2);
V(2) = median(TT2,2);
%%%%%%

T(1) = 129.65*(V(1))-65.634;%Temp Fluid%

T(2) = 116.56*(V(2))-59.903;%Temp Heater%

X = [T(1) T(2)];

e = SP-T(1);
sum(1) =sum(1)+ e*st;

if (and(T(1)>(SP+1),T(1)<(SP+3)))
    MV=1;
elseif (and(T(1)>(SP+3),T(1)<(SP+5)))
    MV=1.5;
elseif (and(T(1)>(SP-2),T(1)<SP+1))
    MV=0;
elseif (T(1)<(SP-2))
    MV=0;
elseif (T(1)>(SP+5))
    MV=2;
end

putsample(ao,MV);
j(i)=X(1);%Temp Fluid%
k(i)=X(2);%Temp Heater%
l(i)=MV;%Volt Pump%

i
TT1
TT2
X
MV

pause(st);
save TestOil100
end
t=0:st:final;

```

ตารางที่ ก-3 ทดลองที่ 120 องศาเซลเซียส

```

ai=analoginput('nidaq','Dev2');
addchannel(ai,0:1);

ao=analogoutput('nidaq','Dev2');
addchannel(ao,0);

SP=120;
Kc=0.5;
Ti=0.3;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

MVss=1.0;
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(5);
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 129.65*(Temp(1))-65.634;
Temp(2) = 116.56*(Temp(2))-59.903;
CVss = [35 35];
CVss
MVss
sum=zeros(1,3);
j=zeros(final,1);%Temp Fluid%
k=zeros(final,1);%Temp Heater%
l=zeros(final,1);%Volt Pump%

for i=1:final

    %%%%%%%%%
    Temp1 = getsample(ai);
    Temp2 = getsample(ai);
    Temp3 = getsample(ai);
    Temp4 = getsample(ai);
    Temp5 = getsample(ai);
    Temp6 = getsample(ai);
    Temp7 = getsample(ai);
    Temp8 = getsample(ai);
    Temp9 = getsample(ai);
    Temp10 = getsample(ai);
    Temp11 = getsample(ai);
    Temp12 = getsample(ai);
    Temp13 = getsample(ai);
    Temp14 = getsample(ai);
    Temp15 = getsample(ai);
    Temp16 = getsample(ai);
    Temp17 = getsample(ai);
    Temp18 = getsample(ai);
    Temp19 = getsample(ai);
    Temp20 = getsample(ai);
    Temp21 = getsample(ai);
    Temp22 = getsample(ai);
    Temp23 = getsample(ai);
    Temp24 = getsample(ai);
    Temp25 = getsample(ai);
    Temp26 = getsample(ai);
    Temp27 = getsample(ai);
    Temp28 = getsample(ai);

```

```

Temp29 = getsample(ai);
Temp30 = getsample(ai);

TT1=[Temp1(1) Temp2(1) Temp3(1) Temp4(1) Temp5(1) Temp6(1)
Temp7(1) Temp8(1) Temp9(1) Temp10(1) Temp11(1) Temp12(1) Temp13(1)
Temp14(1) Temp15(1) Temp16(1) Temp17(1) Temp18(1) Temp19(1) Temp20(1)
Temp21(1) Temp22(1) Temp23(1) Temp24(1) Temp25(1) Temp26(1) Temp27(1)
Temp28(1) Temp29(1) Temp30(1)];
TT2=[Temp1(2) Temp2(2) Temp3(2) Temp4(2) Temp5(2) Temp6(2)
Temp7(2) Temp8(2) Temp9(2) Temp10(2) Temp11(2) Temp12(2) Temp13(2)
Temp14(2) Temp15(2) Temp16(2) Temp17(2) Temp18(2) Temp19(2) Temp20(2)
Temp21(2) Temp22(2) Temp23(2) Temp24(2) Temp25(2) Temp26(2) Temp27(2)
Temp28(2) Temp29(2) Temp30(2)];
V(1) = median(TT1,2);
V(2) = median(TT2,2);
%%%%%%

T(1) = 129.65*(V(1))-65.634;%Temp Fluid%

T(2) = 116.56*(V(2))-59.903;%Temp Heater%

X = [T(1) T(2)];

e = SP-T(1);
sum(1) =sum(1)+ e*st;

if (and(T(1)>(SP+1),T(1)<(SP+3)))
    MV=1;
elseif (and(T(1)>(SP+3),T(1)<(SP+5)))
    MV=1.5;
elseif (and(T(1)>(SP-2),T(1)<SP+1))
    MV=0;
elseif (T(1)<(SP-2))
    MV=0;
elseif (T(1)>(SP+5))
    MV=2;
end

putsample(ao,MV);
j(i)=X(1);%Temp Fluid%
k(i)=X(2);%Temp Heater%
l(i)=MV;%Volt Pump%

i
TT1
TT2
X
MV

pause(st);
save TestOil120
end
t=0:st:final;

```

ตารางที่ ก-4 ทดลองที่ 125 องศาเซลเซียส

```

ai=analoginput('nidaq','Dev2');
addchannel(ai,0:1);

ao=analogoutput('nidaq','Dev2');
addchannel(ao,0);

SP=125;
Kc=0.5;
Ti=0.3;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

MVss=1.0;
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(5);
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 129.65*(Temp(1))-65.634;
Temp(2) = 116.56*(Temp(2))-59.903;
CVss = [35 35];
CVss
MVss
sum=zeros(1,3);
j=zeros(final,1);%Temp Fluid%
k=zeros(final,1);%Temp Heater%
l=zeros(final,1);%Volt Pump%

for i=1:final

    %%%%%%%%%
    Temp1 = getsample(ai);
    Temp2 = getsample(ai);
    Temp3 = getsample(ai);
    Temp4 = getsample(ai);
    Temp5 = getsample(ai);
    Temp6 = getsample(ai);
    Temp7 = getsample(ai);
    Temp8 = getsample(ai);
    Temp9 = getsample(ai);
    Temp10 = getsample(ai);
    Temp11 = getsample(ai);
    Temp12 = getsample(ai);
    Temp13 = getsample(ai);
    Temp14 = getsample(ai);
    Temp15 = getsample(ai);
    Temp16 = getsample(ai);
    Temp17 = getsample(ai);
    Temp18 = getsample(ai);
    Temp19 = getsample(ai);
    Temp20 = getsample(ai);
    Temp21 = getsample(ai);
    Temp22 = getsample(ai);
    Temp23 = getsample(ai);
    Temp24 = getsample(ai);
    Temp25 = getsample(ai);
    Temp26 = getsample(ai);
    Temp27 = getsample(ai);
    Temp28 = getsample(ai);

```

```

Temp29 = getsample(ai);
Temp30 = getsample(ai);

TT1=[Temp1(1) Temp2(1) Temp3(1) Temp4(1) Temp5(1) Temp6(1)
Temp7(1) Temp8(1) Temp9(1) Temp10(1) Temp11(1) Temp12(1) Temp13(1)
Temp14(1) Temp15(1) Temp16(1) Temp17(1) Temp18(1) Temp19(1) Temp20(1)
Temp21(1) Temp22(1) Temp23(1) Temp24(1) Temp25(1) Temp26(1) Temp27(1)
Temp28(1) Temp29(1) Temp30(1)];
TT2=[Temp1(2) Temp2(2) Temp3(2) Temp4(2) Temp5(2) Temp6(2)
Temp7(2) Temp8(2) Temp9(2) Temp10(2) Temp11(2) Temp12(2) Temp13(2)
Temp14(2) Temp15(2) Temp16(2) Temp17(2) Temp18(2) Temp19(2) Temp20(2)
Temp21(2) Temp22(2) Temp23(2) Temp24(2) Temp25(2) Temp26(2) Temp27(2)
Temp28(2) Temp29(2) Temp30(2)];
V(1) = median(TT1,2);
V(2) = median(TT2,2);
%%%%%%

T(1) = 129.65*(V(1))-65.634;%Temp Fluid%

T(2) = 116.56*(V(2))-59.903;%Temp Heater%

X = [T(1) T(2)];

e = SP-T(1);
sum(1) =sum(1)+ e*st;

if (and(T(1)>(SP+1),T(1)<(SP+3)))
    MV=1;
elseif (and(T(1)>(SP+3),T(1)<(SP+5)))
    MV=1.5;
elseif (and(T(1)>(SP-2),T(1)<SP+1))
    MV=0;
elseif (T(1)<(SP-2))
    MV=0;
elseif (T(1)>(SP+5))
    MV=2;
end

putsample(ao,MV);
j(i)=X(1);%Temp Fluid%
k(i)=X(2);%Temp Heater%
l(i)=MV;%Volt Pump%

i
TT1
TT2
X
MV

pause(st);
save TestOil125
end
t=0:st:final;

```

ตารางที่ ก-5 ทดลองที่ 130 วิชาเซลล์เซียม

```

ai=analoginput('nidaq','Dev2');
addchannel(ai,0:1);

ao=analogoutput('nidaq','Dev2');
addchannel(ao,0);

SP=130;
Kc=0.5;
Ti=0.3;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

MVss=1.0;
putsample(ao,MVss);
disp('Waiting for a while. ');
pause(5);
Temp = getsample(ai);
Temp(1) = 129.65*(Temp(1))-65.634;
Temp(2) = 116.56*(Temp(2))-59.903;
CVss = [35 35];
CVss
MVss
sum=zeros(1,3);
j=zeros(final,1);%Temp Fluid%
k=zeros(final,1);%Temp Heater%
l=zeros(final,1);%Volt Pump%

for i=1:final

    %%%%%%%%%
    Temp1 = getsample(ai);
    Temp2 = getsample(ai);
    Temp3 = getsample(ai);
    Temp4 = getsample(ai);
    Temp5 = getsample(ai);
    Temp6 = getsample(ai);
    Temp7 = getsample(ai);
    Temp8 = getsample(ai);
    Temp9 = getsample(ai);
    Temp10 = getsample(ai);
    Temp11 = getsample(ai);
    Temp12 = getsample(ai);
    Temp13 = getsample(ai);
    Temp14 = getsample(ai);
    Temp15 = getsample(ai);
    Temp16 = getsample(ai);
    Temp17 = getsample(ai);
    Temp18 = getsample(ai);
    Temp19 = getsample(ai);
    Temp20 = getsample(ai);
    Temp21 = getsample(ai);
    Temp22 = getsample(ai);
    Temp23 = getsample(ai);
    Temp24 = getsample(ai);
    Temp25 = getsample(ai);
    Temp26 = getsample(ai);
    Temp27 = getsample(ai);
    Temp28 = getsample(ai);

```

```

Temp29 = getsample(ai);
Temp30 = getsample(ai);

TT1=[Temp1(1) Temp2(1) Temp3(1) Temp4(1) Temp5(1) Temp6(1)
Temp7(1) Temp8(1) Temp9(1) Temp10(1) Temp11(1) Temp12(1) Temp13(1)
Temp14(1) Temp15(1) Temp16(1) Temp17(1) Temp18(1) Temp19(1) Temp20(1)
Temp21(1) Temp22(1) Temp23(1) Temp24(1) Temp25(1) Temp26(1) Temp27(1)
Temp28(1) Temp29(1) Temp30(1)];
TT2=[Temp1(2) Temp2(2) Temp3(2) Temp4(2) Temp5(2) Temp6(2)
Temp7(2) Temp8(2) Temp9(2) Temp10(2) Temp11(2) Temp12(2) Temp13(2)
Temp14(2) Temp15(2) Temp16(2) Temp17(2) Temp18(2) Temp19(2) Temp20(2)
Temp21(2) Temp22(2) Temp23(2) Temp24(2) Temp25(2) Temp26(2) Temp27(2)
Temp28(2) Temp29(2) Temp30(2)];
V(1) = median(TT1,2);
V(2) = median(TT2,2);
%%%%%%

T(1) = 129.65*(V(1))-65.634;%Temp Fluid%

T(2) = 116.56*(V(2))-59.903;%Temp Heater%

X = [T(1) T(2)];

e = SP-T(1);
sum(1) =sum(1)+ e*st;

if (and(T(1)>(SP+1),T(1)<(SP+3)))
    MV=1;
elseif (and(T(1)>(SP+3),T(1)<(SP+5)))
    MV=1.5;
elseif (and(T(1)>(SP-2),T(1)<SP+1))
    MV=0;
elseif (T(1)<(SP-2))
    MV=0;
elseif (T(1)>(SP+5))
    MV=2;
end

putsample(ao,MV);
j(i)=X(1);%Temp Fluid%
k(i)=X(2);%Temp Heater%
l(i)=MV;%Volt Pump%

i
TT1
TT2
X
MV

pause(st);
save TestOil130
end
t=0:st:final;

```

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการก่อดัวของตะกรันน้ำมันดิบ

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 90°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
1.3	91.4	476.1	382.7	103.4	0.000026
1.7	90.1	472.9	382.8	103.4	0.000029
2.0	89.1	471.6	382.5	103.5	0.000022
2.3	90.4	473.8	383.5	103.2	0.000045
2.7	89.4	474.5	383.8	103.1	0.000053
3.0	89.7	473.2	383.5	103.2	0.000045
3.3	90.1	473.2	383.1	103.3	0.000037
3.7	90.7	474.5	383.8	103.1	0.000052
4.0	89.7	473.5	383.8	103.1	0.000053
4.3	89.4	473.4	384.0	103.1	0.000058
4.7	91.4	475.4	384.1	103.1	0.000060
5.0	90.7	474.8	384.1	103.1	0.000060
5.3	92.4	475.7	384.7	102.9	0.000076
5.7	90.7	473.8	384.4	103.0	0.000069
6.0	89.4	472.6	384.5	102.9	0.000070
6.3	90.4	474.5	384.1	103.1	0.000061
6.7	90.4	473.2	384.1	103.0	0.000061
7.0	89.1	473.2	384.1	103.0	0.000062
7.3	90.1	476.4	384.3	103.0	0.000067
7.7	90.1	476.1	384.7	102.9	0.000076
8.0	88.1	473.1	385.0	102.8	0.000083
8.3	91.7	474.2	385.1	102.8	0.000085
8.7	90.7	475.4	384.7	102.9	0.000077
9.0	91.4	477.7	385.0	102.8	0.000083

9.3	89.1	471.9	385.5	102.7	0.000095
9.7	91.7	477.3	385.6	102.6	0.000100
10.0	88.7	473.8	385.1	102.8	0.000086
10.3	89.4	473.2	385.1	102.8	0.000086
10.7	90.7	476.1	385.4	102.7	0.000093
11.0	88.7	476.4	385.6	102.6	0.000100
11.3	88.4	474.2	385.7	102.6	0.000103
11.7	89.1	473.8	386.1	102.5	0.000111
12.0	89.4	473.8	385.7	102.6	0.000102
12.3	87.8	474.8	385.7	102.6	0.000103
12.7	88.4	476.4	386.0	102.5	0.000108
13.0	90.1	476.1	386.0	102.5	0.000109
13.3	90.1	473.5	386.1	102.5	0.000111
13.7	91.4	477.7	386.3	102.5	0.000116
14.0	89.4	474.2	386.1	102.5	0.000111
14.3	91.4	477.3	386.0	102.5	0.000108
14.7	90.4	478.0	386.3	102.5	0.000116
15.0	90.1	473.8	386.4	102.4	0.000119
15.3	92.7	479.3	386.6	102.4	0.000123
15.7	92.4	476.4	386.6	102.4	0.000125
16.0	90.1	475.4	386.7	102.4	0.000126
16.3	89.4	473.5	386.7	102.3	0.000127
16.7	89.4	475.9	386.5	102.4	0.000123
17.0	89.7	476.1	386.3	102.5	0.000118
17.3	90.4	475.7	386.7	102.4	0.000126
17.7	90.1	479.6	386.9	102.3	0.000132
18.0	89.7	475.7	387.3	102.2	0.000142
18.3	89.4	473.8	387.0	102.3	0.000135
18.7	91.0	478.3	387.3	102.2	0.000141

19.0	90.1	476.7	386.6	102.4	0.000125
19.3	90.4	477.7	387.3	102.2	0.000141
19.7	90.4	475.1	387.3	102.2	0.000143
20.0	89.1	473.8	387.4	102.2	0.000144



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 100°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
1.6	100.6	317.5	216.9	182.5	0.000038
2.0	101.3	317.5	216.3	183.0	0.000021
2.4	103.2	320.8	217.5	181.9	0.000054
2.8	101.6	320.1	218.5	181.1	0.000079
3.2	100.9	318.8	217.9	181.6	0.000063
3.6	102.6	321.4	218.9	180.8	0.000087
4.0	96.3	315.6	219.2	180.5	0.000097
4.4	101.6	318.8	217.2	182.2	0.000046
4.8	101.3	319.5	218.2	181.4	0.000071
5.2	100.9	320.1	219.2	180.6	0.000096
5.6	100.3	317.5	217.2	182.2	0.000046
6.0	103.2	320.8	217.5	181.9	0.000054
6.4	101.3	318.8	217.6	181.9	0.000054
6.8	100.3	320.1	219.9	180.0	0.000112
7.2	98.6	318.2	219.5	180.3	0.000105
7.6	99.9	320.1	220.2	179.8	0.000121
8.0	99.6	318.8	219.2	180.6	0.000096
8.4	100.6	320.1	219.5	180.3	0.000104
8.8	96.3	315.6	219.2	180.5	0.000097
9.2	101.9	321.4	219.5	180.3	0.000104
9.6	100.9	320.8	219.9	180.0	0.000112
10.0	99.9	318.8	218.9	180.8	0.000088
10.4	100.3	320.1	219.9	180.0	0.000112
10.8	100.3	320.8	220.5	179.5	0.000129
11.2	98.6	318.8	220.2	179.7	0.000121
11.6	99.3	320.1	220.8	179.2	0.000137

12.0	99.3	320.8	221.5	178.7	0.000154
12.4	101.9	322.7	220.8	179.2	0.000137
12.8	98.6	318.8	220.2	179.7	0.000121
13.2	99.3	320.1	220.8	179.2	0.000137
13.6	99.3	321.4	222.2	178.2	0.000170
14.0	100.6	321.4	220.8	179.2	0.000137
14.4	101.9	322.1	220.2	179.8	0.000120
14.8	98.6	320.1	221.5	178.7	0.000154
15.2	98.9	320.1	221.2	179.0	0.000146
15.6	100.6	322.1	221.5	178.7	0.000154
16.0	99.9	321.4	221.5	178.7	0.000154
16.4	101.9	324.0	222.1	178.2	0.000170
16.8	98.6	319.5	220.9	179.2	0.000138
17.2	100.9	322.7	221.8	178.4	0.000162
17.6	99.3	320.1	220.8	179.2	0.000137
18.0	99.3	321.4	222.2	178.2	0.000170
18.4	98.3	320.1	221.8	178.4	0.000162
18.8	102.6	324.7	222.1	178.2	0.000170
19.2	100.3	321.4	221.2	179.0	0.000145
19.6	101.3	323.4	222.1	178.2	0.000170
20.0	98.6	320.8	222.2	178.2	0.000171
20.4	102.9	325.4	222.5	177.9	0.000178
20.8	98.9	321.4	222.5	177.9	0.000179
21.2	101.3	324.0	222.8	177.7	0.000186
21.6	98.9	320.8	221.8	178.4	0.000162
22.0	99.9	322.7	222.8	177.6	0.000187
22.4	98.9	322.1	223.1	177.4	0.000195
22.8	102.6	325.4	222.8	177.7	0.000186
23.2	101.3	324.0	222.8	177.7	0.000186

23.6	101.3	324.7	223.4	177.1	0.000203
24.0	98.6	321.4	222.8	177.6	0.000187
24.4	101.3	325.4	224.1	176.6	0.000219
24.8	100.9	324.0	223.1	177.4	0.000195
25.2	97.3	321.4	224.1	176.6	0.000220
25.6	95.0	319.5	224.5	176.3	0.000229
26.0	99.3	322.7	223.5	177.1	0.000203
26.4	98.0	321.4	223.5	177.1	0.000204
26.8	99.6	324.0	224.4	176.4	0.000228
27.2	97.3	322.7	225.4	175.6	0.000253
27.6	99.6	323.4	223.8	176.9	0.000212
28.0	99.3	325.4	226.1	175.1	0.000269
28.4	99.3	323.4	224.1	176.6	0.000220
28.8	98.9	324.0	225.1	175.8	0.000245
29.2	99.3	324.0	224.8	176.1	0.000236
29.6	97.3	322.7	225.4	175.6	0.000253

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกรันน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 120°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
0.3	118.4	446.9	328.5	124.0	-0.00006
0.7	118.1	448.0	329.9	123.5	-0.00003
1.0	119.9	448.8	328.9	123.9	-0.00005
1.3	120.7	449.9	329.2	123.7	-0.00004
1.7	121.0	451.5	330.5	123.3	-0.00001
2.0	121.1	449.9	328.8	123.9	-0.00005
2.3	119.1	451.2	332.1	122.7	0.00003
2.7	119.9	451.3	331.4	122.9	0.00001
3.0	120.7	450.0	329.3	123.7	-0.00004
3.3	120.1	450.4	330.3	123.3	-0.00002
3.7	121.4	452.6	331.3	123.0	0.00001
4.0	120.1	453.9	333.9	122.0	0.00007
4.3	120.0	454.8	334.9	121.7	0.00010
4.7	120.7	455.1	334.4	121.8	0.00009
5.0	121.1	455.2	334.1	121.9	0.00008
5.3	120.1	456.5	336.4	121.1	0.00013
5.7	120.7	454.1	333.4	122.2	0.00006
6.0	119.1	453.2	334.1	121.9	0.00008
6.3	118.8	454.1	335.4	121.5	0.00011
6.7	117.1	453.6	336.4	121.1	0.00013
7.0	118.1	453.6	335.5	121.4	0.00011
7.3	120.8	454.6	333.8	122.1	0.00007
7.7	119.1	455.2	336.1	121.2	0.00013
8.0	119.7	454.6	334.8	121.7	0.00009

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
8.3	120.0	455.6	335.6	121.4	0.00011
8.7	120.7	457.6	336.9	120.9	0.00014
9.0	120.1	456.9	336.8	121.0	0.00014
9.3	119.3	455.6	336.3	121.1	0.00013
9.7	118.3	454.9	336.6	121.0	0.00014
10.0	119.9	457.4	337.5	120.7	0.00016
10.3	120.9	458.9	338.0	120.5	0.00017
10.7	121.8	459.9	338.1	120.5	0.00018
11.0	121.4	460.6	339.3	120.1	0.00020
11.3	120.7	461.1	340.4	119.7	0.00023
11.7	120.4	461.7	341.3	119.4	0.00025
12.0	120.8	461.0	340.2	119.7	0.00023
12.3	121.1	463.0	341.9	119.2	0.00027
12.7	120.4	461.9	341.5	119.3	0.00026
13.0	120.1	461.6	341.6	119.3	0.00026
13.3	119.7	462.0	342.2	119.0	0.00028
13.7	120.0	463.0	343.0	118.8	0.00029
14.0	119.1	460.5	341.3	119.4	0.00025
14.3	119.7	462.0	342.2	119.0	0.00028
14.7	121.4	462.7	341.3	119.4	0.00025
15.0	122.3	464.9	342.5	118.9	0.00028
15.3	121.7	465.4	343.7	118.6	0.00031
15.7	120.1	464.1	344.0	118.4	0.00032
16.0	119.8	464.6	344.8	118.2	0.00034

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
16.3	120.0	465.5	345.5	117.9	0.00036
16.7	120.4	465.3	344.9	118.1	0.00034
17.0	121.4	466.3	345.0	118.1	0.00034
17.3	120.3	464.1	343.8	118.5	0.00031
17.7	121.7	466.2	344.5	118.3	0.00033
18.0	122.0	468.4	346.4	117.6	0.00038
18.3	122.1	467.7	345.7	117.9	0.00036
18.7	122.0	468.4	346.4	117.6	0.00038
19.0	120.1	467.6	347.5	117.2	0.00041
19.3	119.7	466.2	346.5	117.6	0.00038
19.7	118.9	466.8	347.9	117.1	0.00042
20.0	119.4	466.1	346.7	117.5	0.00039
20.3	120.1	466.7	346.7	117.5	0.00039
20.7	121.7	467.2	345.5	117.9	0.00036
21.0	121.8	467.5	345.7	117.9	0.00036
21.3	120.7	467.6	346.9	117.5	0.00039
21.7	120.7	468.0	347.3	117.3	0.00040
22.0	121.7	467.6	345.9	117.8	0.00037
22.3	119.1	466.2	347.1	117.4	0.00040
22.7	119.8	467.1	347.4	117.3	0.00040
23.0	119.7	468.8	349.1	116.7	0.00044
23.3	119.4	468.1	348.7	116.8	0.00044
23.7	120.0	469.4	349.3	116.6	0.00045
24.0	120.7	469.2	348.5	116.9	0.00043

ตารางที่ ข-4 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 125°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
2.44	123.0142	447.775	324.7608	125.4521	0.0000284
2.67	124.2474	448.328	324.0806	125.7154	0.0000117
3.33	125.1662	449.3225	324.1563	125.6861	0.0000135
3.56	124.6248	450.3408	325.716	125.0842	0.0000518
4.00	125.793	452.2386	326.4456	124.8047	0.0000697
4.22	124.3075	453.328	329.0205	123.8279	0.0001329
4.67	124.9622	453.9649	329.0027	123.8346	0.0001325
4.89	126.6128	454.4174	327.8046	124.2872	0.0001031
5.11	125.9541	454.4174	328.4633	124.038	0.0001192
5.33	124.7496	454.8755	330.1259	123.4133	0.0001600
5.56	124.3075	453.7806	329.4731	123.6579	0.0001440
6.00	124.9421	455.7861	330.844	123.1455	0.0001777
6.67	125.6248	454.4174	328.7926	123.9138	0.0001273
7.11	123.6488	455.5124	331.8635	122.7671	0.0002027
7.33	125.2594	453.1437	327.8843	124.2571	0.0001050
7.56	126.6128	458.8755	332.2627	122.6196	0.0002125
7.78	127.2714	456.9649	329.6935	123.5752	0.0001494
8.00	127.6008	459.5124	331.9116	122.7494	0.0002039
8.22	125.6609	458.2386	332.5778	122.5035	0.0002202
8.44	124.9662	456.328	331.3619	122.953	0.0001904
8.67	126.6128	458.2386	331.6259	122.8551	0.0001969
8.89	125.6248	456.9649	331.3401	122.9611	0.0001898
9.11	125.6248	458.2386	332.6138	122.4902	0.0002211
9.33	127.2474	462.0599	334.8125	121.6858	0.0002751
9.56	126.9902	461.423	334.4328	121.824	0.0002658
9.78	125.5767	458.8755	333.2988	122.2385	0.0002379

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
10.00	124.2835	459.423	335.1395	121.5671	0.0002831
10.22	127.2714	460.7861	333.5147	122.1593	0.0002432
10.67	125.6488	459.5124	333.8635	122.0317	0.0002518
10.89	126.6008	459.1862	332.5854	122.5007	0.0002204
11.11	125.6368	460.1493	334.5124	121.795	0.0002677
11.33	124.0142	458.8755	334.8613	121.6681	0.0002763
11.56	125.6128	458.9649	333.3521	122.2189	0.0002392
11.78	125.6849	459.6018	333.9169	122.0122	0.0002531
12.22	123.3195	460.1493	336.8297	120.9571	0.0003246
12.44	127.6008	461.7861	334.1854	121.9142	0.0002597
12.67	125.9541	462.0599	336.1057	121.2176	0.0003068
13.11	125.6248	461.5124	335.8876	121.2963	0.0003015
13.33	123.2714	461.3336	338.0622	120.5161	0.0003548
13.56	124.9782	461.5179	336.5398	121.0613	0.0003175
14.00	122.9902	462.4286	339.4384	120.0275	0.0003886
14.44	125.6248	465.2442	339.6194	119.9635	0.0003931
14.67	125.9662	465.2442	339.2781	120.0842	0.0003847
14.89	124.6368	464.6967	340.0599	119.8081	0.0004039
15.33	126.2835	466.1548	339.8714	119.8746	0.0003992
15.56	125.6008	464.6073	339.0066	120.1804	0.0003780
16.22	123.132	462.423	339.291	120.0796	0.0003850
16.44	125.9541	464.8811	338.9269	120.2086	0.0003761
16.67	123.3195	464.0599	340.7404	119.5689	0.0004206
16.89	125.1954	465.9244	340.729	119.5728	0.0004203
17.11	123.9902	465.7917	341.8015	119.1976	0.0004466
17.33	125.2594	467.3392	342.0797	119.1007	0.0004534
17.56	125.2594	466.7023	341.4429	119.3228	0.0004378

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
18.00	124.3075	465.0654	340.7579	119.5627	0.0004210
18.22	124.3075	466.7023	342.3948	118.9911	0.0004612
18.89	123.6488	466.5179	342.8691	118.8265	0.0004728
19.11	126.6128	468.4286	341.8158	119.1927	0.0004470
19.33	125.2955	469.7023	344.4068	118.296	0.0005106
19.56	123.6488	469.7023	346.0535	117.7331	0.0005510
19.78	124.6368	469.0654	344.4286	118.2885	0.0005111
20.00	122.3315	467.7917	345.4602	117.9353	0.0005364
20.44	124.3075	470.976	346.6685	117.5242	0.0005661
20.67	125.6128	470.4286	344.8158	118.1557	0.0005206
20.89	125.0662	470.1235	345.0573	118.0729	0.0005265

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนน้ำมันดิบที่อุณหภูมิ 130°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
5.00	129.7011	436.1247	306.4237	132.9595	0.00000059
5.33	129.2019	435.946	306.7441	132.8206	0.00000846
5.67	129.1905	436.0354	306.8448	132.777	0.00001093
6.00	129.5552	436.5828	307.0276	132.698	0.00001542
6.33	130.1658	437.9907	307.8249	132.3543	0.00003499
6.67	129.431	437.3538	307.9228	132.3122	0.00003739
7.00	127.455	438.4599	311.0049	131.001	0.00011304
7.33	129.431	440.1299	310.699	131.1299	0.00010553
7.67	131.7362	440.5437	308.8074	131.9331	0.00005910
8.00	131.0776	442.7727	311.6951	130.7108	0.00012998
8.33	130.1728	444.0465	313.8737	129.8036	0.00018345
8.67	131.1728	445.9571	314.7843	129.4281	0.00020580
9.00	131.1416	446.2755	315.1339	129.2845	0.00021438
9.33	130.9422	444.8683	313.9261	129.7819	0.00018474
9.67	129.9182	445.594	315.6757	129.0626	0.00022768
10.00	130.3558	444.2308	313.8751	129.803	0.00018349
10.33	130.7125	443.3649	312.6524	130.3107	0.00015348
10.67	128.4072	445.1507	316.7435	128.6275	0.00025389
11.00	129.5142	445.5586	316.0444	128.9121	0.00023673
11.33	134.1247	446.6535	312.5288	130.3622	0.00015044
11.67	132.4781	445.5641	313.086	130.1302	0.00016412
12.00	133.1368	445.3705	312.2337	130.4854	0.00014320
12.33	132.7242	446.889	314.1648	129.6833	0.00019060
12.67	127.7843	443.7783	315.994	128.9326	0.00023550
13.00	130.0896	446.3351	316.2455	128.8301	0.00024167
13.33	131.7362	446.3798	314.6435	129.486	0.00020235

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
13.67	130.7483	447.3351	316.5868	128.6912	0.00025005
14.00	130.9902	446.6982	315.708	129.0494	0.00022848
14.33	129.2474	445.201	315.9536	128.9491	0.00023450
14.67	128.8555	447.6535	318.798	127.7986	0.00030432
15.00	129.5767	452.052	322.4753	126.3413	0.00039458
15.33	132.1488	453.7783	321.6295	126.6735	0.00037382
15.67	133.1368	451.2308	318.0941	128.0814	0.00028704
16.00	128.2209	451.8677	323.6468	125.8839	0.00042333
16.33	128.7723	452.13	323.3577	125.9965	0.00041624
16.67	131.7242	454.0967	322.3725	126.3815	0.00039205
17.00	129.7603	455.052	325.2918	125.2474	0.00046371
17.33	129.1377	453.7783	324.6406	125.4986	0.00044772
17.67	131.7362	453.7783	322.0421	126.5112	0.00038394
18.00	127.8139	453.1414	325.3275	125.2336	0.00046458
18.33	128.2594	452.594	324.3345	125.617	0.00044021
18.67	131.3195	456.1023	324.7828	125.4436	0.00045121
19.00	133.4661	456.8286	323.3625	125.9946	0.00041635
19.33	131.8195	456.0073	324.1879	125.6738	0.00043661
19.67	133.7954	459.5101	325.7147	125.0847	0.00047409
20.00	133.4901	460.2364	326.7463	124.6898	0.00049941
20.33	130.1368	457.6889	327.5521	124.3831	0.00051919
20.67	131.9782	461.5995	329.6213	123.6022	0.00056998
21.00	130.6488	460.4152	329.7663	123.5479	0.00057353
21.33	126.0778	455.4599	329.382	123.692	0.00056410
21.67	128.3831	460.2308	331.8477	122.773	0.00062462
22.00	125.6248	458.3258	332.701	122.4581	0.00064556
22.33	130.0896	460.5548	330.4652	123.2866	0.00059069

ตารางที่ ข-6 ค่าความต้านทานตะกรันจากการทดลองที่ 3 อุณหภูมิ เทียบกับเวลา

Time (Day)	ค่าความต้านทานตะกรัน: $R_f (m^{2o} C/W)$		
	ทดลองที่ 120°C	ทดลองที่ 125°C	ทดลองที่ 130°C
	$R_f(t) = 0.0000189t$	$R_f(t) = 0.0000251t$	$R_f(t) = 0.0000350t$
1	0.0005	0.0007	0.0008
2	0.0009	0.0014	0.0017
3	0.0014	0.0021	0.0027
4	0.0019	0.0029	0.0036
5	0.0024	0.0036	0.0046
6	0.0029	0.0043	0.0056
7	0.0033	0.0050	0.0065
8	0.0038	0.0057	0.0075
9	0.0043	0.0065	0.0084
10	0.0048	0.0072	0.0094
11	0.0053	0.0079	0.0104
12	0.0057	0.0086	0.0113
13	0.0062	0.0093	0.0123
14	0.0067	0.0101	0.0132
15	0.0072	0.0108	0.0142
16	0.0077	0.0115	0.0152
17	0.0081	0.0122	0.0161
18	0.0086	0.0129	0.0171
19	0.0091	0.0137	0.0180
20	0.0096	0.0144	0.0190
21	0.0101	0.0151	0.0200

ภาคผนวก ค

ผลการจำลองกระบวนการด้วยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS)

ตารางที่ ค-1 ผลการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมไฮซิสที่อุณหภูมิ 120 °C

ค่าความดันทางตะกรัน $P_f (m^2 \cdot C/W)$	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อเกิดตะกรัน Uf ($W/m^2 \cdot C$)	การเปลี่ยนแปลงของค่า Uf (%)	อุณหภูมิพื้นผิวที่ออกกลาง E4 (°C)	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (%)	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย (kW)	ค่าไฟฟ้า (BTU/(kW.hr)) 2.70	ค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย (บาท/เดือน)
0.00000	153.83	0.0%	125.00	0.00%	0	0	0
0.00050	142.84	7.1%	124.66	0.26%	170	459	330,480
0.00100	133.32	13.3%	124.40	0.47%	315	851	612,360
0.00150	124.99	18.7%	124.13	0.69%	445	1,202	865,080
0.00200	117.64	23.5%	123.90	0.87%	560	1,512	1,088,640
0.00250	111.10	27.8%	123.70	1.03%	665	1,796	1,292,760
0.00300	105.26	31.6%	123.50	1.19%	755	2,039	1,467,720
0.00350	99.99	35.0%	123.30	1.35%	840	2,268	1,632,960
0.00400	95.23	38.1%	123.22	1.42%	915	2,471	1,778,760
0.00450	90.90	40.9%	123.00	1.59%	980	2,646	1,905,120
0.00500	86.95	43.5%	122.90	1.67%	1,045	2,822	2,031,480
0.00550	83.33	45.8%	122.84	1.72%	1,105	2,984	2,148,120
0.00600	80.00	48.0%	122.74	1.80%	1,155	3,119	2,245,320
0.00650	76.92	50.0%	122.64	1.88%	1,205	3,254	2,342,520
0.00700	74.07	51.8%	122.54	1.96%	1,250	3,375	2,430,000
0.00750	71.43	53.6%	122.40	2.07%	1,295	3,497	2,517,480
0.00800	68.96	55.2%	122.30	2.15%	1,335	3,605	2,595,240
0.00850	66.66	56.7%	122.20	2.21%	1,370	3,699	2,663,280
0.00900	64.51	58.1%	122.23	2.23%	1,405	3,794	2,731,320
0.00950	62.50	59.4%	122.10	2.31%	1,440	3,888	2,799,360
0.01000	60.60	60.6%	122.00	2.36%	1,470	3,969	2,857,680
0.01050	58.82	61.8%	122.04	2.39%	1,500	4,050	2,916,000
0.01100	57.14	62.9%	121.90	2.47%	1,525	4,118	2,964,600
0.01150	55.55	63.9%	121.90	2.47%	1,550	4,185	3,013,200
0.01200	54.05	64.9%	121.80	2.54%	1,575	4,253	3,061,800

ตารางที่ ค-2 ผลการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรม ไฮซิสที่อุณหภูมิ 125 °C

ค่าความต้านทานตะกรัน	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อเกิดตะกรัน UR	การเปลี่ยนแปลงของค่า UR	อุณหภูมิน้ำมันดิบที่ออกจากE4	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย	ค่าไฟฟ้า (BTH/kW.hr)	ค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย
$R_f(m^2 C/W)$	$(W/m^2 C)$	(%)	(°C)	(%)	(kW)	2.70	(บาท/เดือน)
0.00000	153.83	0.0%	129.90	0.00%	0	0	0
0.00050	142.84	7.1%	129.50	0.25%	165	446	320,760
0.00100	133.32	13.3%	129.30	0.48%	310	837	602,640
0.00150	124.99	18.7%	129.00	0.67%	445	1,202	865,080
0.00200	117.64	23.5%	128.80	0.85%	560	1,512	1,088,640
0.00250	111.10	27.8%	128.60	1.00%	665	1,796	1,292,760
0.00300	105.26	31.6%	128.40	1.14%	760	2,052	1,477,440
0.00350	99.99	35.0%	128.20	1.27%	840	2,268	1,632,960
0.00400	95.23	38.1%	128.10	1.38%	920	2,484	1,788,480
0.00450	90.90	40.9%	127.90	1.49%	990	2,673	1,924,560
0.00500	86.95	43.5%	127.80	1.58%	1,055	2,849	2,050,920
0.00550	83.33	45.8%	127.70	1.67%	1,110	2,997	2,157,840
0.00600	80.00	48.0%	127.60	1.75%	1,165	3,146	2,264,760
0.00650	76.92	50.0%	127.50	1.82%	1,215	3,281	2,361,960
0.00700	74.07	51.8%	127.40	1.89%	1,265	3,416	2,459,160
0.00750	71.43	53.6%	127.30	1.96%	1,305	3,524	2,536,920
0.00800	68.96	55.2%	127.20	2.02%	1,345	3,632	2,614,680
0.00850	66.66	56.7%	127.20	2.08%	1,385	3,740	2,692,440
0.00900	64.51	58.1%	127.10	2.13%	1,420	3,834	2,760,480
0.00950	62.50	59.4%	127.00	2.18%	1,455	3,929	2,828,520
0.01000	60.60	60.6%	127.00	2.21%	1,485	4,010	2,886,840
0.01050	58.82	61.8%	126.90	2.29%	1,515	4,091	2,945,160
0.01100	57.14	62.9%	126.90	2.29%	1,540	4,158	2,993,760
0.01150	55.55	63.9%	126.80	2.36%	1,565	4,226	3,042,360
0.01200	54.05	64.9%	126.80	2.39%	1,590	4,293	3,090,960

ตารางที่ ค-3 ผลการจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมไฮซิสที่อุณหภูมิ 130 °C

ค่าความต้านทานตะกรัน	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อเกิดตะกรัน U_f	การเปลี่ยนแปลงของค่า U_f	อุณหภูมิน้ำมันดิบที่ออกจาก E4	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ	กำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย	ค่าไฟฟ้า (BTH/kW.br)	ค่าไฟฟ้าที่สูญเสีย
$R_f (m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W})$	$(W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$	(%)	($^\circ\text{C}$)	(%)	(kW)	2.70	(บาท/เดือน)
0.00000	153.83	0.0%	134.75	0.00%	0	0	0
0.00050	142.84	7.1%	134.40	0.26%	155	419	301,320
0.00100	133.32	13.3%	134.10	0.48%	310	837	602,640
0.00150	124.99	18.7%	133.90	0.63%	450	1,215	874,800
0.00200	117.64	23.5%	133.70	0.78%	570	1,539	1,108,080
0.00250	111.10	27.8%	133.50	0.93%	670	1,809	1,302,480
0.00300	105.26	31.6%	133.30	1.08%	770	2,079	1,496,880
0.00350	99.99	35.0%	133.10	1.22%	850	2,295	1,652,400
0.00400	95.23	38.1%	133.00	1.30%	930	2,511	1,807,920
0.00450	90.90	40.9%	132.90	1.37%	1,000	2,700	1,944,000
0.00500	86.95	43.5%	132.70	1.52%	1,060	2,862	2,060,640
0.00550	83.33	45.8%	132.60	1.60%	1,120	3,024	2,177,280
0.00600	80.00	48.0%	132.50	1.67%	1,180	3,186	2,293,920
0.00650	76.92	50.0%	132.40	1.74%	1,230	3,321	2,391,120
0.00700	74.07	51.8%	132.40	1.74%	1,280	3,456	2,488,320
0.00750	71.43	53.6%	132.30	1.82%	1,320	3,564	2,566,080
0.00800	68.96	55.2%	132.20	1.89%	1,360	3,672	2,643,840
0.00850	66.66	56.7%	132.10	1.97%	1,400	3,780	2,721,600
0.00900	64.51	58.1%	132.10	1.97%	1,440	3,888	2,799,360
0.00950	62.50	59.4%	132.00	2.04%	1,465	3,956	2,847,960
0.01000	60.60	60.6%	131.90	2.12%	1,500	4,050	2,916,000
0.01050	58.82	61.8%	131.90	2.12%	1,530	4,131	2,974,320
0.01100	57.14	62.9%	131.80	2.19%	1,555	4,199	3,022,920
0.01150	55.55	63.9%	131.80	2.19%	1,585	4,280	3,081,240
0.01200	54.05	64.9%	131.73	2.24%	1,610	4,347	3,129,840

ภาคผนวก ง

การคำนวณการสูญเสียเมื่อเกิดตะกรัน

เนื่องจากเกิดตะกรันขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ซึ่งทำให้ต้องเสียพลังงานในการให้ความร้อนกับน้ำมันดิบเพื่อให้ได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ คืออุณหภูมิเท่ากับขณะที่ไม่เกิดตะกรัน จะต้องเพิ่มความร้อนที่เครื่องฮีตเตอร์เพิ่มขึ้นไปจากเดิม จากการศึกษาทดลองนี้ใช้โปรแกรมไฮซิสจำลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนและจัดบันทึกค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียนำมาคำนวณ ดังต่อไปนี้

$$\text{พลังงานความร้อน (กิโลวัตต์)} \times \frac{2.7 \text{ (บาท)}}{\text{กิโลวัตต์ ชั่วโมง}} \times 720 \frac{\text{(ชั่วโมง)}}{\text{เดือน}} = \text{ค่าใช้จ่ายที่สูญเสีย (บาท) / เดือน}$$

อัตราค่าไฟฟ้าของโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต้องคิดเป็นช่วงเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราค่าไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของกิจการขนาดใหญ่ หน่วยละ 2.70 บาท โดยหน่วย(unit) เท่ากับ กิโลวัตต์ ชั่วโมง หมายถึงพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ไป 1000 วัตต์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกำหนดให้ 1 เดือน เท่ากับ 720 ชั่วโมง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นางสาวชนภรณ์ หอมสุวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	23 สิงหาคม พ.ศ. 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดสุพรรณบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	244/1 หมู่ 1 ต.วังน้ำเย็น อ.บางปลาม้า จ.สุพรรณบุรี 72150
โทรศัพท์	081-0098356
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2538	มัธยมศึกษา โรงเรียนสตรีวิทยา กรุงเทพมหานคร เกรดเฉลี่ย 2.91 สำเร็จการศึกษาปี 2544
พ.ศ.2544	ศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เกรดเฉลี่ย 2.65 สำเร็จการศึกษาปี 2548
พ.ศ.2551	ศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เกรดเฉลี่ย 3.50 สำเร็จการศึกษาปี 2553

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย