

การก่อตัวของตะกอนและผลกระทบของตะกอนในกระบวนการระเหยของเหลวดำ

นายศรัณ จันทรพิวง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FOULING FORMATION AND THE IMPACT OF FOULING IN BLACK LIQUOR
EVAPORATION PROCESS

Mr.Saran Chanpuang

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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การก่อตัวของตะกอนและผลกระทบของ
ตะกอนในกระบวนการระเหยของเหลวดำ

โดย

นายศรัณ จันท์พวง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัจนวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กษิธิศ หนูทอง)

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

ศรัณ จันทรพิวง: การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการระเหยของเหลวดำ (FOULING FORMATION AND THE IMPACT OF FOULING IN BLACK LIQUOR EVAPORATION PROCESS), อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 81 หน้า

ในกระบวนการระเหยน้ำของเหลวดำ ในกระบวนการนำกลับมาเป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มไอน้ำ หลังจากมีการใช้งานระยะหนึ่ง เครื่องระเหยจะถ่ายเทความร้อนได้น้อยลง ทำให้มีประสิทธิภาพน้อยลง อันเนื่องมาจากการก่อตัวของตะกรันที่ผิวของท่อ ประสิทธิภาพที่น้อยลงทำให้ต้องสูญเสียพลังงานมากขึ้นเรื่อยๆ และทำให้ต้องหยุดกระบวนการผลิตเพื่อทำการบำรุงรักษาเครื่องระเหย การวางแผนในการบำรุงรักษาที่ดีย่อมทำให้การระเหยมีประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน ที่อุณหภูมิ 80 90 100 110 และ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการใช้งานในเครื่องระเหย จากการทดลองค่าความต้านทานของตะกรันมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามความสัมพันธ์เป็นดังสมการ

$$R_f = 0.00131(1 - e^{-0.10339t}) - 0.00037 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 80^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 2.5 \text{ ชั่วโมง}$$

$$R_f = 0.00138(1 - e^{-0.09388t}) - 0.00023 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 90^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 2.2 \text{ ชั่วโมง}$$

$$R_f = 0.00174(1 - e^{-0.08309t}) - 0.00017 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 100^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 1.6 \text{ ชั่วโมง}$$

$$R_f = 0.00210(1 - e^{-0.07726t}) - 0.00011 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 110^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 1.3 \text{ ชั่วโมง}$$

$$R_f = 0.00258(1 - e^{-0.06610t}) - 0.00010 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 120^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 0.9 \text{ ชั่วโมง}$$

โดยที่ R_f คือค่าความต้านทานตะกรันรวม และ t คือเวลาในการทดลอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการการก่อตัวของตะกรันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง และทำให้เครื่องระเหยมีประสิทธิภาพน้อยลงตามไปด้วย

คำสำคัญ : ตะกรัน ของเหลวดำ

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

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2554.....

##5171478521: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: BLACK LIQUOR/FOULING/FORMATION/

SARAN CHANPUANG: FOULING FORMATION AND THE IMPACT OF
 FOULING IN BLACK LIQUOR EVAPORATION PROCESS. ADVISOR:
 ASST.PROF.SOORATHEP KHEAWHOM, 81 pp.

The evaporation of the black liquid of the fuel boiler recycling evaporator, after a certain period the evaporator heat transfer will be less leads the less efficient. This is according to the formation of fouling on the surface of the pipe. To be less effective leads increasing energy loss and the need to stop production for essential maintenance. Good maintenance plan will make the most efficient evaporation. This research was conducted to test the formation of slag at temperatures of 80, 90, 100, 110 and 120 degrees Celsius, which is in the range of applications in the evaporator. From the trial values the resistances of the fouling have a replica mathematical that shows the relationship is as follows.

$$R_f = 0.00131(1 - e^{-0.10339t}) - 0.00037 \text{ at } 80^\circ\text{C where } t \geq 2.5 \text{ hour}$$

$$R_f = 0.00138(1 - e^{-0.09388t}) - 0.00023 \text{ at } 90^\circ\text{C where } t \geq 2.2 \text{ hour}$$

$$R_f = 0.00174(1 - e^{-0.08309t}) - 0.00017 \text{ at } 100^\circ\text{C where } t \geq 1.6 \text{ hour}$$

$$R_f = 0.00210(1 - e^{-0.07726t}) - 0.00011 \text{ at } 110^\circ\text{C where } t \geq 1.3 \text{ hour}$$

$$R_f = 0.00258(1 - e^{-0.06610t}) - 0.00010 \text{ at } 120^\circ\text{C where } t \geq 0.9 \text{ hour .}$$

When R_f overall thermal resistance coefficient, and t is the experimental time. The result demonstrated that the scale deposition would increase with increasing temperature of the system. Consequently, the efficiency of heat transfer would be reduced and the evaporation of the black liquor in the evaporator would be reduced as well.

Key word: fouling of black liquid

Department: Chemical Engineering ... Student's Signature.....
 Field of Study: Chemical Engineering ... Advisor's Signature.....
 Academic Year: ...2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณ ศศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง ศศ.ดร. มนตรี วงศ์ศรี ประธานในการสอบ ศศ.ดร.กษิธิษ หนูทอง กรรมการในการสอบ และ อ.ดร.วิรัช ฤทธิสุข กรรมการภายนอกมหาลัย ซึ่งได้ชี้แนะแนวทาง และคำแนะนำอื่นๆ ที่สำคัญจนสำเร็จลุล่วง

นอกจากนี้รายงานฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนและกำลังใจจากเพื่อนหลายท่าน จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถเสร็จลุล่วงได้เลย ถ้าขาดพระคุณจากบิดา มารดาของผู้จัดทำเอง ซึ่งผู้เป็นทั้งผู้ให้กำเนิด ผู้ให้การสนับสนุนทุกๆด้าน และกำลังใจจนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อย่างสมบูรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	4
2.1.1 ขั้นตอนการจัดเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation).....	4
2.1.2 ขั้นตอนการผลิตเยื่อ (Pulping).....	5

2.2 เครื่องระเหย (Evaporator).....	9
2.2.1 ประเภทของหม้อระเหย.....	10
2.2.2 การดำเนินการของเครื่องระเหย.....	12
2.3. การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer).....	15
2.3.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer).....	15
2.3.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer).....	17
2.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat-transfer coefficient).....	18
2.4 ตะกรัน (Fouling).....	21
2.4.1 ประเภทของตะกรัน.....	22
2.4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตะกรัน.....	22
2.4.2.1 A simple general model.....	23
2.4.2.2 Asymptotic fouling.....	23
2.4.2.3 Falling rate fouling.....	24
2.5 กระบวนการระเหยน้ำของน้ำยาดำ.....	26
บทที่ 3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับของเหลวดำ.....	30
3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเครื่องพยากรณ์การเกิดตะกรัน.....	35

บทที่ 4 การออกแบบและการทดลอง.....	36
4.1 การออกแบบ.....	36
4.2 อุปกรณ์ในการทดลอง.....	37
4.3 ระบบไฟฟ้าและระบบควบคุมการทดลอง.....	39
4.3.1 การควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์.....	42
4.3.2 การควบคุมการหมุนของใบกวน.....	43
4.3.3 การควบคุมการวัดอุณหภูมิ.....	44
4.3.4 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น.....	45
4.3.5 การควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ	46
บทที่ 5 การสร้างแบบจำลองกระบวนการระเหยของของเหลวค่าโดยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS)..	50
5.1 หลักการสร้างแบบจำลองกระบวนการระเหย.....	50
5.2 สมมุติฐานการจำลองกระบวนการระเหย.....	50
5.3 วิธีการสร้างแบบจำลองกระบวนการระเหย.....	50
บทที่ 6 ผลการทดลอง.....	55
6.1 ผลการทดลองจากเครื่องทดสอบตะกั่วของของเหลวค่า.....	55
6.2 ผลการจำลองอุณหภูมิของตะกั่วในสายออกจากเครื่องระเหยหลังจากเกิดตะกั่ว โดยโปรแกรมไฮซิส.....	71
6.3 ผลการจำลองค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่มากขึ้นเมื่อเกิดตะกั่ว.....	75

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	79
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
7.2 กลไกการเกิดตะกรัน.....	80
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำ.....	83
ภาคผนวก ข คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป.....	92
ข.1 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 80°C.....	92
ข.2 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 90°C.....	93
ข.3 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 100°C.....	95
ข.4 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 110°C.....	96
ข.5 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 120°C.....	98

ภาคผนวก ค คำสั่งควบคุมการหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองและการสร้างกราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง.....	100
ภาคผนวก ง ตารางการหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลอง.....	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	116

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของหม้อระเหย.....	10
6.1 ผลการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่ 80 องศาเซลเซียส.....	56
6.2 ผลการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่ 90 องศาเซลเซียส.....	58
6.3 ผลการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่ 100 องศาเซลเซียส.....	60
6.4 ผลการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่ 110 องศาเซลเซียส.....	62
6.5 ผลการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่ 120 องศาเซลเซียส.....	64
6.6 คุณสมบัติของเหลวดำในการป้อนเข้าสู่กระบวนการระเหย.....	71
6.7 แสดงค่าที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส.....	72
6.8 แสดงค่าที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส.....	73
6.9 แสดงค่าที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส.....	74
6.10 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรันที่ 80 องศาเซลเซียส.....	76
6.11 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรันที่ 100 องศาเซลเซียส.....	77
6.12 แสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรันที่ 120 องศาเซลเซียส.....	78
ก.1 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่อุณหภูมิ 80°C.....	83
ก.2 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่อุณหภูมิ 90°C.....	84
ก.3 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวดำที่อุณหภูมิ 100°C.....	86

ตารางที่	หน้า
ก.4 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวค้ำที่อุณหภูมิ 110°C.....	88
ก.5 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อตัวของตะกรันของเหลวค้ำที่อุณหภูมิ 120°C.....	90
ง.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 80°C.....	104
ง.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 90°C.....	106
ง.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 100°C.....	108
ง.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 110°C.....	110
ง.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 120°C.....	112

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	2
2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟต.....	9
2.2 หม้อระเหยรูปแบบต่างๆ.....	12
2.3 เครื่องระเหยผลเชิงเดี่ยว.....	13
2.4 Forward - feed multiple effect evaporators.....	14
2.5 Backward - feed multiple effect evaporators.....	14
2.6 การนำความร้อนผ่านผนังหนา Δx	16
2.7 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน.....	17
2.8 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (ก) $T_{\infty} < T_w$ (ข) $T_w < T_{\infty}$	17
2.9 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น.....	18
2.10 ลักษณะการเกิดตะกรันที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก.....	19
2.11 กราฟแสดงอัตราการเพิ่มความหนาของตะกรันต่อเวลา.....	23
2.12 แผนภาพส่วนประกอบภายในเครื่องระเหย.....	26
2.13 แผนภาพลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	27
2.14 แผนภาพหน่วยระเหย.....	27
2.15 Recovery boiler.....	28
2.16 ส่วนประกอบของของเหลวค้ำหลังจากระเหยน้ำ.....	28

รูปที่	หน้า
3.1(a) Schematic of experimental rig.....	31
3.1(b) ผลกระทบของพื้นผิวถ่ายเทความร้อนต่อค่าความต้านทานความร้อน.....	32
3.1(c) ผลกระทบของอุณหภูมิของเหลวต่อค่าความต้านทานความร้อน	32
3.2 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง	33
3.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนกับเวลา (a) เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (b) เมื่อเปลี่ยนแปลงความแตกต่างอุณหภูมิของเหลวกับพื้นผิวถ่ายเทความร้อน (c) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวความร้อน	34
4.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องทดสอบ.....	38
4.2 แบบสำหรับการสั่งซื้อเครื่องทดสอบ.....	38
4.3 ภาพเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน.....	39
4.4 ผังวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบการก่อตะกรัน.....	40
4.5 ผังวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้สัญญาณไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์.....	41
4.6 ผังวงจรการรับส่งสัญญาณจากกล่องรับส่งข้อมูล DAQ กับเทอร์โมคัปเปิล.....	42
4.7 เทอร์โมเวล และฮีทเตอร์.....	43
4.8 เครื่องปรับโวลท์ (Voltage Variable Transformer).....	43
4.9 RTD.....	44
4.10 ตัวแปลงสัญญาณจากกระแส 4-20 มิลลิแอมป์ เป็น 0-5 โวลท์.....	40
4.11 กล่องรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ).....	45
4.12 เครื่องทำน้ำเย็น (Chilled Water Machine).....	45

รูปที่	หน้า
5.1 การใส่เชื้อสารในระบบการจำลองกระบวนการระเหย.....	51
5.2 การใส่ Fluid package ในระบบการจำลองกระบวนการระเหย.....	51
5.3 การใส่อุปกรณ์และระบบท่อในการจำลองกระบวนการระเหย.....	52
5.4 การใส่ค่าของอุณหภูมิสายป้อน.....	52
5.5 การใส่ค่าอัตราส่วน น้ำ ต่อ โซดาไฟ.....	53
5.6 การใส่ค่าอุณหภูมิของของเหลวค้ำ.....	53
6.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันกับเวลา ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C 90°C 100°C 110°C และ120°C.....	66
6.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 80°C.....	68
6.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 90°C.....	69
6.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 100°C.....	69
6.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 110°C.....	70
6.6 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 120°C.....	70

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Q_{cond}	อัตราการนำความร้อน, W
k	ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง, $\text{W/m}^0\text{C}$
$\frac{\partial T}{\partial X}$	อนุพันธ์ย่อยของอุณหภูมิต่อทิศทางการนำความร้อน, $^0\text{C/m}$
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $\text{W/m}^2^0\text{C}$
A	พื้นที่ผิวของการพาความร้อน, m^2
T_w	อุณหภูมิของพื้นผิว, ^0C
T_∞	อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว, ^0C
i	สถานะที่เกิดตะกันด้านใน
o	สถานะที่เกิดตะกันด้านนอก
R_f	ค่าความต้านทานตะกันรวม, $\text{m}^2\text{K/W}$
$R_{f,i}$	ค่าความต้านทานตะกันที่ผิวด้านใน, $\text{m}^2\text{K/W}$
$R_{f,o}$	ค่าความต้านทานตะกันที่ผิวด้านนอก, $\text{m}^2\text{K/W}$
R_{ft}	ค่าความต้านทานความร้อนที่เวลา t , $\text{m}^2\text{K/W}$
$R_{f\infty}$	ค่าความต้านทานความร้อนที่เวลาเข้าใกล้อนันต์, $\text{m}^2\text{K/W}$
R_C	ค่าต้านทานทางความร้อนในสถานะยังไม่เกิดตะกัน, $\text{m}^2\text{K/W}$
C,i	สถานะที่ไม่มีตะกันด้านใน
C,o	สถานะที่ไม่มีตะกันด้านนอก
U_f	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ผิวที่มีตะกัน, $\text{W/m}^2\text{K}$

U_c	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสถานะที่ผิวท่อยังไม่มีตะกรัน, W/m^2K
m	มวลของตะกรันต่อพื้นที่, m^2
β	ค่าคงที่ของระบบสำหรับแบบจำลองตะกรัน
Φ_D	อัตราการก่อตัวของตะกรัน
Φ_R	อัตราการหลุดตัวของตะกรัน
$\alpha(t)$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, kW/m^2K
r^2	ค่าสัมประสิทธิ์การหาแบบจำลอง(coefficient of determination, r-squared value).
J	ผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลองกำลังสอง (sum of the squares of the residuals)
S	ผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับค่าเฉลี่ยผลการทดลองกำลังสอง (sum of the squares of the deviation)
y_i	ค่าจากผลการทดลอง
$F(x_i)$	ค่าจากแบบจำลอง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ได้นำกระดาษไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้มีการพัฒนาวิธีการผลิต เพื่อให้สามารถที่จะลดต้นทุน และเพิ่มผลผลิต ให้มากขึ้น วิธีการหนึ่งซึ่งเป็นวิธีการที่พบอย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตกระดาษคือ กระบวนการผลิตกระดาษแบบซัลเฟต (Kraft process) แต่เนื่องจากเป็นกระบวนการเคมีทำให้ต้องใช้สารเคมีปริมาณมากเพื่อนำไปใช้ผลิต เพื่อให้สามารถลดต้นทุนในบางกระบวนการจึงต้องทำการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ เช่นกระบวนการแยกเอาน้ำออกจากของเหลวดำ (Black liquor) ที่เกิดจากกระบวนการต้มเยื่อกระดาษ เนื่องจากในของเหลวดำนั้นเต็มไปด้วยส่วนประกอบของ สารอินทรีย์ เช่น ลิกนิน ยางไม้ และสารอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในการแยกน้ำออกจากของเหลวดำ ใช้วิธีการผ่านเครื่องระเหยน้ำ (Evaporator) เครื่องระเหยที่ใช้เป็นเครื่องระเหยชนิดของเหลวไหลลงหรือฟิล์มกำลังตก (Falling-film-type evaporator) โดยเครื่องระเหยนี้จะมีหลายตัวต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งทำให้ของเหลวดำที่มีความเข้มข้นประมาณ 17% dry solid ซึ่งเรียกว่า ของเหลวดำเจือจาง (Weak black liquor; WBL) มีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็น 75% dry solid หรือที่เรียกว่า ของเหลวดำเข้มข้น (Heavy black liquor; HBL) ก่อนจะถูกส่งไปเผาที่หม้อไอน้ำเพื่อนำสารกลับมาใช้อีกครั้ง (Recovery boiler) ต่อไป

ในเครื่องระเหยหลังจากใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนย่อมลดลง ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพลดลงคือ การเกิดตะกรัน (Fouling) ผลจากการเกิดตะกรันทำให้ความต้านทานความร้อนมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตต่ำลง สูญเสียพลังงาน มากขึ้น และอาจทำให้สูญเสียโอกาสในการผลิต เนื่องจากการต้องหยุดการทำงานเพื่อทำความสะอาดเครื่องระเหย



รูปที่ 1.1 การเกิดตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการก่อตัวของตะกรันในกระบวนการระเหยของเหลวค่า โดยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันเพื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิที่ 80 90 100 110 และ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานตะกรันกับเวลา และนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมาประเมินผลกระทบในกระบวนการระเหยน้ำของของเหลวค่าโดยใช้โปรแกรมไฮซิส รวมไปถึงสามารถพยากรณ์การเพิ่มขึ้นของต้นทุนจากผลการเกิดตะกรันได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการเกิดตะกรันบนผิวของเครื่องระเหยได้
2. เพื่อศึกษาการก่อตัวของตะกรันในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของตะกรันในกระบวนการระเหยของเหลวค่า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทดลองการก่อตัวของตะกรัน โดยพิจารณาสภาวะที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งจำลองให้มีการไหลแบบปั่นป่วน ในช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียส ควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบโดยโปรแกรมแมทแลป หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าความต้านทานแล้วนำไปประเมินผลกระทบของตะกรัน และทำการตรวจวัดสมรรถนะของข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรมไฮซิส

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน และสร้างอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการทดสอบการเกิดตะกรัน
3. เขียนโปรแกรมเมทแลปเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ
4. ทำการทดลองการเกิดตะกรันของของเหลวดำ ในสภาวะต่างๆ และสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกรัน
5. ประเมินผลกระทบของตะกรัน ในกระบวนการระเหยในเครื่องระเหย
6. ตรวจสอบสมรรถนะของข้อมูลที่ได้โดยใช้โปรแกรมไฮซิส
7. สร้างแบบประเมินอัตราการสิ้นเปลืองของพลังงานที่มากขึ้น
8. สรุปผลและจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองสามารถทำนายอัตราการเกิดตะกรันของของเหลวดำภายในเครื่องระเหย
2. ทราบผลกระทบของตะกรันในกระบวนการระเหย
3. ทราบถึงแนวทางในการดำเนินการ และระยะเวลาในการวางแผนเพื่อทำความสะอาดเครื่องระเหย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

การผลิตเยื่อกระดาษประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 2 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นตอนการจัดเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation)
2. ขั้นตอนการผลิตเยื่อ (Pulping)

2.1.1 ขั้นตอนการจัดเตรียมวัตถุดิบ (Raw Material Preparation)

ขั้นตอนนี้จะทำการแปรรูปไม้ ให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตเยื่อ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

การปอกเปลือก (Debarking)

เนื่องจากเปลือกไม้เป็นส่วนที่ไม่มีประโยชน์ต่อการผลิตเยื่อกระดาษ และยังส่งผลเสียต่อการผลิตเยื่อกระดาษอีกด้วย เปลือกไม้เป็นส่วนที่มีเส้นใยน้อยและมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนอยู่มาก ถ้าหากปอกเปลือกออกไม่หมดและเหลือเข้าไปในกระบวนการผลิตอื่น เช่น การต้มเยื่อ จะเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีและไอน้ำมาก ขณะที่ได้ผลตอบแทนไม่คุ้มค่า รวมทั้งยังได้เยื่อกระดาษที่มีคุณภาพต่ำ

การสับชิ้นไม้ (Chipping)

ขนาดชิ้นไม้สับที่ได้มีความสำคัญต่อการผลิตเยื่อ ขนาดที่ได้ควรมีความสม่ำเสมอ โดยความยาวและความหนาที่มีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือความกว้าง โดยควรมีความยาวและความกว้างประมาณ 20-30 มม. ความหนาประมาณ 6-10 มม. จากนั้นชิ้นไม้สับจะถูกส่งโดยสายพานลำเลียงจากเครื่องสับไม้มากองไว้บนลานกลางแจ้ง โดยจะกองเป็นวงกลมหรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การคัดขนาด (Screening)

ชิ้นไม้ที่มีขนาดใหญ่เกินไปออก และนำกลับไปสับอีกครั้งเพื่อให้มีขนาดเล็กลง เส้นไม้ และฝุ่นจะถูกคัดแยกออกแล้วส่งไปรวมกับเปลือกไม้เพื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ (Boiler) สำหรับชิ้นไม้ที่ได้ขนาดแล้วจะถูกส่งไปที่หม้อต้มเชื้อต่อไป

2.1.2 ขั้นตอนการผลิตเยื่อ (Pulping)

การผลิตเยื่อสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีคือ

1. กระบวนการทางกล (Mechanical pulping process)
2. กระบวนการกึ่งเคมี (Semi-chemical pulping process)
3. กระบวนการเคมี (Chemical pulping process)

ในที่นี้จะกล่าวถึงกระบวนการเคมี ซึ่งเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์

กระบวนการเคมี (Chemical pulping process)

มีหลักการคือ นำเอาสารละลายมาต้มพร้อมกับเนื้อไม้ เพื่อทำลายสารในเนื้อไม้ที่ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวเส้นใยในเนื้อไม้ กระบวนการทางเคมีได้แก่

1. กระบวนการโซดา (Soda process)

เป็นกระบวนการที่ใช้โซดาไฟ (NaOH) เป็นน้ำยาต้มเยื่อ เยื่อที่ได้ส่วนใหญ่ใช้ทำกระดาษพิมพ์เขียวนอกจากนั้นยังใช้ผลิตกระดาษชนิดพิเศษ เช่น กระดาษสา

2. กระบวนการซัลเฟตหรือคราฟท์ (Sulphate or Kraft process)

การผลิตเยื่อกระดาษโดยกระบวนการนี้ ชิ้นไม้จะถูกต้มด้วยน้ำยาต้มเยื่อที่เรียกว่า น้ำยาขาว (White liquor) ซึ่งประกอบด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ โซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) เยื่อที่ได้จากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่ใช้ทำกระดาษเพื่อบรรจุเป็นหีบห่อ กระดาษเหนียว (Kraft paper) กระดาษผิวกล่อง (Kraft linerboard) นอกจากนี้เยื่อที่นำไปฟอกขาวแล้ว ใช้ทำกระดาษได้หลายชนิด ตั้งแต่กระดาษพิมพ์เขียวจนถึงกระดาษอนามัย

ขั้นตอนการผลิตมีทั้งแบบกะ (Batch) และแบบ (Continuous) โดยข้อดีของแบบกะคือลงทุนต่ำกว่า ส่วนแบบต่อเนื่องนั้นมีข้อดีคือ ควบคุมง่ายกว่า ได้ผลผลิตสูงกว่า และใช้สารเคมีน้อยกว่า ทำให้มีการใช้แรงงานน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่สูงกว่า

จุดประสงค์ของการต้ม เพื่อละลายลิกนินออกมาจากเส้นใยแต่ถ้าลิกนินละลายออกมามาก เปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) ที่ได้จะต่ำ เพราะไม่ได้มีแต่ลิกนินเท่านั้นที่ถูกแยกออกมา ถ้าต้มเยือนานเกินไป เปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) จะลดลงอย่างรวดเร็ว ความแข็งแรงเยื่อก็จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงมีการตรวจสอบระดับของการต้มเยื่อ โดยการตรวจวัดปริมาณสารเคมีที่ทำปฏิกิริยากับลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ ซึ่งเรียกว่าค่า Kappa number

3. การคัดขนาด (Screening)

หลังผ่านขั้นตอนการผลิตเยื่อแล้ว เยื่อที่ได้จะถูกนำมาผ่านขั้นตอนการคัดแยกเพื่อแยกเอาสิ่งแปลกปลอมออกจากเยื่อ ซึ่งแปลกปลอมเหล่านี้ได้แก่ ตาไม้ (Knot) ชิ้นไม้สับที่ผ่านการต้มไม่สมบูรณ์, เส้นใยที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการคัดขนาด ได้แก่ เครื่องแยกตาไม้ (Disc knoter), ตะแกรงหยาบ (Vibrating Knotter Screen) เครื่องร่อนแยกเยื่อ (Delta Screen) Pressure Screen และเซนตริคลินเนอร์ (Centric leaner)

4. การล้างเยื่อ (Washing)

เมื่อผ่านการคัดขนาดแล้วจะต้องนำเยื่อที่ได้ไปผ่านขั้นตอนการล้างซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายในขั้นตอนนี้ของเหลวจากการต้มเยื่อจะถูกล้างแยกออกจากเยื่อ ของเหลวนั้นประกอบด้วย สารเคมีลิกนินและส่วนประกอบอื่นของเส้นใย ของเหลวที่ได้นี้เรียกว่า ของเหลวดำ (Black Liquor) ซึ่งจุดประสงค์ในการล้างเยื่อ คือ ล้างของเหลวดำออกจากเยื่อ ลดการใช้สารเคมีในขั้นตอนถัดไปและนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ในขั้นตอนการต้มเยื่ออีกครั้ง

5. การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O_2 delignification)

ในการผลิตเยื่อเคมีซึ่งใช้ยูคาลิปตัสหรือไม้ไผ่เป็นวัตถุดิบ เมื่อเยื่อผ่านขั้นตอนการล้างแล้วจะนำเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O_2 - delignification) ซึ่งจะเป็นการฟอกเยื่อขั้นตอนแรกโดยใช้ออกซิเจน (O_2) ทำปฏิกิริยากับลิกนินให้ลิกนินหลุดออกจากเยื่อเพิ่มมากขึ้น

6. การฟอกเยื่อ (Bleaching)

ขั้นตอนการฟอกเยื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในด้านความขาว (Brightness) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตกระดาษบางชนิด เช่น กระดาษพิมพ์เขียว กระดาษทิชชู กระดาษสา เป็นต้น

7. หน่วยทำความสะอาดเยื่อหลังการฟลอก (Bleached Stock screening)

เยื่อที่ฟลอกแล้วจะผ่านเข้าสู่หน่วยทำความสะอาดเยื่อก่อนเข้าสู่ขั้นตอนทำแผ่นเยื่อเพื่อป้องกันไม่ให้มีสิ่งสกปรก (Dirt Material) ปะปนไปกับผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ เซนติคลินเนอร์

8. ขั้นตอนการเดินแผ่น (Sheet Forming) และอบแห้ง (Drying)

เยื่อจากหน่วยทำความสะอาดหลังการฟลอกจะเข้าสู่เครื่องเดินแผ่น (Sheet forming machines) โรงงานที่ผลิตเยื่อกระดาษส่วนใหญ่จะมีระบบน้ำวงจรปิด (Closed water system) ซึ่งจะนำน้ำได้ลวดเดินแผ่นวนกลับเข้าไปเจือจางเยื่อที่เฮดบ็อกซ์ (Head box) และน้ำล้นส่วนที่ล้น (Overflow) จะนำกลับเข้าไปใช้ในขั้นตอนการล้างเยื่อและเมื่อเยื่อผ่านกระบวนการเดินแผ่นแล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการอบแห้ง (Drying) เพื่อให้เหลือความชื้นประมาณ 10% ก่อนส่งขายลูกค้าเวลาที่ใช้ในการผลิตเยื่อทั้งหมดจะใช้เวลาประมาณ 18 ชั่วโมง

9. ระบบการนำสารเคมีกลับคืน (Chemical Recovery)

ระบบการนำสารเคมีกลับคืนจะมีเฉพาะสำหรับการผลิตเยื่อเคมี เนื่องจากการผลิตเยื่อเคมีจะใช้สารเคมีในปริมาณมาก ถ้าหากไม่มีการนำสารเคมีกลับมาใช้อีก จะทำให้เยื่อกระดาษมีราคาแพงมากขึ้น เนื่องจากสารเคมีมีราคาแพง อีกทั้งยังทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการนำสารเคมีกลับคืน เพื่อนำสารเคมีจากการต้มเยื่อกลับมาใช้ใหม่ และการนำพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สารอินทรีย์มาใช้ประโยชน์ ระบบนำสารเคมีกลับคืนประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ หน่วยทำระเหย (Evaporation Plant) หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery Boiler) และหน่วยทำด่างและเตาเผาปูน (Causticizing Plant & Lime Kiln)

10. หน่วยทำระเหย (Evaporation Plant)

หน่วยทำระเหยมีหน้าที่ระเหยน้ำออกจากของเหลวดำเจือจาง (Weak black liquor) ให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น หรือที่เรียกว่า ของเหลวดำเข้มข้นก่อนที่จะส่งไปเป็นเชื้อเพลิงที่หม้อไอน้ำนำสารเคมีกลับคืน ของเหลวดำเจือจางที่เกิดจากการล้างเยื่อที่ผ่านการต้มแล้ว มีความเข้มข้นประมาณ 15-20% จะถูกส่งเข้าเครื่องทำระเหย (Evaporator) เครื่องทำระเหยจะมีหลายตัวต่อเข้าด้วยกันเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของของเหลวดำและภายในเครื่องจะมีสภาพเป็นสุญญากาศเพื่อให้การระเหยของน้ำเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ เครื่องทำระเหยทุกแบบจะใช้ไอน้ำความดันต่ำเป็นตัวให้ความร้อนเมื่อน้ำระเหยออกจากของเหลวดำ จะมีพลังงานความร้อนอยู่ในไอน้ำนั้น ซึ่งสามารถส่งไป

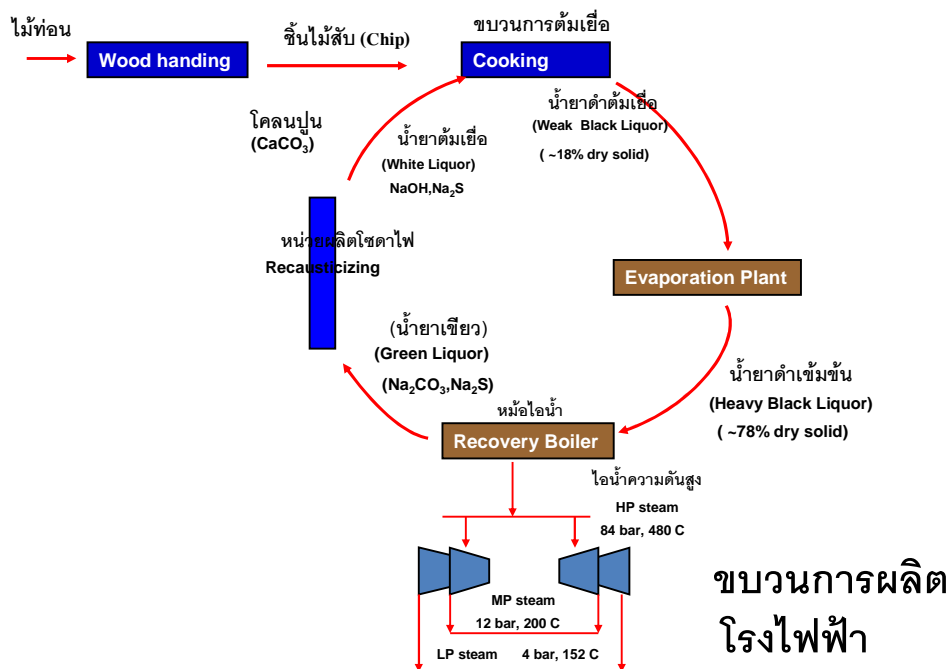
ระเหยน้ำจากของเหลวดำ ในเครื่องระเหยตัวต่อไป เพื่อประหยัดไอน้ำและพลังงานและของเหลวดำที่ได้จากหน่วยทำระเหยจะมีความเข้มข้นประมาณ 65-70%

11. หม้อไอน้ำนำสารกลับคืน (Recovery Boiler)

หน้าที่ของหม้อไอน้ำนำสารกลับคืน คือ การเผาของของเหลวดำ (Black liquor) ที่ส่งมาจากหน่วยทำระเหยเพื่อให้สารเคมีในของเหลวดำ เปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่เหมาะสม สำหรับการทำน้ำยาขาว (White liquor) ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จะถูกเผาไหม้ให้เป็นพลังงานความร้อนและนำความร้อนที่ได้ไปต้มน้ำเพื่อนำไอน้ำไปใช้ ส่วนสารอนินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเกลืออนินทรีย์โซเดียมจะเปลี่ยนเป็นของแข็งหลอมเหลว (Smelt) ซึ่งประกอบด้วยโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ของแข็งหลอมเหลวจะถูกระบายออกจากทางด้านล่างของเตาลงมาที่ถังทำละลาย (Dissolving tank) ภายในถังทำละลายจะมีน้ำที่มาจาก 3 ส่วน คือน้ำเจือจางจากหน่วยทำค่างน้ำที่ได้จากการล้างโคลนปูน (lime mud) และน้ำจากการล้างกากของน้ำยาเขียว (dreg) เมื่อของแข็งหลอมเหลวผสมกับของเหลวในถังทำละลายจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำยาเขียว (green liquor) และน้ำยาเขียวที่เกิดขึ้นจะถูกส่งต่อไปยังหน่วยทำค่างต่อไป

12. หน่วยทำค่าง (Causticizing plant & Lime Kiln)

หน่วยทำค่างมีหน้าที่ผลิตน้ำยาขาวจากน้ำยาเขียวโดยการเติมปูนขาวและผลิตปูนขาวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง น้ำยาเขียวจากเตาเผาของหม้อไอน้ำนำสารกลับคืน จะถูกนำมาแยกเอาสิ่งเจือปนที่ไม่ละลายน้ำออกที่ถัง Green liquor clarifier จากนั้นส่วนที่เป็นน้ำยาเขียวจะถูกส่งต่อไปผสมกับปูนขาวที่ Slaker เกิดเป็นน้ำยาขาว ซึ่งก่อนที่จะส่งน้ำยาขาวไปยังหม้อต้ม จะทำการแยก Lime mud หรือ CaCO_3 ออกก่อน ส่วนวิธีการที่ใช้แยก Lime mud นั้นสามารถทำได้ทั้งแบบการตกตะกอนและการกรอง หลังจากนั้น Lime mud และกำจัดน้ำออก แล้วส่งไปเผาที่เตาเผาปูน (Lime Kiln) เพื่อผลิตปูนขาวกลับมาใช้ที่ Slaker อีกครั้ง



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบซัลเฟต

2.2 เครื่องระเหย (Evaporator)

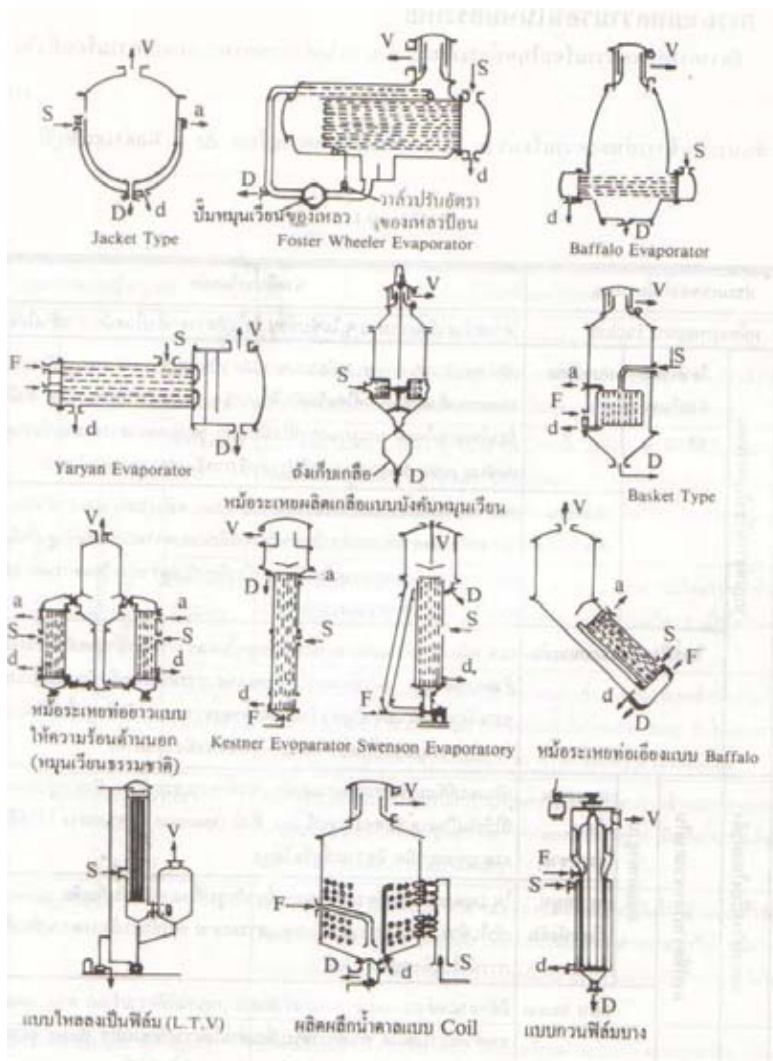
การระเหย คือการเปลี่ยนสถานะของสารจากของเหลวให้กลายเป็นไอ โดยอาศัยการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ซึ่งมีการเดือดเกิดขึ้นด้วย การระเหยเป็นกระบวนการที่ทำให้สารละลายเข้มข้น จากสารละลายเจือจางที่มีตัวทำละลาย (Solvent) ปนอยู่มาก ด้วยวิธีการระเหยตัวทำละลายออกไป อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวมีข้อจำกัดที่ว่า ความดันไอ (Vapor pressure) ของตัวถูกทำละลาย (solute) ต้องมีค่าต่ำกว่าความดันไอของตัวทำละลายมากๆ เท่านั้น

2.2.1 ประเภทของหม้อระเหย

ตารางที่ 2.1 แสดงประเภทของหม้อระเหย

ประเภทของหม้อระเหย		คำอธิบายโดยย่อ		
หม้อระเหยแบบ Jacket		โครงสร้าง เป็นแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน จึงไม่มีสารตกค้างในหม้อ การล้างไม่จำเป็น		
แบบให้ความร้อนด้วยท่อ	แบบท่อวางเรียงในแนวนอน	ไอน้ำไหลด้านในของท่อ	แบบฟิล์มบาง	สารละลายจะถูกป้อนเข้าหม้อทางด้านบน เพื่อให้ไหลรินเป็นเส้นบางๆ บนผิวนอกของท่อระเหย ซึ่งมีไอน้ำร้อนไหลผ่านในท่อ กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพดี แต่ควบคุมลำบาก
			แบบท่วมเต็ม	ปัญหาเรื่องจุดเดือดสูงขึ้นของสารละลายมีน้อย แต่ทำความสะอาดลำบาก
		ไอน้ำไหลด้านนอกของท่อ	สารละลายถูกบีบส่งเข้าด้านในท่อระเหยที่จัดไว้เป็นชุดๆ ด้วยความเร็วสูง ไปยังห้องแยกไอกับของเหลวประสิทธิภาพดี ระยะเวลาในการให้ความร้อนสั้น ปัญหาเรื่องสารละลายเข้มข้นสูงขึ้นมีน้อยเหมาะสำหรับสารที่ไวต่อความร้อน	
	การให้ความร้อนจากภายใน	แบบมาตรฐาน	แบบหมุนเวียนธรรมชาติ	นิยมใช้มากในอดีต ทำความสะอาดง่าย มีหลายรูปแบบ ใช้กับสารละลายหลายชนิด มีความเชื่อถือได้สูง
			แบบหมุนเวียนบังคับ	มี down take อยู่ตรงกลาง และเพิ่มเติม screw pump เข้าไปด้วย เพื่อเร่งการหมุนเวียนของสารละลาย ทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น มีการนำไปใช้ตกผลึกเกลือด้วย
		แบบ Basket	สามารถถอด basket ออกจากตัวหม้อระเหยได้ ทำให้สามารถสับเปลี่ยนชุดใหม่แทนชุดเก่าได้ โดยไม่ต้องทำการหยุดโรงงานได้	
การให้ความร้อนจาก		แบบหมุนเวียนธรรมชาติ	แบ่งภายในออกเป็น 2-4 ส่วน ช่วยลดปัญหาการทำมาสะอาดทั้งตัว เนื่องจากเป็นท่อยาวดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงดีเยี่ยม	
	แบบไม่มีหมุนเวียน	สารละลายจะไหลขึ้นในท่อระเหยที่ร้อนเป็นฟิล์มบางๆ ด้วยความเร็วสูง แล้วเข้าสู่ห้องแยกไอกับของเหลว ปัญหาของสารละลายมีจุดเดือดสูงขึ้นมีน้อย		

		แบบไหลลง เป็นฟิล์ม	สารละลายจะไหลลงจากด้านบนของกลุ่มท่อระเหย เป็นฟิล์มบางๆภายในท่อ และเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ เมื่อยิ่งไหลลงต่ำ การถ่ายเทความร้อนดี และจุดเดือดเพิ่มขึ้นน้อย
		แบบหมุนเวียน บังคับ	ปั๊มจะปั๊มสารละลายขึ้นผ่านท่อระเหยด้วยความเร็วสูง เข้าสู่ห้องแยกไอกับของเหลวเพื่อกระทบแผ่นกั้น (baffle) เพื่อให้ฟองหายไป จึงเหมาะสำหรับของเหลวที่เกิดฟองง่าย การถ่ายเทความร้อนดีเยี่ยม
		แบบท่อวางในแนวเอียง	ให้ความร้อนจากด้านบนนอกท่อผ่านท่อยาว ทำความสะอาดง่าย มีแผ่นกั้นเพื่อจัดฟอง
		แบบท่อขด	ใช้งานที่ระดับใดของสารก็ได้ เหมาะสำหรับใช้กรณีป้อนน้ำเข้าสู่หม้อไอน้ำ
		หม้อระเหยแบบเกลี่ยให้ฟิล์มบาง	ทรงกระบอกกลม ให้ความร้อนผ่านเปลือกความร้อน (Jacket)

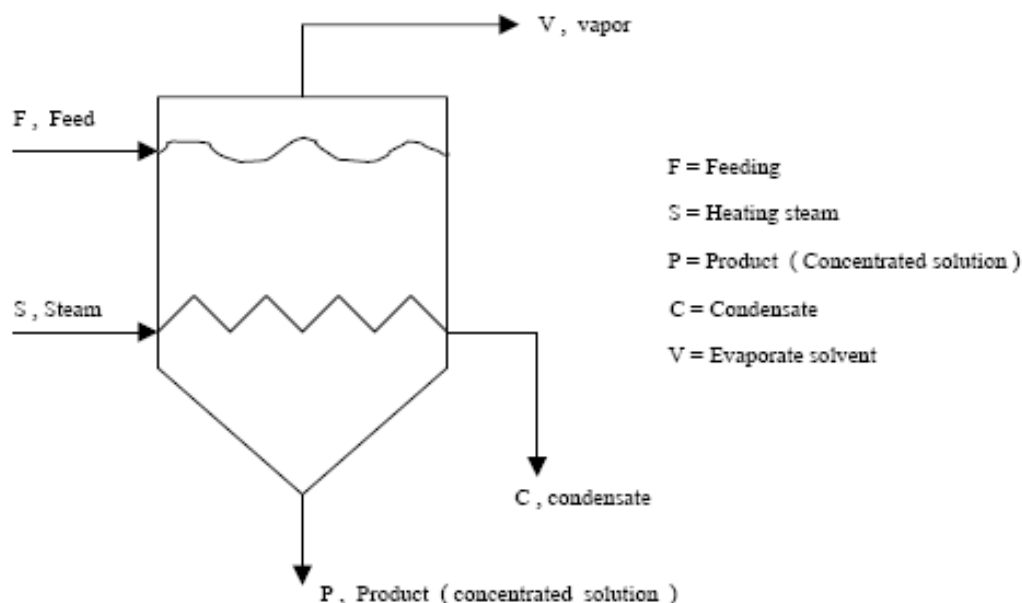


รูปที่ 2.2 หม้อระเหยรูปแบบต่างๆ

2.2.2 การดำเนินการของเครื่องระเหย

1. เครื่องระเหยผลเชิงเดี่ยว (Single-Effect Evaporator)

เครื่องระเหยชนิดนี้ประกอบไปด้วยเครื่องระเหยเพียงตัวเดียว หลักการทำงาน คือ สารละลายที่ต้องการทำให้มีความเข้มข้นสูงจะป้อนเข้ามาทาง F, Feed (ดังรูปที่ 2.3 และความร้อนที่ใช้ในการระเหยได้จากไอน้ำซึ่งป้อนเข้าทาง S, Steam สารละลายที่ถูกระเหยตัวทำละลายไปจะมีความเข้มข้นมากขึ้น และไหลออกมาทาง P ส่วนตัวทำละลาย (สมมติเป็นน้ำ) จะระเหยออกมาทาง V เมื่อไอน้ำให้ความร้อนกับสารละลายแล้ว จะควบแน่นเป็นของเหลว เรียกว่า condensate, C



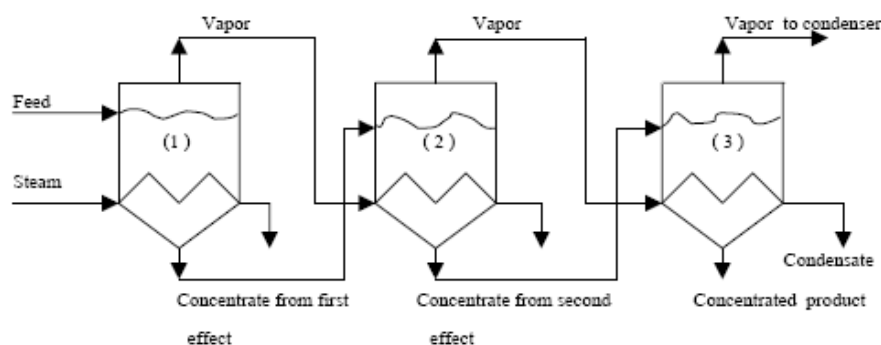
รูปที่ 2.3 เครื่องระเหยผลเชิงเดี่ยว

2. เครื่องระเหยผลหลายเชิง (Multi-Effect Evaporator)

เนื่องจากไอน้ำที่ระเหยออกมาจากเครื่องระเหยมีความร้อนอยู่ แต่เนื่องจากไอน้ำที่ได้ อุณหภูมิต่ำกว่าแบบ Single-effect จึงต้องลดความดันของสารระเหยลงเพื่อให้จุดเดือดต่ำลง การนำ เครื่องระเหยตั้ง 2 ตัวขึ้นไปมาต่อกันเป็นระบบ เรียกว่า multiple-effect evaporator โดยมีระบบการ ต่อ 3 แบบ ดังนี้

2.1 Forward - feed multiple-effect evaporator

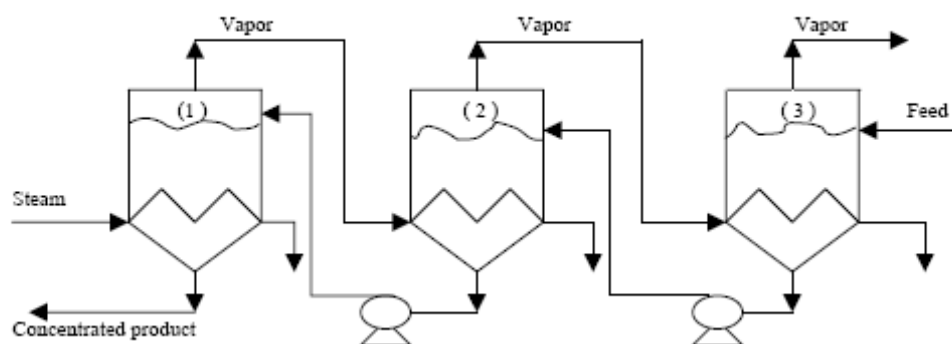
สารละลายและไอน้ำเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันเรียกว่า การป้อนไปข้างหน้า (Forward feed) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจากเอฟเฟลแรกจนถึงเอฟเฟลสุดท้าย ใช้ปั๊มเพียงแค่เครื่องแรก และทางออกเครื่องสุดท้าย เนื่องจากในระหว่างเครื่องนั้นแรงดันลดลงอยู่แล้ว การป้อนไปข้างหน้ามีข้อดี คือ เป็นวิธีการที่เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้งานง่าย ไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยในการป้อนสารละลายระหว่างเครื่องระเหย แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่ำ เมื่อของเหลวมีความหนืดสูง ทำให้อัตราการระเหยลดลงในเครื่องถัดไป



รูปที่ 2.4 Forward - feed multiple effect evaporators

2.2 Backward - feed multiple-effect evaporator

สารละลายและไอน้ำเคลื่อนที่สวนทางกัน เรียกว่า การป้อนย้อนกลับ (Backward feed) วิธีนี้ทำโดยสารละลายที่เจือจาง ถูกป้อนเข้าไปในเครื่องสุดท้าย และหลังจากนั้นจะปั๊มให้สารละลายไหลผ่านต่อมาจนถึงเครื่องที่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 วิธีการป้อนแบบนี้ต้องใช้ปั๊มช่วยระหว่างเครื่องระเหยแต่ละคู่ เนื่องจากเป็นการไหลจากบริเวณที่มีความดันต่ำ ไปยังบริเวณที่มีความดันสูง ระบบนี้มีความประหยัดต่ำกว่าการป้อนไปข้างหน้า เมื่อของเหลวที่ป้อนมีอุณหภูมิต่ำ การป้อนย้อนกลับมีข้อดี คือ ไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยป้อนสารละลายในตอนแรกและมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูง เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายที่ป้อน แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ปั๊มช่วยในระหว่างเครื่องระเหยในแต่ละเอฟเฟก เมื่อสารละลายที่เข้มข้นขึ้นเคลื่อนที่ได้ช้า ทำให้อาจเกิดตะกอน



รูปที่ 2.5 Backward - feed multiple effect evaporators

2.3 Parallel-feed multiple-effect evaporator

สารละลายจะถูกป้อนผ่านเครื่องระเหยแต่ละเอฟเฟกต์แยกจากกัน ในทิศทางที่ขนานกัน การป้อนแบบนี้เรียกว่า การป้อนแบบขนาน (Parallel feed) การป้อนแบบนี้ไม่มีการถ่ายเทของเหลวในแต่ละเอฟเฟกต์ สารละลายที่ป้อนจะถูกป้อนที่ด้านล่างของแต่ละเอฟเฟกต์พร้อมๆกัน ผลผลิตที่ได้ปล่อยออกที่ด้านบนของแต่ละเอฟเฟกต์ การป้อนแบบขนานมีข้อดี คือ มีความเหมาะสมกับการใช้ตกผลึกสาร เนื่องจากมีการควบคุมการตกผลึกได้ดี ไม่ต้องใช้ปั๊มช่วยในการป้อนน้ำผลึก ใช้ระเหยน้ำออกเพื่อทำเกลือ วิธีนี้มีข้อเสีย คือ เครื่องมีความสลับซับซ้อน และมีราคาสูงที่สุด ต้องใช้ปั๊มเพื่อการสกัดในเครื่องระเหยแต่ละเอฟเฟกต์ สารละลายและไอน้ำมีทั้งเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและสวนทางกัน

2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทของพลังงานจากแหล่งที่มีความร้อนสูงกว่า ไปยังแหล่งที่มีความร้อนต่ำกว่า เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิของแหล่งความร้อนทั้งสอง โดยการถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดได้สามทางคือ การนำความร้อน(Conduction Heat Transfer) การพาความร้อน (Convection Heat Transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) แต่เนื่องจากในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะไม่นำเอาการแผ่รังสีความร้อนมาคำนวณเนื่องจากมีผลน้อยมาก ดังนั้นจึงขอกกล่าวเพียงการนำความร้อน และการพาความร้อนเท่านั้น

2.3.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปยังอนุภาคที่ใกล้เคียง ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า การนำความร้อนเกิดขึ้นเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยที่การนำความร้อนในของเหลวและก๊าซเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกัน(Collisions) และการแพร่ (Diffusion) ของโมเลกุลในขณะที่โมเลกุลเหล่านั้นมีการเคลื่อนที่ ส่วนการนำความร้อนในของแข็งเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นของโมเลกุล (Vibrations of Molecules) ในแลตทิซ (Lattice) และการขนถ่ายพลังงานโดยอิเล็กตรอนอิสระ (Free electrons)

โดยทั่วไปการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถถือว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงที่และปัจจัยสำคัญที่มีส่วนกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือผลต่างของอุณหภูมิ มิติรูปร่างของวัตถุและคุณสมบัติของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงการนำความร้อนในสภาวะคงตัวผ่านผนังซึ่งมีความหนา $\Delta X = L$ และพื้นที่ผิว A และผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาของผนังเป็น $\Delta T = T_2 - T_1$ ส่วนรูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการนำความร้อน ซึ่ง

สามารถสรุปได้ว่าอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาและพื้นที่การนำความร้อนเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของตัวกลาง เขียนเป็นสมการได้ว่า

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

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

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{\partial T}{\partial X} \quad (2.2)$$

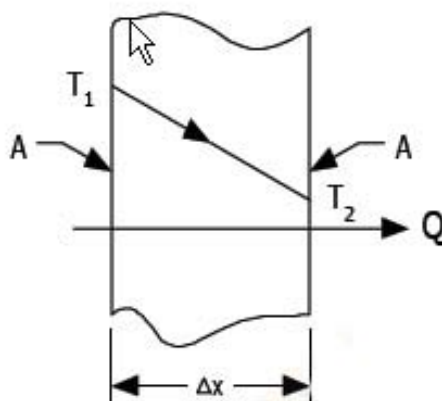
โดยที่

Q_{cond} คือ อัตราการนำความร้อน (W)

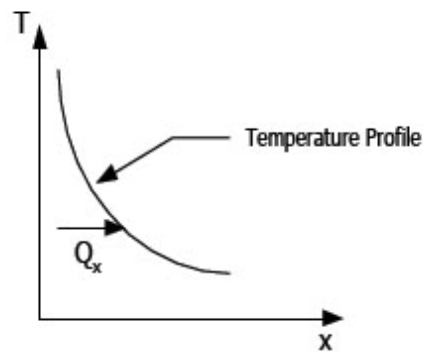
k คือ ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง ($\text{W/m}^0\text{C}$)

$\frac{\partial T}{\partial X}$ คือ อนุพันธ์ย่อยของอุณหภูมิต่อทิศทางการนำความร้อน ($^0\text{C/m}$)

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



รูปที่ 2.6 การนำความร้อนผ่านผนังหนา ΔX

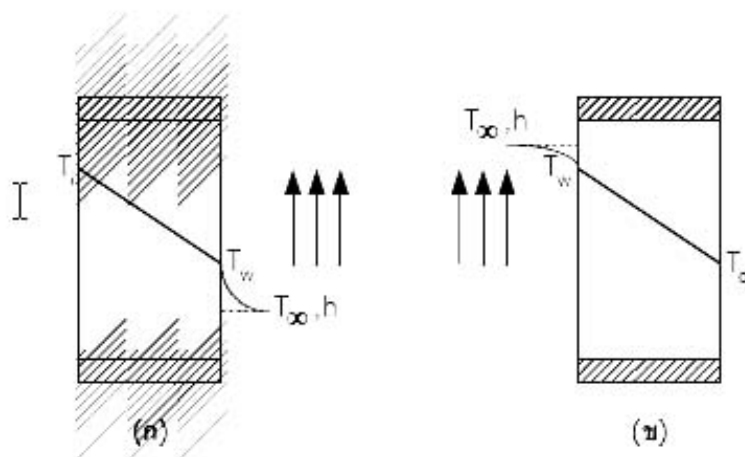


รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน

2.3.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

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

อัตราการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ และสามารถแสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการวาดแสดงดังรูปที่ 2.8 และสามารถเขียนสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ได้ดังสมการ



รูปที่ 2.8 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (ก) $T_{\infty} < T_w$ (ข) $T_w < T_{\infty}$

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

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

โดยที่

Q_{conv} คือ อัตราการพาความร้อน (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)

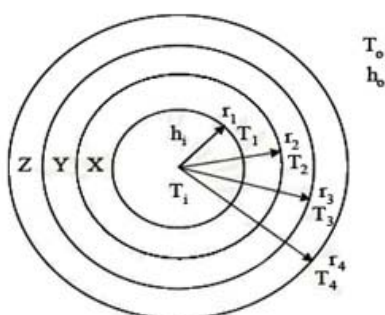
A คือ พื้นที่ผิวของการพาความร้อน (m^2)

T_w คือ อุณหภูมิของพื้นผิว ($^\circ\text{C}$)

T_∞ คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว ($^\circ\text{C}$)

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้น ไม่ใช่คุณสมบัติของของไหล แต่เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนเช่น รูปแบบการไหล (แบบลามินาร์ เทอบีวเลนต์ หรือทรานซิชัน) รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งตามผิววัตถุ กลไกการพาความร้อนเช่น การพาความร้อนแบบอิสระและการพาความร้อนแบบบังคับ

2.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The overall heat-transfer coefficient)



รูปที่ 2.9 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น

เมื่อพิจารณาท่อดังแสดงในรูปที่ 2.9 ท่อด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลร้อน T_1 อีกด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลเย็น T_0 เนื่องจากค่าการถ่ายเทความร้อนเท่ากันในแต่ละพื้นผิว ดังนั้นค่าการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$q = h_i A_i (T_i - T_1) = 2\pi k_x L \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_1/r_2)} = 2\pi k_y L \frac{(T_2 - T_3)}{\ln(r_2/r_3)} = 2\pi k_z L \frac{(T_3 - T_4)}{\ln(r_3/r_4)} = h_o A_o (T_4 - T_o) \quad (2.5)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

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

หรือ

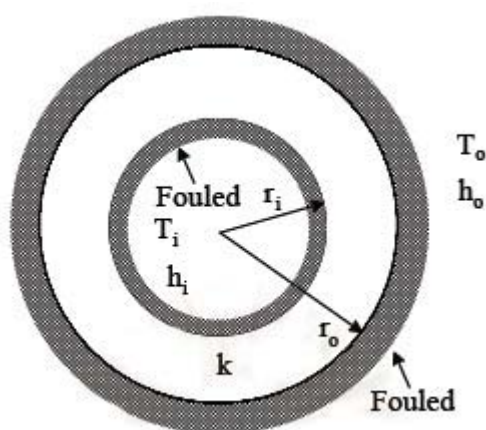
$$q = \frac{(T_i - T_o)}{R} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ (2.6) และสมการที่ (2.7) เราสามารถเขียนค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบได้เป็น

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

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้เป็นดังนี้

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



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเกิดตะกรันที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก

จากสมการที่ 2.7 2.8 และ 2.9 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของพื้นที่ผิวท่อด้านนอกพบว่าจะมีค่า

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{A_o \ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{A_o \ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (2.10)$$

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_o) และค่าความต้านทานความร้อนรวม (R) ได้ดังนี้

$$R = \frac{1}{U_o A_o} \quad (2.11)$$

ในกรณีที่มีตะกอนเกิดขึ้นที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอกต่อดังรูปที่ 11 ค่าความร้อนในกรณีที่มีตะกอนนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

$$R_i = \left(\frac{1}{h_i A_i}\right) + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \left(\frac{1}{h_o A_o}\right) \quad (2.12)$$

โดยที่

i และ o คือ สภาวะที่เกิดตะกอนด้านในและด้านนอกตามลำดับ

R_{fi}, R_{fo} คือ ค่าความต้านทานของตะกอนที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ

สมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในสภาวะอันเนื่องมาจากการเกิดตะกอนที่ผิวได้เป็นดังนี้

$$\frac{1}{U_{f,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \left(\frac{1}{h_o}\right) + R_f \quad (2.13)$$

โดยที่

i และ o คือ สภาวะที่เกิดตะกอนด้านในและด้านนอก ตามลำดับ

R_f, R_{fi}, R_{fo} คือ ค่าความต้านทานตะกอนรวมและค่าความต้านทานตะกอนที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในสภาวะที่ไม่มีตะกอนเกิดขึ้นที่ผิวท่อจะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะหาได้จากสมการ

$$U_{c,o} = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (2.14)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{U_{c,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i} \right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o} \right) \quad (2.15)$$

โดยที่

C_{i} และ C_{o} คือ สภาวะที่ไม่มีตะกรัน, ด้านในและด้านนอกตามลำดับ

เมื่อนำสมการที่ (2.13) ลบด้วยสมการที่ (2.15) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (2.16)$$

โดยที่

R_f คือ ค่าความต้านทานตะกรันรวม (m^2K/W)

U_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวท่อที่มีตะกรัน (W/m^2K)

U_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวท่อที่ไม่มีตะกรัน (W/m^2K)

จากสมการที่ (2.16) ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานตะกรันรวมสามารถหาได้จากการนำส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ผิวท่อที่มีตะกรันลบกลับส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ยังไม่เกิดตะกรัน

2.4 ตะกรัน (Fouling)

ตะกรันที่เกิดขึ้นกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการที่เกิดขึ้นบริเวณผิวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำให้สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ตะกรันอาจเป็นผลมาจากเงื่อนไขในการใช้งาน ดังเช่น อุณหภูมิ และความเร็ว นอกจากนี้ของอนุภาคของแข็งและอนุภาคกึ่งของแข็ง ยังเป็นตัวการให้เกิดตะกรันขึ้นได้ ตัวอย่างของตะกรัน ที่เกิดจากสารอนินทรีย์ ได้แก่ ฝุ่นผงในอากาศ กรวดทราย ฝุ่นผงในของเหลว เช่น โคลน ตะกอน เกลือแคลเซียม เกลือแมกนีเซียม และอ็อกไซด์ของเหล็ก เป็นต้น ตัวอย่างของตะกรัน ที่เกิดสารอินทรีย์ ได้แก่ สารชีวภาพ แบคทีเรีย เห็ด รา น้ำมัน ซีซีง์ จารบี โพลีเมอร์ น้ำมันดิน และคาร์บอน เป็นต้น

2.4.1 ประเภทของตะกรัน

1. ตะกรันที่เกิดจากการตกตะกอน(Precipitation Fouling) คือ การที่ตะกอนที่บริเวณพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนจากสารละลายที่เป็นของเหลว กลไกนี้มีความเป็นอันตรายสูงมาก ถ้ามีการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับหม้อไอน้ำ แต่ในขณะเดียวกันความอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากตะกรันประเภทนี้จะเกิดบริเวณที่ของไหลมีความเร็วต่ำ

2. ตะกรันที่เกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ (Particulate Fouling) จะเป็นของแข็งที่แขวนลอยอยู่บนพื้นผิวการแลกเปลี่ยนความร้อน ตะกรันในกรณีนี้จะไม่จับตัวเกาะอยู่บริเวณพื้นผิว แต่ยังมีแรงในการยึดเกาะกันอยู่

3. ตะกรันที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี(Chemical reaction fouling) เกิดจากคุณสมบัติการรวมตัวกันทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นผิวในการถ่ายเทความร้อนด้วยตะกรันในกลุ่มนี้จะมีความสำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

4. ตะกรันทางชีววิทยา(Biological fouling) เกิดจากการติดและการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตทั้งที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ (เฟรียง, หอย) และแบบโครงสร้างขนาดเล็ก (แบคทีเรีย)

2.4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตะกรัน

สมการทางคณิตศาสตร์ ของการก่อตัวของตะกรัน เกิดจากสมมติฐานความแตกต่างของอัตราการก่อตัวและการหลุดตัวของตะกรัน

$$\frac{dm}{dt} = \Phi_D - \Phi_R \quad (2.17)$$

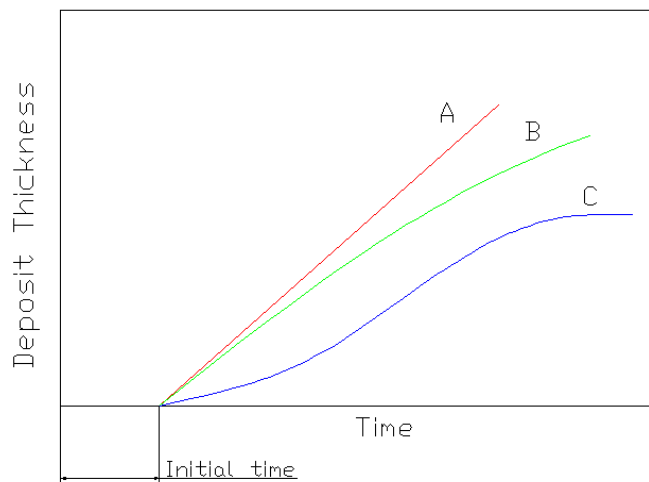
โดยที่

m คือ มวลของตะกรันต่อพื้นที่ (m^2)

Φ_D และ Φ_R คือ อัตราการก่อตัวและอัตราการหลุดตัวของตะกรัน

จุดประสงค์ของการหา Fouling model นั้นทำให้ นักออกแบบ หรือผู้ใช้งานได้สามารถประเมินผลกระทบของตะกรันที่มีต่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ในรูปที่ 2.11 ได้แสดงกราฟแสดงอัตราการเพิ่มความหนาของตะกรันต่อเวลา ในอุดมคติ แบ่งเป็น 3 รูปแบบ เส้นกราฟ C เรียกว่า asymptotic curve เส้นกราฟ A เรียก straight line ส่วนกราฟ B เรียก falling rate

แบบจำลองโดยทั่วไปจะแสดงไม่คิดช่วงเริ่มต้น(Initiation period) เนื่องจากมีช่วงเวลาการเกิดที่สั้นจนสามารถไม่นำเอามาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงอัตราการเพิ่มความหนาของตะกอนต่อเวลา

2.4.2.1 A simple general model

รูปแบบที่ง่ายที่สุดของแบบจำลอง ได้แก่กราฟ A ซึ่งไม่คิด ช่วงเวลาเริ่มต้น

$$x_f = \frac{dx}{dt} \cdot t \quad (2.18)$$

ถ้าช่วงเวลาเริ่มต้นคือ t_i แล้วสมการข้างต้นสามารถเขียนเป็น

$$x_f = \frac{dx}{dt} \cdot (t - t_i) \quad (2.19)$$

2.4.2.2 Asymptotic fouling

หนึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ง่ายที่สุดซึ่งคิดค้น โดย Kern และ Seaton (1959)

$$R_{ft} = R_{f\infty} (1 - e^{-\beta t}) \quad (2.20)$$

โดยที่

R_{ft} คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เวลา t

$R_{f\infty}$ คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เวลาเข้าใกล้อนันต์

β คือ ค่าคงที่ของระบบ

จากรูปที่ 2.11 เส้นกราฟ C แสดงลักษณะของ asymptotic fouling โดยไม่คิดช่วงเวลาเริ่มต้น โดยค่า R_{fo} และ β จะขึ้นอยู่กับชนิดของตะกรัน และเงื่อนไขในการดำเนินการ โดยทั่วไปไม่สามารถหาค่าได้จากปราศจากการทดลอง

2.4.2.3 Falling rate fouling

Epstein [1988] ได้เสนอ สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงในกราฟ B ในรูปที่ 2.11 โดยได้ตั้งสมฐานของสมการดังนี้

$$\frac{dR_f}{dt} \text{ เป็นสัดส่วนตรงกับ (some driving force)}^n \quad (2.21)$$

$$\text{ซึ่งก็คือ เป็นสัดส่วนกับ } q^n \text{ นั่นเอง} \quad (2.22)$$

โดยที่

n คือ เลขยกกำลัง

q คือ ฟลักซ์ความร้อน

ในกรณีที่สัมประสิทธิ์พื้นผิวของการถ่ายเทความร้อน (α) คงที่ จะได้ฟลักซ์ความร้อนดังนี้

$$q = U_D \Delta T = \frac{\Delta T}{R_C + R_F} \quad (2.23)$$

โดยที่

U_D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อเกิดตะกรัน

U_C คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกรณียังไม่เกิดตะกรัน

R_f คือ ค่าต้านทานทางความร้อนในสภาวะที่เกิดตะกรันแล้ว

R_C คือ ค่าต้านทานทางความร้อนในสภาวะยังไม่เกิดตะกรัน

R_C คือ $\frac{1}{U_C} = \frac{1}{\alpha}$ เมื่อยังไม่มีการเกิดตะกรัน

ถ้าสมมติว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิโดยรวมคงที่ที่เวลาใดใด ถ้ารวมสมการ 2.22 และ 2.23 โดยให้ค่า K คือค่าคงที่

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{K}{(R_f + R_c)^n} \quad (2.24)$$

ทำการอินทิเกรต
$$\int_{t=0}^{t=t} \frac{dR_f}{dt} = \int_{R_0}^{R_f} \frac{K}{(R_f + R_c)^n} \quad (2.25)$$

นั่นคือ
$$(R_f + R_c)^{n+1} - R_c^{n+1} = K(n-1)t \quad (2.26)$$

หรือสามารถเขียนรูปแบบของสมการได้อีกในรูปแบบหนึ่งคือ

$$\frac{1}{U_D^{n+1}} - \frac{1}{U_C^{n+1}} = Kt \quad (2.27)$$

ค่าของ K และ n ใช้ในการประเมินค่าของตะกรัน และจะขึ้นกับกลไกต่างๆ ที่สัมพันธ์กับ ตะกรัน ไม่ว่าตะกรันนั้นจะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือการถ่ายเทมวล ซึ่งข้อมูลเหล่านั้นจะไม่สามารถหาได้ทั่วไป

สรุปสมการคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเกิดตะกรัน

ความพยายามที่จะพัฒนารูปแบบสมการทั่วไป ได้ถูกพัฒนามาเป็นระยะเวลาหลายสิบปี ตัวอย่างเช่น Tabored ได้ให้สมการทั่วไปคือ

$$\frac{dm}{dt} = \phi_D - \phi_R \quad (2.28)$$

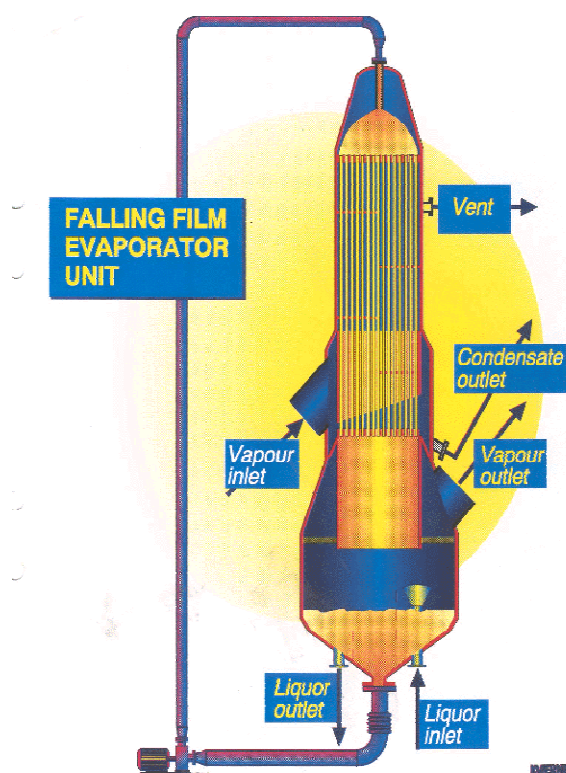
โดยที่ m คือ การสะสมมวล

และความพยายามที่จะเขียนสมการซึ่งเป็นพื้นฐานของการหาค่า ϕ_D และ ϕ_R ผู้เขียนสมการเหล่านี้จะทำการปรับปรุงสมการทั่วไป และสร้างรูปแบบของสมการซึ่งสามารถนำมาใช้จริงกับ

ระบบนั้นๆ ดังนั้น พวกเขาจึงพยายามที่จะอธิบายถึงการสมการว่าขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมี การถ่ายเทมวล และการก่อตัวของตะกอน ส่วนการหลุดออกไปของตะกอน จะถูกเขียนอยู่ในรูปของแรงเสียดทานของของไหลและความต้านทานการเกิดฟองของตะกอน ซึ่งส่งผลกับการหลุดออกไปกับตะกอน แม้จะยังมีความยุ่งยากในการสร้างสมการให้ละเอียดเพียงพอก็ตาม รูปแบบสมการเหล่านี้ก็ยังคงถูกใช้ในการตั้งสมมติฐานเกี่ยวกับปัญหาของตะกอนซึ่งยังคงอยู่ภายใต้การพิจารณาในแต่ละกลไกการเกิดตะกอน

2.5 กระบวนการระเหยน้ำของของเหลวดำ

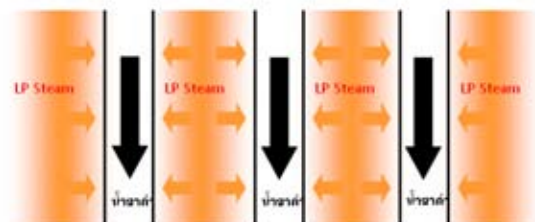
หน่วยระเหยน้ำมีหน้าที่ในการระเหยน้ำออกจากของเหลวดำเพื่อเตรียมเชื้อเพลิงให้เหมาะสมแก่การเผาไหม้ที่ Recovery boiler โดยหน่วยระเหยน้ำมีภาพแสดงส่วนประกอบภายในดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แผนภาพส่วนประกอบภายในเครื่องระเหย

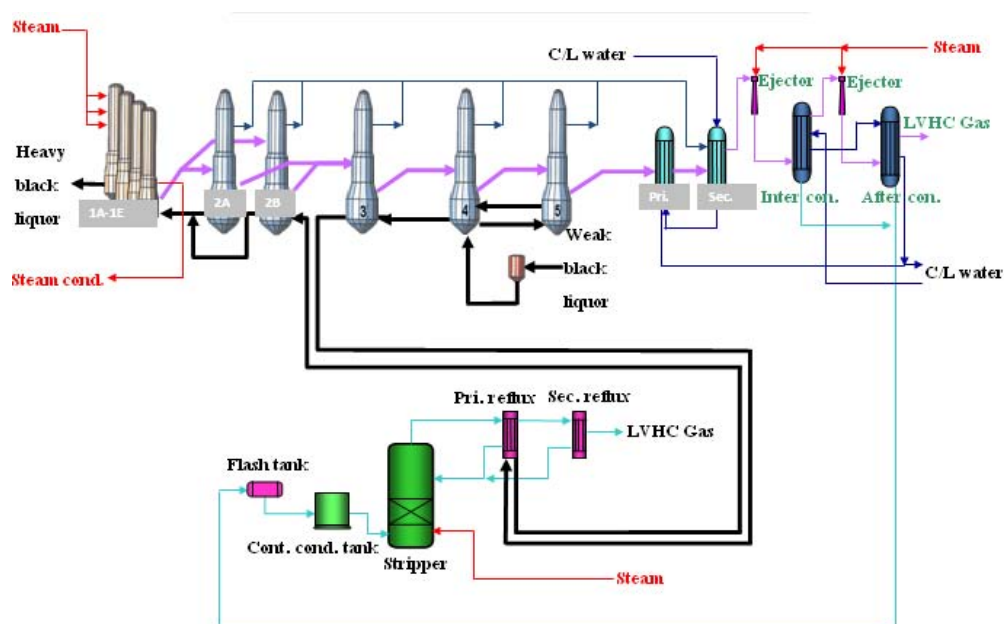
เครื่องระเหย แบบฟิล์มไหลลง โดยป้อนหมุนวน จะเป็นตัวทำให้ของเหลวดำ หมุนเวียนจากล่างขึ้นบนและไหลตกลงมาตามท่อ ของเหลวดำจะอยู่ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และทำการ

แลกเปลี่ยนความร้อนกับไอที่อยู่ภายนอกท่อ และไอที่ได้จากของเหลวดำจะถูกนำไปใช้กับเครื่องระเหยขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 2.13 แผนภาพลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อน

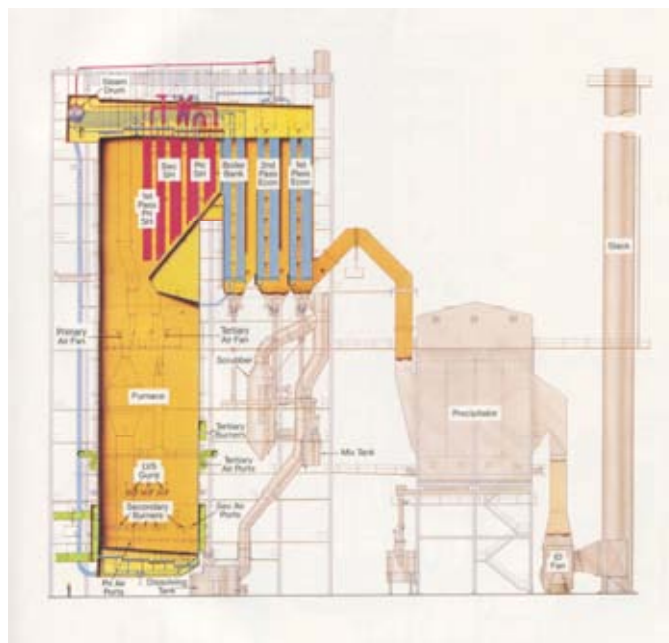
การระเหยน้ำออกจากของเหลวดำเจือจางที่ได้จากการต้มเชื้อจะได้ของเหลวดำเข้มข้นความเข้มข้นอยู่ที่ประมาณ 78% ก่อนจะนำไปเผาใน Recovery Boiler โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำแรงดันต่ำ และส่วนไอที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ที่ Effect ถัดไป



รูปที่ 2.14 แผนภาพหน่วยระเหย

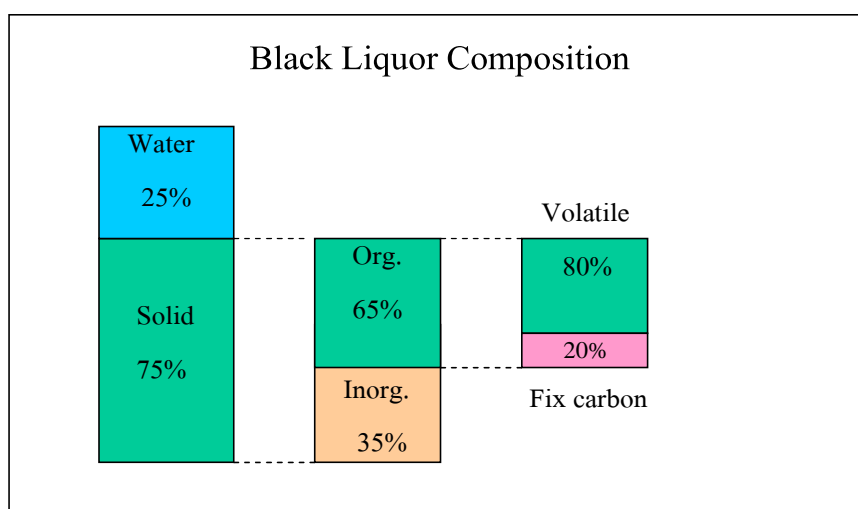
เมื่อได้ของเหลวดำเข้มข้นแล้ว ของเหลวดำจะถูกส่งไปยัง Recovery boiler ซึ่งเปรียบเสมือนเตาปฏิริยาเคมี ทำหน้าที่เปลี่ยนของเหลวดำ ให้เป็นน้ำยาเจียว และนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ใน

ขบวนการต้มเยื่อ ผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานความร้อนจากการเผาสารอินทรีย์ในของเหลวดำ และยังมีทำหน้าที่เผากำจัดกำมะถันอีกด้วย



รูปที่ 2.15 Recovery boiler

จากกระบวนการดังกล่าวจะให้ความเข้มข้นของของเหลวดำในน้ำ ปรากฏดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของของเหลวดำหลังจากการระเหยน้ำ

จากรูปที่ 2.16 ส่วนประกอบของของเหลวดำหลังจากผ่านการระเหยแล้ว ประกอบด้วยสองส่วนประกอบได้แก่

1. สารอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย ลิกนิน เส้นใย เป็นต้น
2. สารอนินทรีย์ซึ่งประกอบ $Na_2SO_4, Na_2CO_3, NaOH, Na_2S$ เป็นต้น

สารทั้งหมดจะถูกนำไปเผา โดยสารอินทรีย์จะเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับผลิตไอน้ำ ส่วนสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการเผาจะถูกนำกลับไปใช้อีกครั้งในรูปของน้ำยาเจียว เพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษต่อไป

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะแบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับของเหลวดำ ส่วนที่สองเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาแนวทางในการหาอัตราการเพิ่มของตะกอน

3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับของเหลวดำ

ในปี 1990 Erkki J. [4] ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Method of decreasing black liquor viscosity” โดยได้นำเอาก๊าซออกซิไดซ์ เช่นอากาศมาทำการอุ่นแล้วผสมกับของเหลวดำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งทำให้ค่า pH ของสารของเหลวดำลดลง และมีผลให้สาร Lignin ควบแน่นได้มากขึ้น เป็นที่ทราบกันว่าความหนืดของของเหลวดำนั้นขึ้นอยู่กับ macro-molecular lignin ในของเหลวดำ ดังนั้นถ้าควบแน่น macro-molecular lignin ได้มากขึ้นก็ทำให้ความหนืดของน้ำยาน้อยลง

ในปี 1993 Kaj Henricson [8] ได้ทำวิจัยเรื่อง “Treatment of chips with high temperature black liquor to reduce black liquor viscosity” โดยได้หาวิธีและออกแบบเครื่องมือที่ใช้ในการลดค่า Kappa number ของการผลิตกระดาษแบบ Kraft paper pulp และ วิธีการลดความหนืดของของเหลวดำ เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวกสู่กระบวนการต่อไป วิธีการคือทำการนำของเหลวดำที่ได้จากกระบวนการระเหยผ่าน Vaporizer ซึ่งจะมีความเข้มข้นที่สูง และความหนืดสูงมาทำการให้ความร้อนก่อนเพื่อทำให้ความหนืดของของเหลวดำลดลงและนำกลับไปยังกระบวนการ Recovery boiler เพื่อให้ความร้อนและแยกเอาสารอนินทรีย์ออกมา

ในปีเดียวกัน Hakulin B. [7] ได้ทำวิจัยเรื่อง “Method for treating black liquor” โดยได้ความร้อนจาก Flue gas ที่ได้จากกระบวนการ gas turbine ที่นำไปผลิตไฟฟ้ากลับมาให้ความร้อนของเหลวดำเพื่อลดความหนืดของของเหลวดำ

ในปี 1995 Walter T. [15] ได้ทำการวิจัยเรื่อง “Method for controlling the viscosity of Kraft black liquor” โดยได้ทำการควบคุมปฏิกิริยา Oxidation ของของเหลวดำเพื่อให้สามารถลดความหนืดและค่าการจุกความร้อนได้

ปี 1997 Muller H. และ Branch C.A. [10] ได้ทำการทดลองเพื่อค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากตะกรัน โดยใช้เครื่องทดสอบดังรูปที่ 3.1(a) โดยให้ปั๊มดูดสารจากถังเก็บ แล้วส่งเข้าไปยังชุดทดสอบที่บรรจุด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้า ควบคุมอุณหภูมิโดยน้ำหล่อเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Plate heat exchanger โดยมีแผนภาพการทำงานตามรูปที่ 3.1(a) ซึ่งสมการที่นำมาใช้หาความต้านทานคือ

$$R = \frac{1}{\alpha(t)} - \frac{1}{\alpha_o} \quad (3.1)$$

เมื่อ

$$\alpha(t) = \frac{\dot{Q}}{A(T_w - T_b)} \quad (3.2)$$

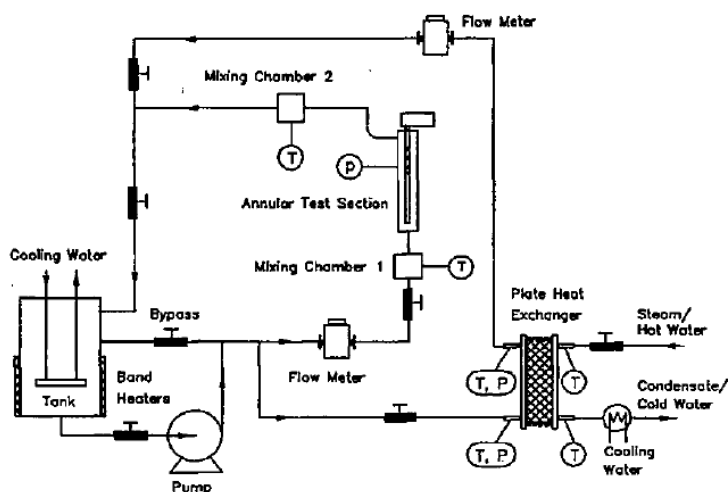
โดยที่

R คือ ค่าความต้านทานความร้อน (m^2K/kW)

$\alpha(t)$ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (kW/m^2K)

T_w คือ อุณหภูมิผิวถ่ายเทความร้อน (K)

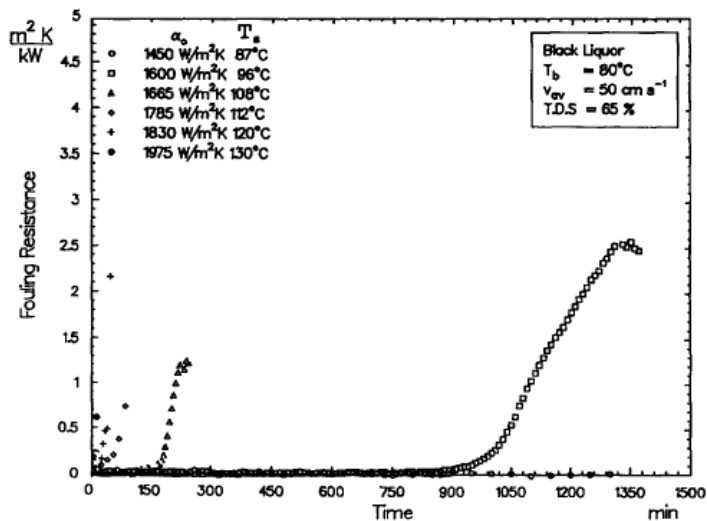
T_b คือ อุณหภูมิของของเหลวค้ำ (K)



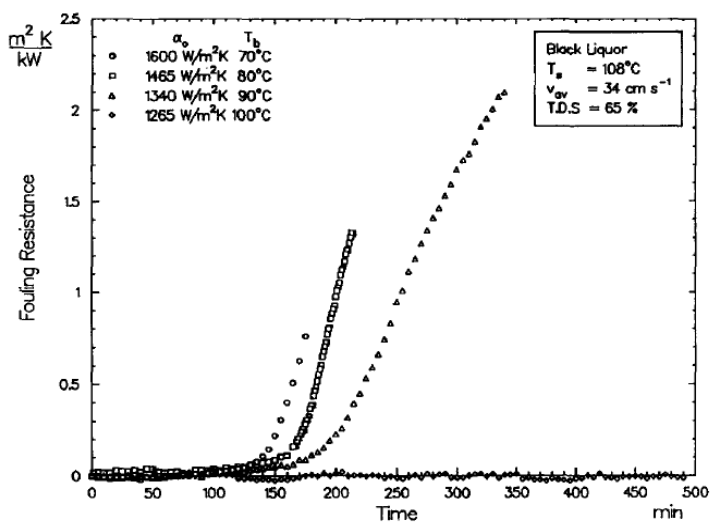
รูปที่ 3.1(a) Schematic of experimental rig [10]

เมื่อทำการทดสอบผลของอุณหภูมิที่ผิวถ่ายเทความร้อนต่อเวลา พบว่า ถ้าให้อุณหภูมิของเหลวค้ำคงที่แล้วทำการปรับอุณหภูมิที่ผิวถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น ความต้านทานความร้อน

จากตะกรันก็จะมากขึ้นไปด้วยดังรูปที่ 3.1(b) ในกรณีที่ให้อุณหภูมิผิวความร้อนคงที่ เมื่อให้ความร้อนของของเหลวค่าลดลง แต่ความต้านทานความร้อนจากตะกรันจะมากขึ้นเนื่องจากการละลายของของเหลวค่าละลายในน้ำได้น้อยลง ดังรูปที่ 3.2(c)



รูปที่ 3.1(b) ผลกระทบของพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนต่อค่าความต้านทานความร้อน [10]



รูปที่ 3.1(c) ผลกระทบของอุณหภูมิของเหลวต่อค่าความต้านทานความร้อน [10]

นอกจากนั้นได้มีการเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายอัตราการเกิดของตะกรันดังสมการ

$$\frac{\partial R_f}{\partial t} = \frac{K_a}{\rho_d \lambda_d} \exp\left(-\frac{E_{act}}{RT_s}\right) (C_b - C_s) \tag{3.1}$$

เมื่อ

R_f คือ ค่าความต้านทานจากการเกิดตะกรัน ($m^2.K/W$)

t คือเวลา(s)

K_a คือ ค่าคงที่ ($Lmol^{-1}s^{-1}$ หรือ $M^{-1}s^{-1}$)

E_{act} คือ ค่าพลังงานความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา(J/mol)

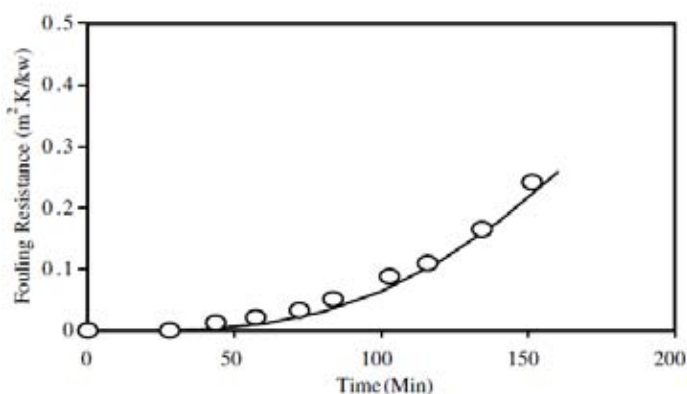
R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่า $8.314 J/mol K$

T_s คือ อุณหภูมิการก่อตัวของตะกรันที่พื้นผิว(K)

C_b คือความเข้มข้นของสารละลาย(Kg/m^3)

C_s คือความเข้มข้นของสารละลายที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อน(Kg/m^3)

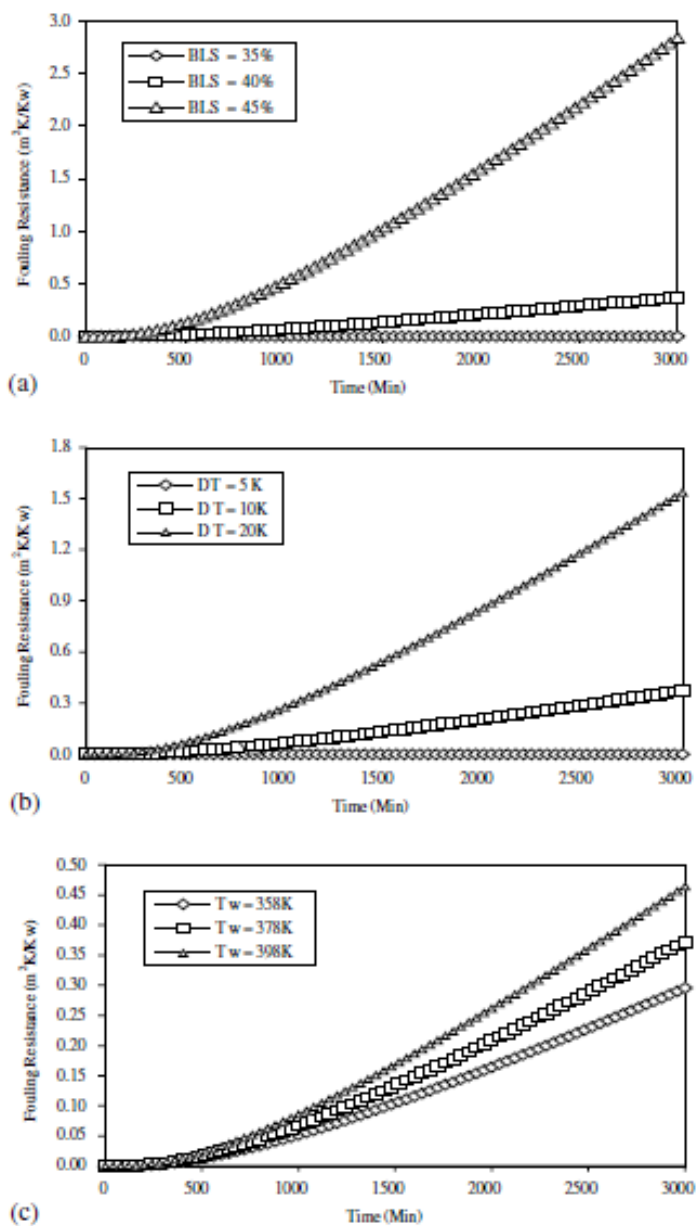
และได้นำเอาข้อมูลจากการทดลองของ Smith และ Hsieh's มาทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและแบบจำลองดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง [10]

ซึ่งจากกราฟเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลอง มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งสรุปได้ว่าแบบจำลองมีความแม่นยำเพียงพอ

ในปี 2003 Fang C. และ Zhiming G. [6] ทำการวิเคราะห์ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากตะกรัน ของของเหลวค่า และพบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิของของเหลวค่ามีผลต่อการเกิดของตะกรัน โดยทำการทดลอง ที่ 35% 40% 45% DS ของอุณหภูมิ 383 K ซึ่งผลปรากฏว่า ที่ความเข้มข้นมากขึ้น การเกิดตะกรัน และความต้านทานทางความร้อนจะมากขึ้นไปด้วย ดังรูป 3.2(a) เมื่อทำการทดลองควบคุมให้ความเข้มข้นคงที่ อัตราการเกิดตะกรันจะเพิ่มขึ้น ตามความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเหลวค่ากับผิวถ่ายเทความร้อน ดังรูป 3.2(b) และเมื่อให้ความเข้มข้นและอุณหภูมิของเหลวค่าคงที่ ปรากฏว่า ค่าต้านทานความร้อนจะเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับอุณหภูมิผิวถ่ายเทความร้อน ดังรูป 3.2(c)



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานความร้อนกับเวลา (a) เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (b) เมื่อเปลี่ยนแปลงความแตกต่างอุณหภูมิของเหลวค่า กับผิวถ่ายเทความร้อน (c) เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวความร้อน [6]

3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเครื่องพยากรณ์การเกิดตะกรัน

ในปี 1983 Paul E.E. [11] ได้ทำวิจัยเรื่อง "Fouling test apparatus" โดยได้สร้างเครื่องพยากรณ์การเกิดตะกรัน โดยใช้ถังซึ่งมีใบพัดสำหรับปั่นกววนเพื่อให้อนุภาคน้ำแข็งทั้งหมดบริเวณและได้เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องทำความร้อน (Heater) ที่มีพื้นผิวเป็นสิ่งที่จำลองการเกิดตะกรัน และเครื่องระบายความร้อน (Cooler) เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากระบบ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ระบบมีอนุภาคน้ำแข็งที่ ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิภายในถัง และส่งสัญญาณไปควบคุมการอัตราการระบายความร้อน และควบคุมอัตราการให้ความร้อนของเครื่องให้ความร้อน หลังจากนั้นได้บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่พื้นผิว แล้วนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของตะกรัน

ในปี 1993 Comstock et al. [3] ได้ทำวิจัยเรื่อง "Method and apparatus for measuring the fouling potential of membrane system feeds" ซึ่งทำการศึกษาถึงค่าความเข้มข้นของสาร antifoulant ซึ่งใช้ในการต่อต้านการเกิดตะกรันภายใน membrane และระยะเวลาในการทำความสะอาด membrane ที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ reversible osmosis โดยนำเอาอัตราการซึมผ่านของสารทำความสะอาดต่อเวลา มาทำนายเพื่อหาค่าช่วงเวลาที่ดีที่สุด ที่จะเข้าทำความสะอาด

ในปี 1995 Thomas F.D. [14] ได้ทำวิจัยเรื่อง "Method and apparatus for evaluating heat exchanger efficiency" ซึ่งได้สร้าง heat exchanger เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพของ heat exchanger ที่ใช้ประเมิน fouling อันเนื่องมาจากการตกตะกอน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ โดยใช้ reference test block เพื่อวัด reference thermal relaxation time และเปรียบเทียบกับ reference thermal relaxation time กับ thermal relation time ที่วัดได้ โดยพบว่า thermal relaxation time เป็นตัวชี้วัดว่า fouling เพิ่มขึ้นในขณะที่เพิ่ม heater block temperature ซึ่งแสดงว่า fouling มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารที่ไม่ใช่สารอินทรีย์

ในปี 2005, Scott S. [12] ได้ทำวิจัยเรื่อง "Fouling test apparatus and process for evaluation of anti-foulant" ซึ่งได้คิดค้นวิธีการและเครื่องมือเพื่อทดสอบผลของ Anti-foulant additives ที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้านการถ่ายเทความร้อน โดยเครื่องมือประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้เป็นส่วนอ้างอิง และส่วนที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งเครื่องมือและวิธีการได้ทำการจำลองการวัดค่าตามเงื่อนไขต่างๆ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ Anti-foulant additives อุณหภูมิของของไหล อัตราการไหล และการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคน้ำแข็ง ทั้งเครื่องมือและวิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ แต่ไม่เป็นที่แพร่หลายในอุตสาหกรรม

บทที่ 4

การออกแบบและการทดลอง

4.1 การออกแบบ

การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน อาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อนจากฮีทเตอร์ไปสู่ของเหลวในเครื่องทดสอบ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของฮีทเตอร์ เมื่ออุณหภูมิของของเหลวได้ถึงค่าที่กำหนดแล้ว เปรียบเสมือนว่าได้มีการก่อเกิดตะกรันที่พื้นผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้น ค่าอุณหภูมิที่ผิวฮีทเตอร์ที่แตกต่างจากสถานะเบื้องต้นจะสามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าความต้านทานของตะกรันได้

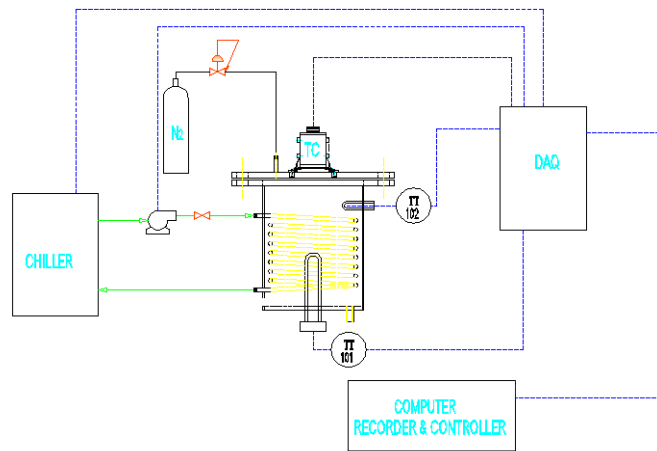
บริเวณที่เกิดตะกรันจะพบได้ที่ผิวของปลอกรับความร้อน (Thermo well) ที่รับความร้อนจากฮีทเตอร์ ที่ติดตั้งบริเวณจุดกึ่งกลางของเครื่องทดสอบ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟจากเครื่องปรับแรงดันไฟฟ้ามาที่ฮีทเตอร์ ฮีทเตอร์จะถ่ายเทความร้อนออกจากตัวมันเรื่อยๆ จนกระทั่ง ความร้อนของของเหลวถึงค่าที่กำหนด เพื่อหยุดยั้งการเพิ่มอุณหภูมิ ผู้ออกแบบจึงได้ ออกแบบชุดเพื่อนำความเย็น จากอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิของของเหลวให้ยังคงอยู่ที่ค่าที่ได้กำหนดไว้

การสร้างเครื่องมือทดสอบเพื่อทดลองการเกิดตะกรันใช้ถังสแตนเลสและปลอกรับความร้อนสแตนเลส เนื่องจากของเหลวเป็นสารที่มีฤทธิ์เป็นด่างซึ่งสามารถกัดกร่อนได้ นอกจากการควบคุมอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ดังได้กล่าวมาแล้ว ยังมีการควบคุมความดันและกำจัดก๊าซออกซิเจนในถังโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนที่ 1 barg ให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์ขนาด 1500 วัตต์ ที่แกนกลางของถัง โดยมีเทอร์โมเวลครอบฮีทเตอร์อยู่เป็นผิวถ่ายเทความร้อน เพื่อให้ความร้อนสามารถถ่ายเทได้อย่างทั่วถึง ได้ออกแบบใบกวนช่วยกระจายความร้อนในของเหลวให้สม่ำเสมอในทุกตำแหน่งภายในเครื่องทดสอบและทำให้สภาวะการปั่นกวนเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent) ซึ่งค่าเรโนลด์ นัมเบอร์ (Re) อยู่ที่ 21,067 เครื่องวัดอุณหภูมิได้ใช้วัดอุณหภูมิฮีทเตอร์ 1 จุด และวัดอุณหภูมิของเหลว 1 จุด โดยค่าที่ได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิทั้งสองตัวนี้ได้แปลงออกมาเป็นค่าสัญญาณทางไฟฟ้า 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ ซึ่งถูกส่งผ่านตัวแปลงสัญญาณให้เป็นค่า 0 ถึง 5 โวลต์ เพื่อส่งค่ามาที่กล่องรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ) หลังจากนั้น DAQ จะทำการแปลงสัญญาณส่งเข้าเครื่องควบคุมหรือคอมพิวเตอร์ต่อไป

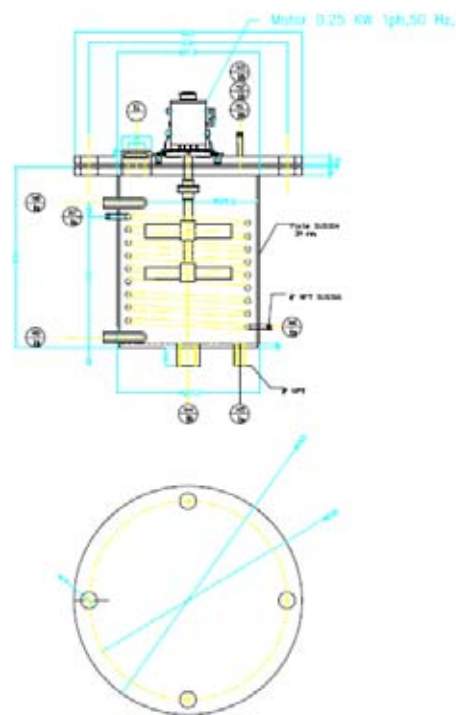
เครื่องควบคุมทำงานได้โดยการเขียนโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) เพื่อสั่งการ พร้อมทั้งบันทึกค่าที่ได้จากการวัด หลังจากนั้นผู้ออกแบบได้นำค่าของ เวลา อุณหภูมิของของเหลวค่า และอุณหภูมิของฮีตเตอร์ ออกไปทำการคำนวณต่อ เพื่อหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ความต้านทานของตะกั่ว เปรียบเทียบผลการทดลอง และสรุปผลต่อไป

4.2 อุปกรณ์ในการทดลอง

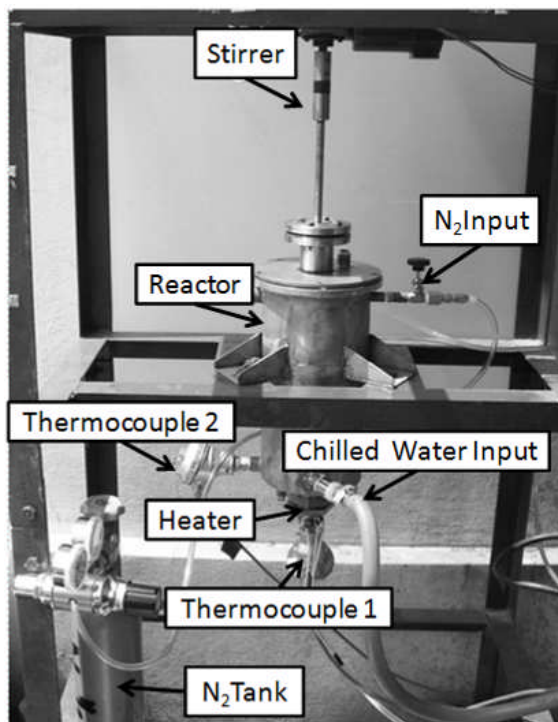
1. เครื่องทดสอบการเกิดตะกั่ว ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้
 - 1.1 มอเตอร์ ติดตั้งพร้อมกับชุดเกียร์ปรับความเร็วรอบ $\frac{1}{4}$ แรงม้า โดยมีอัตราส่วนความเร็วรอบ 1 ต่อ 30
 - 1.2 ใบกวนชนิดใบพาย (Paddle type)
 - 1.3 ชุดคอยล์ ระบายความร้อน ทำจากท่อสแตนเลสขนาด $\frac{1}{4}$ "
 - 1.4 โครงเหล็กรองรับเครื่องทดสอบตะกั่ว
2. เครื่องระบายความร้อน (Chiller)
3. เครื่องให้ความร้อน (Heater) และปลอกรับความร้อน (Thermo well)
4. DAQ
5. คอมพิวเตอร์
6. เครื่องมือวัดอุณหภูมิและส่งสัญญาณ (RTD)
7. ท่อยาง
8. ป้อนหมุนวนน้ำระบายความร้อน
9. เครื่องจ่ายกระแสไฟแบบปรับแรงดันไฟฟ้าได้ (Voltage Variable Transformer)
10. ก๊าซไนโตรเจน
11. อุปกรณ์ปรับแรงดันสำหรับก๊าซไนโตรเจน
12. หอผึ่งน้ำชนิดระบายความร้อนด้วยอากาศ
13. ตู้จ่ายไฟและระบบควบคุมกระบวนการ



รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของเครื่องทดสอบ



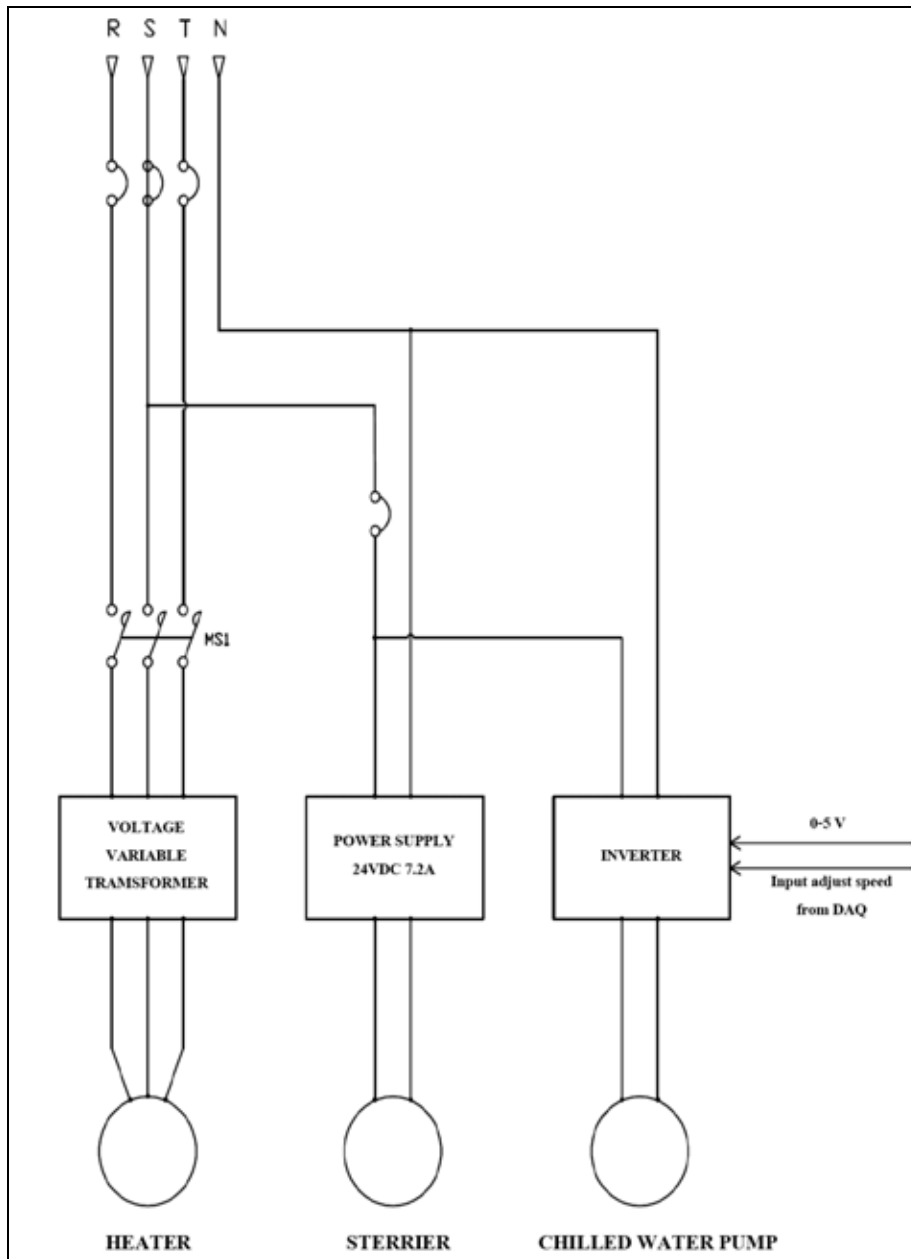
รูปที่ 4.2 แบบสำหรับการสั่งซื้อเครื่องทดสอบ



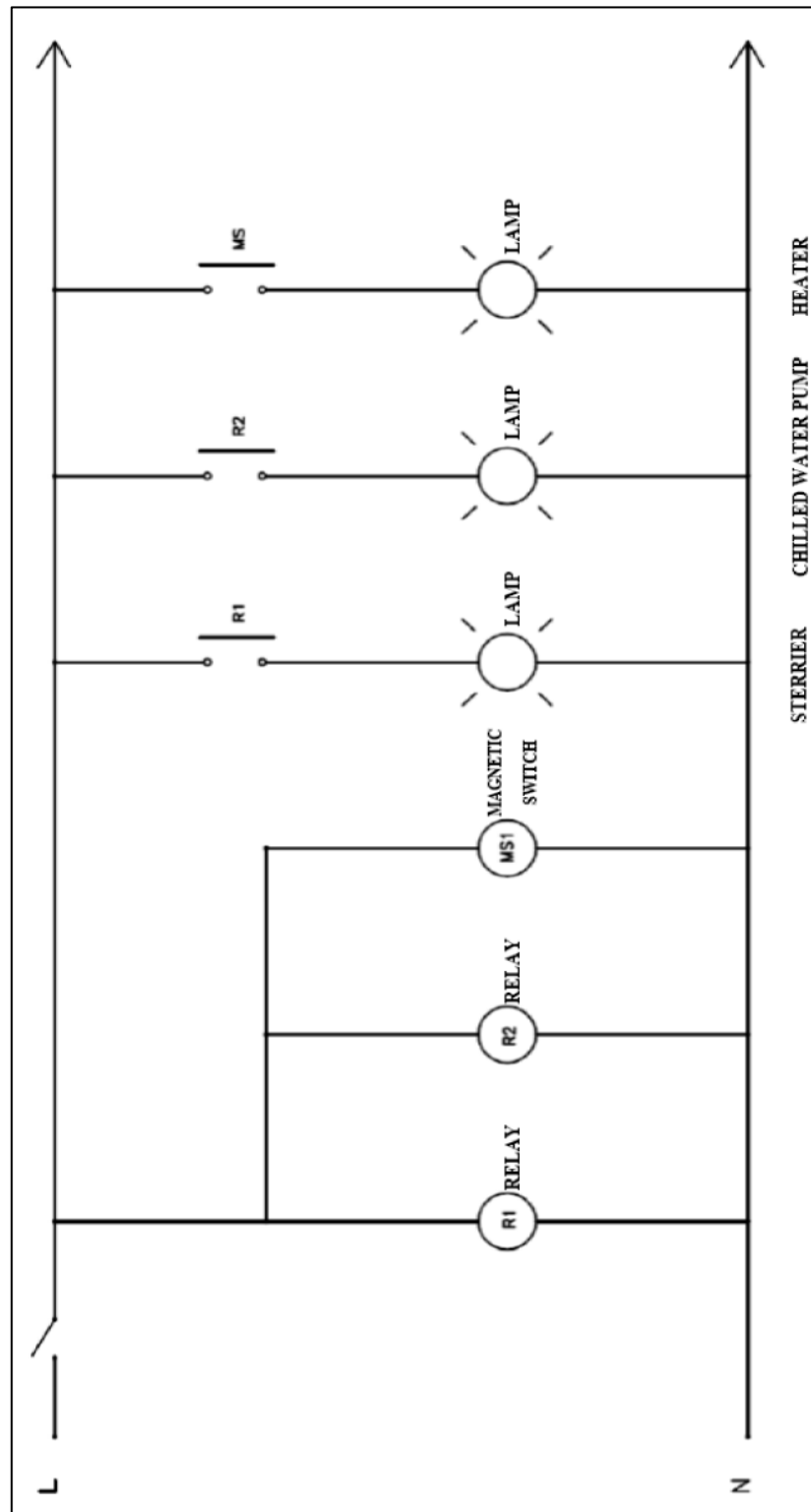
รูปที่ 4.3 ภาพเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน [1]

4.3 ระบบไฟฟ้าและระบบควบคุมการทดลอง

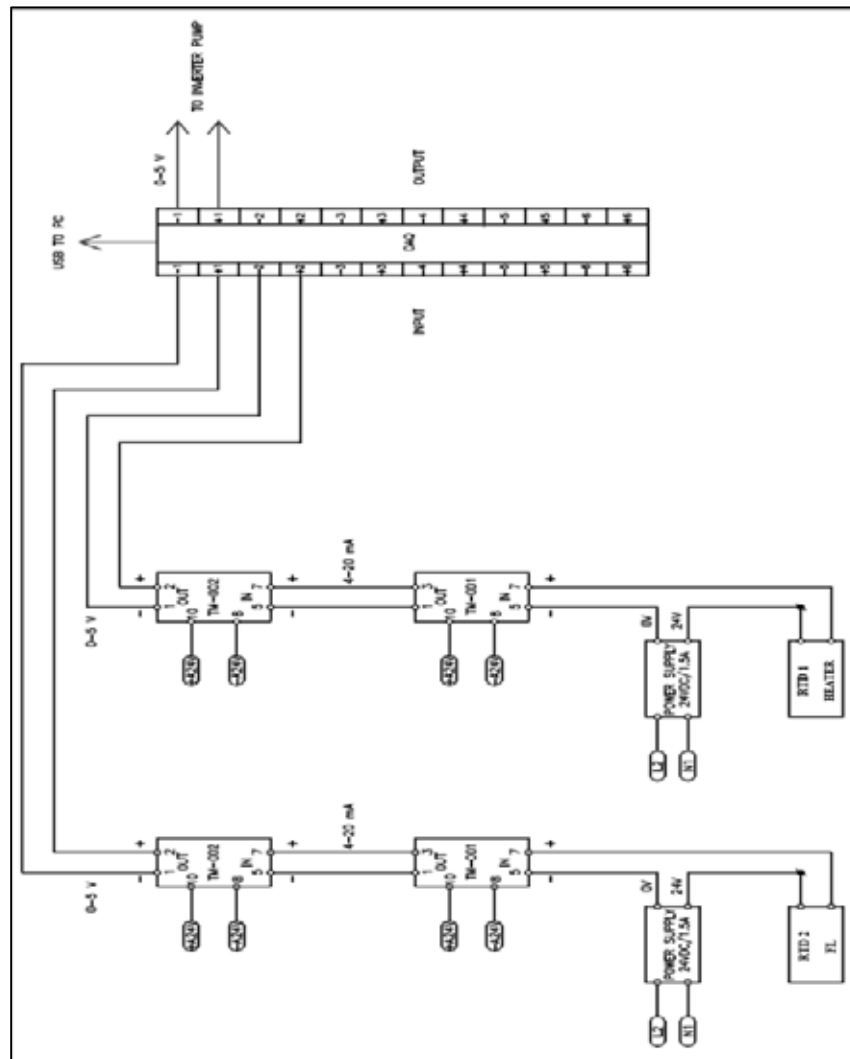
แบบผังวงจรไฟฟ้าแยกตามส่วนของการควบคุมเครื่องทดสอบ คือผังวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบการก่อตะกรัน ได้แก่ ฮีตเตอร์ ไบคอน และปั๊มน้ำเย็นตามรูปที่ 4.4 ผังวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้สัญญาณไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์ตามรูปที่ 4.5 และผังวงจรการรับส่งสัญญาณจากกล่องรับส่งข้อมูล DAQ กับ RTD ตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 ศังวงจรไฟฟ้า 3 เฟส ที่จ่ายให้อุปกรณ์ของเครื่องทดสอบการก่อตะกรัน [1]



รูปที่ 4.5 ผังวงจรไฟฟ้าที่จ่ายให้สัญญาณไฟแสดงการทำงานของอุปกรณ์ [1]



รูปที่ 4.6 ผังวงจรการรับส่งสัญญาณจากกล่องรับส่งข้อมูล DAQ กับเทอร์โมคัปเปิล [1]

การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน แบ่งการควบคุมระบบออกเป็น 4 ส่วน คือ การควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์ การควบคุมการหมุนของใบกวน การควบคุมการวัดอุณหภูมิ และการควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเครื่องทดสอบ

4.3.1 การควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์

งานวิจัยนี้ได้จ่ายกระแสไฟเข้าสู่ฮีตเตอร์ ในช่วง 80 ถึง 120 องศาเซลเซียส ฮีตเตอร์ที่ใช้เป็นฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3 เฟส กำลังไฟ 1500 วัตต์ สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าที่เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า (Voltage Variable Transformer) ในช่วง 0 ถึง 380 โวลต์ เพื่อให้การจ่ายกระแสไฟตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน จึงต้องควบคุมการจ่ายกระแสไฟโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้เขียน

โปรแกรมแมทแลป เพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในค่าที่กำหนด ภาพที่ 4.7 ได้แสดงให้เห็นถึงชุดฮีทเตอร์ ทางด้านขวามือ และปลอกรับความร้อนทางด้านซ้ายมือ



รูปที่ 4.7 เทอร์โมเวล และฮีทเตอร์[1]



รูปที่ 4.8 เครื่องปรับโวลท์ (Voltage Variable Transformer) [1]

4.3.2 การควบคุมการหมุนของใบกวน

ชุดใบกวนของเครื่องทดสอบ ประกอบไปด้วย ชุดใบพัด ชุดมอเตอร์ และชุดควบคุมการทำงาน ชุดใบพัดและเพลาทำจากสแตนเลสสตีล เกรด 304 (SUS304) ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี และไม่เป็นสนิม ส่วนชุดมอเตอร์ เป็นมอเตอร์ขนาด 100W ความเร็วรอบ 1500 rpm แต่เนื่องจากเป็นมอเตอร์เตอร์แบบเกียร์รีดิวเซอร์ มีอัตราทดรอบที่ 1:30 ดังนั้นความเร็วรอบเพลาก็เหลืออยู่ 50 rpm

ส่วนการควบคุมมอเตอร์ ทำได้โดยจ่ายไฟ 220 VAC ซึ่งควบคุมโดยการเปิดสวิตช์ เพื่อจ่ายไฟเข้ามอเตอร์ การที่ต้องมีใบกวนเพื่อให้ความร้อนทั่วถึงกันไปตลอดทั้งเครื่องทดสอบ

4.3.3 การควบคุมการวัดอุณหภูมิ

เพื่อให้สามารถนำค่าอุณหภูมิของของเหลวดำ และฮีทเตอร์มาทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ทางความร้อน และค่าความต้านทานความร้อนได้ จำเป็นต้องมีการติดตั้ง อุปกรณ์ตรวจวัดความร้อนและส่งค่าความร้อนเข้าสู่ชุดควบคุม ผู้ทดลองได้ติดตั้ง RTD มาทำการวัดอุณหภูมิ เนื่องจากมีค่าความแม่นยำที่สูง และหาซื้อง่ายในท้องตลาด โดยสัญญาณที่ออกจาก RTD จะมีค่าในช่วง 4-20 mA และถูกส่งไปยังชุดแปลงสัญญาณ เพื่อแปลงสัญญาณจาก 0-5 VDC ก่อนส่งต่อไปยังตัวรับส่งข้อมูล DAQ เพื่อส่งข้อมูลต่อไปยังคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 4.9 เทอร์โมคัปเปิลเปิด RTD [1]



รูปที่ 4.10 ตัวแปลงสัญญาณจากกระแส 4-20 มิลลิแอมป์ เป็น 0-5 โวลท์



รูปที่ 4.11 กล้องรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ)

4.3.4 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

เมื่ออุณหภูมิของของเหลวค่าเพิ่มขึ้นถึงค่ากำหนด วงจรควบคุมจะสั่งการให้ฮีตเตอร์หยุดเพิ่มความร้อนให้แก่ระบบ แต่ความร้อนที่ยังหลงเหลือภายในฮีตเตอร์ยังคงไม่หยุดการถ่ายเทออกมาที่ของเหลวค่า ดังนั้นจึงต้องทำการถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบโดยน้ำคูลลิ่ง ซึ่งถูกส่งมาจากเครื่องทำน้ำเย็น โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 16 °C เครื่องทำน้ำเย็นถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ควบคุม เมื่อได้รับสัญญาณอุณหภูมิของของเหลวค่าเกินค่ากำหนด



รูปที่ 4.12 เครื่องทำน้ำเย็น (Chilled Water Machine) [1]

4.3.5 การควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบโดยใช้โปรแกรมแมทแลป

คำสั่งที่ใช้ควบคุมระบบได้ถูกเขียนขึ้นมาดังข้อมูลด้านล่าง โดยเป็นตัวอย่างที่ตั้งค่าอุณหภูมิของเหลวที่ 120°C [2]

```

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) = 250.16*(Temp(2))-182.344;
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) = 250.16*(V(2))-182.344;%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;
```

ในชุดคำสั่งได้ถูกเขียนไว้เพื่อให้อ่านค่าทุก 10 วินาที เมื่อทำการเฝ้าติดตามผลไปถึง 24 ชั่วโมงได้พบว่า แนวโน้มการเพิ่มของอุณหภูมิของฮีตเตอร์สูงขึ้นเรื่อยๆ จากค่าที่ได้ตั้งไว้ จึงทำการหยุดเครื่อง และทำการทดสอบในอุณหภูมิอื่นๆ ที่สนใจ

บทที่ 5

การสร้างแบบจำลองกระบวนการระเหยของ ของเหลวดำโดยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS)

5.1 หลักการสร้างแบบจำลองกระบวนการระเหย

การระเหยนํ้าด้วยโปรแกรมไฮซิส (HYSYS) ได้ใช้ข้อมูลจากกระบวนการระเหยในเครื่องทดสอบตะกรัน โดยนำเอาค่าของอุณหภูมิที่ 80°C 100°C และ 120°C มาทำการทดสอบความแตกต่างของอุณหภูมิ เมื่อการถ่ายรอนลดลง อันเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในกรณีที่มีตะกรันเกิดขึ้น เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตะกรันเกิดขึ้นในอุณหภูมิเริ่มต้น

แบบจำลองนี้ได้ทำการนำคุณสมบัติของ นํ้าและ โซเดียมไฮดรอกไซด์มาเป็นตัวแทนของระบบ และใช้อุปกรณ์ Shell & tube heat exchanger และ Separator มาเป็นตัวแทนของ evaporator ในกระบวนการจริง

ในการประเมินประสิทธิภาพ ได้ทำการแยกการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องระเหยแต่ละตัว เนื่องจากจะสามารถทำให้อธิบายประสิทธิภาพได้ง่ายแก่การเข้าใจ โดยที่อุณหภูมิ 80°C ใช้ Evaporator Effect3 ที่อุณหภูมิ 100°C ใช้ Evap Effect 2 และที่อุณหภูมิ 100°C ใช้ Evap Effect 1D มาทำการประเมิน

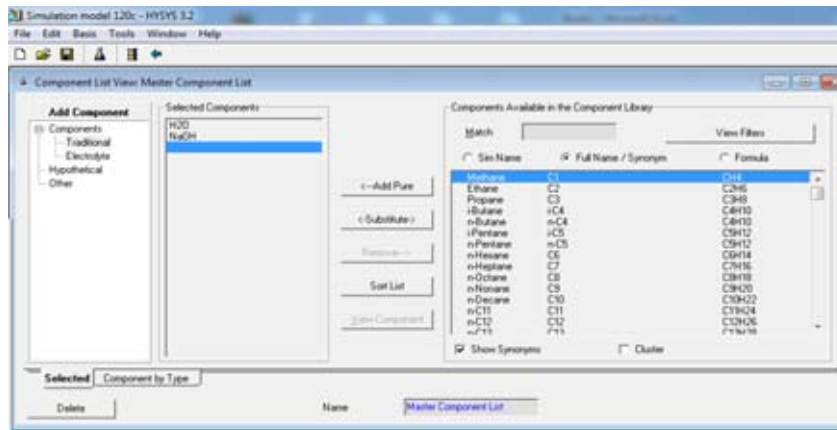
5.2 สมมุติฐานการจำลองกระบวนการระเหย

1. ที่สภาวะคงตัว (Steady State)
2. ไม่มีการสูญเสียความร้อน
3. ไม่มีการสูญเสียแรงดัน (Pressure drop) ของระบบ
4. ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีและปฏิบัติตามขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

5.3 วิธีการสร้างแบบจำลองกระบวนการระเหย

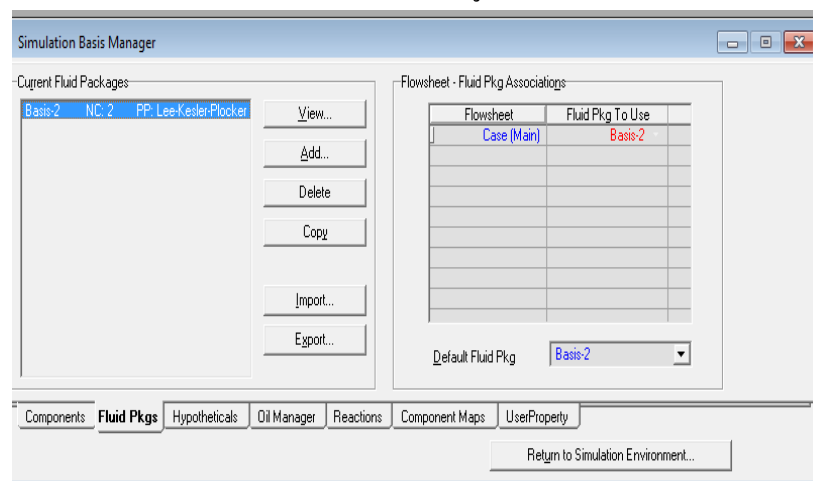
1. เปิดการใช้งานโปรแกรมไฮซิส (HYSYS)
2. ใส่ชื่อสารในระบบการทดสอบได้แก่ H₂O และ NaOH ที่ช่อง add components

ดังรูปที่ 5.1



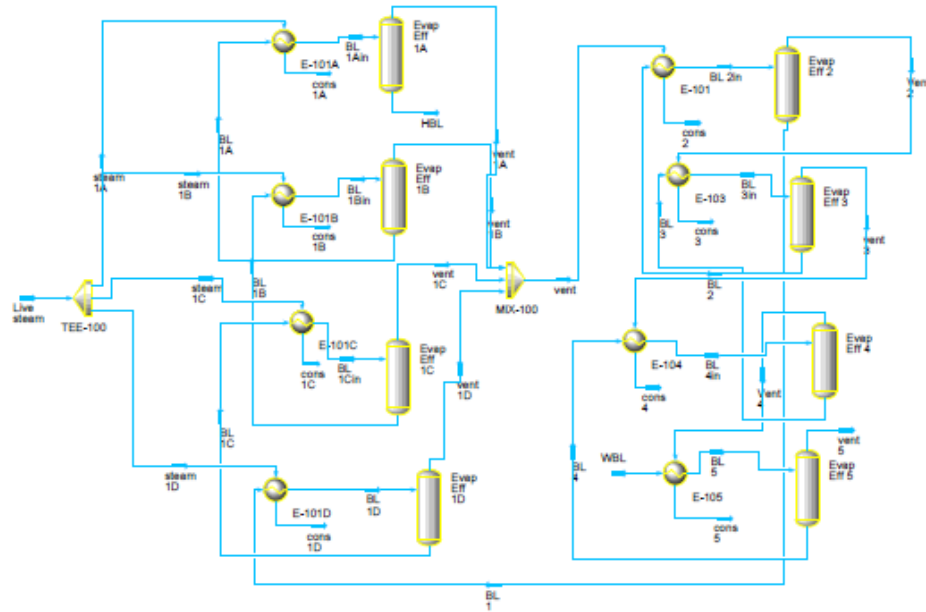
รูปที่ 5.1 การใส่ชื่อสารในระบบการจำลองกระบวนการระเหย

1. ใส่ Fluid package โดยเลือก Pengrobinson ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การใส่ Fluid package ในระบบการจำลองกระบวนการระเหย

2. เข้าสู่ Simulation environment และทำการเลือกอุปกรณ์ในการจำลองจาก Pallet ด้านขวา โดยอุปกรณ์ที่ใช้คือ Heat exchanger ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้ความร้อนแก่สายป้อนเข้าสู่การจำลองกระบวนการระเหย และ Phase Separator ทำหน้าที่แทนเครื่องระเหยความร้อนของระบบจริง พร้อมทั้งตั้งชื่ออุปกรณ์ และต่อทั้งหมด ใส่ค่าของอุณหภูมิ ของสารป้อน

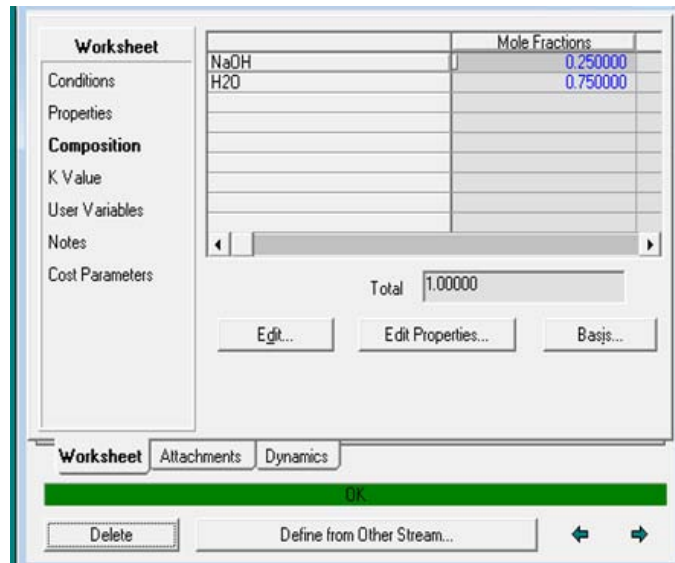


รูปที่ 5.3 การใส่อุปกรณ์และระบบท่อในการจำลองกระบวนการระเหย

Worksheet	
Stream Name	Raw mat'l
Vapour / Phase Fraction	0.0000
Temperature [C]	30.00
Pressure [kPa]	50.00
Molar Flow [kgmole/h]	1.276e+004
Mass Flow [kg/h]	3.000e+005
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h] 244.3
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole] -2.567e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C] 7.100
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h] -3.275e+009
	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h] 338.1
	Fluid Package Basis-1

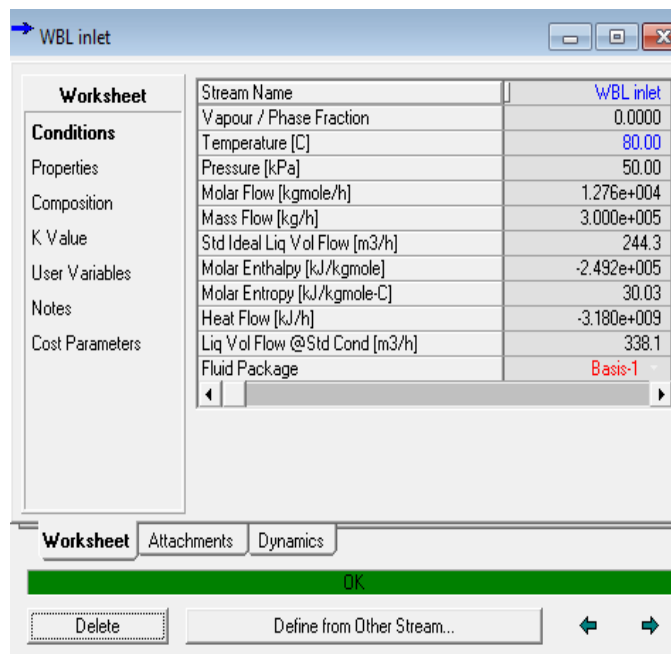
รูปที่ 5.4 การใส่ค่าของอุณหภูมิสายป้อน

และใส่ค่า อัตราส่วนของ น้ำ กับ โซดาไฟ (NaOH)



รูปที่ 5.5 การใส่ค่าอัตราส่วน น้ำ ต่อ โซดาไฟ

3. ใส่ค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อหาค่าพลังงานความร้อน และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 5.6 การใส่ค่าอุณหภูมิของของเหลว

4. จัดบันทึกค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน หลังจากนั้นลบค่าอุณหภูมิออก แล้วทำการใส่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่จัดบันทึกไว้แทน
5. ทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นที่เปลี่ยนไป
6. นำค่าการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไปคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานตะกรันแล้วบันทึกค่าเพื่อหาความสัมพันธ์
7. ทำตามกระบวนการเดิมสำหรับกรณีอุณหภูมิอื่นๆ
8. ทำการกำหนดค่าอุณหภูมิให้คงที่ แล้วทำการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำที่เปลี่ยนไป
9. ทำการประเมินค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าค่าเริ่มต้น
- 10.สรุปผลการทดลอง

บทที่ 6

ผลการทดลอง

การสรุปผลการทดลอง สามารถ แบ่งออกได้ 2 ส่วนคือ ส่วนการทดลองจากเครื่องกำเนิด
ตะกอนของของเหลวดำ และส่วนการทดลองโดยโปรแกรมไฮซิส

6.1 ผลการทดลองจากเครื่องทดสอบตะกอนของของเหลวดำ

เพื่อให้สามารถทราบค่าความต้านทานในการเกิดตะกอน สมการที่นำมาใช้สำหรับป้อนค่า
เข้าไปในการจำลองสภาวะการระเหยคือ

$$U = \frac{Q}{A(T_i - T_o)} \quad (6.1)$$

โดยที่

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W/m^2\text{C}$)

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน(W)

A คือ พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน(m^2)

T_i คือ อุณหภูมิภายในฮีตเตอร์ ($^{\circ}C$)

T_o คือ อุณหภูมิของของเหลว ($^{\circ}C$)

แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานของ
ตะกอน (Fouling resistance: R_f) ได้จากสมการ

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \quad (6.2)$$

โดยที่

R_f คือ ค่าความต้านทานตะกอนรวม, $m^2\text{C}/W$

U_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวมีตะกอน, $W/m^2\text{C}$

U_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวยังไม่มีตะกอน, $W/m^2\text{C}$

หลังจากเก็บค่าทำการทดลองทั้งสิ้น 24 ชั่วโมง แล้วทำการนำค่าจากการทดลองมาคำนวณ และได้ผลการทดลองเทียบกับเวลาดังตารางที่ 6.1 6.2 6.3 6.4 และ 6.5

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค่าที่ 80 องศาเซลเซียส

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
2.5	80.48	347.50	267.02	240.82	240.82	0
3	80.84	348.93	268.09	240.82	239.85	1.67099E-05
3.5	81.49	349.15	267.66	240.82	240.24	9.97068E-06
4	80.84	350.46	269.62	240.82	238.49	4.05288E-05
4.5	81.82	353.69	271.86	240.82	236.53	7.53222E-05
5	81.17	355.34	274.17	240.82	234.53	0.000111274
5.5	80.84	360.38	279.54	240.82	230.03	0.000194783
6	83.14	363.15	280.01	240.82	229.64	0.000202082
6.5	82.15	368.69	286.53	240.82	224.42	0.000303471
7	83.80	370.95	287.15	240.82	223.93	0.0003131
7.5	81.52	371.61	290.09	240.82	221.67	0.000358735
8	82.18	372.95	290.77	240.82	221.14	0.000369437
8.5	82.18	374.52	292.35	240.82	219.95	0.000393886
9	81.12	376.79	295.67	240.82	217.48	0.000445608
9.5	81.81	378.14	296.32	240.82	217.00	0.00045575
10	81.81	380.14	298.32	240.82	215.55	0.000486852
10.5	81.17	382.83	301.67	240.82	213.16	0.000538799
11	80.21	382.06	301.84	240.82	213.04	0.000541555
11.5	80.84	381.83	300.99	240.82	213.64	0.000528369
12	80.84	383.36	302.53	240.82	212.55	0.000552188
12.5	81.47	385.67	304.20	240.82	211.39	0.000578185
13	81.14	385.98	304.83	240.82	210.94	0.00058807
13.5	81.46	386.28	304.82	240.82	210.95	0.000587899
14	81.14	388.59	307.45	240.82	209.15	0.000628701

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกั่วของเหลวค้ำที่ 80 องศาเซลเซียส(ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
14.5	81.17	390.24	309.08	240.82	208.05	0.000654036
15	79.52	392.36	312.84	240.82	205.54	0.000712636
15.5	78.86	393.28	314.42	240.82	204.51	0.00073717
16	80.84	392.24	311.40	240.82	206.49	0.00069026
16.5	80.18	393.98	313.80	240.82	204.92	0.000727472
17	80.18	394.98	314.80	240.82	204.27	0.000743023
17.5	80.18	394.59	314.41	240.82	204.52	0.000737
18	83.47	395.89	312.42	240.82	205.82	0.0007061
18.5	82.81	396.59	313.78	240.82	204.93	0.00072713
19	82.11	398.93	316.83	240.82	202.96	0.000774617
19.5	82.46	399.20	316.74	240.82	203.01	0.000773256
20	81.82	397.20	315.38	240.82	203.89	0.000752022
20.5	80.18	398.93	318.76	240.82	201.73	0.000804599
21	79.52	399.81	320.29	240.82	200.76	0.000828503
21.5	82.15	399.16	317.01	240.82	202.84	0.000777374
22	80.18	397.20	317.02	240.82	202.83	0.00077763
22.5	78.53	399.81	321.28	240.82	200.15	0.000843868
23	78.86	399.81	320.95	240.82	200.35	0.000838746
23.5	81.17	399.81	318.65	240.82	201.80	0.000802896
24	81.17	400.88	319.72	240.82	201.12	0.000819536

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค้ำที่ 90 องศาเซลเซียส

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
2.2	90.03	394.43	304.40	218.42	218.42	0
2.5	93.11	394.56	301.45	218.42	213.31	0.000109627
3	91.38	394.46	303.08	218.42	212.17	0.000134913
3.5	90.56	394.90	304.34	218.42	211.29	0.000154495
4	91.57	396.83	305.26	218.42	210.65	0.000168827
4.5	91.75	400.19	308.44	218.42	208.48	0.000218273
5	90.41	403.29	312.87	218.42	205.52	0.000287284
5.5	90.06	406.03	315.97	218.42	203.51	0.000335496
6	90.37	408.04	317.67	218.42	202.42	0.000361861
6.5	90.36	410.14	319.78	218.42	201.09	0.000394607
7	90.06	412.50	322.44	218.42	199.43	0.000436048
7.5	90.72	415.82	325.10	218.42	197.79	0.00047742
8	92.36	418.91	326.55	218.42	196.92	0.000499923
8.5	90.34	420.15	329.81	218.42	194.97	0.000550652
9	92.36	422.59	330.23	218.42	194.72	0.000557129
9.5	92.33	424.95	332.62	218.42	193.32	0.000594382
10	93.35	426.16	332.81	218.42	193.21	0.000597356
10.5	90.06	426.05	336.00	218.42	191.38	0.000646877
11	89.07	426.45	337.39	218.42	190.59	0.000668462
11.5	90.06	432.08	342.02	218.42	188.01	0.000740579
12	87.42	427.25	339.83	218.42	189.22	0.000706511
12.5	90.06	432.23	342.17	218.42	187.93	0.000742862
13	89.07	433.93	344.86	218.42	186.46	0.000784763
13.5	92.69	435.64	342.95	218.42	187.50	0.000754962
14	93.35	437.35	344.00	218.42	186.93	0.000771255
14.5	93.35	435.79	342.44	218.42	187.78	0.000747002

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค้ำที่ 90 องศาเซลเซียส(ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
15	92.69	438.15	345.45	218.42	186.14	0.000793939
15.5	91.37	439.85	348.48	218.42	184.53	0.00084096
16	90.72	440.91	350.19	218.42	183.62	0.000867581
16.5	91.05	443.92	352.87	218.42	182.23	0.000909311
17	90.72	441.05	350.34	218.42	183.55	0.000869865
17.5	87.42	440.06	352.64	218.42	182.35	0.000905725
18	89.73	438.59	348.86	218.42	184.32	0.000846883
18.5	91.05	441.60	350.55	218.42	183.43	0.000873248
19	92.69	443.31	350.61	218.42	183.40	0.000874176
19.5	94.34	446.97	352.63	218.42	182.35	0.000905577
20	91.37	443.45	352.08	218.42	182.64	0.000896945
20.5	94.67	447.77	353.10	218.42	182.11	0.000912896
21	91.70	445.56	353.85	218.42	181.72	0.00092458
21.5	91.05	451.18	360.14	218.42	178.55	0.001022304
22	88.41	447.66	359.25	218.42	178.99	0.001008551
22.5	93.35	452.64	359.29	218.42	178.97	0.001009052
23	90.39	451.08	360.69	218.42	178.28	0.001030894
23.5	89.73	448.86	359.14	218.42	179.05	0.001006727
24.00	90.73	451.26	360.54	218.42	178.35	0.001028499

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค้ำที่ 100 องศาเซลเซียส

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
1.6	100.58	415.91	315.33	203.93	203.93	0
2	100.64	425.95	325.31	203.93	197.67	0.000155254
2.5	100.41	426.95	326.54	203.93	196.92	0.000174455
3	100.55	429.05	328.50	203.93	195.75	0.000204898
3.5	100.33	431.16	330.83	203.93	194.37	0.000241033
4	100.53	435.26	334.73	203.93	192.10	0.000301782
4.5	100.56	440.45	339.89	203.93	189.19	0.000381997
5	100.60	442.48	341.88	203.93	188.09	0.000412954
5.5	101.22	445.66	344.45	203.93	186.69	0.00045284
6	101.55	449.46	347.92	203.93	184.82	0.000506813
6.5	100.22	450.88	350.66	203.93	183.38	0.000549455
7	101.57	457.55	355.98	203.93	180.64	0.000632268
7.5	101.91	460.70	358.79	203.93	179.22	0.000675897
8	98.95	461.85	362.90	203.93	177.19	0.000739825
8.5	98.62	462.91	364.29	203.93	176.51	0.000761522
9	96.64	463.67	367.03	203.93	175.20	0.000804062
9.5	97.94	464.51	366.58	203.93	175.41	0.00079702
10	100.91	470.31	369.40	203.93	174.07	0.000840938
10.5	100.58	471.50	370.92	203.93	173.36	0.000864525
11	100.58	472.14	371.56	203.93	173.06	0.000874446
11.5	100.91	473.02	372.11	203.93	172.81	0.000883025
12	100.89	475.43	374.54	203.93	171.68	0.000920919
12.5	99.28	476.62	377.34	203.93	170.41	0.000964431
13	100.57	476.03	375.46	203.93	171.26	0.000935184
13.5	101.91	478.83	376.92	203.93	170.60	0.000957869

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกั่วของเหลวค่าที่ 100 องศาเซลเซียส(ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
14	101.58	482.21	380.62	203.93	168.94	0.001015431
14.5	102.57	482.35	379.78	203.93	169.32	0.00100235
15	101.91	482.50	380.59	203.93	168.96	0.001014877
15.5	101.91	484.61	382.69	203.93	168.03	0.001047633
16	100.58	485.83	385.25	203.93	166.91	0.001087401
16.5	99.97	485.55	385.58	203.93	166.77	0.001092526
17	99.93	486.74	386.81	203.93	166.24	0.001111739
17.5	99.60	487.58	387.98	203.93	165.74	0.001129931
18	99.36	487.95	388.59	203.93	165.48	0.001139389
18.5	100.21	490.41	390.20	203.93	164.80	0.001164373
19	100.30	491.55	391.25	203.93	164.35	0.001180735
19.5	96.64	492.31	395.67	203.93	162.52	0.001249421
20	99.28	493.76	394.49	203.93	163.00	0.001231048
20.5	100.93	495.83	394.91	203.93	162.83	0.001237567
21	99.28	498.45	399.17	203.93	161.09	0.001303844
21.5	97.63	500.86	403.23	203.93	159.47	0.001366972
22	102.57	502.27	399.70	203.93	160.88	0.001312118
22.5	98.55	501.34	402.79	203.93	159.64	0.001360169
23	104.22	503.26	399.04	203.93	161.14	0.001301865
23.50	103.23	504.10	400.87	203.93	160.41	0.001330301
24.00	103.23	505.60	402.37	203.93	159.81	0.001353628

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค้ำที่ 110 องศาเซลเซียส

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
1.3	111.25	425.26	314.01	204.78	204.78	0
1.5	115.21	434.48	319.27	204.78	201.41	8.18052E-05
2	113.89	440.68	326.79	204.78	196.77	0.000198726
2.5	113.23	444.71	331.48	204.78	193.99	0.000271695
3	109.94	447.36	337.43	204.78	190.57	0.000364151
3.5	109.96	451.82	341.86	204.78	188.10	0.000433056
4	109.28	453.59	344.31	204.78	186.76	0.000471199
4.5	110.57	455.32	344.75	204.78	186.52	0.00047807
5	109.96	461.33	351.37	204.78	183.01	0.000580971
5.5	110.60	465.14	354.54	204.78	181.37	0.000630309
6	109.61	470.23	360.62	204.78	178.31	0.000724805
6.5	110.91	472.48	361.57	204.78	177.84	0.000739621
7	110.90	475.23	364.33	204.78	176.50	0.000782545
7.5	111.23	478.07	366.84	204.78	175.29	0.000821538
8	111.89	481.94	370.05	204.78	173.77	0.000871489
8.5	111.91	484.14	372.23	204.78	172.75	0.000905344
9	110.56	485.72	375.16	204.78	171.40	0.000950889
9.5	110.91	488.90	377.98	204.78	170.12	0.000994886
10	109.94	490.09	380.15	204.78	169.15	0.001028571
10.5	109.61	493.52	383.92	204.78	167.49	0.001087131
11	108.62	495.14	386.52	204.78	166.36	0.001127624
11.5	109.28	497.51	388.23	204.78	165.63	0.001154281
12	111.25	498.10	386.85	204.78	166.22	0.001132756
12.5	110.60	501.29	390.70	204.78	164.59	0.001192592
13	109.61	503.53	393.92	204.78	163.24	0.00124273

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวดำที่ 110 องศาเซลเซียส(ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
13.5	110.58	504.40	393.82	204.78	163.28	0.001241162
14	110.24	506.48	396.23	204.78	162.29	0.001278692
14.5	110.56	505.71	395.15	204.78	162.73	0.001261861
15	110.89	507.89	397.00	204.78	161.97	0.001290595
15.5	110.90	508.48	397.58	204.78	161.74	0.001299558
16	111.25	509.01	397.75	204.78	161.67	0.001302311
16.5	111.88	510.51	398.63	204.78	161.31	0.001316022
17	109.61	513.97	404.36	204.78	159.02	0.001405055
17.5	109.91	514.20	404.28	204.78	159.05	0.001403877
18	109.28	516.77	407.49	204.78	157.80	0.001453694
18.5	111.25	520.56	409.30	204.78	157.10	0.0014819
19	109.28	522.37	413.10	204.78	155.66	0.001540903
19.5	109.61	524.58	414.97	204.78	154.96	0.001570096
20	110.60	525.48	414.88	204.78	154.99	0.001568699
20.5	111.91	527.67	415.75	204.78	154.67	0.001582239
21	111.58	528.28	416.70	204.78	154.32	0.001596954
21.5	111.91	529.72	417.81	204.78	153.91	0.001614185
22	112.90	530.93	418.03	204.78	153.82	0.001617653
22.50	113.56	532.85	419.29	204.78	153.36	0.001637217
23.00	113.89	533.00	419.11	204.78	153.43	0.00163449
23.50	112.90	535.21	422.31	204.78	152.27	0.001684169
24.00	113.90	537.77	423.87	204.78	151.70	0.001708497

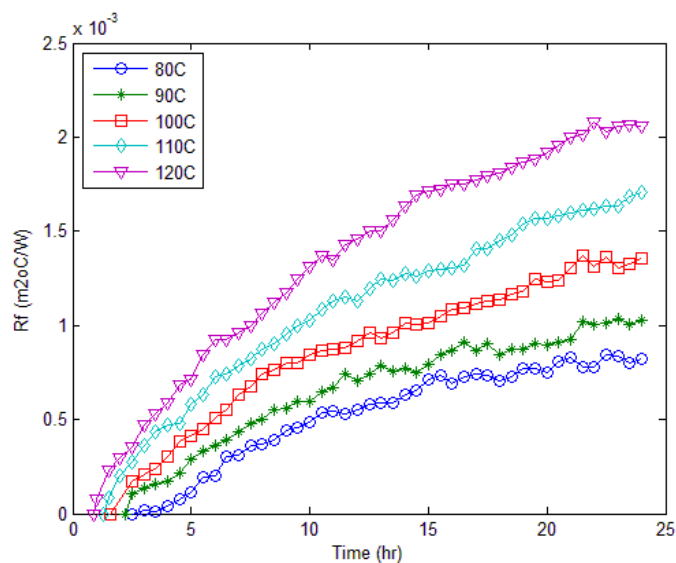
ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค้ำที่ 120 องศาเซลเซียส

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_f (m ² °C/W)
0.9	120.05	460.6575531	340.6075531	188.789127	188.789127	0
1	120.1372647	465.69174	345.5544753	188.789127	186.0864414	7.69314E-05
1.5	120.2665922	475.8790896	355.6124974	188.789127	180.8232362	0.000233347
2	121.2545745	480.7575531	359.5029786	188.789127	178.8663973	0.00029385
2.5	119.2305392	482.8385774	363.6080382	188.789127	176.8470327	0.000357689
3	119.6079373	490.49174	370.8838028	188.789127	173.3777591	0.000470837
3.5	120.9252471	495.4512279	374.5259808	188.789127	171.6917007	0.000527478
4	120.2425569	498.7575531	378.5149962	188.789127	169.8823118	0.000589513
4.5	119.9372647	504.4107157	384.473451	188.789127	167.2495264	0.000682175
5	120.9252471	507.49174	386.566493	188.789127	166.3439635	0.000714725
5.5	120.9252471	515.7575531	394.832306	188.789127	162.8615532	0.000843269
6	119.6079373	519.49174	399.8838028	188.789127	160.804219	0.000921827
6.5	121.583902	521.4512279	399.8673259	188.789127	160.8108451	0.000921571
7	121.2545745	523.7575531	402.5029786	188.789127	159.7578305	0.000962559
7.5	120.9252471	525.7575531	404.832306	188.789127	158.8386145	0.000998783
8	120.9252471	530.1043905	409.1791434	188.789127	157.1512225	0.001066382
8.5	119.9372647	532.7575531	412.8202884	188.789127	155.7651221	0.001123007
9	119.9372647	535.7575531	415.8202884	188.789127	154.6413304	0.001169661
9.5	120.2665922	540.7980653	420.5314731	188.789127	152.9088944	0.001242927
10	120.5959196	545.4107157	424.8147961	188.789127	151.3671445	0.001309538
10.5	121.2545745	550.1449026	428.8903281	188.789127	149.9287776	0.001372918
11	122.9012118	550.4107157	427.5095039	188.789127	150.4130365	0.001351445
11.5	119.2786098	551.7170409	432.4384311	188.789127	148.6986308	0.001428096
12	120.9252471	555.49174	434.566493	188.789127	147.9704571	0.001461191
12.5	120.2665922	557.4512279	437.1846357	188.789127	147.0843149	0.001501906

ตารางที่ 6.5 ผลการทดสอบการก่อดัวของตะกั่วของเหลวค่าที่ 120 องศาเซลเซียส(ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	ΔT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_f (m ² °C/W)
13	123.2305392	560.4512279	437.2206886	188.789127	147.0721864	0.001502467
13.5	121.9132294	563.1043905	441.191161	188.789127	145.7486194	0.001564213
14	120.2665922	565.7575531	445.4909609	188.789127	144.3418795	0.001631081
14.5	119.2786098	568.6765287	449.3979189	188.789127	143.0870057	0.00169184
15	119.2786098	570.0638783	450.7852685	188.789127	142.6466371	0.001713415
15.5	120.2665922	571.7575531	451.4909609	188.789127	142.4236766	0.001724389
16	119.2786098	572.5322522	453.2536424	188.789127	141.8697978	0.001751801
16.5	119.2786098	572.3702035	453.0915937	188.789127	141.9205377	0.001749281
17	118.9492824	573.7170409	454.7677586	188.789127	141.3974526	0.001775348
17.5	119.2786098	575.4107157	456.1321059	188.789127	140.9745154	0.001796565
18	119.2786098	576.3702035	457.0915937	188.789127	140.6785937	0.001811487
18.5	119.2786098	578.1449026	458.8662928	188.789127	140.1345089	0.001839086
19	118.9492824	579.6765287	460.7272464	188.789127	139.5684825	0.001868026
19.5	119.9372647	581.3702035	461.4329388	188.789127	139.3550334	0.001879001
20	119.6079373	583.4107157	463.8027784	188.789127	138.6429871	0.001915855
20.5	119.6079373	585.7575531	466.1496158	188.789127	137.9449868	0.001952351
21	117.6319725	586.7170409	469.0850684	188.789127	137.0817511	0.001998002
21.5	120.5959196	590.6765287	470.0806091	188.789127	136.7914382	0.002013484
22	119.9372647	594.4107157	474.473451	188.789127	135.5249751	0.002081799
22.5	120.2665922	591.1449026	470.8783105	188.789127	136.5597038	0.002025889
23	120.9252471	593.7170409	472.7917938	188.789127	136.0070193	0.002055646
23.5	121.2545745	594.7575531	473.5029786	188.789127	135.8027415	0.002066706
24	122.2545745	595.3702035	473.115629	188.789127	135.913926	0.002060683

และเมื่อนำผลการทดลองที่บันทึกค่าได้นั้นมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆกัน จะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาผ่านไป ค่าความต้านทานของตะกรันมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนตะกรันทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง และเมื่อค่าความต้านทานตะกรันเพิ่มสูงขึ้น ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของตะกรันเทียบกับเวลานั้นจะมีลักษณะดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันกับเวลา ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C 90°C 100°C 110°C และ 120°C

จากรูปที่ 6.1 เมื่อทำการวิเคราะห์ ลักษณะกราฟ พบว่าเมื่อทำการทดสอบไป 24 ชั่วโมง พบว่าค่าความต้านทานตะกรัน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากตะกรันมีความหนามากขึ้นนั่นเอง โดยที่เมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 80°C การเกิดของตะกรันจะช้ากว่าและมีอัตราการเพิ่มของตะกรันที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิ 90°C และช้ากว่าอุณหภูมิที่ 100°C 110°C และ 120°C ตามลำดับ

และถ้าพิจารณาจากรูปที่ 6.1 ถ้ามีการวางเป้าหมายในการทำความสะอาดเครื่องระเหยไว้ที่ 0.0005 m²oC/W จะพบได้ว่า ควรทำความสะอาดเครื่องที่ทำงานที่อุณหภูมิสูงๆ ก่อน เนื่องจากจะมีการก่อตัวของตะกรันเร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ และควรทำความสะอาดบ่อยกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การประเมินถึงความคุ้มค่าในการหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาด เนื่องจากมีหลายปัจจัยในการนำมาพิจารณา เช่น ยอดการผลิต ค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด เป็นต้น

จากผลการทดลองได้ทำการนำค่าจากการทดลองมาทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

โดยวิธีการประมาณค่าแบบถดถอยไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear fit curve analysis) และเมื่อพิจารณากราฟความต้านทานตะกรันกับเวลา พบว่ากราฟมีลักษณะเป็นการเกิดตะกรันแบบ asymptotic fouling ซึ่งมีสมการทั่วไปดังที่ได้กล่าวในสมการ 2.20

$$R_{ft} = R_{f\infty}(1 - e^{-\beta t}) + C \quad (6.3)$$

โดยที่

R_{ft} คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เวลา t

$R_{f\infty}$ คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เวลาเข้าใกล้อนันต์

β คือ ค่าคงที่ของระบบ

เมื่อทำการคำนวณเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี Fit curve วิธีดังกล่าวปรากฏว่าผลตามเป็นไปตามสมการที่ 6.4 ถึง 6.8

$$R_f = 0.00131(1 - e^{-0.10339t}) - 0.00037 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 80^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 2.5 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.4)$$

$$R_f = 0.00138(1 - e^{-0.09388t}) - 0.00023 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 90^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 2.2 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.5)$$

$$R_f = 0.00174(1 - e^{-0.08309t}) - 0.00017 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 100^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 1.6 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.6)$$

$$R_f = 0.00210(1 - e^{-0.07726t}) - 0.00011 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 110^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 1.3 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.7)$$

$$R_f = 0.00258(1 - e^{-0.06610t}) - 0.00010 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 120^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 0.9 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.8)$$

จากรูปแบบของสมการทำให้สามารถนำไปประยุกต์เพื่อหา ค่าความต้านทานที่เวลาใดๆ ซึ่งทำให้สามารถทำนายถึงการเกิดตะกรันในอนาคตได้ นอกจากนั้นก็จะสามารถทำการวางแผนในการทำความสะอาดเพื่อขจัดตะกรันในระบบในอุตสาหกรรมได้

และเพื่อเป็นการตรวจสอบความแม่นยำของสมการ ผู้วิจัยทำการตรวจสอบหาค่าความแม่นยำของสมการกับผลการทดลอง โดยวิธีการหาคุณภาพของสมการ(The quality of a curve fit) จากสมการดังกล่าวนี้

$$r^2 = 1 - \frac{J}{S} \quad (6.9)$$

โดยที่

r^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหาแบบจำลอง(coefficient of determination, r-squared value).

J คือ ผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับผลการทดลองกำลังสอง(sum of

the squares of the residuals) ตามสมการ

$$J = \sum_{i=1}^m [f(x_i) - y_i]^2 \quad (6.10)$$

และ S คือ ผลรวมของค่าความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับค่าเฉลี่ยผลการทดลองกำลังสอง (sum of the squares of the deviation) ตามสมการ

$$S = \sum_{i=1}^m [y_i - \bar{y}]^2 \quad (6.11)$$

เมื่อ

$F(x_i)$ คือ ค่าจากแบบจำลอง

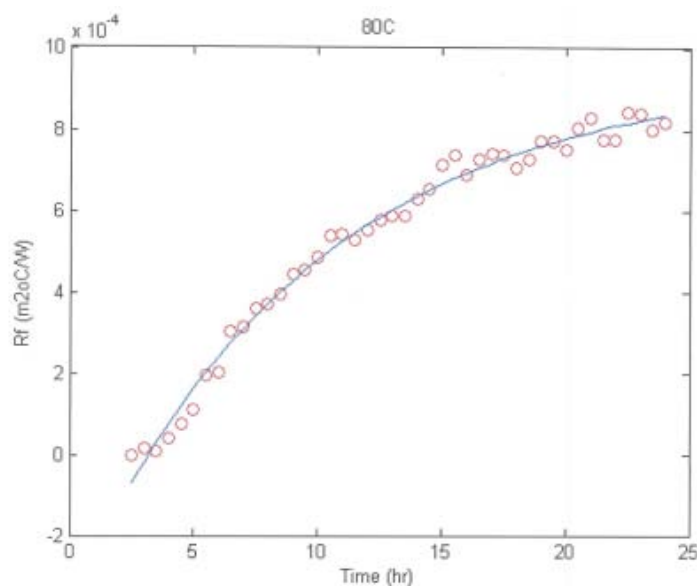
y_i คือ ค่าจากผลการทดลอง

แบบจำลองที่ได้จะมีความแม่นยำเมื่อค่า r^2 เข้าใกล้ 1 จากวิธีการดังกล่าวค่า r^2 ของแบบจำลองปรากฏดังนี้

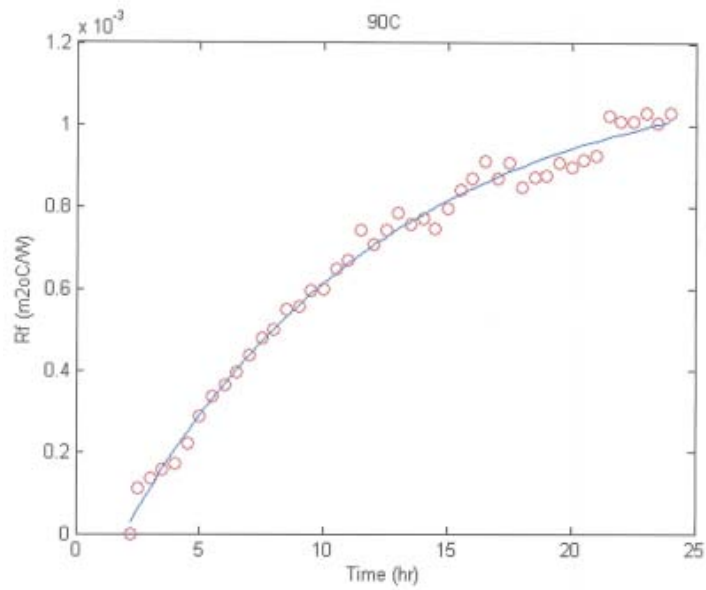
จากสมการ 6.4 ค่า $r^2 = 0.9886$ จากสมการ 6.5 ค่า $r^2 = 0.9900$ จากสมการ 6.6

ค่า $r^2 = 0.9911$ จากสมการ 6.6 ค่า $r^2 = 0.9945$ จากสมการ 6.6 ค่า $r^2 = 0.9975$

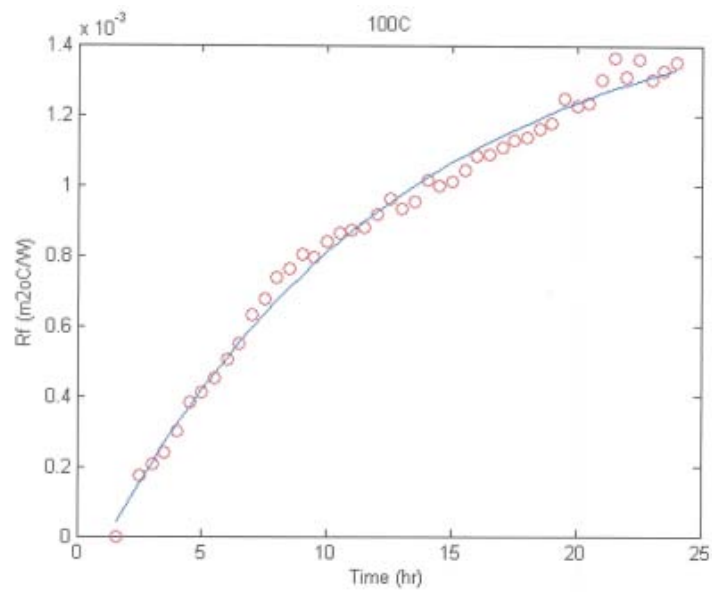
การหาแบบจำลองได้จากการเขียนคำสั่งลงบน โปรแกรมแมทแล็บ โดยชุดคำสั่งได้ระบุที่ภาคผนวก ค. และค่า หาได้จากภาคผนวก ง และเมื่อทำการนำผลการทดลองมาพลอตเทียบกับแบบจำลอง จะปรากฏดังรูปที่ 6.2 6.3 6.4 6.5 และ 6.6



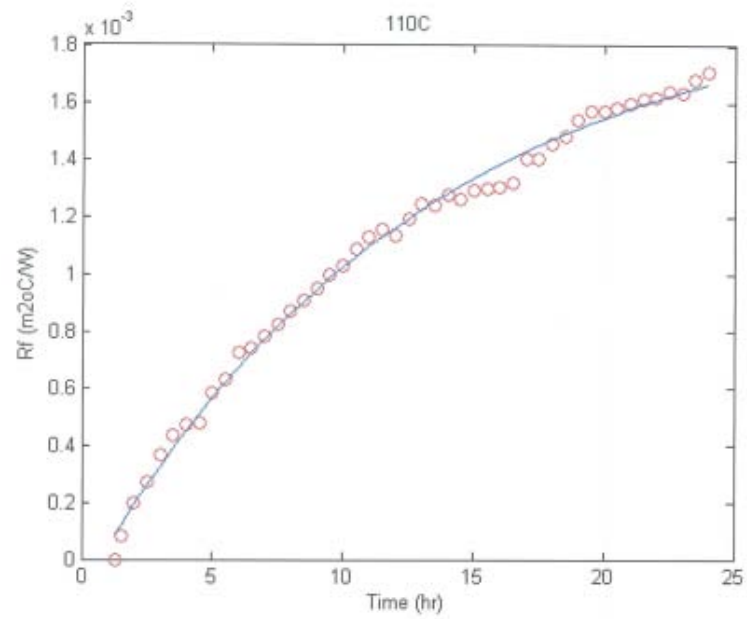
รูปที่ 6.2 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 80°C และ SD = 0.000260378



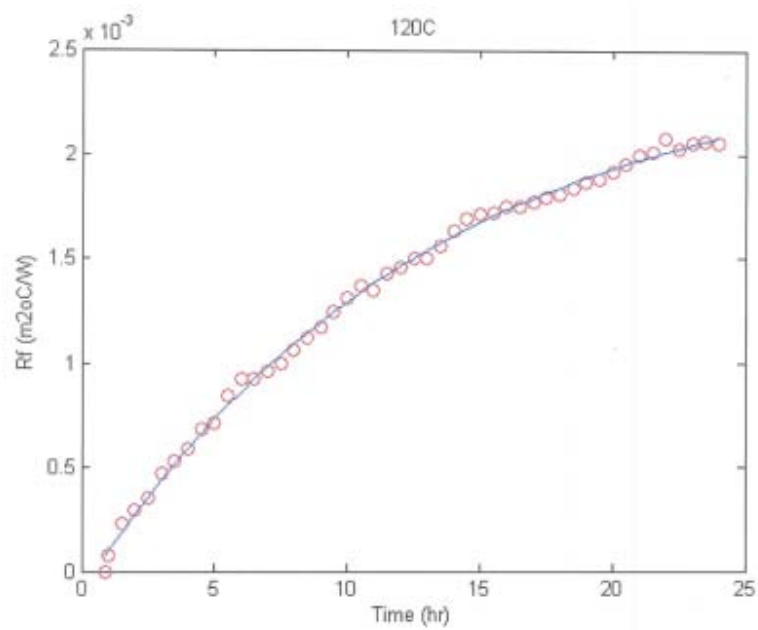
รูปที่ 6.3 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 90°C และ SD = 0.000287265



รูปที่ 6.4 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่อุณหภูมิ 100°C และ SD = 0.000361598



รูปที่ 6.5 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่ อุณหภูมิ 110°C และ SD =0.000466469



รูปที่ 6.6 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานของตะกรันจากแบบจำลองและผลการทดลองที่ อุณหภูมิ 120°C และ SD =0.000584207

6.2 ผลการจำลองอุณหภูมิของตะกรันในสายออกจากเครื่องระเหยหลังจากเกิดตะกรันโดยโปรแกรมไฮซิด

เพื่อให้สามารถเห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานความร้อนในระบบจริงในเครื่องระเหยแต่ละเครื่อง ผู้วิจัยได้แยกการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องระเหยแต่ละเครื่องตามอุณหภูมิการทดลอง ที่ 80°C 100°C และ 120°C มาทำการทดลอง โดยทำการทดลองเปลี่ยนค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนแล้วบันทึกค่า อุณหภูมิที่สายออก และค่าความเข้มข้นของเหลวค้ำที่ออกมาจากเครื่องระเหย ซึ่งคุณสมบัติที่ป้อนเข้ามีค่าตามตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.6 คุณสมบัติของเหลวค้ำในการป้อนเข้าสู่กระบวนการระเหย

Property	BL 80°C	BL 100°C	BL 120°C
Temperature(°C)	80	100	120
Pressure(KPa)	-80	-10	39
Mole flow (KgMole/hr)	11904	8598	5425
Mass flow (Kg/hr)	256800	193100	140072
Composition (NaOH, %)	30	36	55

จากแบบจำลองสารผสมของเหลวค้ำที่ประกอบด้วยส่วนผสมของน้ำ และ โซดาไฟมีอุณหภูมิที่เครื่องเป็น 80°C 100°C และ 120°C และมีความเข้มข้นเป็น 30% 36% และ 55% ตามลำดับ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน ผลที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 6.7 6.8 และ 6.9

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส

R_f (x1E-6 °C h/KJ)	T_{out}	ร้อยละความ แตกต่างอุณหภูมิ	ความเข้มข้น (%NaOH)	ร้อยละความแตกต่างความ เข้มข้น
0	80.00	0.00	35.8	0.00
0.00058	79.92	0.10	35.75	0.14
0.00099	79.86	0.18	35.66	0.39
0.00141	79.80	0.25	35.57	0.64
0.00183	79.74	0.33	35.48	0.89
0.00225	79.69	0.39	35.4	1.12
0.00267	79.63	0.46	35.31	1.37
0.00310	79.57	0.54	35.22	1.62
0.00353	79.51	0.61	35.14	1.84
0.00396	79.46	0.68	35.05	2.09
0.00439	79.40	0.75	34.97	2.32
0.00483	79.34	0.82	34.88	2.57
0.00527	79.29	0.89	34.79	2.82
0.00571	79.23	0.96	34.71	3.04
0.00615	79.17	1.04	34.62	3.30
0.00660	79.12	1.10	34.54	3.52
0.00705	79.06	1.18	34.45	3.77
0.00750	79.01	1.24	34.37	3.99
0.00795	78.95	1.31	34.28	4.25
0.00841	78.90	1.37	34.2	4.47

ตารางที่ 6.8 ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส

R_f (x1E-6 °C h/KJ)	T_{out}	ร้อยละความ แตกต่างอุณหภูมิ	ความเข้มข้น (%NaOH)	ร้อยละความแตกต่างความ เข้มข้น
0.00000	100.00	0.00	39.54	0.00
0.00086	99.93	0.07	39.45	0.23
0.00242	99.81	0.19	39.39	0.38
0.00401	99.69	0.31	39.13	1.04
0.00562	99.63	0.37	39.05	1.24
0.00724	99.45	0.55	38.82	1.82
0.00888	99.33	0.67	38.66	2.23
0.01054	99.21	0.79	38.50	2.63
0.01222	99.09	0.91	38.34	3.03
0.01392	98.97	1.03	38.19	3.41
0.01564	98.86	1.14	38.03	3.82
0.01738	98.74	1.26	37.88	4.20
0.01915	98.62	1.38	37.72	4.60
0.02093	98.51	1.49	37.56	5.01
0.02273	98.39	1.61	37.41	5.39
0.02456	98.28	1.72	37.26	5.77
0.02640	98.16	1.84	37.1	6.17
0.02827	98.05	1.95	36.95	6.55
0.03017	97.94	2.06	36.8	6.93
0.03209	97.82	2.18	36.65	7.31

ตารางที่ 6.9 ตารางแสดงค่าที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส

R_f ($\times 10^{-6}$ °C h/KJ)	T_{out}	ร้อยละความ แตกต่างอุณหภูมิ	ความเข้มข้น (%NaOH)	ร้อยละความแตกต่างความ เข้มข้น
0	120.00	0.00	63.56	0
0.00168	119.90	0.08	63.43	0.20
0.00358	119.70	0.25	63.29	0.42
0.00549	119.50	0.42	63.14	0.66
0.00744	119.40	0.50	63	0.88
0.00940	119.20	0.67	62.85	1.12
0.01139	119.10	0.75	62.76	1.26
0.01341	118.90	0.92	62.61	1.49
0.01545	118.80	1.00	62.46	1.73
0.01752	118.60	1.17	62.31	1.97
0.01961	118.40	1.33	62.16	2.21
0.02173	118.30	1.42	61.94	2.55
0.02388	118.10	1.58	61.79	2.78
0.02606	118.00	1.67	61.63	3.04
0.02827	117.80	1.83	61.47	3.29
0.03051	117.60	2.00	61.32	3.52
0.03277	117.50	2.08	61.16	3.78
0.03507	117.30	2.25	61	4.03
0.03740	117.10	2.42	60.84	4.28
0.03976	117.00	2.50	60.68	4.53

จากผลการทดลองโดยใช้แบบจำลองจากโปรแกรมไฮลีส พบว่าตะกรันมีส่วนทำให้ค่าของอุณหภูมิขาออกลดลงและความเข้มข้นของของเหลวต่ำลงไปด้วย โดยที่สภาวะ 80°C เมื่อค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึง 0.0841×10^{-6} h/KJ°C จะทำให้อุณหภูมิขาออกลดลง คิดเป็นร้อยละ 1.37 และความเข้มข้นลดลงที่ร้อยละ 4.47 กรณีสภาวะ 100°C เมื่อค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึง 0.03209×10^{-6} h/KJ°C จะทำให้อุณหภูมิขาออกลดลง คิดเป็นร้อยละ 2.18 และความเข้มข้นลดลงที่ร้อยละ 7.31กรณีสภาวะ 120°C เมื่อค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึง

$0.03976 \times 10^{-6} \text{ h/KJ}^\circ\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิขากลดลง คิดเป็นร้อยละ 2.5 และความเข้มข้นลดลงที่ร้อยละ 4.53

ในกระบวนการผลิตจริงเพื่อรักษาอุณหภูมิและความเข้มข้นดังกล่าว จะต้องเพิ่มความร้อนหรืออัตราการจ่ายไอน้ำให้มากขึ้น เพื่อให้อุณหภูมิของของเหลวค้างคงมีค่าเท่าเดิม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของไอน้ำหรืออัตราการจ่ายไอน้ำ มีผลทำให้ต้องการเพิ่มเชื้อเพลิงในการเพิ่มอุณหภูมิกมากขึ้นจากช่วงที่ดำเนินการเริ่มต้น และเมื่อถึงจุดหนึ่งที่ไอน้ำไม่สามารถถ่ายเทความร้อนได้พอเพียงกับความต้องการ ก็จำเป็นที่จะต้องทำความสะอาดพื้นผิวถ่ายเทความร้อน ซึ่งต้องมีการหยุดการทำงาน of เครื่องด้วย นอกจากนั้นทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการทำความสะอาด และสูญเสียกำลังการผลิตในช่วงเวลาหนึ่งๆ ด้วย

6.3 ผลการจำลองค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่มากขึ้นเมื่อเกิดตะกรัน

การจำลองได้ทำการตั้งค่าตัวแปรอื่นให้คงที่ แล้วทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นตัวแทนการเกิดความต้านทานของตะกรัน เพื่อดูค่าอัตราการป้อนไอน้ำที่เปลี่ยนไปจากต้นทุนของการผลิตไอน้ำอยู่ที่ 600 บาทต่อตัน ทำให้สามารถคำนวณการสิ้นเปลืองดังตารางที่ 6.11 6.12 และ 6.13

ตารางที่ 6.10 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกอนที่ 80 องศาเซลเซียส

R_f (x1E-6 °C h/KJ)	อัตราการไหลไอน้ำ (Kg/h)	ผลต่างอัตราการไหล ของไอน้ำ (Kg/hr)	ค่าใช้จ่ายจากไอน้ำที่เพิ่มขึ้น (Baht/Day)
0.0000	129800	0.00	0
0.0007	129900	100.00	1440
0.0013	130000	200.00	2880
0.0020	130100	300.00	4320
0.0027	130200	400.00	5760
0.0034	130300	500.00	7200
0.0041	130400	600.00	8640
0.0048	130500	700.00	10080
0.0055	130600	800.00	11520
0.0062	130700	900.00	12960
0.0070	130800	1000.00	14400
0.0077	130900	1100.00	15840
0.0085	131000	1200.00	17280
0.0092	131100	1300.00	18720
0.0100	131200	1400.00	20160
0.0107	131400	1600.00	23040
0.0115	131500	1700.00	24480
0.0123	131600	1800.00	25920
0.0131	131700	1900.00	27360
0.0139	131800	2000.00	28800

ตารางที่ 6.11 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกอนที่ 100 องศาเซลเซียส

R_f (x1E-6 °C h/KJ)	อัตราการไหลไอน้ำ (Kg/h)	ผลต่างอัตราการไหล ของไอน้ำ (Kg/hr)	ค่าใช้จ่ายจากไอน้ำที่เพิ่มขึ้น (Baht/Day)
0.0000	88820.00	0.00	0
0.0013	88900.00	80.00	1152
0.0025	88990.00	170.00	2448
0.0038	89070.00	250.00	3600
0.0051	89160.00	340.00	4896
0.0064	89250.00	430.00	6192
0.0077	89330.00	510.00	7344
0.0091	89420.00	600.00	8640
0.0104	89520.00	700.00	10080
0.0118	89610.00	790.00	11376
0.0132	89700.00	880.00	12672
0.0146	89800.00	980.00	14112
0.0160	89900.00	1080.00	15552
0.0174	90000.00	1180.00	16992
0.0188	90100.00	1280.00	18432
0.0203	90210.00	1390.00	20016
0.0217	90310.00	1490.00	21456
0.0232	90420.00	1600.00	23040
0.0247	90530.00	1710.00	24624
0.0262	90640.00	1820.00	26208

ตารางที่ 6.12 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายในการผลิตไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรันที่ 120 องศาเซลเซียส

R_f (x1E-6 °C h/KJ)	อัตราการไหลไอน้ำ (Kg/h)	ผลต่างอัตราการไหล ของไอน้ำ (Kg/hr)	ค่าใช้จ่ายจากไอน้ำที่เพิ่มขึ้น (Baht/Day)
0.0000	53510.00	0.00	0
0.0015	53540.00	30.00	432
0.0030	53570.00	60.00	864
0.0045	53610.00	100.00	1440
0.0060	53640.00	130.00	1872
0.0075	53680.00	170.00	2448
0.0091	53720.00	210.00	3024
0.0106	53750.00	240.00	3456
0.0122	53790.00	280.00	4032
0.0138	53830.00	320.00	4608
0.0154	53870.00	360.00	5184
0.0171	53910.00	400.00	5760
0.0187	53950.00	440.00	6336
0.0204	53990.00	480.00	6912
0.0221	54030.00	520.00	7488
0.0238	54070.00	560.00	8064
0.0256	54120.00	610.00	8784
0.0273	54160.00	650.00	9360
0.0291	54120.00	610.00	8784
0.0309	54250.00	740.00	10656

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีตะกรันเกิดขึ้นในระบบ นอกจากจะทำให้ อุณหภูมิในระบบ น้อยลง และความเข้มข้นของสารน้อยลงแล้ว ยังส่งผลให้ไอน้ำที่ป้อนต้องถูกเพิ่มปริมาณให้มากขึ้น เพื่อชดเชยกับการสูญเสียดังกล่าว โดยที่อุณหภูมิในระบบ 80°C 100°C และ 120°C นั้น เมื่อมี ตะกรันเพิ่มขึ้นจนถึง ค่า 0.0139 x 10⁻⁶ h/KJ°C 0.0262 x 10⁻⁶ h/KJ°C และ 0.0309 x 10⁻⁶ h/KJ°C จะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองเพิ่มขึ้นถึง 28,800 26,208 และ 10,656 บาทต่อวัน ตามลำดับ

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน เพื่อศึกษาแนวโน้มการก่อตัวของตะกรัน และผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเกิดตะกรันขึ้น โดยจำลองให้ฮีทเตอร์เป็นตัวส่งถ่ายความร้อนไปสู่ของเหลวค่า มีการควบคุมอุณหภูมิของของเหลวค่าในเครื่องให้คงที่โดยน้ำเย็น และนำเอาค่าอุณหภูมิของฮีทเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเกิดตะกรัน มาทำการคำนวณหาค่าการเกิดตะกรัน

อุณหภูมิของของเหลวค่าที่ทำการทดลองคือ 80 90 100 110 และ 120 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงการปฏิบัติการของกระบวนการระเหยในการผลิตกระดาษจริง พบว่าตะกรันมีการก่อตัวที่มากขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลา และที่อุณหภูมิสูงๆ ตะกรันจะเกิดขึ้นได้เร็ว และมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ

อย่างไรก็ตามการพิจารณาในการทำความสะอาดเครื่องนั้น ต้องอาศัยข้อมูลหลายอย่าง อาทิ เช่น ต้นทุนการทำความสะอาด ต้นทุนเชื้อเพลิง แผนการผลิต การสูญเสียโอกาสในการผลิต เมื่อนำมาพิจารณาประกอบร่วมกัน เป็นต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปรากฏดังสมการเหล่านี้

$$R_f = 0.00131(1 - e^{-0.10339t}) - 0.00037 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 80^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 2.5 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.4)$$

$$R_f = 0.00138(1 - e^{-0.09388t}) - 0.00023 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 90^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 2.2 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.5)$$

$$R_f = 0.00174(1 - e^{-0.08309t}) - 0.00017 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 100^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 1.6 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.6)$$

$$R_f = 0.00210(1 - e^{-0.07726t}) - 0.00011 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 110^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 1.3 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.7)$$

$$R_f = 0.00258(1 - e^{-0.06610t}) - 0.00010 \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 120^\circ\text{C} \text{ เมื่อ } t \geq 0.9 \text{ ชั่วโมง} \quad (6.8)$$

การทดลองโดยใช้โปรแกรมไฮซิส ได้พบความสัมพันธ์ของตะกรันที่เกิดในระบบกับอุณหภูมิที่ลดลงจากอุณหภูมิเริ่มต้น พบว่าที่สภาวะ 80°C ค่าความต้านทานมีค่า $0.0841 \times 10^{-6} \text{ h/K}^\circ\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิขาออกลดลง คิดเป็นร้อยละ 1.37 และความเข้มข้นลดลงที่ร้อยละ 4.47 กรณีสภาวะ 100°C เมื่อค่าความต้านทานถึง $0.03209 \times 10^{-6} \text{ h/K}^\circ\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิขาออกลดลง คิดเป็นร้อยละ 2.18 และความเข้มข้นลดลงที่ร้อยละ 7.31 กรณีสภาวะ 120°C เมื่อค่าความต้านทานถึง $0.03976 \times 10^{-6} \text{ h/K}^\circ\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิขาออกลดลง คิดเป็นร้อยละ 2.5 และความเข้มข้นลดลงที่ร้อยละ 4.53

เมื่อพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการป้อนไอน้ำเพิ่มพบว่าที่อุณหภูมิในระบบ 80°C 100°C และ 120°C นั้น เมื่อมีตะกรันเพิ่มขึ้นจนถึง ค่า $0.0139 \times 10^{-6} \text{ h/KJ}^{\circ}\text{C}$ $0.0262 \times 10^{-6} \text{ h/KJ}^{\circ}\text{C}$ และ $0.0309 \times 10^{-6} \text{ h/KJ}^{\circ}\text{C}$ ต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นถึง 28,800 26,208 และ 10,656 บาทต่อวันตามลำดับ

7.2 กลไกการเกิดตะกรันในของเหลวดำ

การเกิดตะกรันในของเหลวดำนั้นเกิดจากอนุภาคเล็กๆ (Particular Fouling) ได้แก่ ลิกนิน เส้นใย ของเยื่อไม้ ทราย หรือฝุ่นที่ปะปนมาจับตัวกัน แล้วจับตัวที่ผิวที่ถ่ายเทความร้อน จนนำไปสู่การที่ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง

นอกจากการที่อนุภาคเล็กๆเหล่านี้ได้จับตัวกันจนเกิดตะกรันแล้ว การที่อุณหภูมิของระบบสูงขึ้น จะเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส(Pyrolysis) ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาเกิดจากเศษไม้หรือลิกนิน ได้รับความร้อนสูงขึ้น จนเกิดการแตกตัว ดังเช่นตัวอย่างสมการเคมีด้านล่าง



เมื่อ $\text{C}_{21}\text{H}_{32}\text{O}_{14}$ คือเศษไม้ และ $\text{C}_7\text{H}_4\text{O}$ คือ ซาโคล (Charcoal) ดังจะเห็นได้จากการทดลองที่เมื่อมีการทดลองที่ระบบอุณหภูมิสูงกว่า จะทำให้เกิดตะกรันเนื่องจากปฏิกิริยาได้มากขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] ชนภรณ์ หอมสุวรรณ. การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [2] ปริญญา วณิชเจริญการ. การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [3] Comstock, et al. Method and apparatus for measuring the fouling potential of membrane system feeds, United States patent, No. 5,198,116, 1993
- [4] Erkki, J., et al. Method of decreasing black liquor viscosity, United States patent, No.4, 929,307, 1990
- [6] Fang, C. and Zhiming G., An analysis of black liquor falling film evaporation, Elsevier, 2003
- [7] Hakulin, B., et al. Method for treating black liquor, United States patent , No. 5201172, 1993
- [8] Henricson, K., et al. Treatment of chips with high temperature black liquor to reduce black liquor viscosity, United States patent, No.5,213,662, 1993
- [9] Kagaku, S., คู่มืออุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี, บริษัทดวงกมลสมัย จำกัด, 2536
- [10] Muller, H. and Branch, C.A., Heat transfer and heat transfer fouling in craft black liquor evaporators, Elsevier, No.426131429, 1997
- [11] Paul, E.E. and Cedar, H.M., Fouling test apparatus, United States patent, No.4,383,438, 1988
- [12] Scott, S., Fouling test apparatus and process for evaluation of anti-foulant, United States patent, No.6978663, 2005
- [13] Steven, C.C. and Raymond P.C., Numerical methods for engineers, McGraw-Hill higher Education, 2003
- [14] Thomas, F.D., Method and apparatus for evaluating heat exchanger efficiency, United States patent, No. 5,399,017, 1995
- [15] Walter, T., Method for controlling the viscosity of Kraft black liquor, United States patent, No. 5,478,568, 1995

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ผลการทดลองการก่อดัวของตะกรันของเหลวดำ

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวดำที่อุณหภูมิ 80°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
2.5	80.48	347.50	267.02	240.82	240.82	0
3	80.84	348.93	268.09	240.82	239.85	1.67099E-05
3.5	81.49	349.15	267.66	240.82	240.24	9.97068E-06
4	80.84	350.46	269.62	240.82	238.49	4.05288E-05
4.5	81.82	353.69	271.86	240.82	236.53	7.53222E-05
5	81.17	355.34	274.17	240.82	234.53	0.000111274
5.5	80.84	360.38	279.54	240.82	230.03	0.000194783
6	83.14	363.15	280.01	240.82	229.64	0.000202082
6.5	82.15	368.69	286.53	240.82	224.42	0.000303471
7	83.80	370.95	287.15	240.82	223.93	0.0003131
7.5	81.52	371.61	290.09	240.82	221.67	0.000358735
8	82.18	372.95	290.77	240.82	221.14	0.000369437
8.5	82.18	374.52	292.35	240.82	219.95	0.000393886
9	81.12	376.79	295.67	240.82	217.48	0.000445608
9.5	81.81	378.14	296.32	240.82	217.00	0.00045575
10	81.81	380.14	298.32	240.82	215.55	0.000486852
10.5	81.17	382.83	301.67	240.82	213.16	0.000538799
11	80.21	382.06	301.84	240.82	213.04	0.000541555
11.5	80.84	381.83	300.99	240.82	213.64	0.000528369
12	80.84	383.36	302.53	240.82	212.55	0.000552188
12.5	81.47	385.67	304.20	240.82	211.39	0.000578185
13	81.14	385.98	304.83	240.82	210.94	0.00058807
13.5	81.46	386.28	304.82	240.82	210.95	0.000587899
14	81.14	388.59	307.45	240.82	209.15	0.000628701
14.5	81.17	390.24	309.08	240.82	208.05	0.000654036
15	79.52	392.36	312.84	240.82	205.54	0.000712636
15.5	78.86	393.28	314.42	240.82	204.51	0.00073717
16	80.84	392.24	311.40	240.82	206.49	0.00069026
16.5	80.18	393.98	313.80	240.82	204.92	0.000727472
17	80.18	394.98	314.80	240.82	204.27	0.000743023
17.5	80.18	394.59	314.41	240.82	204.52	0.000737
18	83.47	395.89	312.42	240.82	205.82	0.0007061

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวคำที่อุณหภูมิ 80°C (ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
18.5	82.81	396.59	313.78	240.82	204.93	0.00072713
19	82.11	398.93	316.83	240.82	202.96	0.000774617
19.5	82.46	399.20	316.74	240.82	203.01	0.000773256
20	81.82	397.20	315.38	240.82	203.89	0.000752022
20.5	80.18	398.93	318.76	240.82	201.73	0.000804599
21	79.52	399.81	320.29	240.82	200.76	0.000828503
21.5	82.15	399.16	317.01	240.82	202.84	0.000777374
22	80.18	397.20	317.02	240.82	202.83	0.00077763
22.5	78.53	399.81	321.28	240.82	200.15	0.000843868
23	78.86	399.81	320.95	240.82	200.35	0.000838746
23.5	81.17	399.81	318.65	240.82	201.80	0.000802896
24	81.17	400.88	319.72	240.82	201.12	0.000819536

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวคำที่อุณหภูมิ 90°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
2.2	90.03	394.43	304.40	218.42	218.42	0
2.5	93.11	394.56	301.45	218.42	213.31	0.000109627
3	91.38	394.46	303.08	218.42	212.17	0.000134913
3.5	90.56	394.90	304.34	218.42	211.29	0.000154495
4	91.57	396.83	305.26	218.42	210.65	0.000168827
4.5	91.75	400.19	308.44	218.42	208.48	0.000218273
5	90.41	403.29	312.87	218.42	205.52	0.000287284
5.5	90.06	406.03	315.97	218.42	203.51	0.000335496
6	90.37	408.04	317.67	218.42	202.42	0.000361861
6.5	90.36	410.14	319.78	218.42	201.09	0.000394607
7	90.06	412.50	322.44	218.42	199.43	0.000436048
7.5	90.72	415.82	325.10	218.42	197.79	0.00047742

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค่าที่อุณหภูมิ 90°C(ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U_c (W/m ² °C)	U_r (W/m ² °C)	R_r (m ² °C/W)
8	92.36	418.91	326.55	218.42	196.92	0.000499923
8.5	90.34	420.15	329.81	218.42	194.97	0.000550652
10	93.35	426.16	332.81	218.42	193.21	0.000597356
10.5	90.06	426.05	336.00	218.42	191.38	0.000646877
11	89.07	426.45	337.39	218.42	190.59	0.000668462
11.5	90.06	432.08	342.02	218.42	188.01	0.000740579
12	87.42	427.25	339.83	218.42	189.22	0.000706511
12.5	90.06	432.23	342.17	218.42	187.93	0.000742862
13	89.07	433.93	344.86	218.42	186.46	0.000784763
13.5	92.69	435.64	342.95	218.42	187.50	0.000754962
14	93.35	437.35	344.00	218.42	186.93	0.000771255
14.5	93.35	435.79	342.44	218.42	187.78	0.000747002
15	92.69	438.15	345.45	218.42	186.14	0.000793939
15.5	91.37	439.85	348.48	218.42	184.53	0.00084096
16	90.72	440.91	350.19	218.42	183.62	0.000867581
16.5	91.05	443.92	352.87	218.42	182.23	0.000909311
17	90.72	441.05	350.34	218.42	183.55	0.000869865
17.5	87.42	440.06	352.64	218.42	182.35	0.000905725
18	89.73	438.59	348.86	218.42	184.32	0.000846883
18.5	91.05	441.60	350.55	218.42	183.43	0.000873248
19	92.69	443.31	350.61	218.42	183.40	0.000874176
19.5	94.34	446.97	352.63	218.42	182.35	0.000905577
20	91.37	443.45	352.08	218.42	182.64	0.000896945
20.5	94.67	447.77	353.10	218.42	182.11	0.000912896
21	91.70	445.56	353.85	218.42	181.72	0.00092458
21.5	91.05	451.18	360.14	218.42	178.55	0.001022304
22	88.41	447.66	359.25	218.42	178.99	0.001008551

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวคำที่อุณหภูมิ 90°C(ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U _c (W/m ² °C)	U _r (W/m ² °C)	R _r (m ² °C/W)
22.5	93.35	452.64	359.29	218.42	178.97	0.001009052
23	90.39	451.08	360.69	218.42	178.28	0.001030894
23.5	89.73	448.86	359.14	218.42	179.05	0.001006727
24.00	90.73	451.26	360.54	218.42	178.35	0.001028499

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวคำที่อุณหภูมิ 100°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	U _c (W/m ² °C)	U _f (W/m ² °C)	R _f (m ² °C/W)
.6	100.58	415.91	315.33	203.93	203.93	0
2	100.64	425.95	325.31	203.93	197.67	0.000155254
2.5	100.41	426.95	326.54	203.93	196.92	0.000174455
3	100.55	429.05	328.50	203.93	195.75	0.000204898
3.5	100.33	431.16	330.83	203.93	194.37	0.000241033
4	100.53	435.26	334.73	203.93	192.10	0.000301782
4.5	100.56	440.45	339.89	203.93	189.19	0.000381997
5	100.60	442.48	341.88	203.93	188.09	0.000412954
5.5	101.22	445.66	344.45	203.93	186.69	0.00045284
6	101.55	449.46	347.92	203.93	184.82	0.000506813
6.5	100.22	450.88	350.66	203.93	183.38	0.000549455
7	101.57	457.55	355.98	203.93	180.64	0.000632268
7.5	101.91	460.70	358.79	203.93	179.22	0.000675897
8	98.95	461.85	362.90	203.93	177.19	0.000739825
8.5	98.62	462.91	364.29	203.93	176.51	0.000761522
9	96.64	463.67	367.03	203.93	175.20	0.000804062
9.5	97.94	464.51	366.58	203.93	175.41	0.00079702

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวคำที่อุณหภูมิ 100°C (ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	Uc (W/m ² °C)	Uf (W/m ² °C)	Rf (m ² °C/W)
10	100.91	470.31	369.40	203.93	174.07	0.000840938
10.5	100.58	471.50	370.92	203.93	173.36	0.000864525
11	100.58	472.14	371.56	203.93	173.06	0.000874446
11.5	100.91	473.02	372.11	203.93	172.81	0.000883025
12	100.89	475.43	374.54	203.93	171.68	0.000920919
12.5	99.28	476.62	377.34	203.93	170.41	0.000964431
13	100.57	476.03	375.46	203.93	171.26	0.000935184
13.5	101.91	478.83	376.92	203.93	170.60	0.000957869
14	101.58	482.21	380.62	203.93	168.94	0.001015431
14.5	102.57	482.35	379.78	203.93	169.32	0.00100235
15	101.91	482.50	380.59	203.93	168.96	0.001014877
15.5	101.91	484.61	382.69	203.93	168.03	0.001047633
16	100.58	485.83	385.25	203.93	166.91	0.001087401
16.5	99.97	485.55	385.58	203.93	166.77	0.001092526
17	99.93	486.74	386.81	203.93	166.24	0.001111739
17.5	99.60	487.58	387.98	203.93	165.74	0.001129931
18	99.36	487.95	388.59	203.93	165.48	0.001139389
18.5	100.21	490.41	390.20	203.93	164.80	0.001164373
19	100.30	491.55	391.25	203.93	164.35	0.001180735
19.5	96.64	492.31	395.67	203.93	162.52	0.001249421
20	99.28	493.76	394.49	203.93	163.00	0.001231048
20.5	100.93	495.83	394.91	203.93	162.83	0.001237567
21	99.28	498.45	399.17	203.93	161.09	0.001303844
21.5	97.63	500.86	403.23	203.93	159.47	0.001366972
22	102.57	502.27	399.70	203.93	160.88	0.001312118
22.5	98.55	501.34	402.79	203.93	159.64	0.001360169
23	104.22	503.26	399.04	203.93	161.14	0.001301865
23.50	103.23	504.10	400.87	203.93	160.41	0.001330301
24.00	103.23	505.60	402.37	203.93	159.81	0.001353628

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวดำที่อุณหภูมิ 110°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	Uc (W/m ² °C)	Uf (W/m ² °C)	Rf (m ² °C/W)
1.3	111.25	425.26	314.01	204.78	204.78	0
1.5	115.21	434.48	319.27	204.78	201.41	8.18052E-05
2	113.89	440.68	326.79	204.78	196.77	0.000198726
2.5	113.23	444.71	331.48	204.78	193.99	0.000271695
3	109.94	447.36	337.43	204.78	190.57	0.000364151
3.5	109.96	451.82	341.86	204.78	188.10	0.000433056
4	109.28	453.59	344.31	204.78	186.76	0.000471199
4.5	110.57	455.32	344.75	204.78	186.52	0.00047807
5	109.96	461.33	351.37	204.78	183.01	0.000580971
5.5	110.60	465.14	354.54	204.78	181.37	0.000630309
6	109.61	470.23	360.62	204.78	178.31	0.000724805
6.5	110.91	472.48	361.57	204.78	177.84	0.000739621
7	110.90	475.23	364.33	204.78	176.50	0.000782545
7.5	111.23	478.07	366.84	204.78	175.29	0.000821538
8	111.89	481.94	370.05	204.78	173.77	0.000871489
8.5	111.91	484.14	372.23	204.78	172.75	0.000905344
9	110.56	485.72	375.16	204.78	171.40	0.000950889
9.5	110.91	488.90	377.98	204.78	170.12	0.000994886
10	109.94	490.09	380.15	204.78	169.15	0.001028571
10.5	109.61	493.52	383.92	204.78	167.49	0.001087131
11	108.62	495.14	386.52	204.78	166.36	0.001127624
11.5	109.28	497.51	388.23	204.78	165.63	0.001154281
12	111.25	498.10	386.85	204.78	166.22	0.001132756
12.5	110.60	501.29	390.70	204.78	164.59	0.001192592
13	109.61	503.53	393.92	204.78	163.24	0.00124273
13.5	110.58	504.40	393.82	204.78	163.28	0.001241162
14	110.24	506.48	396.23	204.78	162.29	0.001278692

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกรันของเหลวคำที่อุณหภูมิ 110°C (ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	Uc (W/m ² °C)	Uf (W/m ² °C)	Rf (m ² °C/W)
14.5	110.56	505.71	395.15	204.78	162.73	0.001261861
15	110.89	507.89	397.00	204.78	161.97	0.001290595
15.5	110.90	508.48	397.58	204.78	161.74	0.001299558
16	111.25	509.01	397.75	204.78	161.67	0.001302311
16.5	111.88	510.51	398.63	204.78	161.31	0.001316022
17	109.61	513.97	404.36	204.78	159.02	0.001405055
17.5	109.91	514.20	404.28	204.78	159.05	0.001403877
18	109.28	516.77	407.49	204.78	157.80	0.001453694
18.5	111.25	520.56	409.30	204.78	157.10	0.0014819
19	109.28	522.37	413.10	204.78	155.66	0.001540903
19.5	109.61	524.58	414.97	204.78	154.96	0.001570096
20	110.60	525.48	414.88	204.78	154.99	0.001568699
20.5	111.91	527.67	415.75	204.78	154.67	0.001582239
21	111.58	528.28	416.70	204.78	154.32	0.001596954
21.5	111.91	529.72	417.81	204.78	153.91	0.001614185
22	112.90	530.93	418.03	204.78	153.82	0.001617653
22.50	113.56	532.85	419.29	204.78	153.36	0.001637217
23.00	113.89	533.00	419.11	204.78	153.43	0.00163449
23.50	112.90	535.21	422.31	204.78	152.27	0.001684169
24.00	113.90	537.77	423.87	204.78	151.70	0.001708497

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค้ำที่อุณหภูมิ 120°C

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	Uc (W/m ² °C)	Uf (W/m ² °C)	Rf (m ² °C/W)
0.9	120.05	460.6575531	340.6075531	188.789127	188.789127	0
1	120.1372647	465.69174	345.5544753	188.789127	186.0864414	7.69314E-05
1.5	120.2665922	475.8790896	355.6124974	188.789127	180.8232362	0.000233347
3.5	120.9252471	495.4512279	374.5259808	188.789127	171.6917007	0.000527478
4	120.2425569	498.7575531	378.5149962	188.789127	169.8823118	0.000589513
4.5	119.9372647	504.4107157	384.473451	188.789127	167.2495264	0.000682175
5	120.9252471	507.49174	386.566493	188.789127	166.3439635	0.000714725
5.5	120.9252471	515.7575531	394.832306	188.789127	162.8615532	0.000843269
6	119.6079373	519.49174	399.8838028	188.789127	160.804219	0.000921827
6.5	121.583902	521.4512279	399.8673259	188.789127	160.8108451	0.000921571
7	121.2545745	523.7575531	402.5029786	188.789127	159.7578305	0.000962559
7.5	120.9252471	525.7575531	404.832306	188.789127	158.8386145	0.000998783
8	120.9252471	530.1043905	409.1791434	188.789127	157.1512225	0.001066382
8.5	119.9372647	532.7575531	412.8202884	188.789127	155.7651221	0.001123007
9	119.9372647	535.7575531	415.8202884	188.789127	154.6413304	0.001169661
9.5	120.2665922	540.7980653	420.5314731	188.789127	152.9088944	0.001242927
10	120.5959196	545.4107157	424.8147961	188.789127	151.3671445	0.001309538
10.5	121.2545745	550.1449026	428.8903281	188.789127	149.9287776	0.001372918
11	122.9012118	550.4107157	427.5095039	188.789127	150.4130365	0.001351445
11.5	119.2786098	551.7170409	432.4384311	188.789127	148.6986308	0.001428096
12	120.9252471	555.49174	434.566493	188.789127	147.9704571	0.001461191
12.5	120.2665922	557.4512279	437.1846357	188.789127	147.0843149	0.001501906
13	123.2305392	560.4512279	437.2206886	188.789127	147.0721864	0.001502467
13.5	121.9132294	563.1043905	441.191161	188.789127	145.7486194	0.001564213
14	120.2665922	565.7575531	445.4909609	188.789127	144.3418795	0.001631081
14.5	119.2786098	568.6765287	449.3979189	188.789127	143.0870057	0.00169184

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าจากการทดสอบการก่อดัวของตะกอนของเหลวค้ำที่อุณหภูมิ 120°C (ต่อ)

t (hr)	Liquid Temp (°C)	Heater Temp (°C)	DT (°C)	Uc (W/m ² °C)	Uf (W/m ² °C)	Rf (m ² °C/W)
15	119.2786098	570.0638783	450.7852685	188.789127	142.6466371	0.001713415
16	119.2786098	572.5322522	453.2536424	188.789127	141.8697978	0.001751801
16.5	119.2786098	572.3702035	453.0915937	188.789127	141.9205377	0.001749281
17	118.9492824	573.7170409	454.7677586	188.789127	141.3974526	0.001775348
17.5	119.2786098	575.4107157	456.1321059	188.789127	140.9745154	0.001796565
18	119.2786098	576.3702035	457.0915937	188.789127	140.6785937	0.001811487
18.5	119.2786098	578.1449026	458.8662928	188.789127	140.1345089	0.001839086
19	118.9492824	579.6765287	460.7272464	188.789127	139.5684825	0.001868026
19.5	119.9372647	581.3702035	461.4329388	188.789127	139.3550334	0.001879001
20	119.6079373	583.4107157	463.8027784	188.789127	138.6429871	0.001915855
20.5	119.6079373	585.7575531	466.1496158	188.789127	137.9449868	0.001952351
21	117.6319725	586.7170409	469.0850684	188.789127	137.0817511	0.001998002
21.5	120.5959196	590.6765287	470.0806091	188.789127	136.7914382	0.002013484
22	119.9372647	594.4107157	474.473451	188.789127	135.5249751	0.002081799
22.5	120.2665922	591.1449026	470.8783105	188.789127	136.5597038	0.002025889
23	120.9252471	593.7170409	472.7917938	188.789127	136.0070193	0.002055646
23.5	121.2545745	594.7575531	473.5029786	188.789127	135.8027415	0.002066706
24	122.2545745	595.3702035	473.115629	188.789127	135.913926	0.002060683

ภาคผนวก ข. คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป

ข.1 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 80°C

```

ai=analoginput('nidaq','Dev2');
addchannel(ai,0:1);
ao=analogoutput('nidaq','Dev2');
addchannel(ao,0);
SP=80;
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) = 250.16*(Temp(2))-182.344;
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) = 250.16*(V(2))-182.344;%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;

```

ข.2 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวต่ำ 90°C

```

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) = 250.16*(Temp(2))-182.344;
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) = 250.16*(V(2))-182.344;%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;

```

ข.3 กำจัดควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 100°C

```

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) = 250.16*(Temp(2))-182.344;
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) = 250.16*(V(2))-182.344;%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;

```

ข.4 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวต่ำ 110°C

```

ai=analoginput('nidaq','Dev2');
addchannel(ai,0:1);
ao=analogoutput('nidaq','Dev2');
addchannel(ao,0);
SP=110;
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) = 250.16*(Temp(2))-182.344;
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) = 250.16*(V(2))-182.344;%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;

```

ข.5 คำสั่งควบคุมอุณหภูมิโดยโปรแกรมแมทแลป ที่อุณหภูมิของเหลวดำ 120°C

```

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) = 250.16*(Temp(2))-182.344;
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) = 250.16*(V(2))-182.344;%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;

```

ภาคผนวก ค. คำสั่งควบคุมการหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองและการสร้าง กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลอง

```

clc
close all
clear all
data = xlsread('Final experiment for matlab.xls', 'Sheet1');
t1 = data(:,1);
t1 = t1(~isnan(t1));
y1 = data(:,11);
y1 = y1(~isnan(y1));
figure(1)
plot(t1,y1,'or'),hold on
mdl = @(a,x)(a(1)-a(1)*exp(-a(2)*x)+a(3));
a0 = [2;2;0];
[ahat1,r,J,cov,mse1] = nlinfit(t1,y1,mdl,a0);
figure(1)
plot(t1,mdl(ahat1,t1),'b')
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Rf (m2oC/W)')
title('80C')
text(mean(t1)/1.5+0.5,mdl(ahat1,mean(t1)/1.5),['\leftarrow \it',num2str(ahat1(1),'% 0.5f'),'(1-
\ite^{\-',num2str(ahat1(2),'% 0.5f'),'t}'),num2str(ahat1(3),'% 0.5f')],...
    'HorizontalAlignment','left','FontSize',11)
t2 = data(:,2);
t2 = t2(~isnan(t2));
y2 = data(:,12);
y2 = y2(~isnan(y2));
figure(2)
plot(t2,y2,'or'),hold on

```

```

mdl = @(a,x)(a(1)-a(1)*exp(-a(2)*x)+a(3));
a0 = [2;2;0];
[ahat2,r,J,cov,mse2] = nlinfit(t2,y2,mdl,a0);
figure(2)
plot(t2,mdl(ahat2,t2),'b')
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Rf (m2oC/W)')
title('90C')
text(mean(t2)/1.5+0.5,mdl(ahat2,mean(t2)/1.5),['\leftarrow \it',num2str(ahat2(1),'% 0.5f'),('1-
\ite^{\-',num2str(ahat2(2),'% 0.5f'),'t}'),num2str(ahat2(3),'% 0.5f')],...
    'HorizontalAlignment','left','FontSize',11)
t3 = data(:,3);
t3 = t3(~isnan(t3));
y3 = data(:,13);
y3 = y3(~isnan(y3));
figure(3)
plot(t3,y3,'or'),hold on
mdl = @(a,x)(a(1)-a(1)*exp(-a(2)*x)+a(3));
a0 = [2;2;0];
[ahat3,r,J,cov,mse3] = nlinfit(t3,y3,mdl,a0);
figure(3)
plot(t3,mdl(ahat3,t3),'b')
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Rf (m2oC/W)')
title('100C')
text(mean(t3)/1.5+0.5,mdl(ahat3,mean(t3)/1.5),['\leftarrow \it',num2str(ahat3(1),'% 0.5f'),('1-
\ite^{\-',num2str(ahat3(2),'% 0.5f'),'t}'),num2str(ahat3(3),'% 0.5f')],...
    'HorizontalAlignment','left','FontSize',11)
t4 = data(:,4);
t4 = t4(~isnan(t4));

```

```

y4 = data(:,14);
y4 = y4(~isnan(y4));
figure(4)
plot(t4,y4,'or'),hold on
mdl = @(a,x)(a(1)-a(1)*exp(-a(2)*x)+a(3));
a0 = [2;2;0];
[ahat4,r,J,cov,mse4] = nlinfit(t4,y4,mdl,a0);
figure(4)
plot(t4,mdl(ahat4,t4),'b')
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Rf (m2oC/W)')
title('110C')
text(mean(t4)/1.5+0.5,mdl(ahat4,mean(t4)/1.5),['\leftarrow \it',num2str(ahat4(1),'% 0.5f'),'(1-
\ite^{\-',num2str(ahat4(2),'% 0.5f'),'t}'),num2str(ahat4(3),'% 0.5f')],...
    'HorizontalAlignment','left','FontSize',11)
t5 = data(:,5);
t5 = t5(~isnan(t5));
y5 = data(:,15);
y5 = y5(~isnan(y5));
figure(5)
plot(t5,y5,'or'),hold on
mdl = @(a,x)(a(1)-a(1)*exp(-a(2)*x)+a(3));
a0 = [2;2;0];
[ahat5,r,J,cov,mse5] = nlinfit(t5,y5,mdl,a0);
figure(5)
plot(t5,mdl(ahat5,t5),'b')
xlabel('Time (hr)')
ylabel('Rf (m2oC/W)')
title('120C')

```



```
text(mean(t5)/1.5+0.5,mdl(ahat5,mean(t5)/1.5),['\leftarrow \it',num2str(ahat5(1),'% 0.5f'),'(1-
\ite^{\it',num2str(ahat5(2),'% 0.5f'),t5}',num2str(ahat5(3),'% 0.5f')],...
```

```
    'HorizontalAlignment','left','FontSize',11)
```

```
figure(6)
```

```
plot(t1,mdl(ahat1,t1),'-o',t2,mdl(ahat2,t2),'-*',t3,mdl(ahat3,t3),'-s',t4,mdl(ahat4,t4),'-
d',t5,mdl(ahat5,t5),'-v')
```

```
legend('80C','90C','100C','110C','120C',2)
```

```
xlabel('Time (hr)')
```

```
ylabel('Rf (m2oC/W)')
```

```
figure(7)
```

```
plot(t1,y1,'-o',t2,y2,'-*',t3,y3,'-s',t4,y4,'-d',t5,y5,'-v')
```

```
legend('80C','90C','100C','110C','120C',2)
```

```
xlabel('Time (hr)')
```

```
ylabel('Rf (m2oC/W)')
```

ภาคผนวก ง• การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

ตารางที่ ง.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 80°C

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S	r^2
2.5	0	-7.16191E-05	5.1293E-09	2.86448E-07	0.988625696
3	1.67099E-05	-2.06522E-05	1.39593E-09	2.6884E-07	
3.5	9.97068E-06	2.7747E-05	3.15996E-10	2.75874E-07	
4	4.05288E-05	7.37077E-05	1.10084E-09	2.44707E-07	
4.5	7.53222E-05	0.000117353	1.76657E-09	2.11495E-07	
5	0.000111274	0.000158799	2.25862E-09	1.7972E-07	
5.5	0.000194783	0.000198157	1.13882E-11	1.1589E-07	
6	0.000202082	0.000235532	1.1189E-09	1.10973E-07	
6.5	0.000303471	0.000271025	1.05279E-09	5.37019E-08	
7	0.0003131	0.000304729	7.00872E-11	4.93318E-08	
7.5	0.000358735	0.000336734	4.84005E-10	3.11429E-08	
8	0.000369437	0.000367128	5.33074E-12	2.74801E-08	
8.5	0.000393886	0.00039599	4.42863E-12	1.9972E-08	
9	0.000445608	0.000423398	4.93277E-10	8.02816E-09	
9.5	0.00045575	0.000449425	3.99949E-11	6.31365E-09	
10	0.000486852	0.000474141	1.61569E-10	2.33828E-09	
10.5	0.000538799	0.000497612	1.69635E-09	1.28932E-11	
11	0.000541555	0.0005199	4.68928E-10	4.0283E-11	
11.5	0.000528369	0.000541065	1.61204E-10	4.67742E-11	
12	0.000552188	0.000561164	8.05802E-11	2.88311E-10	
12.5	0.000578185	0.000580251	4.26692E-12	1.84703E-09	
13	0.00058807	0.000598375	1.06195E-10	2.79442E-09	
13.5	0.000587899	0.000615587	7.66598E-10	2.77639E-09	

ตารางที่ ง.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 80°C (ต่อ)

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S
14	0.000628701	0.000631931	1.04381E-11	8.74087E-09
14.5	0.000654036	0.000647452	4.3341E-11	1.412E-08
15	0.000712636	0.000662191	2.54466E-09	3.14807E-08
15.5	0.00073717	0.000676188	3.71887E-09	4.07888E-08
16	0.00069026	0.000689479	6.09868E-13	2.40411E-08
16.5	0.000727472	0.000702101	6.43702E-10	3.69654E-08
17	0.000743023	0.000714086	8.37346E-10	4.31872E-08
17.5	0.000737	0.000725468	1.32969E-10	4.07198E-08
18	0.0007061	0.000736277	9.10651E-10	2.9204E-08
18.5	0.00072713	0.000746541	3.7676E-10	3.68342E-08
19	0.000774617	0.000756287	3.35989E-10	5.73169E-08
19.5	0.000773256	0.000765543	5.94869E-11	5.66668E-08
20	0.000752022	0.000774333	4.97744E-10	4.70085E-08
20.5	0.000804599	0.000782679	4.80474E-10	7.25714E-08
21	0.000828503	0.000790605	1.43625E-09	8.6022E-08
21.5	0.000777374	0.000798132	4.30908E-10	5.86442E-08
22	0.00077763	0.000805279	7.64501E-10	5.87684E-08
22.5	0.000843868	0.000812067	1.01129E-09	9.52708E-08
23	0.000838746	0.000818512	4.09405E-10	9.21354E-08
23.5	0.000802896	0.000824633	4.72516E-10	7.16567E-08
24	0.000819536	0.000830445	1.19024E-10	8.08422E-08
Total	0.023549149	0.023345782	3.39301E-08	2.98305E-06
$R_{f,avg}$	0.000535208			

ตารางที่ ง.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 90°C

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S	r^2
2.2	0	2.75122E-05	7.56919E-10	4.43535E-07	0.990048657
2.5	0.000109627	5.86849E-05	2.59508E-09	3.09533E-07	
3	0.000134913	0.000108728	6.85671E-10	2.82037E-07	
3.5	0.000154495	0.000156475	3.92366E-12	2.61621E-07	
4	0.000168827	0.000202034	1.10268E-09	2.47165E-07	
4.5	0.000218273	0.000245503	7.41506E-10	2.00446E-07	
5	0.000287284	0.000286979	9.27053E-14	1.43414E-07	
5.5	0.000335496	0.000326553	7.99722E-11	1.09222E-07	
6	0.000361861	0.000364313	6.01154E-12	9.24908E-08	
6.5	0.000394607	0.000400341	3.28719E-11	7.36453E-08	
7	0.000436048	0.000434717	1.77341E-12	5.28704E-08	
7.5	0.00047742	0.000467516	9.80845E-11	3.55564E-08	
8	0.000499923	0.000498812	1.23576E-12	2.75761E-08	
8.5	0.000550652	0.000528672	4.83101E-10	1.33015E-08	
9	0.000557129	0.000557163	1.21587E-15	1.18495E-08	
9.5	0.000594382	0.000584348	1.00688E-10	5.12677E-09	
10	0.000597356	0.000610286	1.67205E-10	4.70986E-09	
10.5	0.000646877	0.000635035	1.40235E-10	3.65071E-10	
11	0.000668462	0.000658649	9.62992E-11	6.14145E-12	
11.5	0.000740579	0.00068118	3.52822E-09	5.56439E-09	
12	0.000706511	0.000702678	1.46904E-11	1.64242E-09	
12.5	0.000742862	0.00072319	3.87E-10	5.91029E-09	
13	0.000784763	0.000742762	1.76408E-09	1.41083E-08	
13.5	0.000754962	0.000761436	4.19103E-11	7.91706E-09	
14	0.000771255	0.000779253	6.39818E-11	1.10819E-08	
14.5	0.000747002	0.000796254	2.42574E-09	6.56398E-09	

ตารางที่ ง.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 90°C (ต่อ)

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S
15	0.000793939	0.000812475	3.43607E-10	1.63724E-08
15.5	0.00084096	0.000827953	1.69201E-10	3.06167E-08
16	0.000867581	0.00084272	6.18081E-10	4.06415E-08
16.5	0.000909311	0.000856811	2.75627E-09	5.92079E-08
17	0.000869865	0.000870255	1.52073E-13	4.15674E-08
17.5	0.000905725	0.000883083	5.12684E-10	5.74759E-08
18	0.000846883	0.000895322	2.3464E-09	3.27243E-08
18.5	0.000873248	0.000907001	1.13927E-09	4.29582E-08
19	0.000874176	0.000918143	1.93316E-09	4.33438E-08
19.5	0.000905577	0.000928775	5.38176E-10	5.74047E-08
20	0.000896945	0.00093892	1.76185E-09	5.33431E-08
20.5	0.000912896	0.000948599	1.27467E-09	6.09657E-08
21	0.00092458	0.000957834	1.10584E-09	6.68719E-08
21.5	0.001022304	0.000966646	3.09783E-09	1.26964E-07
22	0.001008551	0.000975054	1.12208E-09	1.17352E-07
22.5	0.001009052	0.000983076	6.74773E-10	1.17696E-07
23	0.001030894	0.00099073	1.61309E-09	1.33159E-07
23.5	0.001006727	0.000998034	7.55713E-11	1.16106E-07
24	0.001028499	0.001005002	5.52092E-10	1.31417E-07
Total	0.029969278	0.029845507	3.69538E-08	3.71345E-06
$R_{f,avg}$	0.000665984			

ตารางที่ 3 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 100°C

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S	r^2
1.6	0	4.66054E-05	2.17207E-09	7.86631E-07	0.991082702
2.5	0.000174455	0.000156371	3.2703E-10	5.07609E-07	
3	0.000204898	0.000213897	8.09875E-11	4.65157E-07	
3.5	0.000241033	0.000269082	7.86725E-10	4.17172E-07	
4	0.000301782	0.000322021	4.09627E-10	3.42389E-07	
4.5	0.000381997	0.000372806	8.44572E-11	2.5495E-07	
5	0.000412954	0.000421525	7.34536E-11	2.24645E-07	
5.5	0.00045284	0.000468261	2.37808E-10	1.88427E-07	
6	0.000506813	0.000513095	3.94546E-11	1.44483E-07	
6.5	0.000549455	0.000556104	4.42132E-11	1.13884E-07	
7	0.000632268	0.000597364	1.21829E-09	6.48489E-08	
7.5	0.000675897	0.000636944	1.51733E-09	4.45316E-08	
8	0.000739825	0.000674913	4.21353E-09	2.16375E-08	
8.5	0.000761522	0.000711338	2.51839E-09	1.57253E-08	
9	0.000804062	0.00074628	3.33868E-09	6.86585E-09	
9.5	0.00079702	0.000779801	2.96526E-10	8.08228E-09	
10	0.000840938	0.000811957	8.39917E-10	2.11452E-09	
10.5	0.000864525	0.000842804	4.7176E-10	5.01647E-10	
11	0.000874446	0.000872397	4.19711E-12	1.55662E-10	
11.5	0.000883025	0.000900785	3.15411E-10	1.51852E-11	
12	0.000920919	0.000928018	5.03948E-11	1.1558E-09	
12.5	0.000964431	0.000954143	1.05844E-10	6.0076E-09	
13	0.000935184	0.000979204	1.93774E-09	2.32926E-09	
13.5	0.000957869	0.001003246	2.05912E-09	5.03341E-09	
14	0.001015431	0.001026309	1.18331E-10	1.65147E-08	
14.5	0.00100235	0.001048434	2.12372E-09	1.33237E-08	

ตารางที่ ง.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 100°C (ต่อ)

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S
15	0.001014877	0.001069659	3.00105E-09	1.63725E-08
15.5	0.001047633	0.00109002	1.7966E-09	2.58281E-08
16	0.001087401	0.001109552	4.90658E-10	4.01918E-08
16.5	0.001092526	0.001128289	1.279E-09	4.2273E-08
17	0.001111739	0.001146264	1.19201E-09	5.05425E-08
17.5	0.001129931	0.001163508	1.12737E-09	5.90535E-08
18	0.001139389	0.001180049	1.65323E-09	6.37398E-08
18.5	0.001164373	0.001195918	9.95074E-10	7.69791E-08
19	0.001180735	0.001211141	9.24499E-10	8.63262E-08
19.5	0.001249421	0.001225744	5.60599E-10	1.31406E-07
20	0.001231048	0.001239753	7.57841E-11	1.18423E-07
20.5	0.001237567	0.001253192	2.44161E-10	1.22952E-07
21	0.001303844	0.001266084	1.4258E-09	1.73824E-07
21.5	0.001366972	0.001278452	7.83576E-09	2.30448E-07
22	0.001312118	0.001290316	4.7532E-10	1.80792E-07
22.5	0.001360169	0.001301697	3.41895E-09	2.23963E-07
23	0.001301865	0.001312616	1.15577E-10	1.72178E-07
23.5	0.001330301	0.00132309	5.19983E-11	1.96585E-07
24	0.001353628	0.001333137	4.19853E-10	2.17814E-07
Total	0.039911474	0.039972185	5.24683E-08	5.88388E-06
$R_{f,avg}$	0.000886922			

ตารางที่ ๓.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 110°C

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S	r^2
1.3	0	9.06735E-05	8.22169E-09	1.16624E-06	0.994514255
1.5	8.18052E-05	0.000119796	1.44332E-09	9.96249E-07	
2	0.000198726	0.000190665	6.49816E-11	7.76517E-07	
2.5	0.000271695	0.000258848	1.6506E-10	6.5324E-07	
3	0.000364151	0.000324447	1.5764E-09	5.12337E-07	
3.5	0.000433056	0.00038756	2.06983E-09	4.18444E-07	
4	0.000471199	0.000448282	5.25206E-10	3.7055E-07	
4.5	0.00047807	0.000506703	8.19865E-10	3.62233E-07	
5	0.000580971	0.00056291	3.26204E-10	2.48958E-07	
5.5	0.000630309	0.000616987	1.77454E-10	2.02158E-07	
6	0.000724805	0.000669015	3.11246E-09	1.26112E-07	
6.5	0.000739621	0.000719072	4.22266E-10	1.15809E-07	
7	0.000782545	0.000767232	2.34489E-10	8.84368E-08	
7.5	0.000821538	0.000813567	6.3538E-11	6.67656E-08	
8	0.000871489	0.000858146	1.78044E-10	4.34468E-08	
8.5	0.000905344	0.000901035	1.85661E-11	3.04795E-08	
9	0.000950889	0.0009423	7.37799E-11	1.66509E-08	
9.5	0.000994886	0.000982001	1.66035E-10	7.2321E-09	
10	0.001028571	0.001020197	7.01143E-11	2.63757E-09	
10.5	0.001087131	0.001056946	9.11121E-10	5.18862E-11	
11	0.001127624	0.001092303	1.24759E-09	2.27494E-09	
11.5	0.001154281	0.00112632	7.8184E-10	5.52839E-09	
12	0.001132756	0.001159048	6.91263E-10	2.79076E-09	
12.5	0.001192592	0.001190535	4.23155E-12	1.26932E-08	
13	0.00124273	0.00122083	4.79646E-10	2.65046E-08	
13.5	0.001241162	0.001249976	7.76819E-11	2.59965E-08	

ตารางที่ ๓.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 110°C (ต่อ)

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S
14	0.001278692	0.001278018	4.54446E-13	3.95072E-08
14.5	0.001261861	0.001304997	1.86075E-09	3.30996E-08
15	0.001290595	0.001330954	1.6289E-09	4.43805E-08
15.5	0.001299558	0.001355928	3.17756E-09	4.82374E-08
16	0.001302311	0.001379955	6.02865E-09	4.94541E-08
16.5	0.001316022	0.001403072	7.57772E-09	5.57402E-08
17	0.001405055	0.001425312	4.1037E-10	1.05707E-07
17.5	0.001403877	0.00144671	1.83473E-09	1.04943E-07
18	0.001453694	0.001467297	1.85046E-10	1.39701E-07
18.5	0.0014819	0.001487104	2.70905E-11	1.61581E-07
19	0.001540903	0.001506161	1.20703E-09	2.12498E-07
19.5	0.001570096	0.001524495	2.07945E-09	2.40265E-07
20	0.001568699	0.001542135	7.05657E-10	2.38897E-07
20.5	0.001582239	0.001559106	5.35146E-10	2.52316E-07
21	0.001596954	0.001575434	4.63109E-10	2.67316E-07
21.5	0.001614185	0.001591143	5.30908E-10	2.8543E-07
22	0.001617653	0.001606257	1.29855E-10	2.89148E-07
22.5	0.001637217	0.001620798	2.69553E-10	3.10571E-07
23	0.00163449	0.001634789	8.93343E-14	3.07539E-07
23.5	0.001684169	0.001648249	1.29024E-09	3.65107E-07
24	0.001708497	0.001661199	2.23706E-09	3.95099E-07
Total	0.05075661	0.050624508	5.6102E-08	1.02269E-05
$R_{f,avg}$	0.001079928			

ตารางที่ ๓.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 120°C

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S	r^2
0.9	0	7.39091E-05	5.46255E-09	1.78278E-06	0.997633272
1	7.69314E-05	9.24938E-05	2.42187E-10	1.58326E-06	
1.5	0.000233347	0.000183286	2.50615E-09	1.2141E-06	
2	0.00029385	0.000270626	5.39364E-10	1.08443E-06	
2.5	0.000357689	0.000354644	9.27387E-12	9.55545E-07	
3	0.000470837	0.000435467	1.25106E-09	7.47139E-07	
3.5	0.000527478	0.000513217	2.0339E-10	6.52429E-07	
4	0.000589513	0.00058801	2.25962E-12	5.56063E-07	
4.5	0.000682175	0.000659958	4.93579E-10	4.26453E-07	
5	0.000714725	0.000729171	2.08697E-10	3.85001E-07	
5.5	0.000843269	0.000795752	2.25794E-09	2.42005E-07	
6	0.000921827	0.0008598	3.84732E-09	1.70885E-07	
6.5	0.000921571	0.000921413	2.47975E-14	1.71097E-07	
7	0.000962559	0.000980683	3.28499E-10	1.38868E-07	
7.5	0.000998783	0.0010377	1.51449E-09	1.13182E-07	
8	0.001066382	0.001092547	6.84608E-10	7.22677E-08	
8.5	0.001123007	0.00114531	4.97394E-10	4.50296E-08	
9	0.001169661	0.001196065	6.97166E-10	2.7406E-08	
9.5	0.001242927	0.001244891	3.85756E-12	8.51602E-09	
10	0.001309538	0.00129186	3.12536E-10	6.58986E-10	
10.5	0.001372918	0.001337042	1.2871E-09	1.422E-09	
11	0.001351445	0.001380507	8.44603E-10	2.63597E-10	
11.5	0.001428096	0.001422318	3.33844E-11	8.62804E-09	
12	0.001461191	0.00146254	1.82081E-12	1.58714E-08	
12.5	0.001501906	0.001501232	4.54689E-13	2.7788E-08	
13	0.001502467	0.001538453	1.29497E-09	2.79752E-08	

ตารางที่ ๓.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์แบบจำลองที่อุณหภูมิ 120°C (ต่อ)

เวลา (hr)	R_f จากผลการทดลอง	R_f จากแบบจำลอง	J	S
13.5	0.001564213	0.001574258	1.00894E-10	5.24429E-08
14	0.001631081	0.001608701	5.00845E-10	8.75403E-08
14.5	0.00169184	0.001641835	2.50043E-09	1.27185E-07
15	0.001713415	0.001673709	1.57655E-09	1.4304E-07
15.5	0.001724389	0.001704371	4.00743E-10	1.51461E-07
16	0.001751801	0.001733866	3.21664E-10	1.73549E-07
16.5	0.001749281	0.00176224	1.67938E-10	1.71456E-07
17	0.001775348	0.001789535	2.01284E-10	1.93722E-07
17.5	0.001796565	0.001815792	3.69677E-10	2.1285E-07
18	0.001811487	0.001841051	8.7404E-10	2.26841E-07
18.5	0.001839086	0.001865349	6.89753E-10	2.53892E-07
19	0.001868026	0.001888723	4.28356E-10	2.83894E-07
19.5	0.001879001	0.001911208	1.03732E-09	2.95709E-07
20	0.001915855	0.001932838	2.88429E-10	3.3715E-07
20.5	0.001952351	0.001953646	1.67483E-12	3.80865E-07
21	0.001998002	0.001973662	5.92432E-10	4.39294E-07
21.5	0.002013484	0.001992917	4.22997E-10	4.60057E-07
22	0.002081799	0.00201144	4.95036E-09	5.57396E-07
22.5	0.002025889	0.002029258	1.13503E-11	4.77039E-07
23	0.002055646	0.002046399	8.55152E-11	5.1903E-07
23.5	0.002066706	0.002062888	1.45797E-11	5.35088E-07
24	0.002060683	0.00207875	3.26432E-10	5.26312E-07
Total	0.064090043	0.064001331	4.03879E-08	1.70649E-05
$R_{f,avg}$	0.001335209			

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองโดยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) คือการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรต้น ซึ่งตัวแปรต้นหรือเรียกว่าตัวแปรพยากรณ์ มีตั้งแต่กรณีมีตัวพยากรณ์เพียงตัวเดียว เรียกว่าการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression Analysis) หรือการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear Regression analysis) แต่ถ้ามีพยากรณ์ 2 ตัวขึ้นไป แต่มีตัวแปรตามตัวเดียว จะเรียกความสัมพันธ์แบบนี้ว่า การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression analysis) และในกรณีที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear Regression analysis) ดังเช่นแบบจำลองในงานวิจัยนี้ มีวิธีการหาความสัมพันธ์ดังวิธีการต่อไปนี้

ถ้าสมการทั่วไปคือ

$$f(x) = a_0(1 - e^{-a_1x}) + c \quad (ง.1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลและแบบจำลองคือ

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) + c_i \quad (ง.2)$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจากผลการทดลอง

$f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)$ คือ สมการซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระ x_i และเป็นฟังก์ชันของ

a_0, a_1, \dots, a_m

และ c_i คือค่าผิดพลาดจากจากแบบจำลองเมื่อเทียบกับผลการทดลอง

และเพื่อความสะดวกสมการ ง.2 เขียนอยู่ในรูป

$$y_i = f(x_i) + c_i \quad (ง.3)$$

แบบจำลองแบบไม่เป็นเส้นตรงสามารถจัดอยู่ในรูปแบบอนุกรมเทเลอร์ดังสมการ ง.4

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 \quad (ง.4)$$

เมื่อ j คือค่าเดาเริ่มต้น

$j+1$ คือจากการพยากรณ์

$$\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}$$

และ $\Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$

แทนสมการ ง.4 ในสมการ ง.3

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + c_i \quad (ง.5)$$

จัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์

$$\{D\} = [Z_j]\{\Delta A\} + \{E\} \quad (ง.6)$$

เมื่อ $[Z_j]$ คือเมทริกซ์ของอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน f ซึ่งได้จากการเดาค่าเริ่มต้น

$$[Z_j] = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_n} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} \end{pmatrix}$$

โดยที่ n คือจำนวนข้อมูล และ $\frac{\partial f_n}{\partial a_k}$ คืออนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชัน อันดับที่ k และเวกเตอร์ $\{D\}$ คือความแตกต่างของการทดลองและแบบจำลอง

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n - f(x_n) \end{Bmatrix}$$

และเวกเตอร์ $\{\Delta A\}$ คือค่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร

$$\{\Delta A\} = \begin{Bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta a_m \end{Bmatrix}$$

นำสมการ ง.6 มาแก้สมการเพื่อหา $\{\Delta A\}$ โดยสมการ ง.7

$$[[Z_j]^T [Z_j]] \{\Delta A\} = [Z_j]^T \{D\} \quad \text{ง.7}$$

คำตอบจากสมการที่ ง.7 นำมาบวกเข้ากับค่าเดาเริ่มต้น

$$a_{0,j+1} = a_{0,j} + \Delta a_0$$

$$\text{และ } a_{1,j+1} = a_{1,j} + \Delta a_1$$

หลังจากนั้นทำการคำนวณซ้ำจนกระทั่งค่าความผิดพลาดยอมรับได้ตามสมการ ง.8

$$|\varepsilon_a|_k = \left| \frac{a_{k,j+1} - a_{k,j}}{a_{k,j+1}} \right| 100\%$$

ง.8

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล	นาครินทร์ จันทร์พวง
วัน เดือน ปีเกิด	18 มกราคม พ.ศ. 2522
สถานที่เกิด	จ. อุบลราชธานี
ที่อยู่ปัจจุบัน	44/1 ถ.เทศบาล 1 ต.วารินชำราบ อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
โทรศัพท์	081-4881686
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2534	มัธยมศึกษา โรงเรียนเบ็ญจมมหาราช อุบลราชธานี สำเร็จการศึกษา ปีการศึกษา 2539
พ.ศ.2540	ศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ขอนแก่น เกรดเฉลี่ย 2.46 สำเร็จ การศึกษาปีการศึกษา 2543
พ.ศ.2551	ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม เคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เกรดเฉลี่ย 3.60 สำเร็จการศึกษา ปีการศึกษา 2554