การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์

นายปริญญา วณิชเจริญการ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FOULING FORMATION AND THE IMPACTS IN ETHYLENE DICHLORIDE RECOVERY PROCESS

Mr. Parinya Wanitcharoenkarn

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์
โดย	นายปริญญา วณิชเจริญการ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.กษิดิศ หนูทอง)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญา วณิชเจริญการ : การก่อตัวของตะกรันและผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์. (FOULING FORMATION AND THE IMPACTS IN ETHYLENE DICHLORIDE RECOVERY PROCESS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สุรเทพ เขียวหอม, 102 หน้า.

ในกระบวนการผลิตโมโนเมอร์ไวนิลคลอไรด์ พบปัญหาการเกิดตะกรันในกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ที่หม้อต้มซ้ำ ซึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อความสามารถในกระบวนการผลิต ระบบสาธารณูปโภค และต้นทุนการดำเนินการผลิต ในการทดลองการก่อตัวของตะกรันจึงมีความสำคัญมากในการวางแผนบำรุงรักษาเครื่องจักร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันเพื่อใช้ในการทำนายการก่อตัวของตะกรันของเอทิลีนไดคลอไรด์ โดยความสัมพันธ์ของค่าความต้านทานตะกรันกับเวลาและอุณหภูมิเป็นดังสมการ

$$R_f(T,t) = 1.23 \times 10^{-4}T - (9 \times 10^{-5} - 0.0033)e^{-t/(0.3615T-13.754)} - 0.0076$$

นอกจากนี้ยังนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เปลี่ยนแปลงจากผลของตะกรันมาประเมินประสิทธิภาพของระบบ โดยจำลองกระบวนการกลั่นด้วยโปรแกรม HYSYS พบว่าเมื่อให้อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สูงขึ้น การเกิดตะกรันขึ้นในระบบจะสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง และประสิทธิภาพในกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.........วิศวกรรมเคมี..........ลายมือชื่อนิสิต.........ปริญญา.........
สาขาวิชา........วิศวกรรมเคมี..........ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.........
ปีการศึกษา.....2553...................

5171501221 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : ETHYLENE DICHLORIDE/FOULING/RATE OF FOULING FORMATION

PARINYA WANITCHAROENKARN: FOULING FORMATION AND THE IMPACTS IN ETHYLENE DICHLORIDE RECOVERY PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. SOORATHEP KHEAWHOM, 102 pp.

In process of Vinyl Chloride Monomer, the fouling problem occurs in re-boiler of Ethylene dichloride distillation. The fouling problem affect to the performance of process, utility and operating cost. The prediction of fouling process is most important to for maintenancing the plant. In this work, the fouling apparatus machine is devised to predict the fouling formation of Ethylene dichloride, It is found that the relation between fouling resistant (R_f) and time and temperature is

$$R_f(T,t) = 1.23 \times 10^{-4}T - (9 \times 10^{-5} - 0.0033)e^{-t/(0.3615T-13.754)} - 0.0076$$

In addition, the overall heat transfer coefficient uses to evaluate the effectiveness of the system by HYSYS, the overall heat transfer coefficient reduced, the resulting efficiency of distillation column reduced. Which the temperature of Ethylene dichloride is increased the performance of the system is reduced.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรเทพ เขียวหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร.กษิดิศ หนูทอง กรรมการ และอาจารย์ ดร.วีรยุทธ เลิศบำรุงสุข กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ซึ่งได้เสียสละเวลาในการให้คำแนะนำแนวทางในการพัฒนางานวิจัย และข้อคิดเห็นต่างๆ ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงที่ได้ให้ความกรุณาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงลงได้

ขอขอบพระคุณ บริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด ซึ่งได้ให้ความอนุเคราะห์สารเอทิลีนไดคลอไรด์เพื่อใช้ในการศึกษา และทดลอง

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการออกแบบเครื่องทดสอบตะกรัน และวงจรไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุม จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและพี่น้องในครอบครัวทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ

กิตติกรรมประกาศ.. ฉ

สารบัญ.. ช

สารบัญตาราง.. ฌ

สารบัญภาพ.. ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.. ฎ

บทที่

1.บทนำ.. 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์.. 1

1.3 ขอบเขตงานวิจัย.. 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.. 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.. 2

2. ทฤษฎี.. 3

2.1 กระบวนการผลิต.. 3

2.1.1 เอทิลีนไดคลอไรด์ (EDC).. 3

2.1.2 ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (VCM).. 8

2.2 การเกิดตะกรัน.. 10

2.2.1 ชนิดของตะกรัน.. 10

2.2.2 รูปแบบการก่อตัวของตะกรัน.. 11

2.2.3 ผลกระทบของตะกรันบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.. 12

2.3 การถ่ายเทความร้อน.. 12

2.3.1 การนำความร้อน.. 12

2.3.2 การพาความร้อน.. 14

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน.. 15

2.3.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.. 16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 20
3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน........ 20
3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกรันของเอทิลีนไดคลอไรด์....................... 22
4. การออกแบบและการทดลอง.. 24
4.1 การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน...................................... 24
4.1.1 การควบคุมความร้อนของฮีตเตอร์.. 27
4.1.2 การควบคุมความเร็วใบพัด.. 27
4.1.3 การวัดอุณหภูมิ... 27
4.1.4 การควบคุมความเร็วปั้มในการนำน้ำหล่อเย็นไปควบคุมอุณหภูมิ
ในเครื่องทดสอบ.. 28
4.1.5 วงจรไฟฟ้าและแบบวงจรควบคุมเครื่องทดสอบ.......................... 28
4.2 การใช้งานเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน.. 32
4.3 วิธีการทดลอง... 33
5. การทดลองการก่อตัวของตะกรันของเอทิลีนไดคลอไรด์.. 34
6. การสร้างแบบจำลองกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยโปรแกรม HYSYS………. 44
6.1 การสร้างแบบจำลองกระบวนการกลั่น……………………………..………… 44
6.2 ผลการจำลองการก่อตัวของตะกรันเอทิลีนไดคลอไรด์................................ 47
6.2.1 ผลการจำลองอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ในสายออกเมื่อเกิด
ตะกรัน 48
6.2.2 ผลการจำลองพลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรัน........................ 55
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.. 62
7.1 สรุปผลการวิจัย... 62
7.2 ข้อเสนอแนะ.. 63
รายการอ้างอิง.. 64
ภาคผนวก.. 65
ภาคผนวก ก. โค้ด MATLAB ในการควบคุมเครื่องทดสอบตะกรัน...................... 65
ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง... 85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 101

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

6.1 แสดงคุณสมบัติของสารป้อน.. 45

6.2 แสดงองค์ประกอบของสารป้อน.. 45

6.3 แสดงคุณสมบัติของหอกลั่น... 46

6.4 แสดงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์.. 46

6.5 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์.. 47

6.6 แสดงอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารในระบบที่เกิดจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส.. 48

6.7 แสดงอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารในระบบที่เกิดจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.. 49

6.8 แสดงอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารในระบบที่เกิดจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส.. 51

6.9 แสดงปริมาณไอน้ำและต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส.. 55

6.10 แสดงปริมาณไอน้ำและต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส.. 56

6.11 แสดงปริมาณไอน้ำและต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส.. 58

ข. 1 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 85 องศาเซลเซียส...................... 87

ข. 2 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 90 องศาเซลเซียส...................... 89

ข. 3 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 100 องศาเซลเซียส.................... 92

ข. 4 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 110 องศาเซลเซียส.................... 95

ข. 5 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 115 องศาเซลเซียส.................... 98

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 แสดงกระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์... 3
2.2 แสดงกระบวนการผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยวิธีการคลอริเนชั่น..................... 4
2.3 แสดงกระบวนการผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยวิธีการอ๊อกซิคลอริเนชั่น............. 5
2.4 แสดงกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์.. 6
2.5 การประยุกต์การใช้งานของเอทิลีนไดคลอไรด์.. 7
2.6 กระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์ด้วยกระบวนการดีไฮโดรคลอริเนชั่น................ 8
2.7 แสดงกระบวนการกลั่นไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์... 9
2.8 แสดงกระบวนการผลิตโพลีไวนิลคลอไรด์.. 9
2.9 แสดงตัวอย่างตะกรันที่เกิดจากกระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์......... 10
2.10 รูปแบบการก่อตัวของตะกรันกับเวลา……………………………………………… 11
2.11 การนำความร้อนผ่านผนังหนา Δx.. 13
2.12 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน... 14
2.13 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา $T_s > T_\infty$.. 15
2.14 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น... 16
3.1 แสดงเครื่องทดสอบตะกรันโดยใช้ท่อทดสอบ... 20
3.2 แสดงเครื่องทดสอบการเกิดตะกรัน... 21
3.3 แสดงเครื่องทดสอบตะกรันของเหลวอินทรีย์ ที่อุณหภูมิและความดันสูง........... 22
4.1 แสดงรายละเอียดของเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน.............................. 24
4.2 แสดงแบบฮีตเตอร์……………………………………………………………… 25
4.3 แสดงชุดเทอโมคัปเปิล และเทอโมเวล สำหรับวัดอุณหภูมิภายในฮีตเตอร์…….. 25
4.4 แสดงชุดเทอโมคัปเปิล และเทอโมเวล สำหรับวัดอุณหภูมิของเหลว…………… 25
4.5 แสดงแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน…………………………………… 26
4.6 แสดงฮีตเตอร์และเทอโมเวล และเครื่องปรับกำลังโวลต์................................. 27
4.7 แสดงเทอโมคัปเปิล ตัวแปลงสัญญาณจากกระแสเป็นโวลต์ และตัวรับ-ส่ง ข้อมูล... 28
4.8 แสดงวงจรกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้อุปกรณ์ต่างๆ... 29

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพที่ หน้า

4.9 แสดงวงจรตัวตัดต่อกระแสไฟ........ 30

4.10 แสดงวงจรอุปกรณ์ควบคุมรับ-ส่งสัญญาณ........ 31

4.11 เครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน........ 32

4.12 เครื่องทำความเย็น........ 32

5.1 แสดงค่าความต้านทานตะกรันที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 85, 90, 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียส........ 35

5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส........ 36

5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส........ 37

5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส........ 37

5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส........ 38

5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส........ 39

5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของความต้านทานรวมที่เข้าสู่สมดุล – ค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์..... 40

5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของคุณสมบัติในระบบ กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์........ 41

5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์........ 42

6.1 แสดงแบบจำลองในกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์โดยใช้โปรแกรม HYSYS........ 44

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน เอทิลีนไดคลอไรด์ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในหลากหลายอุตสาหกรรม ในประเทศไทย เอทิลีนไดคลอไรด์ประมาณ 95 เปอร์เซ็นต์ [1] ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ เพื่อนำไปใช้ในการผลิตโพลีไวนิลคลอไรด์ต่อไป

กระบวนการผลิตมอนอเมอร์ไวนิลคลอไรด์ ได้มาจากการนำเอทิลีน และคลอรีน มาทำปฏิกิริยาคลอริเนชั่น แล้วใช้กระบวนการแตกพันธะ ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ แต่ในกระบวนการแตกพันธะจะมีเอทิลีนไดคลอไรด์เหลืออยู่ และมีผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งไฮโดรเจนคลอไรด์สามารถนำกลับมาทำปฏิกิริยาออกซิคลอรอเนชั่นกับ เอทิลีน และออกซิเจน ให้ได้เป็นเอทิลีนไดคลอไรด์แต่ปฏิกิริยานี้มีสารที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการกลั่นเพิ่มขึ้น เพื่อนำเอทิลีนไดคลอไรด์ที่มีความบริสุทธิต่ำมากลั่นเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแตกพันธะ

ปัญหาในกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ที่พบ คือการเกิดตะกรันขึ้นบริเวณผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนหม้อต้มซ้ำในหอกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ ซึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์ลดลง ทำให้โรงงานจำเป็นต้องหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาด หรือต้องให้พลังงานแก่ระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรัน และนำเครื่องทดสอบมาทำการทดลองที่อุณหภูมิ 85 90 100 110 และ 115 องศาเซลเซียสเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา และนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในสภาวะที่เกิดตะกรันมาประเมินผลกระทบในกระบวนการนำกลับของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์โดยใช้โปรแกรมไฮซิส รวมไปถึงการคำนวนราคาต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากผลของการเกิดตะกรัน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกรันบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
2. เพื่อศึกษาการก่อตัวของตะกรันในสภาวะอุณหภูมิที่ต่างกัน
3. เพื่อประเมินผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทำนายอัตราการก่อตัวของตะกรัน โดยพิจารณาภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน และสภาวะที่ศึกษาอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 120 องศาเซลเซียส ในการประเมินผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์จะใช้โปรแกรม MATLAB และตรวจวัดสมรรถนะของกระบวนการนำกลับจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้โปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหล 60 ตันต่อชั่วโมง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบ จัดหาอุปกรณ์ และสร้างอุปกรณ์ซึ่งใช้ในการทดสอบการเกิดตะกรัน
3. ทำการทดลองการเกิดตะกรันของสารเอทิลีนไดคลอไรด์ในสภาวะต่างๆ และสร้างแบบจำลองการก่อตัวของตะกรัน
4. ประเมินผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์
5. หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานของกระบวนการนำกลับของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์
6. สรุปผลและจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

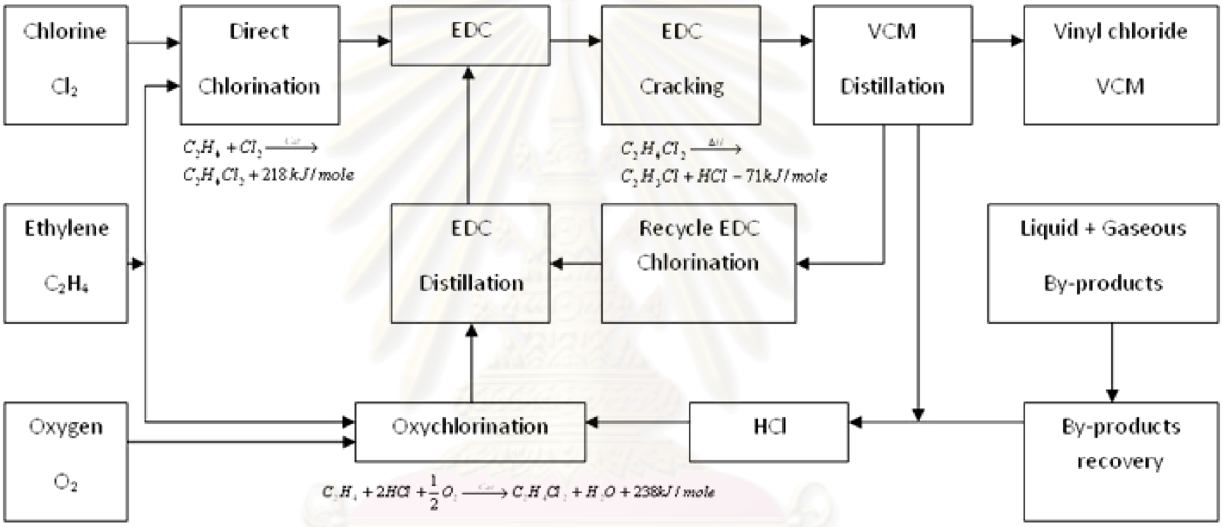
1. แบบจำลองสามารถทำนายอัตราการเกิดตะกรันของหอกลั่นในกระบวนการนำกลับของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์
2. ทราบผลกระทบของตะกรันในกระบวนการนำกลับของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์
3. ทราบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินงานและระยะเวลาในการวางแผนเพื่อทำการบำรุงรักษาหอกลั่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตมอนอเมอร์ไวนิลคลอไรด์ ได้มาจากการนำเอทิลีน และคลอรีน มาทำปฏิกิริยาคลอริเนชั่น (Chlorination) และ ได้มาจากการนำเอทิลีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ และออกซิเจน มาทำปฏิกิริยาออกซิคลอริเนชั่น (Oxychlorination) ให้ได้เอทิลีนไดคลอไรด์ก่อน แล้วจึงใช้กระบวนการแตกพันธะ (Cracking) ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ ซึ่งกระบวนการผลิตเป็นดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตมอนอเมอร์ไวนิลคลอไรด์ [2]

2.1.1 เอทิลีนไดคลอไรด์ (EDC)

เอทิลีนไดคลอไรด์เป็นของเหลวไม่มีสีคล้ายน้ำมัน มีกลิ่นหอมคล้ายคลอโรฟอร์ม เป็นสารพิษและติดไฟง่าย ซึ่งชื่อทางเคมีของเอทิลีนไดคลอไรด์ คือ1,2-ไดคลอโรอีเทน [2] มีโครงสร้างดังนี้

```
      H   H
Cl  - C - C - Cl
      H   H
```

เอทิลีนไดคลอไรด์ เป็นผลผลิตจากเอทิลีนและคลอรีนโดยทำปฏิกิริยาคลอริเนชั่นโดยตรง และผลิตได้จากเอทิลีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ และน้ำโดยทำปฏิกิริยาอ๊อกซิคลอริเนชั่น

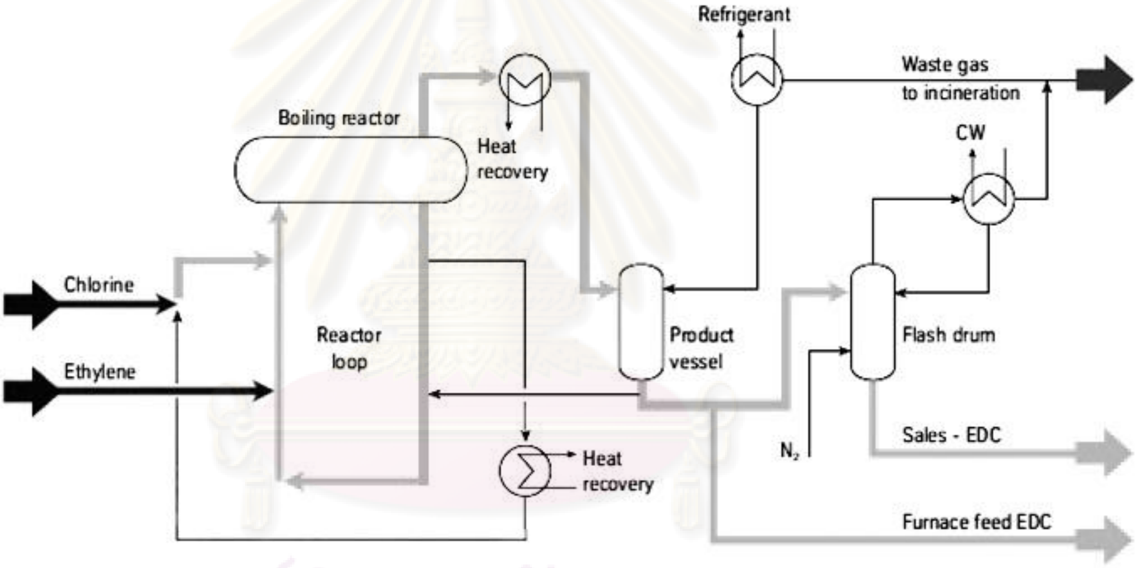
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กระบวนการผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์จากปฏิกิริยาคลอริเนชั่น

กระบวนการคลอริเนชั่นถูกใช้ผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยปฏิกิริยาคายความร้อนอย่างสูงกับเอทิลีน และคลอรีน กระบวนการนี้ทำให้ได้ความบริสุทธิ์ของสารเอทิลีนไดคลอไรด์ถึง 99.5% และมีสารประกอบอื่นเป็นสารเจือปนคือ

- Ethyl chloride
- 1,1-dichloroethane
- Chloroform
- 1,1,2-trichloroethane
- Tetra-Chloroethane

ซึ่งแสดงกระบวนการดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยวิธีการคลอริเนชั่น [2]

ปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตสามารถเขียนได้ดังนี้

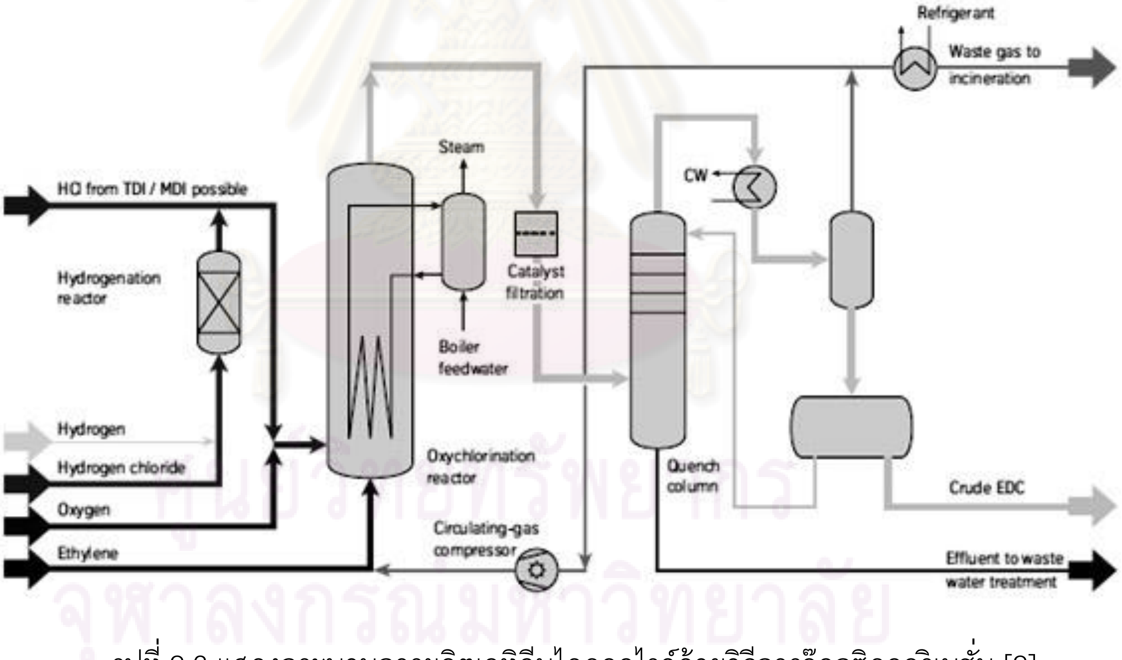
$$C_2H_4 + Cl_2 \xrightarrow{Cat} C_2H_4Cl_2 + 218kJ/mole$$

กระบวนการผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์จากปฏิกิริยาอ๊อกซิคลอริเนชั่น

กระบวนการอ๊อกซิคลอริเนชั่นถูกใช้ผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยปฏิกิริยาคายความร้อนอย่างสูงกับเอทิลีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ และอ๊อกซิเจนโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส และผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีน้ำออกมาด้วย ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกไปแล้วจะมีความบริสุทธิ์ของสารเอทิลีนไดคลอไรด์ถึง 96.3% และมีสารประกอบอื่นเป็นสารเจือปน คือ

- Ethyl chloride
- Cis-Dichloroethylene
- Trichloroacetaldehyde
- Carbon Tetrachloride
- Trichloroethylene
- 1,1,2-trichloroethane
- Tetrachloroethane

ซึ่งแสดงกระบวนการดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการผลิตเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยวิธีการอ๊อกซิคลอริเนชั่น [2]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตสามารถเขียนได้ดังนี้

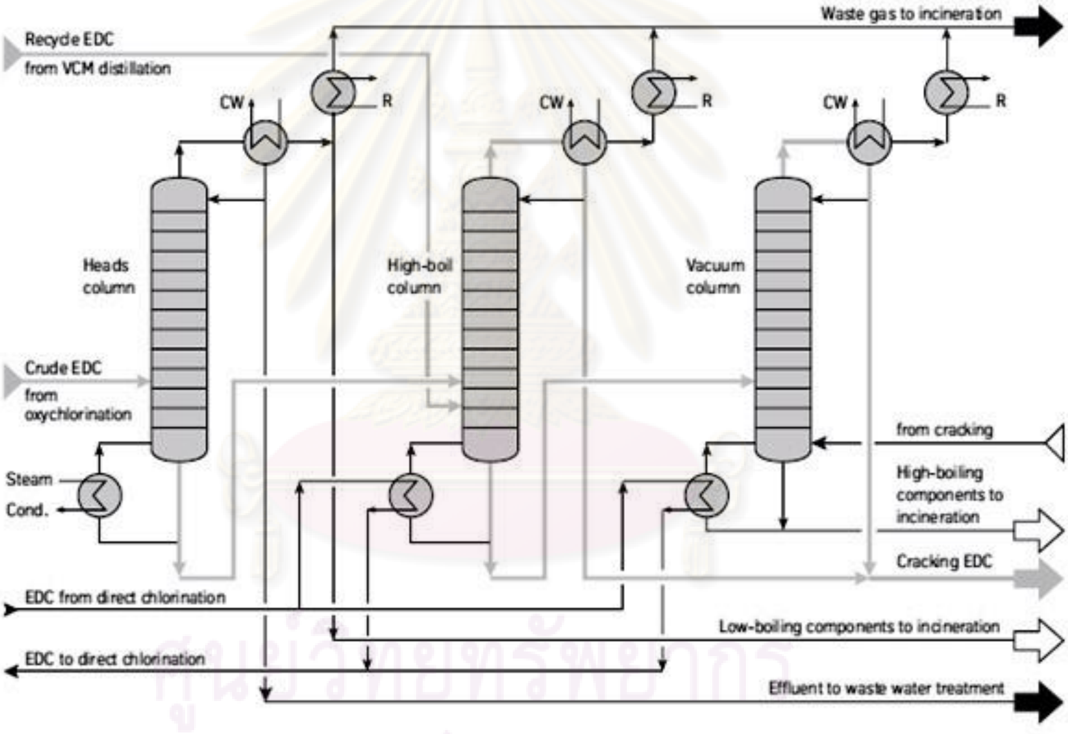
$$C_2H_4 + 2HCl + \frac{1}{2}O_2 \xrightarrow{Cat} C_2H_4Cl_2 + H_2O + 238kJ/mole$$

กระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการทำให้สารเอทิลีนไดคลอไรด์จากกระบวนการอ๊อกซิคลอริเนชั่น คลอริเนชั่น และกระบวนการนำกลับ มาทำให้มีความบริสุทธิ์ที่สูงขึ้น ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการทั้งหมดแล้วความบริสุทธิ์ของสารเอทิลีนไดคลอไรด์จะอยู่ที่ 99.8% และมีสารประกอบอื่นเจือปนอยู่ คือ

- Ethyl chloride
- Chloroprene
- Chloroform
- Monochlorobenzene

ซึ่งกระบวนการกลั่นแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ [2]

ปริมาณการใช้เอทิลีนไดคลอไรด์กว่า 95% ถูกนำไปใช้ในการผลิตไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ ที่เหลือจะใช้ในการผลิตเอทิลีนเอมีน 1% เตตระคลอโรอีเทน 1% ไตรคลอโรอีเทน 1% และเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น สีทาอาคาร ผลิตภัณฑ์ขจัดสารปนเปื้อน เป็นต้น ดังรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 การประยุกต์การใช้งานของเอทิลีนไดคลอไรด์ [1]

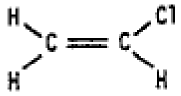
คุณสมบัติของเอทิลลีนไดคลอไรด์

Auto-ignition temperature °C	413
Boiling point °C	83.5
Density at 20 °C	1.257
Explosive limits, vol% in air	6.2-1.6
Flash point °C c.c	13
Melting point °C	-35.4
Molecular weight	98.96
Octanol/water partition coefficient (log Pow)	1.48
Relative density (water = 1)	1.235
Relative vapour density (air = 1)	3.42
Vapour pressure (kPa at 20°C)	8.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

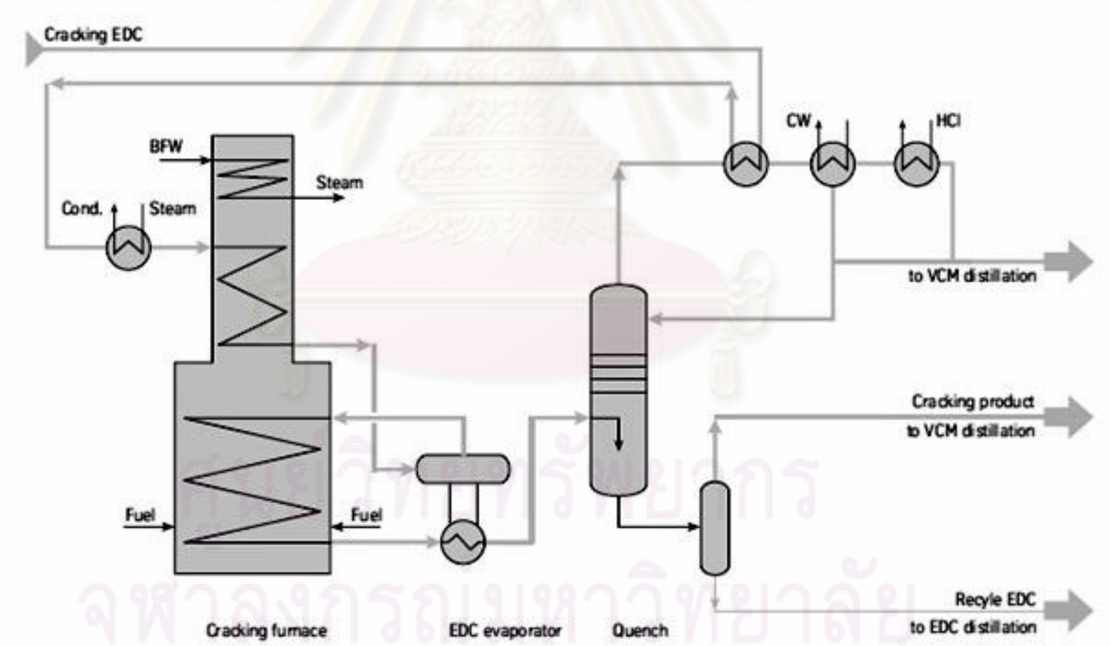
2.1.2 ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ (VCM)

ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ ถูกผลิตจากกระบวนการดีไฮโดรคลอริเนชั่นของเอทิลีนไดคลอไรด์ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการผลิตโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) โดยที่ไวนิลคลอไรด์มีโครงสร้างดังนี้



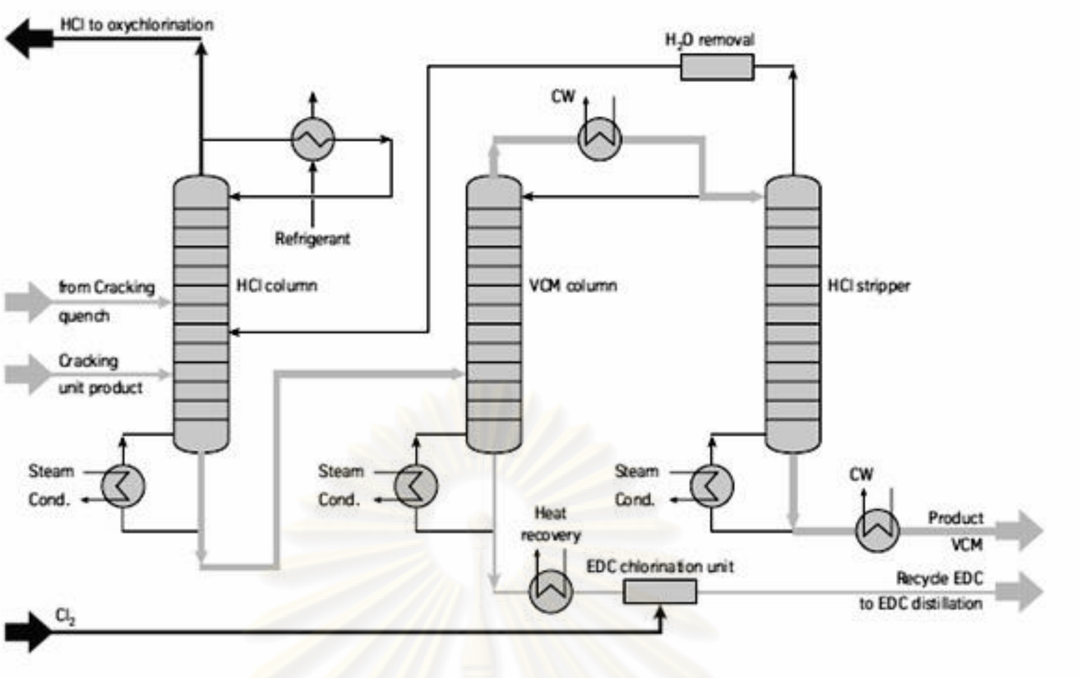
กระบวนการดีไฮโดรคลอริเนชั่น ถูกแสดงในรูปที่ 2.6 กระบวนการเกิดจากการป้อนเอทิลีนไดคลอไรด์ เข้าสู่ Pyrolysis furnace เพื่อแตกพันธะ ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 450 – 620 องศาเซลเซียส และความดัน 450 – 930 กิโลปาสคาล เอทิลีนไดคลอไรด์จะแตกตัวได้ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์และก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ โดยมีสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยา 45 – 60 % และสารทั้งหมดจะถูกส่งไปที่หอกลั่นเพื่อให้ได้ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ที่บริสุทธ์

ปฏิกิริยาดีไฮโดรคลอริเนชั่น : $C_2H_4Cl_2 \xrightarrow{\Delta H} C_2H_3Cl + HCl - 71kJ/mole$



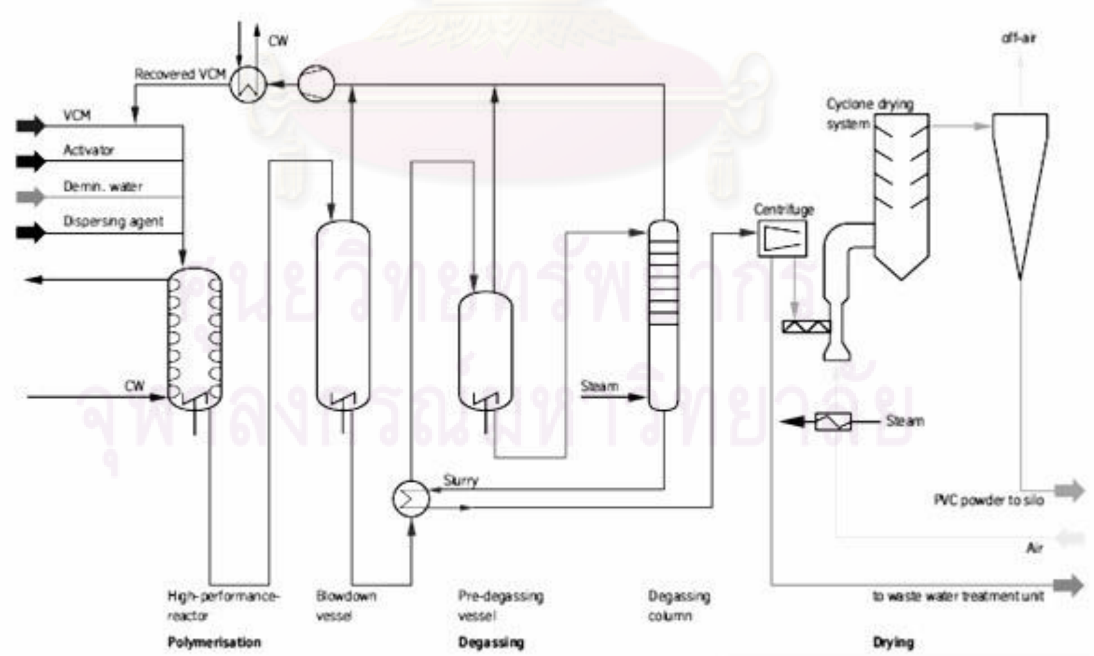
รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์ ด้วยกระบวนการดีไฮโดรคลอริเนชั่น [2]

หลังจากผ่านกระบวนการดีไฮโดรคลอริเนชั่นแล้ว ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการกลั่นเพื่อที่จะกำจัดไฮโดรเจนคลอไรด์ และน้ำ ออกเพื่อเพิ่มความเข้มข้นให้กับไวนอลคลอไรด์โมโนเมอร์ ซึ่งแสดงกระบวนการดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการกลั่นไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ [2]

ไวนิลคลอไรด์มอนอเมอร์ประมาณ 97% นำไปใช้ผลิตโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เพื่อผลิตเป็นชิ้นส่วนยานยนต์ วัสดุก่อสร้าง ท่อ เฟอร์นิเจอร์ และวัสดุบรรจุภัณฑ์ ซึ่งแสดงกระบวนการผลิตดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการผลิตโพลีไวนิลคลอไรด์ [2]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การเกิดตะกรัน

ตะกรันคือ ธาตุที่มารวมตัวกันเป็นก้อนแข็งยึดเกาะตามผิวของอุปกรณ์ซึ่งมีความร้อน โดยปกติธาตุเหล่านี้จะละลายอยู่ในของเหลว เมื่อผ่านผิวของอุปกรณ์ที่มีความร้อน จะเกิดการเปลี่ยนสถานะก่อตัวยึดกันแน่นตามผิวของอุปกรณ์เกิดเป็นตะกรันแข็งขึ้นมา ทั้งนี้ตะกรันสามารถจำแนกออกได้หลายชนิด อาทิ ตะกรันแคลเซียม (หินปูน), ตะกรันสนิมเหล็ก, ตะกรันเกลือ ฯลฯ

การเกิดของตะกรันตามผิวของท่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ จะทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลา , เงิน และประสิทธิภาพในการผลิต ในการบำรุงรักษาและกำจัดตะกรันออกไป

รูปที่ 2.9 รูปแสดงตัวอย่างตะกรันที่เกิดจากกระบวนการผลิตไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์

2.2.1 ชนิดของตะกรัน

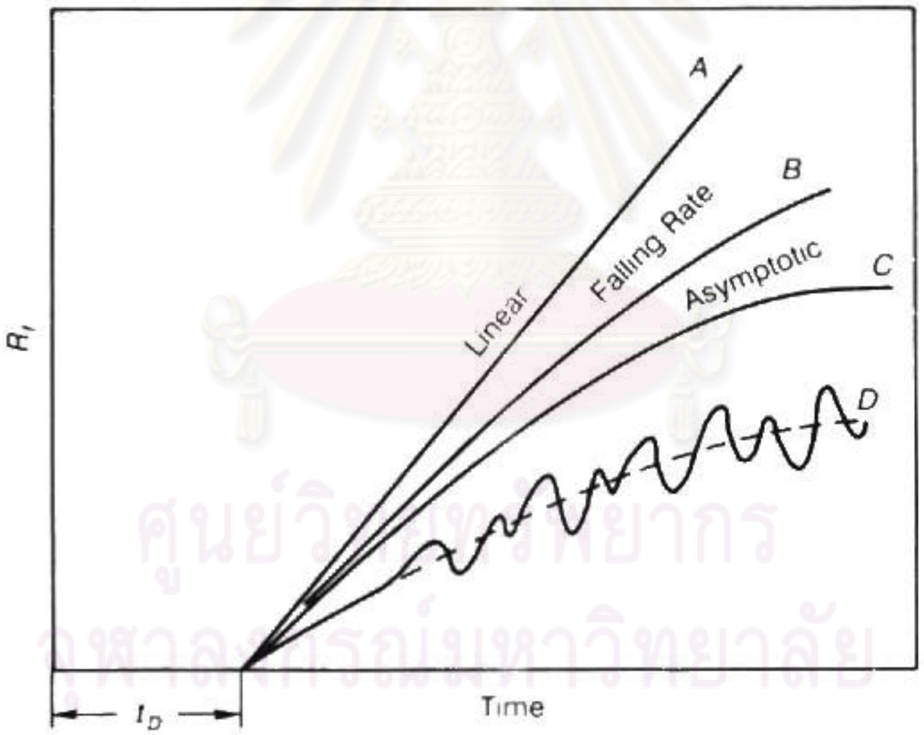
กลไกการเกิดตะกรันมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของของเหลว และองค์ประกอบที่ของในของเหลว ซึ่งสามารถแบ่งกลไกการเกิดตะกรันได้ดังนี้

1. ตะกรันจากการตกตะกอน (Sedimentation fouling) เกิดจากของแข็งแขวนลอยในของเหลว รวมตัวกันโดยจะเกิดด้วยตัวมันเอง ซึ่งมีผลกระทบต่อความเร็วและอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยน
2. ตะกรันจากสารละลาย (Inverse solubility fouling) เกิดจากการตกผลึกของสารละลายบนผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะเกิดบนพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าการอิ่มตัวของสารละลาย
3. ตะกรันจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction fouling) เกิดจากการเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพเป็นของแข็งใกล้กับพื้นผิว

4. ตะกรันจากการกัดกร่อน (Corrosion product fouling) เกิดจากการกัดกร่อนโลหะที่ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แล้วทำปฏิกิริยากับโลหะเปลี่ยนรูปเป็นตะกรันเกาะที่ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวอย่างเช่น สนิม เป็นต้น
5. ตะกรันจากชีววิทยา (Biological fouling) เกิดจากการเกาะติดและการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตประเภทรา แบคทีเรีย เพรียง และหอย เป็นต้น
6. ตะกรันจากกลไกการเผาไหม้ (Combined mechanisms fouling)

2.2.2 **รูปแบบการก่อตัวของตะกรัน**

การก่อตัวของตะกรันมีรูปแบบด้วยกัน 4 แบบ คือ แบบเส้นตรง แบบ Asymptotic แบบกึ่งเส้นตรงและAsymptotic และแบบที่คาดการณ์ไม่ได้ โดยรูปแบบการก่อตัวของตะกรันเทียบกับเวลา แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบการก่อตัวของตะกรันกับเวลา [3]

ซึ่งสมการต้นแบบ สามารถเขียนได้เป็น

แบบเส้นตรง $$R_f(t) = kt$$

แบบ Asymptotic $$R_f(t) = k(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

2.2.3 ผลกระทบของตะกรันบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ผลกระทบของตะกรันเกิดจากการมีของแข็งเกาะบนผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้การนำพาความร้อนระหว่างผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง และเพิ่มความต้านทานในการไหลของของเหลว ซึ่งเราสามารถรู้ปริมาณ และอัตราการเกิดตะกรันได้ด้วยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความร้อนโดยรวม (Overall heat transfer coefficient) จากการเปรียบเทียบค่าระหว่างก่อนและหลังจากเกิดตะกรัน

2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิ 2 บริเวณ โดยความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ถ่ายเทจนกระทั่งทั้ง 2 บริเวณมีอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งเราสามารถแบ่งการถ่ายเทความร้อนออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน
2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน
3. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน

2.3.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)

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

ในกรณีการนำความร้อนถ้าอุณหภูมิที่ทุก ๆ จุดของวัตถุที่นำความร้อนมีค่าคงที่โดยไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาเรียกว่าการนำความร้อนที่สภาวะคงที่(Steady state heat conduction) ในกรณีนี้ ปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยของวัตถุในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าคงที่ ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิของวัตถุทั้งชิ้นหรืออุณหภูมิของวัตถุส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนเปลี่ยนค่าตามเวลา อัตราการนำความร้อนของวัตถุย่อมเปลี่ยนค่าตามเวลาในกรณีนี้เรียกว่าการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่(Unsteady state heat conduction)โดยทั่วไปการนำความร้อนที่เกิดชิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถถือว่าเป็นการนำความร้อนในสภาวะคงที่และปัจจัยสำคัญที่มีส่วนกำหนดอัตราการนำความร้อนก็คือผลต่างของอุณหภูมิ มิติรูปร่างของวัตถุและคุณสมบัติของวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงถึงการนำความร้อนในสภาวะคงตัวผ่านผนังซึ่งมีความหนา

$\Delta X = L$ และพื้นที่ผิว A และผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาของผนังเป็น $\Delta T = T_2 - T_1$ ส่วนรูปที่ 2.12 แสดงทิศทางการนำความร้อน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราการนำความร้อนผ่านผนังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิตลอดความหนาและพื้นที่การนำความร้อนเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของตัวกลาง เขียนเป็นสมการได้ว่า

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

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

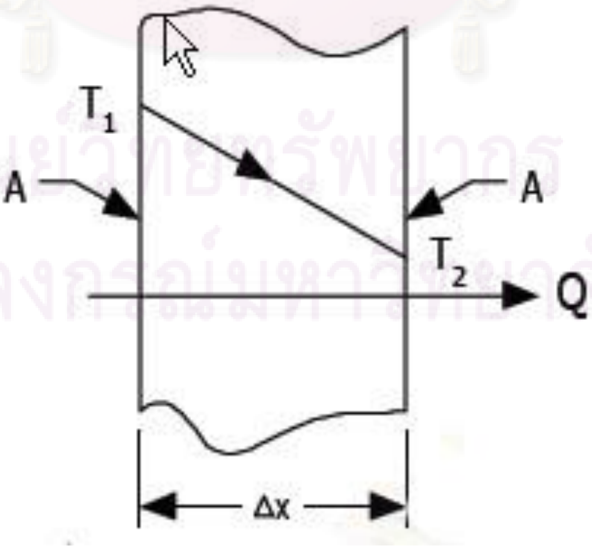
$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dX} \qquad (2.2)$$

Q_{cond} = อัตราการนำความร้อน(W)

K = ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง(W/m^{0}C)

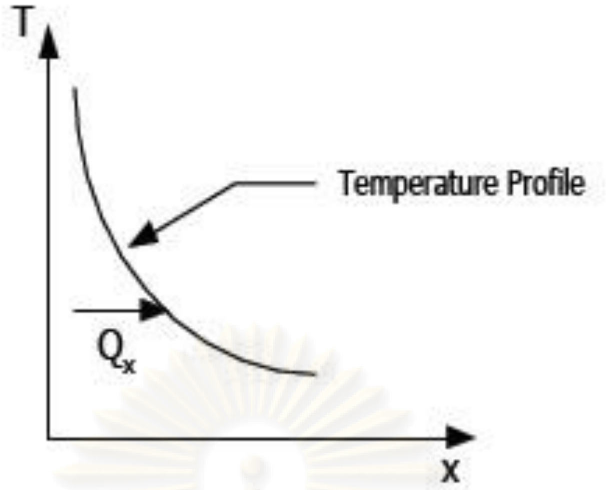
dT/dX = เกรเดียนท์ของอุณหภูมิในทิศทางการนำความร้อน(^{0}C/m)

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



รูปที่ 2.11การนำความร้อนผ่านผนังหนา ΔX [4]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 แสดงทิศทางการไหลของความร้อน [4]

2.3.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยให้โมเลกุลของตัวกลางเคลื่อนที่พาพลังงานความร้อนไปกับตัวกลางจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอัตราการส่งผ่านความร้อนออกจากวัตถุก้อนหนึ่งโดยการพาความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลที่เป็นตัวพาความร้อนกับอุณหภูมิของพื้นที่ผิว A ที่อยู่ติดกับของไหล

อัตราการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ และสามารถแสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาดังแสดงดังรูปที่ 2.13 และสามารถเขียนสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton 's Law of Cooling) ได้ดังสมการ

$$Q_{conv} = hA(T_S - T_\infty) \tag{2.3}$$

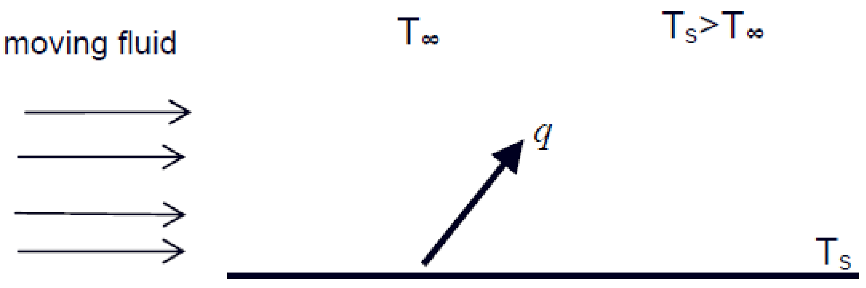
โดยที่ Q_{conv} = อัตราการพาความร้อน (W)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2.{}^0C$)

A = พื้นที่ผิวของการพาความร้อน (m^2)

T_S = อุณหภูมิของพื้นผิว (${}^0C$)

T_∞ = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว (${}^0C$)



รูปที่ 2.13 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา $T_S > T_\infty$ [4]

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นไม่ใช่คุณสมบัติของของไหล แต่เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปลต่างๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนเช่นรูปแบบการไหล(แบบลามินาร์ เทอบิวเลนท์ หรือทรานซิชั่น) รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งตามผิววัตถุ กลไกการพาความร้อนเช่น การพาความร้อนแบบอิสระและการพาความร้อนแบบบังคับ

2.3.3 **การแผ่รังสีความร้อน** (Radiation heat transfer)

วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิเหนือศูนย์องศาสัมบูรณ์จะปลดปล่อยพลังงานจากผิวของวัตถุนั้น อัตราการแผ่รังสีจากผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว A และอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสี่ (หน่วยเป็นเคลวิน) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่า ε เป็นค่าสภาพส่งรังสี (emissivity) ซึ่งขึ้นกับธรรมชาติของพื้นผิวนั้นๆ โดยค่า ε จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยปกติถ้าวัตถุอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อม ก็จะแผ่และดูดกลืนพลังงานในอัตราเดียวกัน จึงทำให้อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าวัตถุนั้นร้อนกว่าสิ่งที่อยู่รอบๆก็จะแผ่พลังงานออกมามากกว่าที่จะดูดกลืน ตัวแผ่รังสีในอุดมคติหรือวัตถุดำ (black body) จะดูดกลืนรังสีทั้งหมดที่ตกกระทบวัตถุ ค่า ε ของวัตถุดำมีค่าเท่ากับ 1

กฎของ สเตฟาน เขียนเป็นสมการการแผ่รังสีของวัตถุได้ดังนี้

$$H = \varepsilon \sigma A T^4 \tag{2.4}$$

H คือ อัตราการแผ่รังสีมีหน่วยเป็นวัตต์

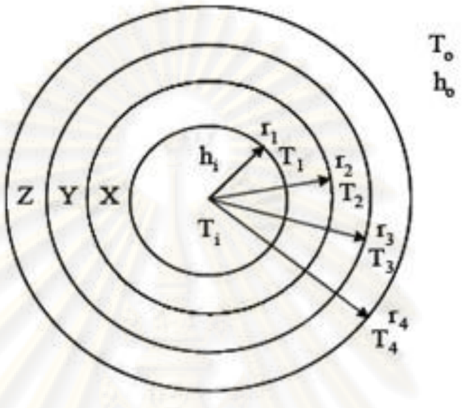
σ คือ ค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลตมานน์ = 5.67×10^{-8} $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

ε คือ ค่าสภาพส่งรังสี (emissivity)

ถ้าวัตถุมีอุณหภูมิ T_1 ขณะที่สิ่งแวดล้อมมีอุณหภูมิ T_2 กำลังเนื่องจากการแผ่รังสี เขียนได้เป็น

$$H_{total} = \varepsilon\sigma A\,(T_1^4 - T_2^4) \tag{2.5}$$

2.3.4 **สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม** (The overall heat-transfer coefficient)



รูปที่ 2.14 การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านผนังท่อหลายชั้น [4]

เมื่อพิจารณาท่อดังแสดงในรูปที่ 2.14 ท่อด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลร้อน T_i อีกด้านหนึ่งสัมผัสกับของไหลเย็น T_o ค่าการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} q = h_i A_i\,(T_i - T_1) &= 2\pi k_X L\frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_1/r_2)} = 2\pi k_Y L\frac{(T_2 - T_3)}{\ln(r_3/r_2)} \\ &= 2\pi k_Z L\frac{(T_3 - T_4)}{\ln(r_4/r_3)} = hA_o(T_o - T_4) \end{aligned} \tag{2.6}$$

สามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อน (2.6) ใหม่ได้เป็น

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{\left(\frac{1}{h_i A_i}\right) + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_X L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_Y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_Z L} + \left(\frac{1}{h_o A_o}\right)} \tag{2.7}$$

หรือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$q = \frac{(T_i - T_o)}{R} \tag{2.8}$$

จากสมการที่(2.6)และสมการที่(2.7)เราสามารถเขียนค่าความต้านทานความรวมของระบบได้เป็น

$$R = \left(\frac{1}{h_i A_i}\right) + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_X L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_Y L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_Z L} + \left(\frac{1}{h_o A_o}\right) \tag{2.9}$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้เป็นดังนี้

$$q = UA(T_i - T_o) = \frac{(T_i - T_o)}{R} \tag{2.10}$$

จากสมการที่ 2.7, สมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของพื้นที่ผิวท่อด้านนอกพบว่าจะมีค่า

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{A_o \ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{A_o \ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \tag{2.11}$$

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(U_0) และค่าความต้านทานความร้อนรวม(R)ได้ดังนี้

$$R = \frac{1}{U_o A_o} \tag{2.12}$$

ในกรณีที่มีตะกรันเกิดขึ้นที่บริเวณผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอกท่อดังรูปที่ 2.4 ค่าความร้อนในกรณีที่มีตะกรันนี้สามารถเขียนได้ดังนี้

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ

i และ o = สภาวะที่เกิดตะกรันด้านในและด้านนอกตามลำดับ

$R_{f,i}$, $R_{f,0}$ = ค่าความตานทานตะกรันที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ

สมการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในสภาวะอันเนื่องมาจากการเกิดตะกรันที่ผิวได้เป็นดังนี้

$$\frac{1}{U_{f,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o}\right) + R_f \tag{2.14}$$

เมื่อ ตัวห้อย i และ o = สภาวะที่เกิดตะกรันด้านในและด้านนอก ตามลำดับ

R_f ,$R_{f,i}$, $R_{f,0}$ = ค่าความต้านทานตะกรันรวมและค่าความต้านทานตระกรันที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ

เมื่อพิจารณาในสภาวะที่ไม่มีตะกรันเกิดขึ้นที่ผิวท่อจะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะหาได้จากสมการ

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

เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{1}{U_{C,o}} = \left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi kL} + \left(\frac{1}{h_o}\right) \tag{2.16}$$

เมื่อ C,i และ o = สภาวะที่ไม่มีตะกรัน,ด้านในและด้านนอกตามลำดับ

เมื่อนำสมการที่ (2.16) ลบด้วยสมการที่ (2.14) จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$R_f = \frac{1}{U_f} - \frac{1}{U_c} \tag{2.17}$$

เมื่อ R_f = ค่าความต้านทานตะกรันรวม,(m^2-K)/W

U_f = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวท่อมีตะกรัน, W/(m^2- K)

U_c = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ผิวท่อยังไม่มีตะกรัน ,W/(m^2- K)

จากสมการที่(2.17)ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานตะกรันรวมสามารถหาได้จากการนำส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ผิวท่อมีตะกรันลบกลับส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของสภาวะที่ยังไม่เกิดตะกรัน

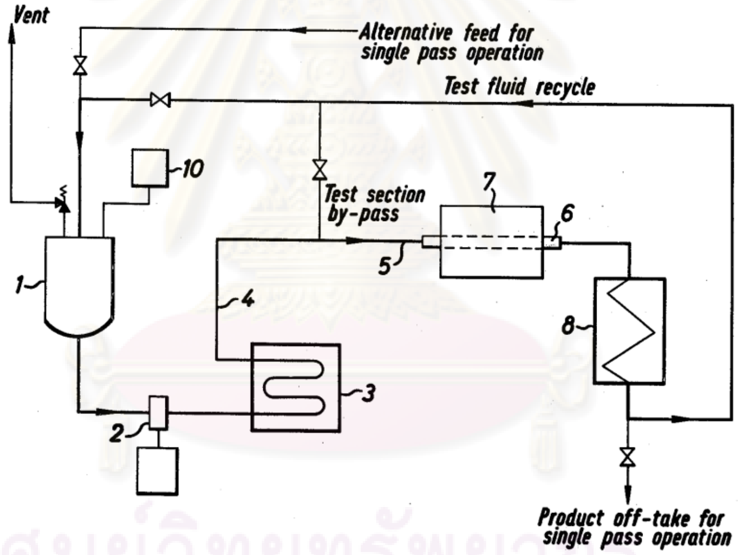
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะแบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องพยากรณ์การเกิดตะกรัน ส่วนที่สองเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาแนวทางในการลดการเกิดตะกรันของเอทิลีนไดคลอไรด์

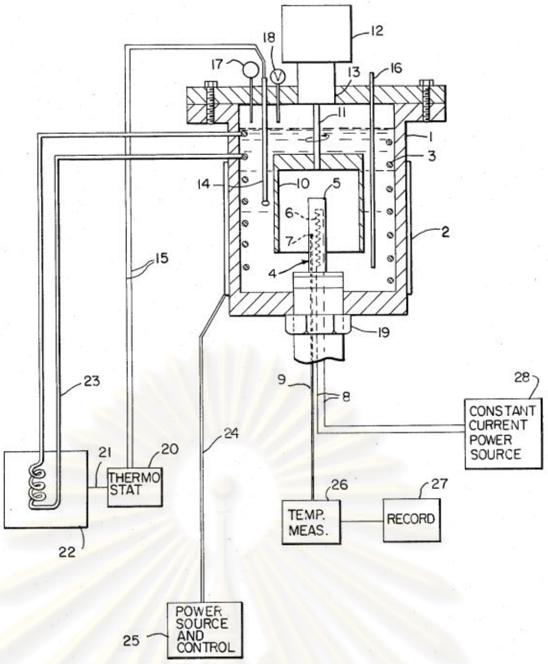
3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

ปี ค.ศ. 1978 Martin, K.E. และGraham, L.W. [5] ได้คิดค้นวิธีการตรวจสอบแนวโน้มการเกิดตะกรันของของเหลวทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยการผ่านของเหลวเข้าไปในท่อทดสอบที่มีความร้อน และทำการวัดค่าความดันที่สูงขึ้น และอุณหภูมิที่ลดลง เมื่อผ่านท่อทดสอบในช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 3.1 รูปแสดงเครื่องทดสอบตะกรันโดยใช้ท่อทดสอบ [5]

ปี ค.ศ. 1981 Paul, E.E. และ Cedar, H. [6] ได้ทำเครื่องทดสอบการเกิดตะกรัน โดยออกแบบให้อุณหภูมิของของเหลวมีค่าคงที่จากการควบคุมด้วย Thermo stat และมีใบกวนเพื่อให้อุณหภูมิทุกส่วนในเครื่องมีค่าเท่ากัน และใช้ชุดเครื่องให้ความร้อนเพื่อวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีตะกรันมาเกาะที่พื้นผิว ซึ่งค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการเกิดตะกรันได้ ซึ่งเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแสดงเครื่องทดสอบการเกิดตะกรัน [6]

ปี ค.ศ. 1988 Paul, E.E. และ Cedar, H. [7] ได้ออกแบบวิธีการและเครื่องสำหรับทดสอบตะกรันจากการนำความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิและความดันซึ่งจำลองมาจากสภาวะจริงของโรงงาน มาวัดค่าการสะสมของตะกรันในระหว่างกระบวนการที่จะเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งมาเกาะกับพื้นผิวที่อุณหภูมิสูงกว่า โดยสามารถคำนวนการเกิดตะกรันได้จากสมการดังนี้

$$F = \left(\frac{1}{U_{fouled}} - \frac{1}{U_{clean}}\right)$$

โดยที่ F = ปัจจัยการเกิดตะกรัน ($m^{2o}C/W$)

U fouled = สัมประสิทธิ์การเทถ่ายเทความร้อนที่เกิดตะกรัน ($W/m^{2o}C$)

U clean = สัมประสิทธิ์การเทถ่ายเทความร้อนที่ไม่เกิดตะกรัน ($W/m^{2o}C$)

ซึ่งสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ที่วัดได้ดังนี้

$$U = Q / A(T_S - T_O)$$

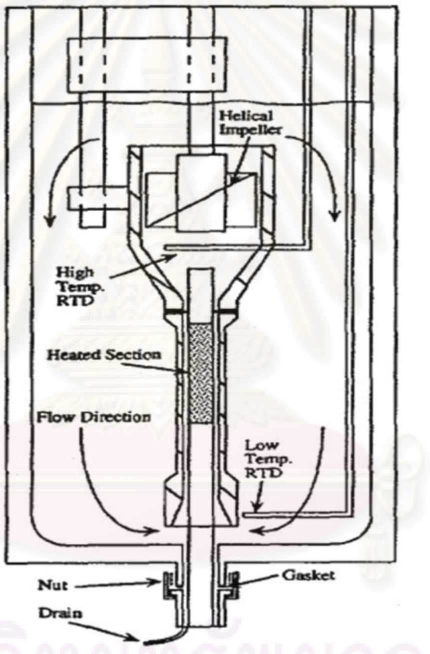
โดยที่ Q = Heat duty (W)

A = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

T_S = อุณหภูมิของโลหะ (^oC)

T_o = อุณหภูมิของน้ำมัน (^oC)

ปี ค.ศ. 1997 Kuru, W.C.และ Panchal, C.B. [8] ได้พัฒนาเครื่องพยากรณ์การเกิดตะกรันชนิดใหม่ที่ใช้สำหรับทดลองที่อุณหภูมิสูง (500 ^oC) และความดันสูง (70 atm) โดยมีการปรับปรุงเพิ่มเครื่องพัดในท่อของไหล และเครื่องวัดตะกรันจากของเหลวเคลื่อนที่ โดยทำการทดลองกับ indene และ kerosene ซึ่งเครื่องทดสอบนี้สามารถนำไปใช้ในการทดลองการกัดกร่อนและปฏิกิริยาเคมีได้



รูปที่ 3.3 รูปแสดงเครื่องทดสอบตะกรันของเหลวอินทรีย์ ที่อุณหภูมิและความดันสูง [8]

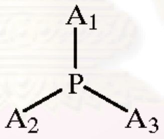
3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดตะกรันของเอทิลีนไดคลอไรด์

ปี ค.ศ. 1982 Lawrence K. W. และ Bernard D.B. [9] ได้ปรับปรุงกระบวนการลดตะกรันที่ผนังของเครื่องปฏิกรณ์ โดยการนำสารละลายกรด selenous มาผ่านกระบวนการที่อุณหภูมิ 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยใส่สารละลายกรดลงไปอย่างน้อย 5 นาทีก่อนทำการผลิต ซึ่งพบว่าสารละลายดังกล่าวสามารถลดการเกิดตะกอนแขวนลอยในกระบวนการเกิดไวนิลคลอไรด์โพลิเมอร์ ในเครื่องปฏิกรณ์ สแตนเลสสติลได้

ปี ค.ศ. 1984 John P.L. และ Akron O. [10] ได้ค้นพบการดำเนินงานเอทิลีนไดคลอไรด์ในเตาอบแตกพันธะ (cracking furnace) เพื่อลดกระบวนการกัดกร่อน และคราบเขม่า (coke) ซึ่งปัญหาเกิดจากการที่มี $FeCl_3$ และคลอรีนอิสระ เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งกระบวนการดำเนินการที่เหมาะสมที่สุด อุณหภูมิต้องอยู่ในช่วง85 ถึง 130 องศาเซลเซียส ความดันลด (pressure drop) ต้องน้อยกว่า 10 psi และเวลาที่สัมผัสเครื่องปฏิกรณ์ต้องน้อยกว่า 10 วินาที

ปี ค.ศ. 1991 Ghazi B.D. [11] ได้ปรับปรุงตัวป้องกันการเกิดตะกรันในกระบวนการนำกลับ และในหอกลั่นของเอทิลีนไดคลอไรด์ ที่ใช้อุณหภูมิในการดำเนินการอยู่ช่วงระหว่าง 200 ถึง 350 องศาฟาเรนไฮท์ โดยได้ทดลองสาร 3 ชนิด คือ acylated amine, magnesium alkyl aromatioc sulfonate และ ผสมกันระหว่างสารสองประเภทแรก ซึ่งพบว่าถ้าใส่สารผสมลงไปพร้อมกับเอทิลีนไดคลอไรด์ประมาณ 25 ถึง 300 ส่วนในล้านส่วน จะทำให้การป้องกันการเกิดตะกรันใน reboilers, tray และท่อส่งได้

ปี ค.ศ. 2000 Youdong T. [12] ได้ศึกษาวิธีการลดการเกิดตะกรันบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของเอทิลีนไดคลอไรด์ โดยการเติมกลุ่มของฟอสเฟต ซึ่งมีโครงสร้างดังนี้

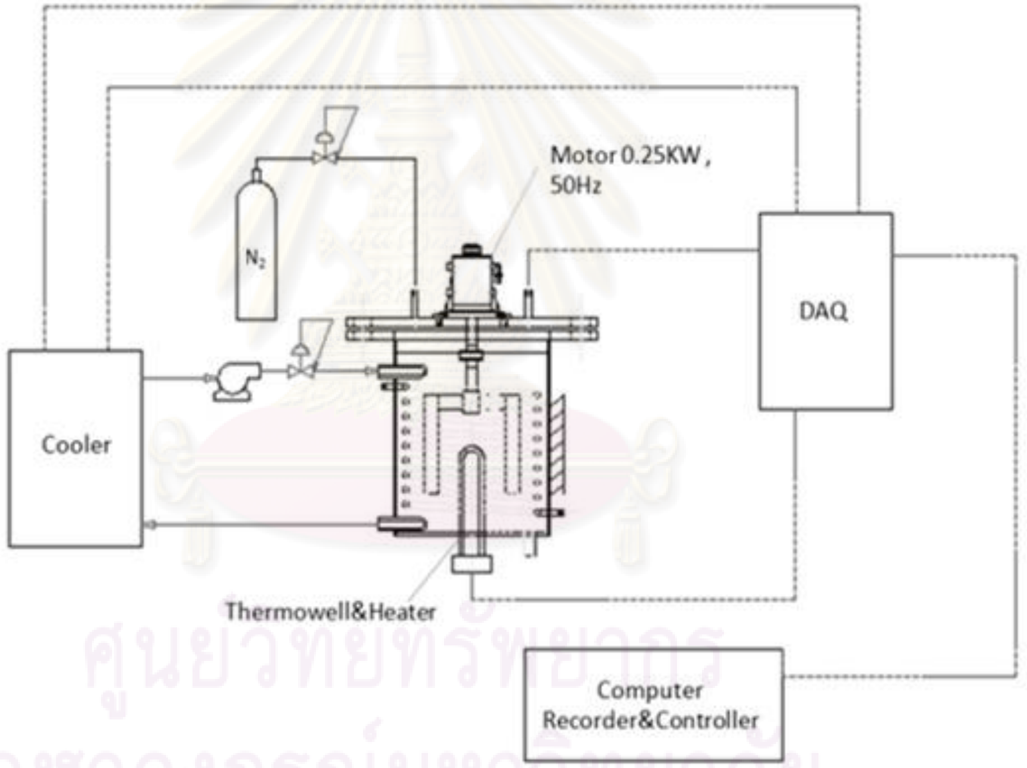


ซึ่งได้ทำการเติมกลุ่มฟอสเฟตประมาณ 20 ถึง 200 ส่วนในล้านส่วน ลงไปพร้อมกับเอทิลีนไดคลอไรด์ พบว่าผลที่ได้จากการเติม triisodecyl phosphite (TDOP), trinonylphenyl phosphite (TNPhOP) และ trilauryl trithiophosphite (TLSP) สามารถลดตะกรันได้ ซึ่งสาร trilauryl trithiophosphite (TLSP) ลดอัตราการเกิดตะกรันได้มากที่สุด และสาร trinonylphenyl phosphite (TNPhOP) ลดอัตราการเกิดตะกรันได้น้อยที่สุด

บทที่ 4
การออกแบบ และการทดลอง

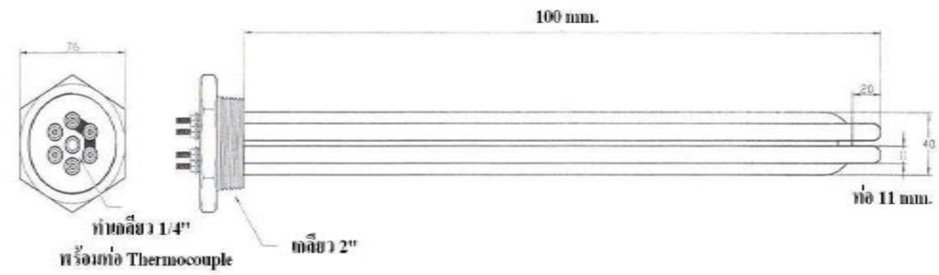
4.1 การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

เครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน ผู้วิจัยได้ออกแบบโดยอาศัยหลักการการถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์ไปสู่ของเหลว โดยใช้ระบบน้ำหล่อเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของเหลวให้คงที่ ดังนั้นเมื่อทำการทดลองเวลาผ่านไปจะทำให้ตะกรันเกิดขึ้นที่ผิวของเทอโมเวลที่ครอบฮีตเตอร์อยู่ ซึ่งส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นลดลง และมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นภายในเทอโมเวล เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานของตะกรันที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งแบบของเครื่องทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.1

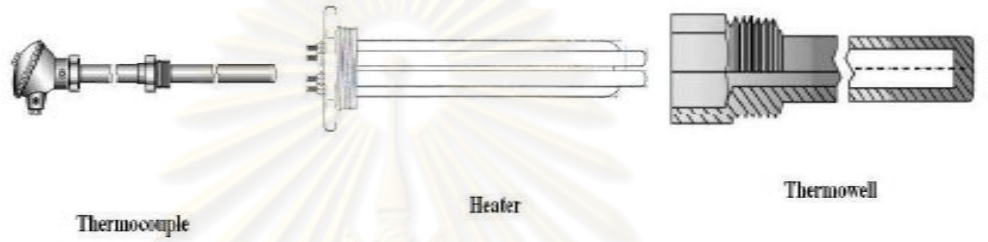


รูปที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

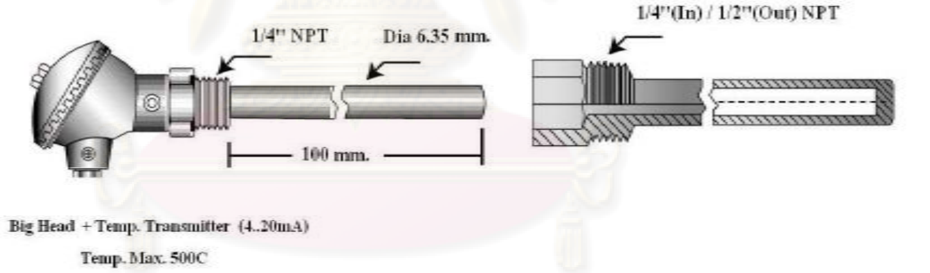
และอุปกรณ์ภายในเครื่องทดสอบที่ต้องสั่งทำ คือ ฮีตเตอร์ เทอร์โมคัปเปิล เทอร์โมเวล และถังเครื่องทดลอง ได้ออกแบบและแสดงดังรูปที่ 4.2 ถึง 4.5



รูปที่ 4.2แสดงแบบฮีตเตอร์

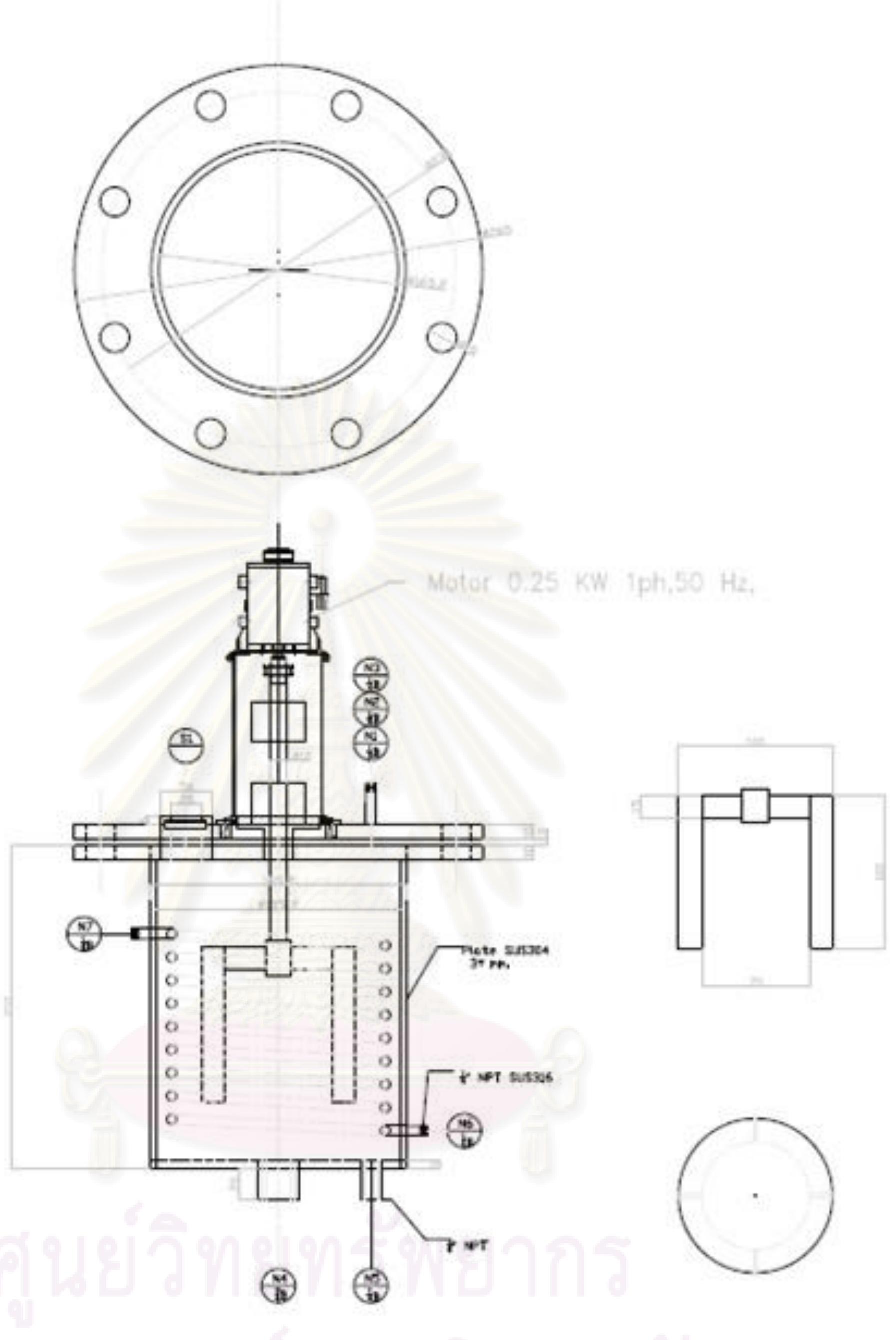


รูปที่ 4.3 แสดงชุดเทอโมคัปเปิล และเทอโมเวล สำหรับวัดอุณหภูมิภายในฮีตเตอร์



รูปที่ 4.4 แสดงชุดเทอโมคัปเปิล และเทอโมเวล สำหรับวัดอุณหภูมิของเหลว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 แสดงแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การออกแบบเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน แบ่งการควบคุมระบบออกเป็น 4 ส่วน คือ การควบคุมความร้อนของฮีตเตอร์ การควบคุมความเร็วใบพัด การวัดอุณหภูมิ และการควบคุมความเร็วปั้มในการนำน้ำหล่อเย็นไปควบคุมอุณหภูมิในเครื่องทดสอบ

4.1.1 การควบคุมความร้อนของฮีตเตอร์

ในการทดลองผู้วิจัยออกแบบเครื่องทดสอบให้อุณหภูมิภายในสูงได้ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยใช้ฮีตเตอร์ขนาดกำลัง 1500 วัตต์ แบบไฟ 3 เฟส ใส่อยู่ในเทอร์โมเวล ขนาดความยาว 15 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร แล้วใช้เครื่องปรับกำลังโวลต์ (Voltage Regulator) รุ่น ISEG2-9KVA แบบไฟ 3 เฟส 4 สาย เป็นตัวควบคุมเพื่อให้ได้ความร้อนตามที่ต้องการโดยหมุนปรับค่าโวลต์ที่จะป้อนให้เครื่องฮีตเตอร์ในช่วง 0 – 380 โวลต์ ซึ่งสามารถปรับช่วงอุณหภูมิเพื่อใช้ในการทดสอบได้ในช่วง 0 – 500 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.6 แสดงฮีตเตอร์และเทอโมเวล (ซ้าย) และเครื่องปรับกำลังโวลต์ (Voltage Variable Transformer) (ขวา)

4.1.2 การควบคุมความเร็วใบพัด

ใบพัดใช้มอเตอร์ 24 โวลต์ กำลัง 1/8 แรงม้า ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นตัวขับใบพัด โดยทำงานทันทีเมื่อเปิดเครื่องใช้งาน

4.1.3 การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิ ใช้เทอโมคัปเปิล แบบ RTD 4-20 mA 2 ตัว ตัวแรกใช้ในการวัดอุณหภูมิของของเหลวในเครื่องทดสอบ และตัวที่สองใช้ในการวัดอุณหภูมิภายในเทอโมเวล แล้วใช้ตัวแปลงสัญญาณจากกระแสเป็นโวลต์ (Current Transmitter) จาก 4-20 mA เป็น 0-5 VDC เพื่อที่จะนำสัญญาณ 0-5 VDC เข้าตัวรับส่งข้อมูล (Data Acquisition: DAQ) เพื่อส่งข้อมูลมาบันทึกลงคอมพิวเตอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.7 แสดงเทอโมคัปเปิล (ซ้าย) ตัวแปลงสัญญาณจากกระแสเป็นโวลต์ (Current Transmitter) (กลาง) และ ตัวรับส่งข้อมูล DAQ (ขวา)

4.1.4 การควบคุมความเร็วปั้มในการนำน้ำหล่อเย็นไปควบคุมอุณหภูมิในเครื่องทดสอบ

การควบคุมความเร็วปั้ม ผู้วิจัยได้นำโปรแกรม Matlab มาประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดคำสั่งให้ควบคุมอุณหภูมิของของเหลวให้คงที่ โดยสั่งให้รับข้อมูลอุณหภูมิของของเหลวมาบันทึกลงคอมพิวเตอร์ทุกๆ 10 วินาที และเขียนคำสั่งให้เร่ง-หรี่ปั้มเป็นขั้นๆขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไปจากค่าที่กำหนดไว้ เพื่อให้อัตราการไหลเข้าของน้ำหล่อเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิของของเหลว โดยใช้คำสั่งดังนี้

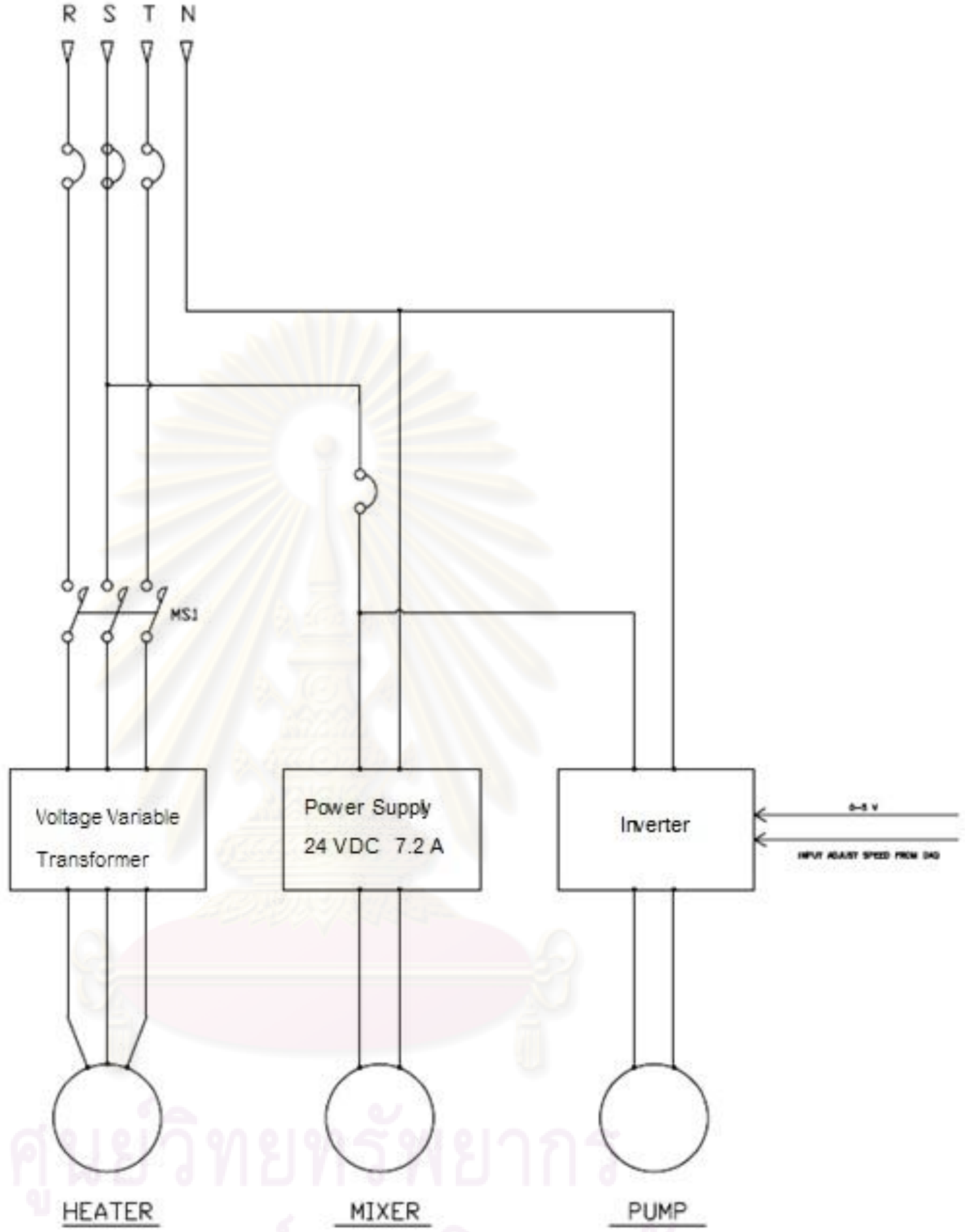
การสั่งรับค่าอุณหภูมิ : ใช้คำสั่ง getsample

การสั่งเร่ง-หรี่ปั้ม : ใช้คำสั่ง putsample

ซึ่งโค้ด matlab ที่ใช้ในการคำนวณ และสั่งการควบคุมระบบ ดูเพิ่มเติมใน ภาคผนวก ก.

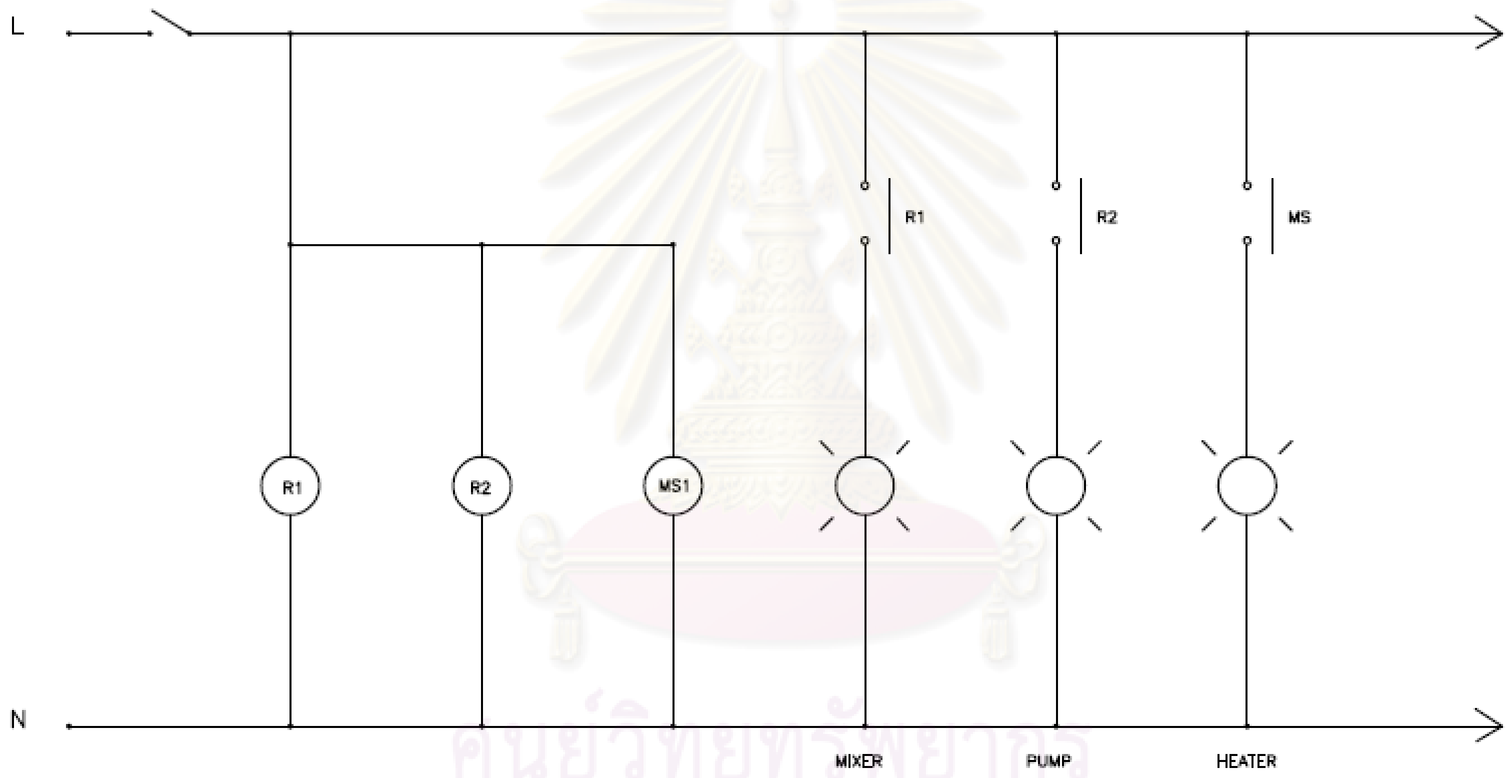
4.1.5 วงจรไฟฟ้า และแบบวงจรควบคุมเรื่องทดสอบ

วงจรไฟฟ้าจะใช้เบรกเกอร์หลักเป็นกระแส 3 เฟส เพื่อใช้ในการจ่ายกระแสให้กับฮีตเตอร์และปั้ม และใช้เบรกเกอร์ 220 โวลต์จ่ายให้กับตัวแปลงกระแสเป็นกระแสตรง 24 โวลต์ เพื่อใช้จ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เช่น ตัวแปลงสัญญาณ เทอโมคัปเปิล และใบพัด และยังมีตัวต่อวงจร 3 เฟส (Magnetic) และตัวต่อวงจร 1 เฟส (Relay) เพื่อป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย ซึ่งผังวงจรแสดงดังรูปที่ 4.8 ถึง 4.10



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

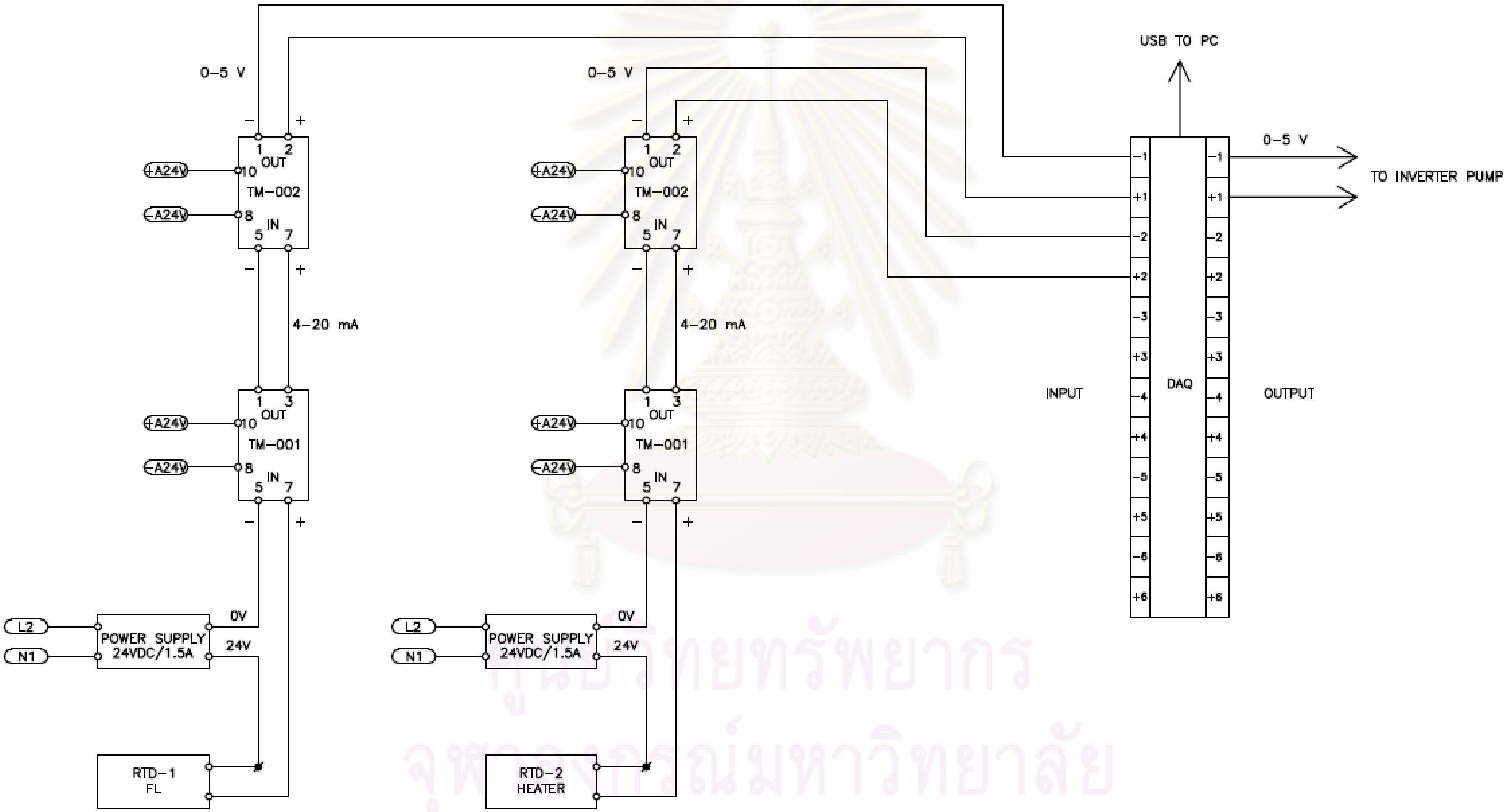
รูปที่ 4.8 แสดงวงจรกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้อุปกรณ์ต่างๆ



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรตัวตัดต่อกระแสไฟ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

30



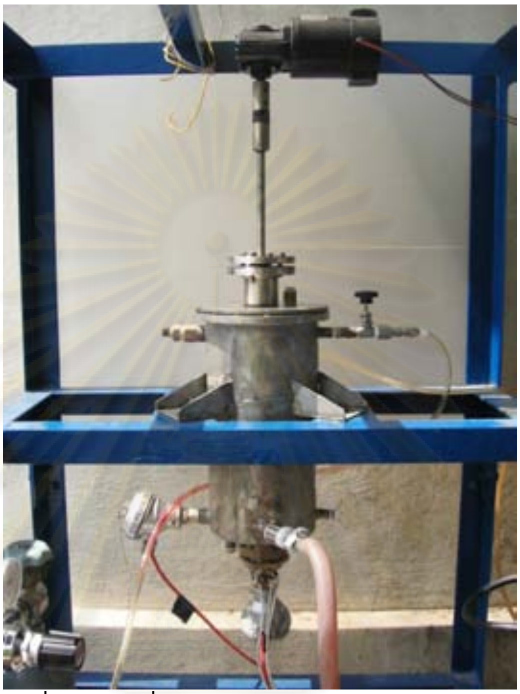
รูปที่ 4.10 แสดงวงจรอุปกรณ์ควบคุมรับ - ส่งสัญญาณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

31

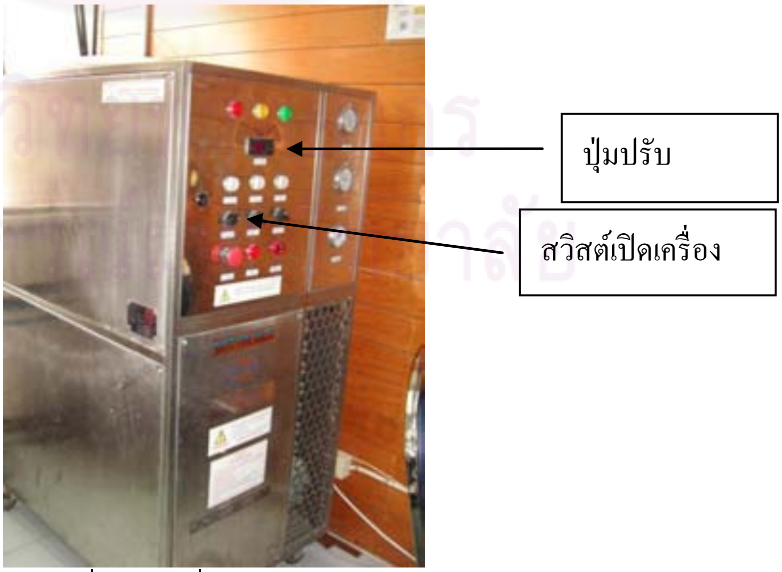
4.2 การใช้งานเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

การใช้งานเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันทุกครั้ง ก่อนทำการเปิดสวิตส์ให้เครื่องทำงาน ควรตรวจสอบสายไฟที่ขั้วของฮีตเตอร์ทุกครั้งว่าอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน และควรบิดเครื่องปรับกำลังโวลต์ (Voltage Variable Transformer) ให้อยู่ที่ 0 โวลต์ เมื่ออุปกรณ์ทุกอย่างอยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน ควรเริ่มตามขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 เครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

4.2.1 เปิดเครื่องทำน้ำเย็น และปรับอุณหภูมิตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.12 เครื่องทำความเย็น

4.2.2 รอจนกว่าอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นได้ตามที่ตั้งไว้

4.2.3 เปิดโปรแกรม MATLAB แล้วตั้งชื่อไฟล์ที่จะบันทึกข้อมูลโดยใช้คำสั่ง save (ชื่อไฟล์) ในหน้า command ของโปรแกรม

4.2.4 เขียนคำสั่งในการควบคุมระบบ (ใช้โค้ดคำสั่งดัง ภาคผนวก ก) โดยเปลี่ยน st = (อุณหภูมิที่ต้องการควบคุม) และ save (ชื่อไฟล์) ในลูป for เพื่อให้บันทึกค่าทุกครั้งที่เก็บข้อมูล

4.2.5 ทำการรันระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB แล้วค่อยปรับเครื่องปรับกำลังโวลต์ (Voltage Regulator) ตามที่ต้องการ

4.2.6 เปิดก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากระบบ

4.2.7 ทดลองจนอุณหภูมิภายในฮีตเตอร์เปลี่ยนแปลงจนคงที่

4.3 วิธีการทดลอง

4.3.1 นำเทอโมเวลมาขัดทำความสะอาดด้วยกระดาษทราย และประกอบกลับในสภาพพร้อมใช้งาน

4.3.2 ประกอบฮีตเตอร์และเทอโมคัปเปิลเข้ากับเทอโมเวล

4.3.3 ใส่ประเก็นยางบริเวณฝาบนของเครื่อง และพันประเก็นเชือกที่แกนใบพัด เพื่อป้องการการรั่วของสารทดสอบ

4.3.4 เติมเอทิลีนไดคลอไรด์จำนวน 4 ลิตร ลงในเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรัน

4.3.5 เปิดก๊าซไนโตรเจนเข้าเครื่องเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากระบบ

4.3.6 เปิดเครื่องทำความเย็น และปรับอุณหภูมิคงไว้ที่ 16 องศาเซลเซียส เพื่อไม่ให้ท่อน้ำหล่อเย็น เย็นเกินไปจนเกิดหยดน้ำ และร้อนเกินไปทำให้อุณหภูมิในระบบเข้าสู่ค่าที่กำหนดช้าไป

4.3.7 ตั้งค่าอุณหภูมิโดยใช้โปรแกรม MATLAB ควบคุมอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ให้ได้ 85 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ

4.3.8 ปรับเครื่องปรับกำลังโวลต์ (Voltage Variable Transformer) ไปที่ 320 โวลต์

4.3.9 ทำการทดลองจนกระทั่งอุณหภูมิภายในฮีตเตอร์เปลี่ยนแปลงจนคงที่

4.3.10 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.3.1 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ เป็น 100 และ 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

4.3.11 นำค่าที่ได้จากการบันทึก มาทำการวิเคราะห์ผล

4.3.12 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จากผลการทดลองที่ได้

4.3.13 คำนวณค่าความต้านทานของการเกิดตะกรัน และออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.3.14 นำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม มาประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์ โดยใช้โปรแกรม HYSYS

4.3.15 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
การทดลองการก่อตัวของตะกรันของเอทิลลีนไดคลอไรด์

การทดลองการก่อตัวของตะกรันของสารเอทิลีนไดคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 85, 90, 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียส ได้ใช้เครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการควบคุมอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ให้ได้ตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ และใช้ในการบันทึกค่าอุณหภูมิที่ช่วงเวลาต่างๆทั้งภายในเทอร์โมเวล และของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์ ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิภายในเทอร์โมเวลจะสูงขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ โดยค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถนำมาคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) และค่าความต้านทานของตะกรัน (R_f) โดยคำนวนจากสูตรดังนี้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

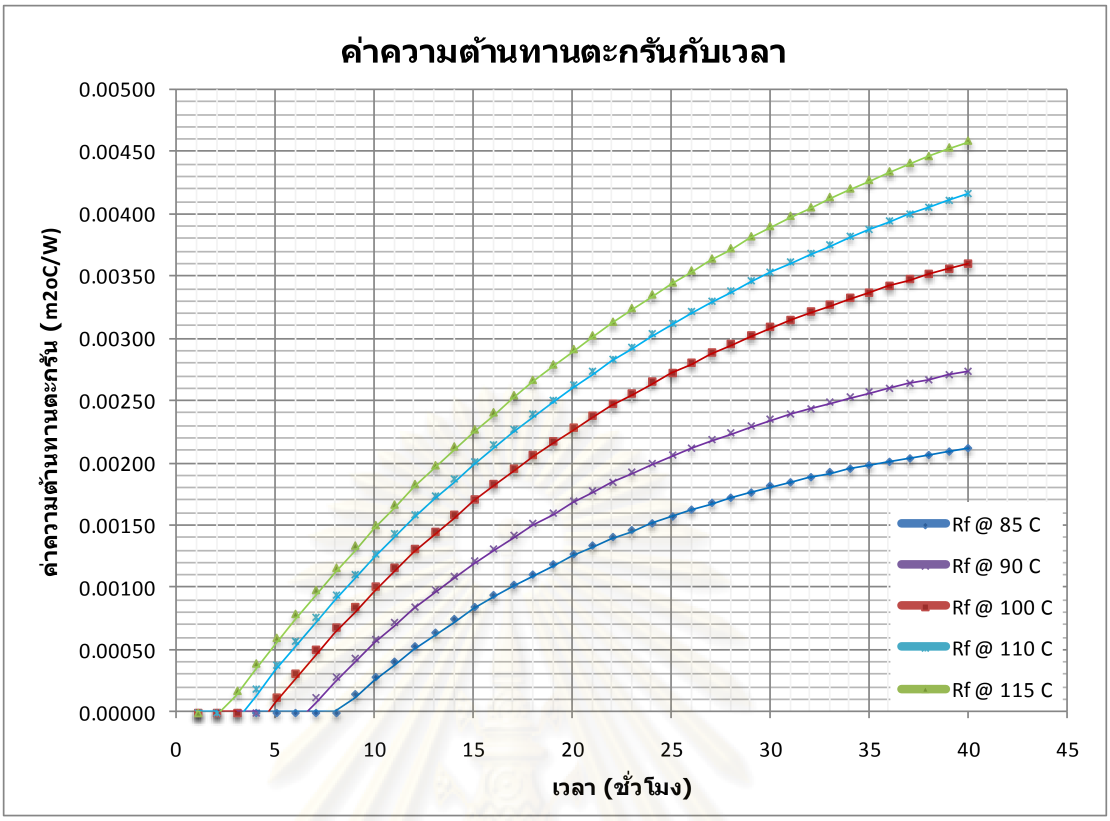
$$\mathrm{U} = \frac{Q}{\mathrm{A}(\mathrm{T_i} - \mathrm{T_o})}$$ หน่วย คือ $W/m^{2o}C$

ค่าความต้านทานตะกรัน

$$R_\mathrm{f}(\mathrm{t}) = \frac{1}{\mathrm{U_f(t)}} - \frac{1}{\mathrm{U_c}}$$ หน่วย คือ $m^{2o}C/W$

จากการทดลอง ทั้ง 5 อุณหภูมิ ได้ทำการทดลองเป็นเวลา 40 ชั่วโมง ซึ่งผลของการทดลองทั้ง 5 อุณหภูมิมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ อุณหภูมิในช่วงต้นจะคงที่เป็นระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลภายในฮีตเตอร์จะมีค่าสูงขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงอีกช่วงเวลาหนึ่งจะเริ่มคงที่ ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง สามารถคำนวนหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมได้ โดยผลที่ได้จากการคำนวนพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนคงที่ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นแบบผกผันกับค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เริ่มต้นจากการทดลอง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ไม่เกิดตะกรัน (U_c) และเมื่อเวลาผ่านไปทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อเกิดตะกรันที่เวลาใดๆ ($U_f(t)$) ซึ่งเมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมทั้งสองสภาวะแล้ว เราก็สามารถคำนวนหาค่าความต้านทานตะกรันที่เวลาใดๆได้ ซึ่งผลของค่าความต้านทานตะกรันรวมทั้ง 5 อุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงค่าความต้านทานตะกรันที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 85, 90, 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.1 พบว่ารูปแบบของค่าความต้านทานตะกรันรวมกับเวลา มีรูปแบบเป็นเส้นโค้ง Asymptotic แบบมีเวลาหน่วง ซึ่งรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$R_f(t) = k\left(1 - e^{-t/\tau}\right) + C$$

โดยที่ R_f = ค่าความต้านทานตะกรันรวม ($m^{2o}C/W$)

t = เวลาที่เกิดตะกรัน (ชั่วโมง)

k = ค่าคงที่ของความต้านทานรวมที่เข้าสู่สมดุล – ค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม ($m^{2o}C/W$)

τ = ค่าคงที่ของคุณสมบัติในระบบ (ชั่วโมง)

C = ค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม ($m^{2o}C/W$)

เมื่อนำรูปแบบสมการนี้ มาเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากเครื่องการทดสอบการก่อตัวของตะกรัน พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง มีรูปแบบดังสมการที่ (5.1) ถึง (5.5)

อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส : $R_f(t) = 0.0040(1 - e^{-t/17}) - 0.0015$ เมื่อ $t \geq 8$ (5.1)

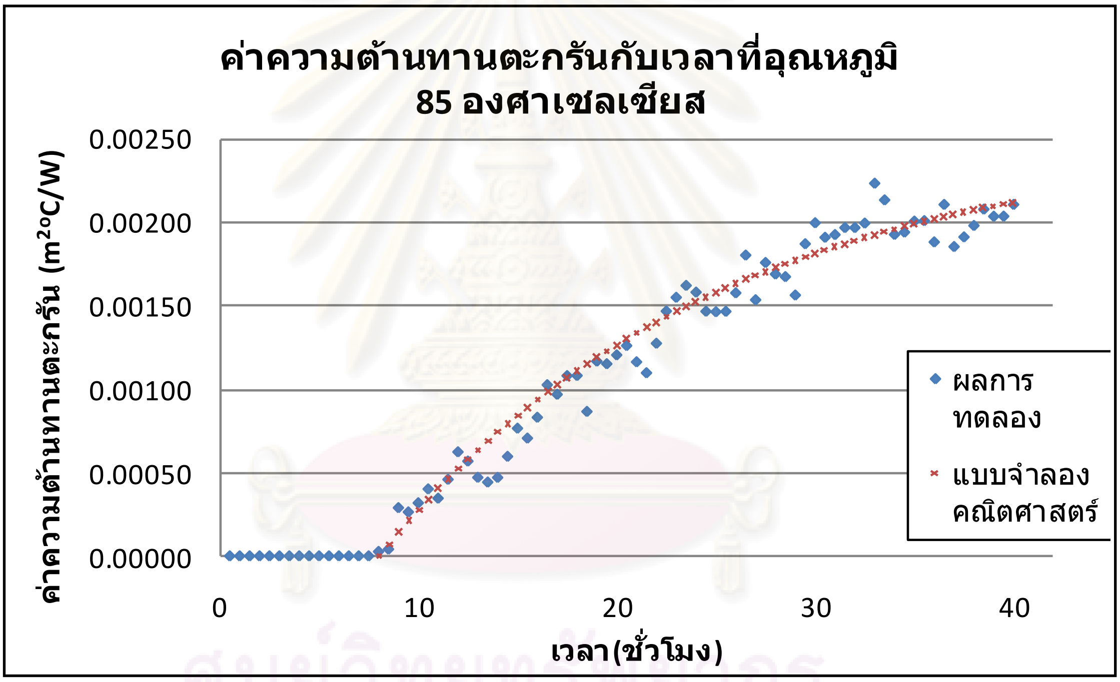
อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส : $R_f(t) = 0.0046(1 - e^{-t/19}) - 0.0013$ เมื่อ $t \geq 6.5$ (5.2)

อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส : $R_f(t) = 0.0055(1 - e^{-t/22}) - 0.0010$ เมื่อ $t \geq 6$ (5.3)

อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส : $R_f(t) = 0.0062(1 - e^{-t/26}) - 0.0007$ เมื่อ $t \geq 3.5$ (5.4)

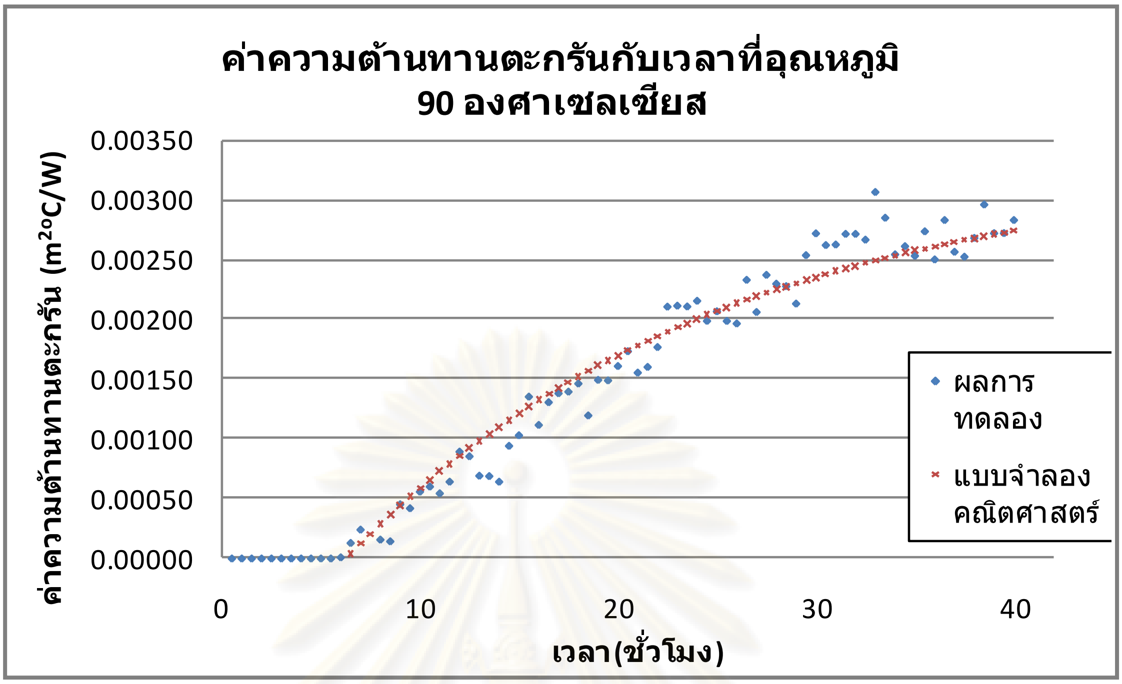
อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส : $R_f(t) = 0.0067(1 - e^{-t/28}) - 0.0005$ เมื่อ $t \geq 3$ (5.5)

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้ ทดลองแทนค่าที่เวลาต่างๆและนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรันกับเวลา และเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง แสดงดังรูปที่ 5.2 ถึง 5.6

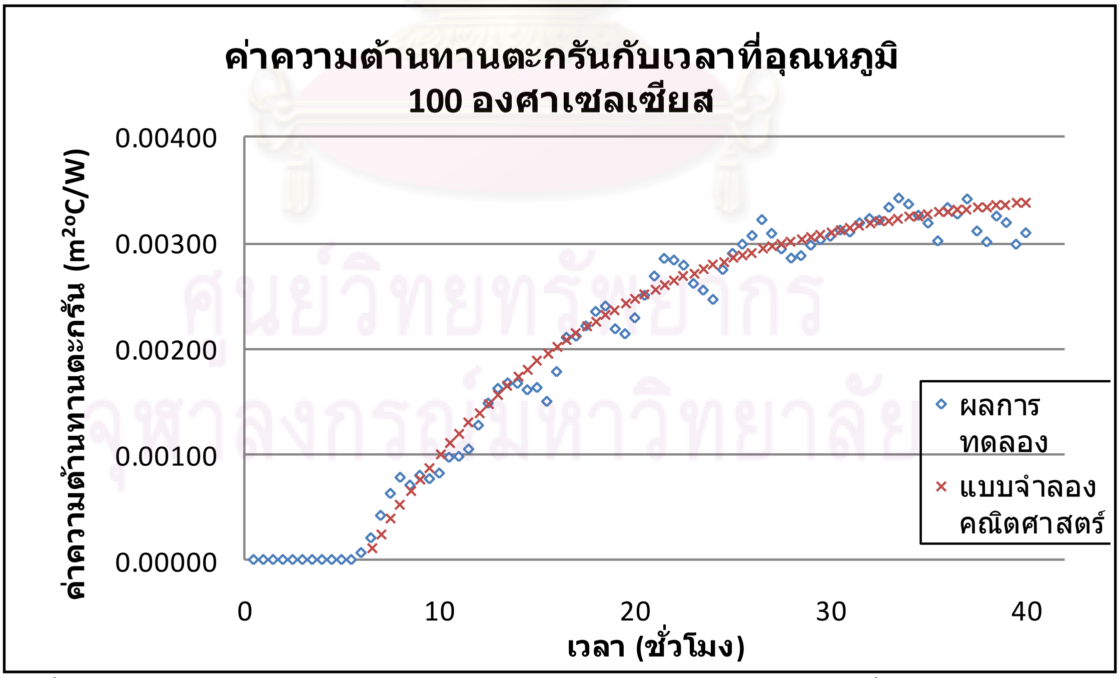


รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรัน (R_f) กับเวลา ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.2 พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 85 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 8 ชั่วโมงในการเริ่มก่อตัวของตะกรัน และค่าความต้านทานการก่อตัวของตะกรันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ และเมื่อนำมาคำนวนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้ พบว่าที่เวลาผ่านไปจนตะกรันเข้าสู่สมดุล จะมีค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0025 $m^{2o}C/W$ ซึ่งผลจากการคำนวนมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไปจากผลการทดลองจริงเพียง ร้อยละ 2.11



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรัน (R_f) กับเวลา ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

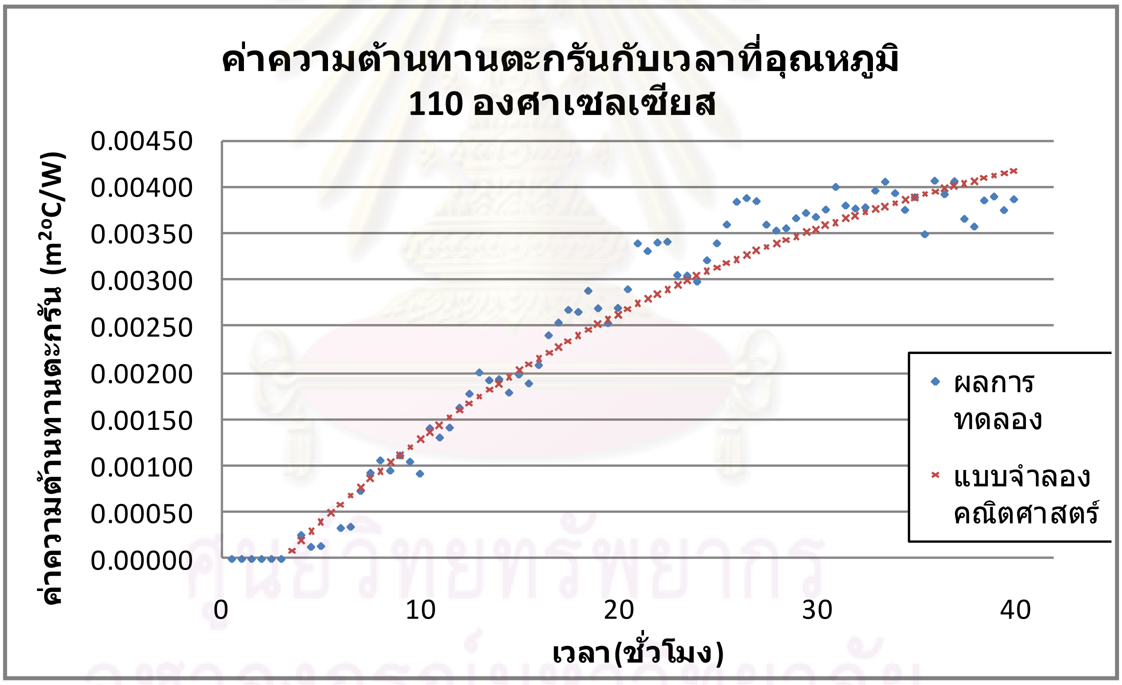


รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรัน (R_f) กับเวลา ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

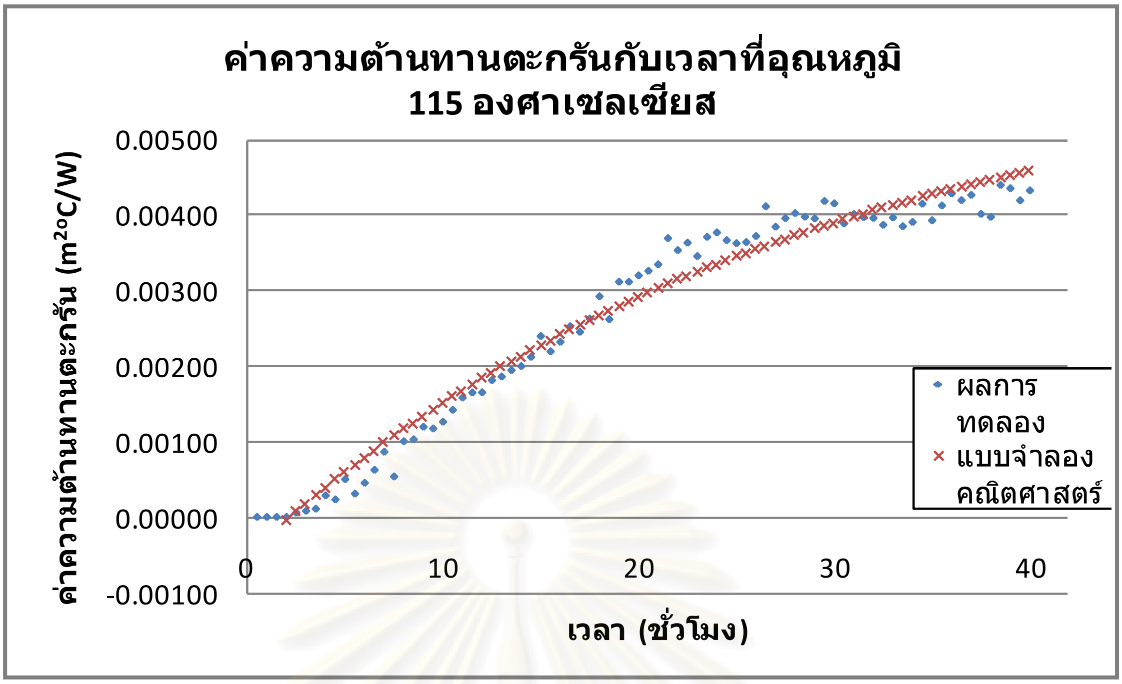
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.3 พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 90 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 6.5 ชั่วโมงในการเริ่มก่อตัวของตะกรัน และค่าความต้านทานการก่อตัวของตะกรันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ และเมื่อนำมาคำนวนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้ พบว่าที่เวลาผ่านไปจนตะกรันเข้าสู่สมดุล จะมีค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0033 $m^{2o}C/W$ ซึ่งผลจากการคำนวนมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไปจากผลการทดลองจริงเพียง ร้อยละ 2.58

จากรูปที่ 5.4 พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 100 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 6 ชั่วโมงในการเริ่มก่อตัวของตะกรัน และค่าความต้านทานการก่อตัวของตะกรันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ และเมื่อนำมาคำนวนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้ พบว่าที่เวลาผ่านไปจนตะกรันเข้าสู่สมดุล จะมีค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0045 $m^{2o}C/W$ ซึ่งผลจากการคำนวนมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไปจากผลการทดลองจริงเพียง ร้อยละ 2.31



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรัน (Rf) กับเวลา ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

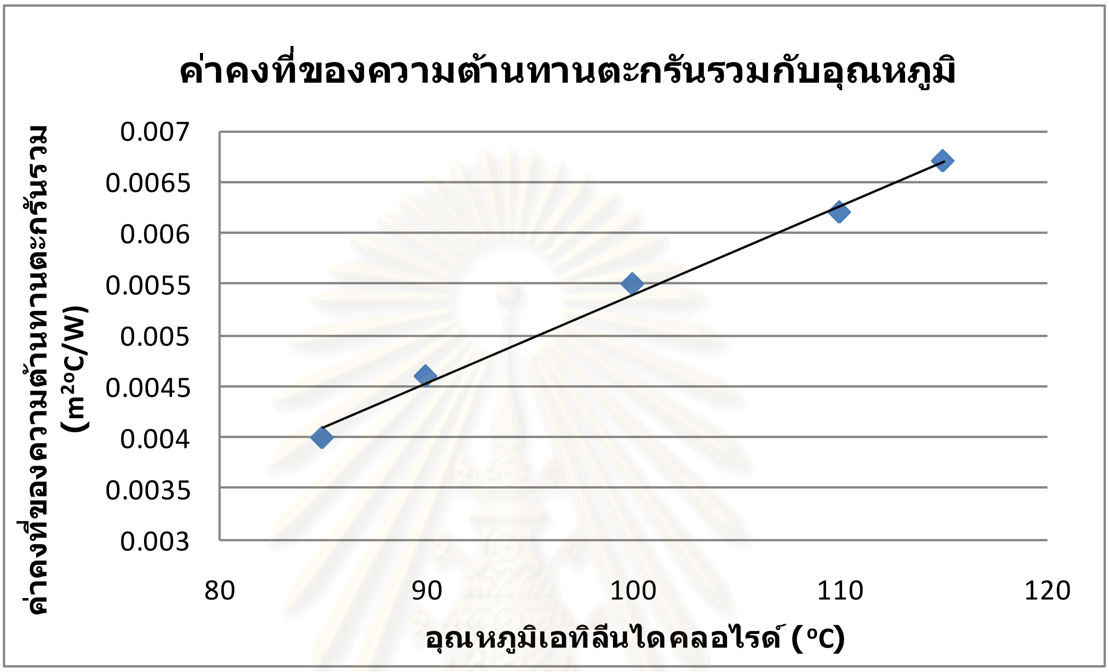


รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานตะกรัน (Rf) กับเวลา ที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.5 พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 110 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 3.5 ชั่วโมงในการเริ่มก่อตัวของตะกรัน และค่าความต้านทานการก่อตัวของตะกรันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ และเมื่อนำมาคำนวนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้พบว่าที่เวลาผ่านไปจนตะกรันเข้าสู่สมดุล จะมีค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0055 $m^{2o}C/W$ ซึ่งผลจากการคำนวนมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไปจากผลการทดลองจริงเพียง ร้อยละ 3.74

จากรูปที่ 5.6 พบว่าการทดลองที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ 115 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 3 ชั่วโมงในการเริ่มก่อตัวของตะกรัน และค่าความต้านทานการก่อตัวของตะกรันจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ และเมื่อนำมาคำนวนด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้พบว่าที่เวลาผ่านไปจนตะกรันเข้าสู่สมดุล จะมีค่าความต้านทานตะกรันเท่ากับ 0.0062 $m^{2o}C/W$ ซึ่งผลจากการคำนวนมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไปจากผลการทดลองจริงเพียง ร้อยละ 5.98

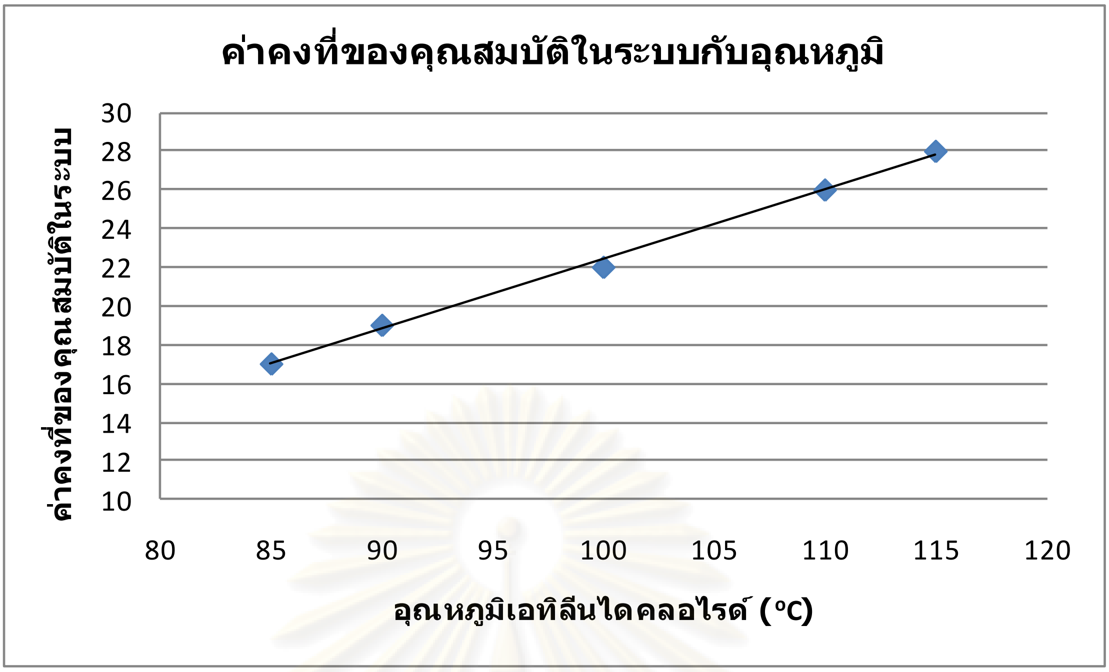
จากค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการทดลองเอทิลีนไดคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 85, 90, 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียส สามารถนำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์เทียบกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ได้ดังรูปที่ 5.7 ถึง 5.9



รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของความต้านทานรวมที่เข้าสู่สมดุล – ค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์

จากรูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของความต้านทานรวมที่เข้าสู่สมดุล – ค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์ มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$K(T) = 9 \times 10^{-5} T - 0.0033 \tag{5.6}$$

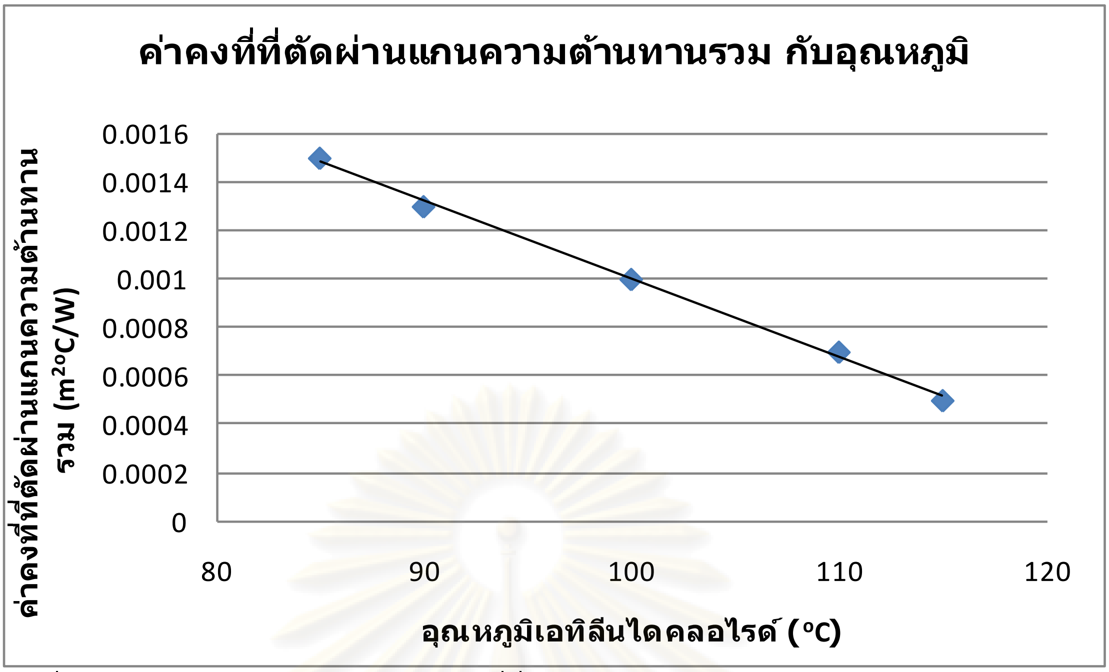


รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของคุณสมบัติในระบบ กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์

จากรูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของคุณสมบัติในระบบ กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\tau(T) = 0.3615T - 13.754 \tag{5.7}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์

จากรูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ที่ตัดผ่านแกนความต้านทานรวม กับอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์ไดคลอไรด์มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$C(T) = -3.33 \times 10^{-5}T + 0.0043 \tag{5.8}$$

จากสมการ (5.1) ถึง (5.5) ทำให้เราได้ความสัมพันธ์ของค่าคงที่ต่างๆจากสมการรูปแบบ Asymptotic ซึ่งเมื่อนำค่าความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการ (5.6) ถึง (5.8) มาเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ของค่าความต้านทานตะกรันรวมที่มีอุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์ และเวลาเป็นตัวแปรตาม จะทำให้ได้สมาการที่สามารถทำนายค่าความต้านทานการเกิดตะกรันรวมที่เวลามากกว่า 8 ชั่วโมงไปแล้ว และอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 85 ถึง 115 องศาเซลเซียสได้จากสมการดังนี้

$$R_f(T,t) = 1.23 \times 10^{-4}T - (9 \times 10^{-5} - 0.0033)e^{-t/(0.3615T - 13.754)} - 0.0076 \tag{5.9}$$

เครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันที่ผลิตขึ้นมีลักษณะการทำการเป็นแบบเบช แต่ในกระบวนการผลิตจริงมีลักษณะการไหลเป็นแบบต่อเนื่อง แต่งานวิจัยนี้ได้ทำการใช้ใบพัดในเครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันเพื่อจำลองกระบวนการไหลภายในให้มีรูปแบบแบบปั่นป่วน ซึ่งทำให้มีลักษณะใกล้เคียงกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม

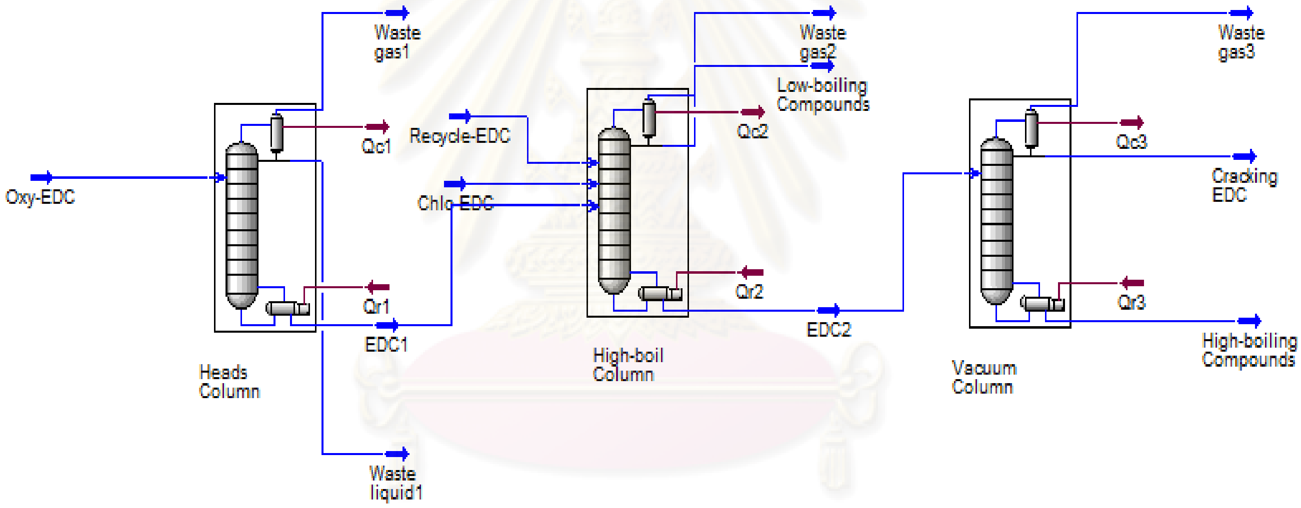
จากผลการทดลอง อุณหภูมิที่ให้กับเอทิลีนไดคลอไรด์มีผลต่อค่าเวลาเริ่มต้นที่ใช้ในการก่อตัวในการเกิดตะกรัน ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สูงขึ้น เวลาเริ่มต้นที่ใช้ในการก่อตัวในการเกิดตะกรันจะลดลง และอุณหภูมิที่ให้กับเอทิลีนไดคลอไรด์ยังมีผลต่อค่าความต้านทานตะกรัน พบว่าที่อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สูงขึ้น ค่าความต้านทานตะกรันของเอทิลีนไดคลอไรด์จะสูงขึ้น ซึ่งตะกรันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนของเอทิลีนไดคลอไรด์เป็นแบบตะกรันจากปฏิกิริยาเคมี เมื่อมีความร้อนเกิดขึ้นไฮโดรคาร์บอนในโมเลกุลของสารเอทิลีนไดคลอไรด์จะก่อตัวเป็นตะกรันเคลือบเป็นฟิล์มบางๆเคลือบบริเวณพื้นผิวที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
การสร้างแบบจำลองกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ด้วยโปรแกรม HYSYS

6.1 การสร้างแบบจำลองกระบวนการกลั่น

ในการสร้างแบบจำลองในกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ ได้เลือกใช้สมการของลี-ไคสเลอร์ พลอคเกอร์ ในการประมวลผล เนื่องจากเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมประกอบอยู่ในช่วงสอง ถึง เก้าอะตอม และสร้างแบบจำลองโดยใช้กระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์จากแผนภาพกระบวนการผลิตจริง โดยในการจำลองสารป้อนส่วนนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์ (Recycle-EDC) ผู้ออกแบบได้ลดความยุ่งยากในการจำลองลงโดยนำค่าที่ได้จากกระบวนการแตกพันธะมากำหนดเป็นคุณสมบัติของสารป้อนเลย แต่ยังคงเป็นตัวแทนของกระบวนการผลิตจริงได้ ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงแบบจำลองกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์โดยใช้โปรแกรม HYSYS

สารป้อนของกระบวนการกลั่น คือ สารประกอบที่มีเอทิลีนไดคลอไรด์เป็นส่วนประกอบหลักและมีสารอื่นปนเปื้อน ซึ่งสารป้อนที่มาจากกระบวนการออกซิคลอริเนชั่น (Oxy-EDC) จะเข้าที่หอกลั่นที่หนึ่ง (Heads column) และสารป้อนที่มาจากกระบวนการคลอริเนชั่น (Chlo-EDC) และกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์ (Recycle-EDC) ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไม่หมดในกระบวนการแตกพันธะให้เป็นโมโนเมอร์ไวนิลคลอไรด์ จะเข้าที่หอกลั่นที่สอง (High-boil Column) ซึ่งมีคุณสมบัติของสารป้อน และองค์ประกอบของสารป้อน แสดงดังตารางที่ 6.1 และ 6.2

ตารางที่ 6.1 แสดงคุณสมบัติของสารป้อน

คุณสมบัติ	หน่วย	สารป้อน		
		Oxy-EDC	Chlo-EDC	Recycle-EDC
อุณหภูมิ	^{o}C	83.70	83.70	83.70
ความดัน	kPa	101.3	101.3	101.3
อัตราไหล	Ton/hr	15.00	15.00	30.00

ตารางที่ 6.2 แสดงองค์ประกอบของสารป้อน

สารประกอบ	ร้อยละที่มีอยู่ในสารป้อน		
	Oxy-EDC	Chlo-EDC	Recycle-EDC
สารจุดเดือดต่ำ			
เอทิลีนไดคลอไรด์	96.30	99.50	99.80
เอทิลคลอไรด์	0.7	0.1	0.05
ซิส-ไดคลอโรเอทิลีน	0.6	0.0	0.0
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	0.6	0.0	0.0
ไตรคลอโรเอทิลีน	0.6	0.0	0.0
1,1-ไดคลอโรอีเทน	0.0	0.1	0.0
คลอโรฟอร์ม	0.0	0.1	0.05
คลอโรพรีน	0.0	0.0	0.05
สารจุดเดือดสูง			
1,1,2-ไตรคลอโรอีเทน	0.6	0.1	0.0
เตตระคลอโรอีเทน	0.6	0.1	0.0
โมโนคลอโรเบนซีน	0.0	0.0	0.05

การกำหนดคุณสมบัติของหอกลั่น มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งจะต้องเลือกจำนวนเทรย์ภายในหอกลั่น และตำแหน่งในการป้อนสารป้อนเข้าสู่หอกลั่น ให้เหมาะสม ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์ยังส่งผลต่อการประมวลผลของโปรแกรม HYSYS ซึ่งถ้ากำหนดไม่ดีพออาจทำให้ระบบประมวลผลไม่ออก หรือได้ค่าไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ซึ่งค่าที่ใช้ในการกำหนดค่าในแบบจำลองกระบวนการกลั่นได้นำมาจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถกำหนดค่าต่างๆได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงคุณสมบัติของหอกลั่น

คุณสมบัติ	**หน่วย**	**หอกลั่น**		
		Heads Column	High-boil Column	Vacuum Column
จำนวนเทรย์	ชั้น	75	75	75
สารป้อนเข้า	ชั้นที่	60	60	60
ความดัน	kPa	101.3	101.3	101.3
ผลิตภัณฑ์ออก	-	ด้านล่าง	ด้านล่าง	ด้านบน

หลังจากสร้างแบบจำลองและใส่คุณสมบัติต่างๆของหอกลั่น สารป้อน และเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวให้เหมาะสมโดยให้โปรแกรม HYSYS ทำการคำนวนและประมวลผลของกระบวนการกลั่นให้ ซึ่งจะทำให้ได้เอทิลีนไดคลอไรด์ที่ออกมามีความเข้มข้นสูงขึ้น โดยที่เอทิลีนไดคลอไรด์ที่ออกมาจากหอกลั่นที่หนึ่ง (EDC1) จะออกมาด้านล่างของหอ และกลั่นนำสารที่มีจุดเดือดต่ำออกด้านบนของหอแต่ความบริสุทธิ์ของเอทิลีนไดคลอไรด์ที่ได้ยังไม่เพียงพอจึงนำสารที่กลั่นได้เข้าไปทำการกลั่นต่อรวมกับเอทิลีนไดคลอไรด์ที่มาจากกระบวนการคลอริเนชั่น และกระบวนการนำกลับ ในหอกลั่นที่สอง สำหรับเอทิลีนไดคลอไรด์ที่ออกมาจากหอกลั่นที่สอง (EDC2) ออกด้านล่างของหอ และกลั่นสารเจือปนที่มีจุดเดือดต่ำออกด้านบนของหอกลั่น ซึ่งเอทิลีนไดคลอไรด์ที่ได้จากหอนี้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นแต่ยังมีส่วนประกอบของสารจุดเดือดสูงปนอยู่จำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องนำเข้าหอกลั่นที่สามเพื่อกำจัดสารจุดเดือดสูงออก ซึ่งในการกลั่นในหอกลั่นที่สาม จะกลั่นเอาเอทิลีนไดคลอไรด์ออกทางด้านบนของหอกลั่น (Cracking EDC) และแยกสารเจือปนที่มีจุดเดือดสูงออกทางด้านล่างของหอกลั่น ซึ่งความบริสุทธิ์ของสารที่ออกมาจากทั้งสามหอกลั่นแสดงคุณสมบัติและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ดังตารางที่ 6.4 และ 6.5 โดยที่ค่าความบริสุทธิ์ที่ต้องการก่อนเข้ากระบวนการแตกพันธะต้องมีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 99.6

ตารางที่ 6.4 แสดงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

คุณสมบัติ	**หน่วย**	**สารป้อน**		
		EDC1	EDC2	Cracking EDC
อุณหภูมิ	^{o}C	85.75	85.45	85.37
ความดัน	kPa	101.3	101.3	101.3
อัตราไหล	Ton/hr	14.0	58.94	58.70

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.5 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์

สารประกอบ	**ร้อยละที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์**		
	EDC1	EDC2	Cracking EDC
สารจุดเดือดต่ำ			
เอทิลีนไดคลอไรด์	98.09	99.35	99.73
เอทิลคลอไรด์	0.0	0.02	0.02
ซิส-ไดคลอโรเอทิลีน	0.0	0.0	0.0
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	0.01	0.0	0.0
ไตรคลอโรเอทิลีน	0.62	0.15	0.15
1,1-ไดคลอโรอีเทน	0.0	0.02	0.02
คลอโรฟอร์ม	0.0	0.05	0.05
คลอโรพรีน	0.0	0.02	0.02
สารจุดเดือดสูง			
1,1,2-ไตรคลอโรอีเทน	0.64	0.18	0.0
เตตระคลอโรอีเทน	0.0	0.18	0.0
โมโนคลอโรเบนซีน	0.0	0.03	0.0

6.2 ผลการจำลองการก่อตัวของตะกรันเอทิลีนไดคลอไรด์

การประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยใช้โปรแกรม HYSYS ได้ทำการทดสอบ 2 กรณีด้วยกัน คือ กรณีแรก ทดสอบระบบโดยการกำหนดสารป้อนเอทิลีนไดคลอไรด์ และสารป้อนไอน้ำ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ในสายออก เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลงจากการเกิดตะกรัน และกรณีที่สอง ทดสอบระบบโดยควบคุมอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ในสายเข้า และสายออกให้คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานที่ใช้ ให้เพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยผลกระทบจากการเกิดตะกรันขึ้นในระบบ

6.2.1 ผลการจำลองอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ในสายออกเมื่อเกิดตะกรัน

การจำลองการการก่อตัวของตะกรันเอทิลีนไดคลอไรด์ ได้นำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องการผลของการเกิดตะกรัน มาหาประสิทธิภาพของระบบ โดยนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมาประมวลผลในโปรแกรม HYSYS ซึ่งจะกระทบกับค่าของอุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ในสายออกเมื่อกำหนดค่าสารป้อน และสายไอน้ำให้คงที่ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 85 100 และ 115 องศาเซลเซียสแสดงในตารางที่ 6.6 ถึง 6.8

ตารางที่ 6.6 แสดงอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารในระบบที่เกิดจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 (^{o}C)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0000	85.00	0.00	0.9931	0.9973
0.0001	84.94	0.07	0.9931	0.9973
0.0002	84.88	0.14	0.9931	0.9973
0.0003	84.83	0.20	0.9931	0.9973
0.0004	84.77	0.27	0.9931	0.9973
0.0005	84.72	0.33	0.9931	0.9973
0.0006	84.66	0.40	0.9930	0.9973
0.0007	84.61	0.46	0.9930	0.9972
0.0008	84.56	0.52	0.9930	0.9972
0.0009	84.51	0.58	0.9930	0.9972
0.001	84.46	0.64	0.9930	0.9972
0.0011	84.42	0.68	0.9930	0.9972
0.0012	84.37	0.74	0.9930	0.9972
0.0013	84.32	0.80	0.9930	0.9972
0.0014	84.28	0.85	0.9930	0.9972
0.0015	84.24	0.89	0.9930	0.9972
0.0016	84.19	0.95	0.9930	0.9972
0.0017	84.15	1.00	0.9930	0.9972

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน (m$^{2\circ}$C/W)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 ($^{\circ}$C)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0018	84.11	1.05	0.9930	0.9972
0.0019	84.07	1.09	0.9930	0.9972
0.002	84.03	1.14	0.9930	0.9972
0.0021	83.99	1.19	0.9930	0.9972
0.0022	83.95	1.24	0.9930	0.9972
0.0023	83.92	1.27	0.9930	0.9972
0.0024	83.88	1.32	0.9929	0.9972
0.0025	83.84	1.36	0.9929	0.9972

ตารางที่ 6.7 แสดงอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารในระบบที่เกิดจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ค่าความต้านทานตะกรัน (m$^{2\circ}$C/W)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 ($^{\circ}$C)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0000	100.00	0.00	0.9930	0.9972
0.0001	99.98	0.02	0.9930	0.9972
0.0002	99.92	0.08	0.9930	0.9972
0.0003	99.86	0.14	0.9930	0.9972
0.0004	99.81	0.19	0.9929	0.9972
0.0005	99.76	0.24	0.9929	0.9972
0.0006	99.70	0.30	0.9929	0.9972
0.0007	99.65	0.35	0.9929	0.9971
0.0008	99.60	0.40	0.9929	0.9971
0.0009	99.55	0.45	0.9929	0.9971
0.001	99.50	0.50	0.9929	0.9971
0.0011	99.45	0.55	0.9929	0.9971

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 (°C)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0012	99.41	0.59	0.9929	0.9971
0.0013	99.36	0.64	0.9929	0.9971
0.0014	99.32	0.68	0.9929	0.9971
0.0015	99.27	0.73	0.9929	0.9971
0.0016	99.23	0.77	0.9929	0.9971
0.0017	99.19	0.81	0.9929	0.9971
0.0018	99.14	0.86	0.9929	0.9971
0.0019	99.10	0.90	0.9929	0.9971
0.002	99.06	0.94	0.9929	0.9971
0.0021	99.03	0.97	0.9929	0.9971
0.0022	98.99	1.01	0.9929	0.9971
0.0023	98.95	1.05	0.9928	0.9971
0.0024	98.91	1.09	0.9928	0.9971
0.0025	98.88	1.12	0.9928	0.9971
0.0026	98.84	1.16	0.9928	0.9970
0.0027	98.81	1.19	0.9928	0.9970
0.0028	98.77	1.23	0.9928	0.9970
0.0029	98.74	1.26	0.9928	0.9970
0.003	98.71	1.29	0.9928	0.9970
0.0031	98.67	1.33	0.9928	0.9970
0.0032	98.64	1.36	0.9928	0.9970
0.0033	98.61	1.39	0.9928	0.9970
0.0034	98.58	1.42	0.9928	0.9970
0.0035	98.55	1.45	0.9928	0.9970
0.0036	98.52	1.48	0.9928	0.9970
0.0037	98.49	1.51	0.9928	0.9970

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 (^{o}C)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0038	98.46	1.54	0.9928	0.9970
0.0039	98.43	1.57	0.9928	0.9970
0.0040	98.00	1.60	0.9928	0.9970
0.0041	97.97	1.63	0.9928	0.9970
0.0042	97.95	1.65	0.9928	0.9970
0.0043	97.93	1.67	0.9928	0.9970
0.0044	97.89	1.71	0.9928	0.9970
0.0045	97.87	1.73	0.9928	0.9970

ตารางที่ 6.8 แสดงอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารในระบบที่เกิดจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 (^{o}C)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0000	115.00	0.00	0.9929	0.9971
0.0001	114.94	0.05	0.9929	0.9971
0.0002	114.89	0.10	0.9929	0.9971
0.0003	114.84	0.14	0.9929	0.9971
0.0004	114.78	0.19	0.9928	0.9971
0.0005	114.73	0.23	0.9928	0.9971
0.0006	114.68	0.28	0.9928	0.9971
0.0007	114.63	0.32	0.9928	0.9971
0.0008	114.58	0.37	0.9928	0.9970
0.0009	114.53	0.41	0.9928	0.9970
0.001	114.49	0.44	0.9928	0.9970
0.0011	114.44	0.49	0.9928	0.9970

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 (^oC)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0012	114.4	0.52	0.9928	0.9970
0.0013	114.35	0.57	0.9928	0.9970
0.0014	114.31	0.60	0.9928	0.9970
0.0015	114.27	0.63	0.9928	0.9970
0.0016	114.22	0.68	0.9928	0.9970
0.0017	114.18	0.71	0.9928	0.9970
0.0018	114.14	0.75	0.9928	0.9970
0.0019	114.10	0.78	0.9928	0.9970
0.002	114.07	0.81	0.9928	0.9970
0.0021	114.03	0.84	0.9928	0.9970
0.0022	113.99	0.88	0.9928	0.9970
0.0023	113.95	0.91	0.9927	0.9970
0.0024	113.92	0.94	0.9927	0.9970
0.0025	113.88	0.97	0.9927	0.9970
0.0026	113.85	1.00	0.9927	0.9970
0.0027	113.82	1.03	0.9927	0.9970
0.0028	113.78	1.06	0.9927	0.9970
0.0029	113.75	1.09	0.9927	0.9970
0.003	113.72	1.11	0.9927	0.9970
0.0031	113.69	1.14	0.9927	0.9970
0.0032	113.65	1.17	0.9927	0.9970
0.0033	113.62	1.20	0.9927	0.9970
0.0034	113.59	1.23	0.9927	0.9969
0.0035	113.56	1.25	0.9927	0.9969
0.0036	113.53	1.28	0.9927	0.9969
0.0037	113.51	1.30	0.9927	0.9969

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกที่หอกลั่นที่ 2 (^{o}C)	ร้อยละความแตกต่างของอุณหภูมิ	องค์ประกอบเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย	
			EDC2	Cracking EDC
0.0038	113.48	1.32	0.9927	0.9969
0.0039	113.45	1.34	0.9927	0.9969
0.004	113.42	1.37	0.9927	0.9969
0.0041	113.39	1.40	0.9927	0.9969
0.0042	113.37	1.42	0.9927	0.9969
0.0043	113.34	1.44	0.9927	0.9969
0.0044	113.32	1.46	0.9927	0.9969
0.0045	113.29	1.49	0.9927	0.9969
0.0046	113.27	1.50	0.9927	0.9969
0.0047	113.24	1.53	0.9927	0.9969
0.0048	113.22	1.55	0.9926	0.9969
0.0049	113.19	1.57	0.9926	0.9969
0.005	113.17	1.59	0.9926	0.9969
0.0051	113.15	1.61	0.9926	0.9969
0.0052	113.12	1.63	0.9926	0.9969
0.0053	113.10	1.65	0.9926	0.9969
0.0054	113.08	1.67	0.9926	0.9969
0.0055	113.06	1.69	0.9926	0.9969
0.0056	113.04	1.70	0.9926	0.9969
0.0057	113.02	1.72	0.9926	0.9969
0.0058	112.99	1.75	0.9926	0.9969
0.0059	112.97	1.77	0.9926	0.9969
0.006	112.95	1.78	0.9926	0.9969
0.0061	112.93	1.80	0.9925	0.9969
0.0062	112.91	1.82	0.9925	0.9969

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบโดยใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรม HYSYS พบว่า ค่าความต้านทานตะกรันมีผลต่ออุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์ และองค์ประกอบของเอทิลีนไดคลอไรด์ในสายออกซึ่งที่สภาวะของตะกรันเกิดขึ้นจนคงที่ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ที่ 1.36 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ที่ 1.73 และที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอยู่ที่ 1.82

สำหรับผลกระทบของตะกรันต่อองค์ประกอบของสารเอทิลีนไดคลอไรด์ในสาย EDC2 พบว่าองค์ประกอบของสารเอทิลีนไดคลอไรด์จะมีค่าลดลงร้อยละ 0.0002, 0.0003 และ 0.0004 ที่อุณหภูมิ 85, 100 และ 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนในสาย Cracking EDC พบว่าองค์ประกอบของสารเอทิลีนไดคลอไรด์จะมีค่าลดลงร้อยละ 0.0001, 0.0002 และ 0.0002 ที่อุณหภูมิ 85, 100 และ 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากผลที่ได้พบว่าเมื่ออุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์สูงขึ้น ค่าความต้านทานของตะกรันที่เกิดขึ้นจะสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการกลั่น ทำให้อุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์ที่หม้อต้มซ้ำลดลง ส่งผลให้องค์ประกอบของเอทิลีนได้คลอไรด์ในสายออกลดลง ดังนั้นความบริสุทธิ์ของสารเอทิลีนไดคลอไรด์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นจะลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2.2 ผลการจำลองพลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดตะกรัน

การจำลองการการก่อตัวของตะกรันเอทิลีนไดคลอไรด์ ได้กำหนดค่าสารป้อนให้คงที่ และเพิ่มปริมาณการไหลของสายไอน้ำ เพื่อชดเชยกับผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ลดลง เพื่อให้อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์สายออกคงที่ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 85 100 และ 115 องศาเซลเซียสแสดงในตารางที่ 6.9 ถึง 6.11

ตารางที่ 6.9 แสดงปริมาณไอน้ำและต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0000	1.4263	0.0000	0.00
0.0001	1.4307	0.0044	2851.20
0.0002	1.4351	0.0088	5702.40
0.0003	1.4396	0.0133	8618.40
0.0004	1.4418	0.0155	10044.00
0.0005	1.4484	0.0221	14320.80
0.0006	1.4551	0.0288	18662.40
0.0007	1.4595	0.0332	21513.60
0.0008	1.4661	0.0398	25790.40
0.0009	1.4706	0.0443	28706.40
0.0010	1.4750	0.0487	31557.60
0.0011	1.4816	0.0553	35834.40
0.0012	1.4883	0.0620	40176.00
0.0013	1.4949	0.0686	44452.80
0.0014	1.5016	0.0753	48794.40
0.0015	1.5060	0.0797	51645.60
0.0016	1.5102	0.0839	54367.20
0.0017	1.5193	0.0930	60264.00
0.0018	1.5259	0.0996	64540.80
0.0019	1.5326	0.1063	68882.40

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0020	1.5414	0.1151	74584.80
0.0021	1.5503	0.1240	80352.00
0.0022	1.5569	0.1306	84628.80
0.0023	1.5658	0.1395	90396.00
0.0024	1.5724	0.1461	94672.80
0.0025	1.5813	0.1550	100440.00

ตารางที่ 6.10 แสดงปริมาณไอน้ำและต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0000	1.8869	0.0000	0.00
0.0001	1.8922	0.0053	3421.44
0.0002	1.8975	0.0106	6842.88
0.0003	1.9029	0.0160	10342.08
0.0004	1.9055	0.0186	12052.80
0.0005	1.9134	0.0265	17184.96
0.0006	1.9215	0.0346	22394.88
0.0007	1.9267	0.0398	25816.32
0.0008	1.9347	0.0478	30948.48
0.0009	1.9401	0.0532	34447.68
0.0010	1.9453	0.0584	37869.12
0.0011	1.9533	0.0664	43001.28
0.0012	1.9613	0.0744	48211.20
0.0013	1.9692	0.0823	53343.36
0.0014	1.9773	0.0904	58553.28
0.0015	1.9825	0.0956	61974.72

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0016	1.9876	0.1007	65240.64
0.0017	1.9985	0.1116	72316.80
0.0018	2.0064	0.1195	77448.96
0.0019	2.0145	0.1276	82658.88
0.0020	2.0250	0.1381	89501.76
0.0021	2.0357	0.1488	96422.40
0.0022	2.0436	0.1567	101554.56
0.0023	2.0543	0.1674	108475.20
0.0024	2.0622	0.1753	113607.36
0.0025	2.0729	0.1860	120528.00
0.0026	2.0799	0.1930	125061.64
0.0027	2.0888	0.2019	130862.38
0.0028	2.0978	0.2109	136663.11
0.0029	2.1068	0.2199	142463.84
0.0030	2.1157	0.2288	148264.58
0.0031	2.1247	0.2378	154065.31
0.0032	2.1336	0.2467	159866.04
0.0033	2.1426	0.2557	165666.77
0.0034	2.1515	0.2646	171467.51
0.0035	2.1605	0.2736	177268.24
0.0036	2.1694	0.2825	183068.97
0.0037	2.1784	0.2915	15.4468
0.0038	2.1873	0.3004	15.9212
0.0039	2.1963	0.3094	16.3956
0.0040	2.2052	0.3183	16.8700
0.0041	2.2142	0.3273	17.3445
0.0042	2.2231	0.3362	17.8189

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0043	2.2321	0.2876	0.3452
0.0044	2.2410	0.2951	0.3541
0.0045	2.2500	0.3026	0.3631

ตารางที่ 6.11 แสดงปริมาณไอน้ำและต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้นจากผลกระทบของตะกรันที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0000	2.2163	0.0000	0.00
0.0001	2.2219	0.0056	3621.02
0.0002	2.2275	0.0112	7242.05
0.0003	2.2332	0.0169	10945.37
0.0004	2.2360	0.0197	12755.88
0.0005	2.2444	0.0281	18187.42
0.0006	2.2529	0.0366	23701.25
0.0007	2.2585	0.0422	27322.27
0.0008	2.2668	0.0505	32753.81
0.0009	2.2726	0.0563	36457.13
0.0010	2.2781	0.0618	40078.15
0.0011	2.2865	0.0702	45509.69
0.0012	2.2950	0.0787	51023.52
0.0013	2.3034	0.0871	56455.06
0.0014	2.3119	0.0956	61968.89
0.0015	2.3175	0.1012	65589.91
0.0016	2.3229	0.1066	69046.34
0.0017	2.3344	0.1181	76535.28
0.0018	2.3428	0.1265	81966.82

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0019	2.3513	0.1350	87480.65
0.0020	2.3625	0.1462	94722.70
0.0021	2.3738	0.1575	102047.04
0.0022	2.3822	0.1659	107478.58
0.0023	2.3935	0.1772	114802.92
0.0024	2.4018	0.1855	120234.46
0.0025	2.4132	0.1969	127558.80
0.0026	2.4206	0.2043	132356.91
0.0027	2.4300	0.2137	138496.02
0.0028	2.4395	0.2232	144635.12
0.0029	2.4490	0.2327	150774.23
0.0030	2.4585	0.2422	156913.34
0.0031	2.4679	0.2516	163052.45
0.0032	2.4774	0.2611	169191.56
0.0033	2.4869	0.2706	175330.67
0.0034	2.4963	0.2800	181469.78
0.0035	2.5058	0.2895	187608.89
0.0036	2.5153	0.2990	193748.00
0.0037	2.5248	0.3085	199887.10
0.0038	2.5342	0.3179	206026.21
0.0039	2.5437	0.3274	212165.32
0.0040	2.5532	0.3369	218304.43
0.0041	2.5627	0.3464	224443.54
0.0042	2.5721	0.3558	230582.65
0.0043	2.5816	0.3653	236721.76
0.0044	2.5911	0.3748	242860.87
0.0045	2.6006	0.3843	248999.98

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานตะกรัน ($m^{2\,o}C/W$)	ปริมาณของไอน้ำที่สายเข้า (ตัน/ชั่วโมง)	ผลต่างปริมาณไอน้ำที่ใช้เพิ่มขึ้น (ตัน/ชั่วโมง)	ต้นทุนที่ใช้เพิ่มขึ้น (บาท/เดือน)
0.0046	2.6100	0.3937	255139.09
0.0047	2.6195	0.4032	261278.19
0.0048	2.6290	0.4127	267417.30
0.0049	2.6385	0.4222	273556.41
0.0050	2.6479	0.4316	279695.52
0.0051	2.6574	0.4411	285834.63
0.0052	2.6669	0.4506	291973.74
0.0053	2.6764	0.4601	298112.85
0.0054	2.6858	0.4695	304251.96
0.0055	2.6953	0.4790	310391.07
0.0056	2.7048	0.4885	316530.17
0.0057	2.7142	0.4979	322669.28
0.0058	2.7237	0.5074	328808.39
0.0059	2.7332	0.5169	334947.50
0.0060	2.7427	0.5264	341086.61
0.0061	2.7521	0.5358	347225.72
0.0062	2.7616	0.5453	353364.83

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดสอบโดยใช้แบบจำลองด้วยโปรแกรม HYSYS เมื่อระบบเกิดตะกรันขึ้น อุณหภูมิในหม้อต้มซ้ำในกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์จะลดลง แต่ถ้าต้องการทำให้อุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์ในหม้อต้มซ้ำคงที่ ต้องเพิ่มปริมาณของสายไอน้ำเพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียจากตะกรันที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นลดลง ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าการทำให้ระบบอยู่ในสภาวะดังเดิมเมื่อเกิดตะกรันขึ้น จะต้องให้ความร้อนกับระบบเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.87, 19.24 และ 24.60 เมื่อให้อุณหภูมิเอทิลีนไดคลอไรด์ที่ 85, 100 และ 115 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากการที่ต้องให้ปริมาณไอน้ำกับระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ต้นทุนพลังงานที่ใช้ต้องเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาคำนวนในสภาวะที่เกิดตะกรันคงที่ โดยใช้ราคาไอน้ำ 900 บาทต่อลูกบาศก์เมตรมาคำนวน ค่าพลังงานที่ใช้ พบว่าที่อุณหภูมิ 85, 100 และ 115 องศาเซลเซียส ต้องใช้ต้นทุนพลังงานเพิ่มขึ้น 100440.00, 235275.57 และ 353364.83 บาทต่อเดือน ตามลำดับ

จากผลทดสอบที่ได้ พบว่าปัญหาของตะกรันจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง แต่เมื่อต้องการคงคุณสมบัติของสาร จะต้องใช้ปริมาณไอน้ำสายเข้าเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยกับค่าการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง ส่งผลให้ต้นทุนพลังงานที่ใช้เพิ่มขึ้นเช่นกัน

ดังนั้นในการดำเนินการผลิต นอกจากจะต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพเท่าเดิมแล้ว ยังสามารถใช้วิธีการหยุดเครื่องเพื่อทำความสะอาดตะกรัน แต่วิธีการทั้งสองก็ขึ้นอยู่กับสถานะการณ์ว่าวิธีใดจะเหมาะสมที่สุดในช่วงเวลานั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สร้างเครื่องทดสอบการก่อตัวการเกิดตะกรันโดยอาศัยหลักการของการถ่ายเทความร้อน เมื่อเกิดตะกรันขึ้นที่ผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้อุณหภูมิภายในฮีตเตอร์สูงขึ้นเนื่องจากความร้อนที่เกิดถ่ายเทออกด้านนอกได้น้อยลง ดังนั้นค่าผลต่างของอุณหภูมิจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดตะกรัน ซึ่งจากผลต่างของอุณหภูมินี้เสามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(U) และหาค่าความต้านทานของตะกรัน (R_f) ได้ แต่เครื่องทดสอบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของสารทดสอบไม่มาก เนื่องจากบริเวณแกนใบพัด สารทดสอบจะรั่วออกได้ และถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส จะมีปัญหากับระบบน้ำหล่อเย็น เนื่องจากน้ำหล่อเย็นจะเดือดเมื่อไหลผ่านเครื่องทดสอบ ทำให้ต้องเติมน้ำในเครื่องทำความเย็นเสมอ

ในการทดลองได้ศึกษาการก่อตัวของตะกรันที่อุณหภูมิ 85, 90, 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียสเนื่องจากกระบวนการนำกลับเอทิลีนไดคลอไรด์ใช้ช่วงอุณหภูมิ 80 – 120 องศาเซลเซียส จากการนำไอน้ำมาให้ความร้อนที่หม้อต้มซ้ำ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าความต้านทานของตะกรันมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อให้ความร้อนแก่ของเหลวเอทิลีนไดคลอไรด์สูงขึ้น โดยแนวโน้มเป็นฟังก์ชั่นขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาและมีรูปแบบตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ

$$R_f(T,t) = 1.23 \times 10^{-4}T - (9 \times 10^{-5} - 0.0033)e^{-t/(0.3615T-13.754)} - 0.0076$$

และตะกรันที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฟิล์มสีน้ำตาลเข้มเคลือบอยู่บนผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่อุณหภูมิ 85, 90, 100, 110 และ 115 องศาเซลเซียสมีค่าความต้านทานตะกรันเป็น 0.0025, 0.0033, 0.0045, 0.0055 และ 0.0062 ($m^{2o}C$)/W ตามลำดับ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบ ได้ใช้โปรแกรม HYSYS จำลองกระบวนการกลั่นเอทิลีนไดคลอไรด์ พบว่าเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ก่อนและหลังการเกิดตะกรันมาจำลองในโปรแกรม ที่อุณหภูมิ 85, 100 และ 115 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของเอทิลีนไดคลอไรด์ที่ออกจากหอกลั่นจะลดลง 1.36%, 1.73% และ 1.82% ตามลำดับ และมีองค์ประกอบของเอทิลีนไดคลอไรด์ลดลงร้อยละ 0.0001, 0.0002 และ 0.0002 ตามลำดับ แต่ถ้าต้องการให้เอทิลีนไดคลอไรด์มีสภาวะเดียวกันกับตอนก่อนเกิดตะกรัน จะต้องใช้ปริมาณไอน้ำสายเข้าเพิ่มขึ้นกับระบบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เป็น 10.87 %, 19.24 % และ 24.60 % ตามลำดับ ซึ่งทำให้ต้นทุนการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น 100440.00, 235275.57 และ 353364.83 บาทต่อเดือน

7.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 เครื่องทดสอบการก่อตัวของตะกรันมีปัญหาในการรั่วของสารที่แกนใบพัด เมื่อให้อุณหภูมิเกิดจุดเดือดของสาร ดังนั้นควรหาประเก็นและแป้นเกลียวมาต่อเพิ่มเติม

6.2.2 สารที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น ควรเปลี่ยนจากน้ำ เป็น โพพาลีนไกลคอล เพื่อแก้ปัญหาการเดือดเป็นไอในท่อหล่อเย็น

6.2.3 ฮีตเตอร์ที่ใช้ ควรเปลี่ยนจากแบบแท่ง เป็น แบบขดเกลียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการให้ความร้อน และความทนทานในการใช้งาน

6.2.4 การทดลองเอทิลีนไดคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงมีความอันตรายสูง เนื่องจากไอของสารมีสารพิษอยู่ ผู้วิจัยควรหาอุปกรณ์ป้องกัน เช่นที่ปิดจมูก และแว่นตา มาใช้ทุกครั้งในการทำการทดลอง

6.2.5 ควรศึกษาการก่อตัวของตะกรันของเอทิลีนไดคลอไรด์ เมื่อเติมสารป้องกันการก่อตัวของตะกรัน เพื่อดูประสิทธิภาพของสารป้องกันการก่อตัวของตะกรัน และนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงในอุตสาหกรรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1.] โรงงานอุตสาหกรรม, กรม, คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูง เอทิลีนไดคลอไรด์, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ตุลาคม 2551

[2.] Uhde, company profile, Vinyl chloride and polyvinyl chloride, A company of ThyssenKrupp Technologies, 2010

[3.] Sadik, K., Boiler Evaporators & Condensers, John Wiley & Sons Inc., 1991

[4.] Theodore, R.B., Fouling of Heat Exchangers, Elsevier, 1995

[5.] Martin, K.E. and Graham, L.W., Method for determining fouling, United State Patent, No. 4,176,544, 1978

[6.] Paul, E.E. and Cedar, H.M., Fouling test apparatus, United State Patent, No. 4,383,438, 1981

[7.] Paul, E.E. and Cedar, H.M., Method and apparatus for conducting fouling tests, United State Patent, No. 4,910,999, 1988

[8.] Kuru, W.C. and C. B. Panchal, High-Temperature organic-fluid fouling unit, Argonne National Laboratory, 1997

[9.] Lawrence, K.W. and Bernard, D.B., Method for reducing wall fouling in Vinyl Chloride Polymerization, United State Patent, No. 4,420,591, 1982

[10.] John, P.L, and Akron, O., Process for minimizing corrosion and coking in an ethylene dichloride plant, United State Patent, No. 4,590,317, 1984

[11.] Ghazi, B.D., Process for preventing fouling in the production of ethylene dichloride, United State Patent, 1991

[12.] Youdong, T., Method for reducing coke in EDC-VCM furnaces with a Phosphite inhibitor, United State Patent, 2000

[13.] John, H.L., A Heat Transfer Textbook, Cambridge Massachusetts, Third edition, 2002

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

โค้ด Matlab ในการควบคุมระบบของเครื่องทดลองการก่อตัวของตะกรัน

ก. 1 โค้ด Matlabที่ใช้ควบคุมระบบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

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

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

SP=85;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

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

for i=1:final
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
%%%%%%
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);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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



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

  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=0.75;
  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 TestEDC85C
    end

t=0:st:final;
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. 2 โค้ด Matlabที่ใช้ควบคุมระบบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

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

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

SP=90;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

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

for i=1:final

  %%%%%%
  Temp1 = getsample(ai);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
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);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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



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

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=0.75;
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 TestEDC100C
    end

t=0:st:final;
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. 3 โค้ด Matlabที่ใช้ควบคุมระบบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

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

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

SP=100;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

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

for i=1:final

    %%%%%%
    Temp1 = getsample(ai);
```

```
Temp2 = getsample(ai);
Temp3 = getsample(ai);
Temp4 = getsample(ai);
Temp5 = getsample(ai);
Temp6 = getsample(ai);
Temp7 = getsample(ai);
Temp8 = getsample(ai);
Temp9 = getsample(ai);
Temp10 = getsample(ai);
Temp11 = getsample(ai);
Temp12 = getsample(ai);
Temp13 = getsample(ai);
Temp14 = getsample(ai);
Temp15 = getsample(ai);
Temp16 = getsample(ai);
Temp17 = getsample(ai);
Temp18 = getsample(ai);
Temp19 = getsample(ai);
Temp20 = getsample(ai);
Temp21 = getsample(ai);
Temp22 = getsample(ai);
Temp23 = getsample(ai);
Temp24 = getsample(ai);
Temp25 = getsample(ai);
Temp26 = getsample(ai);
Temp27 = getsample(ai);
Temp28 = getsample(ai);
Temp29 = getsample(ai);
Temp30 = getsample(ai);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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


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

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=0.75;
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 TestEDC100C
    end

t=0:st:final;
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. 4 โค้ด Matlabที่ใช้ควบคุมระบบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

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

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

SP=110;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

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

for i=1:final

    %%%%%%
    Temp1 = getsample(ai);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
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);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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



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

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=0.75;
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 TestEDC100C
    end

t=0:st:final;
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. 5 โค้ด Matlabที่ใช้ควบคุมระบบที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส

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

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

SP=115;
st=10; %sampling time
final=60000; %final time

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

for i=1:final

    %%%%%%
    Temp1 = getsample(ai);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
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);
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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


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

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=0.75;
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 TestEDC115C
    end

t=0:st:final;
```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

ข. 1 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลลีนไดคลอไรด์ 85 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^oC)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^oC)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^oC)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
0.5	83.4709	422.8897	339.4188	67.65576	0.00000	0.00000
1	83.4709	423.2081	339.7372	67.59235	0.00001	0.00000
1.5	82.1536	422.2528	340.0992	67.52041	0.00003	0.00000
2	83.1416	421.6159	338.4744	67.84454	-0.00004	0.00000
2.5	83.1416	421.2975	338.1559	67.90843	-0.00006	0.00000
3	83.1416	425.4371	342.2956	67.08716	0.00012	0.00000
3.5	82.8122	420.9990	338.1867	67.90224	-0.00005	0.00000
4	82.1536	418.4316	336.2780	68.28766	-0.00014	0.00000
4.5	83.4709	419.7053	336.2344	68.29651	-0.00014	0.00000
5	82.4829	418.7500	336.2671	68.28987	-0.00014	0.00000
5.5	83.4709	420.6606	337.1897	68.10301	-0.00010	0.00000
6	84.7882	425.7556	340.9674	67.34849	0.00007	0.00000
6.5	83.1416	424.1634	341.0218	67.33773	0.00007	0.00000
7	80.5069	422.8897	342.3827	67.07008	0.00013	0.00000
7.5	88.0815	424.4818	336.4004	68.26282	-0.00013	0.00000
8	83.4709	423.5265	340.0556	67.52906	0.00003	0.00000
8.5	83.1416	423.5265	340.3850	67.46372	0.00004	0.00007
9	84.1295	430.2137	346.0841	66.35276	0.00029	0.00014
9.5	82.4829	427.9846	345.5017	66.46461	0.00026	0.00021
10	83.1416	429.8952	346.7537	66.22464	0.00032	0.00028
10.5	83.1416	431.8058	348.6643	65.86174	0.00040	0.00034
11	83.1416	430.5321	347.3905	66.10323	0.00035	0.00041
11.5	81.8243	431.8058	349.9816	65.61384	0.00046	0.00047
12	82.8122	436.5823	353.7701	64.91118	0.00062	0.00053

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (°C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
12.5	82.8122	435.3086	352.4964	65.14574	0.00057	0.00058
13	83.1416	433.3980	350.2564	65.56235	0.00047	0.00064
13.5	83.4709	433.0796	349.6087	65.68383	0.00044	0.00069
14	83.4709	433.7164	350.2455	65.56439	0.00047	0.00074
14.5	82.4829	435.6270	353.1441	65.02624	0.00060	0.00080
15	80.8363	437.8561	357.0198	64.32034	0.00077	0.00084
15.5	83.4709	439.1298	355.6589	64.56645	0.00071	0.00089
16	83.4709	441.9957	358.5248	64.05034	0.00083	0.00094
16.5	82.8122	445.8170	363.0047	63.25988	0.00103	0.00098
17	84.1295	445.8170	361.6874	63.49029	0.00097	0.00103
17.5	83.4709	447.7276	364.2567	63.04246	0.00108	0.00107
18	82.8122	447.0907	364.2785	63.03869	0.00108	0.00111
18.5	88.0815	447.4091	359.3276	63.90723	0.00087	0.00115
19	80.8363	447.0907	366.2544	62.69859	0.00117	0.00119
19.5	82.1536	448.0460	365.8924	62.76063	0.00115	0.00123
20	83.8002	450.9119	367.1117	62.55218	0.00120	0.00127
20.5	83.4709	451.8672	368.3963	62.33406	0.00126	0.00130
21	83.8002	449.9566	366.1564	62.71538	0.00116	0.00134
21.5	81.1656	445.8170	364.6514	62.97423	0.00110	0.00137
22	83.4709	452.1856	368.7148	62.28022	0.00127	0.00140
22.5	84.1295	457.2806	373.1510	61.53979	0.00147	0.00144
23	84.7882	459.8281	375.0399	61.22985	0.00155	0.00147
23.5	83.4709	460.1465	376.6756	60.96396	0.00162	0.00150
24	82.4829	458.2359	375.7530	61.11365	0.00158	0.00153
24.5	85.1175	458.2359	373.1184	61.54518	0.00147	0.00155
25	87.0935	460.1465	373.0530	61.55596	0.00146	0.00158
25.5	85.4469	458.5543	373.1075	61.54697	0.00147	0.00161

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^{o}C)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
26	85.4469	461.1018	375.6550	61.12960	0.00158	0.00163
26.5	82.4829	463.3309	380.8479	60.29608	0.00180	0.00166
27	85.4469	460.1465	374.6997	61.28545	0.00154	0.00168
27.5	84.4589	464.2862	379.8273	60.45810	0.00176	0.00171
28	84.1295	462.3755	378.2460	60.71085	0.00169	0.00173
28.5	85.4469	463.3309	377.8840	60.76901	0.00167	0.00175
29	85.1175	460.4649	375.3474	61.17968	0.00156	0.00177
29.5	83.4709	465.8783	382.4074	60.05018	0.00187	0.00179
30	82.8122	468.1074	385.2951	59.60012	0.00200	0.00182
30.5	85.4469	468.7442	383.2974	59.91076	0.00191	0.00183
31	83.8002	467.4705	383.6703	59.85253	0.00193	0.00185
31.5	83.4709	468.1074	384.6365	59.70218	0.00197	0.00187
32	83.4709	468.1074	384.6365	59.70218	0.00197	0.00189
32.5	84.1295	469.3811	385.2516	59.60686	0.00199	0.00191
33	81.8243	472.5655	390.7412	58.76943	0.00223	0.00193
33.5	83.8002	472.2470	388.4468	59.11655	0.00213	0.00194
34	83.1416	466.8336	383.6921	59.84913	0.00193	0.00196
34.5	83.1416	467.1521	384.0105	59.79950	0.00194	0.00197
35	85.4469	470.9733	385.5264	59.56436	0.00201	0.00199
35.5	83.4709	469.0627	385.5918	59.55427	0.00201	0.00200
36	85.4469	468.1074	382.6605	60.01047	0.00188	0.00202
36.5	83.4709	471.2917	387.8208	59.21197	0.00211	0.00203
37	85.4469	467.4705	382.0236	60.11051	0.00185	0.00205
37.5	83.8002	467.1521	383.3518	59.90225	0.00191	0.00206
38	84.4589	469.3811	384.9222	59.65786	0.00198	0.00207
38.5	83.8002	470.9733	387.1731	59.31104	0.00208	0.00208
39	84.4589	470.6548	386.1960	59.46110	0.00204	0.00210

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (°C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	U (W/m$^{2\circ}$C)	Rf Actual (m$^{2\circ}$C/W)	Rf Model (m$^{2\circ}$C/W)
39.5	84.1295	470.3364	386.2069	59.45942	0.00204	0.00211
40	83.4709	471.2917	387.8208	59.21197	0.00211	0.00212

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. 2 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลลีนไดคลอไรด์ 90 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่างอุณหภูมิ (^{o}C)	U (W/m^{2o}C)	Rf Actual (m^{2o}C/W)	Rf Model (m^{2o}C/W)
0.5	90.3868	380.5432	290.1564	324.8768	68.17639	-0.00001
1	90.0574	380.9030	290.8456	325.6555	68.01484	0.00002
1.5	90.7161	381.3121	290.5960	325.3735	68.07326	0.00001
2	90.7161	379.4760	288.7599	323.2987	68.50611	-0.00008
2.5	91.3748	379.1162	287.7414	322.1478	68.74859	-0.00013
3	90.3868	383.7940	293.4072	328.5502	67.42103	0.00015
3.5	87.7521	379.1510	291.3988	326.2807	67.88571	0.00005
4	90.7161	376.9941	286.2780	320.4942	69.10002	-0.00021
4.5	91.0454	376.9449	285.8995	320.0664	69.19152	-0.00023
5	90.0574	376.9818	286.9244	321.2246	68.94436	-0.00018
5.5	89.7281	378.0244	288.2963	322.7748	68.61628	-0.00011
6	91.7041	382.2931	290.5890	325.3656	68.07489	0.00001
6.5	89.3988	382.3547	292.9559	328.0402	67.52490	0.00013
7	88.7401	383.8925	295.1523	330.5221	67.02240	0.00024
7.5	88.4108	377.1324	288.7216	323.2554	68.51520	-0.00008
8	87.7521	381.2629	293.5107	328.6671	67.39726	0.00016
8.5	88.4108	381.6350	293.2242	328.3434	67.46311	0.00014
9	88.7401	388.0750	299.3349	335.2484	66.08590	0.00045
9.5	88.7401	387.4169	298.6768	334.5048	66.23152	0.00042
10	87.4228	388.8316	301.4088	337.5920	65.63119	0.00056
10.5	88.7401	390.9906	302.2505	338.5430	65.44842	0.00060
11	88.4108	389.5513	301.1405	337.2888	65.68967	0.00054
11.5	89.4228	392.4792	303.0564	339.4537	65.27439	0.00064
12	88.7521	396.7602	308.0081	345.0491	64.22500	0.00089
12.5	88.0815	395.3209	307.2394	344.1805	64.38568	0.00085
13	88.7521	392.7898	304.0376	340.5625	65.06372	0.00069

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^{o}C)	U ($W/m^{2\,o}C$)	Rf Actual ($m^{2\,o}C/W$)	Rf Model ($m^{2\,o}C/W$)
13.5	88.0815	392.0578	303.9763	340.4932	65.07684	0.00069
14	89.7281	392.7775	303.0494	339.4458	65.27590	0.00064
14.5	87.0935	396.0529	308.9594	346.1241	64.02725	0.00094
15	89.7281	400.4324	310.7043	348.0958	63.66767	0.00103
15.5	81.8243	398.8946	317.0703	355.2895	62.38937	0.00135
16	89.7281	402.1331	312.4050	350.0176	63.32108	0.00111
16.5	91.0454	407.1953	316.1499	354.2494	62.57101	0.00130
17	88.0815	405.7068	317.6253	355.9166	62.28036	0.00138
17.5	90.7161	408.6100	317.8939	356.2201	62.22773	0.00139
18	89.3988	408.6347	319.2359	357.7365	61.96615	0.00146
18.5	89.0695	403.0402	313.9708	351.7870	63.00528	0.00119
19	91.0454	410.8675	319.8221	358.3989	61.85257	0.00149
19.5	90.7161	410.4584	319.7423	358.3088	61.86800	0.00148
20	89.7281	411.8362	322.1081	360.9821	61.41360	0.00160
20.5	88.7401	413.2878	324.5477	363.7389	60.95196	0.00173
21	89.7281	410.7567	321.0286	359.7623	61.62011	0.00155
21.5	87.0935	409.0560	321.9625	360.8177	61.44137	0.00160
22	88.4108	413.6477	325.2369	364.5177	60.82280	0.00176
22.5	86.7642	418.6607	331.8965	372.0431	59.60237	0.00210
23	88.7401	420.7951	332.0549	372.2221	59.57393	0.00211
23.5	90.7161	422.6434	331.9273	372.0779	59.59683	0.00210
24	88.7401	421.6009	332.8607	373.1326	59.42971	0.00215
24.5	89.0695	418.6238	329.5543	369.3964	60.02598	0.00198
25	87.4228	418.5499	331.1271	371.1736	59.74086	0.00206
25.5	89.0695	418.6114	329.5420	369.3824	60.02822	0.00198
26	92.3627	421.4901	329.1274	368.9139	60.10384	0.00196
26.5	91.0454	427.3582	336.3128	377.0334	58.81971	0.00232

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^{o}C)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
27	89.3988	420.4106	331.0118	371.0434	59.76167	0.00205
27.5	89.0695	426.2048	337.1354	377.9630	58.67619	0.00236
28	88.7401	424.4180	335.6779	376.3160	58.93096	0.00229
28.5	88.7401	424.0089	335.2688	375.8537	59.00286	0.00227
29	88.7401	421.1426	332.4024	372.6148	59.51165	0.00212
29.5	88.7401	429.1204	340.3803	381.6297	58.11682	0.00253
30	88.4108	432.3835	343.9727	385.6891	57.50985	0.00271
30.5	88.0815	430.1260	342.0446	383.5104	57.83404	0.00261
31	88.4108	430.5474	342.1366	383.6144	57.81848	0.00262
31.5	87.7521	431.6392	343.8871	385.5924	57.52417	0.00270
32	87.7521	431.6392	343.8871	385.5924	57.52417	0.00270
32.5	89.3988	432.3343	342.9355	384.5171	57.68379	0.00266
33	87.7521	438.5376	350.7854	393.3875	56.39293	0.00305
33.5	89.3988	435.9449	346.5461	388.5971	57.08279	0.00284
34	90.0574	430.5720	340.5146	381.7815	58.09389	0.00253
34.5	89.0695	430.9319	341.8624	383.3045	57.86485	0.00260
35	92.3627	432.6449	340.2821	381.5188	58.13358	0.00252
35.5	88.4108	432.7187	344.3079	386.0679	57.45386	0.00273
36	89.7281	429.4064	339.6783	380.8364	58.23693	0.00249
36.5	89.0695	435.2375	346.1681	388.1699	57.14513	0.00282
37	87.7521	428.6867	340.9346	382.2561	58.02233	0.00255
37.5	90.0574	430.1876	340.1301	381.3471	58.15956	0.00251
38	88.7401	431.9621	343.2220	384.8409	57.63564	0.00267
38.5	85.7762	434.5056	348.7294	391.0642	56.72541	0.00295
39	89.3988	433.4015	344.0027	385.7230	57.50484	0.00271
39.5	89.3988	433.4138	344.0150	385.7369	57.50278	0.00271
40	89.0695	435.2375	346.1681	388.1699	57.14513	0.00282

ข. 3 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลลีนไดคลอไรด์ 100 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^{o}C)	U ($W/m^{2\,o}C$)	Rf Actual ($m^{2\,o}C/W$)	Rf Model ($m^{2\,o}C/W$)
0.5	96.3147	434.9455	338.6308	67.81319	-0.00018	0.00000
1	94.9974	434.6270	339.6297	67.61375	-0.00014	0.00000
1.5	94.0094	435.9008	341.8914	67.16646	-0.00004	0.00000
2	94.0094	435.9008	341.8914	67.16646	-0.00004	0.00000
2.5	93.6800	436.8561	343.1760	66.91503	0.00001	0.00000
3	94.6680	437.1745	342.5065	67.04584	-0.00001	0.00000
3.5	94.9974	437.1745	342.1772	67.11037	-0.00003	0.00000
4	95.9853	439.4036	343.4182	66.86784	0.00003	0.00000
4.5	97.9613	439.9957	342.0344	67.13838	-0.00004	0.00000
5	99.2786	443.4538	344.1752	66.72077	0.00006	0.00000
5.5	99.9373	441.1801	341.2428	67.29412	-0.00007	0.00000
6	100.9252	445.2750	344.3498	66.68695	0.00007	-0.00004
6.5	98.6200	446.1856	347.5657	66.06992	0.00021	0.00011
7	94.6680	447.0962	352.4282	65.15834	0.00042	0.00025
7.5	93.3507	450.5543	357.2036	64.28724	0.00063	0.00039
8	92.3627	453.0571	360.6944	63.66508	0.00078	0.00052
8.5	94.0094	453.0124	359.0030	63.96502	0.00070	0.00065
9	95.9853	457.1074	361.1220	63.58968	0.00080	0.00077
9.5	97.6320	458.0180	360.3860	63.71956	0.00076	0.00088
10	97.9613	459.5655	361.6042	63.50490	0.00082	0.00099
10.5	98.9493	463.9788	365.0296	62.90898	0.00097	0.00110
11	101.2546	466.4816	365.2271	62.87496	0.00097	0.00120
11.5	99.6079	466.4369	366.8290	62.60039	0.00104	0.00130
12	95.9853	467.9844	371.9991	61.73036	0.00127	0.00139
12.5	94.3387	471.1241	376.7854	60.94620	0.00148	0.00148
13	92.6921	472.6715	379.9795	60.43389	0.00162	0.00157

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (°C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	U (W/m^2°C)	Rf Actual (m^2°C/W)	Rf Model (m^2°C/W)
13.5	93.6800	474.8559	381.1758	60.24421	0.00167	0.00165
14	94.9974	476.0849	381.0876	60.25816	0.00167	0.00173
14.5	97.6320	477.3140	379.6820	60.48124	0.00160	0.00181
15	100.2666	480.4536	380.1870	60.40090	0.00163	0.00188
15.5	103.2305	480.4089	377.1784	60.88270	0.00150	0.00195
16	99.2786	482.9117	383.6331	59.85833	0.00178	0.00202
16.5	94.9974	486.0513	391.0540	58.72242	0.00210	0.00208
17	95.3267	486.6435	391.3168	58.68298	0.00211	0.00214
17.5	94.0094	487.5541	393.5448	58.35076	0.00221	0.00220
18	94.3387	491.0122	396.6735	57.89052	0.00234	0.00226
18.5	95.6560	493.5150	397.8590	57.71803	0.00240	0.00232
19	99.2786	492.1966	392.9179	58.44385	0.00218	0.00237
19.5	101.5839	493.4256	391.8417	58.60437	0.00213	0.00242
20	101.2546	496.5652	395.3107	58.09010	0.00228	0.00247
20.5	96.6440	496.8390	400.1950	57.38112	0.00250	0.00251
21	94.0094	498.3865	404.3771	56.78768	0.00268	0.00256
21.5	92.6921	500.8892	408.1972	56.25623	0.00285	0.00260
22	92.6921	500.5261	407.8341	56.30632	0.00283	0.00264
22.5	95.9853	502.7105	406.7251	56.45984	0.00278	0.00268
23	98.9493	501.7105	402.7612	57.01552	0.00261	0.00272
23.5	102.9012	504.2132	401.3120	57.22140	0.00255	0.00275
24	104.8772	504.1685	399.2914	57.51098	0.00246	0.00279
24.5	99.9373	505.7160	405.7788	56.59152	0.00274	0.00282
25	98.2906	507.5819	409.2913	56.10585	0.00289	0.00285
25.5	94.6680	505.9451	411.2770	55.83496	0.00298	0.00288
26	94.3387	507.4925	413.1538	55.58132	0.00306	0.00291
26.5	94.3387	510.9506	416.6119	55.11997	0.00321	0.00294

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (°C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	U (W/m^{2}°C)	Rf Actual (m^{2}°C/W)	Rf Model (m^{2}°C/W)
27	96.3147	509.9506	413.6360	55.51654	0.00308	0.00297
27.5	100.5959	510.8612	410.2653	55.97265	0.00294	0.00299
28	103.4998	511.7718	408.2721	56.24592	0.00285	0.00302
28.5	103.8892	512.6824	408.7933	56.17421	0.00287	0.00304
29	100.9252	512.0009	411.0756	55.86231	0.00297	0.00306
29.5	101.9132	514.1852	412.2720	55.70021	0.00302	0.00309
30	100.9373	512.9455	413.0082	55.60092	0.00306	0.00311
30.5	99.2786	511.6270	414.3484	55.42108	0.00311	0.00313
31	100.9613	511.9008	413.9395	55.47583	0.00310	0.00315
31.5	98.9853	510.9008	415.9154	55.21227	0.00318	0.00317
32	98.9974	510.8561	416.8587	55.08733	0.00322	0.00318
32.5	100.6680	510.1745	416.5065	55.13392	0.00321	0.00320
33	98.6800	509.1745	419.2945	54.76732	0.00333	0.00322
33.5	99.0094	510.4036	421.2942	54.50737	0.00342	0.00323
34	102.0094	510.9957	419.9864	54.67710	0.00336	0.00325
34.5	102.9974	514.4538	417.5565	54.99528	0.00325	0.00326
35	101.3147	512.1801	415.8654	55.21891	0.00318	0.00328
35.5	100.9373	512.9455	412.0082	55.73587	0.00301	0.00329
36	99.3906	518.6282	419.2375	54.77476	0.00333	0.00330
36.5	95.6680	513.4966	417.8286	54.95947	0.00327	0.00331
37	95.5387	516.6396	421.1009	54.53238	0.00341	0.00333
37.5	95.4387	509.5938	414.1551	55.44695	0.00311	0.00334
38	97.3647	509.1675	411.8029	55.76366	0.00300	0.00335
38.5	97.9400	515.3236	417.3836	55.01807	0.00325	0.00336
39	98.8530	514.8399	415.9869	55.20278	0.00319	0.00337
39.5	99.7659	511.0487	411.2827	55.83419	0.00298	0.00338
40	100.6789	514.4318	413.7528	55.50086	0.00309	0.00339

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. 4 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลลีนไดคลอไรด์ 110 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (°C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
0.5	110.3988	388.5632	278.1644	311.3258	76.14855	-0.00032
1	109.7401	390.8684	281.1283	314.6750	75.34574	-0.00018
1.5	109.4108	394.4365	285.0257	319.0790	74.31548	0.00000
2	109.7401	396.3960	286.6558	320.9211	73.89286	0.00008
2.5	110.3988	394.4148	284.0160	317.9381	74.57967	-0.00005
3	109.4108	397.0110	287.6002	321.9883	73.65021	0.00012
3.5	107.1055	392.1096	285.0041	319.0546	74.32111	0.00000
4	107.4348	397.9228	290.4879	325.2514	72.91807	0.00026
4.5	107.4348	395.2327	287.7978	322.2115	73.59965	0.00013
5	108.0935	396.0671	287.9736	322.4102	73.55472	0.00014
5.5	109.0815	393.1347	284.0532	317.9802	74.56989	-0.00005
6	106.7762	398.8543	292.0781	327.0483	72.52106	0.00033
6.5	107.1055	399.4576	292.3521	327.3578	72.45312	0.00034
7	107.1055	407.5859	300.4804	336.5429	70.49317	0.00073
7.5	107.1055	411.7082	304.6027	341.2010	69.53918	0.00092
8	108.4228	415.8521	307.4293	344.3951	68.89981	0.00106
8.5	107.1055	412.2013	305.0958	341.7582	69.42679	0.00095
9	107.1055	415.6266	308.5211	345.6288	68.65599	0.00111
9.5	107.7642	414.8906	307.1264	344.0528	68.96776	0.00104
10	110.3988	414.8024	304.4036	340.9761	69.58465	0.00091
10.5	107.4348	422.1468	314.7119	352.6245	67.30542	0.00140
11	108.4228	421.0379	312.6151	350.2551	67.75686	0.00130
11.5	109.0815	423.9462	314.8647	352.7971	67.27276	0.00141
12	109.0815	428.4631	319.3816	357.9012	66.32134	0.00162
12.5	108.7521	431.2899	322.5378	361.4677	65.67237	0.00177
13	109.0815	436.4435	327.3620	366.9191	64.70457	0.00200

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่างอุณหภูมิ (^{o}C)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
13.5	111.3868	436.9867	325.5999	364.9279	65.05474	0.00191
14	109.7401	435.5921	325.8520	365.2127	65.00442	0.00193
14.5	111.3868	434.1865	322.7998	361.7637	65.61906	0.00178
15	110.3988	437.3042	326.9054	366.4031	64.79494	0.00198
15.5	110.0695	434.9487	324.8793	364.1136	65.19904	0.00188
16	110.3988	439.4440	329.0452	368.8210	64.37359	0.00208
16.5	111.0574	446.8649	335.8074	376.4624	63.07728	0.00240
17	111.0574	449.7404	338.6829	379.7117	62.54174	0.00253
17.5	110.3988	451.9683	341.5695	382.9735	62.01320	0.00267
18	110.7281	451.8312	341.1031	382.4465	62.09799	0.00265
18.5	110.3748	456.2825	345.9078	387.8758	61.23545	0.00287
19	111.3627	453.3010	341.9382	383.3902	61.94633	0.00269
19.5	111.7161	450.2652	338.5491	379.5605	62.56645	0.00253
20	112.3748	454.3874	342.0126	383.4742	61.93286	0.00269
20.5	111.7161	457.9654	346.2493	388.2617	61.17506	0.00289
21	110.0695	466.7196	356.6501	400.0146	59.39103	0.00338
21.5	109.7401	464.6612	354.9211	398.0608	59.68036	0.00330
22	108.7521	465.6044	356.8523	400.2431	59.35739	0.00339
22.5	109.4108	466.4550	357.0442	400.4599	59.32548	0.00340
23	110.3988	459.8784	349.4796	391.9119	60.60960	0.00304
23.5	108.4228	457.7761	349.3532	391.7692	60.63152	0.00304
24	109.7401	457.7149	347.9748	390.2115	60.87171	0.00297
24.5	110.7281	463.5491	352.8210	395.6877	60.03559	0.00320
25	109.7401	466.4085	356.6684	400.0353	59.38799	0.00338
25.5	110.7281	471.6600	360.9319	404.8531	58.68646	0.00358
26	108.7521	474.8432	366.0910	410.6829	57.85943	0.00383
26.5	108.7521	475.6886	366.9365	411.6382	57.72612	0.00387

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^oC)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^oC)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^oC)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
27	109.7401	475.9785	366.2383	410.8493	57.83616	0.00383
27.5	110.3988	471.3015	360.9027	404.8200	58.69122	0.00358
28	110.3988	469.9614	359.5626	403.3057	58.90996	0.00352
28.5	109.7401	469.8294	360.0893	403.9009	58.82379	0.00354
29	110.3988	472.7650	362.3662	406.4738	58.45418	0.00365
29.5	109.7401	473.3082	363.5680	407.8319	58.26095	0.00371
30	110.0695	472.7381	362.6686	406.8155	58.40544	0.00366
30.5	110.3988	474.7314	364.3327	408.6959	58.13868	0.00374
31	111.3868	480.8541	369.4673	414.4981	57.33069	0.00399
31.5	111.0574	476.2985	365.2410	409.7223	57.99408	0.00379
32	111.3868	475.9354	364.5486	408.9400	58.10423	0.00375
32.5	111.3868	476.2363	364.8496	409.2800	58.05631	0.00377
33	111.7161	480.3306	368.6146	413.5344	57.46333	0.00395
33.5	110.3748	481.0240	370.6493	415.8337	57.14787	0.00404
34	110.3507	478.4099	368.0592	412.9069	57.55004	0.00392
34.5	111.7161	475.9800	364.2639	408.6182	58.14965	0.00374
35	111.7161	478.8611	367.1450	411.8738	57.69333	0.00388
35.5	111.7161	470.4317	358.7156	402.3487	59.04905	0.00348
36	108.7521	479.6205	370.8684	416.0813	57.11411	0.00405
36.5	111.0574	478.8647	367.8073	412.6223	57.58944	0.00391
37	110.7281	481.4839	370.7558	415.9540	57.13146	0.00405
37.5	110.3507	472.5786	362.2279	406.3175	58.47650	0.00364
38	111.0574	471.5327	360.4753	404.3370	58.76081	0.00356
38.5	110.7041	477.1134	366.4093	411.0425	57.80917	0.00384
39	111.0334	478.3294	367.2960	412.0445	57.66961	0.00388
39.5	109.4228	473.6252	364.2024	408.5487	58.15947	0.00374
40	109.4228	476.0953	366.6725	411.3399	57.76768	0.00385

ข. 5 ผลการทดลอง ที่อุณหภูมิเอทิลลีนไดคลอไรด์ 115 องศาเซลเซียส

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^{o}C)	U (W/m^{2o}C)	Rf Actual (m^{2o}C/W)	Rf Model (m^{2o}C/W)
0.5	113.7269	351.6132	237.8863	60.34205	-0.00010	0.00000
1	113.4679	351.3557	237.8878	60.34165	-0.00010	0.00000
1.5	112.2646	352.3854	240.1209	59.78050	0.00006	0.00000
2	113.1179	352.3854	239.2675	59.99370	0.00000	-0.00004
2.5	113.0454	353.1577	240.1123	59.78263	0.00006	0.00007
3	112.9729	353.4151	240.4422	59.70060	0.00008	0.00018
3.5	112.5711	353.4151	240.8441	59.60099	0.00011	0.00029
4	111.8399	355.2171	243.3772	58.98065	0.00029	0.00039
4.5	113.0847	355.6958	242.6111	59.16690	0.00023	0.00049
5	112.0242	358.4914	246.4671	58.24122	0.00050	0.00060
5.5	112.9397	356.6533	243.7135	58.89925	0.00031	0.00069
6	114.1845	359.9636	245.7791	58.40425	0.00045	0.00079
6.5	112.4654	360.6998	248.2344	57.82658	0.00062	0.00089
7	109.7583	361.4359	251.6777	57.03544	0.00086	0.00098
7.5	117.2603	364.2315	246.9712	58.12235	0.00054	0.00107
8	112.5772	366.2547	253.6775	56.58580	0.00100	0.00117
8.5	112.1754	366.2186	254.0432	56.50435	0.00103	0.00125
9	113.0909	369.5290	256.4381	55.97664	0.00120	0.00134
9.5	114.1569	370.2651	256.1082	56.04875	0.00117	0.00143
10	114.1196	371.5161	257.3966	55.76821	0.00126	0.00151
10.5	115.4396	375.0839	259.6443	55.28542	0.00142	0.00160
11	115.1286	377.1072	261.9787	54.79281	0.00158	0.00168
11.5	114.1233	377.0711	262.9478	54.59086	0.00165	0.00176
12	115.3372	378.3221	262.9849	54.58316	0.00165	0.00184
12.5	115.5631	380.8602	265.2971	54.10744	0.00181	0.00191
13	116.1183	382.1112	265.9929	53.96591	0.00186	0.00199

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (^{o}C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (^{o}C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (^{o}C)	U ($W/m^{2o}C$)	Rf Actual ($m^{2o}C/W$)	Rf Model ($m^{2o}C/W$)
13.5	116.6736	383.8770	267.2035	53.72141	0.00195	0.00206
14	116.8995	384.8706	267.9711	53.56751	0.00200	0.00214
14.5	116.1374	385.8642	269.7268	53.21884	0.00212	0.00221
15	114.7167	388.4023	273.6856	52.44903	0.00240	0.00228
15.5	117.5772	388.3661	270.7889	53.01009	0.00219	0.00235
16	117.8031	390.3894	272.5863	52.66055	0.00232	0.00242
16.5	117.3704	392.9275	275.5572	52.09281	0.00253	0.00248
17	118.9136	393.4062	274.4927	52.29482	0.00245	0.00255
17.5	117.1249	394.1424	277.0175	51.81819	0.00263	0.00261
18	115.6882	396.9379	281.2497	51.03844	0.00292	0.00268
18.5	122.0685	398.9612	276.8927	51.84154	0.00262	0.00274
19	113.8693	397.8954	284.0261	50.53953	0.00312	0.00280
19.5	114.8697	398.8889	284.0193	50.54075	0.00312	0.00286
20	116.1994	401.4270	285.2277	50.32663	0.00320	0.00292
20.5	115.5531	401.6483	286.0952	50.17402	0.00326	0.00298
21	115.5656	402.8993	287.3338	49.95774	0.00335	0.00304
21.5	112.6140	404.9226	292.3086	49.10751	0.00369	0.00309
22	114.6024	404.6290	290.0266	49.49389	0.00354	0.00315
22.5	114.9442	406.3949	291.4507	49.25205	0.00363	0.00320
23	116.6882	405.5865	288.8983	49.68720	0.00346	0.00325
23.5	115.0540	407.6097	292.5558	49.06602	0.00371	0.00331
24	114.1698	407.5736	293.4038	48.92419	0.00377	0.00336
24.5	116.9082	408.8246	291.9164	49.17348	0.00367	0.00341
25	118.9879	410.3330	291.3451	49.26991	0.00363	0.00346
25.5	117.4451	409.0098	291.5647	49.23280	0.00364	0.00351
26	117.5488	410.2607	292.7119	49.03984	0.00372	0.00355
26.5	114.6887	413.0563	298.3676	48.11027	0.00412	0.00360

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ EDC (°C)	อุณหภูมิ ฮีตเตอร์ (°C)	ผลต่าง อุณหภูมิ (°C)	U (W/m^{2o}C)	Rf Actual (m^{2o}C/W)	Rf Model (m^{2o}C/W)
27	117.7564	412.2479	294.4915	48.74350	0.00385	0.00365
27.5	116.8722	412.9840	296.1118	48.47677	0.00396	0.00369
28	116.6466	413.7202	297.0735	48.31984	0.00403	0.00374
28.5	118.0677	414.4563	296.3886	48.43151	0.00398	0.00378
29	117.8422	413.9053	296.0631	48.48475	0.00396	0.00382
29.5	116.2993	415.6712	299.3718	47.94888	0.00419	0.00386
30	115.7445	414.6689	298.9245	48.02064	0.00415	0.00391
30.5	118.4829	413.6031	295.1203	48.63965	0.00389	0.00395
31	116.9400	413.8244	296.8844	48.35062	0.00401	0.00399
31.5	116.7144	413.0160	296.3015	48.44573	0.00397	0.00402
32	116.8182	412.9799	296.1616	48.46862	0.00396	0.00406
32.5	117.5807	412.4289	294.8482	48.68453	0.00387	0.00410
33	115.3791	411.6205	296.2413	48.45558	0.00397	0.00414
33.5	118.0392	412.6140	294.5748	48.72971	0.00385	0.00417
34	117.7036	413.0928	295.3892	48.59537	0.00391	0.00421
34.5	117.0316	415.8883	298.8567	48.03153	0.00415	0.00425
35	118.3469	414.0502	295.7033	48.54374	0.00393	0.00428
35.5	116.1429	414.6689	298.5260	48.08473	0.00413	0.00431
36	118.4469	419.2629	300.8160	47.71869	0.00429	0.00435
36.5	115.5731	415.1145	299.5414	47.92174	0.00420	0.00438
37	117.1149	417.6553	300.5404	47.76244	0.00427	0.00441
37.5	115.0340	411.9594	296.9254	48.34395	0.00402	0.00444
38	115.2585	411.6148	296.3563	48.43678	0.00398	0.00448
38.5	114.1656	416.5914	302.4258	47.46469	0.00440	0.00451
39	114.3901	416.2004	301.8103	47.56148	0.00436	0.00454
39.5	113.6265	413.1356	299.5090	47.92692	0.00420	0.00457
40	114.4709	415.8705	301.3996	47.62630	0.00433	0.00459

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปริญญา วณิชเจริญการ เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2526 ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย