

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อิทธิพลของสภาวะเริ่มต้นต่อการผลิตน้ำตาลไอเข้มข้นด้วยเครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง

Influence of inlet conditions on longan drink concentration in a falling film  
evaporator

โดย

นางสาวกฤษณา

แม่เฮ้ง

นางสาวเกษศิริ

ป้อมเชียงพิณ

นางสาวพินุกาญจน์

โกศลกาญจน์

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....62636

วัน,เดือน,ปี.....21 ส.ค. 2549

b. 116 29384  
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Influence of inlet conditions on longan drink concentration in a falling film  
evaporator**

**MISS KRIDSANA**

**SAEHENG**

**MISS KEDSIRI**

**POMCHIANGPIN**

**MISS PINNUKARN**

**KOSONKARN**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF FOOD ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF FOOD ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

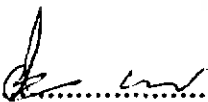
ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ อิทธิพลของสภาวะเริ่มต้นต่อการผลิตน้ำดื่มเข้มข้นด้วยเครื่องระเหย  
แบบฟิล์มไหลลง

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกฤษณา แซ่เฮ้ง
2. นางสาวเกษศิริ ป้อมเชียงพิณ
3. นางสาวพินทุภาญจน์ โกศลกาญจน์

.....  ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ. ดร. มาตุดี ผ่องทิพัฒน์พงศ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิทธิพลของสภาวะเริ่มต้นต่อการผลิตน้ำลำไยเข้มข้นด้วยเครื่องระเหยแบบ  
ฟิล์มไหลลง

นางสาวกฤษณา            แซ่เอ็ง  
นางสาวเกษศิริ           ป้อมเชียงพิณ  
นางสาวพินุกาญจน์ โกศลกาญจน์

ผศ. ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์            อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

การระเหยเป็นการแปรรูปอาหารที่สำคัญและมักใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม  
เครื่องดื่ม ปัจจุบันน้ำลำไยกำลังเป็นที่นิยม การผลิตน้ำลำไยเข้มข้น เพื่อความสะดวกต่อการบริโภค  
และ ยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตลำไยที่มีมากเกินความต้องการ เป็นแนวทางในการ  
แก้ปัญหา ลดการสูญเสีย ในโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาอิทธิพลของสภาวะการผลิต  
เริ่มต้นซึ่งประกอบด้วย ความเข้มข้น อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำลำไย และอัตราการป้อนที่มีผลต่อค่า  
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของเครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลงที่ใช้ในการผลิตน้ำลำไย  
เข้มข้นคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะสูงขึ้นเมื่อ อุณหภูมิน้ำลำไยเพิ่มขึ้น อัตราการ  
ป้อนเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นลดลง และ อุณหภูมิน้ำร้อนลดลง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำ  
ลำไยในระหว่างการระเหยเพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียล นอกจากนี้ในโครงการนี้ยัง  
ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของน้ำลำไย คือความหนาแน่น และความหนืด พบว่าความสัมพันธ์  
ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างความ  
หนืดกับความเข้มข้นเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล ส่วนอุณหภูมิมีผลต่อค่าความหนืดและความ  
หนาแน่นเพียงเล็กน้อย ผลการศึกษานี้จะใช้เป็นประโยชน์ในการกำหนดแนวทางการออกแบบและ  
ควบคุมสภาวะการผลิตน้ำลำไยเข้มข้นต่อไป

# **Influence of inlet conditions on longan drink concentration in a falling film evaporator**

**Miss Kritsana Saeheng**

**Miss Kedsiri Pomchiangpin**

**Miss Pinnukarn Kosonkarn**

**Asst. Prof. Dr. Maradee Phongpipatpong Advisor**

## **Abstract**

**Evaporation is an important food process and often use extensively in beverage industry. Nowadays longan drink is popular in many countries. The concentrate longan drink is produced for convenient consumption and for higher price ; this can solve the problem of over supply of longan during high season of harvesting .The influence of inlet conditions on longan drink concentration including concentration , temperature of longan juice , water supply temperature and feed rate that affect the overall heat transfer coefficient in a falling film evaporator was investigated . The results showed that overall heat transfer coefficient increased with longan juice temperature and feed rate . However , when water supply temperature was decreased , the overall heat transfer coefficient decreased .The change of longan juice concentration was exhibited in the exponential form . The mathematical relations of longan juice density and viscosity were also proposed as a function of concentration and temperature.**

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่มีส่วนทำให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ดังรายนามต่อไปนี้ ผศ. ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และบุคลากรของ ภาควิชาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการทดลองในครั้งนี้ รศ. ศาทิพย์ รัตนภาสกร และคณาจารย์ของภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน นอกจากนี้ยังมีคุณพ่อ และคุณแม่ที่เป็นบุคคลที่ช่วยสนับสนุนด้านต่าง ๆ จนประสบความสำเร็จ และต้องขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่อาจกล่าวได้หมดที่มีส่วนให้ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	I
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	VI
สัญลักษณ์	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการ เหตุผล ที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับลำไย	3
2.1.1 พันธุ์ลำไย	3
2.1.2 คุณค่าทางอาหารของลำไย	5
2.1.3 สถานการณ์ผลผลิตลำไย	5
2.2 การระเหย	6
2.2.1 ทฤษฎี	6
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว	7
2.2.3 คุณสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อการระเหย	8
2.2.4 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่อง	9
2.2.5 ชนิดของเครื่องระเหย	11
2.2.6 ทฤษฎีคำนวณ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	15
2.3 ความหนืด	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3 การดำเนินงานและการออกแบบ	21
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเตรียมวัตถุดิบ	21
3.3 การเตรียมอุปกรณ์	22
3.4 ขั้นตอนการระเหย	24
3.5 การวางแผนการทดลอง	26
3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	26
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	<b>27</b>
4.1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	27
4.1.1 แบบจำลองเชิงทฤษฎี	27
4.1.2 แบบจำลองกึ่งทฤษฎี	32
4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำลำไยในระหว่างการระเหย	38
4.3 คุณสมบัติของน้ำลำไย	39
4.3.1 ความหนาแน่นของน้ำลำไย	39
4.3.2 ค่าความหนืดของน้ำลำไย	45
4.3.3 ผลของสภาวะเริ่มต้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำลำไย	49
4.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	51
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>53</b>
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>54</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>56</b>
ภาคผนวก ก	57
ภาคผนวก ข	64
ภาคผนวก ค	66
ภาคผนวก ง	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ปริมาณผลผลิตลำไยทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ถึงปัจจุบัน	6
2.2 เครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง	9
2.3 ถังแลกเปลี่ยนความร้อน	10
2.4 ปุ่มสูญญากาศ	11
2.5 เครื่องระเหยแบบหม้อชนิดเป็นครึ่ง	11
2.6 เครื่องระเหยแบบการหมุนเวียนตามธรรมชาติ	12
2.7 เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มไหลขึ้น	13
2.8 เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มไหลลง	13
2.9 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง	14
2.10 เครื่องระเหยชนิดบังคับให้หมุนเวียน	15
2.11 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มบาง ๆ ที่มีการกวาน	15
2.12 เครื่องระเหยแบบขั้นตอนเดียว	16
2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง shear rate กับ shear stress	17
3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ	22
3.2 แผนผังกระบวนการ	23
3.3 แสดงขั้นตอนการทดลอง โดยรวม	25
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า	28
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า	28
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ	29
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้	29
4.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณจากสมการทำนาย	30
4.6 แสดงผลของ อุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า และอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	31
4.7 แสดงผลของอัตราการป้อนวัตถุดิบ และความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้ ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิวัตถุบิขาเข้า	33
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า	33
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอัตราการป้อนวัตถุบิ	34
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับความเข้มข้น ของตัวถูกละลายที่ละลายได้	34
4.12 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลอง กับ จากการคำนวณจากสมการทำนาย	35
4.13 แสดงผลของ อุณหภูมิวัตถุบิขาเข้า และอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ต่อสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนรวม	36
4.14 แสดงผลของอัตราการป้อนวัตถุบิ และความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้ต่อ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	37
4.15 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎี ( $U_1$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงกึ่งทฤษฎี ( $U_2$ ) ที่คำนวณจาก ทฤษฎีกึ่งพื้นฐาน	38
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ ต่อ ความเข้มข้นเริ่มต้นที่การทดลองต่าง ๆ	38
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับสภาวะเริ่มต้นคือ อัตราเร็วการป้อน(F)และอุณหภูมิ วัตถุบิเริ่มต้น ( $T_0$ )	39
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำลำไยกับความหนาแน่น	41
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำลำไยที่สภาวะต่าง ๆ กับความหนาแน่น	41
4.20 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ ของความหนาแน่นจากการทดลองและ จากสมการความสัมพันธ์รูปแบบที่1	42
4.21 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความหนาแน่นจากสมการความสัมพันธ์รูปแบบที่ 2 และของการทดลอง	43
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่ได้จากสมการรูปแบบที่1 กับ ความเข้มข้นและอุณหภูมิ	44
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่ได้จากสมการรูปแบบที่2 กับ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำลำไยกับความหนืด	45
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำลำไยที่สภาวะต่างๆกับความหนืด	45
4.26 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ ของความหนืดจากสมการความสัมพันธ์รูปแบบที่ 1 และจากการทดลอง	46
4.27 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ ของความหนืดจากสมการความสัมพันธ์รูปแบบที่ 2 และจากการทดลอง	47
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่ได้จากสมการรูปแบบที่ 1 กับ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ	48
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่ได้จากสมการรูปแบบที่ 2 กับ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ	49
4.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า $k$ เมื่อเวลาผ่านไป	50
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $k$ กับสภาวะเริ่มต้น คือ อัตราเร็วการป้อนและอุณหภูมิวัดจุดดิบ	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะของลำไยพันธุ์ต่าง ๆ	4
2.2 ส่วนประกอบของลำไยสดและแห้ง	5
2.3 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกลำไยในปี พ.ศ.2547	6
3.1 แผนการตลาดที่สภาวะต่าง ๆ	26
4.2 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการทำระเหยน้ำลำไยที่การตลาดต่าง ๆ	52



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์

A	พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $m^2$ )
B	ความเข้มข้นของของแข็งละลายได้ในน้ำลำไย(°Brix)
$B_0$	ความเข้มข้นน้ำลำไยเริ่มต้น (°Brix)
$C_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารละลาย = $4186.8 * ((0.8 * M) + 0.2)$ [4] (j / kg °c)
E	ค่าความแตกต่างของสี (Total different color)
f	อัตราส่วนโดยมวลของตัวถูกละลายที่สามารถละลายได้ในสารละลาย
F	อัตราการป้อนวัตถุดิบ ( $m^3/hr$ )
$\hat{h}_{w1}$	เอนทาลปีของน้ำร้อนขาเข้า (j / kg)
$\hat{h}_{w2}$	เอนทาลปีของน้ำร้อนขาออก (j / kg)
$\hat{h}_c$	เอนทาลปีของวัตถุดิบขาออก (j / kg)
$\hat{h}_F$	เอนทาลปีของวัตถุดิบขาเข้า (j / kg)
$\hat{H}_v$	เอนทาลปีของไอน้ำ (j / kg)
$i_s$	เอนทาลปีจำเพาะของไอน้ำร้อนอิ่มตัว(j/kg)
$m_c$	อัตราการไหลโดยมวลของน้ำลำไยขาออก (kg/s)
$m_F$	อัตราการไหลโดยมวลของน้ำลำไยขาเข้า(kg/s)
$m_v$	อัตราการไหลโดยมวลของไอรระเหย (kg/s)
$m_w$	อัตราการไหลโดยมวลของน้ำร้อน (kg/s)
M	อัตราส่วนโดยมวลของน้ำในสารละลายสุดท้าย = $(100-B)/100$
$\dot{Q}$	พลังงานที่ใช้ในการระเหย (J/s)
t	เวลาในการระเหย (นาที)
$T_b$	อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า (°C)
$T_c$	อุณหภูมิวัตถุดิบขาออก (°C)
$T_E$	อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก (°C)
$T_F$	อุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า (°C)
$T_s$	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องระเหย (°C)
$T_v$	อุณหภูมิของน้ำร้อน (°C)
$T_0$	อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุดิบ (°C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T_s$	อุณหภูมิของไอน้ำที่ระเหยจากสารละลาย ณ ห้องระเหย ( $^{\circ}\text{C}$ )
$u$	พลังงานภายในของสารละลาย (j / kg) $= 2.362\left\{\left(\frac{\text{Brix}}{10} \frac{100 + \text{Brix}}{900 - 8\text{Brix}}\right) + .8T_s\left[1 - \left(\frac{\text{Brix}}{100}\right)(0.6 - 0.0009T_s)\right]\right\}$ [5]
$U_1$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากแบบจำลองเชิงทฤษฎี ( $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
$U_2$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมแบบกึ่งทฤษฎี ( $\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
$X_c$	อัตราส่วนโดยมวลของน้ำลำไยขาเข้า
$X_f$	อัตราส่วนโดยมวลของน้ำลำไยขาออก
$\Delta T$	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของสารละลายขาออกกับขาเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\Delta T_m$	ค่าเฉลี่ยผลต่างของอุณหภูมิของสารละลายและน้ำร้อน ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\lambda$	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ (j / kg)
$\rho$	ความหนาแน่นของน้ำลำไย (g / ml)
$\mu$	ความหนืดของน้ำลำไย (cP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการ เหตุผล ที่มาของปัญหา

การระเหยเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่ของเหลว ในขณะที่ผิวกันของเหลวบางส่วนเกิดการเปลี่ยนสถานะไปเป็นไอทำให้ของเหลวที่เหลืออยู่มีความเข้มข้นสูงขึ้น ของเหลวในอุตสาหกรรมอาหารโดยมากจะอยู่ในรูปของสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก และมีส่วนของตัวถูกละลาย เช่น สารจำพวกน้ำตาล ดังนั้นน้ำจึงจัดเป็นตัวทำละลายในอาหารเหลว และจะถูกกำจัดออกไปด้วยวิธีการระเหย เพื่อให้ได้อาหารเหลวหรือสารละลายที่เข้มข้นขึ้น เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มไหลลงมีการใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งมีข้อดีคือ มีระยะเวลาที่อาหารเหลวสัมผัสกับพื้นผิวร้อนเป็นเวลาสั้น ๆ ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ความดันลดในระบบมีค่าต่ำ การสะสมของอาหารเหลวในระบบไม่มาก และเป็นประโยชน์ต่ออาหารที่ไวต่อความร้อน[1]

ลำไยเป็นผลไม้ที่มีชื่อเสียงของประเทศไทยชนิดหนึ่งที่มีความนิยมบริโภคทั้งภายในประเทศและเป็นสินค้าส่งออก การบริโภคลำไย นอกจากการบริโภคลำไยสดแล้ว ยังสามารถนำไปแปรรูปเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มมูลค่าได้อีก เช่น ลำไยอบแห้ง น้ำลำไยหรือน้ำลำไยอัดลม เป็นต้น จากข้อมูลทางสถิติพบว่า ในปี พ.ศ.2547 มีปริมาณการส่งออกลำไยในลักษณะลำไยสดและแช่แข็งรวม 116,188 ตัน ลำไยอบแห้ง 71,563 ตัน และลำไยบรรจุภาชนะอัดลม 11,320 ตัน รวมทั้ง 3 รายการคิดเป็นมูลค่าทั้งสิ้น 58,658.23 ล้านบาท จากจำนวนผลผลิตลำไยสดประมาณ 1.1 ล้านตันต่อปี [2] จึงนับได้ว่าลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจสำคัญของไทย

พันธุ์ลำไยที่นิยมปลูกและมีความสำคัญในเชิงการค้า คือ พันธุ์อีดอ เหตุผลที่ได้รับความนิยมเนื่องจาก การดูแลรักษาง่าย ทนทานต่อโรค ให้ผลผลิตสม่ำเสมอ เนื้อหนา และกรอบ มีรสหวานและกลิ่นหอม เมล็ดเล็ก จึงเป็นที่ต้องการของตลาด ลำไยนี้มีช่วงเวลาในการเก็บเกี่ยวออกสู่ตลาดมากในช่วงเดือน มิถุนายน-สิงหาคม ทำให้เกิดปัญหาลำไยล้นตลาด ซึ่งมีผลทำให้ราคาของลำไยตกต่ำลง โดยราคาเฉลี่ยลำไยคละที่เกษตรกรขายได้ในเดือนมกราคมถึงเมษายน 2547 กิโลกรัมละ 22.18 บาท และราคาเฉลี่ยในช่วงเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคมซึ่งเป็นช่วงที่มีผลผลิตออกสู่ตลาดมาก จะอยู่ที่ 16.94 - 17.17 บาทต่อกิโลกรัม [2] เมื่อผลผลิตลำไยล้นตลาด เกิดปัญหาการระบายลำไยไม่ทันทำให้ผลผลิตเน่าเสีย การแปรรูปโดยการนำลำไยมาผลิตเป็นเครื่องดื่มเข้มข้นนับเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าไปสู่การแก้ปัญหาดังกล่าว และยังเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตลำไย แต่อย่างไรก็ตามพบว่า การศึกษาการผลิตน้ำลำไยเข้มข้นด้วยเครื่องระเหยยังมิได้มีการศึกษากันมากนัก ความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในระหว่างการระเหยเป็นสิ่งสำคัญ โดยเฉพาะปัจจัยที่เกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพวัตถุดิบ และสภาวะการผลิต ดังเช่น อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำผลไม้ อัตราการป้อนเข้าเครื่องระเหย ความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิของแหล่งความร้อน เป็นต้น ดังนั้นในโครงการนี้จึงมุ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตน้ำลำไยเข้มข้น เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานและเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการแปรรูปลำไยในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและมวลสารในการระเหยด้วยเครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะเริ่มต้น ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำลำไย ความเข้มข้น และ อัตราการป้อนวัตถุดิบ ต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และประสิทธิภาพเชิงความร้อน
3. ศึกษาคุณสมบัติของน้ำลำไยที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่าง ๆ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. น้ำลำไยเตรียมมาจากลำไยอบแห้งพันธุ์อีดอ
2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำลำไยที่ใช้ 30 และ 45 องศาเซลเซียส
3. อัตราการป้อนน้ำลำไยเข้าเครื่องระเหยอยู่ในช่วง  $5 \times 10^{-5}$  -  $7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{sec}$
4. ความเข้มข้นของน้ำลำไยที่ศึกษาอยู่ในช่วง 12 - 63 บริกซ์
5. อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า มีค่าอยู่ในช่วง  $80 \pm 15$  องศาเซลเซียส
6. เครื่องระเหยที่ใช้เป็นเครื่องแบบ ฟิล์มไหลลง (Falling film evaporator)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลกระทบของความเข้มข้น อัตราการป้อน อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า และอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำลำไย ต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง
2. ทราบความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นและความหนืดของน้ำลำไยที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่าง ๆ
3. เป็นการส่งเสริมการแปรรูปผลผลิตลำไยให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้นเพื่อการส่งออก
4. ทราบความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นและการเปลี่ยนแปลงของสีน้ำลำไยเมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับลำไย

##### 2.1.1 พันธุ์ลำไย [3]

พันธุ์ลำไยที่นิยมปลูกเป็นการค้าในประเทศไทยมี 4 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อีตอ พันธุ์สีชมพู พันธุ์แก้ว และพันธุ์เบ็ญจเขียว ซึ่งส่วนใหญ่ (ร้อยละ 66) เป็นพันธุ์อีตอ รองลงได้แก่พันธุ์สีชมพู (ร้อยละ 10) พันธุ์แก้ว (ร้อยละ 8) พันธุ์เบ็ญจเขียว (ร้อยละ 7) ที่เหลือเป็นลำไยพันธุ์อื่น ๆ (ร้อยละ 9) ซึ่งพื้นที่ปลูกส่วนใหญ่จะอยู่ทางภาคเหนือ ในจังหวัดเชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง เชียงราย แพร่ และน่าน ซึ่งพันธุ์ลำไยที่เป็นพันธุ์คุณภาพดี เกษตรกรนิยม และตลาดต้องการจะมีลักษณะดังนี้

- ต้นพันธุ์ควรมีประวัติการติดผลลกดติดต่อกันอย่างน้อย 3 ปี
- มีเปอร์เซ็นต์ผลใหญ่จำนวนมาก มีคุณภาพดี เนื้อหนา เมล็ดเล็ก สีผิวเหลืองนวล
- เหมาะสำหรับบริโภคสด และทำลำไยอบแห้ง

พันธุ์ลำไยที่นิยมปลูกและมีความสำคัญในเชิงการค้า คือ พันธุ์อีตอ ซึ่งผลผลิตลำไยไทยส่วนใหญ่จะมาจากพันธุ์อีตอ เหตุผลที่ได้รับความนิยมเนื่องจาก การดูแลรักษาง่าย ทนทานต่อโรค ให้ผลผลิตสม่ำเสมอ ผลผลิตที่ได้รับมีคุณภาพดี กล่าวคือ เนื้อหนาและกรอบ มีรสหวาน กลิ่นหอม เมล็ดเล็ก จึงเป็นที่ต้องการของตลาด โดยเฉพาะตลาดต่างประเทศ และโรงงานลำไยกระป๋อง จึงคาดว่าในอนาคตจะมีการเพาะปลูกลำไยพันธุ์อีตอมากขึ้น ลำดับรองลงมามีการเพาะปลูกพันธุ์สีชมพู เบ็ญจเขียว ในอดีตพันธุ์เหล่านี้นิยมปลูกกันมากพอสมควร แต่ปัจจุบันได้ลดความสำคัญลง เนื่องจากให้ผลผลิตไม่สม่ำเสมอและตลาดให้ความนิยมน้อย [3]

ตารางที่ 2.1 ลักษณะของลำไยพันธุ์ต่าง ๆ

พันธุ์	ขนาดผล (ซม.) (กว้าง×ยาว×สูง)	ปริมาณน้ำตาล	ลักษณะผล
1. ลำไยพื้นเมือง หรือลำไยกระดุก	1.8×1.6×1.7	19%	ผิวผลสีน้ำตาล เปลือกหนา เนื้อบางสี ขาวใส
2. ลำไยกะโหลก			
- พันธุ์คอหรือ อีคอ	2.7×2.4×2.5	20%	ผิวสีน้ำตาล มีกระหรือตาห่าง สีน้ำตาล เข้มเนื้อค่อนข้างเหนียว สีขาวขุ่น เมล็ด ขนาดใหญ่ปานกลาง รูปร่างแบน เล็กน้อย
- พันธุ์ชมพูหรือ สีชมพู	2.9×2.6×2.7	21-22%	ผิวสีน้ำตาลอมแดง ผิวเรียบ ยิ่งผลแก่จัด สี ของเนื้อยิ่งเข้ม เนื้ออ่อน รสหวาน กลิ่นหอม เนื้อหนาปานกลางสีชมพูระ เรื่อ
- พันธุ์แก้วหรือ อีแก้ว	2.8×2.6×2.6	20-21%	ผิวสีน้ำตาล มีกระสีคล้ำตลอดผล เมื่อจับ จะรู้สึกสากมือ เปลือกหนามาก เนื้อหนา และเนื้อแน่น แข็งและกรอบ สีขาวขุ่น รสหวาน แหลม กลิ่นหอม มีน้ำปาน กลาง
- พันธุ์เขียวเขียว หรืออีเขียวเขียว	3×2.6×2.8	22%	ผิวสีเขียวอมน้ำตาล ผิวเรียบ เปลือกหนา และเหนียว เนื้อหนา แข็งกรอบ ล่อน ง่าย สีขาวมีน้ำน้อย รสหวานแหลม กลิ่น หอม
- พันธุ์ใบคำหรือ อีคำหรือกะโหลก คำ	2.8×2.3×2.3	20%	ผิวสีน้ำตาลคล้ำ ขรุขระ เปลือกหนา และ เหนียวทนทานต่อการขนส่ง เนื้อหนา ปานกลาง สีขาวครีม รสหวาน
- พันธุ์แดงหรืออี แดงกลม	2.6×2.5×2.5	17%	ผิวสีน้ำตาลอมแดงและเรียบ เปลือกบาง เนื้อหนาค่อนข้างปานกลาง สีขาวครีม เนื้อเหนียว มีน้ำมากจึงมักฉะ
- พันธุ์เพชร สาคร	2.7×2.6×2.5	18-20%	ผลกลม เปลือกบาง เนื้อมีสีขาว ฉ่ำน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 คุณค่าทางอาหารของลำไย

กองวิทยาศาสตร์ กรมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ได้ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของลำไยดังแสดงในตารางที่ 2.2 [4]

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบของลำไยสดและแห้ง

ส่วนประกอบ	ลำไยสด	ลำไยแห้ง
น้ำ	81.1%	21.27%
คาร์โบไฮเดรต	16.98%	69.06%
โปรตีน	0.97%	-
เถ้า	0.56%	3.33%
กาก	0.28%	1.5%
ไขมัน	0.11%	0.171%
ค่าความร้อน*	72.8 แคลอรี	296.1 แคลอรี
วิตามิน*	69.2 มิลลิกรัม	-
แคลเซียม*	57 มิลลิกรัม	32.05 มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส*	35.17 มิลลิกรัม	150.5 มิลลิกรัม
ธาตุเหล็ก*	0.35 มิลลิกรัม	2.85 มิลลิกรัม
โซเดียม*	-	4.78 มิลลิกรัม
โพแทสเซียม*	-	1390.3 มิลลิกรัม
กรดเพนโทจีนิก*	-	0.72 มิลลิกรัม
วิตามินบี 12*	-	1.08 มิลลิกรัม

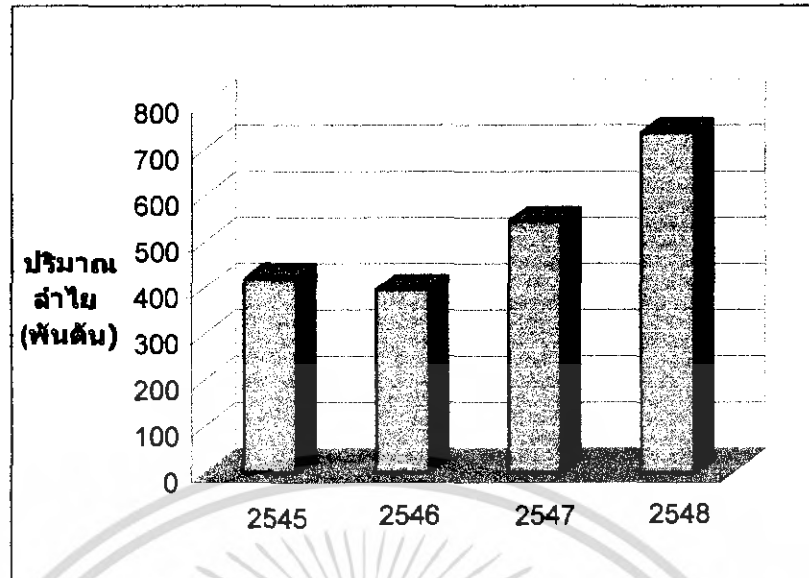
\* หมายถึง คิดจากลำไย 100 กรัม

### 2.1.3 สถานการณ์ผลผลิตลำไย

สถานการณ์การผลิตลำไยคาดว่าจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกษตรกรได้มีการขยายพื้นที่ปลูกใหม่อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาทั้งในแหล่งผลิตทางภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง ทั้งนี้เพราะผลผลิตลำไยยังเป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศทั้งในรูปแบบผลผลิตลำไยสด และผลผลิตลำไยอบแห้งประกอบกับรัฐบาลมีมาตรการแทรกแซงราคาเพื่อพยุงไม่ให้ราคาลำไยตกต่ำ และมีการนำสารเร่งโปรดักส์เชื่อมคลอเรทมาเร่งกระตุ้นให้ลำไยออกดอก ทำให้เกษตรกรมั่นใจที่จะขยายพื้นที่ปลูก [2]

สถิติปริมาณผลผลิตลำไยแสดงในรูปที่ 2.1 และผลิตภัณฑ์ลำไยส่งออกแสดงในตารางที่

2.3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ปริมาณผลผลิตลำไยทั้งหมดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ถึงปัจจุบัน

ตารางที่ 2.3 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกลำไยในปี พ.ศ.2547

ผลิตภัณฑ์ส่งออก	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
1. ลำไยสดและแช่แข็ง	116,188	2,193.23
2. น้ำลำไยบรรจุภาชนะอัดลม	11,320	403.30
3. ลำไยอบแห้ง	71,563	1,540.99

## 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานการระเหย (Evaporation) [5]

การระเหยเป็นการกำจัดน้ำบางส่วนออกจากอาหารเหลวด้วยการต้ม โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความสามารถในการระเหยของน้ำและตัวละลาย การระเหยต่างกับวิธีทำให้ชื้นวิธีอื่น ๆ อาศัยความแตกต่างด้านอัตราการแพร่ที่อุณหภูมิต่างกัน เช่น การทำให้ชื้นโดยใช้เมมเบรน หรือการทำให้ชื้นด้วยการแช่เยือกแข็งซึ่งอาศัยความแตกต่างเรื่องจุดเยือกแข็ง อาหารที่ผ่านการทำให้ชื้นแล้ว มักจะต้องผ่านกระบวนการอื่นอีกก่อนจะนำไปจำหน่าย

### 2.2.1 ทฤษฎี

การถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางให้ความร้อนไปยังอาหาร ความร้อนที่ถ่ายเทถูกนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของอาหารจนถึงจุดเดือด ปริมาณความร้อนส่วนนี้เรียกว่าปริมาณความร้อน

สัมผัส และใช้ในการระเหยน้ำออกจากอาหารเหลว ซึ่งเป็นปริมาณความร้อนแฝงของการระเหย ในระหว่างการระเหยอุณหภูมิของอาหารเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือด ทำให้ความดันไอของอาหารเหลวจะสูงขึ้น เกิดการระเหยเป็น ไอ น้ำ และถูกกำจัดออกไปจากผิวหน้าของอาหารเหลว

การระเหยแตกต่างจากการทำแห้ง (dehydration) เนื่องจากผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการระเหย จะอยู่ในสภาพของเหลวนอกจากนี้ยังแตกต่างจากการกลั่น (distillation) เนื่องจากไอที่ได้จากเครื่องระเหยจะไม่ถูกแยกออกเป็นส่วนๆ เหมือนการกลั่น

อาหารเหลวเข้มข้นจึงได้จากการระเหยน้ำอิสระ (free water) ที่อยู่โดยการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงจุดเดือด (bubble point) แล้วคงไว้ ณ อุณหภูมิดังกล่าวในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ ในกรณีที่อาหารไม่ทนต่อความร้อน (heat sensitivity) การระเหยควรกระทำภายใต้ความดันสุญญากาศ การใช้สภาวะสุญญากาศจะทำให้อาหารเหลวสามารถระเหยที่อุณหภูมิต่ำ จึงลดความเสียหายเนื่องจากความร้อนได้

## 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อจุดเดือดของของเหลว

แรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทความร้อนในตัวแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยคือ ความแตกต่างของอุณหภูมিরะหว่างตัวกลางให้ความร้อน และอุณหภูมิของอาหารเหลว อุณหภูมิจุดเดือดของอาหารเหลวนี จะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญดังต่อไปนี้

### 1. ความดันภายนอก

ของเหลวจะเดือดต่อเมื่อความดันไอของของเหลวเท่ากับความดันภายนอกที่กระทำต่อของเหลวในกรณีที่ตัวทำละลายเป็นน้ำ

### 2. ปริมาณตัวถูกละลาย

จุดเดือดของสารละลายจะสูงกว่า จุดเดือดของน้ำบริสุทธิ์ที่ความดันเดียวกัน ยิ่งสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จุดเดือดก็จะสูงขึ้น ขณะที่เกิดการระเหย ความเข้มข้นของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเป็นผลให้จุดเดือดสูงขึ้นตามลำดับ ความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางให้ความร้อนและของเหลวลดลงจึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างมากด้วย

### 3. ไฮโดรสแตติก-เฮด

ที่ระดับใด ๆ ที่ต่ำกว่าผิวอิสระ (free surface) ความดันของของเหลว ณ ระดับนั้นจะเท่ากับผลรวมของความดันบนผิวนั้นกับความดันที่เกิดจากอาหารเหลวซึ่งเทียบเท่ากับไฮโดรสแตติกเฮด (ระยะแนวตั้งจากผิวอิสระจนถึงระดับที่พิจารณา) ดังนั้น อุณหภูมิจุดเดือดของของเหลว ในเครื่องระเหยจะเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกของชั้นของเหลวเพิ่มขึ้น และมีผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิตัวกลางให้ความร้อนและของเหลวเดือดลดลง ซึ่งอาจนำไปสู่การให้ความร้อนแก่ของเหลวมากเกินไป (over heat)

จนของเหลวร้อนยิ่งยวด (super-heat) ซึ่งการให้ความร้อนมากไปจะทำให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ ผลของไฮโดรสเตติก-เฮดจะเด่นชัดมากขึ้นในเครื่องระเหยสูญญากาศ

### 2.2.3 คุณสมบัติของของเหลวที่มีผลต่อการระเหย

การเลือกชนิดของเครื่องระเหยจะขึ้นกับคุณสมบัติของของเหลว ซึ่งได้แก่

#### 1. ความหนืด (viscosity)

เมื่ออาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้น อัตราการหมุนเวียนจะลดลง และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงด้วย โดยทั่วไป ความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการระเหย ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อการระเหยดำเนินต่อไป

#### 2. ตะกรัน (fouling-scaling)

ตะกรันเป็นปัญหาสำคัญของการระเหยน้ำออกจากอาหาร โดยเฉพาะพวกโปรตีนและน้ำตาล (polysaccharides) ที่มีอยู่ในอาหารสามารถเกาะติดค้างอยู่ที่ผิว ซึ่งยากต่อการกำจัดออกไปและมีผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องตะกรันจะเกิดขึ้นน้อยลง เมื่อกระแสน้ำของอาหารไหลด้วยความเร็วสูง

#### 3. การเกิดฟอง (foaming)

การเกิดฟองระหว่างการต้มมักจะพบในของเหลวหลายชนิด โดยเฉพาะในกรณีการต้มเกิดขึ้นภายใต้ ความดันที่ลดลงและไฮโดรสเตติก-เฮด การเกิดฟองเชื่อว่าเกี่ยวข้องกับแรงระหว่างผิว ที่เกิดขึ้นระหว่างไอของของเหลวร้อนยิ่งยวดและของแข็งที่แขวนลอยอยู่ โดยที่ของแข็งจะเป็นนิวคลีไอของการเกิดฟอง การใช้สารป้องกันการเกิดฟอง อาจช่วยป้องกันการเกิดฟองแต่จำเป็นต้องพิจารณาว่าเป็นสารเจือปนที่ยอมรับให้ใช้ได้หรือไม่

#### 4. การกัดกร่อน (corrosion)

อาหารบางอย่างเช่น น้ำผลไม้ มักจะมีองค์ประกอบที่สามารถกัดกร่อนผิวที่แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นอันตรายต่อเครื่องมือ และยังก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะในอาหารได้ ดังนั้นเครื่องระเหยมักใช้เหล็กปลอดสนิมเป็นโครงสร้าง และทำให้เข้มข้นขึ้นโดยเครื่องระเหยแบบบังคับหมุนเวียน ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (U) ที่สูงกว่า และใช้พื้นที่ผิวลดลงด้วย

#### 5. ความไวต่ออุณหภูมิ (temperature sensitivity)

เพื่อลดการเสื่อมเสียอาหารที่ไม่ทนต่อความร้อนระหว่างการระเหย อุณหภูมิจุดเดือดของอาหารควรมีค่าต่ำและใช้เวลาอยู่ในเครื่องในช่วงให้ความร้อนสั้น อุณหภูมิจุดเดือดจะลดต่ำลงได้โดยการลดความดันของเครื่องระเหย ความแตกต่างของอุณหภูมิอาหารและไอน้ำที่ต้องการสามารถกระทำได้เมื่อใช้อุณหภูมิไอน้ำต่ำลง

#### 6. การสูญเสียกลิ่น (aroma loss)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบของกลั่นรส ในอาหารเหลวหลายชนิดเช่น น้ำผลไม้ นั้นสามารถระเหยเป็นไอ ได้มากกว่าน้ำ เมื่อของเหลวนั้นถูกทำให้เข้มข้นขึ้น องค์ประกอบเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไปพร้อมกับไอน้ำ ที่ได้จากการระเหยทำให้คุณภาพของอาหารเข้มข้นนั้นเสื่อมเสียลง องค์ประกอบของสารระเหยง่ายนี้สามารถเก็บกัก จากไอที่ไว้เป็นหัวเชื้อ โดยการกลั่นลำดับส่วนแล้วผสมกลับเข้าไปในอาหารเหลวเข้มข้นภายหลัง

#### 2.2.4 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องระเหย[7]



รูปที่ 2.2 เครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง [6]

##### 1. The Vapor Chamber (ชุดระเหย)

เป็นส่วนที่ใหญ่ที่สุดของระบบใช้แยกไอน้ำออกจากส่วนของเหลว และป้องกันส่วนของแข็ง ที่อาจปะปนกับ ไอรระเหยที่หลุดออกไป อุณหภูมิของไอน้ำที่ระเหยจะเท่ากับอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ความดันสมบูรณ์ภายในชุดระเหย ถ้าหากสารละลายเจือจางมาก อุณหภูมิของไอน้ำของเหลวจะใกล้เคียงกันหรือเท่ากันแต่ถ้าของเหลวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อุณหภูมิจุดเดือดของของเหลวจะสูงขึ้น ทำให้ไอน้ำระเหยออกไปเป็นไอน้ำยิ่งยวด (superheat steam) มีอุณหภูมิที่จุดเดือดของของเหลวเข้มข้นขึ้น

##### 2. Condenser (ชุดควบแน่น)

ส่วนใหญ่มิ 2 แบบ

1) เป็นแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchange) โดยทั่วไปมีสารหล่อเย็น (refrigerant) หรือน้ำเย็นมาสัมผัสหรือแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอระเหย

2) ใช้น้ำหล่อเย็น (cooling water) ผสมกับน้ำควบแน่น (condensate) ใน ชุดควบแน่น (barometric condenser) ไอระเหยจะถูกปล่อยเข้าไปสัมผัสกับน้ำเย็นที่สเปรย์ลงมาในบารโรเมตริกเลก (barometric leg) ความดันของน้ำในบารโรเมตริกเลก (barometric leg) ต้องสมดุลเพื่อที่จะทำให้เกิดสภาพสุญญากาศและหนีระบบกับบรรยากาศ โดยทั่วไปน้ำที่ผสมกับน้ำควบแน่น (condensate) จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าไอที่อยู่ในชุดระเหย (vapor chamber) ประมาณ 5 องศาฟาเรนไฮด์ เพื่อที่จะทำให้ไอระเหยไหลเข้าสู่ชุดควบแน่นได้อย่างต่อเนื่อง

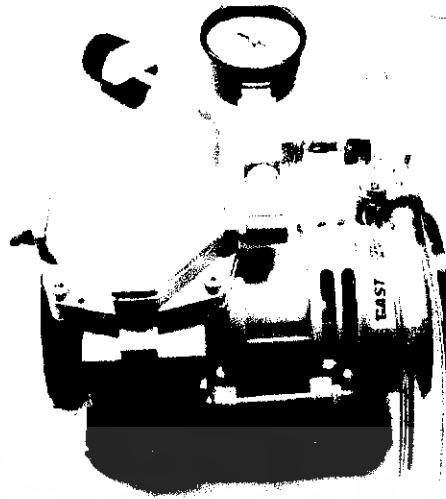
### 3. Heat Exchanger (ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน)

มีหลายลักษณะ ต้องคำนึงอัตราการให้ความร้อน การเกิดตะกรัน ความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ การทำความสะอาด และอัตราการกวน

รูปที่ 2.3 ตั้งแลกเปลี่ยนความร้อน [8]

### 4. Vacuum Pump (ปั๊มสุญญากาศ)

มีส่วนสำคัญคือ การลดความดันให้สภาวะภายใน ชุดระเหย เป็นสุญญากาศมากที่สุด เพื่อที่จะให้ จุดเดือดของอาหารเหล่านั้น มีจุดเดือดที่ต่ำ ซึ่งจะทำให้ คุณค่าทางอาหาร รสชาติ กลิ่นดี เปลี่ยนไปน้อย และพลังงานที่ใช้ในการระเหยก็ลดลง



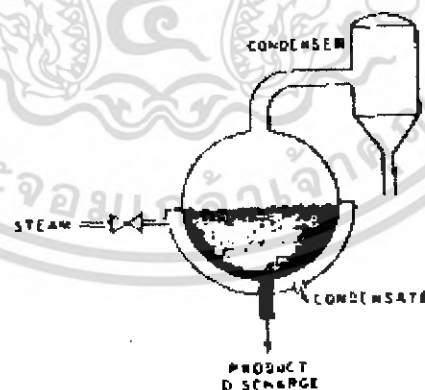
รูปที่ 2.4 ฝั่มสุญญากาศ [9]

## 2.2.5 ชนิดของเครื่องระเหย

### 1. เครื่องระเหยแบบหม้อชนิดเป็นครั้ง (batch-type pan evaporator)

เป็นเครื่องระเหยแบบที่เก่าที่สุดและง่ายที่สุด ผลิตภัณฑ์จะร้อนภายในหม้อทรงกลม (steam-jacketed) หม้อคัมนี้อาจจะทำงานในสภาพความดันบรรยากาศหรือสุญญากาศ สภาวะสุญญากาศนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์เดือดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือดที่ความดันบรรยากาศ ทำให้ลดความเสี่ยงอันเนื่องมาจากความร้อนที่ให้แก่ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ทนความร้อน

เนื่องจากผิวของการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ในหม้อระเหยนี้มีค่าน้อย ดังนั้นเวลา ที่ผลิตภัณฑ์จะต้องอยู่ในหม้อคัม เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการจึงใช้เวลานาน อาจใช้เวลาอยู่หลาย ชั่วโมง



รูปที่ 2.5 เครื่องระเหยแบบหม้อชนิดเป็นครั้ง

### 2. เครื่องระเหยแบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ (natural circulation evaporator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องระเหยแบบนี้จะมีท่อสั้นในแนวดิ่ง ความยาว 1-2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 มิลลิเมตร จัดเรียงกันอยู่ในสตีมเชสต์ (steam chest) ทั้งท่อและสตีมเชสต์ รวมเรียกว่าคาลานเดรีย (calandria)

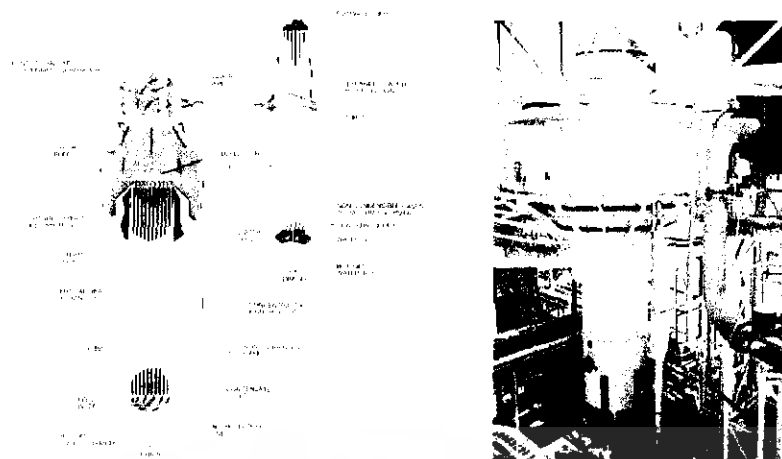
ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความร้อน จะขึ้นสูงผ่านคาลานเดรีย ด้วยการหมุนเวียนแบบธรรมชาติ ขณะที่ไอน้ำจะควบแน่นภายนอกท่อ การระเหยจะเกิดขึ้นภายในท่อและผลิตภัณฑ์จะเข้มข้น ของเหลวเข้มข้นจะตกกลับไปสู่ส่วนล่างของภาชนะโดยผ่านส่วนวงแหวนตรงกลาง (central annular) โดยที่อาหารเหลวอาจถูกอุ่นโดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ภายนอก



รูปที่ 2.6 เครื่องระเหยแบบการหมุนเวียนตามธรรมชาติ [10]

### 3. เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มไหลขึ้น (rising film evaporator)

เครื่องทำระเหยแบบนี้จะใช้กับอาหารที่มีความหนืดต่ำ เพื่อให้เดือดภายในท่อแนวดิ่ง ยาว 10-15 เมตร ท่อจะถูกทำให้ร้อนจากภายนอกด้วยไอน้ำ ของเหลวจะขึ้นสูงภายในท่อ โดยไอที่เกิดขึ้นใกล้ด้านล่างของท่อให้ความร้อน การเคลื่อนที่ขึ้นของไอสู่ด้านบนทำให้ฟิล์มของเหลวเคลื่อนสู่ด้านบนอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างผลิตภัณฑ์และสารให้ความร้อนอย่างน้อยประมาณ 14 องศาเซลเซียส จึงจะพอเพียงพอต่อการเกิดฟิล์มดังกล่าว



รูปที่ 2.7 เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มไหลลง [11] [12]

#### 4. เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง (falling film evaporator)

ตรงกันข้ามกับเครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้น เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง จะมีฟิล์มบาง ๆ เคลื่อนที่ลงภายใต้แรงดึงดูดของโลกในท่อแนวตั้ง

การออกแบบเครื่องระเหยนี้ค่อนข้างจะซับซ้อน เนื่องจากการกระจายตัว (distribution) ของของเหลวในลักษณะที่เป็นฟิล์มเคลื่อนที่ลงอย่างสม่ำเสมอในท่อนั้น เกิดค่อนข้างยากกว่า ระบบการไหลขึ้น ของเครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้น ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวกระจาย (distributors) หรือหัวพ่น (spray nozzle) ช่วย เครื่องระเหยแบบนี้สามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง และใช้กับอาหารที่ไม่สามารถทนกับความร้อนสูงได้ (highly heat sensitive) เช่น น้ำผลไม้ สำหรับเวลา จะใช้เวลาเพียง 20-30 วินาที



รูปที่ 2.8 เครื่องทำระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง [11] [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5. เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง (rising / falling film evaporator)

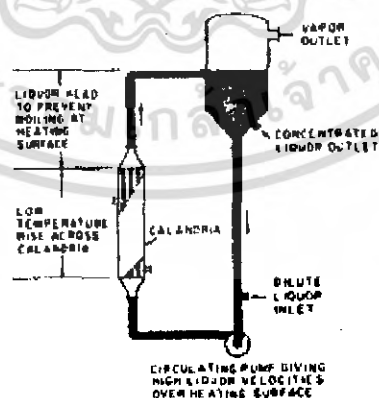
ในเครื่องระเหยแบบนี้ ผลิตภัณฑ์จะถูกทำให้เข้มข้นโดยการหมุนเวียนผ่านส่วนที่เป็นฟิล์มไหลขึ้น ตามด้วยส่วนที่เป็นฟิล์มที่ตกลงมาในเครื่องระเหย



รูปที่ 2.9 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง

### 6. เครื่องระเหยชนิดบังคับให้หมุนเวียน (force circulation evaporator)

เครื่องระเหยนี้ประกอบด้วย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่มีการสัมผัส (noncontact) ซึ่งผลิตภัณฑ์จะหมุนเวียนอยู่ภายในด้วยอัตราเร็วสูง นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูง ความดันไฮโดรสแตติกเซด ที่อยู่ส่วนบนของท่อป้องกันมิให้ของเหลวเดือด ซึ่งจะจำกัดการระเหยให้ความร้อนเกิดในท่อเท่านั้น ส่วนภายในเครื่องแยกความดันสมบูรณ์จะต่ำกว่าความดันในท่อ (tube bundle) เล็กน้อย ดังนั้นของเหลวที่เข้าเครื่องแยกจะเปลี่ยนเป็นไอทันที ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวให้ความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็น 3-5 องศาเซลเซียส

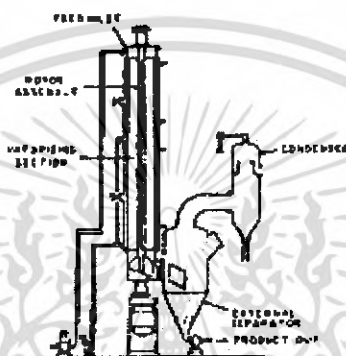


รูปที่ 2.10 เครื่องระเหยชนิดบังคับให้หมุนเวียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7. เครื่องระเหยชนิดฟิล์มบาง ๆ ที่มีการกวน (agitated thin film evaporator)

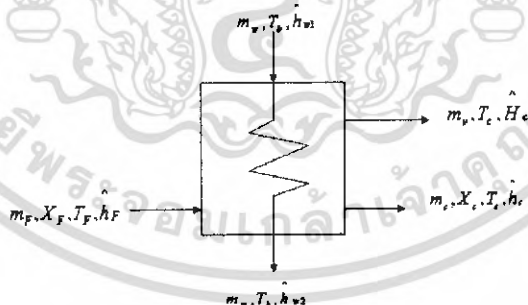
เครื่องระเหยชนิดนี้เหมาะสำหรับอาหาร ที่มีความหนืดสูง โดยอาหารเหลวที่เข้าเครื่องจะถูกเกลี่ยให้อยู่ค้ำในของผิวให้ความร้อนทรงกระบอก โดยการใช้นิดป้าย (wiper blades) เนื่องจากมีการกวนในอัตราสูง ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่มาก รูปร่างของเครื่องที่เป็นทรงกระบอก จะทำให้พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตรของผลิตภัณฑ์ต่ำไอน้ำความดันสูงจะใช้เป็นตัวให้ความร้อน



รูปที่ 2.11 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มบาง ๆ ที่มีการกวน

### 2.2.6 ทฤษฎีคำนวณ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

สมการที่เกี่ยวข้องกับการระเหย[14] มีดังนี้



รูปที่ 2.12 เครื่องระเหยแบบขั้นตอนเดียว

จาก Mass balances :

$$m_F = m_c + m_v \quad (2.1.1)$$

$$m_F X_F = m_c X_C \quad (2.1.2)$$

จาก Heat balance

- Condensation chamber :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_w \times \hat{h}_{w1} = \left( m_w \times \hat{h}_{w2} \right) + \dot{Q} \quad (2.1.3)$$

- Evaporation chamber :

$$(m_F \times \hat{h}_F) + \dot{Q} = \left( m_c \times \hat{h}_c \right) + \left( m_v \times \hat{H}_v \right) \quad (2.1.4)$$

จากสมการ 2.1.3 เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{Q} = (m_v \times \lambda_v) + \left[ (m_F \times C_p) \times (T_c - T_F) \right] \quad (2.1.5)$$

พลังงานที่เกิดในพื้นที่ถ่ายเทความร้อน

$$\dot{Q} = U_1 \times A \times \Delta T_m \quad (2.1.6)$$

## 2.3 ความหนืด [14]

การวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Rotational rheometer

ความหนืด คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงกลมากระทำ  
สัญลักษณ์ของความหนืด คือ  $\mu$  ค่าความหนืดนั้นแสดงได้ในรูปของค่าความเค้นเฉือน (shear stress,  $\tau$ ) ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง 1 หน่วยของ อัตราเฉือน (shear rate หรือ strain rate,  $\dot{\gamma}$ ) ดังแสดงในรูปสมการดังนี้

$$\tau \propto \dot{\gamma} \quad (2.1.6)$$

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (2.1.7)$$

$$\mu_s = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{m \left( \dot{\gamma} \right)^n}{\dot{\gamma}} = m \left( \dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.1.8)$$

$$\mu_s = m \left( \frac{4\pi N}{n} \right)^{n-1} \quad (2.1.9)$$

$$\mu_s = m (4\pi N)^{n-1} \left( \frac{1}{n} \right)^n \quad (2.1.10)$$

$$\log \mu_s = \log m + n \log \left( \frac{1}{n} \right) + (n-1) \log (4\pi N) \quad (2.1.11)$$

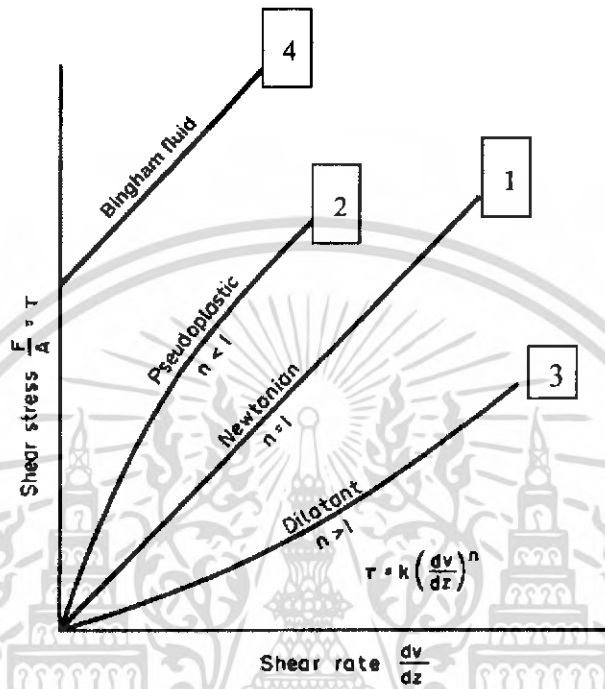
หา  $n$  โดยการพล็อตกราฟระหว่าง ค่า  $\log \mu_s$  กับค่า  $\log (4\pi N)$  ความชันที่ได้คือ  $n-1$

โดยที่  $\mu_s$  คือ ความหนืด (Pa s)

$\tau$  คือ ค่าความเค้นเฉือน ( $N/m^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $\dot{\gamma}$  คือ อัตราเฉือน ( $s^{-1}$ )
- N คือ ความเร็วรอบ (rpm)
- n คือ Flow behavior index
- m คือ Consistency index ( $Pa s^n$ )



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง shear rate กับ shear stress

ลักษณะการไหลของของไหลที่พบเห็นโดยทั่วไปมี 5 ประเภทดังนี้

1. Newtonian Fluid ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลมีค่าความหนืดเป็นค่าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงกับอัตราเฉือน (shear rate) หรือความเร็วในการกวน  
ตัวอย่าง: น้ำ น้ำเชื่อม น้ำผึ้ง น้ำผลไม้ นม น้ำมัน
2. Pseudoplastic ของไหลมีค่าความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนหรือแสดงสมบัติเป็น “shear thinning”  
ตัวอย่าง: น้ำผลไม้เข้มข้น โพลีเมอร์ไหลอม สารละลายโพลีเมอร์
3. Dilatant Fluid ของไหลมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนหรือแสดงสมบัติเป็น “shear thickening”  
ตัวอย่าง: น้ำแป้ง น้ำดินขี้้น หาดทราย
4. Bingham Plastic เมื่อมีแรงกระทำสูงพอจะเกิดการไหลแบบ Newtonian Fluid  
ตัวอย่าง: นมช็อก โกแลต ยาสีฟัน น้ำสลিপของเซรามิก

หมุนแกนเครื่องมือที่วัดค่าในตัวอย่างที่นำมาทดสอบ (Rotational rheometer) คือ ระบบการวัดค่าความคงตัวด้วยค่าของการหมุนรอบตัวของที่หมุนหรือ กระบอกหมุนในตัวอย่างนี้เป็นระบบการวัดค่าที่ใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรม ได้มีการประดิษฐ์เครื่องมือวัดค่าหลายชนิด เช่น เครื่องวัดความคงตัว Brookfield Synchrolectic-Viscosimeter ซึ่งอ่านหาออกมาได้เป็นหน่วย centipoise และเครื่องวัดค่าความคงตัว Stormer Viscosimeter ซึ่งวัดค่าระยะเวลาที่แกน เครื่องหมุนเป็นจำนวนรอบที่กำหนดในตัวอย่าง ที่นำมาวัดค่า การหมุนของแกนเครื่องวัดเกิดจากน้ำหนักถ่วงที่ตกลงไป การเพิ่มน้ำหนักจะเพิ่มอัตราเร็วของการแยกชั้น ค่าที่วัดได้จะเป็นค่า relative viscosity ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นค่าในหน่วย absolute viscosity ด้วยการคำนวณเทียบค่า

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pacheco และ Frioni [15] ได้ทำการศึกษาการระเหยสารละลายน้ำตาลซูโครส โดยใช้เครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลขึ้นและฟิล์มไหลลง (climbing / falling film evaporator) วิธีการดำเนินการเป็นแบบขั้นเดียว (single-effect) โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลายน้ำตาลซูโครสที่ 15-40 บริกซ์ ในการศึกษาได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (over-all heat transfer coefficient) ที่แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลาย และจากผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง ประมาณ 60 %

Nindo และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติด้านรีโอโลยีของน้ำบลูเบอร์รี่และน้ำราสเบอร์รี่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับกระบวนการระเหยและกระบวนการอื่น ๆ น้ำผลไม้ที่มีค่าความเข้มข้น ถึง 65 บริกซ์ อุณหภูมิระหว่าง 20-60 องศาเซลเซียส น้ำผลไม้ทั้ง 2 ชนิดจัดเป็นของไหลประเภทนิวโทเนียน (Newtonian) ในช่วงอุณหภูมิและค่าความเข้มข้น ที่ศึกษาจากการศึกษาพบว่าน้ำราสเบอร์รี่มีค่าพลังงานกระตุ้นมากกว่าน้ำบลูเบอร์รี่ เนื่องจากน้ำราสเบอร์รี่มีปริมาณซูโครสมากกว่า ดังนั้นที่ค่าความเข้มข้นและอุณหภูมิเดียวกัน น้ำราสเบอร์รี่จะมีความหนืดมากกว่าน้ำบลูเบอร์รี่

Zuritz และคณะ [17] ได้ศึกษาความหนาแน่น ความหนืด และสัมประสิทธิ์เชิงความร้อนของน้ำองุ่นที่มีความเข้มข้นที่ละลายได้และอุณหภูมิต่าง ๆ กัน

โดยใช้ น้ำองุ่นที่ได้จาก Mendoza ประเทศอาร์เจนตินา ที่เก็บระหว่าง 1999-2001 ความเข้มข้น 22.9-70.6 บริกซ์ ทำการวัดคุณสมบัติของน้ำองุ่นที่อุณหภูมิระหว่าง 20-80 องศาเซลเซียส พบว่าความหนาแน่นขึ้นกับอุณหภูมิสัมบูรณ์และความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ สัมประสิทธิ์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนงวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงความร้อนคำนวณจากพื้นฐานทางอุณหพลศาสตร์ ที่ความดันคงที่ น้ำอุ่นแสดงถึงพฤติกรรม การไหลแบบ นิวโทเนียน ในช่วงของการศึกษา ผลของความหนืดขึ้นกับอุณหภูมิซึ่งสัมพันธ์ใน รูปแบบสมการ อาซีเนียบส ค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ดีมาก ( $r^2 > 0.992$ ) ค่าของพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ที่ได้ในช่วง 16.3-52.0 กิโลจูลต่อโมล

Juszczak และ Fortuna [18] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหนืดของน้ำสตรอเบอร์รี่เข้มข้น ประกอบด้วยอุณหภูมิและความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ น้ำสตรอเบอร์รี่ที่เข้มข้นศึกษาในช่วง อุณหภูมิระหว่าง 10-60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นที่ 50-67.1 บริกซ์ โดยใช้การวัดด้วยโร ตาชั่นแนล รีโอมิตเตอร์ (Rotational rheometer) กับ โคเซียล ไชลินเดอร์ (coaxial cylinders) พบว่าน้ำสตรอเบอร์รี่เข้มข้นมีพฤติกรรมแบบนิวโทเนียน ค่าของความหนืดขึ้นกับอุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ ความหนืดอยู่ในช่วง 8.6-541.2 มิลลิปาสกาลวินาที (mPa\*s) ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำสตรอเบอร์รี่ สามารถอธิบายโดยใช้สมการอาซีเนียบส ส่วนผล ของความเข้มข้นต่อความหนืด สามารถใช้กฎของกำลัง และสมการเอกโปเนนเชียล อธิบาย อย่างไรก็ตามสมการเอกโปเนนเชียลสามารถอธิบายได้ดีกว่า

ณัฐรากร เศรษฐวิวัฒน์ และคณะ[19] ได้ศึกษาความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ สับปะรดและน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

โดยทำการศึกษาคูณสมบัติดังกล่าวของน้ำสับปะรดในช่วงความเข้มข้น 10 - 60.8 องศา บริกซ์ และ น้ำเสาวรสในช่วงความเข้มข้น 7 - 13.8 องศาบริกซ์ ภายในช่วงอุณหภูมิ 5 - 72 องศา เซลเซียส ในการศึกษาคุณสมบัติความหนืดของน้ำผลไม้ทั้ง 2 ชนิด พบว่าน้ำสับปะรดเป็นของไหล ประเภท Newtonian แต่ น้ำเสาวรสเป็นของไหลประเภท Non-Newtonian และได้มีการหาสมการ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด, ความเข้มข้นกับอุณหภูมิของน้ำสับปะรดในรูปสมการ คณิตศาสตร์ โดยศึกษาจากสมการของ Arrhenius โดยสมการความหนาแน่นของน้ำสับปะรดคือ

$$\rho = 1030.7912 - 0.4643T + 2.8199C + 0.0284C^2, R^2 = 0.9971$$

และสมการความหนาแน่นของน้ำเสาวรสคือ

$$\rho = 1040.2378 - 0.4606T - 2.1939C + 0.2962C^2, R^2 = 0.9855$$

สมการความหนืดของน้ำสับปะรด คือ

$$\eta = 0.7981 \exp(6.8942T - 0.0293C + 0.00187C^2)$$

ดัชนียกกำลังของน้ำเสาวรสคือ  $n = -0.1352 + 0.0473C + 0.0083T - 0.00002T^2$

ดัชนีความหนืดของน้ำเสาวรสคือ  $k = 2.5437 + 0.0019T - 0.6870C + 0.0485C^2$

Patricia Moreira Azoubel และคณะ[20] ได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นที่มีต่อ คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมะม่วงหิมพาน โดยการทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 °C และความ เข้มข้นของสารละลายที่ใช้ 5.5 - 25 °Brix. จากผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติเชิงความร้อนลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นในขณะที่ความหนาแน่นและความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อความ เหนืดนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น      ในการศึกษาได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความหนาแน่น คือ

$$\rho = 0.99562 + 0.00412C \quad , R^2=0.996$$

Steven และคณะ[21]ได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติของการไหลของของไหลในท่อของเครื่องระเหยสารละลายน้ำตาลที่ขึ้นกับความเข้มข้น โดยใช้สมการของความหนืดและความหนาแน่นของน้ำตาล คือ

$$\rho = 1005.3 - 0.22556 \times T - 2.4304 \times 10^{-3} T^2 + 3.7329 \times B + 0.01781937 \times B^2$$

$$\mu = 4.3 \times 10^{-4} \exp[3.357(B - 0.3155(T - 50)) / 116.8 - (B - 0.3155(T - 50))]$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วัตถุดิบ อุปกรณ์ และวิธีการ

#### 3.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์

##### วัตถุดิบ

- ลำไยอบแห้ง พันธุ์อ็อคอ

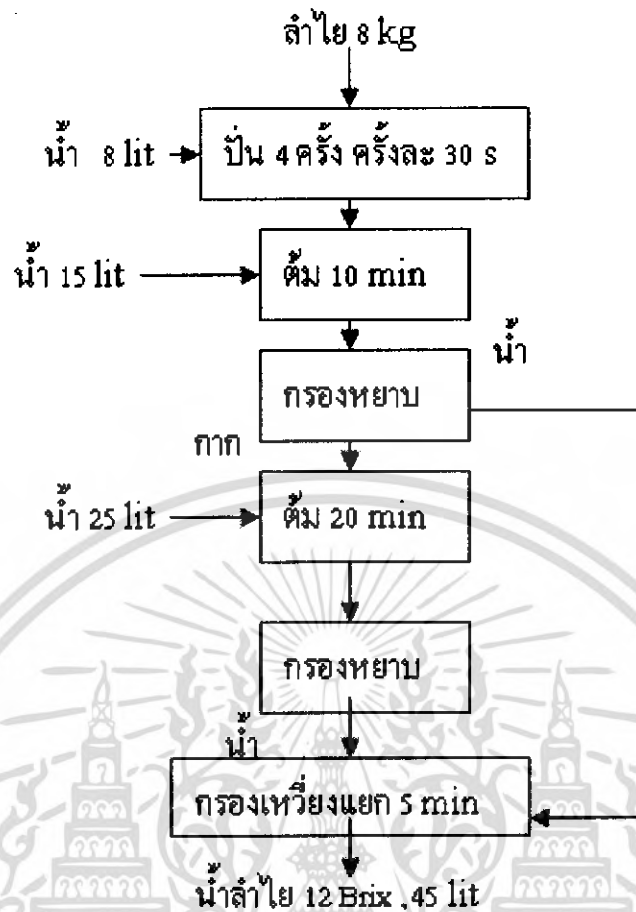
##### อุปกรณ์

1. เครื่องระเหยแบบ Falling Film Evaporator
2. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
3. รีแฟลกโตมิเตอร์ (Refractometer)
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ถังบรรจุอาหารเหลว 4 ใบ
7. กระบอกตวงขนาด 1000 ml
8. หม้อต้มน้ำลำไยจำนวน 4 ใบ
9. เครื่องวัดความหนืด Brookfield
10. Pycnometer 1 ใบ

#### 3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

1. เตรียมลำไยอบแห้งไว้ 8 กิโลกรัม และน้ำสะอาด 48 ลิตร
2. นำลำไยอบแห้งที่เตรียมไว้มาปั่นพร้อมทั้งใส่น้ำ 8 ลิตร จะปั่น 4 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที
3. นำลำไยละเอียดทั้งหมดที่ได้มาต้มพร้อมทั้งใส่น้ำบริสุทธิ์ 15 ลิตร ต้มนาน 10 นาที
4. นำไปกรองหยาบด้วยกระบวยกรอง
5. นำส่วนกากที่ได้จากข้อ 4 มาต้มอีกรอบนาน 20 นาที พร้อมทั้งใส่น้ำอีก 25 ลิตร
6. นำไปกรองหยาบด้วยกระบวยกรองอีกครั้งหนึ่ง
7. นำส่วนน้ำที่ได้จากการกรองทั้งข้อ 4 และข้อ 6 มา กรองละเอียดด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก โดยจะเหวี่ยงนาน 5 นาที
8. ได้น้ำลำไย 12 บริกซ์ ปริมาณ 45 ลิตร ( คังรูปที่ 3.1 )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

### 3.3 การเตรียมอุปกรณ์

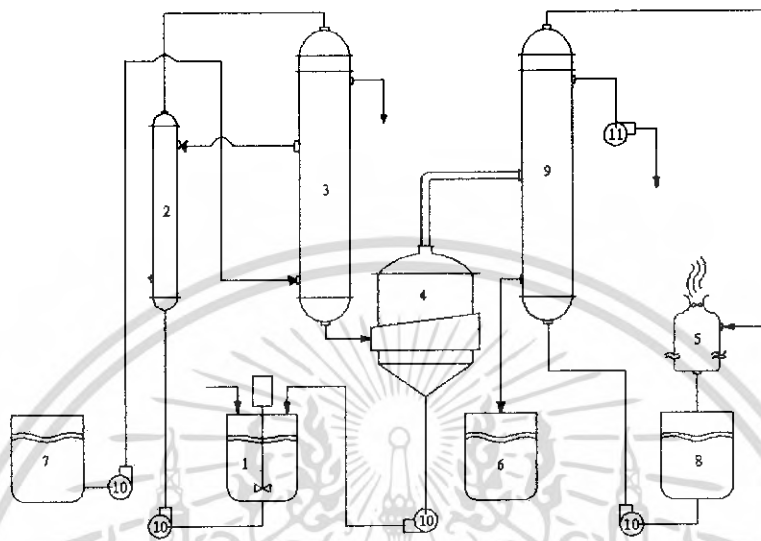
เครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลงแสดงในรูปที่ 3.2

1. เปิดสวิทช์ปั้มน้ำเย็น เพื่อให้ชุดทำน้ำเย็นทำงาน จนได้อุณหภูมิน้ำเย็นที่ต้องการ ชุดทำน้ำเย็นจะตัดและเดินเครื่องอัตโนมัติ
2. เปิดแก๊ส จุดเตาแก๊สสำหรับต้มน้ำร้อน ให้น้ำร้อนในถังต้มน้ำร้อน ได้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
3. เปิดสวิทช์ปั้มน้ำร้อนบนแผงควบคุม เพื่อให้น้ำร้อนเข้าระบบ และกลับเข้าถังต้มน้ำร้อน จนอุณหภูมิของถังแลกเปลี่ยนความร้อน ได้อุณหภูมิที่ต้องการ
4. ใส่วัตถุดิบลงในถังป้อนวัตถุดิบ เปิดสวิทช์ปั้มน้ำร้อน ปรึบวาล์วเพื่อระดับอัตราการไหลที่ชุดเกจวัดอัตราการไหลของวัตถุดิบ (Flow meter)
5. เปิดสวิทช์ปั้มน้ำแยกไอน้ำและเปิดวาล์วบนถังป้อนวัตถุดิบเพื่อให้วัตถุดิบไหลวนกลับเข้าถังป้อนวัตถุดิบ
6. เปิดสวิทช์ปั้มนสุญญากาศ เพื่อสร้างความดันสุญญากาศในระบบ และปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของวัตถุดิบที่เข้าถังแยกไอน้ำสม่ำเสมอไม่เกิดฟอง
7. หลังจากปรับวาล์วในข้อ 6 ได้ระยะเวลาหนึ่งให้เปิดสวิทช์ปั้มน้ำเย็น เปิดวาล์วปล่อยของเหลวออกจากถังควบแน่น (Condensated) ออกจากถังควบแน่น

ไม่วากรัมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบี่ยงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เคนระบบต่อเนื่องจนวัดความเข้มข้นวัตถุดิบจากท่อกลับบนถังป้อนวัตถุดิบ ได้ความเข้มข้นที่ต้องการจึงเปิดวาล์วให้ผลิตภัณฑ์ไหลลงรับผลิตภัณฑ์ ปิดวาล์วท่อไหลกลับลงถังวัตถุดิบ

9. เคนระบบต่อเนื่องจนวัตถุดิบในถังป้อนวัตถุดิบ อยู่ต่ำกว่าทางออกของท่อป้อน วัตถุดิบจึงปิดสวิตช์ป้อนวัตถุดิบ



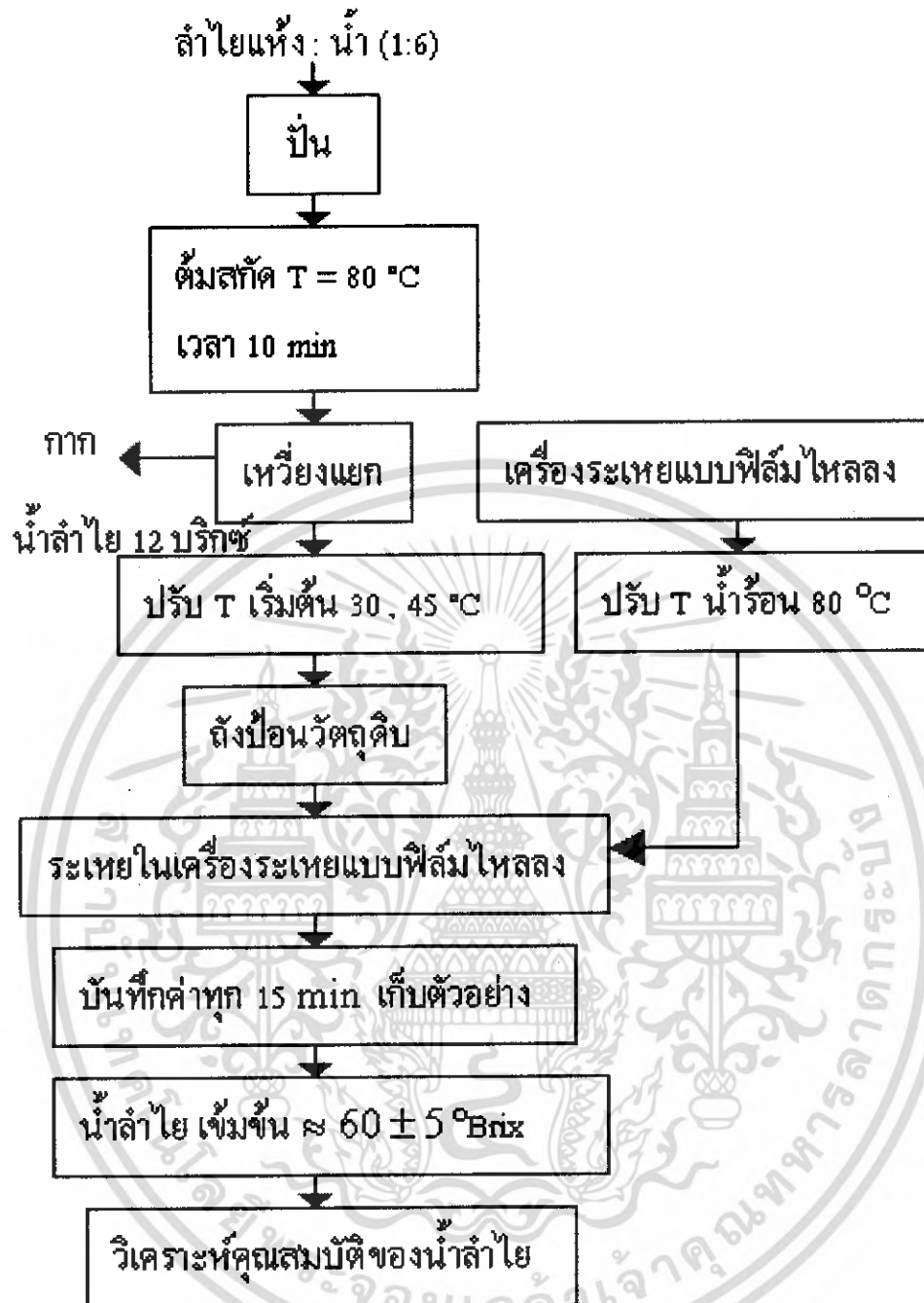
รูปที่ 3.2 แผนผังกระบวนการ

1. ถังป้อนวัตถุดิบ (Raw material tank)
2. ส่วนอุ่นวัตถุดิบ (Pre-heater)
3. ส่วนระเหยแบบฟิล์มไหลลง (Falling film evaporator)
4. ส่วนแยกไอ (Separator)
5. ส่วนควบแน่น (Condenser)
6. ถังเก็บน้ำควบแน่น (Condensate tank)
7. ถังค้ำน้ำร้อน (Hot water tank)
8. ถังน้ำหล่อเย็น (Cooling water tank)
9. หอหล่อเย็น (Cooling tower)
10. ปั๊ปลำเลียง (Delivery pump)
11. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการระเหย (ดังแสดงในรูปที่ 3.3)

1. เริ่มการทดลองด้วยการอุ่นน้ำในหม้อต้มน้ำด้วยแก๊ส ปรับอุณหภูมิน้ำร้อนให้มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
2. เปิดชุดทำน้ำเย็นเพื่อใช้ในการควบแน่นไอรระเหย ตั้งอุณหภูมิน้ำเย็นที่ 15 องศาเซลเซียส (อาจใช้น้ำประปาต่อโดยตรง)
3. เตรียมน้ำลำไยประมาณ 45 ลิตร ใส่ในถังป้อนวัตถุดิบ
4. บันทึกปริมาณของแข็งที่ละลายได้ด้วยรีแฟรคโตมิเตอร์ (Refractrometer) อุณหภูมิ ความหนืด และความหนาแน่นของน้ำลำไยเริ่มต้น
5. เปิดป้อนอาหารเหลวเข้าสู่ชุดเครื่องระเหย ปรับอัตราการป้อนให้คงที่พร้อมบันทึกค่าที่อ่านได้
6. ดำเนินการทดลอง
7. บันทึกค่าต่าง ๆ อาทิ อุณหภูมิของอาหารเหลว อุณหภูมิของน้ำร้อน และอัตราการไหลของน้ำลำไยเข้มข้น ลงในตารางผลการทดลองลงในตาราง ทุก ๆ 15 นาที
8. ระเหยไปจนกระทั่งปริมาณความเข้มข้นของของแข็งที่ละลายได้ 55-60 บริกซ์ จึงหยุดเครื่อง
9. บันทึกน้ำหนักของอาหารเหลวเข้มข้นที่ได้ลงในตารางผลการทดลอง ( ภาคผนวก ข 1-6 )



รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการทดลองโดยรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การวางแผนการทดลอง

แผนการทดลองการระเหยน้ำลำไยที่สภาวะเริ่มต้นดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ

การทดลอง	อุณหภูมิวัตถุดิบเริ่มต้น ( °C)	อัตราการป้อนวัตถุดิบ (m <sup>3</sup> / sec)
1	30	5 x 10 <sup>-5</sup>
2	30	6 x 10 <sup>-5</sup>
3	30	7 x 10 <sup>-5</sup>
4	45	5 x 10 <sup>-5</sup>
5	45	6 x 10 <sup>-5</sup>
6	45	7 x 10 <sup>-5</sup>

### 3.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้ นำไปคำนวณ และหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ต่าง ๆ ดังนี้โดยใช้วิธี Multiple regression และ Non-linear regression

#### 1. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

- แบบจำลองเชิงทฤษฎี (Theoretical Model)

จากสมการที่ 2.1.1- 2.1.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$U_1 = (m_F c_p \Delta T + m_V \lambda) / (A \Delta T_m) \quad (3.5.1)$$

- แบบจำลองกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical Model)

Pacheco และ Frioni<sup>[6]</sup> ได้พัฒนาสมการของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแสดงได้ดังนี้

$$U_2 = \frac{m_F}{A(T_v - T_s) f^2} \left[ (i_s - u) \frac{df}{dt} + f \frac{du}{dt} \right] \quad (3.5.2)$$

#### 2. ความเข้มข้นของน้ำลำไยที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการระเหย

$$B = f(\text{เวลา, อัตราการป้อน, อุณหภูมิ})$$

หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของน้ำลำไย

#### 3. ความหนาแน่นและความหนืดของน้ำลำไย ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่าง ๆ กัน

$$\rho = f(\text{ปริกซ์, อุณหภูมิ})$$

$$\mu = f(\text{ปริกซ์, อุณหภูมิ})$$

#### 4. การเปลี่ยนแปลงของสีระหว่างการระเหย

$$\Delta E = f(\text{เวลา, อัตราการป้อน, อุณหภูมิ})$$

หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำลำไย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 5. ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ความเข้มข้นของน้ำตาลไอในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 12-63°Brix น้ำร้อนที่ใช้ในการให้ความร้อนภายในเครื่องระเหยมีค่า  $80 \pm 15$  °C

ในการอธิบายกระบวนการในรูปของสมดุลการถ่ายเทมวลและพลังงาน โดยมีข้อสมมุติฐานดังต่อไปนี้

- พลังงานความร้อนในระหว่างการทดลองไม่มีการสูญเสีย
- น้ำตาลไอในระหว่างการทดลองมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน
- อัตราการป้อนน้ำตาลไอคงที่ตลอดการทดลอง
- อุณหภูมิน้ำร้อนในถังมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ

ผลการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ แสดงในภาคผนวก ข 1 - 6

#### 4.1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

ช่วงการวิเคราะห์ความเข้มข้นของน้ำตาลไอในการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 12-63°Brix มีอุณหภูมิวัดจุดิบขาเข้าอยู่ในช่วง 30 – 66 องศาเซลเซียส , อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้ามีค่าอยู่ในช่วง 65 – 88 องศาเซลเซียส , น้ำร้อนที่ใช้ในการให้ความร้อนภายในเครื่องระเหยมีค่า  $80 \pm 15$  °C และอัตราการป้อนวัตถุดิบอยู่ในช่วง  $5 \times 10^{-5}$  -  $7 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/sec หรือ 3.033, 3.6 และ 4.150 ลิตร/นาที

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมนี้ สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

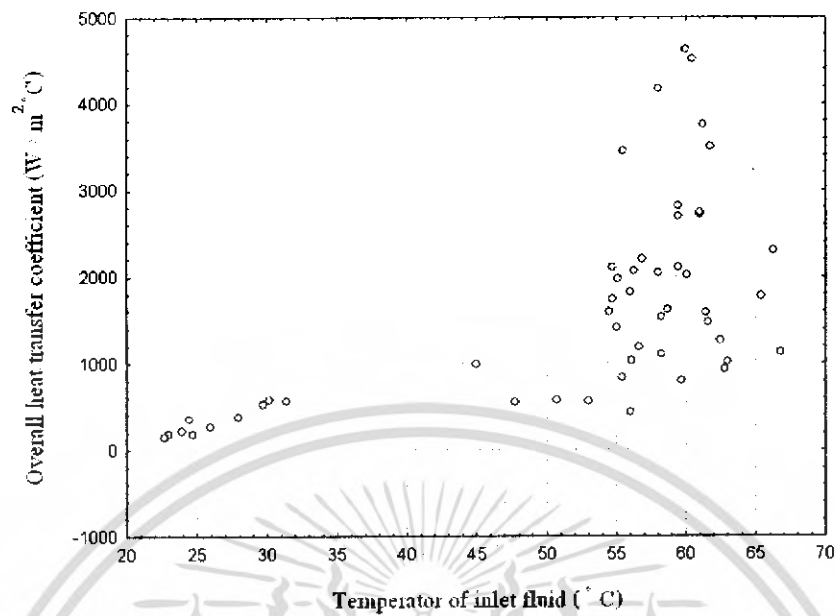
4.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎี ( Theoretical Model ,  $U_1$  ) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$U_1 = (m_f c_p \Delta T + m_v \lambda) / (A \Delta T_m)$$

จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎีมาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิวัดจุดิบขาเข้า อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า อัตราการป้อนวัตถุดิบ และความเข้มข้นของของแข็งละลายได้

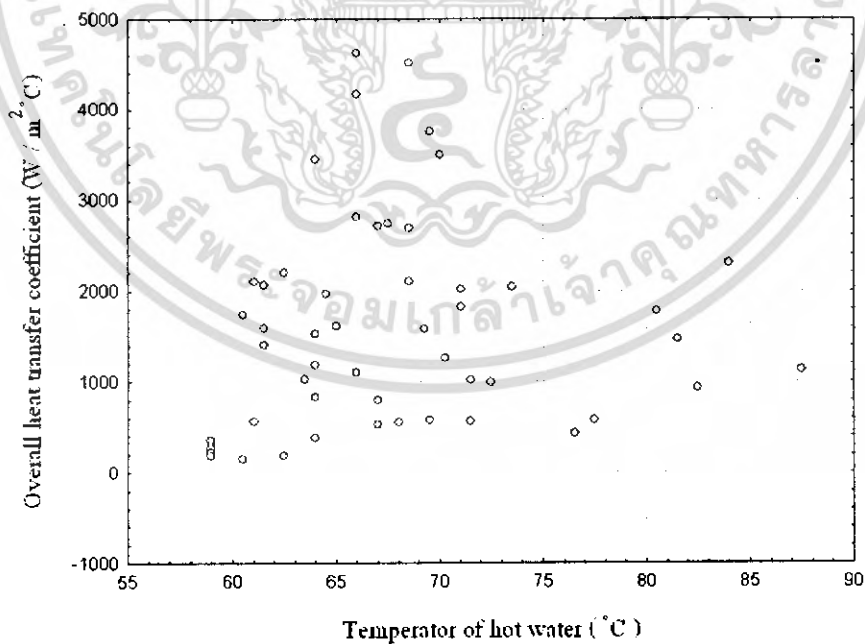
เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิวัดจุดิบขาเข้า ( ดังรูปที่ 4.1 ) พบว่าที่อุณหภูมิวัดจุดิบขาเข้าสูงขึ้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สูงขึ้นด้วย และที่ค่าอุณหภูมิสารละลายขาเข้าประมาณ 55 – 65 °C จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงที่สุด

นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า

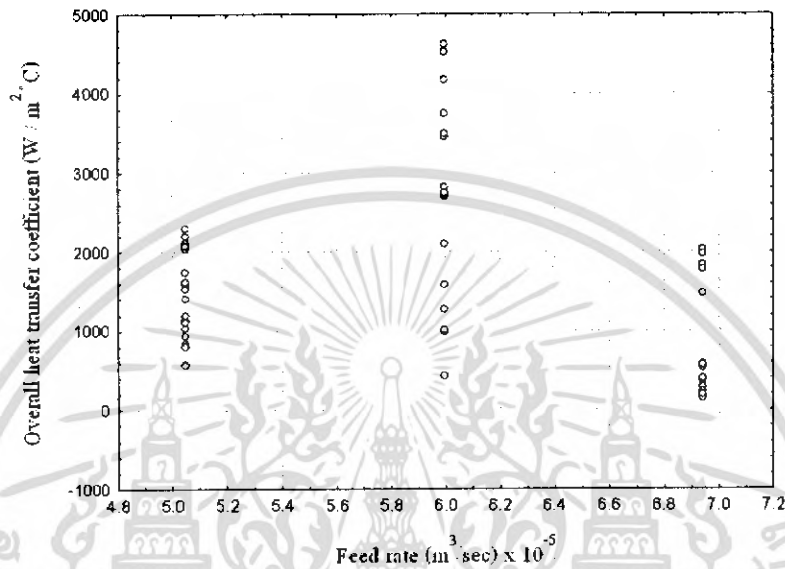
เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ( ดังรูปที่ 4.2 ) พบว่าที่อุณหภูมิสารละลายขาเข้าประมาณ 60 - 70 °C จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงที่สุด



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า

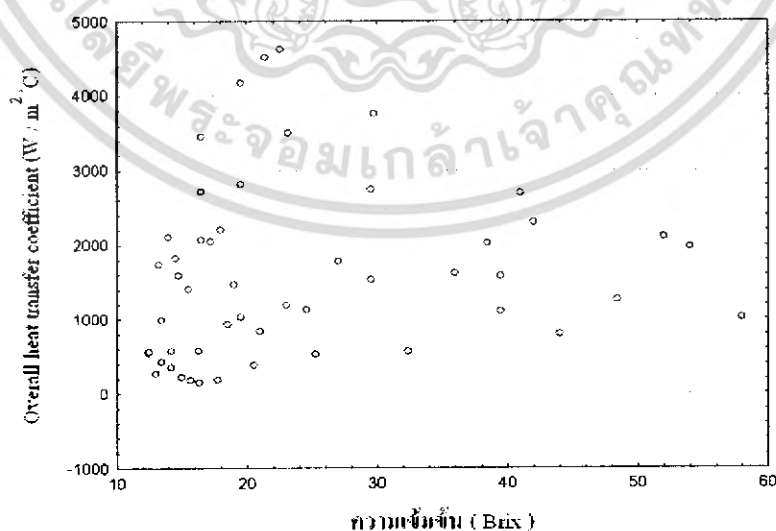
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าจากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ ( ดังรูปที่ 4.3 ) พบว่าที่อัตราการป้อนปานกลาง ณ ที่นี้คือ  $6 \times 10^{-5}$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือ 3.6 ลิตร/นาที จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สูงกว่าที่ค่าอัตราการป้อนที่ต่ำหรือสูงเกินไป



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้ ( ดังรูปที่ 4.4 ) พบว่าที่ค่าปริกซ์ต่ำ ๆ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่กระจาย และความกระจายจะลดลงเมื่อค่าปริกซ์สูงขึ้น



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ ไปทำการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับ ตัวแปรต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมา โดยใช้วิธี Multiple Regression จะได้ ดังนี้

$$U_1 = (1.4T_f^2) - (1.4T_b \times T_f) + (939779.9 \times F \times T_f) - (0.4 \times B^2) \quad (4.1.1)$$

$$R^2 = 0.85280593, SE = 790.9, p < 0.001$$

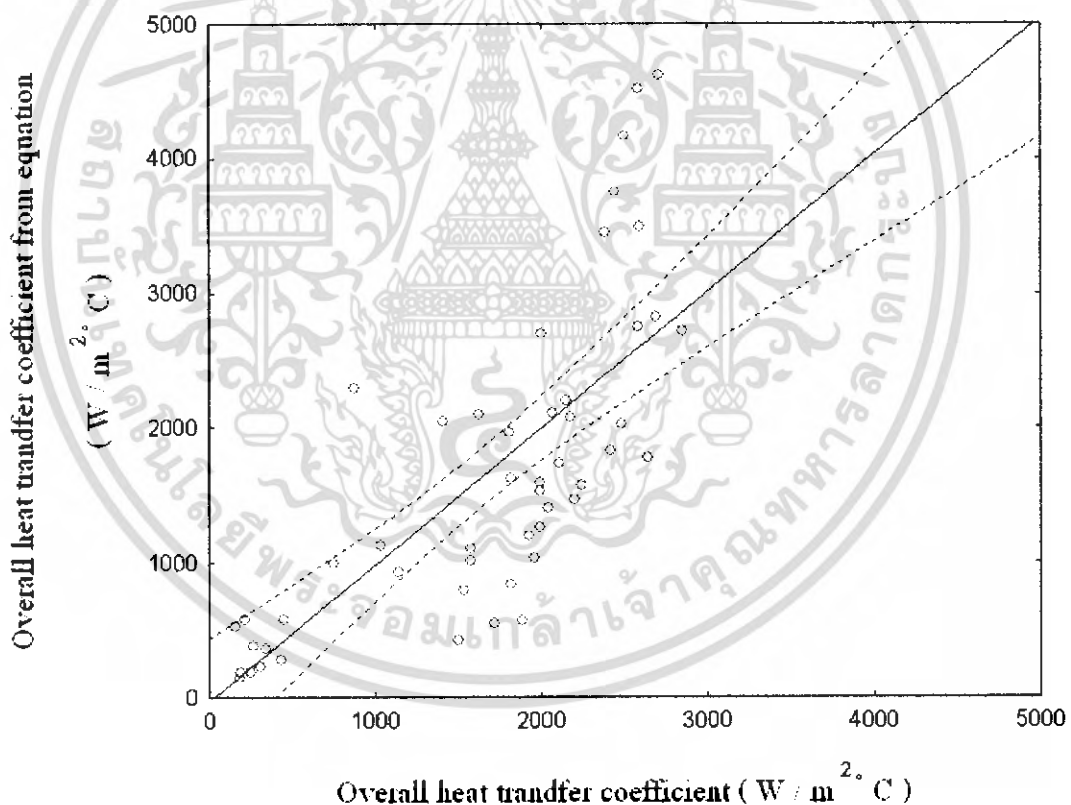
โดยที่  $T_f$  คือ อุณหภูมิน้ำลำไยขาเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_b$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )

$F$  คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบ ( $\text{m}^3/\text{sec}$ )

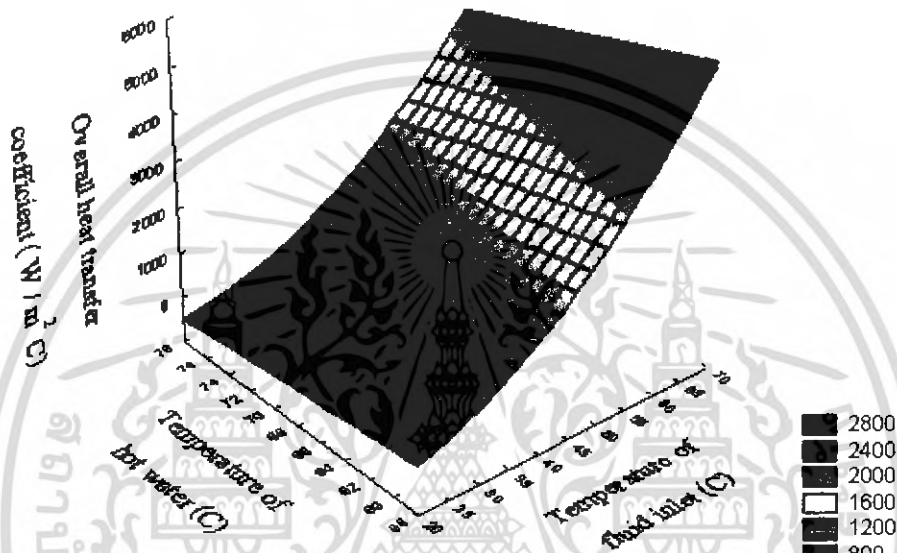
$B$  คือ ความเข้มข้นน้ำลำไย (Brix)

รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลอง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากสมการ 4.1.1



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลอง และจากการคำนวณจากสมการทำนาย

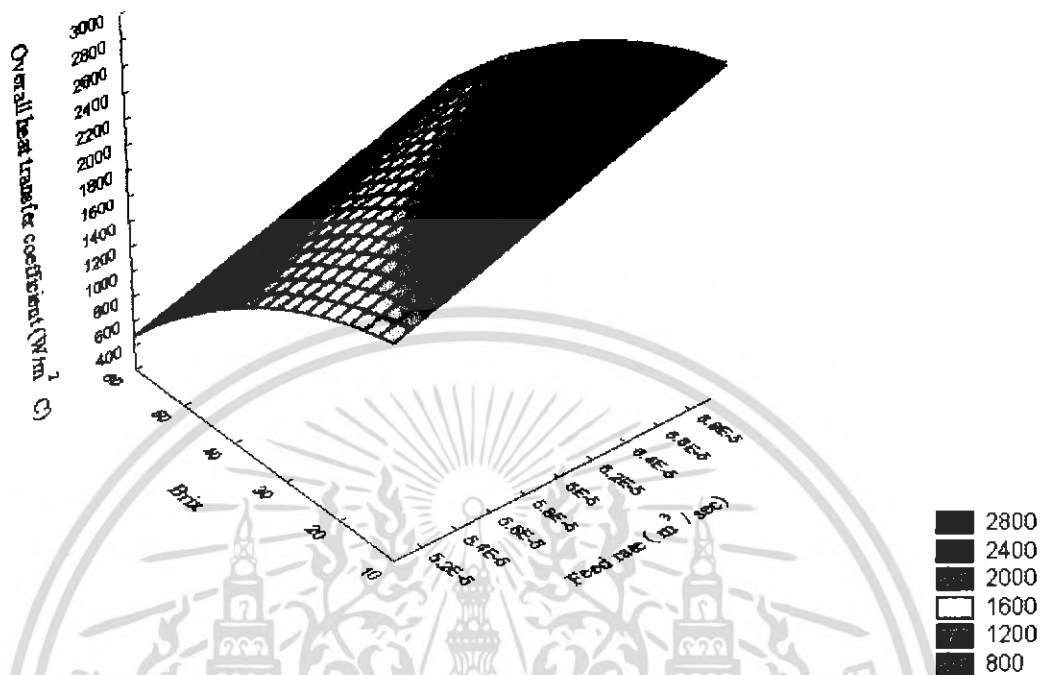
เมื่อนำสมการความสัมพันธ์ที่ได้มาพลอตเพื่อแสดงพื้นผิวถดถอย (Response Surface) ( ดังรูปที่ 4.6) พบว่า เมื่ออุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ( Exponential )และเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำร้อนนั้นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.6 แสดงผลของ อุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า และอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

จากรูปที่ 4.7 เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ( Exponential )และเมื่ออัตราการป้อนลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะลดลงแบบเส้นตรง

โดยสรุปคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะสูงที่สุดเมื่ออุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้าและอัตราการป้อนมีค่าสูง ในขณะที่ความเข้มข้นมีค่าต่ำ



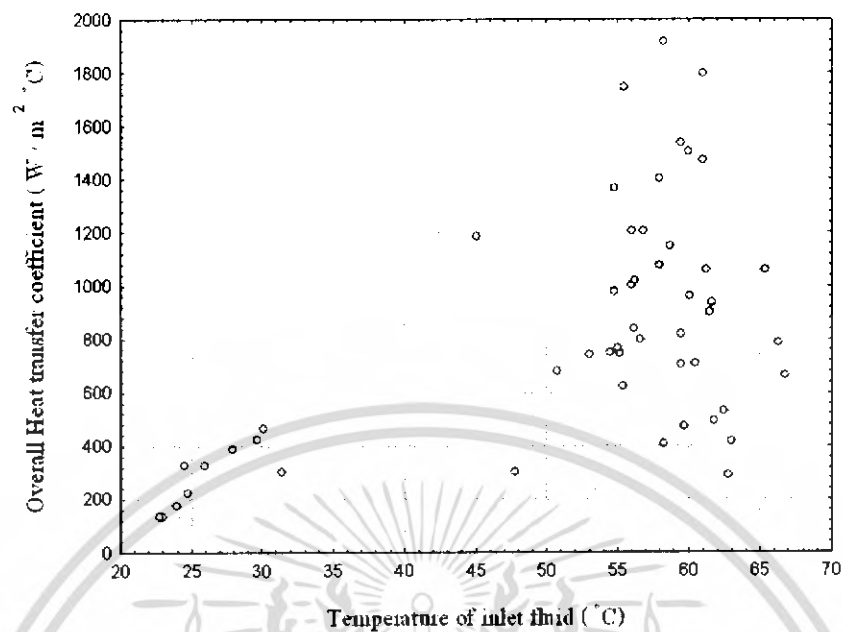
รูปที่ 4.7 แสดงผลของอัตราการป้อนวัตถุดิบ และความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้ ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

4.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกึ่งทฤษฎี [15] (Semi - theoretical Model,  $U_2$ ) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$U_2 = \frac{m_F}{A(T_v - T_s)} \frac{1}{f^2} \left[ (i_s - u) \frac{df}{dt} + f \frac{du}{dt} \right]$$

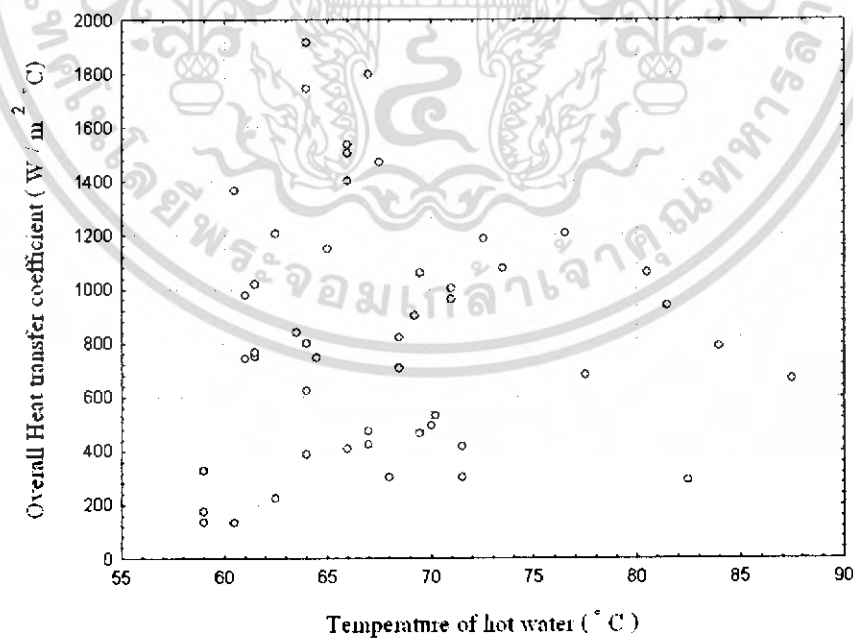
เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมกึ่งทฤษฎีที่คำนวณได้มาสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า อัตราการป้อนวัตถุดิบ และความเข้มข้นของแข็งละลายได้ ผลการทดลองที่ได้นั้นมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับที่แสดงในหัวข้อ 4.1.1 กล่าวคือ

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า ( ดังรูปที่ 4.8 ) พบว่าที่อุณหภูมิสารละลายสูงขึ้นจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูงขึ้นด้วย และที่ค่าอุณหภูมิสารละลายขาเข้าประมาณ 55 – 65 °C จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงที่สุด



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า

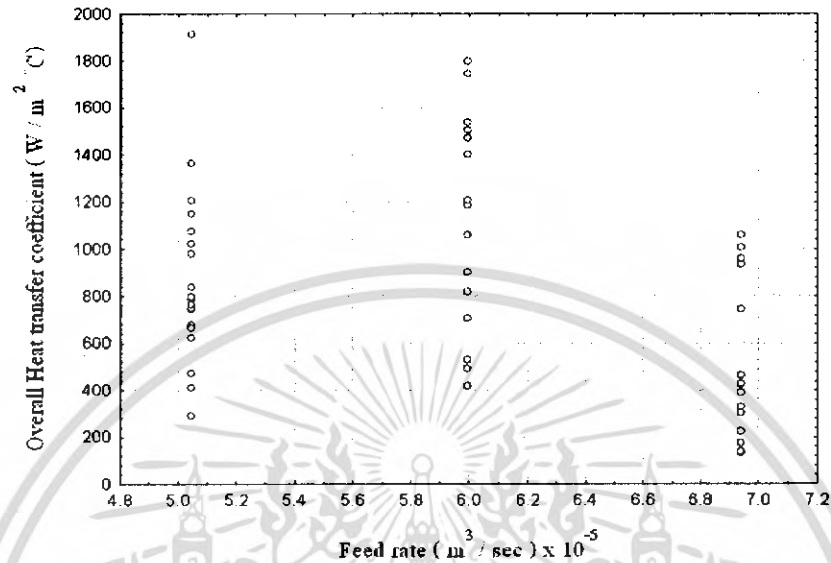
เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ( ดังรูปที่ 4.9 ) พบว่าที่อุณหภูมิสารละลายขาเข้าประมาณ 60 - 70 °C จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสูงที่สุด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า

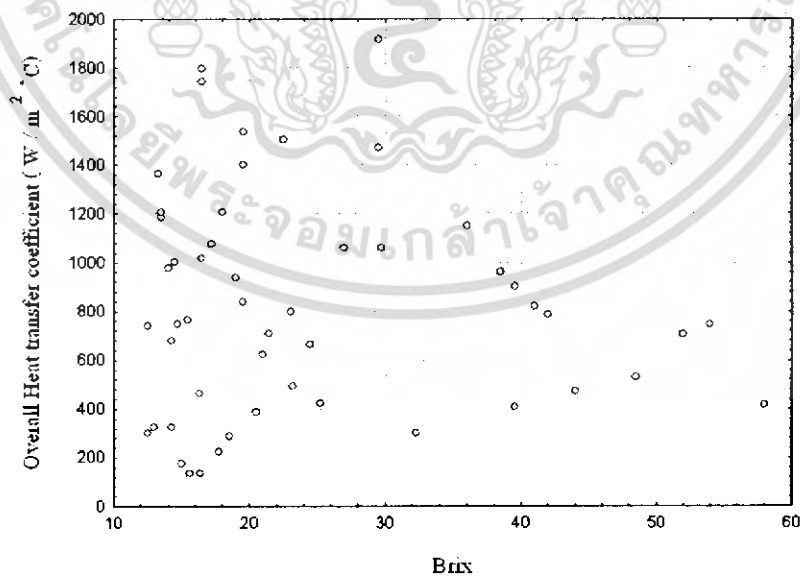
เมื่อนำค่าจากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ ( ดังรูปที่ 4.10 ) พบว่าที่อัตราการป้อนปานกลาง กลาง ณ ที่นี้คือ เอกสารค่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$6 \times 10^{-5}$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที หรือ 3.6 ลิตร/นาที จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สูงกว่าที่ค่าอัตราการป้อนที่ต่ำหรือสูงเกินไป



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับอัตราการป้อนวัตถุดิบ

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้ ( ดังรูปที่ 4.11 ) พบว่าที่ค่าบrixต่ำ ๆ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่กระจาย และความกระจายจะลดลงเมื่อค่าบrixสูงขึ้น



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับความเข้มข้นของน้ำตาลไย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ ไปทำการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม กับ ตัวแปรต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมา โดยใช้วิธี Multiple Regression จะได้ ดังนี้

$$U_2 = (379823.1 \times F \times T_F) - (0.3 \times B^2) + (0.4 \times T_F^2) - (0.4(T_b \times T_F)) \quad (4.2.1)$$

$$R^2 = 0.88617915, SE = 328.66, P < 0.001$$

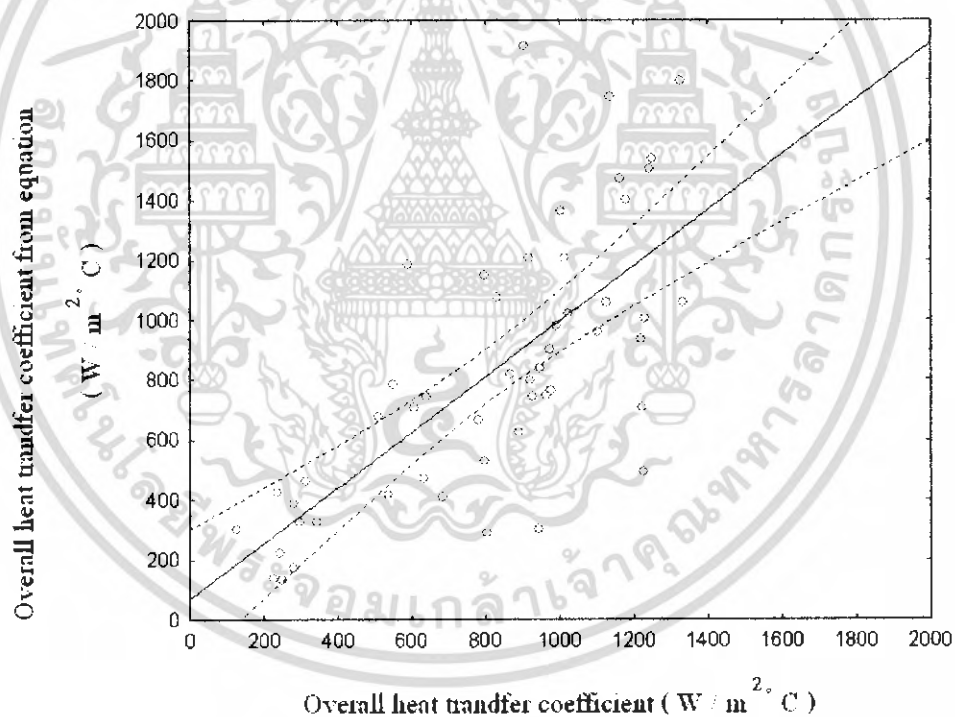
โดยที่  $T_F$  คือ อุณหภูมิน้ำลำไยขาเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_b$  คือ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ( $^{\circ}\text{C}$ )

$F$  คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบ ( $\text{m}^3 / \text{sec}$ )

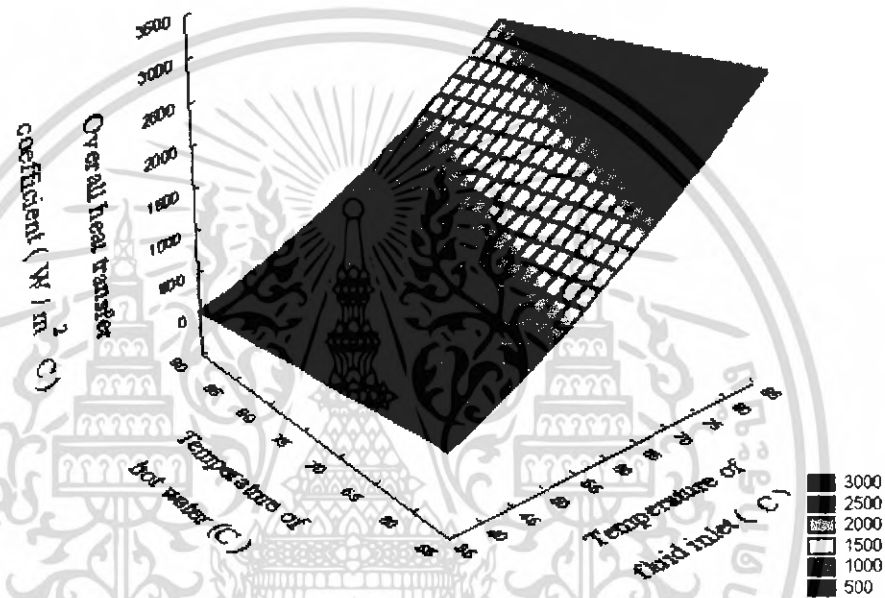
$B$  คือ ความเข้มข้นน้ำลำไย (Brix)

รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลอง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากสมการ 4.2.1



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากการทดลอง กับจากกรคำนวณจากสมการทำนาย

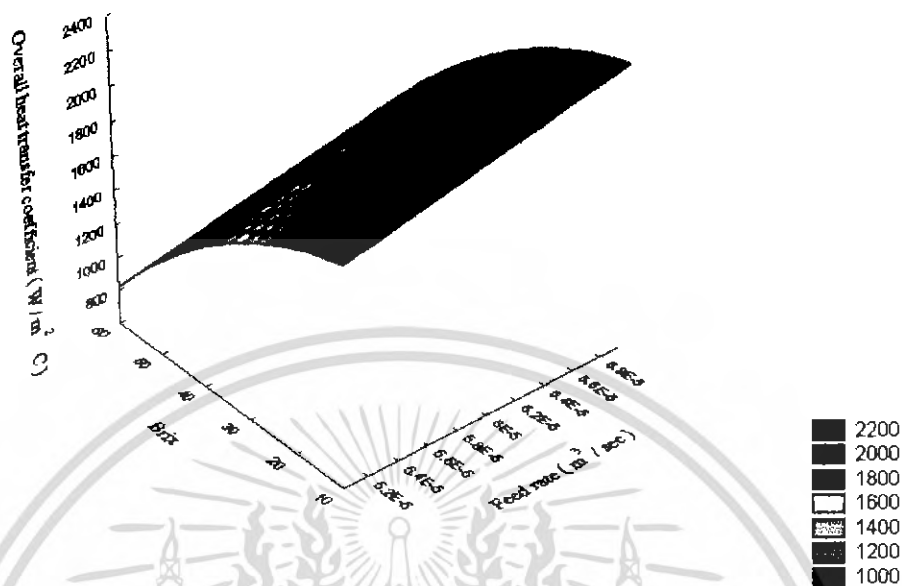
เมื่อนำสมการความสัมพัทธ์ที่ได้มาพลอตเพื่อแสดงพื้นผิวถดถอย (Response Surface) ( ดังรูปที่ 4.13 ) พบว่า เมื่ออุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้าเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ( Exponential ) และเมื่ออุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำร้อนนั้นมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.13 แสดงผลของ อุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้า และอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

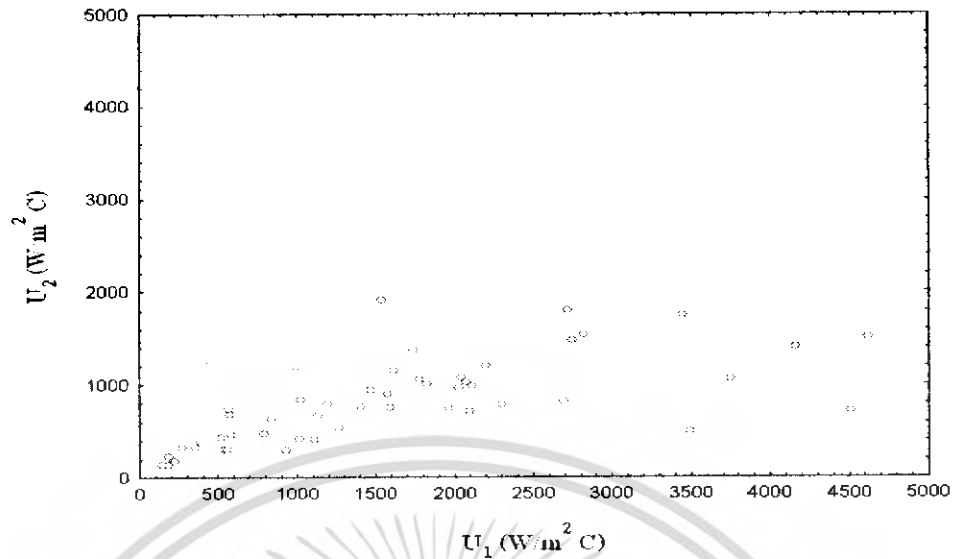
จากรูปที่ 4.14 เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ( Exponential ) และเมื่ออัตราการป้อนลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะลดลงแบบเส้นตรง

โดยสรุปคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะสูงที่สุดเมื่ออุณหภูมิวัตถุดิบขาเข้าและอัตราการป้อนมีค่าสูง ในขณะที่ความเข้มข้นมีค่าต่ำ



รูปที่ 4.14 แสดงผลของอัตราการป้อนวัตุดิบ และความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ละลายได้ ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

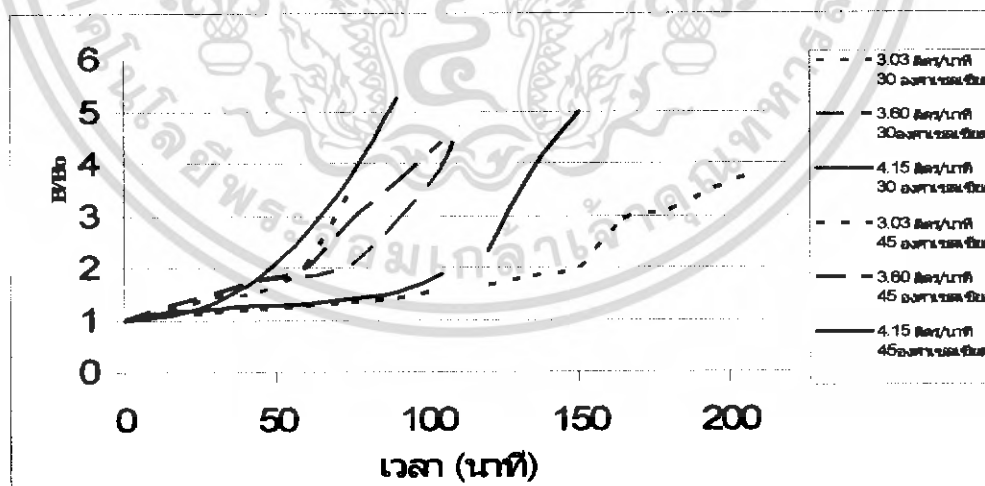
รูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎี ( $U_1$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีกิ่งพื้นฐาน ( $U_2$ ) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎี ( $U_1$ ) มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณจากทฤษฎีกิ่งพื้นฐาน ( $U_2$ ) ทั้งนี้เนื่องจาก ลักษณะของการแลกเปลี่ยนความร้อนและวัตถุดิบที่ใช้ต่างกัน เครื่องระเหยที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณจากทฤษฎีกิ่งพื้นฐาน ( $U_2$ ) ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบแผ่น (Plate heat exchanger) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎี ( $U_1$ ) เป็นแบบท่อ (Double tube heat exchanger) นอกจากนี้วัตถุดิบที่ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณจากทฤษฎีกิ่งพื้นฐาน ( $U_2$ ) คือสารละลายซูโครส ในขณะที่กรณีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎี ( $U_1$ ) นั้นใช้น้ำตาลโย



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงทฤษฎี ( $U_1$ ) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเชิงกึ่งทฤษฎี ( $U_2$ ) ที่คำนวณจากทฤษฎีกึ่งพื้นฐาน

#### 4.2 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำลำไยในระหว่างการระเหย

จากการทำน้ำลำไยเข้มข้นด้วยเครื่องระเหยโดยเปลี่ยนสภาวะเริ่มต้นของน้ำลำไย คือ อุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 30 และ 45 °C และอัตราการป้อนเท่ากับ 0.182, 0.216 และ 0.249  $\text{m}^3/\text{hr}$  หรือ 3.033, 3.600 และ 4.150 ลิตร/นาที พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาสามารถแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นที่การทดลองต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.16 พบว่าความเข้มข้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น โดยในช่วงแรกความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที หรือที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นไป 2 เท่าจากค่าเริ่มต้น ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในลักษณะของเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) จึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการระเหย ดังนี้

$$\frac{B}{B_0} = \exp(kt) \quad (4.2.1)$$

B = [ความเข้มข้นของน้ำลำไยที่เวลาใด ๆ 12-63 °Brix]

B<sub>0</sub> = [ความเข้มข้นของน้ำลำไยเริ่มต้น 12°Brix]

k = [ค่าคงที่]

ซึ่งค่า k ขึ้นกับสถานะเริ่มต้นของการระเหย ได้แก่ อุณหภูมิลำไยและอัตราการป้อน

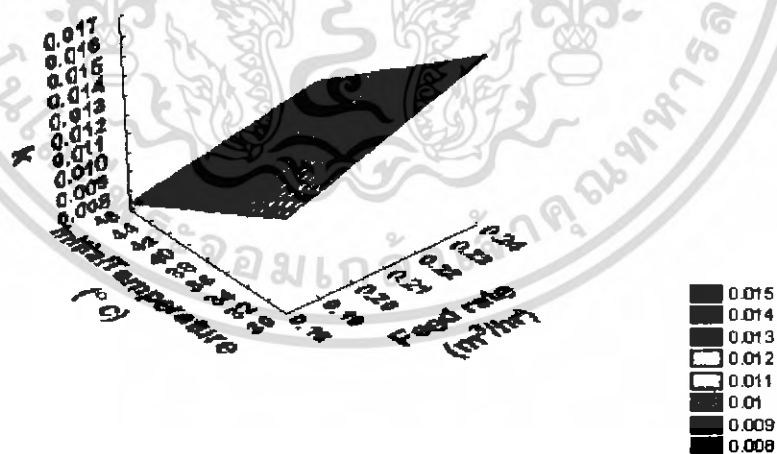
โดยใช้วิธี Multiple Regression ได้ความสัมพันธ์ของค่า k ดังนี้

$$k = (0.112822 \times F) - (0.001562 \times F \times T_0) \quad (4.2.2)$$

$$R^2 = 0.9550, SE = 0.0031, p < 0.005$$

F = [อัตราการป้อนวัตถุดิบ 0.182-0.249 m<sup>3</sup>/hr หรือ 3.03-4.15 L/min]

T = [อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุดิบ 30-45 องศาเซลเซียส]



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า k กับสถานะเริ่มต้นคือ อัตราการป้อนและอุณหภูมิวัตถุดิบเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

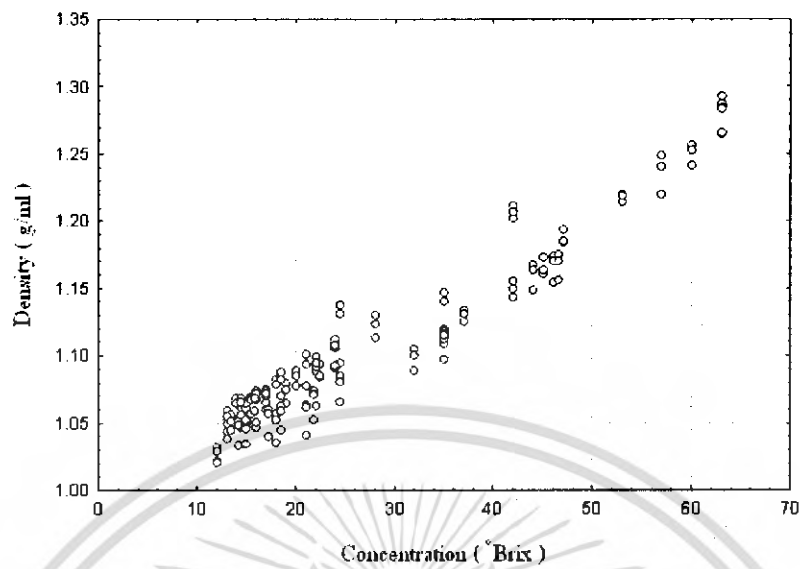
จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $k$  กับสภาวะเริ่มต้นคือ อัตราเร็วการป้อน (Feed rate) และอุณหภูมิวัตถุดิบเริ่มต้น (Initial temperature) พบว่า เมื่ออัตราเร็วการป้อนมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มของอุณหภูมิวัตถุดิบกลับมีผลให้ค่า  $k$  ที่ได้มีค่าต่ำลง ค่า  $k$  มีค่าสูงสุดเมื่ออัตราเร็วการป้อนน้ำลำไยเท่ากับ  $0.24 \text{ m}^3/\text{hr}$  ที่อุณหภูมิ  $30^\circ\text{C}$  แสดงว่าเมื่อให้อัตราการป้อนมากขึ้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำลำไยเพิ่มเร็วขึ้นเนื่องจากอัตราการป้อนที่มากขึ้นทำให้สารละลายมีโอกาสแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้น ความเข้มข้นจึงเพิ่มขึ้นเร็วกว่าที่อัตราการป้อนน้อยกว่า และที่อุณหภูมิเริ่มต้นสูงทำให้การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำลำไยลดลงเนื่องจาก ค่าอุณหภูมิวัตถุดิบเริ่มต้น ที่สูงทำให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิลดลง อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยลง ความเข้มข้นจึงเปลี่ยนแปลงช้ากว่า แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่าอัตราเร็วการป้อน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมากกว่าค่าอุณหภูมิวัตถุดิบ เริ่มต้น มาก อาจเนื่องมาจากว่าช่วงของอุณหภูมิเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงในการทดลองแคบเกินไปจนไม่สามารถวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิต่อความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงได้

#### 4.3 คุณสมบัติของน้ำลำไย

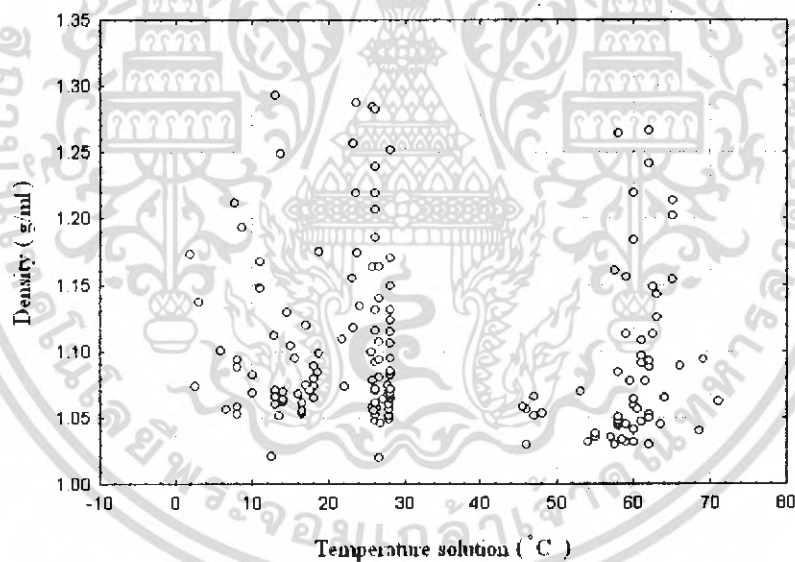
##### 4.3.1 ความหนาแน่นของน้ำลำไย

ในการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของน้ำลำไย ใช้ น้ำลำไยที่มีความเข้มข้นของน้ำลำไยในการทดลองอยู่ในช่วง  $12 - 63^\circ\text{Brix}$  อุณหภูมิอยู่ในช่วง  $3 - 71$  องศาเซลเซียส

นำมาวิเคราะห์ความหนาแน่นโดยใช้ พิกโนมิเตอร์ ( Pycnometer ) จากนั้นนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น กับ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของน้ำลำไย พบว่าความหนาแน่นขึ้นกับความเข้มข้นอย่างมีนัยสำคัญ (  $p < 0.001$  ) ( ดังรูปที่ 4.18 ) ในขณะที่อุณหภูมิไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ( ดังรูปที่ 4.19 )



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำตาลไซท์กับความหนาแน่น



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำตาลไซท์ที่สภาวะต่าง ๆ กับความหนาแน่น

สมการความสัมพันธ์ที่ได้เป็นดังนี้

รูปแบบที่ 1

$$\rho = 0.004313 B + 0.986485 \quad (4.3.1)$$

$$R^2 = 0.9336, \quad SE = 0.0198$$

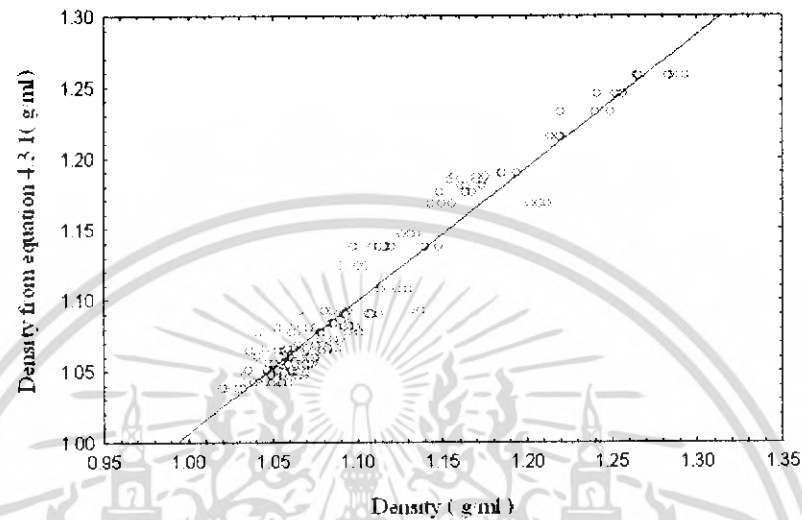
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้โดยที่  $B = [ \text{ความเข้มข้นของน้ำตาลไซท์ } 12 - 63^\circ \text{Brix} ]$  ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T = [ อุณหภูมิของน้ำลำไย 3 – 71 °C ]

$\rho$  คือ ความหนาแน่น (g/ml)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

B คือ ความเข้มข้นของน้ำลำไย (°Brix )



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ ของความหนาแน่นจากการทดลองและจากสมการ  
ความสัมพันธ์รูปแบบที่ 1

รูปแบบที่ 2

เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระทั้ง 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิของน้ำลำไยและความเข้มข้น จะได้  
สมการรูปแบบดังนี้

$$\rho = 1.009237 + 0.003272B + 0.000018B^2 - 0.000224T - 0.000005BT \quad (4.3.2)$$

$$R^2 = 0.9479, \quad SE = 0.0151$$

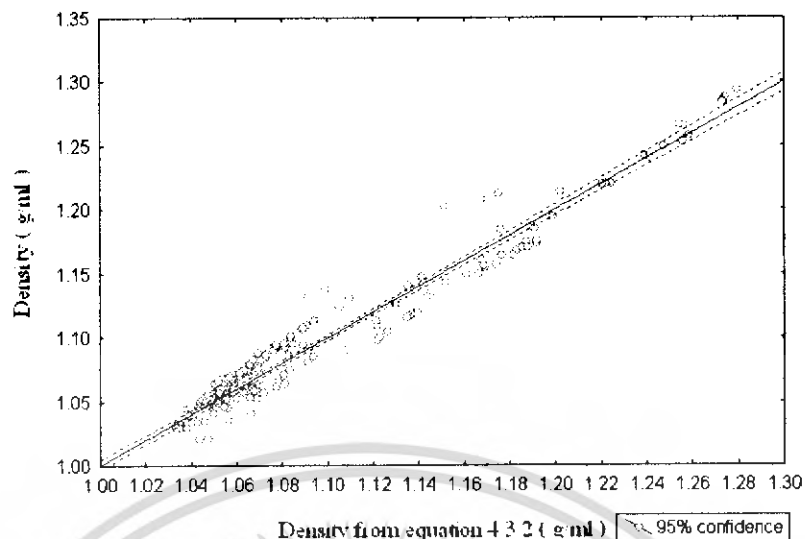
โดยที่ B = [ ความเข้มข้นของน้ำลำไย 12 - 63 °Brix ]

T = [ อุณหภูมิของน้ำลำไย 3 – 71 °C ]

$\rho$  คือ ความหนาแน่น (g/ml)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

B คือ ความเข้มข้นของน้ำลำไย (°Brix )

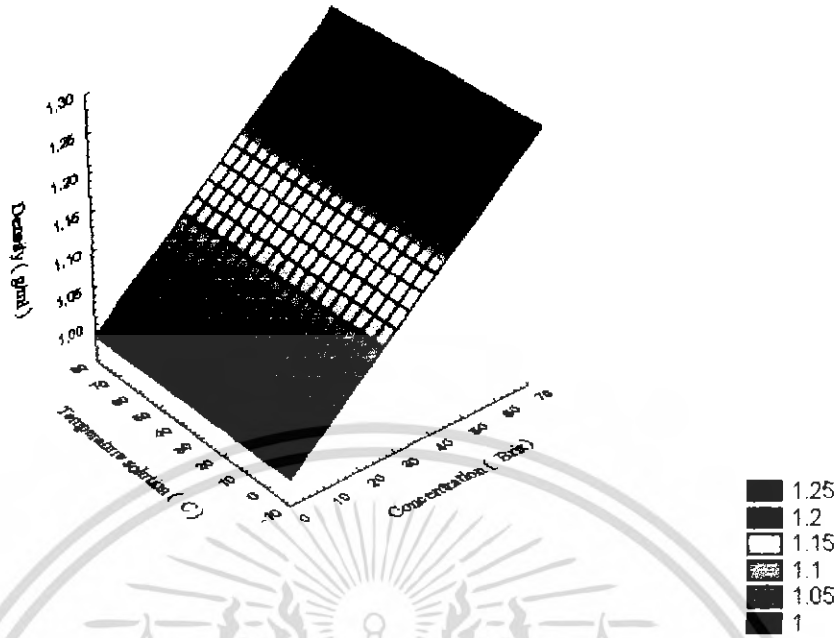


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความหนาแน่นจากสมการความสัมพันธ์รูปแบบที่ 2 และของการทดลอง

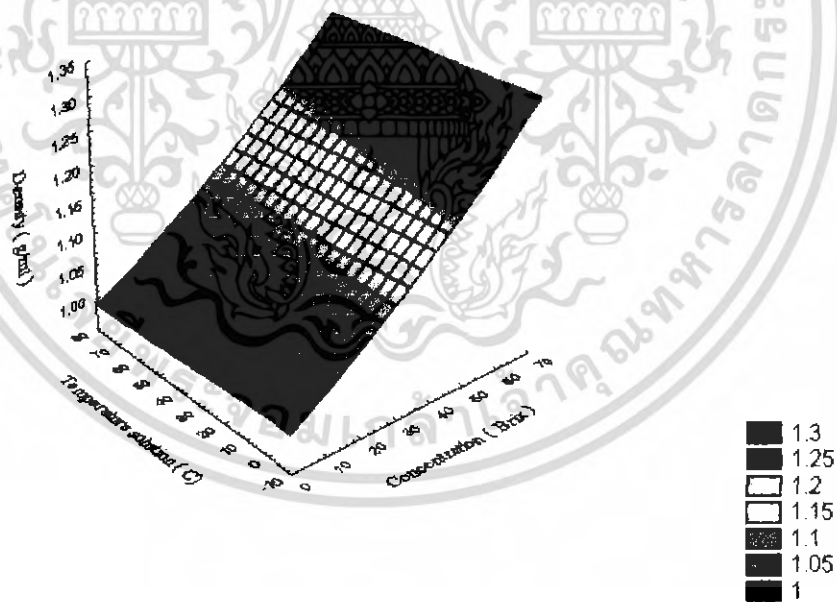
จากรูปที่ 4.20, 4.21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่าทั้งสองมีสหสัมพันธ์  $R^2$  และค่า Std. Error อยู่ในเกณฑ์ดี ( $p < 0.001$ )

จากการวิเคราะห์ความหนาแน่น พบว่าตัวแปรที่มีผลทำให้ความหนาแน่นมีความแตกต่างกัน มีอยู่ 2 ตัวแปรคือ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ ( ดังรูปที่ 4.22, 4.23 ) โดยที่ค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิ ส่งผลให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

สมการความสัมพันธ์ของความหนาแน่น 2 รูปแบบ สามารถใช้ได้คือน้ำลำไย ที่มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 12 - 63 °Brix และ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 3 - 71 องศาเซลเซียส ได้ดีกว่าสมการความสัมพันธ์ของความหนาแน่นรูปแบบอื่นที่ได้มีการศึกษา [19, 20, 21]



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่ได้จากสมการรูปแบบที่ 1 กับ ความเข้มข้นและอุณหภูมิ



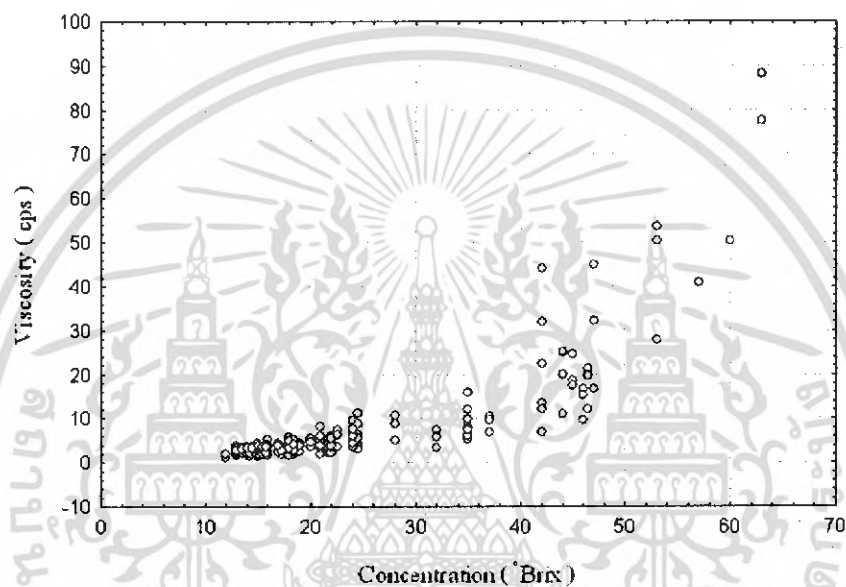
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่ได้จากสมการรูปแบบที่ 2 กับ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

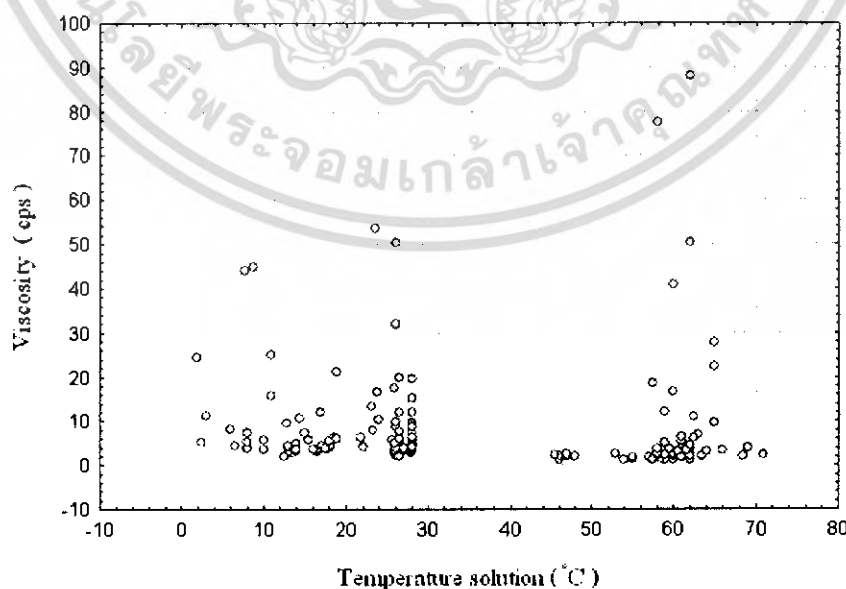
### 4.3.2 ค่าความหนืดของน้ำลำไย

ค่าความเข้มข้นที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าอยู่ในช่วง 12 - 63 °Brix และ อุณหภูมิมีค่าอยู่ในช่วง 3 - 71 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ค่าความหนืดพบว่าความหนืดขึ้นกับค่าความเข้มข้น ( $p < 0.001$ ) เมื่อความเข้มข้นมีค่าสูงขึ้น ความหนืดมีค่าสูงขึ้นด้วย และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นมีค่ามาก ( ดังรูปที่ 4.24 ) ส่วนอุณหภูมิมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความหนืด ( ดังรูปที่ 4.25 )



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำลำไยกับความหนืด



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำลำไยที่สภาวะต่างๆกับความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำลำไย สามารถแสดงได้ 2 รูปแบบ ดังนี้

**รูปแบบที่ 1**

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ ไปทำการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำลำไย โดยใช้วิธี Multiple Regression จะได้ดังนี้

$$\mu = 0.027651 B^2 - 0.549992 B + 0.348349 T - 0.002698 T^2 - 0.008 BT \quad (4.3.3)$$

$$R^2 = 0.8752, \quad SE = 5.5151$$

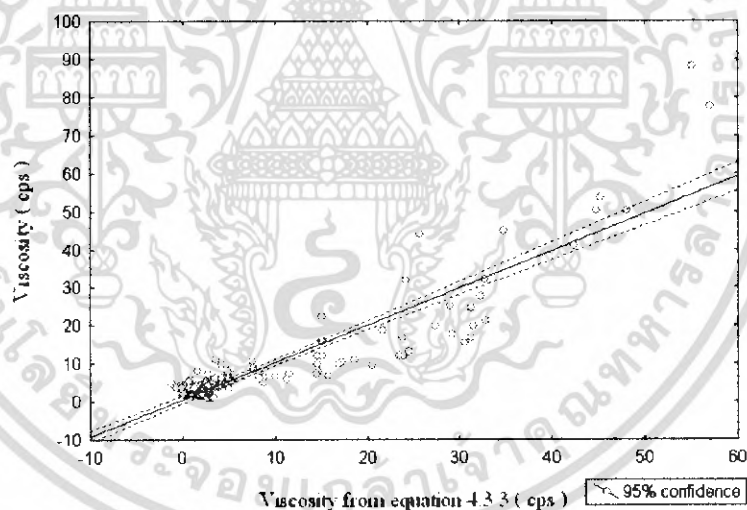
โดยที่ B = [ ความเข้มข้นของน้ำลำไย 12 - 63 °Brix ]

T = [ อุณหภูมิของน้ำลำไย 3 - 71 °C ]

$\mu$  คือ ความหนืด ( cps )

T คือ อุณหภูมิ ( °C )

B คือ ความเข้มข้นของน้ำลำไย ( °Brix )



**รูปที่ 4.26** เปรียบเทียบความสัมพันธ์ ของความหนืดจากสมการความสัมพันธ์รูปแบบที่ 1 และจากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปแบบที่ 2

$$\mu = 2.534507 + \exp(-1.36847 + 0.107431B - 0.017666T) \quad (4.3.4)$$

$$R^2 = 0.9644, \quad SE = 0.9644$$

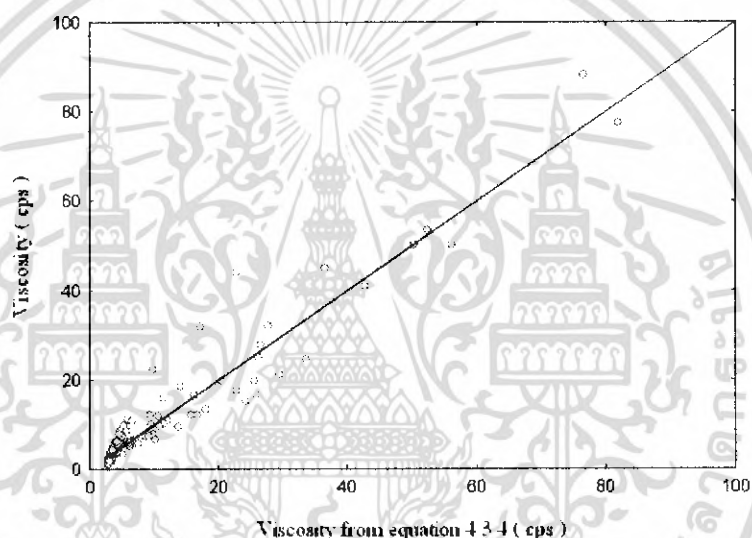
โดยที่ B = [ ความเข้มข้นของน้ำตาลไย 12 - 63 °Brix ]

T = [ อุณหภูมิของน้ำตาลไย 3 - 71 °C ]

$\mu$  คือ ความหนืด (cps)

T คือ อุณหภูมิ (°C)

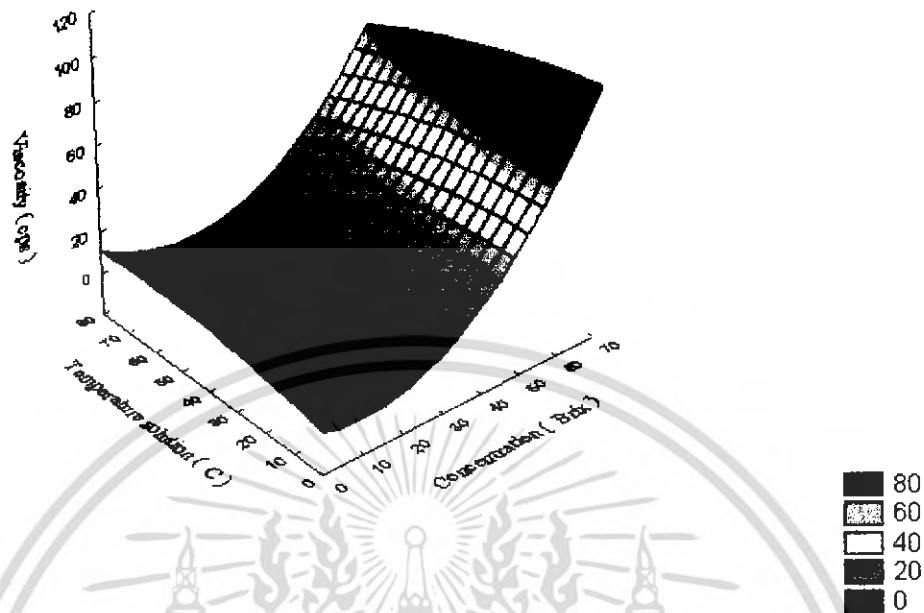
B คือ ความเข้มข้นของน้ำตาลไย (°Brix)



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ ของความหนืดจากสมการความสัมพันธ์รูปแบบที่ 2 และจากการทดลอง

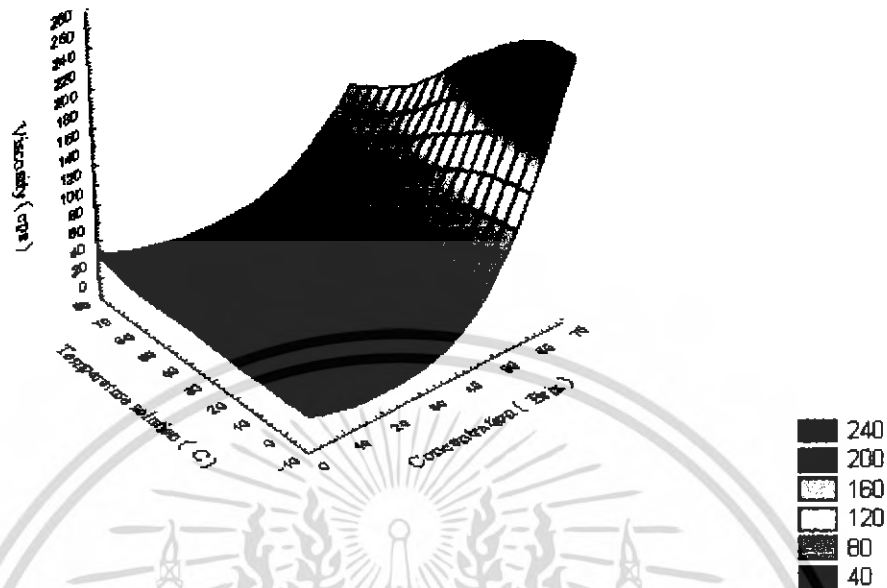
จากรูปที่ 4.26, 4.27 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่าค่าสหสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่ดี  $R^2$  และค่า Std. Error อยู่ในเกณฑ์ดี

จากรูปที่ 4.28 การวิเคราะห์ความหนืดในสมการความสัมพันธ์แบบที่ 1 พบว่าตัวแปรที่มีผลทำให้ความหนืดมีความแตกต่างกัน มีอยู่ 2 ตัวแปรคือ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ โดยที่ค่าความเข้มข้น 12 °Brix และ อุณหภูมิ 26.5 องศาเซลเซียส มีค่าความหนืดต่ำที่สุด และเมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิต่ำ ค่าความหนืดจะมากกว่าที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากสมการรูปแบบที่ 1 กับ ความเข้มข้น และ อุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.29 การวิเคราะห์ความชื้นในสมการความสัมพันธ์แบบที่ 2 พบว่าตัวแปรที่มีผลทำให้ความชื้นมีความแตกต่างกัน มีอยู่ 2 ตัวแปรคือ ความเข้มข้น และอุณหภูมิ โดยที่ค่าความเข้มข้น 0-45 °Brix มีค่าความชื้นไม่แตกต่างกันมาก และเมื่อค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (มากกว่า 45 °Brix) จะส่งผลให้ความชื้นเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิต่ำ ( 3 ถึง 45 องศาเซลเซียส ) ค่าความชื้นจะมากกว่าที่อุณหภูมิสูง

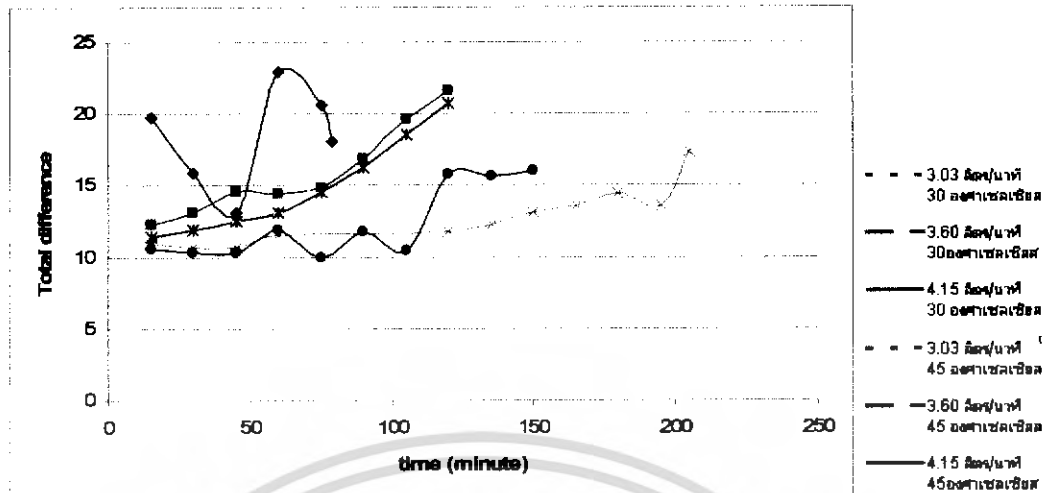


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นที่ได้จากสมการรูปแบบที่ 2 กับ ความเข้มข้น และ อุณหภูมิ

สมการความสัมพันธ์ของความชื้น 2 รูปแบบ สามารถใช้กับน้ำตาลไอ ที่มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 12 - 63 °Brix และ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 3 – 71 องศาเซลเซียส

#### 4.3.3 ผลของสภาวะเริ่มต้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำตาลไอ

จากการระเหยน้ำตาลไอพบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.30 ซึ่งผลการทดลองที่ 1 จะมีค่าที่ไม่มีแนวโน้ม และ ขัดจากการทดลองอื่น ๆ จึงหันมาองความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของสีเฉพาะการทดลองที่ 2 – 6 เท่านั้น



รูปที่ 4.30 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเมื่อเวลาผ่านไป

การเปลี่ยนแปลงของสีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น โดยในช่วงแรกความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 60 นาที การเปลี่ยนแปลงจะเพิ่มขึ้นในลักษณะของเอกซ์โปเนนเชียล ( Exponential ) จึงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของสีในระหว่างการระเหย ดังนี้

$$\Delta E = \exp(kt) \quad (4.3.5)$$

เมื่อ  $\Delta E$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี ( Total different )

$k$  คือ ค่าคงที่

$t$  คือ เวลา (นาที)

ซึ่งค่า  $k$  ขึ้นกับสภาวะเริ่มต้นของการระเหย ได้แก่ อุณหภูมิน้ำลำไยและอัตราการป้อน

ดังนี้

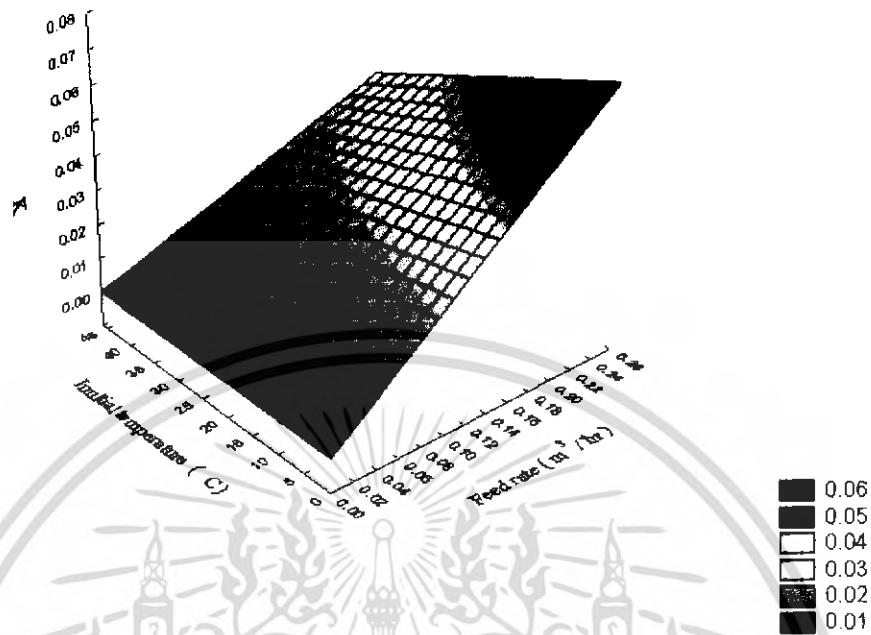
$$k = (0.257495 \times F) - (0.003189 \times F \times T_0) \quad (4.3.6)$$

$$R^2 = 0.9790, SE = 0.00582, p < 0.01$$

เมื่อ  $F$  คือ อัตราการป้อนน้ำลำไย ( $m^3/hr$ )

$T_0$  คือ อุณหภูมิน้ำลำไย ( $^{\circ}C$ )

จากรูปที่ 4.31 พบว่าเมื่ออัตราการป้อนมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่า  $k$  เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรง ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิวัดจุดบิไม่ค่อยมีผลต่อค่า  $k$  ที่อัตราการป้อนวัดจุดบิมีค่าต่ำ และพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นจะมีผลต่อค่า  $k$  มากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $k$  กับสถานะเริ่มต้นคือ อัตราเร็วการป้อนและอุณหภูมิ  
วัตถุดิบ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า  $F$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมากกว่าค่า  $T_0$  มาก อาจเนื่องมาจากว่าช่วงของอุณหภูมิเริ่มต้นที่เปลี่ยนแปลงในการทดลองแคบเกินไปจนไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของสีที่เปลี่ยนแปลงมากนัก

#### 4.4 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency)

ประสิทธิภาพทางความร้อน คัดจากพลังงานที่ต้องการในการระเหยน้ำเทียบกับพลังงานจากเชื้อเพลิงแก๊สที่ใช้ในการทำน้ำร้อน โดยที่ Heating Value ของแก๊ส L.P.G มีค่าเท่ากับ 12,000 kcal/kg หรือ 50232 kJ/kg

การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การทดลองที่ 1 จากการทำ สมดุลมวลได้ปริมาณน้ำที่ระเหยเท่ากับ 33.165 kg ความดันเฉลี่ยในห้องระเหยเท่ากับ 71.16 kPa จากตารางไอน้ำได้ค่า  $h_g$  เท่ากับ 2281.76 /kg และน้ำที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน ( $m_w$ ) จำนวน 100 kg อุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส ต้มให้ถึง 80 องศาเซลเซียส ได้ว่า

$$\eta = \left( \frac{(m_b c_p \Delta T) + (m_v \times h_{fg})}{m_g \times \text{heating value}} \right) \times 100 \quad (4.4.1)$$

$$= \left( \frac{(100 \times 4.186 \times (80 - 30)) + (33.165 \times 2281.76)}{(2.80 \times 50232)} \right) \times 100$$

$$= 68.685\%$$

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการทำระเหยน้ำลำไยที่การทดลองต่าง ๆ

การทดลอง	ปริมาณแก๊สที่ซึ่ $m_b$ (kg)	น้ำที่ระเหยได้ $m_v$ (kg)	$h_{fg}$ (kJ/kg)	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน (%)
1	2.80	33.165	2281.76	68.685
2	3.46	36.660	2273.08	59.988
3	2.82	37.587	2275.68	75.159
4	6.02	34.320	2274.67	32.737
5	3.58	37.587	2276.13	59.213
6	4.24	37.140	2268.67	49.388

จากตารางที่ 4.2 พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 57.53 % และอาจเกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากมีการเพิ่มอุณหภูมิของตัวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้สูงขึ้น ใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำร้อนก่อนการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำลำไย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการทำน้ำลำไยเข้มข้นด้วยเครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง โดยใช้สภาวะเริ่มต้นของน้ำลำไยคือ ความเข้มข้น 12 °Brix , อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำลำไย 30 °c และ 45 °c , อัตราการป้อน  $5 \times 10^{-5} - 7 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{sec}$  ผลที่ได้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ปัจจัยที่สำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมในเครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง คือ อุณหภูมิวัตถุดิบ ปัจจัยที่มีผลรองลงมา คือ ความเข้มข้นวัตถุดิบและอัตราการป้อน ในขณะที่อุณหภูมิน้ำร้อนไม่ค่อยมีผลมากนัก โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลำไยเพิ่มขึ้น อัตราการป้อนเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นลดลง และ อุณหภูมิน้ำร้อนลดลง ดังแสดงสมการความสัมพันธ์ของค่า U กับตัวแปรต่างๆ คือ

$$U_1 = (1.4T_r^2) - (1.4T_0 \times T_r) + (939779.9 \times F \times T_r) - (0.4 \times B^2)$$

2. ค่าความเข้มข้นของน้ำลำไยที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในระหว่างการระเหย มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียล ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$B / B_0 = \exp(kt)$$

$$k = 0.112822F - 0.001562FT_0$$

3. ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ที่ใช้อธิบายคุณสมบัติของน้ำลำไย (ความหนาแน่นและความหนืด) กับค่าความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำลำไยที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ดี นอกจากนี้ ความเข้มข้นจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นในลักษณะเชิงเส้น ในขณะที่มีผลที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเอกซ์โปเนนเชียลกับค่าความหนืด ส่วนอุณหภูมิมิผลต่อค่าทั้งสองเพียงเล็กน้อย

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของน้ำลำไยกับความเข้มข้นและอุณหภูมิ ที่ได้ดังนี้

$$\rho = 1.009237 + 0.003272B + 0.000018B^2 - 0.000224T - 0.000005BT$$

$$\mu = 2.534507 + \exp(-1.36847 + 0.107431B - 0.017666T)$$

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. “ข้อมูลการส่งออกลำไย.” <http://www.oae.go.th/longan48/>. 2548.
- [2] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. “ผลการประมาณการผลผลิตลำไยปี 2547.” <http://www.oae.go.th/mis/predict/Forecast/longan47.htm>. 2548.
- [3] พาวิณ มะโนชัย และคณะ. “การผลิตลำไย.” สิรินาฏการพิมพ์: เชียงใหม่. 2543.
- [4] โครงการพัฒนาขีดความสามารถในธุรกิจลำไยไทย. “ผลการประมาณการผลผลิตลำไยปี 2547.” <http://202.28.248.4/longan/site/static/general.php>. 2548.
- [5] วิไล รังสาดทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่3. กรุงเทพฯ : บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด.
- [6] Frederike Wagner, “Numerical Simulation of Falling Films using the Softwaresystem Fluent”, [www.tfh-berlin.de/.../2002/scheckel/master.html](http://www.tfh-berlin.de/.../2002/scheckel/master.html), 2005.
- [7] McCabe, Smith and Harriott, “Unit Operations of Chemical Engineering”, Sixth edition. Singapore , McGraw-Hill, 2001.
- [8] Maharashtra Industries Directory, “Product Range”, [www.dcmsengg.com/product\\_range.htm](http://www.dcmsengg.com/product_range.htm). 2005.
- [9] Dave Norman, “Industrial Vacuum Pump”, [www.rcuniverse.com/.../m\\_2767802/tm.htm](http://www.rcuniverse.com/.../m_2767802/tm.htm). 2005.
- [10] Auric techno services, “Evaporation system”, [www.auricent.com/index2.htm](http://www.auricent.com/index2.htm) , 2005.
- [11] Gıda Fabrikaları, “ [www1.gantep.edu.tr/~dalgic/evaporator.htm](http://www1.gantep.edu.tr/~dalgic/evaporator.htm) ” , 2005.
- [12] AHL, “Evaporation Technologies Rising Film”, [Online], [www.lundbergassociates.com/.../rising\\_film.html](http://www.lundbergassociates.com/.../rising_film.html), 2005.
- [13] SPG Media Limited a subsidiary of SPG Media Group PLC, “Food processing – technology”, [www.foodprocessing-technology.com/projects/ar](http://www.foodprocessing-technology.com/projects/ar), 2005.
- [14] Albert I. and Gustavo V, “Unit Operations in Food Engineering”, CRC PRESS, 2003.
- [15] Frioni L., and Pacheco C, “ Experiment results for evaporation of sucrose solution using a climbing/falling film plate evaporator” Journal of Food Engineering, (64) : 471-480, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] Nindo C., Powers J., Singh P. and Tang J, “Viscosity of blueberry and raspberry juices for processing applications” *Journal of Food Engineering*, (69) : 343-350, 2005.
- [17] C.A. Zuritz, E.Munoz puntas, H.H. Mathey, E.H. Perez, A.Gascon, L.A. Rubio, C.A. Carullo, R.E. Chernikoff and M.S. Cabeza, “Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures” *Journal of Food Engineering*, (2) : 143-149, 2005.
- [18] Leslaw Fuszczak and Teresa Fortuna, “Viscosity of Concentrated Strawberry Juice” *Electronic Journal of Polish Agricultural*, (2) : 1-19, 2003.
- [19] ฅฎฐฎฎฎ, ฐว้ฐฐ, ฐีรึฎ และหน้ฎฎฎ. “การศึฎความหน้และควมหน้คของน้ ส้บประรดและน้เสาวรสที่ควมแ้ข้ข้และอุณหภูมิต้งๆ.” ปรึฎฎฎน้พน้ วึศวกรรรมศึฎ บ้ณทึตคณะวึศวกรรรมศึฎ สฎฐบ้ณเทคโนโลยึพระจอมเกล้าเจ้าคุณทพารลาคกระบ้ง. 2543.
- [20] Patricia Moreira Azoubel, Débora Cristina Cipriani, Ânnoar Abbas El-Aouar, Graziella Colato Antonio and Fernanda Elizabeth XidiehMurr, “Effect of concentration on the physical properties of cashew juice” *Journal of Food Engineering*, (66) : 413-417, 2005.
- [21] Steven, Jong-Leng and Philip, “CFD Development for sugar mill evaporator”, [www.cfd.com.au/cfd\\_confo3/papers/121Pen.pdf](http://www.cfd.com.au/cfd_confo3/papers/121Pen.pdf), 2003.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองของสภาวะการทดลองที่ 1

เวลา (นาที)	mcond (kg)	T <sub>s</sub> °C	P <sub>s</sub> (in Hg)	T <sub>v</sub> °C	Pboiler (bar)	H (cm)	Tpreheat °C	T <sub>b</sub> °C	T <sub>e</sub> °C	T <sub>f</sub> °C	T <sub>c</sub> °C	B (°Brix)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	μ (cP)
0	0.9	63	23.25	84	0.4	28	56	67	68	35	59	12	1.0318	1.1882
15	7.038	62	24	71	0.3	23	56	60	60	56	58.5	16.5	1.0334	1.5538
30	5.027	68	21.5	76	0.4	12.5	60	62	64	60	68.5	18	1.0404	2.0108
45	3.394	70	16.5	89	0.6	2.5	68	72	73	63	63.5	19	1.0454	2.1022
60	6.716	74	19.8	86	0.5	6	66	70	70	70	69	30	1.0942	3.8388
75	7.505	70	21	82	0.5	1	62	67	68	67	65	54	1.2022	22.393

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองของสภาวะการทดลองที่ 2

เวลา (นาที)	mcond (kg)	T <sub>s</sub> °C	P <sub>S</sub> (in Hg)	T <sub>v</sub> °C	P <sub>boiler</sub> (bar)	H (cm)	T <sub>preheat</sub> °C	T <sub>b</sub> °C	T <sub>E</sub> °C	T <sub>F</sub> °C	T <sub>c</sub> °C	B (°Brix)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	μ (cP)
0	0	62	23.5	81	0.3	28	53	68	68	35	60	12	1.0318	1.1882
15	6.349	56	25.5	64	0.1	25	55	56	56	55	55	15	1.035	1.4624
30	4.165	58	25	64	0.1	21	54	54	56	56	57	18	1.0358	1.7366
45	3.815	66	24.1	68	0.1	20.5	55	57	58	60	60	21	1.041	1.9194
60	3.677	63	23.25	69	0.1	13	56	58	59	61	62	21.8	1.0524	2.3764
75	3.303	65	22.75	71	0.1	11	59	61	61	62.5	64	24.5	1.0654	2.9248
90	5.069	60	24.5	68	0.1	7	57	58	59	60	61	35	1.0972	5.1184
105	4.615	59	24.9	69	0.1	2	56	59	59	59	60	47	1.1846	16.7262
111	1.078	60	24.6	68	0.1	1	56	59	59	60	60	57	1.2198	40.8558

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองของสภาวะการทดลองที่ 3

เวลา (นาที)	mcond (kg)	T <sub>s</sub> °C	P5 (in Hg)	T <sub>v</sub> °C	Pboiler (bar)	H (cm)	T <sub>preheat</sub> °C	T <sub>b</sub> °C	T <sub>e</sub> °C	T <sub>f</sub> °C	T <sub>c</sub> °C	B (°Brix)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	μ (cP)
0		56	24.88928	72	0.2	24	50	58	59	34	54	12	1.0318	1.1882
15	5.73	58	25.09596	64	0.1	22.5	52	56	57	55	55	13	1.0388	1.6452
30	5.1	65	22.49779	78	0.3	17	56	61	62	61	61	16	1.0472	1.828
45	5.5	73	19.25007	85	0.5	13	60	67	69	69.5	71	22	1.0624	2.1936
60	4.49	69	21.49395	76	0.3	8.5	62	66	68	70	66	32	1.0892	3.2904
75	6.14	58	25.00738	66	0.1	2.5	54	58	59.5	54.5	57.5	45	1.1608	18.6456
90	3.82	57	24.09212	63	0.1	0.5	54	56	58	58	58	63	1.2648	77.4158

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองของสภาวะการทดลองที่ 4

เวลา (นาที)	mcond (kg)	T <sub>s</sub> °C	P5 (in Hg)	T <sub>v</sub> °C	Pboiler (bar)	H (cm)	Tpreheat °C	T <sub>b</sub> °C	T <sub>E</sub> °C	T <sub>F</sub> °C	T <sub>C</sub> °C	B (°Brix)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	μ (cP)
0	0	58	24.09212	62	0.2	22.5	50	56	59	52	57.5	12	-0.4204	1.0968
15	2.3	58	24.23974	60	0.2	23.5	52	54	58	58	58	13	1.0444	2.1936
30	1.34	59	24.00354	61	0.2	23.5	54	55	56	60	59	13.5	1.0454	2.1936
45	1.98	59	24.00354	61	0.2	21	52	54	56	60	58	14.5	1.0464	2.742
60	1.9	58	24.00354	62	0.2	19	52	55	56	61	58	15	1.0478	2.742
75	1.82	58	24.00354	61	0.2	18	51	54	56	61	58	16	1.0508	2.5592
90	1.829	58	23.73782	62	0.2	15	52	55	57	61	60	17	1.0598	2.5592
105	1.79	60	23.50162	63	0.2	13	52	55	58	62.5	60	19	1.0646	2.5592
120	0.849	60	23.50162	64	0.2	11	53	57	58	63	59.5	20	1.078	3.4732
135	1.842	60	23.50162	64	0.2	10	54	56	58	63	62	22	1.088	3.656
150	1.825	60	23.20638	64	0.2	7	50	54	60	65	61	24	1.0912	3.656
165	1.743	61	23.50162	64	0.2	6	54	56	59.5	64	61	35	1.1088	6.398
180	1.707	61	22.9997	66	0.2	4	54	57	60	63	63	37	1.1258	6.7636
195	1.67	61	22.9997	66	0.3	2.5	54	58	60	62	63	42	1.1428	6.7636
205	0.862	64	21.99587	68	0.2	0.5	58	60	64	65	65	46	1.154	9.597

ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองของสภาวะการทดลองที่ 5

เวลา (นาที)	mcond (kg)	T <sub>s</sub> °C	P5 (in Hg)	T <sub>v</sub> °C	Pboiler (bar)	H (cm)	T <sub>preheat</sub> °C	T <sub>b</sub> °C	T <sub>E</sub> °C	T <sub>F</sub> °C	T <sub>C</sub> °C	B (° Brix)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	μ (cP)
0	0	64	22.75	85	0.3	21	56	68	69	49	62	12	1.0294	1.0968
15	4.65	61	24	68	0.1	19	56	60	60	63	62	15	1.0498	2.1022
30	4.49	60	24	66	0.1	8.5	56	58	60	59	60.5	18	1.0562	3.0162
45	3.6	63	23.5	66	0.1	15	58	56	60	60	61.5	21	1.078	3.3818
60	3.86	64	24	66	0.1	11	58	54	60	60	62	24	1.093	4.4786
75	3.4	64	24	69	0.1	8	52	58	60	62	62.5	35	1.1128	6.0324
90	3.3	64	22.5	69.5	0.1	6	55	60	62	61	62.5	44	1.1486	10.968
105	2.98	64	22.25	71	0.1	3	56	62	64	64	65	53	1.214	27.6942
115	1.92	64	22	72	0.1	1	56	62	64	62	62	63	1.2662	88.1096

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินสงวนไว้ให้พร้อมจะใช้งานเมื่อคุณสั่งซื้อเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองของสภาวะการทดลองที่ 6

เวลา (นาที)	mcond (kg)	T <sub>s</sub> °C	P5 (in Hg)	T <sub>v</sub> °C	Pboiler (bar)	H (cm)	T <sub>preheat</sub> °C	T <sub>b</sub> °C	T <sub>e</sub> °C	T <sub>f</sub> °C	T <sub>c</sub> °C	B (° Brix)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	μ (cP)
0	0.9	47	0.914	59	0.2	28	50	52	54	45	46	12	1.0294	1.0968
15	3.83	48	0.918	59	0.1	26	45	46	48	48	47	14	1.0514	2.1022
30	2.25	46	0.921	59	0.1	24	44	44	48	49	48	14.5	1.0542	2.1022
45	1.69	46	0.923	47	0	22.5	43	44	46	49	46	15.5	1.0568	2.1022
60	1.42	46	0.921	47	0	20	42	42	44	49	45.5	15.8	1.059	2.1936
75	1.15	46	0.914	49	0	19	44	44	45	49	47	17	1.066	2.4678
90	2.08	54	0.864	59	0.2	16.5	48	51	52	55	53	18.5	1.07	2.5592
105	3.87	58	0.83	65	0.3	14	50	56	58	58	58	22.5	1.0844	3.4732
120	4.32	61	0.813	69	0.3	10	54	58	59	58	59	28	1.1132	5.027
135	4.81	63	0.796	70	0.3	5.5	56	60	60	62	59	4.65	1.1566	12.0648
150	4.05	66	0.762	73	0.4	1	58	62	64	63	62	60	1.2416	50.1786

## ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิง  
ทฤษฎีและกึ่งทฤษฎี กับความเข้มข้น อัตราการป้อน อุณหภูมิน้ำลำไย และอุณหภูมิน้ำร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ข.1 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงทฤษฎี  
กับความเข้มข้น อัตราการป้อน อุณหภูมิน้ำลำไย และอุณหภูมิน้ำร้อน**

Regression Summary for Dependent Variable:  $\theta$  (ata7.5\_u1\_u2\_new\_feedsecond)  
 R= .92347492 R<sup>2</sup>= .85280593 Adjusted R<sup>2</sup>= .84027878  
 F(4,47)=68.077 p<.00000 Std.Error of estimate: 790.90

	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(47)	p-level
N=51						
T <sup>*2</sup>	2.19629	0.443310	1.4	0.3	4.95429	0.000010
T <sup>*Tc</sup>	-2.62951	0.610141	-1.4	0.3	-4.30967	0.000083
F <sup>*Tc</sup>	1.47730	0.386329	939779.9	245761.5	3.82395	0.000386
B <sup>*2</sup>	-0.20190	0.086140	-0.4	0.2	-2.37143	0.021869

**ข.2 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงทฤษฎี กับ  
ความเข้มข้น อัตราการป้อน อุณหภูมิน้ำลำไย และอุณหภูมิน้ำร้อน**

Regression Summary for Dependent Variable:  $\theta$  (ata7.5\_u1\_u2\_new\_feedsecond)  
 R= .94137089 R<sup>2</sup>= .88617915 Adjusted R<sup>2</sup>= .87649226  
 F(4,47)=91.482 p<.00000 Std.Error of estimate: 328.66

	Beta	Std. Err. of Beta	B	Std. Err. of B	t(47)	p-level
N=51						
F <sup>*Tc</sup>	1.26346	0.339722	379823.1	102127.8	3.71910	0.000532
B <sup>*2</sup>	-0.29134	0.074869	-0.3	0.1	-3.89140	0.000313
Tc <sup>*2</sup>	1.38446	0.389828	0.4	0.1	3.55147	0.000883
T <sup>*Tc</sup>	-1.50782	0.536533	-0.4	0.1	-2.81031	0.007193

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการ  
ระเหย กับอัตราการป้อนและอุณหภูมิวัดจุดคิบเริ่มต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ ค.1** ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นระหว่างการระเหยที่สภาวะที่ 1

Regression Summary for Dependent Variable:  $\ln C$  (ครั้งที่ 1)

$R = .97926531$   $R^2 = .95896054$  Adjusted  $R^2 = .95075265$

$F(1,5) = 116.83$   $p < .00012$  Std.Error of estimate: .14115

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(5)	p-level
t	0.979265	0.090597	0.013715	0.001269	10.80898	0.000118

**ตารางที่ ค.2** ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นระหว่างการระเหยที่สภาวะที่ 2

Regression Summary for Dependent Variable:  $\ln C$  (ครั้งที่ 2n)

$R = .99191831$   $R^2 = .98390194$  Adjusted  $R^2 = .98188968$

$F(1,8) = 488.95$   $p < .00000$  Std.Error of estimate: .11724

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(8)	p-level
t	0.991918	0.044858	0.012384	0.000560	22.11231	0.000000

**ตารางที่ ค.3** ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นระหว่างการระเหยที่สภาวะที่ 3

Regression Summary for Dependent Variable:  $\ln C$  (ครั้งที่ 3)

$R = .98939915$   $R^2 = .97891068$  Adjusted  $R^2 = .97539580$

$F(1,6) = 278.50$   $p < .00000$  Std.Error of estimate: .14419

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(6)	p-level
t	0.989399	0.059286	0.016817	0.001008	16.68845	0.000003

**ตารางที่ ค.4** ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นระหว่างการระเหยที่สภาวะที่ 4

Regression Summary for Dependent Variable:  $\ln C$  (ครั้งที่ 4)

$R = .98391062$   $R^2 = .96808011$  Adjusted  $R^2 = .96580012$

$F(1,14) = 424.60$   $p < .00000$  Std.Error of estimate: .13006

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(14)	p-level
t	0.983911	0.047749	0.005608	0.000272	20.60578	0.000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นระหว่างกระเหยที่สภาวะที่ 5

Regression Summary for Dependent Variable:  $\ln C$  (ครั้งที่ 5)

$R = .99821233$   $R^2 = .99642785$  Adjusted  $R^2 = .99598133$

$F(1,8) = 2231.5$   $p < .00000$  Std.Error of estimate: .06268

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(8)	p-level
t	0.998212	0.021131	0.014000	0.000296	47.23927	0.000000

ตารางที่ ค.6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นระหว่างกระเหยที่สภาวะที่ 6

Regression Summary for Dependent Variable:  $\ln C$  (ครั้งที่ 6)

$R = .95753174$   $R^2 = .91686703$  Adjusted  $R^2 = .90855373$

$F(1,10) = 110.29$   $p < .00000$  Std.Error of estimate: .22422

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(10)	p-level
t	0.957532	0.091177	0.008001	0.000762	10.50187	0.000001

ตารางที่ ค.7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่า k

Regression Summary for Dependent Variable: k (k)

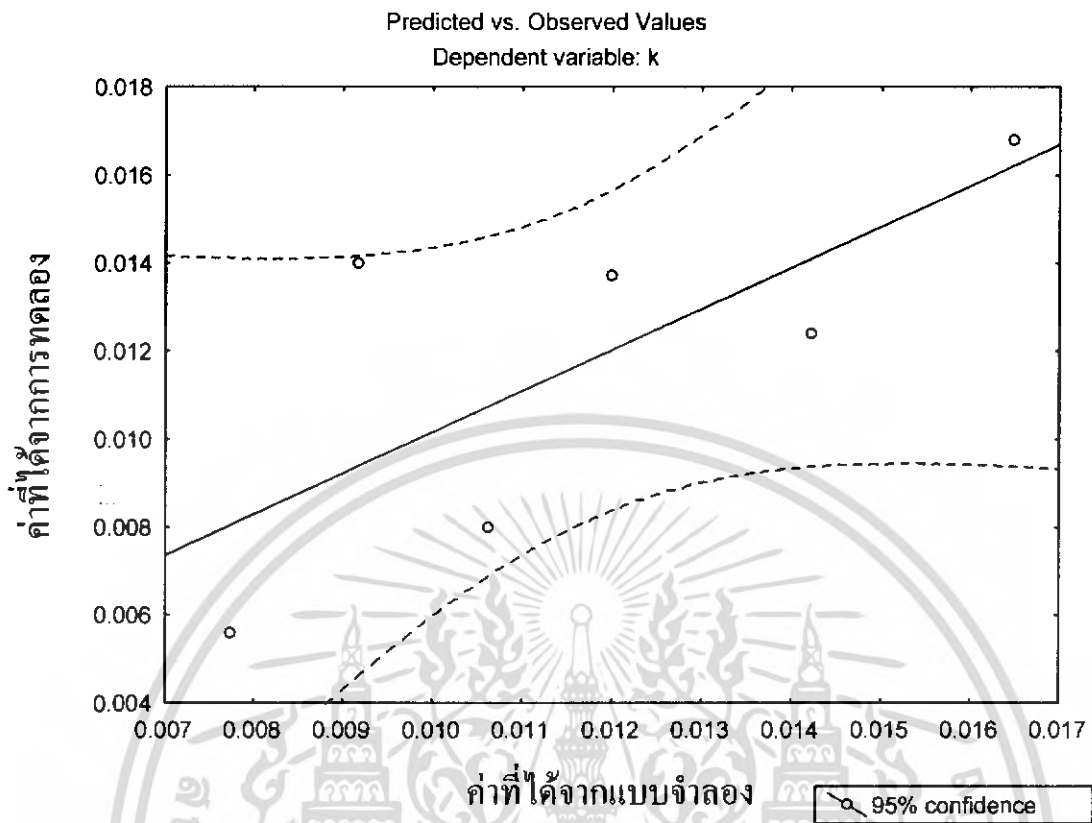
$R = .97726300$   $R^2 = .95504296$  Adjusted  $R^2 = .93256444$

$F(2,4) = 42.487$   $p < .00202$  Std.Error of estimate: .00321

	Beta	Std.Err.	B	Std.Err.	t(4)	p-level
F	1.98677	0.540574	0.112822	0.030697	3.67530	0.021292
FT	-1.05196	0.540574	-0.001562	0.000803	-1.94601	0.123522

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.1 ค่า k ที่ได้จากแบบจำลองและการทดลองจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ผลการทดลอง และผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของน้ำลำไย

- ความหนาแน่น
- ความหนืด
- การเปลี่ยนแปลงของค่าสี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ค่าความหนืดและความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองที่ 1-4 ที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลอง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (°Brix)	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/ml)	ความหนืด (cps)
1	0	12	59	1.0318	1.1882
	15	14.25	58.5	1.0334	1.5538
	30	17.25	68.5	1.0404	2.0108
	45	18.5	63.5	1.0454	2.1022
	60	24.5	69	1.0942	3.8388
	75	42	65	1.2022	22.393
2	0	12	60	1.0318	1.1882
	15	15	55	1.035	1.4624
	30	18	57	1.0358	1.7366
	45	21	60	1.041	1.9194
	60	21.8	62	1.0524	2.3764
	75	24.5	64	1.0654	2.9248
	90	35	61	1.0972	5.1184
	105	47	60	1.1846	16.7262
	111	57	60	1.2198	40.8558
3	0	12	54	1.0318	1.1882
	15	13	55	1.0388	1.6452
	30	16	61	1.0472	1.828
	45	22	71	1.0624	2.1936
	60	32	66	1.0892	3.2904
	75	45	57.5	1.1608	18.6456
	90	63	58	1.2648	77.4158
4	0	12	57.5	1.0294	1.0968
	15	13	58	1.0444	2.1936
	30	13.5	59	1.0454	2.1936
	45	14.5	58	1.0464	2.742
	60	15	58	1.0478	2.742
	75	16	58	1.0508	2.5592

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 ค่าความหนืดและความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองที่ 4-6 ที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลอง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (°Brix)	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/ml)	ความหนืด (cps)
	90	17	60	1.0598	2.5592
	105	19	60	1.0646	2.5592
	120	20	59.5	1.078	3.4732
	135	22	62	1.088	3.656
	150	24	61	1.0912	3.656
	165	35	61	1.1088	6.398
	180	37	63	1.1258	6.7636
	195	42	63	1.1428	6.7636
	210	46	65	1.154	9.597
5	0	12	62	1.0294	1.0968
	15	15	62	1.0498	2.1022
	30	18	60.5	1.0562	3.0162
	45	21	61.5	1.078	3.3818
	60	24	62	1.093	4.4786
	75	35	62.5	1.1128	6.0324
	90	44	62.5	1.1486	10.968
	115	63	62	1.2662	88.1096
6	0	12	46	1.0294	1.0968
	15	14	47	1.0514	2.1022
	30	14.5	48	1.0542	2.1022
	45	15.5	46	1.0568	2.1022
	60	15.8	45.5	1.059	2.1936
	75	17	47	1.066	2.4678
	90	18.5	53	1.07	2.5592
	105	22.5	58	1.0844	3.4732
	120	28	59	1.1132	5.027
	135	46.5	59	1.1566	12.0648
	150	60	62	1.2416	50.1786

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.3 ค่าความหนืดและความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองที่1-4 ที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลอง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (°Brix)	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/ml)	ความหนืด (cps)
1	0	12	12.5	1.0216	2.1022
	15	14.25	13.5	1.052	2.6506
	30	17.25	13.1	1.06	3.2904
	45	18.5	14	1.0624	3.3818
	60	24.5	3	1.1374	11.2422
	75	42	7.7	1.212	44.0548
2	0	12	12.5	1.0216	2.1022
	15	15	8	1.0526	3.9302
	30	18	6.5	1.0568	4.3872
	45	21	14	1.0638	4.8442
	60	21.8	18	1.0742	5.3926
	75	24.5	18.5	1.0848	6.3066
	90	35	17	1.12	11.9734
	105	47	8.7	1.194	44.9688
	111	57	13.8	1.2492	
3	0	12	12.5	1.0216	2.1022
	15	13	8	1.059	3.7474
	30	16	2.5	1.0738	5.1184
	45	22	15.5	1.0946	5.6668
	60	32	15	1.1046	7.312
	75	45	1.8	1.1734	24.4038
	90	63	13	1.293	
4	0	12	12.5	1.0216	2.1022
	15	13	16.5	1.0535	3.0162
	30	13.5	16.5	1.0558	3.199
	45	14.5	16.5	1.0614	3.4732
	60	15	18	1.06552	3.8388
	75	16	13.1	1.07112	4.0216

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ค่าความหนืดและความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองที่4-6 ที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลอง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (°Brix)	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/ml)	ความหนืด (cps)
4	90	17	17.1	1.07472	4.2958
	105	19	18.1	1.07952	4.3872
	120	20	18	1.0893	5.3926
	135	22	18.8	1.09904	6.0324
	165	35	23.2	1.1176	7.8604
	180	37	24	1.13428	10.3282
	195	42	23.1	1.1556	13.253
	210	46	23.8	1.1742	16.7262
5	0	12	12.5	1.0216	2.1022
	15	15	13	1.0666	4.4786
	30	18	10	1.0822	5.8496
	45	21	5.9	1.1008	8.226
	60	24	12.8	1.1124	9.6884
	75	35	11	1.1474	15.9036
	90	44	11	1.1674	25.0436
	105	53	23.5	1.2198	53.5604
	115	63	23.5	1.2872	
6	0	12	12.5	1.0216	2.1022
	15	14	16	1.06808	3.5646
	30	14.5	10	1.0686	3.5646
	45	15.5	14	1.0696	3.656
	60	15.8	17.5	1.0708	3.7474
	75	17	22	1.07428	4.113
	90	18.5	8	1.088	5.3012
	105	22.5	8	1.0938	7.312
	120	28	14.5	1.12988	10.6938
	135	46.5	18.8	1.17532	21.2048
	150	60	23.2	1.25684	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ค่าความหนืดและความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองที่ 1-4 ที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลอง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (°Brix)	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/ml)	ความหนืด (cps)
1	0	12	26.5	1.0202	1.9194
	15	14.25	26	1.0484	2.3764
	30	17.25	26.2	1.0574	2.742
	45	18.5	25.8	1.0586	2.8334
	60	24.5	26	1.1314	8.683
	75	42	26	1.2072	31.8072
2	0	12	26.5	1.0202	1.9194
	15	15	26.8	1.0462	3.1076
	30	18	26.1	1.0528	3.3818
	45	21	26.1	1.0614	3.9302
	60	21.8	26.1	1.071	4.3872
	75	24.5	26.5	1.0804	5.3926
	90	35	26	1.1162	9.8712
	105	47	26	1.1856	32.1728
	111	57	26	1.2402	-
3	0	12	26.5	1.0202	1.9194
	15	13	25.9	1.0552	3.199
	30	16	26	1.0718	3.7474
	45	22	26	1.092	3.8388
	60	32	25.5	1.1002	5.7582
	90	63	25.8	1.2846	-
4	0	12	26.5	1.0202	1.9194
	15	13	27.9	1.0494	2.6506
	30	13.5	27.9	1.0518	2.9248
	45	14.5	27.9	1.0564	3.1076
	60	15	27.9	1.0608	3.199
	75	16	27.8	1.067	3.4732

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.6 ค่าความหนืดและความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองที่4-6 ที่อุณหภูมิต่างๆ

การทดลอง	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (°Brix)	อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (g/ml)	ความหนืด (cps)
4	90	17	27.9	1.0702	3.7474
	105	19	27.8	1.0752	3.7474
	120	20	28	1.0856	4.7528
	135	22	28	1.095	5.3926
	150	24	28	1.1062	6.0324
	165	35	28	1.1152	7.4034
	180	37	28.1	1.1314	9.6884
	195	42	28	1.15	12.1
	210	46	28	1.1704	15.2638
5	0	12	26.5	1.0202	1.9194
	15	15	27	1.0644	3.7474
	30	18	25.8	1.079	4.8442
	45	21	26.5	1.094	6.1238
	60	24	26.5	1.1074	7.769
	75	35	26.5	1.14	12.0648
	90	44	26.5	1.1638	19.8338
	105	53	26	1.2192	50.1786
	115	63	26	1.2834	-
6	0	12	26.5	1.0202	1.9194
	15	14	28.1	1.0642	3.3818
	30	14.5	28.1	1.0652	3.3818
	45	15.5	28	1.0672	3.4732
	60	15.8	28	1.0688	3.5646
	75	17	28.1	1.0718	3.8388
	90	18.5	28	1.0824	4.2044
	105	22.5	28	1.0856	6.2152
	120	28	28	1.1234	8.683
	135	46.5	28	1.1704	19.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.7 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น  
รูปแบบที่ 1 กับความเข้มข้น

Parameter Estimates (sta15_all_vis,den_^2) Sigma-restricted parameterization										
Effect	Param.	Std.Err	t	p	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt	Beta (?)	St.Err.?	-95.00% Cnf.Lmt	+95.00% Cnf.Lmt
Intercept	0.986465	0.002632	374.8644	0.00	0.981290	0.991680				
	0.004313	0.000088	48.7594	0.00	0.004138	0.004487	0.966247	0.019817	0.927127	1.006367

ตารางที่ ง.8 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น  
รูปแบบที่ 2 กับความเข้มข้น และอุณหภูมิ

Regression Summary for Dependent Variable: (sta15_all_vis,den_^2) R= .97359212 R^2= .94788161 Adjusted R^2= .94662574 F(4,166)=754.76 p<0.0000 Std. Error of estimate: .01509						
N=171	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(166)	p-level
Intercept			1.009237	0.006963	144.9411	0.000000
	0.733106	0.097097	0.003272	0.000433	7.5502	0.000000
	-0.066999	0.037457	-0.000224	0.000125	-1.7887	0.075486
Bx^2	0.279879	0.093033	0.000018	0.000006	3.0084	0.003036
Tco*Bx	-0.056312	0.050384	-0.000005	0.000004	-1.1176	0.265332

ตารางที่ ง.9 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนืด  
รูปแบบที่ 1 กับความเข้มข้น และอุณหภูมิ

Regression Summary for Dependent Variable: (sta15_all_vis,den_^2) R= .93551746 R^2= .87519292 Adjusted R^2= .87124333 F(5,158)=221.59 p<0.0000 Std. Error of estimate: 5.5151						
N=163	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(158)	p-level
Bx^2	1.995886	0.170075	0.027651	0.002356	11.73533	0.000000
Tco*Bx	-0.610737	0.139233	-0.008000	0.001824	-4.38643	0.000021
	-0.978178	0.197162	-0.549992	0.110857	-4.96129	0.000002
	0.892259	0.242472	0.348349	0.094664	3.67985	0.000320
Tco^2	-0.381561	0.186595	-0.002698	0.001319	-2.04486	0.042528

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.10 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนืด  
รูปแบบที่ 2 กับความเข้มข้น และอุณหภูมิ

	Model is: exponential growth ( $y=c+\exp(b_0+b_1*x_1+b_2*x_2 \dots)$ ) (sta15_all_vis,den_^2)						
	Dependent variable: $\mu$ Loss: Least squares						
	Final loss: 1864.0618503 R=.96442 Variance explained: 93.011%						
N=163	Const.C	Const.B0					
Estimate	2.534507	-1.36847	0.107431	-0.017666			



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.11 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่ 1 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
0	12.00	12.5	4.296	2.102	2.7626	0.00016
15	14.25	13.5	4.4786	2.6506	2.2936	0.00035
30	17.25	13.1	4.9356	3.2904	2	0.00063
45	18.5	14	5.2098	3.3818	2.0658	0.00059
60	24.5	3	16.0864	11.2422	1.8837	0.00252
75	42	7.7	65.1682	44.0548	1.9656	0.00882

ตารางที่ ง.12 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่ 2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	15	8	5.8496	3.9302	1.9808	0.00077
30	18	6.5	6.398	4.3872	1.9305	0.00092
45	21	14	7.1292	4.8442	1.953	0.00099
60	21.8	18	7.8604	5.3926	1.9293	0.00113
75	24.5	18.5	9.2314	6.3066	1.9397	0.00131
90	35	17	16.7262	11.9734	1.8245	0.00292
105	47	8.7	62.7918	44.9688	1.8234	0.01099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.13 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่3 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	13	8	5.5754	3.7474	1.9799	0.00074
30	16	2.5	7.769	5.1184	2.0292	0.00094
45	22	15.5	9.14	5.6668	2.179	0.00086
60	32	15	10.6024	7.312	1.9164	0.00157
75	45	1.8	35.7374	24.4038	1.9408	0.00506

ตารางที่ ง.14 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่4 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	13	16.5	4.57	3.0162	2.0248	0.00056
30	13.5	16.5	4.8442	3.199	2.0234	0.00059
45	14.5	16.5	5.3012	3.4732	2.0429	0.00063
60	15	18	5.6668	3.8388	1.9605	0.00077
75	16	13.1	5.7582	4.0216	1.8853	0.0009
90	17	17.1	6.3066	4.2958	1.947	0.00088
105	19	18.1	6.4894	4.3872	1.9655	0.00088
120	20	18	7.9518	5.3926	1.9578	0.00109
135	22	18.8	8.8658	6.0324	1.9497	0.00123
150	24	21.8	9.2314	6.3066	1.9397	0.00131
165	35	23.2	11.425	7.8604	1.9223	0.00167
180	37	24	14.7154	10.3282	1.8731	0.00235
195	42	23.1	18.4628	13.253	1.8177	0.00327
210	46	23.8	23.6726	16.7262	1.8567	0.0039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.15 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่ 5 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	15	13	6.398	4.4786	1.8797	0.00101
30	18	10	8.5916	5.8496	1.9481	0.0012
45	21	5.9	11.7906	8.226	1.8879	0.00183
60	24	12.8	14.0756	9.6884	1.9212	0.00206
75	35	11	22.1188	15.9036	1.8136	0.00394
90	44	11	35.0062	25.0436	1.826	0.0061
105	53	23.5	73.3942	53.5604	1.777	0.014

ตารางที่ ง.16 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่ 6 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	14	16	5.5754	3.5646	2.1032	0.00059
30	14.5	10	5.5754	3.5646	2.1032	0.00059
45	15.5	14	5.5754	3.656	2.0408	0.00066
60	15.8	17.5	5.6668	3.7474	2.02	0.0007
105	22.5	8	10.511	7.312	1.895	0.00161
120	28	14.5	15.7208	10.6938	1.9503	0.00219
135	46.5	18.8	30.4362	21.2048	1.8913	0.00471

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.17 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่1 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
0	12.00	12.5	4.0216	1.9194	2.8242	0.00014
15	14.25	13.5	3.8388	2.3764	2.1828	0.00036
30	17.25	13.1	4.4786	2.742	2.21	0.0004
45	18.5	14	4.7528	2.8334	2.2757	0.00038
60	24.5	3	12.6132	8.683	1.9209	0.00185
75	42	7.7	45.5172	31.8072	1.8839	0.00713

ตารางที่ ง.18 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่2 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	15	8	4.7528	3.1076	2.0479	0.00056
30	18	6.5	5.027	3.3818	1.9777	0.00067
45	21	14	5.8496	3.9302	1.9808	0.00077
60	21.8	18	6.4894	4.3872	1.9655	0.00088
75	24.5	18.5	7.8604	5.3926	1.9293	0.00113
90	35	17	13.8928	9.8712	1.8429	0.00235
105	47	8.7	44.0548	32.1728	1.7752	0.00843

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.19 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่3 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	13	8	4.7528	3.199	1.9764	0.00063
30	16	2.5	5.5754	3.7474	1.9799	0.00074
45	22	15.5	6.2152	3.8388	2.1884	0.00057
60	32	15	8.5002	5.7582	1.9605	0.00116
75	45	1.8	26.5974	17.5488	2.0256	0.00324

ตารางที่ ง.20 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่4 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	13	16.5	4.113	2.6506	2.0836	0.00045
30	13.5	16.5	4.3872	2.9248	2	0.00056
45	14.5	16.5	4.6614	3.1076	2	0.00059
60	15	18	4.7528	3.199	1.9764	0.00063
75	16	13.1	4.8442	3.4732	1.8206	0.00085
90	17	17.1	5.5754	3.7474	1.9799	0.00074
105	19	18.1	5.6668	3.7474	2.02	0.0007
120	20	18	6.9464	4.7528	1.9359	0.00099
135	22	18.8	7.9518	5.3926	1.9578	0.00109
150	24	21.8	8.7744	6.0324	1.9241	0.00128
165	35	23.2	10.8766	7.4034	1.9487	0.00152
180	37	24	13.8014	9.6884	1.8727	0.00221
195	42	23.1	17.4574	12.1	1.904	0.00264
210	46	23.8	21.936	15.2638	1.8944	0.00337

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.21 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่ 5 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	15	13	5.5754	3.7474	1.9799	0.00074
30	18	10	6.9464	4.8442	1.889	0.00108
45	21	5.9	8.8658	6.1238	1.9126	0.00132
60	24	12.8	10.968	7.769	1.8505	0.00183
75	35	11	17.0004	12.0648	1.848	0.00285
90	44	11	27.2372	19.8338	1.7823	0.00515
105	53	23.5	68.6414	50.1786	1.7727	0.0132

ตารางที่ ง.22 การหาค่า  $m, n$  ในการทดลองที่ 6 ที่อุณหภูมิต่างๆ

เวลา (min)	ความเข้มข้น (°Brix)	T(°C)	ความหนืด (cp) ที่ 150 rpm	ความหนืด (cp) ที่ 100 rpm	n	m
15	14	16	5.027	3.3818	1.9777	0.00067
45	15.5	14	5.1184	3.4732	1.9563	0.0007
60	15.8	17.5	5.2098	3.5646	1.9359	0.00074
75	17	22	5.6668	3.8388	1.9605	0.00077
90	18.5	8	6.2152	4.2044	1.964	0.00084
105	22.5	8	8.1346	6.2152	1.6638	0.00193
120	28	14.5	12.4304	8.683	1.8849	0.00194
135	46.5	18.8	24.9522	19.67	1.5867	0.00687

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.23 ผลการทดลองค่าสีการทดลองที่ 1

เวลา	L*	a*	b*	del_E
0	17.46	17.11	12.86	0
30	10.34	4.08	7.12	15.919262
45	12.7	5.38	9.55	13.084594
60	5.88	0.76	1.58	22.992549
75	7.06	2.31	2.86	20.668817
79	8.88	3.64	4.48	18.035568

ตารางที่ ง.24 ผลการทดลองค่าสีการทดลองที่ 2

เวลา	L*	a*	b*	del_E
15	14.58	5.83	8.89	12.30015
30	13.18	5.65	8.02	13.15582
45	12.86	4.67	6.8	14.582085
60	12.11	4.9	7.19	14.48639
75	11.03	4.89	7.34	14.870901
90	10.2	3.58	6	16.817494
105	8.16	2.73	3.24	19.642271
120	7.38	0.95	2.65	21.610093

ตารางที่ ง.25 ผลการทดลองค่าสีการทดลองที่ 3

เวลา	L*	a*	b*	del_E
30	14.63	5.69	9.13	12.342536
45	13.37	5.61	9.85	12.571325
60	12.73	5.18	9.49	13.268561
75	10.97	4.28	6.66	15.657873
90	7.34	1.47	2.67	21.233467

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.26 ผลการทดลองค่าสีการทดลองที่ 4

เวลา	L*	a*	b*	del_E
30	15.27	6.76	11.03	10.73627
45	15.08	6.84	11.31	10.655506
60	14.84	5.9	11.63	11.577625
120	13.85	6.15	10.37	11.804821
135	13.47	5.88	10.2	12.211003
150	12.32	5.65	8.99	13.142606
165	12.04	4.95	10.26	13.564734
180	11.27	4.59	9.43	14.381634
195	13.39	4.86	8.57	13.602628
205	9.52	3.47	5.59	17.376596

ตารางที่ 3.27 ผลการทดลองค่าสีการทดลองที่ 5

เวลา	L*	a*	b*	del_E
30	14.55	6.01	9.8	11.876098
45	13.73	5.79	8.98	12.534341
60	12.88	5.41	9.2	13.086711
75	11.52	4.84	7.73	14.565487
90	10.39	3.92	6.42	16.292164
105	9.38	2.64	4.55	18.539779
120	7.7	1.98	2.53	20.757731

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.28 ผลการทดลองค่าสีการทดลองที่ 6

เวลา	L*	a*	b*	del_E
30	15.77	6.96	13.48	10.308395
45	15.41	6.97	12.68	10.346714
60	15.92	5.57	10.22	11.937873
75	17.08	7.21	13.44	9.9242531
90	14.14	5.98	10.71	11.811935
105	15.92	6.73	12.66	10.495523
120	10.62	4.19	6.78	15.832827
135	11.03	4.27	6.58	15.67319
150	11.03	3.89	6.58	15.985984

ตารางที่ ง.29 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาของการทดลองที่ 1

Regression Summary for Dependent Variable: ln(del\_E) (1)  
R= .91456286 R<sup>2</sup>= .83642522 Adjusted R<sup>2</sup>= .80371026  
F(1,5)=25.567 p<.00391 Std.Error of estimate: 1.2861

N=6	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(5)	p-level
t	0.914563	0.180873	0.047663	0.009426	5.056388	0.003912

ตารางที่ ง.30 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาของการทดลองที่ 2

Regression Summary for Dependent Variable: ln(del\_E) (2)  
R= .91794657 R<sup>2</sup>= .84262591 Adjusted R<sup>2</sup>= .82014390  
F(1,7)=37.480 p<.00048 Std.Error of estimate: 1.1694

N=8	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(7)	p-level
t	0.917947	0.149940	0.033417	0.005458	6.122091	0.000481

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.31 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาของการทดลองที่ 3

Regression Summary for Dependent Variable: ln(del_E) (3)						
R= .92767821 R <sup>2</sup> = .86058686 Adjusted R <sup>2</sup> = .83270423						
F(1,5)=30.865 p<.00260 Std.Error of estimate: 1.0844						
N=6	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(5)	p-level
t	0.927678	0.166981	0.042104	0.007579	5.55594	0.002598

ตารางที่ ง.32 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาของการทดลองที่ 4

Regression Summary for Dependent Variable: ln(del_E) (4)						
R= .89618643 R <sup>2</sup> = .80315012 Adjusted R <sup>2</sup> = .78346513						
F(1,10)=40.800 p<.00008 Std.Error of estimate: 1.1805						
N=11	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(10)	p-level
t	0.896186	0.140303	0.016796	0.002630	6.387498	0.000080

ตารางที่ ง.33 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาของการทดลองที่ 5

Regression Summary for Dependent Variable: ln(del_E) (5)						
R= .92234786 R <sup>2</sup> = .85072557 Adjusted R <sup>2</sup> = .82940065						
F(1,7)=39.893 p<.00040 Std.Error of estimate: 1.1095						
N=8	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(7)	p-level
t	0.922348	0.146031	0.032710	0.005179	6.316130	0.000398

ตารางที่ ง.34 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสีกับเวลาของการทดลองที่ 6

Regression Summary for Dependent Variable: ln(del_E) (6)						
R= .91158038 R <sup>2</sup> = .83097879 Adjusted R <sup>2</sup> = .81219865						
F(1,9)=44.248 p<.00009 Std.Error of estimate: 1.0825						
N=10	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(9)	p-level
t	0.911580	0.137041	0.024464	0.003678	6.651899	0.000094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.35 ผลการคำนวณทางสถิติของความสัมพันธ์ของค่า k กับค่าอัตราการป้อนน้ำลำไยและ  
อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำลำไย

Regression Summary for Dependent Variable: k (all_hr)						
R= .98945370 R <sup>2</sup> = .97901862 Adjusted R <sup>2</sup> = .96503104						
F(2,3)=69.992 p<.00304 Std.Error of estimate: .00582						
N=5	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(3)	p-level
F	1.860662	0.440447	0.257495	0.060953	4.22448	0.024256
F*T <sub>0</sub>	-0.902582	0.440447	-0.003189	0.001556	-2.04924	0.132861



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้