แบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

PREDICTION MODEL OF SOYMILK FOULING ON HEAT EXCHANGER SURFACE

จิตตะวัน คชลัย

ฐิชารัศม์ จารุสัจจานันท์

ณัฐวศา ธีระศิลป์

สรธัช สังฆโสภณ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREDICTION MODEL OF SOYMILK FOULING ON HEAT EXCHANGER SURFACE

Jlttawan Khotchalai
Thicharat Jarusajjanan
Nutvasa Theerasilp
Sorratad Sangkasophon

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2565

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

PREDICTION MODEL OF SOYMILK FOULING ON HEAT EXCHANGER SURFACE

ผู้จัดทำ

1. จิตตะวัน คชลัย รหัสประจำตัว 62010113
2. ฐิชารัศม์ จารุสัจจานันท์ รหัสประจำตัว 62010232
3. ณัฐวศา ธีระศิลป์ รหัสประจำตัว 62010289
4. สรธัช สังฆโสภณ รหัสประจำตัว 62010911

..... หัวหน้าภาควิชา

(ผศ.ดร.เจษฎา ชัยโฉม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.นวภัทรา หนูนาค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ แบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

นักศึกษา จิตตะวัน คชลัย

ฐิชารัศม์ จารุสัจจานันท์

ณัฐวศา ธีระศิลป์

สรธัช สังฆโสภณ

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร.นวภัทรา หนูนาค

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงมิติ ทำการทดลองโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิพื้นผิว 65-85 องศาเซลเซียส ซึ่งได้จากการไหลของน้ำร้อนที่ความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที น้ำถั่วเหลืองความหนืด 0.01 กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที ความหนาแน่น 1045 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เวลาในการให้ความร้อน 60 นาที ความเร็วการไหลน้ำถั่วเหลือง 0.048 เมตรต่อวินาที จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวส่งผลต่อการเกาะติดของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) โดยที่อุณหภูมิพื้นผิวเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มวลของคราบเพิ่มขึ้น และเมื่อทดสอบแบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองที่สะสมบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งพัฒนาจากการวิเคราะห์เชิงมิติและการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้เงื่อนไขการทดลอง พบว่า แบบจำลองสามารถประมาณมวลของคราบด้วยความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 6.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis PREDICTION MODEL OF SOYMILK FOULING ON HEAT EXCHANGER SURFACE

Student Ms.Jittawan Khotchalai
Ms.Thicharat Jarusajjanan
Ms.Nutvasa Theerasilp
Mr.Sorratad Sangkasophon

Thesis advisor Assoc. Prof. Dr.Navaphattra Nunak

Degree Bachelor of Engineering

Program Food Engineering

Academic year 2022

ABSTRACT

This project proposes the predictive model of soymilk fouling deposit mass on heat exchanger surfaces using a dimensional analysis. Experiments were conducted using a laboratory plate heat exchanger at a surface temperature of 65-85 °C, which was obtained from a hot water flow at a velocity of 0.4 m/s. Soymilk, viscosity of 0.01 kg/m-s and density of 1045 kg/m3, was pumped into a heat exchanger at an inlet soymilk temperature of 55 °C and flow velocity of milk 0.048 m/s for 60 min for each run. It was found that soymilk fouling deposit mass in the plate heat exchanger significantly increased with increasing the surface temperature ($p<0.05$). The predictive model developed from the analysis of dimension and non-linear regression under experiment conditions could be estimated fouled mass in the heat exchanger plate with relative error of 6.22.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานวิจัยเพื่อการสำเร็จการศึกษาของ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับความอนุเคราะห์และเอาใจใส่ ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ นวภัทรา หนูนาค และรองศาสตราจารย์ ทวีพล ซื่อสัตย์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อแนะนำและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมทั้งแนะแนวทางในการศึกษาค้นคว้าจนกระทั่งการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ขอขอบคุณคณาจารย์, นาย เอกรินทร์ องค์วงศ์สกุล นักศึกษาระดับปริญญาโทและเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่อำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่าปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

คณะผู้วิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ค
สารบัญ.....ง
สารบัญตาราง.....ฉ
สารบัญรูปภาพ.....ช
บทที่ 1 : บทนำ.....1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....1
1.2 วัตถุประสงค์.....2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....2
บทที่ 2 : ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3
2.1 น้ำถั่วเหลือง.....3
2.2 การเกิดคราบคราบ.....3
2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....5
2.4 การวิเคราะห์เชิงมิติ.....6
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....8
บทที่ 3 : วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....11
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์.....11
3.2 การเตรียมน้ำถั่วเหลือง.....13
3.3 การทดลองการเกิดคราบ.....16
3.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดคราบ.....19
3.5 การสร้างแบบจำลองทำนายการเกิดคราบ.....20
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....21
บทที่ 4 : ผลการทดลอง.....22
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำถั่วเหลือง.....22
4.2 การวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับแบบจำลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลือง.....23
4.3 การวิเคราะห์มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองสำหรับพัฒนาแบบจำลอง.....25
4.4 การทดสอบแบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลือง.....28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 5 : สรุปผลการทดลอง.....31
5.1 สรุปผลการทดลอง.....31
บรรณานุกรม.....33
ภาคผนวก ก.....35
ภาคผนวก ข.....36
ภาคผนวก ค.....41
ภาคผนวก ง.....42
ภาคผนวก จ.....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 มิติพื้นฐานในระบบ SI....6

3.1 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดคราบ....20

4.1 ค่าความหนาแน่นที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ....22

4.2 ค่าความหนืดที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ....23

4.3 เมทริกซ์สำหรับปริมาณทางกายภาพ....23

4.4 เมทริกซ์สำหรับปริมาณทางกายภาพสำหรับหาเลขชี้กำลัง....24

4.5 มวลคราบน้ำถั่วเหลืองจากการทดลองสำหรับนำไปสร้างแบบจำลอง....25

4.6 มวลคราบน้ำถั่วเหลืองจากการทดลองสำหรับนำไปทดสอบความแม่นยำแบบจำลอง....26

ก.1 แผนการทดลอง....35

ข.1 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 65 องศาเซลเซียส....36

ข.2 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 70 องศาเซลเซียส....36

ข.3 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 75 องศาเซลเซียส....37

ข.4 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส....37

ข.5 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 85 องศาเซลเซียส....38

ข.6 มวลของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน....38

ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของมวลคราบน้ำถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลอง....41

ค.2 การทดสอบความแตกต่างของคราบน้ำถั่วเหลืองด้วยวิธี Turkey HSD[a]....41

ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปวนทางเดียวของ π-term 1 กับ π-term 3....41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 กลไกการเกิดคราบ....4

2.2 การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น....5

3.1 เครื่องโม่ (CHAMP, FSM-120, ไทย)....11

3.2 ปั๊มหอยโข่ง (C-JET-QB60)....11

3.3 Laboratory water bath (Memmert, Germany) ขนาด 10 ลิตร....12

3.4 Laboratory water bath (JSWB-22t) ขนาด 22 ลิตร....12

3.5 Laboratory water bath (BWS-10) ขนาด 9.2 ลิตร....12

3.6 เครื่องพาสเจอร์ไรส์ระดับห้องปฏิบัติการ....12

3.7 ปั๊มรีดท่อ....12

3.8 เครื่องชั่งดิจิตอล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน)....12

3.9 น้ำถั่วเหลืองแช่ในน้ำสะอาด....13

3.10 ชั่งน้ำหนักถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำ....13

3.11 วิธีการโม่น้ำถั่วเหลือง....14

3.12 ชั่งน้ำหนักน้ำถั่วเหลืองและกากถั่วเหลือง....14

3.13 ให้ความร้อนน้ำถั่วเหลือง....14

3.14 การวัดความหนาแน่น....15

3.15 ชุดการวัดความหนืด....16

3.16 การวัดอุณหภูมิ....17

3.17 ชุดทดลองการเกิดคราบ....17

3.18 แผนภาพการทำงานของการทดลองการเกิดคราบ....18

3.19 ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Laboratory pasteurizer - FT75, Armfield, อังกฤษ)....19

3.20 การชั่งน้ำหนักมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง....19

4.1 ตัวอย่างคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิว....27

4.2 มวลคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นในแต่ละแผ่น ณ อุณหภูมิใดๆ....27

4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลคราบที่เกิดขึ้นกับกลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 3....28

4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ..29

4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์กับมวลของคราบ....30

ข.1 คราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความรร้อนทั้ง 7 แผ่น....39

ง.1 การเปิดใช้โปรแกรม....42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า
ง.2 หน้าต่างโปรแกรม....42
ง.3 การใส่ข้อมูลลงโปรแกรม....43
ง.4 การตั้งค่าข้อมูล....43
ง.5 การวิเคราะห์ข้อมูล....44
ง.6 ระบุ π term และค่าเริ่มต้น a b c....44
ง.7 เลือกค่าที่ต้องการคาดการณ์รูปที่....45
ง.8 ผลที่ได้หลังจากการคาดการณ์....45
จ.1 ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ....46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำถั่วเหลืองเป็นผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่นิยมบริโภค เพราะนอกจากมีประโยชน์ต่อสุขภาพแล้ว ยังเป็นทางเลือกทดแทนนมวัวสำหรับผู้ที่แพ้โปรตีนนมได้ โดยกระบวนการให้ความร้อนทำให้โมเลกุลโปรตีนในน้ำถั่วเหลืองที่รวมตัวกันอยู่แยกตัวออกจากกัน (Ono,1991; Lakshmanan, 2006; Malaki, 2008) ซึ่งโปรตีนส่วนใหญ่ประกอบด้วยโปรตีนเบต้าคอนไกลซินิน (B-Conglycinin) หรือ 7S และ ไกลซินิน (Glycinin) หรือ 11S คิดเป็น 70% ของโปรตีนทั้งหมดและถือได้ว่าเป็นโปรตีนหลักในน้ำถั่วเหลืองอีกด้วย (Reilly et al, 2006) โดยโปรตีนทั้ง 2 ชนิดนี้ ยึดเกาะกันด้วยพันธะไดซัลไฟต์ในโมเลกุลของตัวเอง และเสื่อมสลายเมื่อพันธะไดซัลไฟต์ที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลถูกทำลาย (Guo et al, 2012))

สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปน้ำถั่วเหลืองนั้น การพาสเจอร์ไรส์เป็นกระบวนการที่ช่วยในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (Qingjun, 2020) นอกจากนี้การให้ความร้อนกับน้ำถั่วเหลืองยังช่วยในการกำจัดเอนไซม์ลิพอกซีจีเนส (Lipoxygenase) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นของถั่ว (Wilket et al, 1967) และรสชาติที่ไม่พึงประสงค์ของน้ำถั่วเหลือง (Wolf, 1975) โดยส่วนใหญ่อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม นิยมเลือกใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ในกรรมวิธีทางความร้อน (Bjorn, 2006) เมื่อเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่น ๆ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นมีขนาดกะทัดรัด ทำให้พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนขนาดใหญ่ได้พอดีกับปริมาตรขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังเป็นการออกแบบที่ใช้วัสดุอย่างคุ้มค่ามาก เนื่องจากใช้วัสดุเกือบทั้งหมดนั้นใช้เป็นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (Jorge, 2003) แต่ในระหว่างการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงเนื่องมาจากคราบสะสม (Genic et al, 2012) นอกจากนี้คราบยังก่อให้เกิดปัญหาทางจุลชีววิทยาตามมาได้ (Merheb et al, 2007) โดยสำหรับคราบที่เกิดขึ้นจากน้ำถั่วเหลือง เกิดจากโปรตีนเสื่อมสภาพ (protein denaturation) เมื่อได้รับความร้อนโดยความร้อนจะไปทำลายพันธะภายในของโปรตีน (Guo et al, 2012) ทำให้น้ำถั่วเหลืองมีความหนืดมากขึ้นส่งผลให้เกิดการเกาะติดจนเกิดเป็นคราบบนพื้นผิว (Lalande et al., 1985) งานวิจัยของ Jeremy et al. (2013) ระบุว่า มวลของคราบที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นหลัก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของมวลคราบต่ออุณหภูมินั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายประการ เช่น ระยะเวลาในการให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อน พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน ความเร็วการไหล วัสดุของพื้นผิว ความหยาบพื้นผิว สมบัติทางกายภาพของของไหล สารแขวนลอย กระบวนการถ่ายเทความร้อน (Awad, 2011) ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (René and Lalande, 1988; Visser and Jeurnink, 1997) ทำให้เห็นว่ามีหลายปัจจัยมากที่มีอิทธิพลต่อการเกิดคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากต้องการทำนายการเกิดคราบในระหว่างกระบวนการทางความร้อนจำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคราบทำให้การทดลองมีจำนวนมาก ทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดจำนวนการทดลองได้ คือ นำการวิเคราะห์เชิงมิติมาใช้ในการจัดแผนการทดลอง โดยเป็นการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบและสร้างความสัมพันธ์ให้กับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองที่มีความครอบคลุมในปัจจัยต่าง ๆ เพื่อให้ได้แบบจำลองในการทำนายการเกิดคราบที่มีประสิทธิภาพในการทำนายมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์เชิงมิติใช้เพื่อลดจำนวนของตัวแปรภายใต้การทดลองเพื่อทำความเข้าใจการทดลองที่มีความซับซ้อน (Sharifpur et al, 2015; Tang et al, 2020) ซึ่งนิยมใช้ในการทดลองที่มีกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนและการศึกษาการเสียสภาพของโปรตีนเพื่อสร้างการเชื่อมโยงความสัมพันธ์กันระหว่างมวลคราบสะสมที่เกิดขึ้นกับเงื่อนไขการทำงาน (Gu et al, 2019; Khaldi et al, 2015; Petit et al, 2013)

โครงงานวิจัยของธราเทพ และคณะ (2021) ได้สร้างแบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดยแบบจำลองพัฒนาจากความสัมพันธ์ของตัวแปร ดังนี้ อุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า สำหรับโครงงานวิจัยได้เพิ่มตัวแปร อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออกเข้าไปในแบบจำลอง ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า ดังนั้น โครงงานนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่อการเกิดคราบบนพื้นผิวและสร้างแบบจำลองทำนายมวลของคราบด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงมิติภายใต้ความสัมพันธ์ของตัวแปร ดังนี้ อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า และอุณหภูมิถั่วเหลืองขาออก

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปแบบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิพื้นผิว อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้าและขาออกด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงมิติ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ใช้อุปกรณ์ในการทดลองการเกิดคราบเป็นชุดอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้แบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงมิติภายใต้เงื่อนไขขอบเขตการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำถั่วเหลือง

น้ำถั่วเหลืองเป็นผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองที่มีปริมาณโปรตีนจากพืชที่นิยมใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทดแทนนม (Eustom, 2008) เนื่องจากในน้ำถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีน 2.88 กรัม/100 กรัม ซึ่งสามารถเทียบเท่าได้กับโปรตีนในนมวัว 3.15 กรัม/100 กรัม (กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา, 2019) วิธีการผลิตนมถั่วเหลืองแบบดั้งเดิมนั้นเกี่ยวข้องกับการแช่ถั่วเหลือง ตามด้วยการบดแบบเปียก และกรอง น้ำถั่วเหลืองที่ผลิตด้วยวิธีดั้งเดิมไม่มีรสจืดหรือมีเนื้อเนียนอย่างนมวัว มีรสชาติและกลิ่นที่เฉพาะตัวของถั่ว โดยรสและกลิ่นที่ออกมานั้นมีลักษณะเป็นเหมือนกลิ่นเหม็นเขียวของถั่ว ซึ่งเกิดจากสารประกอบระเหยที่เกิดขึ้นจากการเร่งปฏิกิริยาของลิพอกซีจีเนส (Wilkensetal., 1967) โดยทั่วไปน้ำถั่วเหลืองประกอบด้วยโปรตีน 4-6% (Iwuoha C., 1997; Cruz N., 2007) ซึ่งครึ่งหนึ่งของโปรตีนทั้งหมดมีขนาดอนุภาคที่เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 40 นาโนเมตร (Ono, 1991) โดยอนุภาคโปรตีนสามารถจับตัวเป็นก้อนได้ เมื่อมีการตกตะกอน (Ono, 1993) เมื่ออนุภาคโปรตีนในน้ำถั่วเหลืองมากขึ้น ส่งผลให้เกิดเจลแข็งจากน้ำถั่วเหลืองมากขึ้น (Tezuka M., 2000; Guo S., 2005) ซึ่งผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบและปริมาณอนุภาคในน้ำถั่วเหลืองมีผลเป็นอย่างมากต่อสมบัติทางเคมีของน้ำถั่วเหลือง

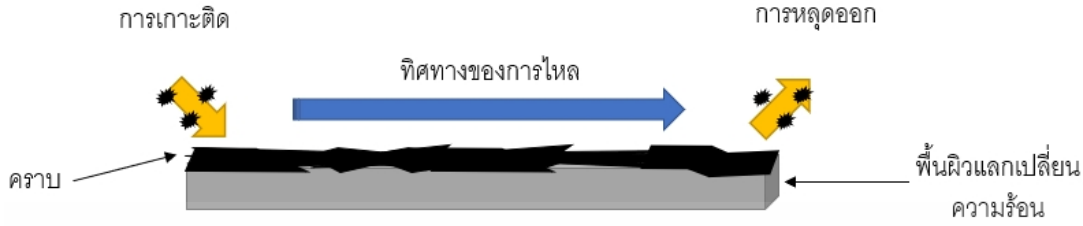
อนุภาคของโปรตีนในน้ำถั่วเหลืองไม่ได้มาจากการที่โปรตีนแตกตัวเป็นอนุภาคเล็กๆ ในระหว่างกระบวนการบดถั่วเหลือง แต่เกิดจากการรวมตัวกันของโปรตีนที่เกิดขึ้นโดยการแยกตัวและจัดเรียงตัวใหม่ของโปรตีนบางชนิดในระหว่างการให้ความร้อน (Ono, 1991; Lakshmanan, 2006; Nik, 2008) น้ำถั่วเหลืองประกอบไปด้วยโปรตีนหลากหลายชนิด เช่น 2S, 7S, 11S และ 15S ซึ่งหาได้จากการหมุนเหวี่ยงแบบพิเศษแยกส่วน (Utsumi et al, 1997) โปรตีนส่วนใหญ่ที่พบได้มากที่สุด คือ **เบต้าคอนไกลซินิน** และไกลซินิน คิดเป็น 70% ของโปรตีนทั้งหมด และถือได้ว่าเป็นโปรตีนหลักในน้ำถั่วเหลืองอีกด้วย ซึ่งโปรตีนทั้ง 2 ชนิดนี้มีโปรตีนหลายหน่วยย่อยที่ซับซ้อน และโครงสร้างแตกต่างกัน

2.2 การเกิดคราบ

คราบ หมายถึง การสะสมและการก่อตัวของอนุภาคที่ไม่พึงประสงค์ เช่น สารแขวนลอย สารละลายเกลือ ส่งผลทำให้เกิดคราบบนพื้นผิวของอุปกรณ์ เช่น พื้นผิวร้อน พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (Al and Ibrahim, 2012) ซึ่งอาจทำให้ความสามารถของพื้นผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ส่งผลกระทบต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น สูญเสียความสามารถในการผลิต อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และการเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่ยังไม่ได้รับการแก้ไข (Awad, 2011)



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดคราบ

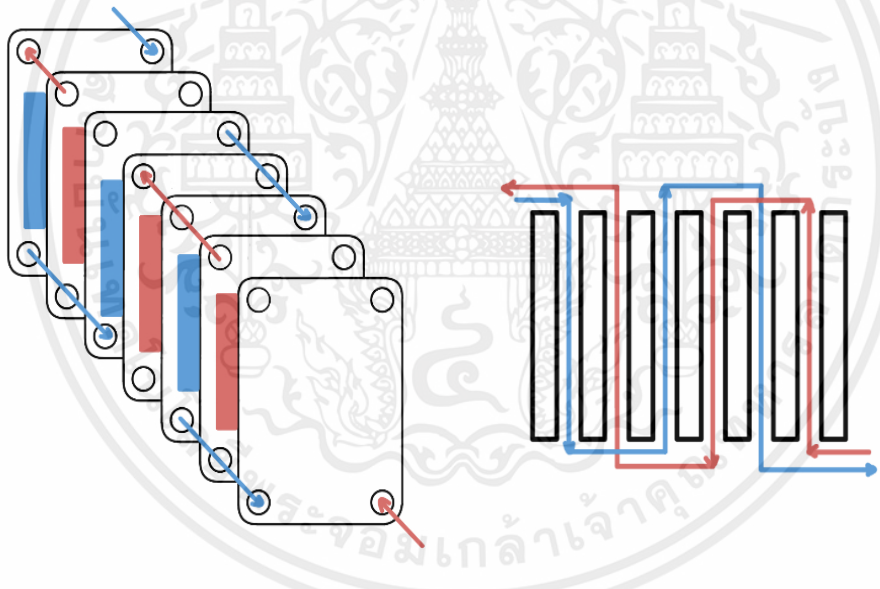
ที่มา: ดัดแปลงจาก Award (2011)

กลไกการเกิดคราบสามารถเกิดได้จากหลายปัจจัย โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบสามารถจำแนกได้ดังนี้ ได้แก่ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ ปัจจัยในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และสมบัติของของไหล ซึ่งในปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ แบ่งออกเป็น ความเร็วในการไหล อุณหภูมิพื้นผิว อุณหภูมิเฉลี่ย ซึ่งความเร็วมีอิทธิพลต่อการเกิดคราบอย่างมีนัยสำคัญ (Kazi, 2012) โดยความเร็วในการไหลส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกาะติด และอัตราการหลุดออก อีกทั้งส่งผลทางอ้อมต่อแรงเฉือนของของไหลและการเกาะติดของคราบ (Awad, 2011) อุณหภูมิพื้นผิว ส่งผลต่อการเกิดคราบในลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดคราบ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการตกผลึกเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อปริมาณของคราบ ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ย ส่งผลต่อการเปลี่ยนสภาพของโครงสร้างของของไหลจนทำให้เกิดคราบ ปัจจัยในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งออกเป็น ชนิดของวัสดุ ความหยาบของพื้นผิว โดยการเลือกชนิดของวัสดุพื้นผิวนั้นมีความสำคัญสำหรับคราบที่เกิดจากการกัดกร่อน เนื่องจากวัสดุที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อปฏิกิริยาและก่อให้เกิดการกัดกร่อน (Kazi, 2012) ส่วนความหยาบของพื้นผิว ส่งผลต่อการสะสมของอนุภาคและทำให้เกิดการเกาะติด สมบัติของของไหล แบ่งออกเป็น ความหนืด และความหนาแน่น โดยความหนืดมีบทบาทสำคัญต่อการสะสมความหนาของชั้นคราบ ซึ่งความหนืดและความหนาแน่นมีผลต่อแรงเฉือนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการหลุดออกของคราบ โดยคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้น จัดอยู่ในประเภทของคราบ ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี คือ เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านพื้นผิวร้อน สารประกอบในผลิตภัณฑ์เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับความร้อนทำให้เกิดคราบ (Awad, 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเป็นที่นิยมในการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมนมและเครื่องดื่ม เหมาะสำหรับอาหารเหลวที่มีความหนืดต่ำ หากอาหารเหลวมีสารแขวนลอย เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งควรน้อยกว่า 3 เซนติเมตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิเพื่อใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค และสามารถลดการสูญเสียคุณภาพทางอาหาร เช่น คุณภาพทางโภชนาการไปจนถึงกลิ่นของอาหารที่มักลดลงจากการถูกทำลายด้วยความร้อน (Singh and Heldman, 2009) และเมื่อเทียบกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทอื่น ๆ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นนั้นมีขนาดกะทัดรัดและมีพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนขนาดใหญ่ (Jorge, 2003) โดยส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นคือ แผ่นโลหะ (Plate) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจำนวนหลายแผ่นที่ถูกบีบชิดให้ติดกันอยู่ในโครง (Frame) ซึ่งแต่ละแผ่นมีประเก็น (Gasket) ปิดผนึกขอบแผ่นเพื่อป้องกันไม่ให้ของเหลวผสมกันและบังคับทิศทางของของไหลของๆไหลให้ไหลผ่านช่องว่างที่กำหนด (Singh and Heldman, 2009)



(ก) (ข)

รูปที่ 2.2 การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

(สีแดง=น้ำร้อน , สีน้ำเงิน=ผลิตภัณฑ์)

(ก) ภาพรวมของการไหลแบบสวนทาง

(ข) การไหลแบบสวนทางด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

การทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนจากแผ่นโลหะที่ล้อมรอบด้วยปะเก็น ปะเก็นถูกจัดเรียงในลักษณะที่ให้ของไหลเพียงประเภทเดียวไหลผ่านช่องว่าง คือในระหว่างแผ่นที่ติดกันมีช่องว่างที่มีของเหลวร้อนและเย็นไหลไปตามระนาบของแผ่นสลับกันไป ด้วยวิธีนี้ของเหลวร้อนและเย็นไหลผ่านแต่ละช่องของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นเพื่อเป็นแลกเปลี่ยนความร้อนกันและป้องกันไม่ให้ของเหลวเกิดการปนเปื้อนกัน (Hussam et al, 2018)

2.4 การวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional analysis) (Guillaume, 2015)

การวิเคราะห์เชิงมิติเป็นเครื่องมือในการสร้างตัวแปรไร้มิติที่เชื่อมโยงถึงปรากฏการณ์ที่ศึกษากับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์นั้นให้สอดคล้องกันในรูปแบบของมิติ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้คำจำกัดความ ข้อกำหนดเบื้องต้น และการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อสร้างชุดตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกันกับปรากฏการณ์ที่ศึกษา ทำให้เข้าใจและศึกษากระบวนการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น และการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบทบัคกิงแฮมพาย (Buckingham - π) ช่วยในการกำหนดขอบเขตภายใต้ปรากฏการณ์ที่จำเป็น

2.4.1 ปริมาณทางกายภาพ มิติและระบบหน่วย

ปริมาณทางกายภาพใช้สำหรับการสร้างความสัมพันธ์เชิงทำนายทางคณิตศาสตร์ โดยประยุกต์ใช้ระบบมิติแทนการใช้ปริมาณทางกายภาพ โดยนำระบบหน่วย SI มาใช้ ซึ่งขึ้นอยู่กับมิติพื้นฐาน 7 มิติ ซึ่งเป็นอิสระและเพียงพอสำหรับการแสดงมิติของปริมาณทั้งหมดที่ถูกพบในโลกทางกายภาพ โดยมิติพื้นฐานและสัญลักษณ์แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มิติพื้นฐานในระบบ SI

ชื่อมิติพื้นฐาน	สัญลักษณ์	มาตรฐานหน่วย SI	สัญลักษณ์
ความยาว	L	เมตร	m
มวล	M	กิโลเมตร	Kg
เวลา	T	วินาที	s
อุณหภูมิ	K	เคลวิน	K
ปริมาณสาร	N	โมล	mol
ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า	I	แอมแปร์	A
ความเข้มข้นของแสง	I_v	แคนเดลา	cd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 หลักความสอดคล้องกัน

การวิเคราะห์เชิงมิติต้องเป็นไปตามหลักทางภาพง่าย ๆ คือ สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพต้องมีความสอดคล้องกัน ซึ่งหมายความว่าความสัมพันธ์ทางกายภาพต้องเชื่อมโยงปริมาณทางกายภาพ v_1 เข้ากับปริมาณทางกายภาพ v_2, v_3, v_4 และ v_5 โดยที่ $v_1 = (v_2 \cdot v_3) + \frac{v_4}{v_5}$ และมีความสมเหตุสมผลก็ต่อเมื่อ v_2 , v_3 และ $\frac{v_4}{v_5}$ มีขนาดเดียวกับ v_1 ซึ่งหลักความสอดคล้องกันแสดงให้เห็นว่าสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปริมาณทางกายภาพเชิงมิติมีความถูกต้องเพียงใด

2.4.3 กฎพื้นฐานสำหรับการสร้างชุดตัวแปรไร้มิติ

1) การเลือกตัวแปรเป้าหมายและกำหนดปริมาณทางกายภาพอิสระที่เกี่ยวข้อง

เริ่มจากการกำหนดปัญหาเพื่อระบุตัวแปรเป้าหมาย ซึ่งเป็นลักษณะของปรากฏการณ์ที่กำลังศึกษา ต่อจากนั้นระบุปริมาณทางกายภาพทั้งหมดที่มีอิทธิพลต่อปรากฏการณ์

2) กำหนดมิติของปริมาณทางกายภาพ

แสดงมิติของปริมาณทางกายภาพในรูปของมิติพื้นฐาน โดยไม่จำเป็นต้องมีเงื่อนไขอื่นนอกจากความสอดคล้องกันของระบบหน่วย และจำนวนของมิติพื้นฐานขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปรากฏการณ์ทางกายภาพที่ศึกษาแล้วนำมาสร้างเมทริกซ์เชิงมิติ โดยที่

- จำนวนคอลัมน์เท่ากับจำนวนของปริมาณทางกายภาพที่ระบุไว้ทั้งหมด
- จำนวนแถวเท่ากับจำนวนมิติพื้นฐานที่จำเป็นในการแสดงมิติของปริมาณทางกายภาพที่ระบุไว้ทั้งหมด

3) การสร้างชุดของตัวเลขไร้มิติ

เมื่อเขียนเมทริกซ์มิติแล้ว ตัวเลขไร้มิติถูกแสดงในรูปของ π_i ซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลของกระบวนการกายภาพที่กำลังศึกษา โดยใช้ทฤษฎีบทบัคกิงแฮมพาย

คือ ปริมาณทางกายภาพที่แสดงถึงปรากฏการณ์ (ตัวแปรเป้าหมาย V_1) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณทางกายภาพที่เป็นอิสระต่อกันที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์ที่ศึกษา (V_i) โดยถูกวัดด้วยมิติพื้นฐาน (จำนวนมิติพื้นฐาน n_d) สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันของชุดตัวเลขไร้มิติ (π_i) ที่มีจำนวนเท่ากับความแตกต่างระหว่างของจำนวนปริมาณทางกายทั้งหมด (m) กับจำนวนมิติพื้นฐานที่ถูกใช้ในการแสดงมิติของปริมาณทางกายภาพทั้งหมด (n_d) โดยชุดตัวเลขไร้มิติ (π_i) แสดงในสมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\pi_i = \frac{V_i}{V_j^{a_{ij}}} \quad (2.1)$$

โดยที่เลขชี้กำลัง a_{ij} เป็นจำนวนตรรกยะ ซึ่งอาจเป็นศูนย์ได้ i ∈ [1; m-n_d] และ j ∈ [m-n_d +1; m]

4) การสร้างตัวแปรไร้มิติ

ชุดตัวเลขไร้มิติ (π_i) ได้มาจากการหารตัวแปรทางกายภาพที่ไม่ซ้ำแต่ละตัวด้วยผลคูณของตัวแปรซ้ำที่ยกกำลังเป็นเลขชี้กำลังต่างๆ

$$\pi_i = \frac{V_{i,non-repeated}}{[V_{j,repeated}]^{a_{ij}}} \quad (2.2)$$

โดยมีเงื่อนไขในการเลือกตัวแปรทางกายภาพที่ซ้ำว่ามิติของตัวแปรที่เลือกต้องครอบคลุมมิติพื้นฐานทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับแสดงขนาดของปริมาณทางกายภาพที่ระบุไว้

5) การจัดเรียงตัวเลขไร้มิติใหม่

ชุดตัวเลขไร้มิติในแต่ละชุดมีลักษณะเฉพาะสามารถเลือกและจัดเรียงใหม่ ไม่ว่าเป็นการเพิ่มตัวเลขไร้มิติบางตัวเป็นกำลังที่แตกต่างจากเดิม การคูณ บวกหรือการลบออก โดยทั่วไปแล้วจำนวนไร้มิติที่ยกกำลัง ผลคูณ ผลรวมหรือผลต่างของตัวเลขไร้มิติยังคงเป็นเลขไร้มิติ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็นการศึกษาการเสียสภาพโปรตีน การศึกษาการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลือง และการศึกษาการวิเคราะห์เชิงมิติ

Lalande et al, (1985) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีนเบต้าแลคโตโกลบูลิน (β-Lactoglobulin) ภายในนมวัวที่มีผลต่อการเกิดคราบบนพื้นผิวร้อนในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยผลที่ได้รับคือทำให้ทราบว่า การเกิดคราบบนพื้นผิวร้อนในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนของนม เป็นผลมาจากกาที่พันธะไดซัลไฟต์ในโปรตีนของนมถูกทำลาย เนื่องจากได้รับความร้อนและมีโมเลกุลเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดความหนืดและเกาะติดบนพื้นผิวร้อนได้ โดยในนมวัวมีโปรตีน ที่มีความสำคัญ คือ เบต้าแลคโตโกลบูลิน เพราะเป็นโปรตีนที่มีอยู่มากถึง 50 % ภายในนมวัว

Oguntunde และ Akintoye (1991) ศึกษาการวัดและเปรียบเทียบความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะและความหนืดของนมวัวและนมถั่วเหลือง โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด (%TS) และคุณสมบัติแต่ละอย่าง โดยนำตัวอย่างทั้งหมดมาหาปริมาณของแข็งทั้งหมด ก่อนที่จะหาค่าความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ และความหนืดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และได้ผลว่าความหนาแน่นไม่ได้ขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%TS (เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมดในของเหลว (%TS)) หรือความหลากหลายของเมล็ดถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ และค่าความหนาแน่นของนมวัวและน้ำถั่วเหลืองทั้ง 2 สายพันธุ์ที่สอดคล้องกันที่ 25 องศาเซลเซียส คือ 1.02 ±0.01, 1.04 ± 0.00 และ 1.05 ± 0.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (1020, 1040 และ 1050 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Liu et al, (2004) กล่าวถึงการศึกษาผลกระทบของการเสียสภาพแบบเลือกผ่านความร้อนต่อความหนืดของน้ำถั่วเหลืองและคุณสมบัติทางกายภาพ โดยการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน แบบขั้นตอนเดียว คือ นำน้ำถั่วเหลืองมาให้ความร้อนที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แบบสองขั้นตอน คือ นำน้ำถั่วเหลืองมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นให้ความร้อนที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที โดยพบว่า ความหนืดที่ผ่านการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียวมีค่า 38±2.1 เซนติพอยส์ ในส่วนการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนมีค่าความหนืด 96±2.8 เซนติพอยส์ ซึ่งการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนเพิ่มความหนืดของน้ำถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เนื่องจากเวลาในการให้ความร้อนนานกว่าแบบขั้นตอนเดียว การเพิ่มขึ้นของความหนืดของน้ำถั่วเหลืองที่เตรียมโดยการให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนบ่งชี้ว่าการเสียสภาพแบบเลือกผ่านความร้อนส่งผลต่อการรวมตัวของโปรตีนถั่วเหลืองระหว่างการเสียสภาพ

Guo et al, (2012) กล่าวถึงโปรตีนสำคัญในน้ำถั่วเหลือง 2 ชนิด คือ เบต้าคอนไกลซินิน และ ไกลซินิน โดยแสดงให้เห็นถึงหน้าที่ของเบต้าคอนไกลซินิน เมื่อโดนความร้อนและกล่าวถึงการทำงานร่วมกันของเบต้าคอนไกลซินิน และไกลซินิน ในระหว่างการให้ความร้อนและประเมินโดยเป็นการสังเกตุเพื่อช่วยในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติทางความร้อนของโปรตีนสำคัญของน้ำถั่วเหลืองทั้งสองชนิดที่มีอิทธิพลต่อการละลายของโปรตีนในกระบวนการ โดยผลที่ได้คือทำให้ทราบว่าเบต้าคอนไกลซินิน และ ไกลซินิน นั้นมีการยึดติดกันด้วยพันธะไดซัลไฟต์ในโมเลกุลของตัวเอง และโปรตีนทั้งสองเสื่อมสลายเมื่อพันธะไดซัลไฟต์ที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลถูกทำลาย โดยในเบต้าคอนไกลซินินเริ่มมีการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิ 60.51 องศาเซลเซียส และ ไกลซินินเริ่มเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิ 75.74 องศาเซลเซียส

Khaldi et al, (2015) กล่าวถึงการตรวจสอบการเกิดคราบและการทำความสะอาดด้วยสารละลายเวย์โปรตีนเข้มข้นในแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยความเข้มข้นของแคลเซียมที่แตกต่าง ภายใต้อุณหภูมิของของไหล 60-96 องศาเซลเซียส งานนี้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมในเวย์โปรตีนเข้มข้นมีส่วนทำให้เกิดคราบและส่งผลต่อการนำความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าการไหลของของไหลระหว่างการเกิดคราบ ส่งผลกระทบต่อการเติบโตของคราบ สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างของชั้นที่เกิดคราบได้ และมีผลที่ตามมาอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการทำความสะอาด การวิเคราะห์เชิงมิติถูกนำมาใช้ร่วมกับการวัดเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลอง ช่วยให้สามารถสร้างความสัมพันธ์และทำให้สามารถคาดการณ์ปริมาณมวลแห้งของคราบได้ตามฟังก์ชันของปริมาณแคลเซียม ตัวเลขเรย์โนลด์ และอุณหภูมิ

Qingjun et al, (2020) การศึกษาการจำลองกระบวนการให้ความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นกับน้ำถั่วเหลืองต่อปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสะสมของคราบจากน้ำถั่วเหลืองภายใต้สภาวะต่างๆ ค่า pH ของน้ำถั่วเหลือง อุณหภูมิการป้อนของน้ำถั่วเหลือง และเวลาในกระบวนการที่แตกต่างกัน โดยผลการวิจัยพบว่าภายใต้ความร้อนของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ การเพิ่มค่า pH ของน้ำถั่วเหลืองให้เป็นกลางและลดอุณหภูมิขาเข้าของน้ำถั่วเหลืองลดอัตราการสะสมและปริมาณการสะสมของคราบ โดยการรวมตัวของโปรตีนถั่วเหลืองและไขมันที่สะสมตัวอย่างรวดเร็วสร้างชั้นการสะสมของคราบภายใน 30 นาทีแรกของการสัมผัสกับพื้นผิว การวิเคราะห์องค์ประกอบของคราบยังแสดงให้เห็นถึงการมีส่วนร่วมของโปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุต่อการก่อตัวของคราบ โดยการควบคุม pH ของนมถั่วเหลืองในบริเวณใกล้เคียงกับความเป็นกลาง และการป้อนน้ำถั่วเหลืองเข้าสู่กระบวนการการให้ความร้อนโดยตรงโดยไม่เพิ่มอุณหภูมิการป้อนของน้ำถั่วเหลืองเป็นแนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการที่เป็นไปได้ในการลดการสะสมของคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

1. เครื่องโม่ (CHAMP, FSM-120, ไทย)
2. หม้อใส่ผลิตภัณฑ์ขนาด 8 ลิตร 2 ใบ
3. กะละมังพลาสติก
4. ทับพีสแตนเลส
5. บีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร
6. ปั๊มหอยโข่ง (C-JET-QB60)
7. Laboratory water bath (Memmert, Germany) ขนาด 10 ลิตร
8. Laboratory water bath (JSWB-22t) ขนาด 22 ลิตร
9. Laboratory water bath (BWS-10) ขนาด 9.2 ลิตร
10. ปั๊มรีดท่อ (Laboratory pasteurizer - FT75, Armfield, อังกฤษ)
11. เครื่องพาสเจอร์ไรส์ระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory pasteurizer - FT75, Armfield, อังกฤษ)
12. เครื่องชั่งดิจิตอล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน)

รูปที่ 3.1 เครื่องโม่ (CHAMP, FSM-120, ไทย)

ที่มา: https://www.champ-online.store/product-page/Bean-Miller-CFSM

รูปที่ 3.2 ปั๊มหอยโข่ง (C-JET-QB60)

ที่มา: https://shopee.co.th/C-JET-ปั๊มน้ำ-ปั๊มน้ำหน้าหมู-ปั๊มน้ำหอยโข่ง-370วัตต์-ใบพัดทองเหลืองแท้-ใช้ดีในไร่สวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 Laboratory water bath (Memmert, Germany) ขนาด 10 ลิตร

ที่มา: https://www.spscience.com/16833660/ waterbath-memmert/

รูปที่ 3.4 Laboratory water bath (JSWB-22t) ขนาด 22 ลิตร

ที่มา: https://www.psc.com.bd/product/water- bath-digital-11-

รูปที่ 3.5 Laboratory water bath (BWS-10) ขนาด 9.2 ลิตร

ที่มา: https://www.ponpe.com /digital-water-bath-9-2l-bws-10-detail.html

รูปที่ 3.6 เครื่องพาสเจอร์ไรส์ระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory pasteurizer - FT75, Armfield, อังกฤษ)

ที่มา: https://armfield.co.uk/product/ft75-laboratory-pasteuriser/

รูปที่ 3.7 ปั๊มรีดท่อ (Laboratory pasteurizer - FT75, Armfield, อังกฤษ)

ที่มา: https://armfield.co.uk/product/ft75-laboratory-pasteuriser/

รูปที่ 3.8 เครื่องชั่งดิจิตอล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน) ความละเอียด 0.001 กรัม

ที่มา: https://www.monotaro.co.th/p/ 68248914.html?utm_id=google_pla_th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมน้ำถั่วเหลือง

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมน้ำถั่วเหลือง

1. นำถั่วเหลืองเต็มเมล็ด ตราไร่ทิพย์ จำนวน 1 กิโลกรัม มาล้างทำความสะอาด
2. นำถั่วมาแช่ด้วยน้ำสะอาดอัตราส่วน 3:1 (น้ำ:ถั่วเหลือง) เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) เพื่อให้ถั่วดูดซับน้ำทำให้เกิดการบวมน้ำและมีความนิ่มมากขึ้น

รูปที่ 3.9 น้ำถั่วเหลืองแช่ในน้ำสะอาด

3. เทน้ำที่แช่ออกจากถั่วเหลือง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณความเข้มข้นของน้ำถั่วเหลือง

รูปที่ 3.10 ชั่งน้ำหนักถั่วเหลืองที่ผ่านการแช่น้ำ

4. นำไปเข้าเครื่องโม่น้ำถั่วเหลือง (CHAMP, FSM-120, ไทย) พร้อมกับน้ำสะอาด (ใช้อัตราส่วน 3.5:1 คือ น้ำ 3500 กรัม : ถั่วเหลืองแห้ง 1000 กรัม)
5. ได้น้ำถั่วเหลืองและกากถั่วเหลืองแยกออกจากกัน โดยน้ำถั่วเหลืองไหลออกมาด้านหน้า และกากถั่วเหลืองแยกออกมาบริเวณด้านหลังเครื่อง

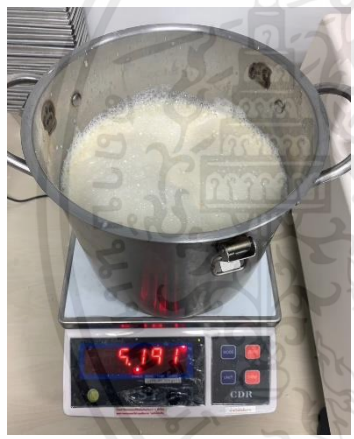
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)

(ข)

รูปที่ 3.11 วิธีการโม่น้ำถั่วเหลือง (ก) การใส่ถั่วเหลืองพร้อมกับน้ำสะอาดในการโม่น้ำถั่วเหลือง , (ข) ภาพรวมการโม่น้ำถั่วเหลือง

6. นำน้ำถั่วเหลืองและกากถั่วเหลืองที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของน้ำถั่วเหลือง



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.12 ชั่งน้ำหนักน้ำถั่วเหลืองและกากถั่วเหลือง (ก) น้ำถั่วเหลือง (ข) กากถั่วเหลือง

7. นำน้ำถั่วเหลืองที่ได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที

รูปที่ 3.13 ให้ความร้อนน้ำถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การวัดปริมาณของแข็งของน้ำถั่วเหลือง (%Total solid)

หลังจากการเตรียมน้ำถั่วเหลืองเสร็จ นำน้ำถั่วเหลืองที่ได้และกากจากการทำน้ำถั่วเหลือง ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง (CDR-30, CST, ไต้หวัน) เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของน้ำถั่วเหลือง โดยคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยที่ปริมาณของแข็งในน้ำถั่วเหลืองบ่งบอกถึงความเข้มข้นของน้ำถั่วเหลือง ส่งผลให้เมื่อมีปริมาณของแข็งในน้ำถั่วเหลืองสูงยิ่งทำให้น้ำถั่วเหลืองมีความเข้มข้นมาก

$$\text{ปริมาณของแข็ง (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักถั่วเหลืองหลังผ่านการแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักกากถั่วเหลือง}}{\text{น้ำหนักน้ำถั่วเหลือง}} \times 100 \qquad (3.1)$$

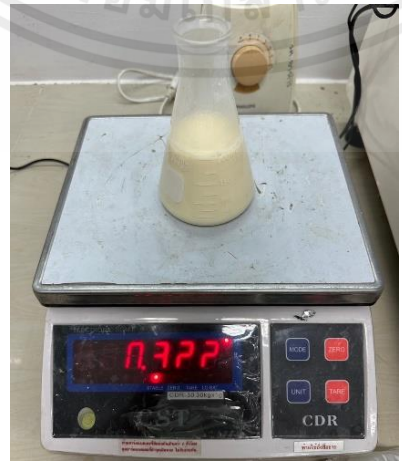
$$\text{ปริมาณของแข็ง (\%)} = \frac{(2 \text{ กิโลกรัม}) - (1.4 \text{ กิโลกรัม})}{4 \text{ กิโลกรัม}} \times 100$$

ปริมาณของแข็ง (%) = 15% (w/w)

3.2.3 การวัดความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง

ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลืองคำนวณได้จากสมการที่ 3.2 โดยการนำน้ำถั่วเหลืองหลังจากเตรียมเสร็จมาให้ความร้อนในหม้ออุ่นน้ำ (Laboratory water bath, JSWB-22t) ขนาด 22 ลิตร ที่อุณหภูมิน้ำร้อน 80 องศาเซลเซียส จนน้ำถั่วเหลืองถึงอุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซียลเซียส เป็นเวลา 9, 20 และ 50 นาที ตามลำดับ เมื่อถึงอุณหภูมิตามที่กำหนดทั้ง 3 ระดับแล้วนำไปชั่งนำหนักด้วยเครื่องชั่ง (CST, CDR-30, ไต้หวัน) (m,kg) ในบีกเกอร์ลูกชมพู่ขนาด 200 มิลลิลิตร (V, m^3) โดยทำทั้งหมด 3 ซ้ำในแต่ละอุณหภูมิ

$$\rho = \frac{m}{v} \qquad (3.2)$$

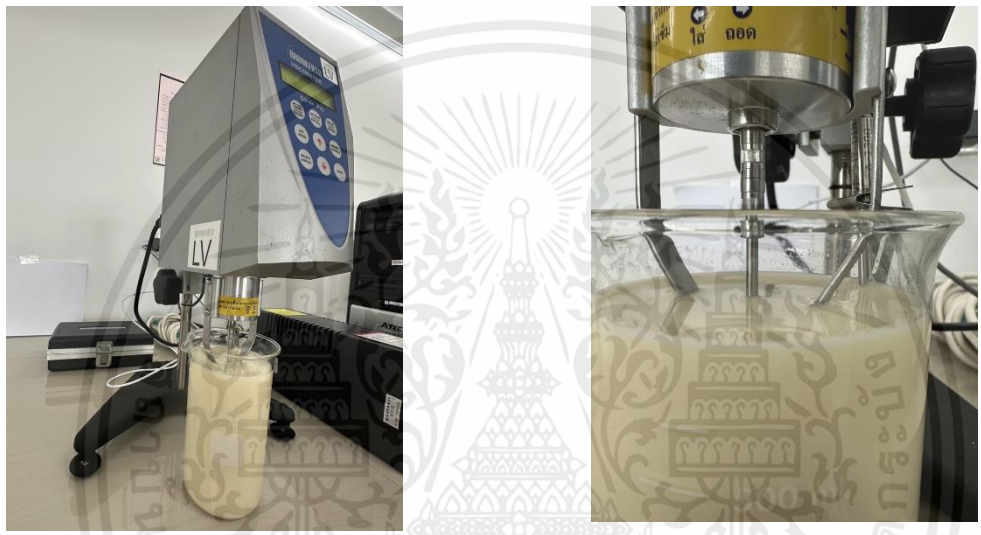


รูปที่ 3.14 การวัดความหนนาแน่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การวัดความหนืดของน้ำถั่วเหลือง

ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองวัดได้จากเครื่องวัดความหนืด (รุ่น DV-II+Pro, BROOKFIELD, USA) โดยใช้แกนหมุนทรงกระบอกหมายเลข 1 ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร ซึ่งวัดความหนืดที่อุณหภูมิทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส ทำได้โดยหลังจากเตรียมน้ำถั่วเหลืองเสร็จ นำน้ำถั่วเหลืองมาให้ความร้อนในหม้ออุ่นน้ำ (Laboratory water bath, JSWB-22t) ขนาด 22 ลิตร ที่อุณหภูมิน้ำร้อน 80 องศาเซลเซียส จนน้ำถั่วเหลืองถึงอุณหภูมิ 60, 70 และ 80 องศาเซียลเซียส เป็นเวลา 9, 20 และ 50 นาทีตามลำดับ เมื่อถึงอุณหภูมิตามที่กำหนดทั้ง 3 ระดับ แล้วจึงนำไปวัดความหนืด โดยวัดความหนืด 3 ซ้ำในแต่ละอุณหภูมิ



(ก) (ข)

รูปที่ 3.15 ชุดการวัดความหนืด (ก) เครื่องวัดความหนืด (รุ่น DV-II+Pro, BROOKFIELD, USA) , (ข) แกนหมุนทรงกระบอกหมายเลข 1 สำหรับวัดความหนืด

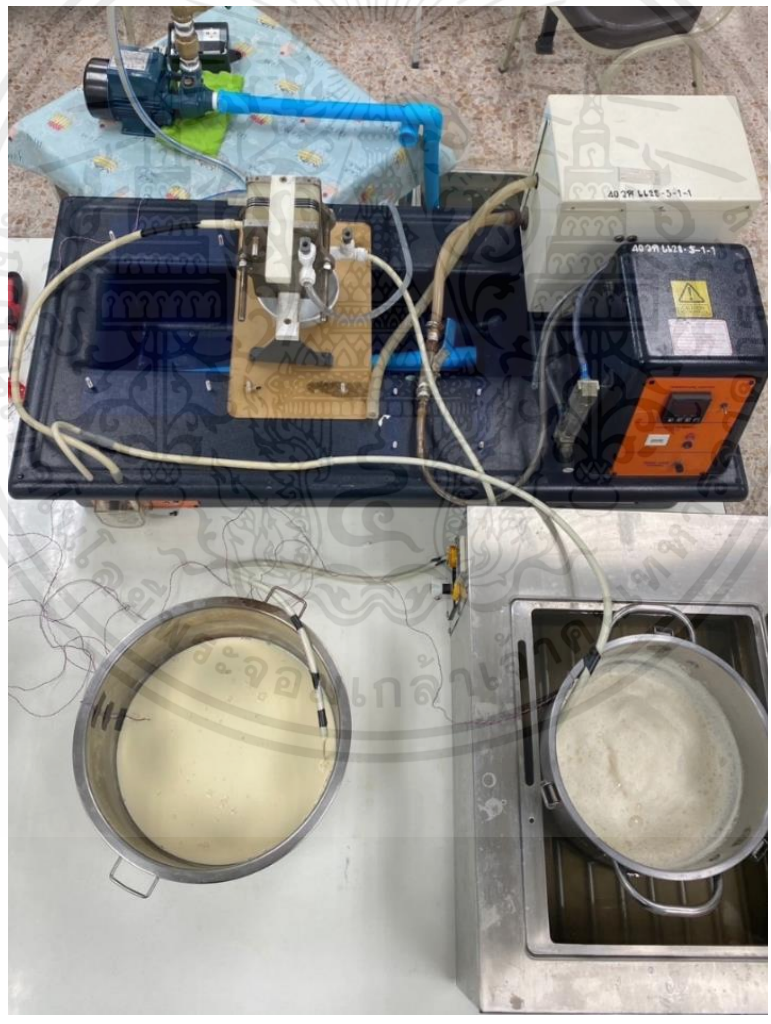
3.3 การทดลองการเกิดคราบ

ชุดทดลองการเกิดคราบดัดแปลงมาจากเครื่องพาสเจอร์ไรส์ระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory pasteurizer - FT75, Armfield, อังกฤษ) ประกอบด้วย หม้ออุ่นน้ำ 2 เครื่อง, ปั๊มหอยโข่ง (C-JET-QB60), เครื่องปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump), ภาชนะบรรจุตัวอย่าง และชุดวัดการเกิดคราบ มีส่วนประกอบ คือ คอมพิวเตอร์, เครื่องบันทึกข้อมูลและเทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (k type) สำหรับการบันทึกค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิน้ำร้อน ทุก ๆ 5 นาที ทั้งหมด 5 จุด ได้แก่ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออก และอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองในภาชนะพัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3.16 การวัดอุณหภูมิ (ก) อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าและขาออก (ข) อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออกและภาชนะพัก และ (ค) อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า



รูปที่ 3.17 ชุดทดลองการเกิดคราบ

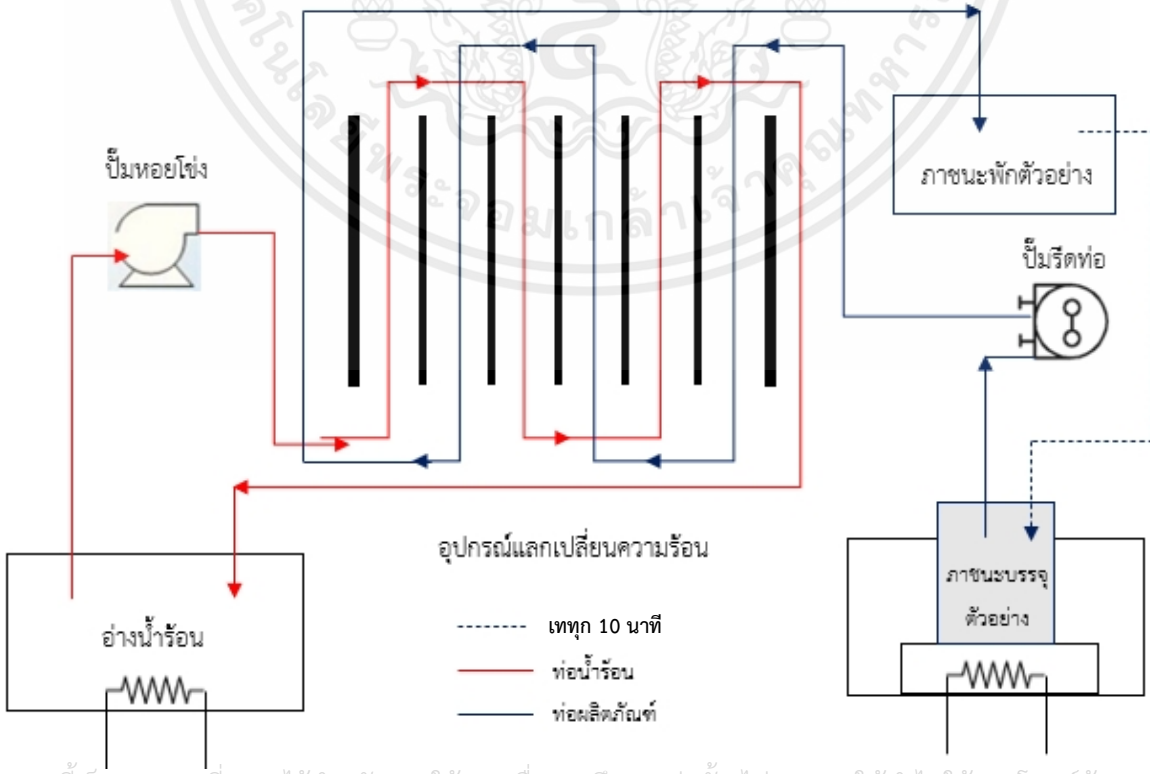
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มการทดลองด้วยการให้ความร้อนกับน้ำถั่วเหลือง จนน้ำถั่วเหลืองมีอุณหภูมิเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส จึงเริ่มการป้อนน้ำร้อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.19 ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที เพื่อเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนใกล้เคียงกับอุณหภูมิน้ำร้อนเป็นเวลา 300 วินาที (จากการทดลองการหาจากการหาอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ลดลงหลังจากเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน) สำหรับอุณหภูมิพื้นผิวที่ทำการทดลองมีทั้งหมด 5 ระดับ ได้แก่ 65, 70, 75, 80 และ 85 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าและขาออกต่างกัน 5 องศาเซลเซียส จากนั้นเริ่มทำการป้อนน้ำถั่วเหลืองเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการเปิดการทำงานของปั๊มรีดท่อ ด้วยความเร็ว 0.048 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) คำนวณได้จากตัวเลขเรย์โนลด์ดังสมการที่ 3.3 โดยที่ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเท่ากับ 30.1 และเริ่มจับเวลา แล้วนำน้ำถั่วเหลืองขาออกกลับมาผสมในภาชนะของน้ำถั่วเหลืองขาเข้าทุกๆ 10 นาที เนื่องจากเป็นระยะเวลาที่อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองในภาชนะพักลดลงจนใกล้เคียงกับน้ำถั่วเหลืองในภาชนะบรรจุตัวอย่าง โดยการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นระยะเวลา 3600 วินาที เมื่อครบเวลาจึงปิดการทำงานของปั๊มรีดท่อและปั๊มน้ำ

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{\rho v (2b)}{\mu} \qquad (3.3)$$

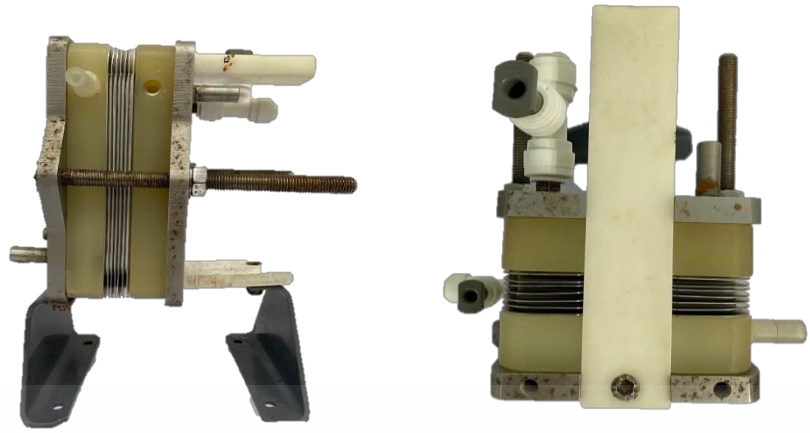
$$Re = \frac{(1045\ kg/m^3)(0.048\ m/s)(2 \cdot 0.003\ m)}{(0.01\ kg/m.s)}$$

$$Re = 30.1$$



รูปที่ 3.18 แผนภาพการทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 3.19 ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Laboratory pasteurizer - FT75, Armfield, อังกฤษ)
(ก) ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ด้านข้าง , (ข) ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ด้านบน

3.4 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดคราบ

การวัดมวลของคราบ

หลังจากปิดปั๊มเมื่อครบเวลา ทำการถอดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แล้วพักทิ้งไว้เป็นเวลา 300 วินาที โดยวางแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนในแนวนอน ในระหว่างนั้นทำการซับน้ำและน้ำถั่วเหลืองบริเวณส่วนเกินรอบ ๆ ที่ไม่ได้นำมาวิเคราะห์ออก จากนั้นนำแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนไปชั่งน้ำหนักหามวลของคราบน้ำถั่วเหลืองด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน) ความละเอียด 0.001 กรัม โดยทำการวัด 1 ครั้ง ซึ่งมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองที่ได้จากการชั่งน้ำหนักนั้น เป็นมวลที่ยังหลงเหลือความชื้นอยู่ (wet mass) และเปรียบเทียบกับน้ำหนักแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนการทดลองที่ชั่งน้ำหนักก่อนเริ่มทดลองทุกครั้ง แสดงการวัดมวลของคราบ ดังรูปที่ 3.20

รูปที่ 3.20 การชั่งน้ำหนักมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การสร้างแบบจำลองทำนายการเกิดคราบ

การนำพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดคราบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาวิเคราะห์มิติตัวแปรโดยการสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ มีตัวแปรเป้าหมาย คือ มวลคราบสะสมรวมที่เกิดขึ้นบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (m_f) ส่วนตัวแปรอื่นๆ เกี่ยวข้องกับสมบัติของน้ำถั่วเหลืองและกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

3.5.1 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของผลิตภัณฑ์

โดยแนวโน้มการเกิดมวลคราบสะสมขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล ยกตัวอย่างเช่น ความหนืดและความหนาแน่น ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อความเค้นที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการเกาะติดและหลุดออกของคราบ (Awad, 2011) และสำหรับงานวิจัยนี้พารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาเกี่ยวกับสมบัติของของไหล (น้ำถั่วเหลือง) ได้แก่ ความหนืด (μ) และความหนาแน่น (ρ) ซึ่งส่งผลต่อการเกิดมวลคราบสะสม

3.5.2 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า (T_{pi}) และขาออก (T_{po}) ($\Delta T_p = T_{po}\text{-}T_{pi}$) อุณหภูมิพื้นผิว ($T_s$) โดยมีการศึกษาไว้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิพื้นผิวมีอิทธิพลต่อการเกิดคราบ (Awad, 2011) ความเร็วในการไหล (v) มีอิทธิพลอย่างมากต่อคราบในกระบวนการเกาะติดและหลุดออก และระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อน (t) นั่นคือระยะเวลาในการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดคราบ

ประเภทของพารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ชื่อทางกายภาพ	หน่วย	มิติของหน่วย
พารามิเตอร์เป้าหมาย	m_f	มวลของคราบน้ำถั่วเหลือง	kg	M^1
พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์	ρ	ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง	kgm^{-3}	$\mathrm{M}^1\mathrm{L}^{-3}$
	μ	ความหนืดของน้ำถั่วเหลือง	$\mathrm{kgm}^{-1}\mathrm{s}^{-1}$	$\mathrm{L}^2\mathrm{T}^2\mathrm{K}^1$
พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ	v	ความเร็วการไหลของน้ำถั่วเหลือง	ms^{-1}	LT^{-1}
	T_s	อุณหภูมิพื้นผิว	K	K^1
	ΔT_p	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้าและขาออก	K	K^1
	t	ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อน	$\mathbf{s}$	T^1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.6.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) มีการทดลองทั้งหมด 24 การทดลอง แสดงในภาคผนวก ก โดยผลการทดลองที่ได้ทั้งหมด 4 ซ้ำในแต่ละระดับอุณหภูมิ นำมาแบ่งข้อมูลผลการทดลองออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 2 ซ้ำในแต่ละระดับอุณหภูมิ ชุดที่ 1 สำหรับสร้างแบบจำลอง และชุดที่ 2 สำหรับทดสอบความแม่นยำของแบบจำลอง แสดงดังในตารางที่ 4.5 และ 4.6 แล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) โดยวิธีการของตูกี (Turkey's HSD test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 เพื่อยืนยันความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงไว้ในภาคผนวก ค

3.6.2 การวิเคราะห์สมการถดถอย

กำหนดให้ ตัวแปรอิสระ คือ กลุ่มของตัวแปรไร้มิติกลุ่มที่ 2 (π_2) และตัวแปรตาม คือ กลุ่มตัวแปรไร้มิติกลุ่มที่ 1 (π_1) โดยมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.5 แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาความสัมพันธ์กับสมการที่ 3.5 เพื่อวิเคราะห์สำหรับการสร้างแบบจำลอง

$$\pi_1 = \left[a \cdot \pi_2^b\right] + d \qquad (3.5)$$

โดยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) สามารถใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์ (Relative error) ในการประเมินว่าแบบจำลองที่ได้นั้นมีความแม่นยำในการทำนายมากน้อยเพียงใด หากค่าที่แบบจำลองทำนายได้ ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากแสดงว่าการทำนายของแบบจำลองนั้นมีความแม่นยำหรือความถูกต้อง (accuracy) สูง โดยการวัดทุกครั้งมักมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ จึงควรนำค่าความคลาดเคลื่อนมาพิจารณาในการวัดความแม่นยำด้วย ซึ่งมีวิธีคือ นำค่าจากการทดลองและค่าที่แบบจำลองทำนายได้ สองค่านี้มาลบกันแล้วส่วนด้วยค่าที่ได้จากการทดลอง โดยทั่วไปความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์ (\%)} = \left|\frac{x_{mea} - x_t}{x_t}\right| \times 100 \qquad (3.4)$$

โดยที่ x_{mea} คือ ค่าที่ได้จากการทำนายแบบจำลอง

X_t คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำถั่วเหลือง

4.1.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

จากการวัดความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง ได้ผลการวัดตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
60	1043
70	1046
80	1047

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ความหนาแน่นที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันมีความหนาแน่นที่ไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไม่ส่งผลต่อความหนาแน่น และความหนาแน่นเฉลี่ยที่ได้ มีค่าความหนาแน่นที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oguntunde และ Akintoye (1991) ที่ระดับความเข้มข้นใกล้เคียงกัน ดังนั้นในโครงงานวิจัยนี้จึงใช้ความหนาแน่นเฉลี่ยรวมในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยในการสร้างแบบจำลอง

4.1.2 การวิเคราะห์ความหนืด

จากตารางที่ 4.2 พบว่า ความหนืดที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกันมีความหนืดที่ใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลต่อความหนืดน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และ Chang (2007) ที่กล่าวว่า อุณหภูมิส่งผลต่อความหนืดน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเข้มข้น โดยที่ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองแปรผันอย่างมีนัยสำคัญกับความเข้มข้นของน้ำถั่วเหลือง ซึ่งโครงงานนี้ทำการทดลองที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ทำให้ไม่มีผลต่อความหนืดในโครงงานนี้ ดังนั้นความหนืดในแต่ละระดับจึงมีค่าใกล้เคียงกัน จึงทำให้ในแบบจำลองใช้ความหนืดเฉลี่ยรวมในการสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตร-เวลา)	ความหนืดเฉลี่ย (กิโลกรัมต่อเมตร-เวลา)
60	0.01025 0.01016 0.01032	0.01024
70	0.01328 0.01345 0.01320	0.01331
80	0.01560 0.01650 0.01540	0.01583
	ความหนืดเฉลี่ยรวม	0.0114±0.0023

4.2 การวิเคราะห์เชิงมิติสำหรับแบบจำลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลือง

จากการใช้ทฤษฎีบทบัคกิงแฮมพาย สามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติจากพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดมวลของคราบที่มีมิติ โดยเลือกมิติพื้นฐานเป็นระบบ MLTK ตามหน่วย SI ดังตารางที่ 3.1 ผ่านกระบวนการวิเคราะห์เชิงมิติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อลดจำนวนของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องภายใต้การทดลอง (Sharifpur et al, 2015; Tang et al, 2020)

ตารางที่ 4.3 ตารางเมทริกซ์สำหรับปริมาณทางกายภาพ

	m_f	t	ΔT_p	v	$T_s - T_{po}$	ρ	μ
K	0	0	1	0	1	0	0
M	1	0	0	0	0	1	1
L	0	0	0	1	0	-3	-1
T	0	1	0	-1	0	0	-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยเลือกใช้ตัวแปรซ้ำในการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ ความเร็วของการไหล (v) ผลต่างอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ขาออกและอุณหภูมิพื้นผิว ($T_s - T_{po}$) ค่าความหนาแน่น (ρ) และความหนืด (μ) และใช้ไดเมนชั่นเมทริกซ์ (Dimensional matrix) ในการหาเลขชี้กำลังของกลุ่มตัวแปรจากตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ตารางเมทริกซ์สำหรับปริมาณทางกายภาพสำหรับหาเลขชี้กำลัง

	m_f	t	ΔT_p	v	$T_s - T_{po}$	ρ	μ
K	0	0	1	0	1	0	0
M	1	0	0	0	0	1	1
L	0	0	0	1	0	-3	-1
T	0	1	0	-1	0	0	-1
	-3	-2	0	0	-3	-1	-2
	0	0	1	1	0	0	0
	-2	-1	0	0	-2	-1	-1
	3	1	0	0	3	1	1

พิจารณาตารางที่ 4.4 เป็นตารางที่ได้จากการใช้ไดเมนชั่นเมทริกซ์ จัดเป็นกลุ่มพายเทอมได้ 3 พายเทอม โดยตัวเลขในตารางด้านล่าง คือ เลขชี้กำลังของตัวแปรซ้ำในแต่ละกลุ่มด้านบนโดยจะเรียงลำดับเป็นแนวตั้งต่อแนวนอน สามารถจัดเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ 3 กลุ่ม โดยแสดงดังสมการที่ 7

$$\pi_1 = \frac{m_f \rho^2 v^3}{\mu^3} = f\left(\pi_2 = \frac{t \rho v^2}{\mu}, \pi_3 = \frac{\Delta T_p}{T_s - T_{po}}\right) \quad (7)$$

โดยกลุ่มตัวแปรไร้มิติแต่ละกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน กลุ่มตัวแปรที่ 1 (π_1) เกี่ยวข้องกับมวลของคราบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น กลุ่มตัวแปรที่ 2 (π_2) สัมพันธ์กับเวลาในการให้ความร้อน และกลุ่มตัวแปรที่ 3 (π_3) แสดงถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออก และอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในโครงงานวิจัยนี้กลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 2 (π_2) มีตัวแปรภายในกลุ่มนี้เป็นค่าคงที่ทั้งหมด คือ t= 3600 วินาที , ρ = 1045 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ v = 0.048 เมตรต่อวินาที ทำให้สมการของกลุ่มตัวแปรไร้มิติเหลือ 2 กลุ่มคือ $\pi_1 = \frac{m_f \rho^2 v^3}{\mu^3}$ และ $\pi_2 = \frac{\Delta T_p}{T_s - T_{po}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองสำหรับพัฒนาแบบจำลอง

จากการทดลองการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวที่อุณหภูมิพื้นผิวต่างๆ พบว่า คราบมีการเกาะติดบนพื้นผิวที่นำมาทดลอง ซึ่งคราบที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นสีขาวครีม เกาะติดกันแน่นบนแผ่น แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยนำมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวไปวิเคราะห์เชิงมิติแล้วสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายมวลของคราบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของพื้นผิวส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณมวลคราบน้ำถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ซึ่งเห็นได้ชัดว่าที่อุณหภูมิพื้นผิว 85 องศาเซลเซียส มีมวลคราบน้ำถั่วเหลืองสูงสุด และลดลงตามลำดับเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวลดลง โดยที่เกิดจากโปรตีนในน้ำถั่วเหลืองเสียสภาพไปเนื่องจากความร้อนแล้วมาเกาะติดเป็นคราบบนพื้นผิว (Guo et al, 2012) ซึ่งเป็นคราบที่เกิดจากโปรตีนเช่นเดียวกับคราบของนมวัว (Lalande et al, 1985) เมื่อมีการเพิ่มระดับความอุณหภูมิทำให้โปรตีนในน้ำถั่วเหลืองเสียสภาพเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปริมาณคราบที่เกาะติดบนพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน ส่งผลให้ที่ระดับอุณหภูมิพื้นผิว 85 องศาเซลเซียส มีมวลคราบน้ำถั่วเหลืองมากที่สุด

ตารางที่ 4.5 มวลคราบน้ำถั่วเหลืองจากการทดลองสำหรับนำไปสร้างแบบจำลองที่อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิพื้นผิว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออก (องศาเซลเซียส)	กลุ่มตัวแปรที่ 2	มวลคราบในแต่ละการทดลอง (กรัม)	มวลของคราบเฉลี่ย (กรัม)
65	60	1	0.527 0.556	0.540±0.012[a]
70	65	2	1.602 1.741	1.657±0.060[b]
75	70	3	3.770 4.423	4.047±0.202[c]
80	75	4	5.018 6.223	5.548±0.553[d]
85	80	5	7.521 7.741	7.284±0.426[e]

* ค่าที่มีตัวอักษรพิมพ์เล็ก (a, b, c, d และ e) ต่างกัน มีความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

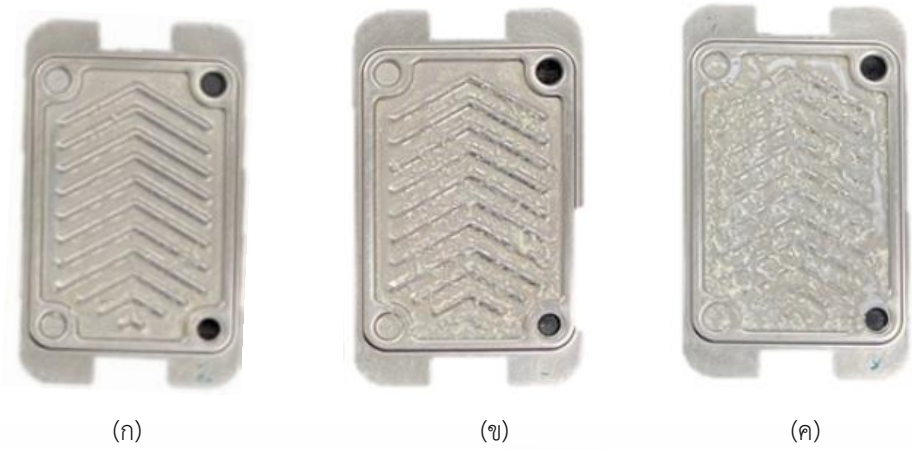
ตารางที่ 4.6 มวลคราบน้ำถั่วเหลืองจากการทดลองสำหรับนำไปทดสอบความแม่นยำแบบจำลอง อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิพื้นผิว (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออก (องศาเซลเซียส)	กลุ่มตัวแปรที่ 2	มวลของคราบน้ำถั่วเหลือง (กรัม)	มวลของคราบเฉลี่ย (กรัม)
65	60	1	0.534 0.542	0.540±0.012[a]
70	65	2	1.655 1.629	1.657±0.060[b]
75	70	3	4.045 4.129	4.047±0.202[c]
80	75	4	5.185 5.767	5.548±0.553[d]
85	80	5	7.075 6.799	7.284±0.426[e]

* ค่าที่มีตัวอักษรพิมพ์เล็ก (a, b, c, d และ e) ต่างกัน มีความแตกต่างกันของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

จากรูปที่ 4.1 สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าว่าคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้น เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยตัวอย่างคราบบนพื้นผิวและผลการทดลองปริมาณของมวลคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นในแต่ละระดับอุณหภูมิแสดงในภาคผนวก ข. และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.2 เพิ่มเติม สามารถสรุปได้ว่าคราบน้ำถั่วเหลืองเกิดขึ้นในแผ่นที่ 2 และ 3 มากที่สุด เนื่องจากในระหว่างแผ่นที่ 2 และ 3 เป็นแผ่นที่มีการไหลของน้ำถั่วเหลืองเป็นช่องว่างแรก และในระหว่างแผ่นที่ 1 และ 2 เป็นการไหลของน้ำร้อนเป็นช่องว่างแรก โดยอนุมานให้อุณหภูมิพื้นผิวเท่ากับอุณหภูมิน้ำร้อน จึงทำให้เป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนสูงสุด ก่อนเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำถั่วเหลือง และส่งผลให้น้ำถั่วเหลืองที่ไหลระหว่างแผ่นที่ 2 และ 3 ได้รับความร้อนสูงสุดจากพื้นผิวเช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้นจึงทำให้น้ำถั่วเหลืองเกิดการเสียสภาพจากความร้อนจนกลายเป็นคราบน้ำถั่วเหลืองแล้วเกาะติดที่พื้นผิวได้มากกว่าแผ่นอื่น

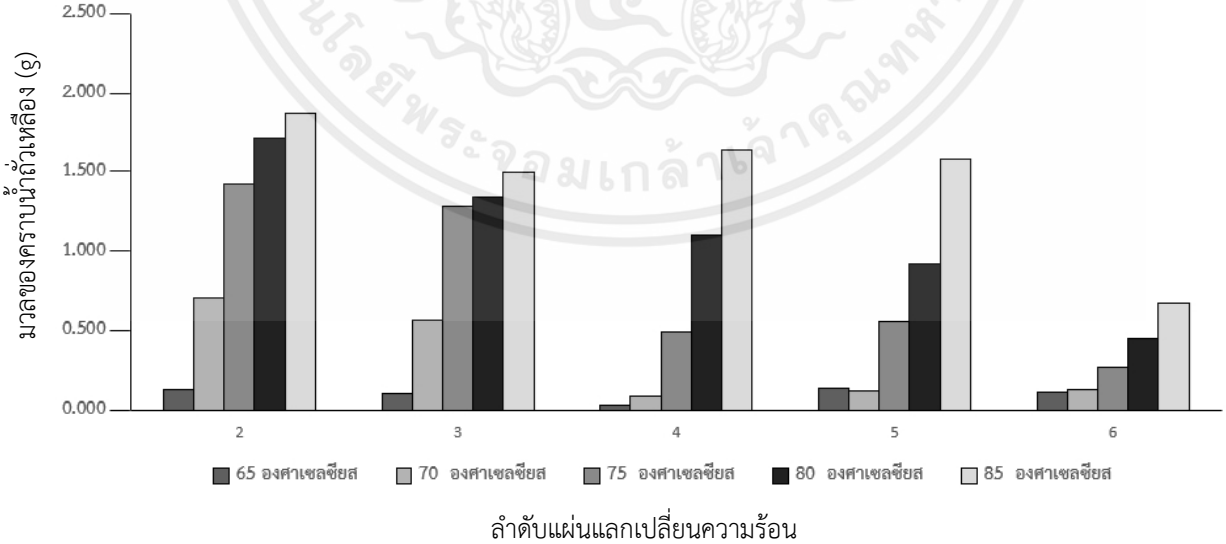
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข) (ค)

(ง) (จ)

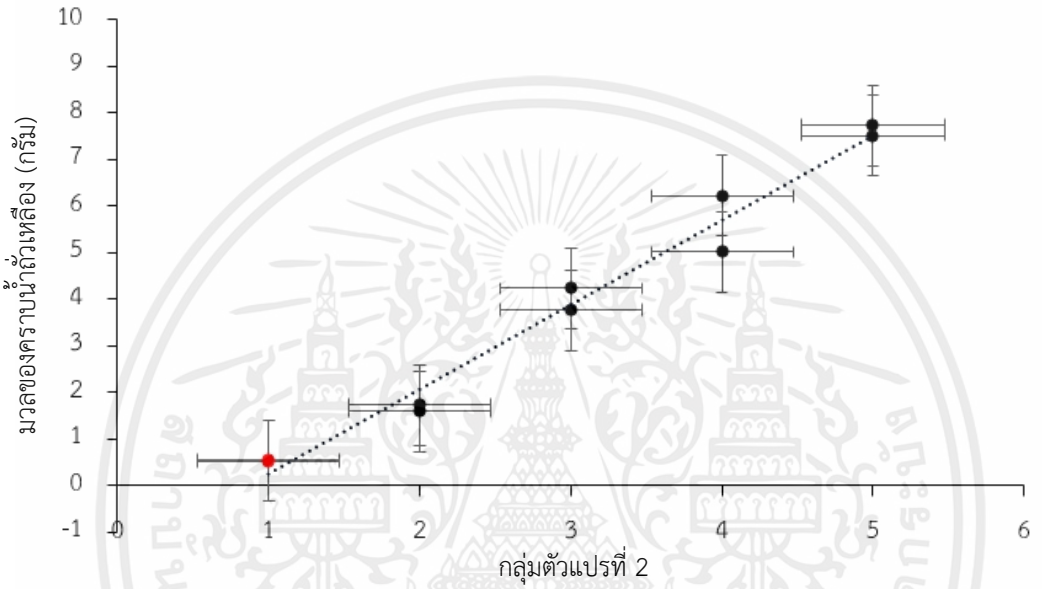
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิว (แผ่นที่ 2) หลังผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน 60 นาที ที่อุณหภูมิพื้นผิวแต่ละระดับ 65 องศาเซลเซียส, (ข) 70 องศาเซลเซียส, (ค) 75 องศาเซลเซียส, (ง) 80 องศาเซลเซียส และ (จ) 85 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 มวลคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นในแต่ละแผ่น ณ อุณหภูมิใดๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างมวลคราบที่เกิดขึ้นกับกลุ่มตัวแปรที่ 2 (π_2) คือ อัตราส่วนระหว่างผลต่างของอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออกและขาเข้ากับผลต่างของอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออก $(\frac{\Delta T_p}{T_s - T_{po}})$ ดังรูปที่ 4.3 เพื่อศึกษาแนวโน้มของมวลคราบที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิ สำหรับในแบบจำลองจากกราฟเห็นได้ว่ามวลของคราบมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามตัวแปรกลุ่มที่ 2 (π_2) โดยที่อุณหภูมิพื้นผิว 65 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออกมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลคราบที่เกิดขึ้นกับกลุ่มตัวแปรกลุ่มที่ 2

เสียสภาพของโปรตีนในน้ำถั่วเหลือง นั่นคือ 60 และ 65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลคราบที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากการเสียสภาพของโปรตีนในน้ำถั่วเหลือง โดยที่อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด ที่มีความคลาดเคลื่อน ±0.003 กรัม และเกิดจากน้ำหนักของน้ำส่วนเกินที่ไม่ได้ซับออกบริเวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน จึงไม่นำมาวิเคราะห์ในแบบจำลอง

4.4 การทดสอบแบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลือง

จากการนำข้อมูลของตัวแปรไปเข้าโปรแกรมทางสถิติ ซึ่งเป็นการสร้างความสัมพันธ์โดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้ความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ดังสมการที่ 4.1

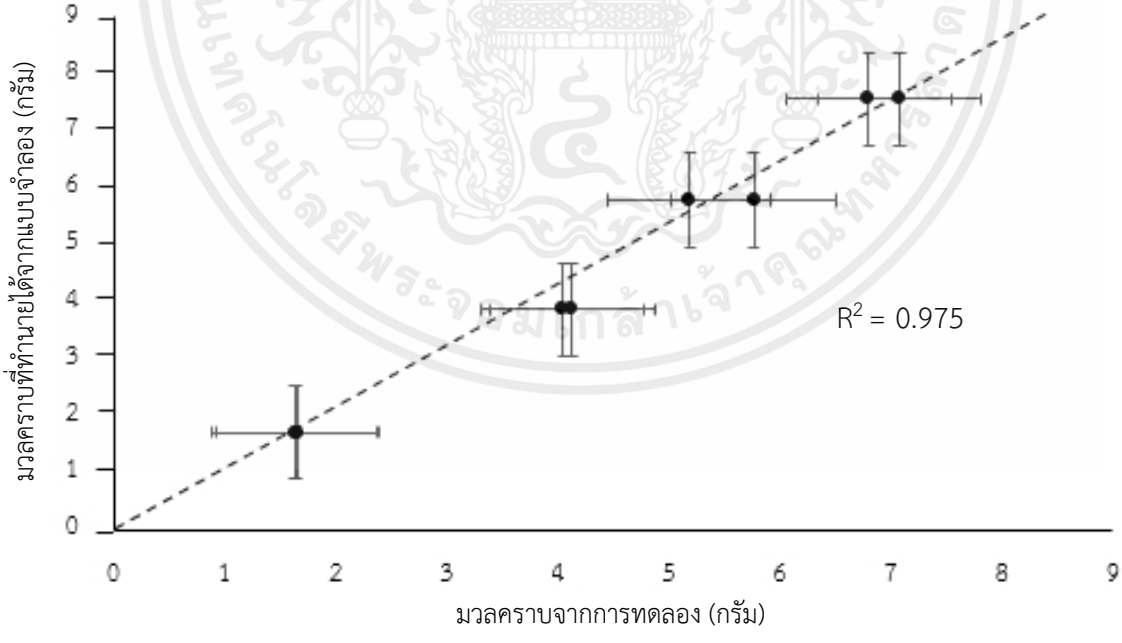
$$\pi_1 = 513655468.81\ (\pi_2{}^{(0.678)}) - 614926437.809 \qquad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำสมการความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้มาแทนค่าในตัวแปรกลุ่มที่ 1 (π_1) ได้สมการของแบบจำลองดังสมการที่ 4.2

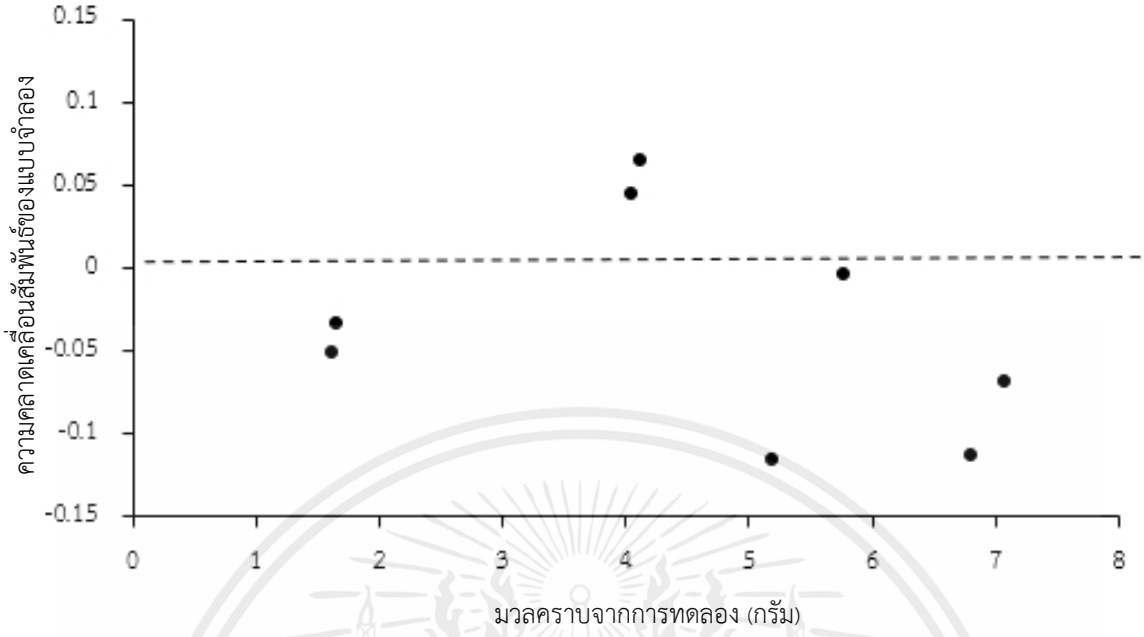
$$m_f = (4.253\left(\frac{\Delta T_p}{T_s - T_{po}}\right)^{0.678}) - 5.092 \quad (4.2)$$

มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทำนายไว้โดยแบบจำลองในสมการที่ 4.2 โดยที่แบบจำลองสร้างจากการทดลองในช่วง 193472304.5 ≤ π_1≤ 934874600.1 , 1 ≤ π_2≤ 5 ซึ่งสามารถใช้ทำนายคราบได้ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างที่นำมาสร้างแบบจำลอง มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.975 โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์เฉลี่ยร้อยละ 5.64 และเมื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์เฉลี่ยร้อยละ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบความแม่นยำแสดง ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทำนายกระจายตัวทั้งมากกว่าและน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองอย่างสมมาตร สอดคล้องกับรูปที่ 4.5 ที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์กับมวลของคราบ



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์กับมวลของคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นที่ระดับอุณหภูมิของพื้นผิวที่ต่างกันสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) ได้แบบจำลองการทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงมิติ ของตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองในกระบวนการการทดลองโดยการทำนายมวลของแบบจำลองที่ได้นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ ร้อยละ 6.22 จากค่าจริง

2) ปริมาณของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีการเกิดคราบเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นซึ่งมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตามการทำนายนอกขอบเขตของการสร้างแบบจำลองยังไม่ได้รับการตรวจสอบที่แน่ชัด เนื่องจากการเกิดคราบขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายประการ ซึ่งการทำนายนอกช่วงเป็นการทำนายที่ไม่แน่นอนจึงทำนายได้เพียงแค่แนวโน้มของการเกิดคราบเท่านั้น สำหรับการทดลองในอนาคตอาจเพิ่มความกว้างของช่วงอุณหภูมิหรือความละเอียดของกระบวนการให้มากขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำมาสร้างแบบจำลองที่สามารถทำนายคราบที่เกิดขึ้นในขอบเขตที่กว้างขึ้นได้อย่างแม่นยำ และนำข้อมูลของความหนาของคราบไปพิจารณาเพิ่มเติมถึงอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือความต้านทานความร้อนของคราบเพื่อใช้ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การสร้างแบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองนั้นควรมีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของผลิตภัณฑ์เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อการเกิดคราบของผลิตภัณฑ์นั้นๆโดยในโครงงานนี้ผู้จัดทำได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของน้ำถั่วเหลืองเพื่อนำมาใช้พิจารณาในการเลือกตัวแปรในการนำไปสร้างแบบจำลองทำนายการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองเพื่อให้ได้ตัวแปรที่ครอบคลุมสำหรับสร้างแบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นการทดลองในอนาคต สามารถนำข้อมูลเกี่ยวกับตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองไปต่อยอดร่วมกับการทดลองบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆเพื่อสร้างแบบจำลองในการทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆได้ หรืออาจวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำถั่วเหลืองที่มีผลต่อการเกิดคราบเพิ่มเติม เพื่อหารูปแบบที่แน่นอนของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสามารถนำไปพิจารณาหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือความต้านทานความร้อนของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้เพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

Akintoye and Oguntunde. 1991. **Measurement and Comparison of Density, Specific Heat and Viscosity of Cow's Milk and Soymilk**. Journal of Food Engineering 13. 221-230.

BJÖRN Palm., Jochim Claesson. 2006**. Plate Heat Exchangers: Calculation Methods for Single- and Two-Phase Flow.** Heat Transfer Engineering, 27(4), 88–98

B. Merheb, G. Nassar, B. Nongaillard, G. Delaplace, J.C. Leuliet. 2007. **Design and performance of a low-frequency non-intrusive acoustic technique for monitoring fouling in plate heat exchangers**. Journal of Food Engineering 82. 518–527.

Gu, Y., Bouvier, L., Tonda, A., Delaplace, G., 2019. **A mathematical model for the prediction of the whey protein fouling mass in a pilot scale plate heat exchanger.** Food Control 106, 106729.

Guillaume, D., Karine, L., Fabrice, D. and Romain, J., 2015. **Dimensional Analysis of Food Processes**.

Hussam, J., Navid, K., Sulaiman, Al., Bertrand, D., Amisha, C. and Savvas, A. Tassou. 2018. **Waste heat recovery technologies and applications.** Thermal Science and Engineering Progress. 6, 268-289.

Jian Guo., Xiao-Quan Yang., Xiu-Ting He, Na-Na Wu., Jin-Mei Wang., Wei Gu. and Yuan-Yuan Zhang. 2012. **Limited Aggregation Behavior of β-Conglycinin and Its Terminating Effect on Glycinin Aggregation during Heating at pH 7.0.** Journal of Agricultural and Food Chemistry. 60, 3782-3791.

Jennifer, K.R., Amy, J.L., Neal, D.B., Kim, S. and Amber A.G. 2006. **Acceptability of Soymilk as a Calcium-Rich Beverage in Elementary School Children.** Journal of the AMERICAN DIETETIC ASSOCIATION.

Jeremy, P. , Thierry, S. , Anne, M. , Gilles, R. , Guillaume, D. 2013. **β -lactoglobulin experiments and dimensional analysis.** Chemical Engineering Science. 101, 432-450.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J. Visser., Th. J. M. Jeurnink. 1997. **Fouling of Heat Exchangers in the Dairy.** Fluid Science 1997. 14, 407-424.

Jorge, A.W. Gut., Jose´, M. Pinto. 2003. **Modeling of plate heat exchangers with generalized configurations.** International Journal of Heat and Mass Transfer 46. 2571-2585.

Khaldi, M., Blanpain-Avet, P., Guérin, R., Ronse, G., Bouvier, L., André, C., Bornaz, S., Croguennec, T., Jeantet, R., Delaplace, G., 2015a. **Effect of calcium content and flow regime on whey protein fouling and cleaning in a plate heat exchanger.** J. Food Eng. 147, 68–78.

Liu, Z.S., Chang, S.K.C., Li, L. and Tatsumi, E. 2004. **Effect of selective thermal denaturation of soybean proteins on soymilk viscosity and tofu's physical properties**. Food Res. Int. 37, 815–822.

Liu, Z.S., Chang, S.K.C., 2007. **Soymilk viscosity as influenced by heating methods and soybean varieties**. Journal of Food Processing and Preservation. 31, 320-333

Makoto, S., Natsumi, T., Kimiko, T., Hiroaki, A. and Ryo, Y. 2008. **Effect of Heat Treatment on Dispersion Stability of Soymilk and Heat Denaturation of Soymilk Protein.** Food Sci. Technol. Res. 14 (1), 32–38.

Marc, L., Jean-Pierre, T. and Georges, C. 1985. **Fouling of Heat Transfer Surfaces Related to β-Lactoglobulin Denaturation During Heat Processing of Milk.** Blotechnology Progress. 1(2), 131-139.

Mostafa, M. Awad. 2011. **Fouling of Heat Transfer Surfaces.** Heat Transfer-Theoretical

Petit, J., Six, T., Moreau, A., Ronse, G., Delaplace, G., 2013. **β-lactoglobulin denaturation, aggregation, and fouling in a plate heat exchanger: pilot-scale experiments and dimensional analysis.** Chem. Eng. Sci. 101, 432–450.

Singh, R.P. and D.R. Heldman, 2009. Introduction to food engineering. 4 ed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แผนการทดลองโดยวิธีการแบบสุ่ม (Completely Randomized Design: CRD)

ตารางที่ ก.1 แผนการทดลอง

การทดลอง	อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า (องศาเซลเซียส)
1	75	55
2	80	55
3	85	55
4	80	55
5	75	55
6	85	55
7	75	55
8	80	55
9	75	55
10	70	55
11	70	55
12	65	55
13	85	55
14	65	55
15	80	55
16	85	55
17	70	55
18	65	55
19	65	55
20	70	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ

ตาราง ข.1 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 65 องศาเซลเซียส

	มวลของคราบ				มวลคราบเฉลี่ย
ซ้ำที่	1	2	3	4	
แผ่นที่	g	g	g	g	g
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.133	0.138	0.143	0.152	0.135
3	0.094	0.120	0.147	0.199	0.107
4	0.035	0.033	0.031	0.026	0.034
5	0.153	0.122	0.092	0.030	0.138
6	0.112	0.121	0.131	0.149	0.117
7	0.075	0.073	0.071	0.066	0.074
มวลรวม	0.527	0.534	0.542	0.556	0.540

ตาราง ข.2 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 70 องศาเซลเซียส

	มวลของคราบ				มวลคราบเฉลี่ย
ซ้ำที่	1	2	3	4	
แผ่นที่	g	g	g	g	g
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.749	0.665	0.707	0.756	0.707
3	0.514	0.627	0.571	0.610	0.571
4	0.067	0.109	0.088	0.094	0.088
5	0.154	0.100	0.127	0.136	0.127
6	0.171	0.101	0.136	0.145	0.136
7	0.046	0.033	0.040	0.042	0.040
มวลรวม	1.655	1.602	1.629	1.741	1.629

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.3 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 75 องศาเซลเซียส

	มวลของคราบ				มวลคราบเฉลี่ย
ซ้ำที่	1	2	3	4	
แผ่นที่	g	g	g	g	g
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.460	1.488	1.321	1.437	1.427
3	1.268	1.303	1.288	1.309	1.292
4	0.345	0.598	0.545	0.491	0.495
5	0.485	0.578	0.516	0.668	0.562
6	0.212	0.276	0.375	0.224	0.272
7	0.052	0.064	0.057	0.064	0.059
มวลรวม	3.770	4.243	4.045	4.129	4.047

ตาราง ข.4 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส

	มวลของคราบ				มวลคราบเฉลี่ย
ซ้ำที่	1	2	3	4	
แผ่นที่	g	g	g	g	g
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.515	1.700	1.885	1.754	1.714
3	1.130	1.180	1.550	1.526	1.347
4	1.156	1.092	1.019	1.169	1.109
5	0.786	0.872	0.933	1.113	0.926
6	0.431	0.341	0.380	0.661	0.453
7	0.068	0.026	0.013	0.070	0.044
มวลรวม	5.018	5.185	5.767	6.223	5.548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.5 ผลการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิว 85 องศาเซลเซียส

	มวลของคราบ				มวลคราบเฉลี่ย
ซ้ำที่	1	2	3	4	
แผ่นที่	g	g	g	g	g
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1.980	1.778	1.993	1.744	1.874
3	1.840	1.161	1.872	1.143	1.504
4	1.567	1.959	1.302	1.754	1.646
5	1.391	1.897	1.333	1.726	1.587
6	0.743	0.946	0.575	0.432	0.674
7	0.031	0.071	0.027	0.026	0.039
มวลรวม	7.521	7.741	7.075	6.799	7.284

ตาราง ข.6 มวลของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

หมายเลขแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน	มวล (g)
1	67.266
2	66.599
3	67.901
4	66.659
5	66.471
6	67.157
7	66.430

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ

(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

รูปที่ ข.1 คราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความรร้อนทั้ง 7 แผ่น หลังผ่านกระบวนการให้ความร้อน 60 นาทีที่อุณหภูมิพื้นผิวแต่ละระดับ (ก) 65 องศาเซลเซียส, (ข) 70 องศาเซลเซียส, (ค) 75 องศาเซลเซียส, (ง) 80 องศาเซลเซียสและ (จ) 85 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จ)

รูปที่ ข.1 (ต่อ) คราบน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความรร้อนทั้ง 7 แผ่น หลังผ่านกระบวนการให้ความร้อน 60 นาทีที่อุณหภูมิพื้นผิวแต่ละระดับ (ก) 65 องศาเซลเซียส, (ข) 70 องศาเซลเซียส, (ค) 75 องศาเซลเซียส, (ง) 80 องศาเซลเซียสและ (จ) 85 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดคราบทางสถิติ

ตาราง ค.1 การวิเคราะห์ความแปรปวนทางเดียวของมวลคราบน้ำถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลอง

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	121.911	4	30.478	286.909	< 0.001
Within Groups	1.593	15	0.106		
Total	123.504	19			

ตาราง ค.2 การทดสอบความแตกต่างของมวลคราบน้ำถั่วเหลืองด้วยวิธี Tukey HSD[a]

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
65	4	0.5397				
70	4		1.6566			
75	4			4.0467		
80	4				5.5482	
85	4					7.2840
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

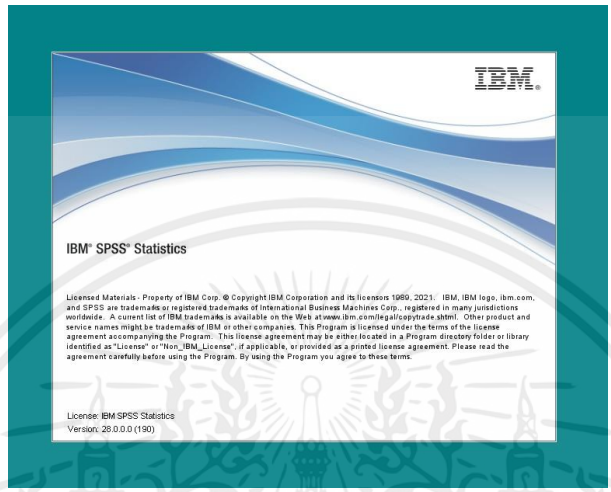
ตาราง ค.3 การวิเคราะห์ความแปรปวนทางเดียวของ π-term 1 กับ π-term 3

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5.568E+17	3	1.856E+17	58.387	< 0.001
Within Groups	1.271E+16	4	3.179E+15		
Total	5.695E+17	7			

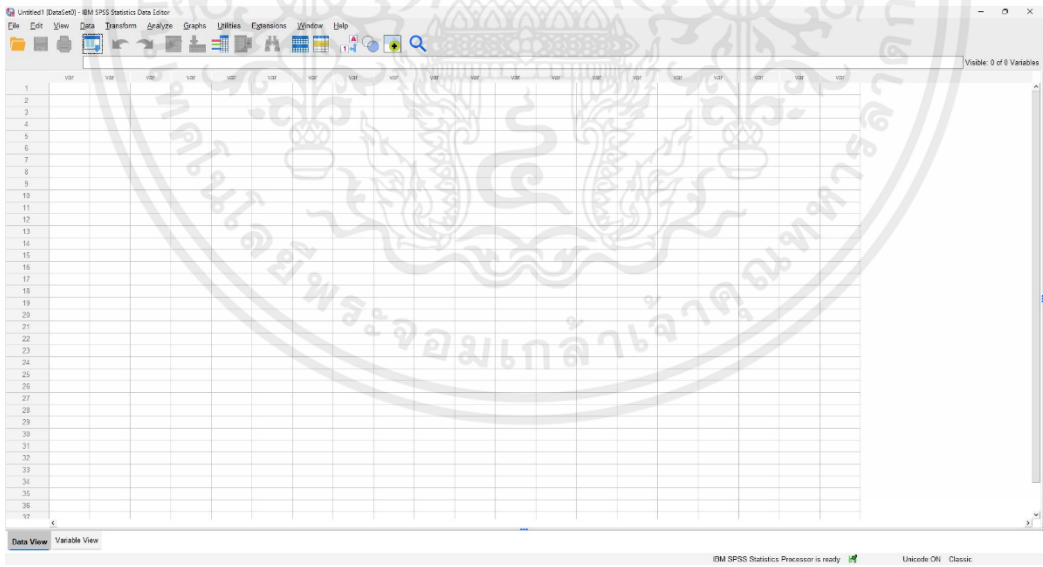
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
การใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics 22

1. เปิดเข้าโปรแกรมเพื่อใช้งาน หลังจากเปิดโปรแกรมแล้วจะได้หน้าต่างโปรแกรมดังรูปที่ ง.2



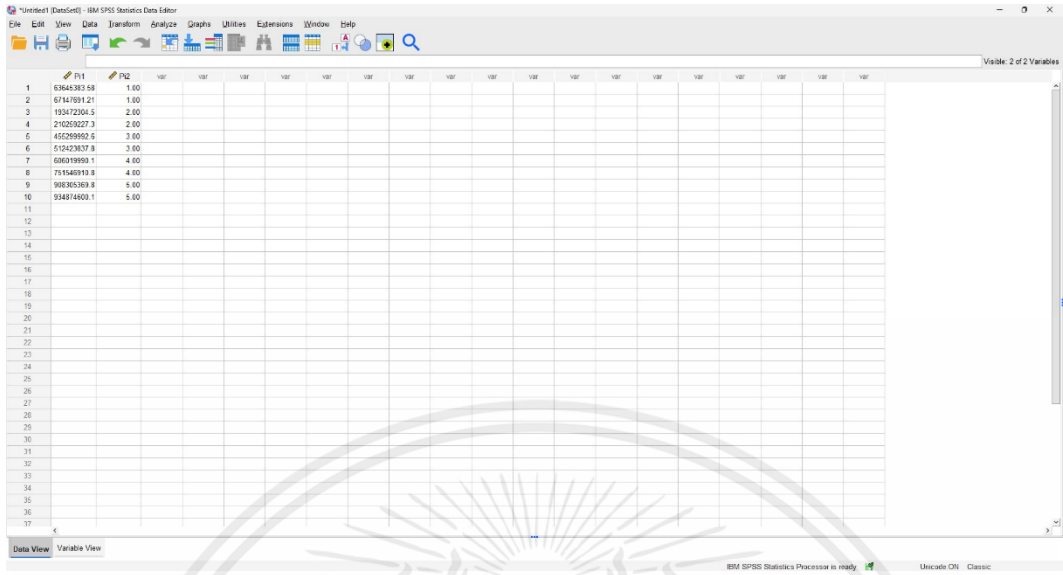
รูปที่ ง.1 การเปิดใช้โปรแกรม



รูปที่ ง.2 หน้าต่างโปรแกรม

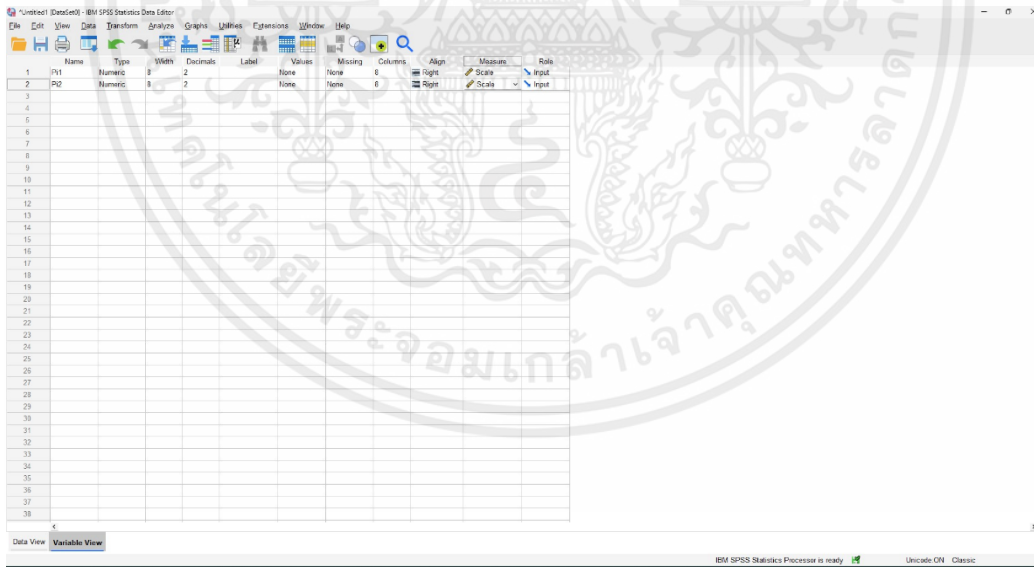
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คัดลอกข้อมูล π term ใส่ลงโปรแกรม



รูปที่ ง.3 การใส่ข้อมูลลงโปรแกรม

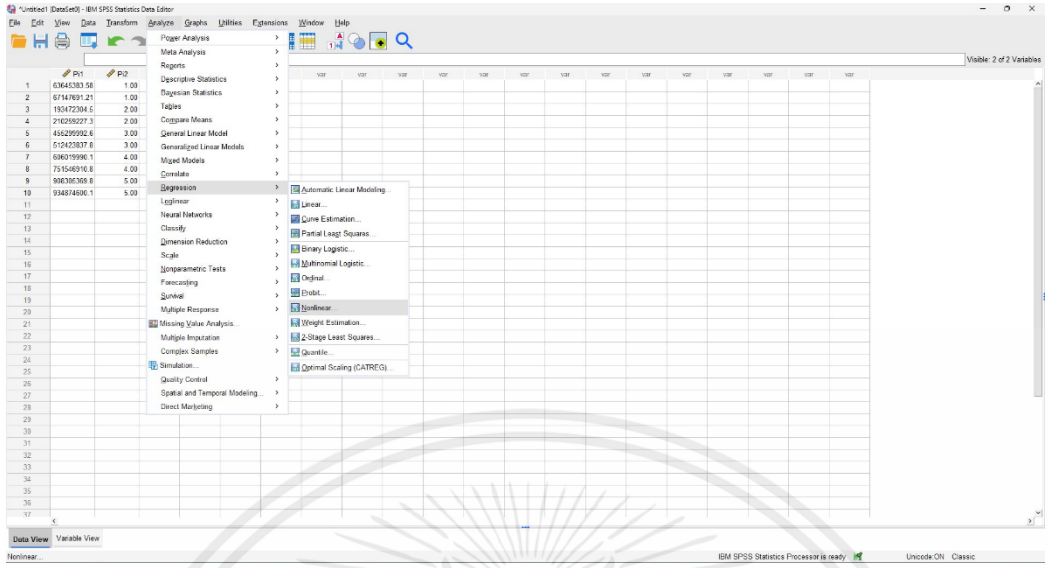
3. เลือก Variable View เพื่อตั้งค่าข้อมูล จากนั้นเลือก Name เพื่อเป็นการตั้งชื่อข้อมูล และเลือก Measure เพื่อระบุชนิดของข้อมูล



รูปที่ ง.4 การตั้งค่าข้อมูล

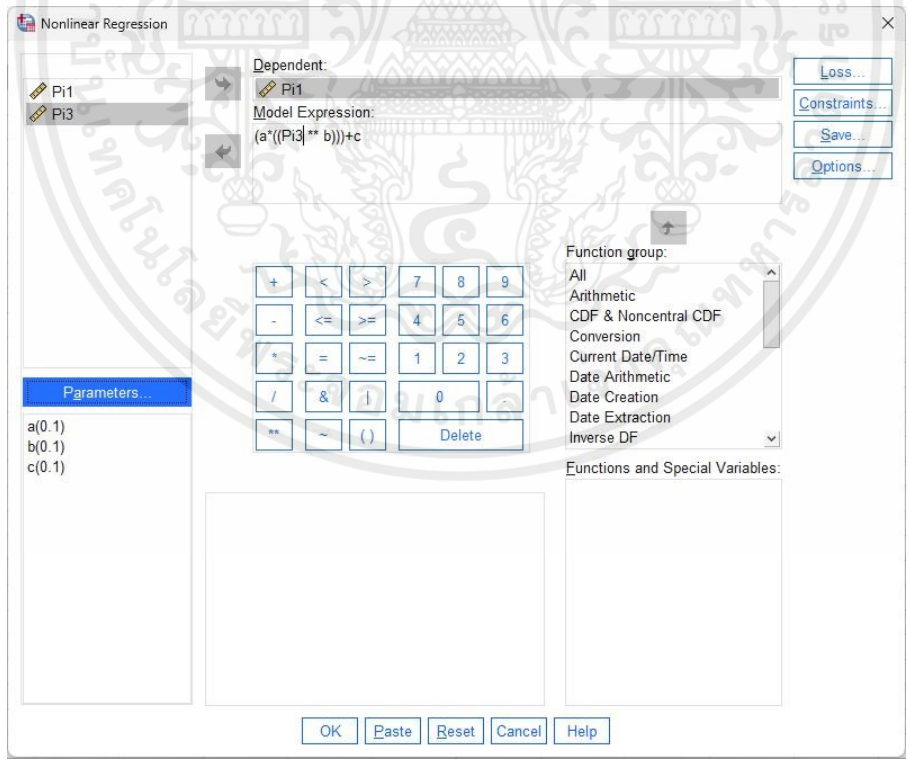
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เลือก Analyze เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล โดยเลือกการวิเคราะห์แบบ Nonlinear Regression



รูปที่ ง.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

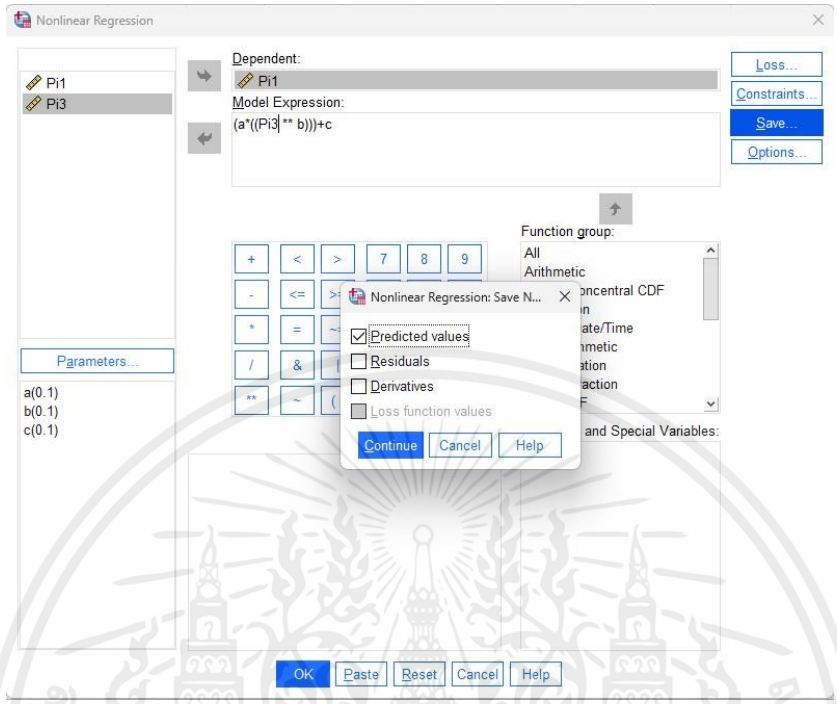
5. ระบุข้อมูลของ π term 1 ใน Dependent และ π term 2 ใน Model Expression หลังจากนั้นเลือก Parameters เพื่อระบุค่าเริ่มต้นของตัวแปร a b c



รูปที่ ง.6 ระบุ π term และค่าเริ่มต้น a b c

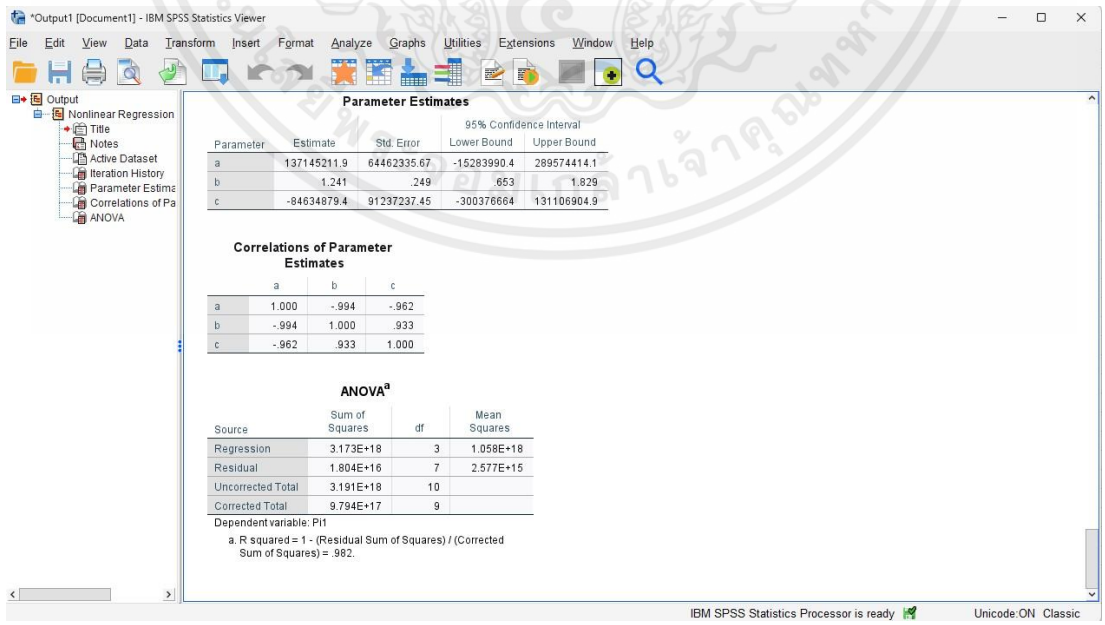
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เลือก Save ที่อยู่ด้านบนขวา จากนั้นเลือก Predicted values เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการคาดการณ์ แล้ว Continue และกด OK



รูปที่ ง.7 เลือกค่าที่ต้องการคาดการณ์

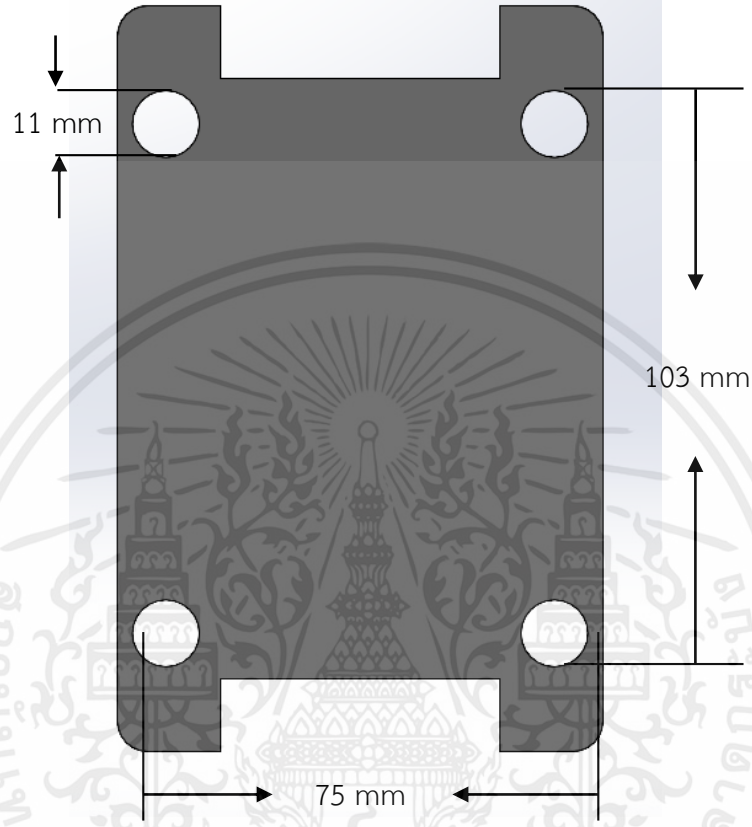
7. ผลที่ได้หลังจากการคาดการณ์เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง



รูปที่ ง.8 ผลที่ได้หลังจากการคาดการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ



ที่ จ.1 ขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้