

แบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

แบบแผ่นโดยการวิเคราะห์เชิงมิติ

PREDICTION MODEL OF SOYMILK FOULING MASS IN PLATE HEAT

EXCHANGER BY DIMENSIONAL ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-270-069

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREDICTION MODEL OF SOYMILK FOULING MASS IN PLATE HEAT
EXCHANGER BY DIMENSIONAL ANALYSIS

EKARIN ONGWONGSAKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD AND AGRICULTURAL INTELLIGENCE
ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-EN-M-270-069

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำ้าถั่วเหลืองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นโดยการวิเคราะห์เชิงมิติ
นักศึกษา	นายเอกรินทร์ องค์กรังสกุล
รหัสประจำตัว	65016105
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. นวภัทรา หนูนา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายมวลของคราบน้ำ้าถั่วเหลืองที่สะสมในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นโดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติโดยอาศัยทฤษฎีของบักกิงแฮมไพ และศึกษาผลของอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (65-85 °C) และปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำ้าถั่วเหลือง (15% และ 20% (w/w)) ต่อการเกาะติดของคราบน้ำ้าถั่วเหลืองบนพื้นผิวร้อนโดยใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ โดยกำหนดอุณหภูมิน้ำ้าถั่วเหลืองขาเข้าและความเร็วการไหลเท่ากับ 55 °C และ 0.048 ms⁻¹ ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวร้อนส่งผลให้ปริมาณมวลของคราบจากน้ำ้าถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.01) ในขณะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำ้าถั่วเหลืองไม่ส่งผลต่อการเกิดคราบอย่างมีนัยสำคัญ โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในช่วงเงื่อนไขของการทดลองสามารถใช้ประมาณปริมาณมวลของคราบน้ำ้าถั่วเหลืองที่ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ย 10.04%

Thesis Title	Prediction Model of Soymilk Fouling Mass in Plate Heat Exchanger by Dimensional Analysis
Student	Mr.Ekarin Ongwongsakul
Student ID.	65016105
Degree	Master of Engineering
Program	Food and Agricultural Intelligence Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navapattra Nunak

ABSTRACT

This research proposes the developing predictive model for soymilk fouling deposit mass in a plate heat exchanger using dimensional analysis. Dimensionless terms were groups using Buckingham's pi-theorem. The effect of surface temperatures of 65-85 °C and total solid content of soymilk of 15 and 20 % (w/w) on fouling deposit mass on hot surfaces were studied. Experiments were conducted using a lab-scale plate heat exchanger. The soymilk inlet temperature and flow velocity were fixed at 55 °C and 0.048 ms⁻¹, respectively. From the experiments, it was found that fouled mass on hot surfaces significantly increased with increasing of surface temperature (p<0.01), while total solid content of soymilk had no significant effect. The developed model within the ranges of experimental conditions was able to estimate the mass of soymilk fouling with an average relative error of 10.04%.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.นวกัศรา หนูนาค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการให้ความรู้ คำแนะนำ ช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ รวมถึงการโตเป็นผู้ใหญ่ที่ดี จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชี้อัสตัย และ ผศ. ดร.เจษฎา ชัยโฉม ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือทั้งด้านการทดลองรวมถึงการทำวิจัย และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่มอบวิชาความรู้ให้ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่ให้ความสำคัญต่อผู้วิจัยมาโดยตลอด คอยสนับสนุน เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณนาย บดินทร์ สัมฤทธิ์โสภาค ที่ทำหน้าที่ คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และคอยชี้แนะแนวทาง ตั้งแต่เรียนระดับบัณฑิตศึกษาในวันแรกจนจบการศึกษา

สุดท้ายนี้คุณค่าและประโยชน์ที่อาจมีในงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้พระคุณของบิดามารดาที่ให้กำเนิดและเลี้ยงดูให้การศึกษา ตลอดจนครูบาอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนในการวางรากฐานการศึกษาให้แก่ผู้วิจัย

เอกรินทร์ องค์กรวงศ์สกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การวิเคราะห์เชิงมิติ.....	5
2.1.1 ปริมาณทางฟิสิกส์.....	5
2.1.2 กฎพื้นฐานสำหรับการสร้างชุดตัวแปรไร้มิติ.....	6
2.2 การเกิดคราบ.....	8
2.2.1 ประเภทและกลไกของการเกิดคราบอาหาร.....	8
2.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบอาหารเหลวกลุ่มโปรตีน.....	9
2.3 น้ำแก้วเหลืองและการให้ความร้อนน้ำแก้วเหลือง.....	10
2.4 ค่าความต้านทานความร้อนของคราบ.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.5.1 การวิเคราะห์เชิงมิติและการสร้างแบบจำลอง.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การเสียดสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนในถั่วเหลืองจาก ความร้อนและการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวร้อน..	14
2.5.3 สมบัติของน้ำถั่วเหลือง.....	15
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	16
3.1 การเตรียมน้ำถั่วเหลือง.....	16
3.1.1 การหาสมบัติของน้ำถั่วเหลือง.....	17
3.2 ชุดทดลองการเกิดคราบ.....	19
3.3 การทดลองการเกิดคราบ.....	21
3.3.1 การทดลอง.....	21
3.3.2 การวัดมวลและความหนาของคราบน้ำถั่วเหลือง.....	23
3.4 การวิเคราะห์เชิงมิติ.....	25
3.5 การวิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของคราบ.....	28
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง.....	32
4.1 ความหนืดและความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง.....	32
4.1.1 ความหนืดของน้ำถั่วเหลือง.....	32
4.1.2 ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง.....	33
4.1.3 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง.....	34
4.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง..	35
4.3 ผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อการเกิดคราบน้ำถั่ว เหลือง.....	45
4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 อิทธิพลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อมวลของคราบน้ำแก้ว	46
เหลือ.....	
4.4 การทดสอบแบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำแก้วเหลือ.....	47
4.5 ความต้านทานความร้อนของคราบ.....	48
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำแก้วเหลือขาออกกับเวลา.....	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มิติของหน่วยตัวแปรในระบบหน่วย SI.....	6
3.1 รายละเอียดชุดทดลองการเกิดคราบ.....	22
3.2 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดคราบของน้ำแก้วเหลืองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	26
3.3 ตารางเมทริกซ์ของกลุ่มตัวแปร.....	27
4.1 ความหนืดของน้ำแก้วเหลืองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	32
4.2 ความหนืดของน้ำแก้วเหลืองที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง.....	33
4.3 ความหนาแน่นของน้ำแก้วเหลืองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	34
4.4 ปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และปริมาณของแข็งทั้งหมด.....	35
4.5 ปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ	36
4.6 มวลของคราบน้ำแก้วเหลืองที่เกิดขึ้นบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w).....	38
4.7 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการเกิดคราบของน้ำแก้วเหลืองที่มีกลุ่มตัวแปรไว้มีติจำนวน 5 กลุ่ม.....	40
4.8 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการเกิดคราบของน้ำแก้วเหลืองที่มีกลุ่มตัวแปรไว้มีติจำนวน 4 กลุ่ม.....	41
4.9 สมบัติของคราบน้ำแก้วเหลืองที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	48
4.10 ความต้านทานความร้อนของคราบน้ำแก้วเหลืองที่เวลาให้ความร้อน 60 min.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่าง

รูปที่	หน้า
2.1 การรวมตัวกันของโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	12
3.1 แผนผังกระบวนการเตรียมน้ำแก้วเหลือง.....	17
3.2 การให้ความร้อนน้ำแก้วเหลือง.....	17
3.3 ชุดการวัดความหนืด.....	18
3.4 ชุดทดลองการเกิดคราบ.....	19
3.5 ขนาดของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	20
3.6 ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และน้ำร้อน.....	20
3.7 แผนภาพการทำงานของชุดการทดลองการเกิดคราบ.....	22
3.8 คราบน้ำแก้วเหลืองบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	23
3.9 การวัดมวลคราบน้ำแก้วเหลือง.....	24
3.10 การวัดความหนาคราบน้ำแก้วเหลือง.....	24
3.11 ตัวอย่างคราบน้ำแก้วเหลืองที่มีลักษณะเป็นทรงกลม.....	29
4.1 แผนภูมิภาพแสดงการกำหนดค่าของระบบและจุดปฏิบัติการของกลุ่มตัวแปร.....	37
4.2 ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ 2 ต่อมวลของคราบน้ำแก้วเหลือง.....	42
4.3 ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ 3 ต่อมวลของคราบน้ำแก้วเหลือง.....	43
4.4 ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ 4 ต่อมวลของคราบน้ำแก้วเหลือง.....	44
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อมวลของคราบน้ำแก้วเหลืองที่เวลาให้ความร้อน 60 min.....	45
4.6 อิทธิพลของปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำแก้วเหลืองต่อมวลของคราบน้ำแก้วเหลืองที่เวลาให้ความร้อน 60 min.....	46
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลคราบที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับมวลคราบที่ได้จากการทดลอง.....	47
4.8 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของมวลที่ทำนายได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับมวลของคราบน้ำแก้วเหลืองจากการทดลอง.....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำแก้วเหลืองต่อ ความต้านทานความร้อนของคราบน้ำแก้วเหลืองที่เวลา 60 min.....	50
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำแก้วเหลืองขาออกกับเวลา ที่อุณหภูมิ พื้นผิวต่าง ๆ	51



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำถั่วเหลืองเป็นเครื่องดื่มที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนมากถึง 3.50% (Riaz, 2006) และเป็นเครื่องดื่มทางเลือก สำหรับผู้บริโภคที่ต้องการเครื่องดื่มทดแทนนมวัว เนื่องจากน้ำถั่วเหลืองไม่มีแลคโตสและคอเลสเตอรอล (Iwuoha and Umunnakwe, 1997) จึงจัดเป็นนมที่ผลิตจากพืช (Plant-based Milk) (Vanga และ Raghavan, 2018) เช่นเดียวกับ นมอัลมอนต์ นมข้าว และนมมะพร้าว โดยน้ำถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีนมากที่สุดในกลุ่มของนมทางเลือก (Astolf และ คณะ, 2020) ซึ่งโปรตีนส่วนใหญ่ในน้ำถั่วเหลืองเป็นโปรตีนชนิดโกลบูลิน (Globulin) (Wolf และ Cowan, 1971) โดยมีปริมาณร้อยละ 70 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Ono, 1991) ส่วนใหญ่เป็น เบต้า-คอนโกลีซินิน (β -Conglycinin) และโกลีซินิน (Glycinin) (Wang และคณะ, 2018; Thanh, 1977 ; Wolf, 1993)

ในอุตสาหกรรมแปรรูปนมและนมที่ผลิตจากพืช นิยมใช้กระบวนการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) ด้วยความร้อนเพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค และยืดอายุการเก็บรักษา (Teixeira, 2014) ซึ่งโดยส่วนใหญ่นิยมฆ่าเชื้อด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger, PHE) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งาน และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง (Mota, Carvalho และ Ravagnani, 2015) สำหรับน้ำถั่วเหลืองการให้ความร้อนยังช่วยปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาการด้วย เช่น การทำลายสารยับยั้งทริปซิน ฮี-แมกกลูตินิน และกอยโตรเจน (Liener, 1958) เป็นต้น และช่วยขจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ด้วยการทำลายลิพอกซีจีเนสในถั่ว (Wilkins และคณะ, 1967; Nelson และคณะ, 1980) โดยในระหว่างการพาสเจอร์ไรส์ด้วยความร้อน โครงสร้างของส่วนประกอบโปรตีนจะเกิดการเสียสภาพธรรมชาติ (Protein denaturation) ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนพื้นผิวร้อน และรวมตัวเพื่อก่อตัวเป็นคราบยึดเกาะกับพื้นผิวของอุปกรณ์ (Awad, 2011) โดยเมื่อให้ความร้อนกับน้ำถั่วเหลือง โปรตีนชนิดเบต้า-คอนโกลีซินินจะเริ่มเสียสภาพที่อุณหภูมินี้ 65 °C และตามด้วยโกล-ซินินซึ่งจะเสียสภาพที่อุณหภูมิ 80 °C (Guo และคณะ, 2012) ซึ่งคราบที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิการพาสเจอร์ไรส์ จัดเป็นคราบประเภท A ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นโปรตีน (50% - 60%) (Lalande และ Tissier, 1985; Blanpain-Avet และคณะ, 2012)

การเกิดคราบ (Fouling) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง (Awad, 2011) ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องจำนวนมากที่ทำให้เกิดคราบ (Belmar-Beiny และคณะ, 1993) แบ่งเป็นปัจจัยของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อคราบ การเสียดสภาพธรรมชาติของโปรตีนในผลิตภัณฑ์ การรวมตัวของโปรตีน (Aggregation) (Petit และคณะ, 2013) สมบัติทางความร้อน (ความจุความร้อนจำเพาะ) สมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น) และสมบัติเชิงรีโอโลยี (ความหนืด) ของผลิตภัณฑ์ (Gu และคณะ, 2019) เป็นต้น ปัจจัยของกระบวนการที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ ได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยพบว่าการเกาะติดของคราบโปรตีนมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้น (Ling และ Lund, 1978) ความเร็วการไหล และเวลาในการให้ความร้อน (Awad, 2011) โดยที่อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพธรรมชาติทางความร้อนของโปรตีน (Bott, 1995) และปริมาณของแข็งทั้งหมดในอาหารส่งผลต่อปัจจัยที่เกี่ยวกับสมบัติของอาหาร ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงต่อกระบวนการเกิดคราบ ทั้งการเกาะติดและการหลุดออกของคราบอาหาร (Awad, 2011) การเกิดคราบเป็นปัญหาสำคัญในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Awad, 2011) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบให้สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิที่กำหนดเมื่อมีคราบเกิดขึ้น

นักวิจัยจำนวนมากสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายคราบจากหลายวิธี เพื่อให้เข้าใจอิทธิพลของคราบต่อการถ่ายเทความร้อน และเพื่อออกแบบเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนตามที่กำหนด (Gu, 2019) เช่น Pan และ Chen (2019) ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ทำนายการเปลี่ยนแปลงของชั้นการสะสมของคราบนม โดยพบว่าขีดจำกัดของวิธีนี้คือ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม (Boundary conditions) (Post, 2011) และ Fryer และคณะ (1996) สร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางสถิติ (Empirical model) โดยได้แบบจำลองสำหรับทำนายอัตราการสะสมของคราบ ซึ่งความแม่นยำของแบบจำลองที่พัฒนาจากวิธีนี้ขึ้นกับจำนวนของการทดลอง และการควบคุมพารามิเตอร์สำหรับการทดลองนั้น เป็นไปได้ยาก ไม่สามารถควบคุมให้เท่ากันทุกการทดลองซ้ำได้ จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 วิธีนี้มีข้อจำกัด การวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองทำนายมวลคราบที่สะสมได้อย่างแม่นยำ นั้นต้องเข้าใจถึงพื้นฐานที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์การเกิดคราบซึ่งมีความซับซ้อนมาก ทั้งกระบวนการทางกายภาพและเคมีที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (การเสียดสภาพของโปรตีน, การเกาะติด และการหลุดออกของคราบโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น) การวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional analysis, DA) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการสร้างแบบจำลอง ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่ต้องมีความรู้เชิงลึกเกี่ยวกับกระบวนการที่ศึกษา (Delaplace และคณะ, 2015) รวมถึงสามารถลดจำนวนตัวแปรและการทดลองได้ (Gu และคณะ, 2019) ปัจจุบันการวิเคราะห์เชิงมิติถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายมวลของคราบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Petit และคณะ, 2013; Gu และคณะ, 2019; Alhuthali และคณะ, 2022)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการสร้างแบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองด้วยการวิเคราะห์เชิงมิติ รวมถึงการคำนวณค่าความต้านทานความร้อนของคราบ (Fouling resistance) จาก การเปลี่ยนแปลงมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง (Awad, 2011) โดยศึกษาผลของอุณหภูมิพื้นผิวร้อน และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุมัติฯ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลือง ต่อคราบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวร้อน และปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำถั่วเหลือง ต่อปริมาณการเกาะติดของคราบน้ำถั่วเหลืองบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการเป็นชุดทดลองการเกิดคราบ โดยลักษณะการไหลในชุดทดลองนี้เป็นการไหลแบบราบเรียบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและวิธีการสร้างแบบจำลองโดยการวิเคราะห์เชิงมิติ

1.4.2 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการกลไกการเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ปัจจัยและอิทธิพลที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ การเกิดคราบในอุตสาหกรรมอาหาร และวิธีตรวจสอบการเกิดคราบ

1.4.3 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์เชิงมิติในอุตสาหกรรมนม และเครื่องต้ม การเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน การศึกษาเกี่ยวกับน้ำถั่วเหลือง และงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับน้ำถั่วเหลือง ส่วนประกอบทางเคมีของสมบัติการไหลของน้ำถั่วเหลือง สมบัติทางความร้อน สมบัติของของไหล โปรตีนที่ทำให้เกิดคราบในน้ำถั่วเหลือง เป็นต้น

1.4.4 ออกแบบการทดลอง สร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการเกิดคราบน้ำถั่วเหลือง และทำการทดลองเบื้องต้น

1.4.5 ดำเนินการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลือง ต่อด้วยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองสร้างแบบจำลองโดยการวิเคราะห์เชิงมิติ และการสร้างแบบจำลองโดยวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้แบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการสำหรับทำนายมวลของคราบน้ำแก้วเหลืองในเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

1.5.2 สามารถอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวร้อน และปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำแก้ว เหลืองต่อปริมาณการเกาะติดของคราบน้ำแก้วเหลืองบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขต ของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงมิติ การเกิดคราบน้ำแก้ว เหลืองและการให้ความร้อนน้ำแก้วเหลือง ค่าความต้านทานความร้อนของคราบ และงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการเตรียมน้ำแก้วเหลือง ชุดทดลองการเกิดคราบ การทดลองการเกิดคราบ (การทดลองการเกิดคราบ และการวัดมวลและความหนาของคราบน้ำแก้วเหลือง) การวิเคราะห์เชิงมิติ การวิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของคราบ และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองเพื่อหาสมบัติของน้ำแก้วเหลือง (ความหนืดของน้ำแก้วเหลือง และ ความหนาแน่นของน้ำแก้วเหลือง) การสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายมวลของคราบน้ำแก้วเหลือง ผลของอุณหภูมิพื้นผิวและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อการเกิดคราบน้ำแก้วเหลือง การทดสอบ แบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำแก้วเหลือง และค่าความต้านทานความร้อนของคราบ

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การวิเคราะห์เชิงมิติ

การวิเคราะห์เชิงมิติเป็นเครื่องมือในการสร้างตัวเลขไร้มิติที่เชื่อมโยงถึงสาเหตุของปรากฏการณ์ที่ศึกษากับผลกระทบของปรากฏการณ์นั้นโดยใช้ความสอดคล้องกันของมิติเพื่อให้คำจำกัดความของเหตุการณ์ที่ศึกษา และใช้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่มีความเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ที่ศึกษา โดยการวิเคราะห์เชิงมิติทำให้เข้าใจกระบวนการทางฟิสิกส์ได้มากขึ้น โดยมีองค์ประกอบ 4 องค์ประกอบ ได้แก่ ปริมาณทางฟิสิกส์ การวัดปริมาณทางฟิสิกส์ หลักความสอดคล้องกัน และกฎพื้นฐานสำหรับการสร้างชุดของตัวแปรไร้มิติ (Gu และคณะ, 2019)

2.1.1 ปริมาณทางฟิสิกส์

ปริมาณทางฟิสิกส์ เป็นปริมาณที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือหรืออาศัยการคำนวณ เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเชื่อมโยงไปถึงสาเหตุและผลกระทบของปรากฏการณ์ที่ศึกษา ตัวอย่างปริมาณทางฟิสิกส์ ได้แก่ แรง โมเมนต์ มวล และความเร็วของวัตถุ เป็นต้น โดยปริมาณเหล่านี้ต้องมีหน่วยกำกับ เช่น ระยะทาง มีหน่วยเป็นเมตร ไมล์หรือกิโลเมตร เป็นต้น (Delaplace และคณะ, 2015)

การวัดปริมาณทางฟิสิกส์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) การวัดภายนอก

การวัดภายนอก คือ ค่าของปริมาณทางฟิสิกส์ที่แสดงออกมาเป็นตัวเลขและมีหน่วยกำกับ ซึ่งค่าของตัวเลขปริมาณฟิสิกส์นั้นได้มาจากการวัดและหน่วยได้มาจากการเลือกระบบมิติ เช่น ระบบหน่วย SI เป็นระบบมิติที่มีมิติพื้นฐานทั้งหมด 7 มิติ

2) การวัดภายใน

การวัดภายใน คือ การนำชุดของปริมาณทางฟิสิกส์ที่เป็นของระบบที่ศึกษาแล้ว ประกอบรวมกันเป็นชุดของปริมาณทางฟิสิกส์ที่สนใจ หลังจากประกอบกันจะทำให้ไม่มีมิติ (หน่วย) เช่น การวัดภายในของ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) เป็นการกำหนดลักษณะการไหลของของไหล (ความหนาแน่น ρ และความหนืด μ) ที่ไหลด้วยความเร็วเฉลี่ย v ในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D นำตัวแปรดังกล่าวประกอบรวมกันเป็นกลุ่มของปริมาณทางฟิสิกส์ที่ไม่มีมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มิติของหน่วย (Units dimension) คือ MLT เรียกว่า มวล ความยาว เวลา ในระบบหน่วย SI ก่อนการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติต้องแปลงระบบหน่วย SI ของแต่ละพารามิเตอร์ให้อยู่ในรูประบบมิติของหน่วย แสดงระบบมิติของหน่วยที่พบบ่อยในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มิติของหน่วยตัวแปรในระบบหน่วย SI

ตัวแปร (หน่วย SI)	สัญลักษณ์	มิติพื้นฐาน
ความยาว (m)	l	L
มวล (kg)	m	M
เวลา (s)	t	T
ความเร็ว (m/s)	v	LT^{-1}
อุณหภูมิ (K)	T	K
แรง (N)	F	MLT^{-2}
พื้นที่ (m^2)	A	L^2

2.1.2 กฎพื้นฐานสำหรับการสร้างชุดตัวแปรไร้มิติ

การสร้างชุดตัวแปรไร้มิติแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

1) การเลือกตัวแปรเป้าหมายและการกำหนดปริมาณทางฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรเป้าหมาย เริ่มจากการระบุปัญหาเพื่อกำหนดตัวแปรเป้าหมาย ซึ่งเป็นลักษณะของปรากฏการณ์ที่กำลังศึกษา จากนั้นระบุปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมดที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรเป้าหมาย และตรวจสอบความเป็นอิสระของปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมด เพื่อให้ทราบว่าปริมาณทางฟิสิกส์ไม่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางฟิสิกส์ตัวอื่น ให้มีแค่ตัวแปรเป้าหมายเท่านั้นที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ

2) กำหนดมิติพื้นฐานของปริมาณทางฟิสิกส์และการสร้างเมทริกซ์เชิงมิติ

มิติของปริมาณทางฟิสิกส์แต่ละปริมาณที่แสดงในรูปของมิติพื้นฐานใช้หลักความสอดคล้องกันของระบบหน่วยในรูปแบบของมิติตั้งตารางที่ 2.1 โดยจำนวนมิติพื้นฐานขึ้นอยู่กับระบบการวัดที่นำมาใช้ และความซับซ้อนของปรากฏการณ์ที่กำลังศึกษา จากนั้นนำปริมาณทางฟิสิกส์ และมิติไปสร้างเมทริกซ์ที่เรียกว่า เมทริกซ์เชิงมิติ (Dimensional matrix) ภายในเมทริกซ์ประกอบด้วยเลขชี้

กำลังของมิติพื้นฐาน โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จำนวนของคอลัมน์เท่ากับจำนวนของปริมาณทางฟิสิกส์ที่ระบุไว้ทั้งหมด
- จำนวนของแถวเท่ากับจำนวนของมิติพื้นฐานที่จำเป็นในการแสดงมิติของปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมด

พิจารณาตัวอย่าง มีตัวแปรที่สนใจแสดงเป็น V_1 ได้รับอิทธิพลจากชุดของปริมาณทางฟิสิกส์อิสระจำนวน 5 ชุด $[V_2, V_3, V_4, V_5, V_6]$ จำนวนของมิติพื้นฐานกำหนดไว้ที่ 3 มิติดังนี้ M, L และ T ซึ่งสอดคล้องกับหน่วย SI ในตารางที่ 2.1 คือ kg, m และ s เป็นต้น โดย V_1 คือ ความเร็ว หน่วยเป็น ms^{-1} เพราะฉะนั้น เขียนในรูประบบมิติพื้นฐานเป็น $V_1 = M^0 L^1 T^{-1}$ จากนั้นนำเลขชี้กำลังของมิติพื้นฐาน (0, 1, -1) ใส่ลงไปเมทริกซ์เชิงมิติ

3) การใช้ทฤษฎีบัคกิงแฮมไพ (Buckingham pi theorem)

เมื่อเขียนเมทริกซ์เชิงมิติแล้ว ตัวเลขไร้มิติจะแสดงในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (π_i) ซึ่งอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลของกระบวนการทางกายภาพที่กำลังศึกษา โดยอ้างอิงจากทฤษฎีวาสซี-บัคกิงแฮม (Vaschy – Buckingham)

ทฤษฎีวาสซี-บัคกิงแฮม ทำให้จำนวนการทดลองลดลงได้อย่างมีนัยสำคัญ อธิบายโดย จำนวนปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมดลบด้วย จำนวนของมิติพื้นฐาน ได้จำนวนของกลุ่มตัวแปรที่ต้องการศึกษา ทำให้ทราบว่ากลุ่มตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อตัวแปรเป้าหมายอย่างไร วิธีนี้เรียกว่า “วิธีการของตัวแปรที่ลดลง (Method of reduced variables) (Delaplace และ คณะ, 2015) จากปกติ ต้องการความสัมพันธ์ของปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ทั้งหมดที่ละตัวว่าส่งผลต่อตัวแปรเป้าหมายอย่างไร แต่ทฤษฎีวาสซี-บัคกิงแฮมสามารถหาความสัมพันธ์ของกลุ่มปริมาณทางฟิสิกส์ต่อตัวแปรเป้าหมายได้เลย ดังนั้นจำนวนการทดลองที่ต้องทำเพื่อสร้างความสัมพันธ์ของกระบวนการที่สนใจ จึงลดลงอย่างมาก

4) การสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

การใช้ทฤษฎีวาสซี-บัคกิงแฮมทำให้ตัวแปรต่าง ๆ ถูกจัดกลุ่มและแสดงในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group) โดยกลุ่มตัวแปรไร้มิติสร้างขึ้นโดยใช้การดำเนินการทางคณิตศาสตร์ด้วยการแก้ระบบสมการเชิงเส้นและการดำเนินการทางเมทริกซ์ ซึ่งจำเป็นที่ต้องนำตัวแปรทางฟิสิกส์บางตัวมาจัดกลุ่มอยู่ในกลุ่มแปรที่เรียกว่า “ตัวแปรซ้ำ” จากนั้นนำมาประกอบเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เชื่อมโยงกับตัวแปรทางฟิสิกส์ที่เหลืออยู่ซึ่งเรียกว่า “ตัวแปรไม่ซ้ำ” โดยหารตัวแปรทางฟิสิกส์ที่ไม่ซ้ำแต่ละตัวด้วยผลคูณของตัวแปรซ้ำที่ยกกำลังเลขชี้กำลังต่าง ๆ (a_{ij}) ซึ่งเลขชี้กำลังดังกล่าวของตัวแปรซ้ำมาจากผลลัพธ์ของการดำเนินการทางเมทริกซ์ แสดงรูปแบบของกลุ่มตัวแปรไร้มิติดังสมการที่ 2.1

$$\pi_1 = \frac{V_{i,non-repeated}}{[V_{j,repeated}]^{a_{ij}}} \quad (2.1)$$

โดยตัวแปรทางฟิสิกส์จำเป็นต้องมีมิติที่ครอบคลุมมิติพื้นฐานสำหรับการแสดงมิติของปริมาณทางฟิสิกส์ที่ระบุไว้ และมีจำนวนของตัวแปรซ้ำเท่ากับจำนวนของมิติพื้นฐานที่ถูกนำมาใช้ เช่น ปริมาณทางฟิสิกส์ทั้งหมดมีมิติ ได้แก่ M, L และ T ดังนั้นตัวแปรทางฟิสิกส์ซ้ำทั้งหมดต้องมีมิติครอบคลุมทั้ง 3 มิติ และมีจำนวนตัวแปรซ้ำเท่ากับ 3 ตัว เป็นต้น

5) การจัดเรียงตัวแปรไร้มิติใหม่

กลุ่มตัวแปรไร้มิติแต่ละชุดมีลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ของกลุ่มปริมาณทางฟิสิกส์ โดยสามารถเลือกจัดเรียงใหม่ได้ด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การเพิ่มตัวเลขไร้มิติบางตัวให้มีเลขชี้กำลังที่แตกต่างจากเดิม การคูณ การบวก หรือการลบออก ซึ่งโดยปกติแล้วจำนวนไร้มิติที่ยกกำลัง ผลคูณ ผลรวม หรือผลต่างของตัวเลขไร้มิติยังคงเป็นเลขไร้มิติ

6) การตรวจสอบความอิสระของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

ขั้นตอนนี้ดำเนินการเพื่อให้ทราบว่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติในแต่ละกลุ่มมีความเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีผลร่วมกันระหว่างกลุ่มตัวแปร และเพื่อให้เข้าใจถึงอิทธิพลของปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ที่มีต่อตัวแปรเป้าหมาย

2.2 การเกิดคราบ

การเกิดคราบ (Fouling) หมายถึง การสะสมและก่อตัวของอนุภาคที่ไม่พึงประสงค์บนพื้นผิวของอุปกรณ์ (Bott, 1995; Awad, 2011) โดยทั่วไปพบได้บนพื้นผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญเรื่องการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังไม่สามารถแก้ไขได้ (Awad, 2011)

2.2.1 ประเภทและกลไกของการเกิดคราบอาหาร

ประเภทของการเกิดคราบสามารถจำแนกตามกลไกการเกิดได้เป็น 6 ประเภท (Awad, 2011) ได้แก่ การเกิดคราบจากสารแขวนลอย (Particulate fouling) การเกิดคราบจากการตกผลึก (Crystallization or Precipitation fouling) การเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction fouling) การเกิดคราบจากการกัดกร่อน (Corrosion fouling) การเกิดคราบชีวภาพ (Biological fouling) และการเกิดคราบจากการแข็งตัว (Solidification or Freezing fouling) ซึ่งการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดจากกลไกใดเพียงกลไกเดียว แต่เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรวมกันของหลายกลไก โดยคราบอาหารส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน จัดเป็นการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา และทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติ (Bott, 1995)

กระบวนการเกิดคราบโปรตีน (Fouling processes) ประกอบด้วยกลไกหลัก 2 ส่วน คือ การเกาะติด และการหลุดออก โดยที่การเกาะติด ประกอบด้วยกลไกย่อย คือ การก่อดั้วของอนุภาคที่ทำให้เกิดคราบในของไหล การถ่ายเทมวลของอนุภาคจากของไหลไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และการเกาะติดของอนุภาคคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนการหลุดออก ประกอบด้วยกลไกย่อย คือ การหลุดออกของคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและการถ่ายเทมวลของอนุภาคคราบที่หลุดออกจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังของไหล (Awad, 2011) พฤติกรรมการสะสมของคราบโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงการเกาะติด และการหลุดออกของคราบ โดยที่อาหารกลุ่มที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบนั้น พฤติกรรมการเกาะติดของคราบโปรตีนมีลักษณะแบบเข้าสู่สมดุล (Asymptotic fouling) เช่น สารละลายเวย์โปรตีน (Belmar-Beiny และคณะ, 1993; Boxler และคณะ, 2013; Zhang และคณะ, 2019) และกะทิ (Narataruksa และคณะ, 2010) เป็นต้น การเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุล เป็นการเพิ่มขึ้นของคราบจนถึงจุดหนึ่งที่เกิดคราบมีค่าอัตราการเกาะติดเท่ากับอัตราการหลุดออก หรือไม่มีอัตราการเกิดคราบเพิ่มขึ้น (Bott, 1995; Awad, 2011) เนื่องจากชั้นคราบที่เกาะบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนไปอาหารลดลง และเมื่อความหนาของคราบเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่อุณหภูมิผิวหน้าระหว่างอาหาร และชั้นคราบต่ำกว่าจุดที่สามารถทำให้โปรตีนในอาหารเสียสภาพธรรมชาติ การเกาะติดจึงไม่เกิดขึ้นเพิ่ม

2.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบอาหารเหลวกลุ่มโปรตีน

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดคราบ สามารถจำแนกได้เป็นอุณหภูมิพื้นผิว (Surface temperature) และอุณหภูมิของอาหารเหลว โดยอุณหภูมิพื้นผิวส่งผลต่อการเกิดคราบในลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดและชนิดของสารก่อคราบ เช่น อุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณคราบที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีและการตกผลึกสูงขึ้น เป็นต้น ส่วนอุณหภูมิของอาหารเหลวนั้น เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพโครงสร้างของสารก่อคราบและการถ่ายเทมวล โดยปัจจัยของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการเกิดคราบของอาหารเหลวกลุ่มโปรตีน มีดังนี้

- อุณหภูมิพื้นผิว เป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดการเกิดคราบของอาหารเหลวกลุ่มโปรตีน

เนื่องจาก อุณหภูมิพื้นผิวเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติและเกาะติดบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลกเปลี่ยนความร้อน โดยการเพิ่มอุณหภูมิพื้นผิวส่งผลให้อัตราการเกาะติดของคราบโปรตีนสูงขึ้น (Ling และ Lund, 1978) และส่งผลให้คราบโปรตีนมีความแข็งแรงมากขึ้น (Zhang และคณะ, 2020) เนื่องจากปริมาณพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและโปรตีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น (Nakanishi และคณะ, 2001)

- อุณหภูมิอาหารเหลว เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพของโครงสร้างโปรตีน ในอาหาร อาหารเหลวที่ได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิเสียสภาพเร็ว ปริมาณการเกาะติดของคราบมากกว่าเมื่อมีการให้ความร้อนแก่อาหารในเวลาเท่ากัน อย่างไรก็ตามหากอุณหภูมิอาหารเหลวสูงกว่า อุณหภูมิพื้นผิว โครงสร้างโปรตีนจะเกิดการรวมตัวกันเองและไม่เกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (Ling และ Lund, 1978)

- ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอาหารเหลว ส่งผลโดยตรงต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและอัตราการเกิดคราบ โดยผลต่างมากขึ้น ส่งผลให้อัตราและปริมาณการเกาะติดของโปรตีนเพิ่มขึ้น (Ling และ Lund, 1978) อย่างไรก็ตาม ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอาหารเหลวส่งผลก็ต่อเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสูงพอที่ทำให้โปรตีนสามารถเสียสภาพธรรมชาติและเกิดการเกาะติดได้

ปัจจัยที่เกี่ยวกับสมบัติของอาหารเหลว เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และความเข้มข้นสารก่อคราบ เป็นต้น ความหนืดและความหนาแน่น ส่งผลต่อชั้นขอบเขตการไหล (Viscous sublayer) และค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง ซึ่งสัมพันธ์ถึงลักษณะการไหลของอาหารที่ส่งผลต่อกระบวนการเกาะติดและหลุดออกของคราบ ส่วนความเข้มข้นของสารก่อคราบส่งผลต่ออัตราและปริมาณการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี (Ling & Lund, 1978)

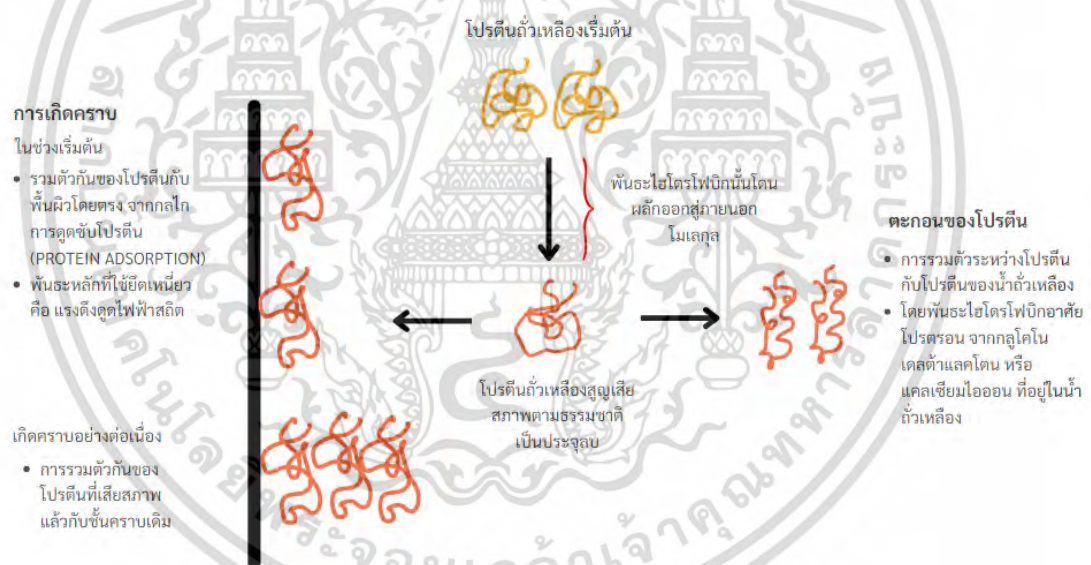
2.3 น้ำถั่วเหลืองและการให้ความร้อนน้ำถั่วเหลือง

น้ำถั่วเหลืองมีองค์ประกอบหลัก คือ น้ำ 88% คาร์โบไฮเดรต 6.28% และโปรตีน 3.27% โดยโปรตีนจากถั่วเหลือง ประกอบด้วยโปรตีนโกลบูลิน 4 ชนิด คือ 2S, 7S, 11S และ 15S เบต้า-คอนโกลซิโนน (7S) และ โกลซิโนน (11S) เป็นองค์ประกอบหลักของโปรตีนจากน้ำถั่วเหลืองคิดเป็น 27 wt% และ 34 wt% ของโปรตีนทั้งหมดในน้ำถั่วเหลืองตามลำดับ (Iwabuchi และ Yamauchi, 1987) เบต้า-คอนโกลซิโนนเป็นทริเมอร์ชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยหน่วยย่อยสามประเภท ส่วนโกลซิโนนประกอบด้วยโพลีเปปไทด์ที่เป็นกรดและเบส ซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ โปรตีนเบต้า-คอนโกลซิโนน (7S) และ โกลซิโนน (11S) เป็นโปรตีนหลักของโปรตีนในถั่วเหลืองมีสมบัติในการเสียสภาพ

ธรรมชาติด้วยความร้อนเหมือนกัน แต่มีสมบัติทางกายภาพของการเกิดคราบที่แตกต่างกัน (Liu, 1997) โดยโปรตีนเบต้า-คอนไกลซินินสามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าโปรตีนไกลซินิน พบว่าโปรตีนเบต้า-คอนไกลซินิน และไกลซินินมีอุณหภูมิของการสูญเสียสภาพที่ 65 และ 80 °C ตามลำดับ ที่ความเป็นกรดต่างเป็นกลางและไม่เติมเกลือ (Hermansson, 1978) น้ำถั่วเหลืองเป็นเครื่องต้มที่มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จึงเป็นเรื่องง่ายที่เสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว กระบวนการทางความร้อนของน้ำถั่วเหลืองเข้ามาช่วยลดหรือกำจัดจุลินทรีย์ และยืดอายุการเก็บรักษา พบว่า มีผลดีหลายประการของการให้ความร้อนต่อน้ำถั่วเหลือง ทั้งช่วยในการปรับปรุงคุณภาพทางด้านโภชนาการ และลดกลิ่นรสถั่ว (Beany flavor) ที่เกิดขึ้น (Liu, 1997) แต่การให้ความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโปรตีน ซึ่งอาจนำไปสู่การทำลายโครงสร้างของโปรตีนโดยการสูญเสียสภาพธรรมชาติเนื่องจากความร้อน ทำให้มีการสะสมของคราบบนพื้นผิวเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน มีงานวิจัยที่ทำการศึกษากลไกการเกิดคราบเวย์โปรตีน (Gu, 2019) กะทิ (Narataruksa และคณะ, 2010) และไข่ขาว (Li et al., 2013) โดยให้ความร้อนนมที่อุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ พบว่า คราบที่เกิดขึ้นเป็นคราบประเภท A ที่มีลักษณะขรุขระสีขาว และประกอบไปด้วยโปรตีนเป็นหลัก (50-60%) เกลือแร่ (แคลเซียม ฟอสฟอรัส) 30-35 % และไขมันประมาณ 5 % (Belmar-Beiny และคณะ, 1993) ซึ่งเกิดจากการเสีสภาพของโปรตีน (Gu, 2019) อย่างไรก็ตามการฆ่าเชื้อโดยการให้ความร้อนสูงพิเศษ (Ultra-high-temperature treatment, UHT) ที่อุณหภูมิการให้ความร้อนสูงกว่า 100 °C จะมีการสะสมของคราบที่มีโปรตีนลดลงแต่มีแร่ธาตุเพิ่มขึ้นเรียกว่า คราบประเภท B (Gu, 2019) โดยคราบชนิดนี้เกิดจากการตกผลึกของเกลือแร่ และลักษณะของคราบมีลักษณะมันวาวที่พื้นผิวหน้าคราบ (Changani, 1997) ซึ่งคราบของน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นจากการได้รับความร้อนในช่วงอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ มีลักษณะคล้ายกับคราบประเภท A เนื่องจากคราบน้ำถั่วเหลืองมีสีขาวและส่วนประกอบของคราบน้ำถั่วเหลืองมีโปรตีนเป็นหลักเช่นเดียวกัน (Qingjun และคณะ, 2020) การให้ความร้อนแก่น้ำถั่วเหลืองทำให้เกิดการรวมตัวกัน (Aggregation) ของโปรตีนถั่วเหลือง Kohyama และคณะ (1995) อธิบายกลไกการเกิดคราบโปรตีนของน้ำถั่วเหลืองโดยเมื่อโปรตีนได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพตามธรรมชาติ ซึ่งเริ่มการเสีสภาพโดยพันธะไฮโดรโพบิกที่อยู่ภายในโมเลกุลของโปรตีนนั้นน้ำถั่วเหลืองดิบโดนผลึกออกสู่ภายนอกโมเลกุลเมื่อได้รับความร้อน โปรตีนถั่วเหลืองที่เกิดการสูญเสียสภาพตามธรรมชาติด้วยความร้อนจึงมีประจุเป็นลบ (Kohyama และ Nishinari, 1993) และเกิดการรวมตัวเป็นโครงสร้างใหม่ ซึ่งสามารถเกิดได้ทั้งการรวมตัวระหว่างโปรตีนกับโปรตีน จนเกิดเป็นตะกอนของโปรตีนแขวนลอยอยู่ในสารละลาย และการรวมตัวระหว่างโปรตีนกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำให้เกิดคราบ (Bott, 1995) กรณีของการรวมตัวระหว่างโปรตีนกับโปรตีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำถั่วเหลือง เกิดจากการรวมตัวกันด้วยพันธะไฮโดรโฟบิกโดยอาศัยโปรตรอน จากกลูโคโนเดสตาแลคโตน หรือแคลเซียมไอออน ทำให้ประจุสุทธิของโมเลกุลโปรตีนมีค่าเท่ากับศูนย์มีผลทำให้พันธะไฮโดรโฟบิกของโมเลกุลโปรตีนเด่นขึ้น และนำไปสู่การเกิดการตกตะกอน (DeMan และคณะ, 1986) ซึ่งกรณีของการรวมตัวระหว่างโปรตีนกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ในช่วงเริ่มต้นเกิดจากการรวมตัวกันของโครงสร้างโปรตีนที่เสถียรภาพกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง จากกลไกการดูดซับโปรตีนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (Protein adsorption) โดยพันธะหลักที่ใช้ยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวกับโครงสร้างของคราบในกลไกการดูดซับ คือ แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) เนื่องจากพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมีพื้นผิวชั้นนอกเป็นออกไซด์ของโครเมียม สามารถเกิดได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ พื้นผิวเหล็กกล้าสามารถดึงดูดวัตถุที่มีประจุตรงกันข้ามเข้าหาซึ่งก็คือโปรตีนถั่วเหลืองที่มีประจุเป็นลบ เมื่อเวลาการให้ความร้อนมากขึ้นมีเกิดคราบอย่างต่อเนื่องจะเข้าสู่ขั้นตอนการเกิดคราบที่โปรตีนที่เสถียรภาพแล้วรวมตัวกับชั้นของคราบเดิมแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การรวมตัวกันของโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Bott (1995)

2.4 ค่าความต้านทานความร้อนของคราบ

ความต้านทานความร้อนของคราบ (Fouling resistance, R_f) หมายถึง ความต้านทานความร้อนอันเกิดจากคราบที่พื้นผิวร้อน หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ลดลงเนื่องจากการเกิดคราบ โดยเมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไประยะหนึ่ง จะเกิดการรวมตัวของคราบอาหารบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวร้อนของโลหะ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวของโลหะต่ำลง ดังนั้น การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่เกาะติดบนผิวของโลหะเพื่อทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ลดลง

ค่าความต้านทานความร้อนของคราบเกี่ยวข้องกับปริมาณมวลของคราบต่อหน่วยพื้นที่ (M_f) ความหนาแน่นของคราบ (ρ_f) ค่าการนำความร้อนของคราบ (λ_f) และความหนาของคราบ (x_f) แสดงดังในสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3

$$M_f = \rho_f x_f = \rho_f \lambda_f R_f \quad (2.2)$$

$$R_f = \frac{M_f}{\rho_f \lambda_f} = \frac{x_f}{\lambda_f} \quad (2.3)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงมิติและการสร้างแบบจำลอง การเสียดสภาพธรรมชาติของโปรตีนในแก้วเหล็องจากความร้อน และการเกิดคราบของน้ำแก้วเหล็องบนพื้นผิวร้อน และสมบัติของน้ำแก้วเหล็อง รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

2.5.1 การวิเคราะห์เชิงมิติและการสร้างแบบจำลอง

Petit และคณะ (2013) นำเสนอแบบจำลอง 3 แบบสำหรับทำนายมวลของคราบทั้งหมดที่เกิดขึ้น (Total fouling mass) ขนาดรวมของเบต้า-แล็กโทโกลบูลิน (Aggregate size) และความเข้มข้นของเบต้า-แล็กโทโกลบูลินที่ทางออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Outlet native β -lg concentration) โดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้จำนวน 17 กลุ่ม อยู่ในรูปแบบของกลุ่มตัวแปรที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เช่น ตัวเลขเรย์โนลด์ (Re), ตัวเลขพรันด์เทิล (Pr) เป็นต้น แบบจำลองที่ได้ถือว่ามีค่าความแม่นยำในการทำนาย โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Mean relative errors) เท่ากับ 3%, 24% และ 9% ตามลำดับ

Gu และคณะ (2019) นำเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายมวลของคราบสารละลายเวย์โปรตีนเข้มข้น (Whey protein concentrate, WPC) โดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติ และศึกษาการเกิดคราบของโปรตีนในระหว่างการให้ความร้อน แบบจำลองสร้างจากข้อมูลการทดลองที่ได้รับจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดยจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้จำนวน 12 กลุ่ม พบว่า กลุ่มตัวแปรข้างต้น

มีอิทธิพลต่อการเกิดคราบสารละลายเวย์โปรตีนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองสำหรับทำนายมวลของคราบสารละลายเวย์โปรตีนเข้มข้น มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.92

Pan และ Chen (2019) นำเสนอการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติ (Computational Fluid Dynamics, 2D-CFD) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของชั้นการสะสมของคราบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระบวนการทางความร้อน และอธิบายการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยพบว่าแบบจำลองสามารถอธิบายประสิทธิภาพทางความร้อนภายใต้การเกิดคราบได้เป็นอย่างดี แต่การอธิบายปริมาณมวลของคราบนั้นมีข้อจำกัดจากกระบวนการเกิดคราบที่ซับซ้อน ความแม่นยำของแบบจำลองนี้ขึ้นกับสมมติฐานและเงื่อนไขขอบเขตที่มีการกำหนดโดยแบบจำลอง

Alhuthali และคณะ (2022) นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองการเกิดคราบของเวย์โปรตีน (0.25 – 2.5% w/w) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยกลุ่มตัวแปรด้านความร้อน ปฏิกริยา และการเกิดคราบ โดยทดลองด้วยการกำหนดปัจจัยทางความร้อน และความเข้มข้นของผงเวย์ที่แตกต่างกัน พบว่า แบบจำลองที่ได้มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.97

2.5.2 การเสียดสภาพทางธรรมชาติของโปรตีนในถั่วเหลืองจากความร้อน และการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองบนพื้นผิวร้อน

Guo และคณะ (2012) ศึกษาสมบัติทางความร้อนของโปรตีนถั่วเหลือง โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 min สรุปลงได้ว่าเบต้า-คอนไกลซินิน และไกลซินินซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโปรตีนถั่วเหลืองนั้นมีการยึดติดระหว่างโมเลกุลของตัวเองด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งเบต้า-คอนไกลซินินเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ 68.0 ถึง 79.4 °C และไกลซินินเสื่อมสภาพในช่วงอุณหภูมิ 88.0 - 96.4 °C

Wang และคณะ (2018) ศึกษาพฤติกรรมการเกิดคราบและการทำความสะอาดคราบของโปรตีนถั่วเหลือง (Soy protein isolates, SPI) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบห้องปฏิบัติการ พบว่า คราบของโปรตีนถั่วเหลืองก่อตัวขึ้นที่อุณหภูมิพื้นผิว 80, 85 และ 90 °C ซึ่งผลสรุปบ่งชี้ว่าเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้นทำให้อัตราการก่อตัวของคราบเร็วขึ้น ข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับการสังเกตของ Chen และ Bala (1998) ที่พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งต่อการก่อตัวของโปรตีนในนมโดยเฉพาะในช่วงแรกโปรตีนถั่วเหลืองมีแนวโน้มที่คล้ายกัน กระบวนการเกิดคราบส่วนใหญ่

เกี่ยวข้องกับการเสียดสภาพธรรมชาติและการรวมตัวของโปรตีน ปฏิกริยาเหล่านี้ล้วนไวต่ออุณหภูมิ ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิพื้นผิวจึงเร่งกระบวนการเกิดคราบ

Qingjun และคณะ (2020) ศึกษาพฤติกรรมการสะสมคราบของน้ำถั่วเหลืองบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นขนาดเล็ก และศึกษาองค์ประกอบของคราบน้ำถั่วเหลืองที่มีสัดส่วนมวลโปรตีน 3.50% โดยเมื่อให้ความร้อนที่ 105-125 °C ภายใต้อุณหภูมิขาเข้าของน้ำถั่วเหลืองที่แตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่าเมื่ออุณหภูมิขาเข้าของนมถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของคราบ (R_f) เพิ่มขึ้นด้วย

2.5.3 สมบัติของน้ำถั่วเหลือง

Oquntunde และ Akintoye (1991) นำเสนอการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ และความหนืดของนมวัวและน้ำถั่วเหลือง 2 ชนิด ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 12.5 ± 1.0 , 10.0 ± 1.0 และ $11.6 \pm 1.1\%$ ที่อุณหภูมิ 25 °C นำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับหาความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมดกับความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ และความหนืดของนมวัวและน้ำถั่วเหลือง ในช่วงปริมาณของแข็งทั้งหมดข้างต้น พบว่า สำหรับน้ำถั่วเหลืองทั้งสองชนิด ค่าความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ และความหนืดเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดมากขึ้น โดยน้ำถั่วเหลืองมีความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ $1050 \pm 10 \text{ kg m}^{-3}$ ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 11.6%

Liu และคณะ (2003) นำเสนอการเปรียบเทียบค่าความหนืดของน้ำถั่วเหลืองที่ให้ความร้อนแบบสองขั้นตอน คือ น้ำถั่วเหลืองถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นอุ่นที่อุณหภูมิ 95 °C อีก 5 นาที กับการให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียว (95 °C, 5 นาที) เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพธรรมชาติของโปรตีนต่อความหนืดของน้ำถั่วเหลือง โดยมีปริมาณของแข็งของน้ำถั่วเหลืองที่แตกต่างกัน (10-12%) พบว่า การให้ความร้อนแบบสองขั้นตอนทำให้ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยมีค่าความหนืดของน้ำถั่วเหลืองเท่ากับ $0.096 \pm 0.003 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ แต่การให้ความร้อนแบบขั้นตอนเดียวได้ค่าความหนืด เท่ากับ $0.038 \pm 0.002 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมน้ำถั่วเหลือง

น้ำถั่วเหลืองที่ใช้สำหรับการทดลองทำจากถั่วเหลืองเต็มเมล็ด ตราไรท์พิพย์ โดยขั้นตอนการเตรียมน้ำถั่วเหลืองดิบ 4 L แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเริ่มจากการแยกเมล็ดถั่วเหลืองที่เสีย สิบ เน่า และดำทิ้ง ล้างด้วยน้ำสะอาด 3 รอบ ให้ฝุ่นละอองออก และแช่ถั่วเหลือง 1 kg ในน้ำสะอาด 3 L เมื่อต้องการให้น้ำถั่วเหลืองดิบมีปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% (w/w) และแช่ 1.5 kg ในน้ำสะอาด 3 L สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมด 20% (w/w) แช่เป็นเวลา 12 hr ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 °C) เมื่อครบ 12 hr แล้วจึงนำมาล้างให้สะอาด และนำถั่วเหลืองบวมมาสะเด็ดน้ำ จากนั้นบดด้วยเครื่องบดถั่วเหลือง (FSM-120, CHAMP, ไทย) ส่วนกากของถั่วเหลืองจะแยกออกจากเครื่องบดโดยอัตโนมัติ ซึ่งระหว่างการบดมีการเติมน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยน้ำถั่วเหลืองดิบที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) เติมน้ำเข้าปริมาณ 3.5 และ 3.2 L ตามลำดับ จากนั้นเริ่มการทดลองการทันทีหลังได้น้ำถั่วเหลือง และไม่มีการนำน้ำถั่วเหลืองที่ผ่านการทดลองแล้วกลับมาใช้ซ้ำ โดยการทดลองการหาสมบัติของน้ำถั่วเหลืองจะใช้น้ำถั่วเหลืองปริมาตร 1 L ต่อหนึ่งการทดลอง โดยแบ่งไปหาความหนืดและความหนาแน่น ส่วนน้ำถั่วเหลืองที่เหลืออีก 3 L จากการเตรียม นำเข้าตู้แช่เย็นเพื่อรักษาอุณหภูมิ (2 °C) แล้วรอนำมาใช้ในการทดลองถัดไป ส่วนการทดลองการเกิดคราบใช้น้ำถั่วเหลืองปริมาตร 4 L ต่อหนึ่งการทดลอง ซึ่งการทดลองการเกิดคราบ และการหาสมบัติของน้ำถั่วเหลืองมีขั้นตอนการเตรียมน้ำถั่วเหลืองแบบเดียวกัน



รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการเตรียมน้ำถั่วเหลือง

ที่มา: ดัดแปลงจาก Liu (1997)

3.1.1 การหาสมบัติของน้ำถั่วเหลือง

การทดลองเพื่อหาสมบัติของน้ำถั่วเหลืองเริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่น้ำถั่วเหลืองที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุตัวอย่างที่ปิดด้วยอลูมิเนียมฟอยล์แสดงในรูปที่ 3.2 โดยให้ความร้อนผ่านน้ำที่มีอุณหภูมิ 85°C จนได้อุณหภูมิน้ำถั่วเหลือง 3 ระดับ ได้แก่ 60°C , 70°C และ 80°C ใช้เวลาเท่ากับ 9, 20 และ 50 min ตามลำดับ เมื่อได้อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองตามที่กำหนดแล้วนำไปหาความหนืด และความหนาแน่นทันที



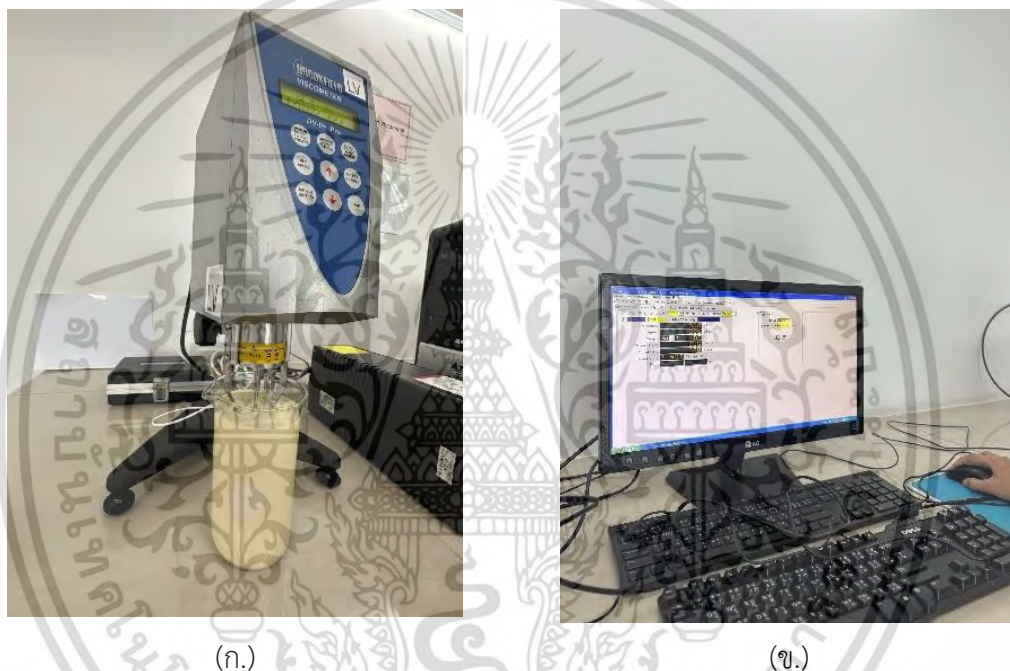
รูปที่ 3.2 การให้ความร้อนน้ำถั่วเหลืองในหม้ออุ่นน้ำ (BWS-10, Laboratory water bath, ไทย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาความหนืด ความหนาแน่น และความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง มีวิธีดังนี้

1) การหาค่าความหนืดของน้ำถั่วเหลือง

ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองสามารถหาได้จากเครื่องวัดความหนืด (DV-II+Pro, BROOKFIELD, สหรัฐอเมริกา) โดยใช้แกนหมุนทรงกระบอกหมายเลข 1 (ขอบเขตการวัด 0 – 20000 cP) โดยวัดในบีกเกอร์ขนาด 600 ml บรรจุน้ำถั่วเหลืองที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) วัดความหนืดจำนวน 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ใช้เวลาในการวัด 5 min เริ่มนับเวลาจากน้ำถั่วเหลืองถึงอุณหภูมิที่กำหนดจนวัดเสร็จ ภาพการวัดความหนืดแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดการวัดความหนืด (ก.) เครื่องวัดความหนืด (ข.) จอแสดงผลค่าความหนืดที่วัดได้ด้วยโปรแกรม Rheocalc V3.3 Build 49-1

2) การหาความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง

ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลืองสามารถหาได้จากการการนำน้ำถั่วเหลืองใส่ในบีกเกอร์รูปชมพู่ขนาด 200 mL (V, m³) ไปชั่งน้ำหนัก (m, kg) วัดมวลของน้ำถั่วเหลืองที่บรรจุในบีกเกอร์จำนวน 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้มวลของน้ำถั่วเหลืองแล้วหาความหนาแน่นจากสมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

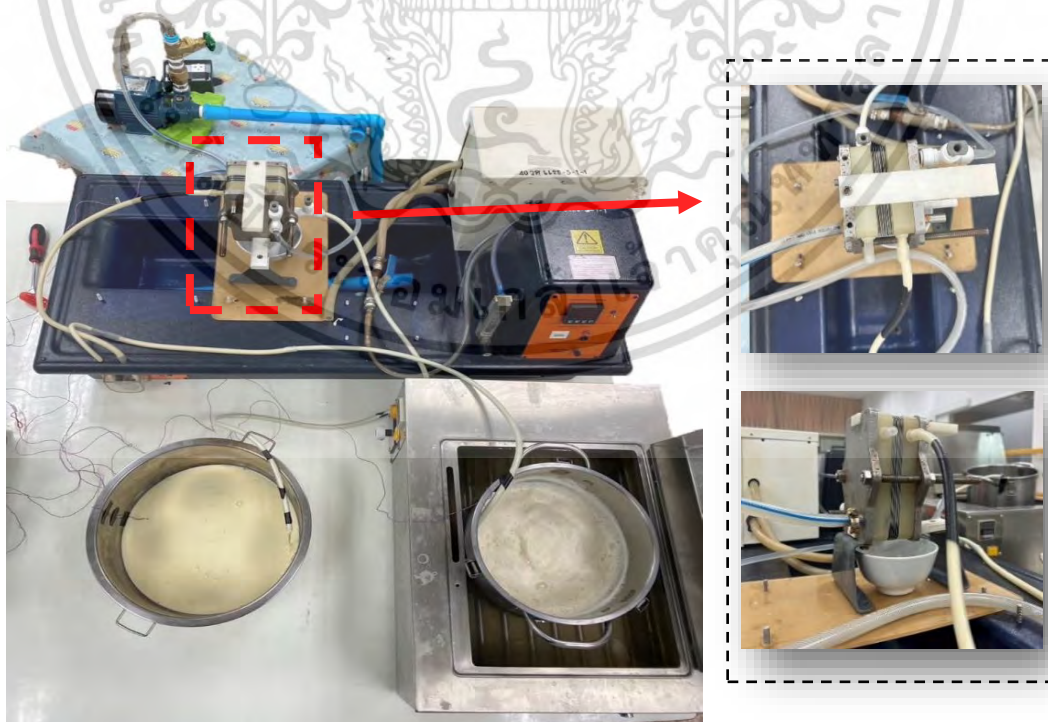
3) ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง คำนวณจากสมการที่ 3.2 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Oguntunde และ Akintoye (1991) ที่นำเสนอความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลืองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลือง $10.0 \pm 1.0\%$

$$C_p = 4.18 + 0.25(\%TS) \quad (3.2)$$

3.2 ชุดทดลองการเกิดคราบ

ชุดทดลองการเกิดคราบ ดัดแปลงจากเครื่องพาสเจอร์ไรส์ระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Pasteurizer – FT75, Armfield, อังกฤษ) ประกอบด้วยหม้ออุ่นน้ำ (JSWB-22t, JSR, เกาหลี) ขนาด 22 L หม้ออุ่นน้ำ (INS-0182, Memmert, เยอรมัน) ขนาด 10 L ปั๊มหอยโข่ง (QB60, C-JET, ไทย) ปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ ภาชนะบรรจุตัวอย่าง และชุดวัดการเกิดคราบ ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ และ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Temperature data logger) ชนิด K สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ โดยบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 5 min ชุดทดลองการเกิดคราบแสดงในรูปที่ 3.4



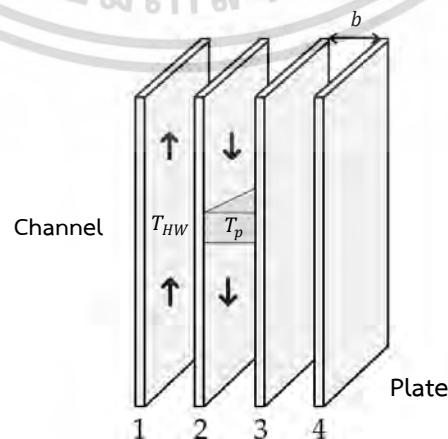
รูปที่ 3.4 ชุดทดลองการเกิดคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 7 แผ่น เมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้วโครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นมีขนาดภายนอกกว้าง 8.2 cm ยาว 7.6 cm ภายในมีช่องสำหรับการไหล 6 ช่อง ระยะห่างระหว่างแผ่น (b) เท่ากับ 3 mm พื้นผิวของแผ่นโลหะมีลักษณะแบบลูกฟูก (Corrugated surface) เพื่อเพิ่มความปั่นป่วน (Turbulence) ในกระแสของไหล ซึ่งเป็นพื้นผิวแบบลายก้างปลา (Chevron or herringbone type) โดยแต่ละแผ่นมีความกว้างของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (L_w) เท่ากับ 75 mm สูง (L_p) เท่ากับ 115 mm แสดงในรูปที่ 3.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางเข้า/ออก (D_p) เท่ากับ 10 mm พื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น (S_0) เท่ากับ 86.3 cm^2 และพื้นที่ผิวทั้งหมดที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (S_{exch}) เท่ากับ 431.5 cm^2 โดยทิศทางการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบไหลสวนทางกัน (Counter flow) แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ขนาดของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3.6 ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และน้ำร้อน

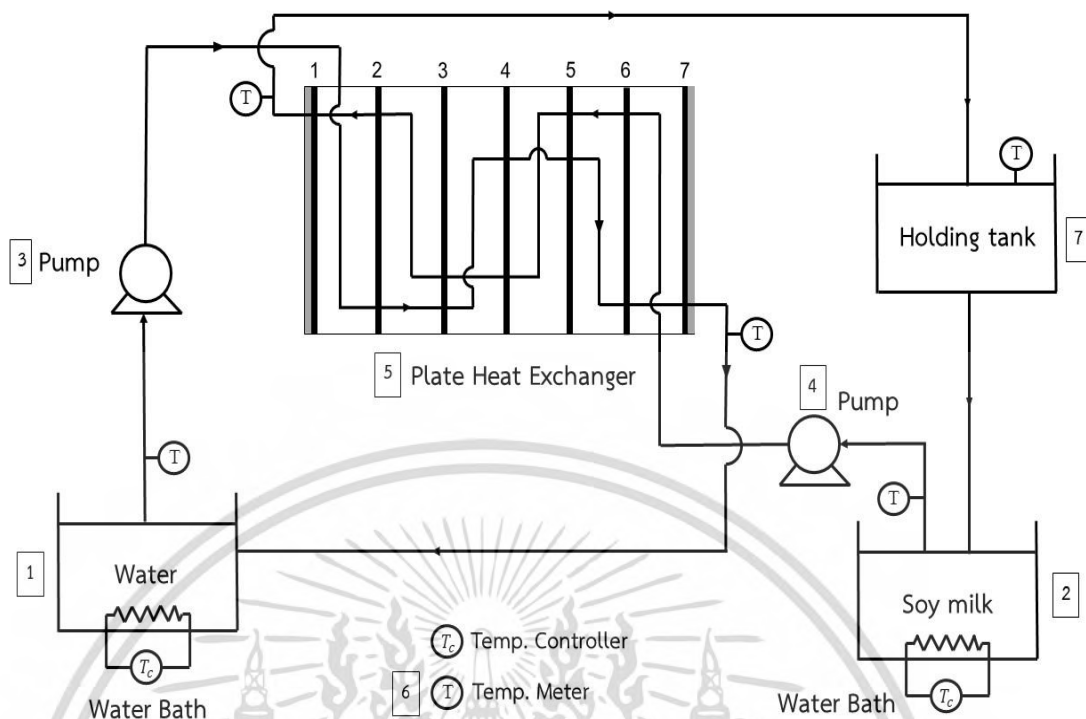
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเชิงในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลองการเกิดคราบ

3.3.1 การทดลอง

เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำถั่วเหลืองเป็นไปตามที่กำหนด (55 °C) จึงเปิดการทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ โดยในงานวิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน จำนวน 5 ระดับ ได้แก่ 65, 70, 75, 80 และ 85 °C และปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลืองมีค่าเท่ากับ 15% และ 20% (w/w) โดยมีปัจจัยควบคุม คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำถั่วเหลืองขาเข้าที่ 55 °C ความเร็วการไหลของน้ำร้อนและน้ำถั่วเหลือง เท่ากับ 0.4 ms⁻¹ และ 0.048 ms⁻¹ ตามลำดับ ทำการทดลองการเกิดคราบน้ำถั่วเหลืองบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นระยะเวลา 3600 s

การทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ อธิบายดังรูปที่ 3.7 และรายละเอียดของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 3.1 เริ่มต้นจากการเปิดการทำงานของหม้ออุ่นน้ำ โดยเทอร์โมมิเตอร์ สำหรับวัดอุณหภูมิในหม้ออุ่นน้ำร้อนและอุณหภูมิของน้ำถั่วเหลือง เมื่อได้อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองเท่ากับ 55 °C (อุ่นน้ำถั่วเหลืองดิบจากอุณหภูมิห้องไปอุณหภูมิที่กำหนดใช้เวลา 45 min) จึงทำการปิดการทำงานของหม้ออุ่นน้ำถั่วเหลือง จากนั้นจึงเริ่มต้นการทดลองโดยการเปิดการทำงานของปั้มน้ำร้อน สำหรับส่งน้ำร้อนที่อยู่ในอ่างน้ำร้อนเข้าไปวนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น เป็นเวลา 5 min จากนั้นจึงเปิดการทำงานของปั้มน้ำร้อน สำหรับส่งน้ำถั่วเหลืองเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น และเริ่มจับเวลา หลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นน้ำร้อนไหลกลับเข้าสู่หม้ออุ่นน้ำ ก่อนวนกลับมาใช้ใหม่ ส่วนน้ำถั่วเหลืองไหลเข้าสู่ภาชนะพักตัวอย่าง เพื่อระบายความร้อนด้วยอากาศอุณหภูมิห้อง (25 ± 0.5 °C) เป็นเวลา 10 min ก่อนไหลเข้าสู่ภาชนะบรรจุตัวอย่างภายในหม้ออุ่นน้ำถั่วเหลือง และไหลวนกลับเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นอีกครั้งจนการทดลองเสร็จสิ้น บันทึกค่าอุณหภูมิทั้งหมด 4 จุด ได้แก่ อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า และอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออก โดยบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 5 min



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทำงานของชุดการทดลองการเกิดคราบ

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดชุดทดลองการเกิดคราบ

หมายเลข	รายละเอียด
1	หม้ออุ่นน้ำ (JSWB-22t, JSR, เกาหลี) ขนาด 22 L ความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ ± 0.2 °C
2	หม้ออุ่นน้ำ (INS-0182, Memmert, เยอรมัน) ขนาด 10 L ความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ ± 0.3 °C
3	ปั๊มหอยโข่ง (C-JET, QB60, ไทย)
4	ปั๊มรีดท่อ (Laboratory Pasteuriser – FT75, Armfield, อังกฤษ)
5	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Laboratory Pasteuriser – FT75, Armfield, อังกฤษ)
6	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Temperature data logger) ชนิด K
7	ภาชนะพักตัวอย่างปริมาตร 8 L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวัดมวลและความหนาของคราบน้ำถั่วเหลือง

มวลคราบเปียก (Wet fouling) ของน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นมวลรวมที่สะสมในแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน แผ่นที่ 2 ถึง 6 ภายในระยะเวลาการให้ความร้อน 1 hr

หลังการทดลองการเกิดคราบสิ้นสุดลง ทำการถอดประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นนำแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนมาเช็ดทำความสะอาดพื้นที่นอกการวิเคราะห์คราบ และนำแผ่นทดลองที่มีคราบวางเรียงต่อกัน โดยหันด้านที่มีคราบสัมผัสอากาศ ทิ้งไว้ 5 min จากนั้นนำไปวัดตัวแปรต่าง ๆ โดยเริ่มจากมวลคราบน้ำถั่วเหลือง ตามด้วยการวัดความหนา การวัดใช้เวลา 10 min ตัวอย่างคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกาะบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนหลังการถอดประกอบอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 คราบน้ำถั่วเหลืองบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

1) มวลคราบเปียกของน้ำถั่วเหลือง วัดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน) ความละเอียด 0.001 g โดยนำแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีคราบเกาะมาวัดทั้งแผ่น ทำการวัด 1 ครั้ง เปรียบเทียบผลต่างระหว่างน้ำหนักแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ก่อนการทดลองการเกิดคราบและหลังการทดลองการเกิดคราบ เพื่อหามวลของคราบ การวัดมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยทำการวัด 3 ซ้ำต่อหนึ่งแผ่นการทดลอง



รูปที่ 3.9 การวัดมวลคราบน้ำถั่วเหลือง

2) ความหนาของคราบน้ำถั่วเหลือง วัดด้วยเครื่องมือวัดความหนา (Positector 6000 FNS1, DelFelsko, สหรัฐอเมริกา) ความละเอียด 1 μm วัดความหนา 9 ตำแหน่ง ทั่วทั้งแผ่นทดลอง โดยมีอุปกรณ์ที่ชุดตำแหน่งการวัดความหนาคราบ ให้มีตำแหน่งการวัดจุดเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ก) ตำแหน่งละ 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่วัดได้ทั้งหมดคำนวณเป็นค่าความหนาของคราบบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนโดยเฉลี่ยเพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป โดยชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูปที่ 3.10 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 การวัดความหนาคราบน้ำถั่วเหลือง (ก) ชุดตำแหน่งการวัดความหนาคราบ (ข) ชุดอุปกรณ์

ที่ใช้ในการวัดความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์เชิงมิติ

มวลของคราบอาหารทั้งหมดที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (m_f) เป็นตัวแปรเป้าหมายของงานวิจัยนี้ และพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อตัวแปรเป้าหมายแสดงดังตารางที่ 3.2 โดยแบ่งพารามิเตอร์ออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1) พารามิเตอร์เกี่ยวกับสมบัติของของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) และความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) ของน้ำถั่วเหลือง

2) พารามิเตอร์เกี่ยวกับกระบวนการ ได้แก่ ความเร็วของน้ำถั่วเหลือง (v) อุณหภูมิของน้ำถั่วเหลืองขาเข้า (T_{pi}) อุณหภูมิของน้ำถั่วเหลืองขาออก (T_{po}) อุณหภูมิพื้นผิวร้อน (T_s) ระยะเวลาในการทำความร้อน (t) และปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลือง ($\%TS$)

3) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ ระยะห่างระหว่างแผ่น (b) พื้นที่ผิวทั้งหมดที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน (S_{exch}) และพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น (S_0)

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดมีจำนวน 12 พารามิเตอร์ และมีมิติพื้นฐาน 4 มิติ ได้แก่ มวล (M) ความยาว (L) เวลา (T) และอุณหภูมิ (K) การวิเคราะห์มิติแบบ Buckingham สามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติให้อยู่ในรูปของ π_i ซึ่งจำนวนของกลุ่มตัวแปรไร้มิติทั้งหมด (Dimensionless groups) คำนวณได้จากการนำจำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมดในตารางที่ 3.2 (12 พารามิเตอร์) ลบด้วยจำนวนของมิติพื้นฐาน (4 มิติ) จึงได้จำนวนกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless groups) ทั้งหมด 8 กลุ่ม สามารถเขียนเป็นฟังก์ชันของกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ในรูปแบบสมการที่ 3.3

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) \quad (3.3)$$

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ประเภทของพารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ชื่อพารามิเตอร์	หน่วย	มิติ
พารามิเตอร์เป้าหมาย	m_f	มวลของคราบน้ำถั่วเหลือง	kg	M^1
พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์	ρ	ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง	kg m^{-3}	$M^1 L^{-3}$
	μ	ความหนืดของน้ำถั่วเหลือง	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	$ML^{-1} T^{-1}$
	C_p	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง	$\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$L^2 T^{-2} K^{-1}$
พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ	$T_s - T_{po}$	ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวที่เกิดคราบและอุณหภูมิขาออกของน้ำถั่วเหลือง	K	K^1
	v	ความเร็วของน้ำถั่วเหลือง	m s^{-1}	LT^{-1}
	$\Delta T_p = T_{po} - T_{pi}$	ความแตกต่างของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์	K	K^1
	t	เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน	s	T^1
	%TS	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลือง	-	-
พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น	b	ระยะห่างระหว่างแผ่น	m	L
	S_{exch}	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด	m^2	L^2
	S_0	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น	m^2	L^2

กำหนดให้พารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรซ้ำ คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น (S_0) ความเร็วของน้ำถั่วเหลือง (v) ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง (ρ) และความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวที่เกิดคราบและอุณหภูมิขาออกของน้ำถั่วเหลือง ($T_s - T_{po}$) จากนั้นนำไปสร้างตารางเมทริกซ์มิติ (Dimensional matrix) แสดงไว้ด้านล่างในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตารางเมทริกซ์ของกลุ่มตัวแปร

	m_f	t	ΔT_p	μ	b	S_{exch}	C_p	$\%TS$	S_0	v	ρ	$T_s - T_{po}$
K	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
M	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
L	0	0	0	-1	1	2	2	0	2	1	-3	0
T	0	1	0	-1	0	0	-2	0	0	-1	0	0

*คอลัมน์สี่เทาอ่อนเป็นคอลัมน์ของตัวแปรซ้ำ

จากทฤษฎี Buckingham Pi สามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ได้ทั้งหมด 8 กลุ่ม สำหรับการทำนายมวลของคราบน้ำกัวเหลียง เขียนเป็นฟังก์ชันของกลุ่มที่ไม่มีมิติดังสมการที่ 3.4

$$\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho}, \pi_2 = \frac{t v}{S_0^{0.5}}, \pi_3 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}, \pi_4 = \frac{\mu}{\rho v S_0^{0.5}}, \pi_5 = \frac{b}{S_0^{0.5}}, \pi_6 = \frac{S_{exch}}{S_0}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}, \pi_8 = \%TS \quad (3.4)$$

กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ 4 จัดรูปโดยคูณด้วยเลขชี้กำลัง -1 แล้วคูณด้วย π_5 จากนั้นคูณเข้าด้วย 2 แสดงในสมการที่ 3.5 ทำให้อยู่ในรูปของ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) แสดงในสมการที่ 3.6

$$\pi_4 = 2 \times ((\pi_4)^{-1} \times \pi_5) \quad (3.5)$$

$$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu} = Re \quad (3.6)$$

วิธีการตรวจสอบความเป็นอิสระของกลุ่มตัวแปรไร้มิติแต่ละกลุ่ม แสดงในภาคผนวก ก โดยจากการตรวจสอบ พบว่า กลุ่มตัวแปรไร้มิติทั้งหมดเป็นอิสระต่อกัน โดยกลุ่มตัวแปรไร้มิติสำหรับการทำนายมวลคราบน้ำกัวเหลียงอธิบายได้ ดังนี้

ตัวแปรกลุ่มที่ 1 (π_1) เกี่ยวข้องกับมวลของคราบน้ำกัวเหลียงทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปรกลุ่มที่ 2 (π_2) สัมพันธ์กับระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์

ตัวแปรกลุ่มที่ 3 (π_3) คือ อัตราส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิทางออกของผลิตภัณฑ์และทางเข้าต่อความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวร้อนและอุณหภูมิทางออกของผลิตภัณฑ์

ตัวแปรกลุ่มที่ 4 (π_4) คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สัมพันธ์กับสมบัติของของไหลที่มีผลต่อการเกิดคราบ

ตัวแปรกลุ่มที่ 5 (π_5) คือ อัตราส่วนของระยะห่างระหว่างแผ่นต่อพื้นที่ผิวของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น

ตัวแปรกลุ่มที่ 6 (π_6) คือ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดต่อพื้นที่ผิวของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น

ตัวแปรกลุ่มที่ 7 (π_7) เกี่ยวข้องกับสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์

ตัวแปรกลุ่มที่ 8 (π_8) คือ ปริมาณของแข็งทั้งหมดในผลิตภัณฑ์

3.5 การวิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของคราบ

ค่าความต้านทานความร้อนของคราบ (R_f , m^2KW^{-1}) คำนวณได้จากสมการที่ 3.7

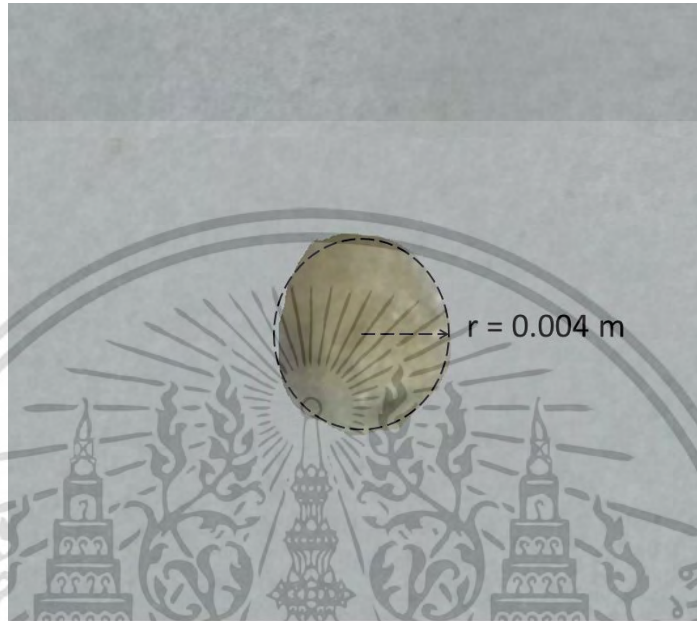
$$R_f = \frac{M_f}{\rho_f \lambda_f} \quad (3.7)$$

ค่าความต้านทานความร้อนของคราบ แสดงถึงปริมาณการสะสมของอนุภาคบนพื้นผิวที่สนใจ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณมวลของคราบทั้งหมดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (M_f , kgm^{-2}) ความหนาแน่นของคราบ (ρ_f , kgm^{-3}) และ ค่าการนำความร้อนของคราบน้ำถั่วเหลือง (λ_f , $W m^{-1}K^{-1}$) โดยหาปริมาณต่างๆ ดังนี้

ปริมาณมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองทั้งหมดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (M_f) ได้จากแบบจำลองที่สามารถทำนายมวลคราบน้ำถั่วเหลืองทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น แล้วจัดรูปแบบจำลองให้ตัวแปรตามอยู่ในรูปมวลต่อพื้นที่ ($\frac{m_f}{S_0}$)

ความหนาแน่นของคราบ (ρ_f) ทดลองโดยการนำคราบน้ำถั่วเหลืองที่ได้จากการทดลองของแผ่นที่ 2, 3 และ 4 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 °C) ออกมาวางบนแผ่นสแตนเลสบางน้ำหนัก 0.194 g แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน) จากนั้นเปรียบเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลต่างระหว่างน้ำหนักแผ่นสแตนเลสก่อน และหลังนำคราบมาวาง โดยจากรูปที่ 3.11 สังเกตได้ว่าคราบมีลักษณะเป็นทรงกลม จึงได้ปริมาตรคราบจากสมการที่ 3.8 จากนั้นคำนวณความหนาแน่นของคราบในสมการที่ 3.1



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างคราบน้ำถั่วเหลืองที่มีลักษณะเป็นทรงกลม; r คือ รัศมีของทรงกลม

$$\text{ปริมาตรของคราบทรงกลม} = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (3.8)$$

ค่าการนำความร้อนของคราบ (λ_f) คำนวณจากสมการที่ 3.9 อ้างอิงจากงานวิจัยของ Legrand และคณะ (2007) ที่นำเสนอค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของถั่วแดงสุก โดยสมการที่ 3.9 สัมพันธ์ความชื้น (Moisture content, X_{H_2O})

$$\lambda_f = -0.2125 + 7.08 \times 10^{-3} \cdot X_{H_2O} \quad (3.9)$$

ความชื้นของคราบน้ำถั่วเหลือง (X_{H_2O}) ได้จากการทดลอง โดยอุปกรณ์ในชุดทดลองประกอบด้วย ตู้อบร้อน (220V 101-0AS, Kenton, จีน) กระจกอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น (Moisture Can) และกล่องบรรจุซิลิกาเจลสำหรับดูดความชื้น ขั้นตอนการหาความชื้นของคราบน้ำถั่วเหลือง (AOAC,

1990) ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) อบกระป๋องอลูมิเนียมหาความชื้น พร้อมด้วยฝาปิดในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 min ทิ้งให้เย็นในกล่องบรรจุซิลิกาเจลที่อุณหภูมิห้อง (15 min) จากนั้นชั่งน้ำหนักกระป๋องอลูมิเนียมและฝาปิดให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน

2) เตรียมคราบน้ำแก้วเหลืองใส่กระป๋องอลูมิเนียมพร้อมปิดฝาและชั่งน้ำหนัก

3) นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1 hr หลังจากนั้น นำออกมาชั่งโดยบรรจุไว้ในกล่องบรรจุซิลิกาเจลเพื่อชั่งน้ำหนัก ทำการอบซ้ำครั้งละ 30 min จนได้น้ำหนักที่คงที่ ซึ่งรวมเป็นใช้เวลาในการอบทั้งหมด 3 hr

4) คำนวณปริมาณร้อยละความชื้นของตัวอย่างอาหาร (Moisture content) ตามสมการที่ 3.10

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างคราบน้ำแก้วเหลืองก่อนอบและหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างคราบน้ำแก้วเหลืองเริ่มต้น}} \times 100 \quad (3.10)$$

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การทดลองการเกิดคราบของน้ำแก้วเหลืองมีทั้งหมด 40 การทดลอง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยแบ่งการทดลองจาก กลุ่มตัวแปรไร้มิติ (π terms) เป็นหน่วยการทดลอง (Treatment) ทำการทดลอง 4 ซ้ำในแต่ละระดับหน่วยการทดลอง แบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ใช้สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง (2 ซ้ำในแต่ละระดับอุณหภูมิ) ชุดที่ 2 เพื่อนำไปทดสอบความแม่นยำของสร้างแบบจำลอง (อีก 2 ซ้ำที่เหลือในแต่ละระดับอุณหภูมิ) ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อบ่งชี้ความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่าง และวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธีของตุกี (Tukey's HSD test) โดยการวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.99 และการวิเคราะห์เชิงมิติในการสร้างแบบจำลองใช้การวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) ดำเนินการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ (IBM SPSS Statistics V.28)

ความถูกต้องของแบบจำลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ในการประเมิน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงอิทธิพลของตัวแปรอิสระทั้งหมดในแบบจำลองที่มีต่อตัวแปรตาม ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง หมายความว่าแบบจำลองสามารถคำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมาก (Campesato, 2020) และใช้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่าที่แสดงระดับของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้ตัวแปรอิสระทั้งหมดมาทำนายตัวแปรตาม วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์จากการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง (x_t) และข้อมูลที่แบบจำลองทำนายได้ (x_{mea}) มาสร้างความสัมพันธ์กัน แสดงในสมการที่ 3.11

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์ (\%)} = \left| \frac{x_{mea} - x_t}{x_t} \right| \times 100 \quad (3.11)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ความหนืดและความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง

4.1.1 ความหนืดของน้ำถั่วเหลือง

จากการทดลองหาความหนืดของน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ และปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลืองต่าง ๆ พบว่า ทั้งสองปัจจัยส่งผลต่อความหนืด และมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยที่อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองระดับเดียวกัน ปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดมีค่ามากขึ้น แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองที่สูงขึ้นทำให้ความหนืดมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกัน ความหนืดที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และ Chang (2007) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.038 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ที่อุณหภูมิน้ำถั่วเหลือง $95 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และปริมาณของแข็งทั้งหมด 11.7% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	อุณหภูมิน้ำถั่วเหลือง ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนืด* ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
15	50	$0.0067 \pm 0.0011 \text{ a}$
	60	$0.0078 \pm 0.0008 \text{ a}$
	70	$0.0132 \pm 0.0011 \text{ b}$
	80	$0.0169 \pm 0.0012 \text{ c}$
20	50	$0.0088 \pm 0.0007 \text{ d}$
	60	$0.0104 \pm 0.0007 \text{ d}$
	70	$0.0173 \pm 0.0008 \text{ e}$
	80	$0.0216 \pm 0.0010 \text{ f}$

หมายเหตุ: *ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01

พิจารณาตารางที่ 4.1 พบว่า ที่อุณหภูมิในช่วง 50-60 $^{\circ}\text{C}$ ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองไม่แตกต่างกัน เนื่องจากโปรตีนเบต้า-คอนโกลูซินิน (7S) เพิ่งเริ่มเสียสภาพธรรมชาติ ในขณะที่โปรตีนไกล

ซินิน (11S) ยังไม่เสียสภาพ โดยโปรตีน 7S และ 11S เสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิ 70-80 $^{\circ}\text{C}$ ส่งผล
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีความหนืดสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว (Liu และ Chang, 2007) จากข้อสรุปข้างต้น การสร้างแบบจำลองจึงเลือกใช้ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้าและขาออก ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความหนืดของน้ำถั่วเหลืองที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	อุณหภูมิพื้นผิว (°C)	อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออก (°C)	อุณหภูมิน้ำ* ถั่วเหลืองเฉลี่ย (°C)	ความหนืดที่อุณหภูมิเฉลี่ย ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
15	65	62	58.5	0.0072
	70	66	60.5	0.0078
	75	70	62.5	0.0078
	80	74	64.5	0.0100
	85	78	66.5	0.0118
20	65	62	58.5	0.0096
	70	66	60.5	0.0104
	75	70	62.5	0.0104
	80	74	64.5	0.0131
	85	78	66.5	0.0152

หมายเหตุ: *อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองเฉลี่ยได้จากการเฉลี่ยอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาเข้า (55 °C) และขาออก

4.1.2 ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง

ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลือง ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) และอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า จากการทดลองปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลืองที่ระดับเดียวกัน อุณหภูมิไม่ส่งผลให้ความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) แต่ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากของแข็งภายในน้ำถั่วเหลืองสูงขึ้น มวลจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นเปลี่ยน จึงสรุปว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดส่งผลต่อความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) สอดคล้องกับงานของ Oguntunde และ Akintoye (1991)

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลืองที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	อุณหภูมิน้ำถั่วเหลือง (°C)	ความหนาแน่น* (kg m ⁻³)
15	50	1044.24 ± 2.78 a
	60	1045.42 ± 1.06 a
	70	1044.90 ± 0.34 a
	80	1047.01 ± 1.76 a
20	50	1065.11 ± 0.61 b
	60	1066.20 ± 1.31 b
	70	1066.92 ± 0.81 b
	80	1067.52 ± 0.57 b

หมายเหตุ: *ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01

อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองที่แตกต่างกันในช่วง 50 ถึง 80 °C ไม่ส่งผลให้ความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) จึงเลือกใช้ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำถั่วเหลืองในการสร้างแบบจำลองที่ปริมาณของแข็งต่าง ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1045.32 และ 1066.75 kg m⁻³ สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w) ตามลำดับ โดยการเลือกใช้ความหนาแน่นเฉลี่ยเพื่อสร้างแบบจำลองนั้นคล้ายกับ Gu และคณะ (2012) และค่าความหนาแน่นของน้ำถั่วเหลืองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oguntunde และ Akintoye (1991) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1050 ± 10 kg m⁻³ ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 11.6% และอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองเท่ากับ 25 °C

4.1.3 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง ที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลือง 15% และ 20% (w/w) มีค่าเท่ากับ 7.93 และ 9.18 J kg⁻¹.K⁻¹ ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของอาหารเหลวส่งผลต่อความจุความร้อนจำเพาะน้อยมาก (Hammer และ Johnson, 1913) จึงเลือกใช้ความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลอง

4.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับการทำนายมวลของคราบน้ำ้ำแก้วเหลือง

แบบจำลองสำหรับการทำนายมวลของคราบน้ำ้ำแก้วเหลืองในงานวิจัยนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เกี่ยวข้องในรูปของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ 8 กลุ่ม ซึ่งค่าของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ และปริมาณของแข็งทั้งหมด

พารามิเตอร์	อุณหภูมิ	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	
	พื้นผิว (°C)	15	20
ความหนืดของน้ำ้ำแก้วเหลือง (μ , kg m ⁻¹ s ⁻¹)	65	0.0072	0.0096
	70	0.0078	0.0104
	75	0.0078	0.0104
	80	0.0100	0.0131
	85	0.0118	0.0152
ความหนาแน่นของน้ำ้ำแก้วเหลือง (ρ , kg m ⁻³)	65		
	70		
	75	1045.32	1066.75
	80		
	85		
ความจุความร้อนจำเพาะของ น้ำ้ำแก้วเหลือง (C_p , J kg ⁻¹ .K ⁻¹)	65		
	70		
	75	7.93	9.18
	80		
	85		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

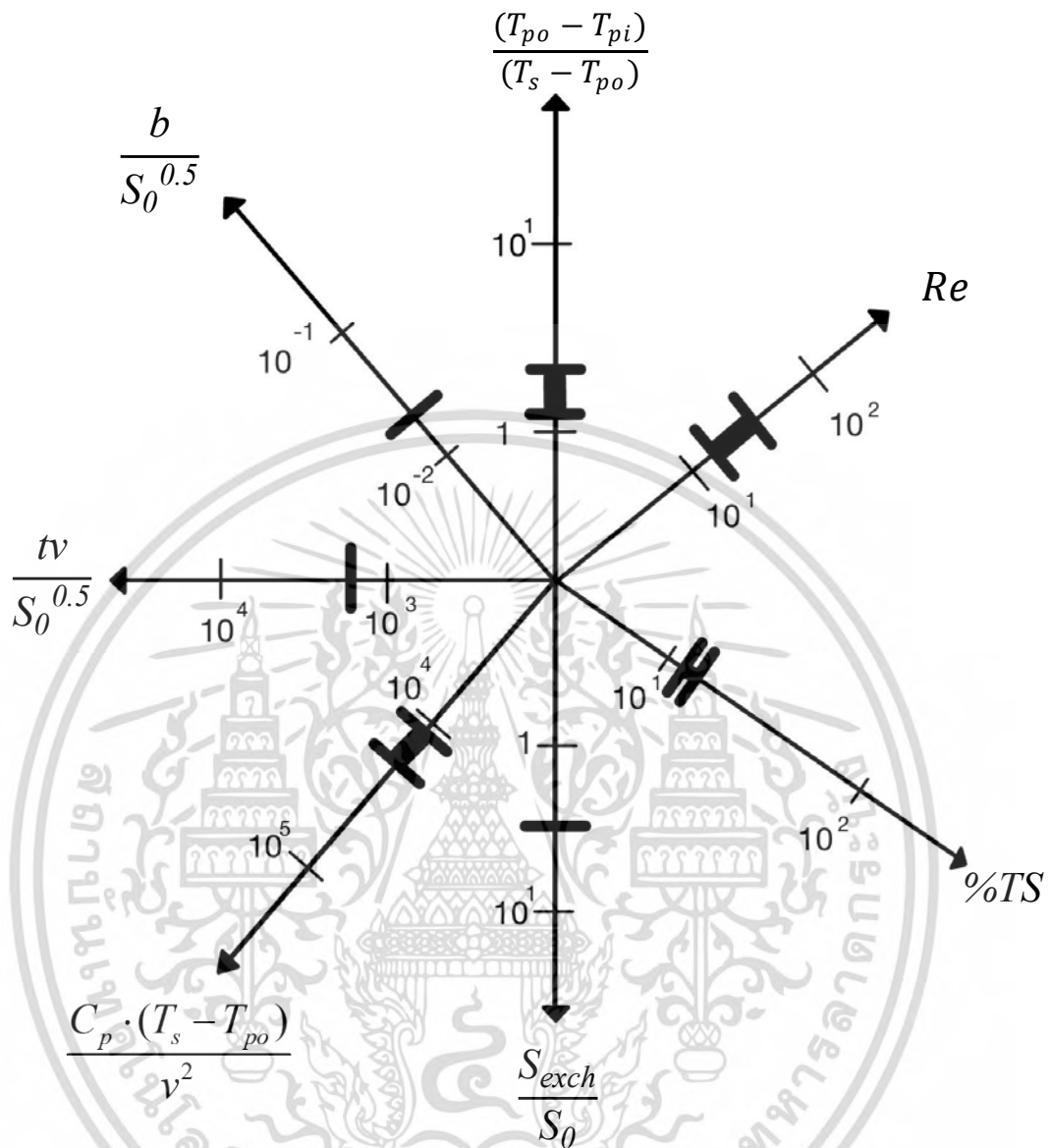
ตารางที่ 4.5 ปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์	หน่วย
ความเร็วของน้ำถั่วเหลือง (v)	0.048	ms^{-1}
เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน (t)	3600	s
ระยะห่างระหว่างแผ่น (b)	0.003	m
พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น (S_0)	86.3	cm^2
พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด (S_{exch})	431.5	cm^2

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติกับปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ ในตารางที่ 4.4 พบว่า กระบวนการทดลองนี้ดำเนินการภายใต้ขอบเขตของกลุ่มตัวแปรไร้มิติแสดงในรูปที่ 4.1 โดยแสดงให้เห็นว่า $\pi_2 = \frac{tv}{S_0^{0.5}} = 1863$, $\pi_5 = \frac{b}{S_0^{0.5}} = 0.032$ และ $\pi_6 = \frac{S_{exch}}{S_0} = 5.017$ เป็นค่าคงที่ จึงนำไปรวมไว้ในเทอมค่าคงที่ค่าเดียว กลุ่มตัวแปรไร้มิติสำหรับสร้างแบบจำลองการทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง จึงทำให้ง่ายขึ้นเป็นรูปแบบที่กำหนดในสมการ 4.1

$$\frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} = f\left(\pi_2 = \frac{(T_{po}-T_{pi})}{(T_s-T_{po})}, \pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}, \pi_5 = \%TS\right) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แผนภูมิภาพแสดงการกำหนดค่าของระบบและจุดปฏิบัติการของกลุ่มตัวแปร

จากตารางที่ 4.6 แสดงมวลของคราบน้ำแก้วเหลือง และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่าง ๆ ทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองการทำนายมวลของคราบน้ำแก้วเหลืองที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ร้อนได้รับ

$$\text{จากข้อมูลการทดลองในช่วง } 0.65 \leq \pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} \leq 9.98, 2.33 \leq \pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})} \leq 3.29, 21.30$$

$$\leq \pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu} \leq 42.39, 10325 \leq \pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2} \leq 27890 \text{ และ } 15 \leq \pi_5 = \%TS \leq 20$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 มวลของคราบน้ำมันที่เพิ่มขึ้นบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำมัน (%TS, %)	อุณหภูมิพื้นผิวร้อน (T_s , °C)	อุณหภูมิขาออกของน้ำมัน (T_{po} , °C)	อัตราส่วนอุณหภูมิ $\frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$	ลำดับแผ่น	มวลคราบน้ำมัน	
					ต่อแผ่น (g)	ทั้งหมด (g)*
15	65	62	2.33	2nd	0.147 ± 0.004	0.540 ± 0.011 a
				3rd	0.173 ± 0.026	
				4th	0.028 ± 0.002	
				5th	0.061 ± 0.031	
				6th	0.139 ± 0.009	
				2nd	0.707 ± 0.042	
15	70	66	2.75	3rd	0.571 ± 0.057	1.657 ± 0.052 b
				4th	0.088 ± 0.021	
				5th	0.127 ± 0.027	
				6th	0.136 ± 0.035	
				2nd	1.427 ± 0.064	
				3rd	1.292 ± 0.016	
15	75	70	3.00	4th	0.495 ± 0.094	4.047 ± 0.175 c
				5th	0.562 ± 0.070	
				6th	0.272 ± 0.064	
				2nd	1.714 ± 0.133	
				3rd	1.347 ± 0.193	
				4th	1.109 ± 0.060	
15	80	74	3.17	5th	0.926 ± 0.120	5.548 ± 0.479 d
				6th	0.453 ± 0.124	
				2nd	1.761 ± 0.017	
				3rd	1.152 ± 0.009	
				4th	1.857 ± 0.103	
				5th	1.812 ± 0.086	
15	85	78	3.28	6th	0.689 ± 0.257	7.284 ± 0.369 e

หมายเหตุ: *ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 15% และ 20% (w/w)

ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลือง (%TS, %)	อุณหภูมิพื้นผิวร้อน (T_s , °C)	อุณหภูมิขาออกของน้ำถั่วเหลือง (T_{po} , °C)	อัตราส่วนอุณหภูมิ $\frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$	ลำดับแผ่น	มวลคราบของน้ำถั่วเหลือง	
					ต่อแผ่น (g)	ทั้งหมด (g)*
15	65	62	2.33	2nd	0.280 ± 0.015	0.845 ± 0.084 a
				3rd	0.245 ± 0.030	
				4th	0.042 ± 0.007	
				5th	0.074 ± 0.016	
				6th	0.185 ± 0.020	
				2nd	0.925 ± 0.061	
20	70	66	2.75	3rd	0.704 ± 0.050	2.142 ± 0.120 b
				4th	0.166 ± 0.001	
				5th	0.162 ± 0.006	
				6th	0.102 ± 0.001	
				2nd	1.655 ± 0.167	
				3rd	1.338 ± 0.035	
25	75	70	3.00	4th	0.528 ± 0.071	4.346 ± 0.266 c
				5th	0.469 ± 0.109	
				6th	0.357 ± 0.081	
				2nd	1.965 ± 0.087	
				3rd	1.640 ± 0.083	
				4th	1.232 ± 0.154	
30	80	74	3.17	5th	1.130 ± 0.278	6.629 ± 0.387 d
				6th	0.662 ± 0.049	
				2nd	2.353 ± 0.248	
				3rd	1.198 ± 0.056	
				4th	1.867 ± 0.002	
				5th	1.773 ± 0.017	
35	85	78	3.28	6th	0.956 ± 0.010	8.055 ± 0.314 e
				4th	1.867 ± 0.002	
				5th	1.773 ± 0.017	

หมายเหตุ: *ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 พบว่า อุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออกเป็นปริมาณที่ได้จากการวัด ซึ่งไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ เนื่องจากเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิพื้นผิวร้อน อย่างไรก็ตามอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองขาออกจำเป็นต้องใส่ลงไปแบบจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของผลต่างของอุณหภูมิต่อมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง

จากการทราบขอบเขตของกลุ่มตัวแปรไร้มิติจึงนำไปวิเคราะห์ในโปรแกรมทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลือง ที่มีกลุ่มตัวแปรไร้มิติจำนวน 5 กลุ่ม

กลุ่มตัวแปร	เลขชี้กำลัง	ความคลาดเคลื่อน	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, %	P-value
		มาตรฐาน		
π_2	0.716	76746538	86	< 0.001
π_3	-2.76	0.184	61	< 0.001
π_4	-0.814	8×10^{-12}	77	< 0.001
π_5	0.526	33.281	1	0.615

หมายเหตุ: $\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$, $\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$ และ $\pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$ และ $\pi_5 = \%TS$

ตารางที่ 4.7 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 0.99 พบว่า ช่วงของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\pi_5 = \%TS$ ตั้งแต่ 15 ถึง 20 % ไม่ส่งผลต่อมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งทั้งหมดส่งผลต่อการก่อตัวของคราบในมุมมองของการเพิ่มสมบัติของน้ำถั่วเหลือง (ความหนืด, ความหนาแน่น และปริมาณของสารก่อ

คราบ) และจากตารางที่ 4.7 ทำให้ทราบว่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$, $\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$ และ

$\pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$ ส่งผลต่อ $\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho}$ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ดังนั้น กลุ่มตัวแปรไร้มิติ

สำหรับสร้างแบบจำลองการทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองเขียนเป็นฟังก์ชันของ π_1 ดังสมการที่

4.2

$$\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} = f(\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}, \pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}) \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์การถดถอยข้างต้น ทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายมวลคราบน้ำ้ำแก้วเหลือง โดยมีขอบเขตของ $\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho}$ ตั้งแต่ 0.65 ถึง 9.98 และเงื่อนไขของกระบวนการทดลอง π_2, π_3 และ π_4 ตั้งแต่ 2.33 ถึง 3.29, 21.30 ถึง 42.39 และ 10325.52 ถึง 27890.63 ตามลำดับ สำหรับการสร้างแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้นได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เลขชี้กำลัง และสัมประสิทธิ์ในรูปของค่าคงที่ในแบบจำลองสามารถเขียนแบบจำลองทำนายมวลของคราบน้ำ้ำแก้วเหลืองได้ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.8 ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยสำหรับการเกิดคราบของน้ำ้ำแก้วเหลือง ที่มีกลุ่มตัวแปรไร้มิติจำนวน 4 กลุ่ม

กลุ่มตัวแปร	เลขชี้กำลัง	ความคลาดเคลื่อน	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดลิมใจ, %	P-value
		มาตรฐาน		
π_2	3.6570	4.5096	95	< 0.001
π_3	0.0072	0.0003	62	< 0.001
π_4	0.6832	38.1628	97	< 0.001

หมายเหตุ: $\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}, \pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$ และ $\pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$

$$\pi_1 = [0.000125 \cdot ((\pi_2)^{3.657} \cdot (\pi_3)^{0.007} \cdot (\pi_4)^{0.683})] - 0.994 \quad (4.3)$$

$$\frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} = [0.000125 \cdot ((\frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})})^{3.657} \cdot (\frac{\rho v 2b}{\mu})^{0.007} \cdot (\frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2})^{0.683})] - 0.994 \quad (4.4)$$

จากนั้นนำสมการที่ 4.4 จัดรูปใหม่ โดยคูณ $S_0^{0.5}$ และ ρ ทั้งสองฝั่งของสมการ ทำให้แบบจำลองอยู่ในรูปของมวลคราบของน้ำ้ำแก้วเหลืองต่อพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน ($\frac{m_f}{S_0}$) แสดงในสมการ 4.5

$$\pi_1 = \frac{m_f}{S_0} = S_0^{0.5} \cdot \rho \cdot ([0.000125 \cdot ((\pi_2)^{3.657} \cdot (\pi_3)^{0.007} \cdot (\pi_4)^{0.683})] - 0.994) \quad (4.5)$$

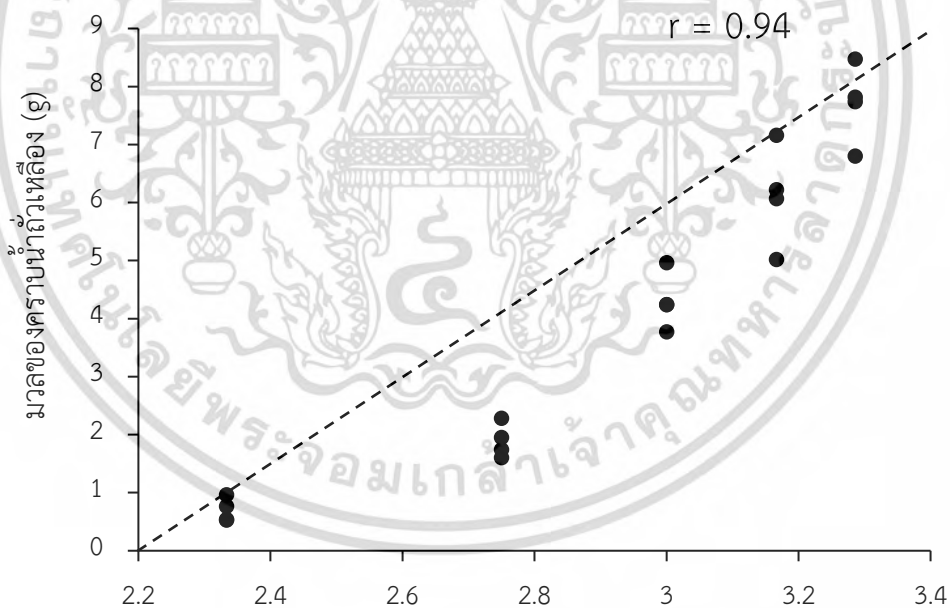
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.8 พบว่า π_2, π_3 และ π_4 ส่งผลต่อ π_1 อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 0.99 โดยความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติดังกล่าวต่อมวลของคราบน้ำั่วเหลือง มีดังนี้

$$\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$$

มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมวลของคราบน้ำั่วเหลืองทั้งหมดที่เกิดขึ้นใน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดย π_2 ที่สูงขึ้นส่งผลให้มวลของคราบน้ำั่วเหลืองทั้งหมดเพิ่มขึ้น ที่เวลาในการเกิดคราบ 60 min จากรูปที่ 4.2 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง π_2 กับมวลของคราบน้ำั่วเหลือง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.94 ซึ่งสรุปได้ว่ามวลของคราบน้ำั่วเหลืองแปรผันตรงกับ π_2 โดยที่มวลคราบสูงสุด 8.258 g ที่ π_2 มีค่าเท่ากับ 3.29 และน้อยลงเมื่อ π_2 มีค่าลดลง ซึ่งผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิน้ำั่วเหลืองส่งผลโดยตรงต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและอัตราการเกิดคราบ โดยผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อัตราและปริมาณการเกาะติดของโปรตีนเพิ่มขึ้น (Ling & Lund, 1978)



$$\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$$

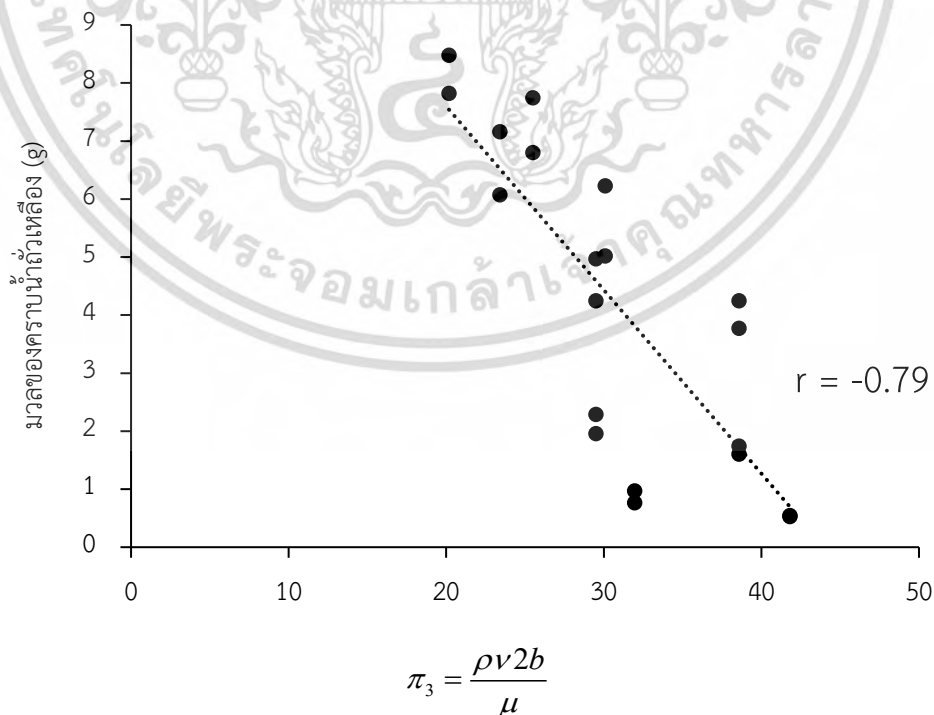
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ 2 ต่อมวลของคราบน้ำั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$ มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองทั้งหมดที่

เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดย π_3 คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ที่บ่งบอกถึงลักษณะการไหล เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยมีค่า ตั้งแต่ 20.18 ถึง 41.80 ซึ่งลักษณะการไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ซึ่งเป็นระบบการไหลที่ง่ายต่อการเกาะติดของอนุภาคคราบ (Awad, 2011) จากข้อสรุปดังกล่าว พบว่า เมื่อปริมาณของแข็งในน้ำถั่วเหลืองน้อยลงส่งผลให้ความหนืด และความหนาแน่นต่ำลง ทำให้ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าน้อย แต่มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก เนื่องจากความหนืด และความหนาแน่นส่งผลต่อชั้นขอบเขตการไหล (Viscous sublayer) และค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง (Awad, 2011)

ในรูปที่ 4.3 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง π_3 กับมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.79 โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลืองเท่ากับ 20% (w/w) อุณหภูมิพื้นผิว 85°C π_3 มีค่าเท่ากับ 20.18 มีมวลคราบสูงสุดเท่ากับ 8.258 g และมวลคราบต่ำลงเมื่อ π_3 มีค่าสูงขึ้น โดยมีมวลคราบต่ำสุดเท่ากับ 0.527 g ที่ π_3 เท่ากับ 41.80

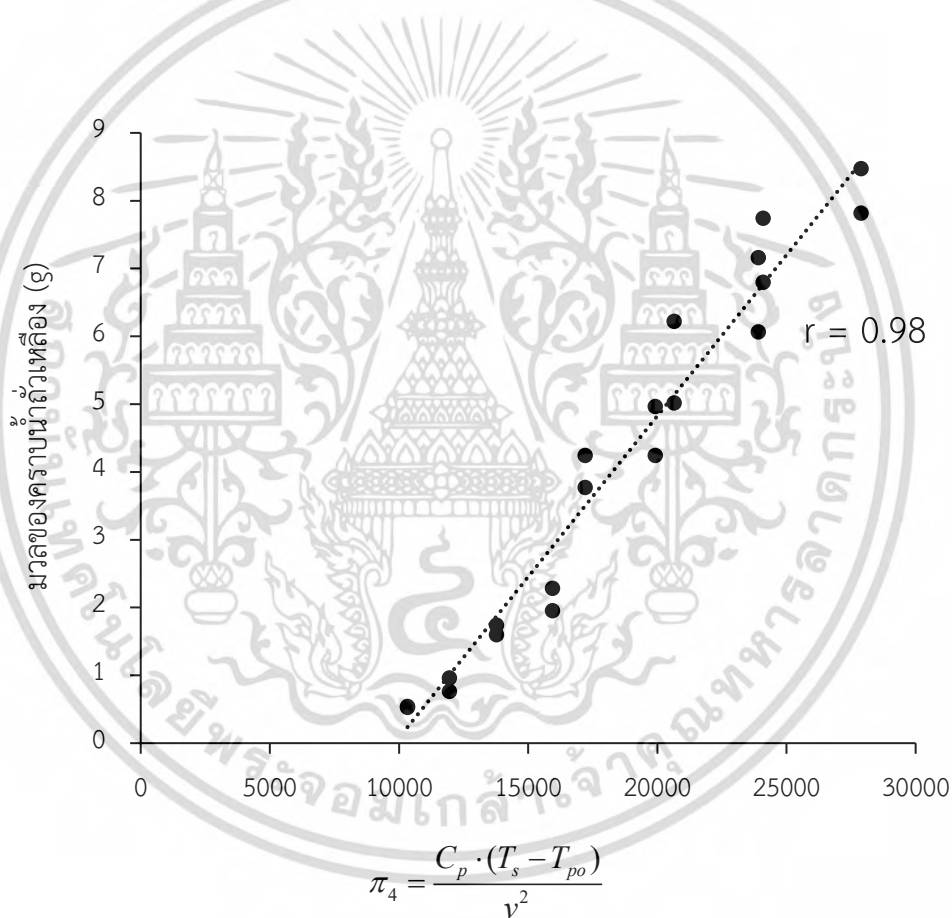


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ 3 ต่อมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง จากรูปที่ 4.4

ความสัมพันธ์ระหว่าง π_4 กับมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.98 มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองแปรผันตรงกับ π_4 โดยที่สมบัติทางความร้อนของน้ำถั่วเหลือง และผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิน้ำถั่วเหลืองมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการเกาะติดของคราบน้ำถั่วเหลืองเพิ่มมากขึ้น โดยค่าความจุความร้อนจำเพาะแปรผันตรงกับมวล เมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลืองเพิ่ม ค่าความจุความร้อนจำเพาะมีค่าสูงขึ้นส่งผลมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเร็วขึ้น ทำให้อุณหภูมิของน้ำถั่วเหลืองถึงอุณหภูมิเสถียรภาพไว้มากขึ้นในการเกาะติดของคราบเพิ่มมากขึ้นในระยะเวลาการให้ความร้อน 1 hr



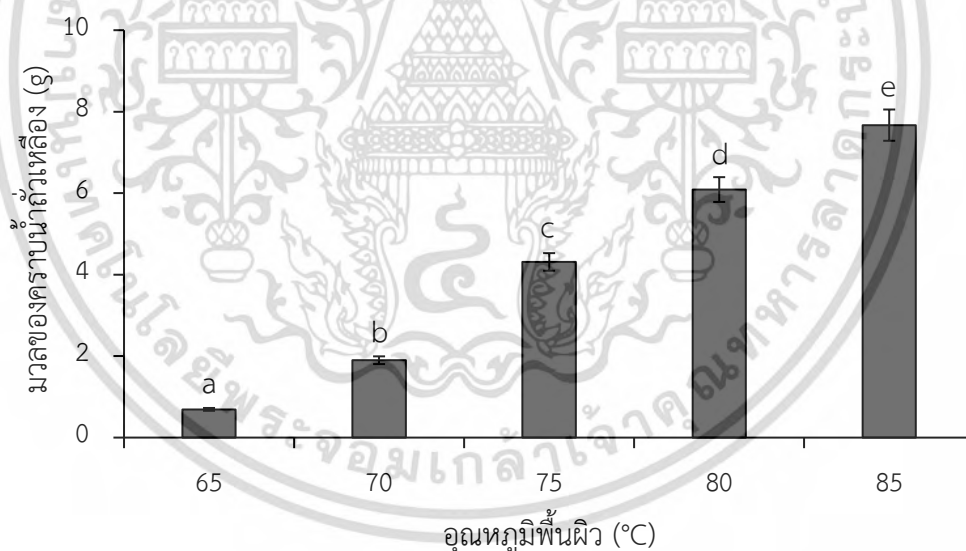
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรที่ 4 ต่อมวลของคราบน้ำถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของอุณหภูมิและปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อการเกิดคราบน้ำั่วเหลือง

4.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อมวลของคราบน้ำั่วเหลือง

จากรูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อมวลของคราบน้ำั่วเหลืองบนแผ่น แลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อมวลของ คราบน้ำั่วเหลืองทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ($p < 0.01$) ที่เวลาในการ เกิดคราบ 60 min เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้น มวลของคราบน้ำั่วเพิ่มขึ้น โดยปริมาณมวลของคราบน้ำั่ว เหลืองสูงที่สุดเท่ากับ 8.258 g ที่อุณหภูมิพื้นผิว 85 °C และลดลงเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวน้อยลง ข้อสังเกตนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen และ Bala (1998) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิพื้นผิวเป็นปัจจัยที่ สำคัญมากสำหรับการก่อตัวของคราบ โดยกระบวนการส่วนใหญ่ของการเกิดคราบเกี่ยวข้องกับการ เสียสภาพธรรมชาติ และการรวมตัวของโปรตีน (Wang และคณะ, 2018) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีอุณหภูมิ เป็นตัวเร่ง (Kessler และ Beyer, 1991) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิพื้นผิวจึงเป็นตัวเร่งกระบวนการเกิด คราบ

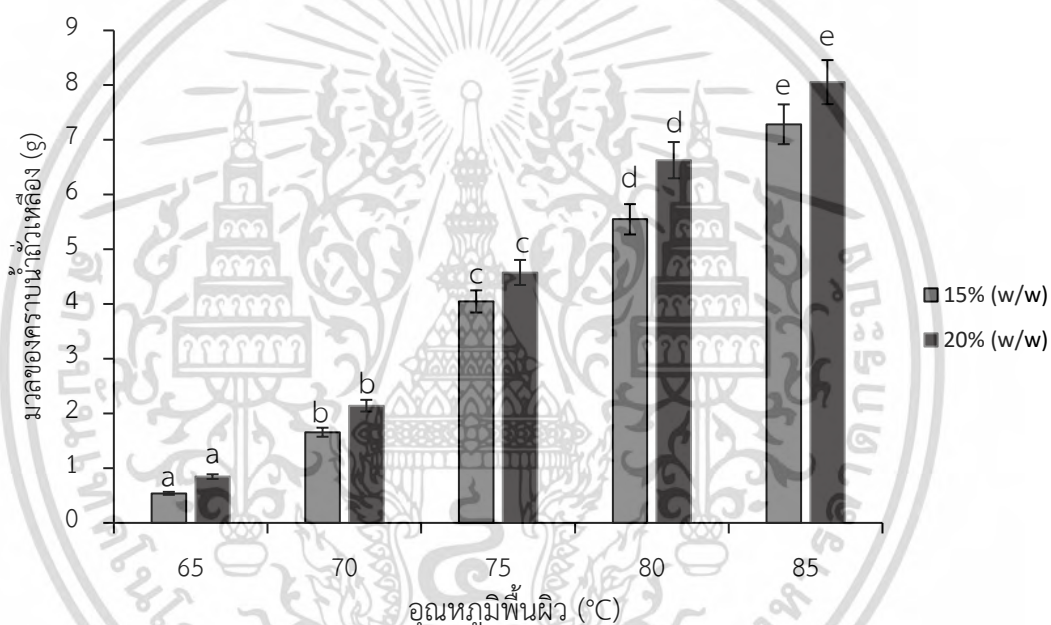


หมายเหตุ: ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมั่น 0.01

รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อมวลของคราบน้ำั่วเหลืองที่เวลาให้ความร้อน 60 min

4.3.2 อิทธิพลของปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อมวลของคราบน้ำ้าถั่วเหลือง

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำ้าถั่วเหลืองไม่ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการเกิดคราบน้ำ้าถั่วเหลือง เนื่องจาก ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นจาก 15% ถึง 20% ไม่ทำให้ปริมาณมวลของคราบน้ำ้าถั่วเหลืองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) แต่ปริมาณของแข็งทั้งหมดส่งผลต่อความหนืด ความหนาแน่น และความเข้มข้นของสารก่อคราบ (โปรตีน) ในน้ำ้าถั่วเหลือง โดยการส่งผลดังกล่าวทำให้มีอัตราและปริมาณการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมีเพิ่มมากขึ้นในระบบการให้ความร้อน (Ling และ Lund, 1978) แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำ้าถั่วเหลืองมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในการเสียสภาพถึงจะทำให้มีการสะสมของคราบน้ำ้าถั่วเหลือง

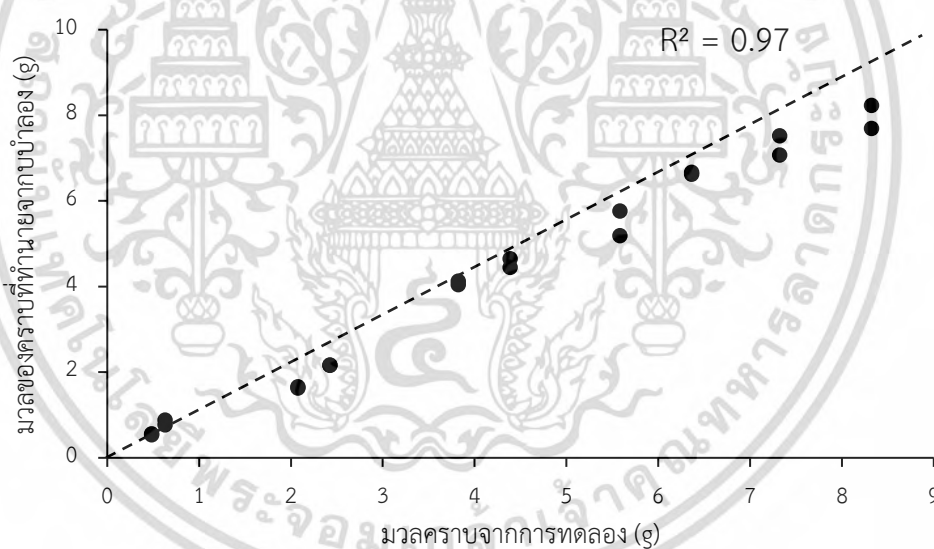


หมายเหตุ: ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01

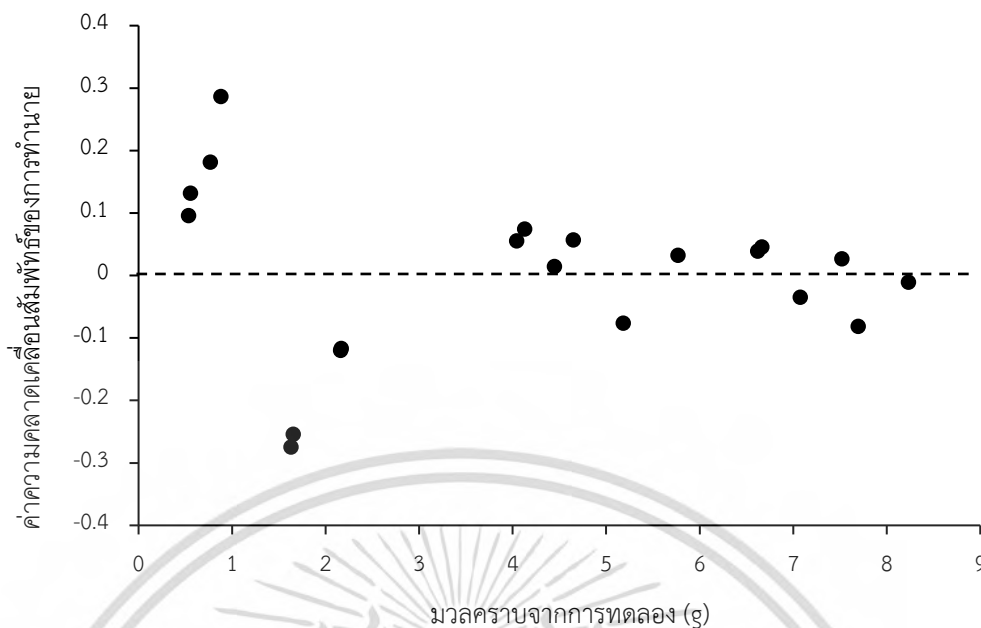
รูปที่ 4.6 อิทธิพลของปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำ้าถั่วเหลืองต่อมวลของคราบน้ำ้าถั่วเหลืองที่เวลาให้ความร้อน 60 min

4.4 การทดสอบแบบจำลองทำนายการเกิดคราบน้ำถั่วเหลือง

การทดสอบความสามารถในการทำนายของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยเปรียบเทียบมวลของคราบที่แบบจำลองทำนายได้กับมวลของคราบที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.97 แสดงในรูปที่ 4.7 และความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของการทำนาย (Predicted relative error) มีค่าเท่ากับ 11.78% และจากรูปที่ 4.8 แสดงการนำมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองที่ทำนายได้จากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับมวลของคราบที่ได้จากการทดลองสำหรับตรวจสอบความถูกต้อง พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.99 สรุปได้ว่า มวลที่ได้จากการทำนาย และได้จากการทดลอง มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 10.04% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ที่ต่ำ เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Petit และคณะ (2013) โดยสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทำนายกระจายตัวทั้งมากกว่า และน้อยกว่า ค่าที่ได้จากการทดลองอย่างสมมาตร



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลคราบที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับมวลคราบที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.8 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของมวลที่ทำนายได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับมวลของคราบน้ำแก้วเหลือจากการทดลอง

4.5 ความต้านทานความร้อนของคราบ

มวลของคราบน้ำแก้วเหลือทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นต่อพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการที่ 4.5 ความหนาแน่น ปริมาณความชื้น และค่าการนำความร้อนของคราบน้ำแก้วเหลือแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สมบัติของคราบน้ำแก้วเหลือที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ตัวแปร	ค่าที่ได้	หน่วย
ความหนาแน่นของคราบน้ำแก้วเหลือ	1036	kgm^{-3}
ค่าการนำความร้อนของคราบน้ำแก้วเหลือ	0.248	$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
ปริมาณความชื้นของคราบน้ำแก้วเหลือ	65.23	%

ความหนาแน่น และค่าการนำความร้อนของคราบน้ำแก้วเหลือที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pan และคณะ (2018) ที่ศึกษาคราบของนมที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยพบว่า คราบที่สะสมส่วนใหญ่เกิดจากการเสียดสภาพของโปรตีนนม ซึ่งเป็นคราบประเภท A ที่องค์ประกอบของคราบส่วนใหญ่เป็นโปรตีนคล้ายกับในคราบของน้ำแก้วเหลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานความร้อนของคราบน้ำั่วเหลืองที่เวลา 60 min ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระดับห้องปฏิบัติการ แสดงในตารางที่ 4.10

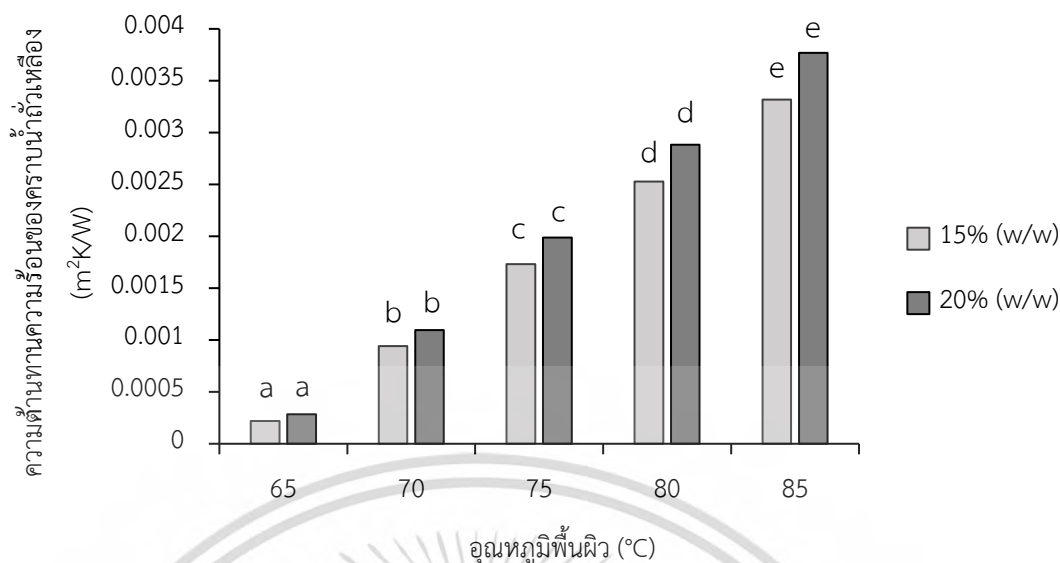
ตารางที่ 4.10 ความต้านทานความร้อนของคราบน้ำั่วเหลืองที่เวลาให้ความร้อน 60 min

ปริมาณของแข็งทั้งหมด	อุณหภูมิพื้นผิว	ความต้านทานความร้อนของคราบน้ำั่วเหลือง*
(%)	(°C)	(m ² K/W)
15	65	0.0002 a
	70	0.0009 b
	75	0.0017 c
	80	0.0025 d
	85	0.0033 e
20	65	0.0003 f
	70	0.0011 g
	75	0.0020 h
	80	0.0029 i
	85	0.0038 j

หมายเหตุ: *ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01

จากการทดลองการเกิดคราบน้ำั่วเหลืองบนพื้นผิวแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิว ปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำั่วเหลืองต่าง ๆ พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวมีผลต่อการเกาะติดของคราบน้ำั่วเหลือง ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานความร้อนของคราบ โดยอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานความร้อน ($p < 0.01$) เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวเป็นปัจจัยหลักที่สัมพันธ์กับปริมาณการเกาะติดของคราบน้ำั่วเหลือง เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของคราบมีค่าเพิ่มขึ้น ในระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เวลา 60 min โดยจากรูปที่ 4.9 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิว พบว่า ค่าความต้านทานความร้อนของคราบน้ำั่วเหลืองมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิพื้นผิว 85 °C ที่ 0.0038 m²K/W และลดลงเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวต่ำลง อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานความร้อน

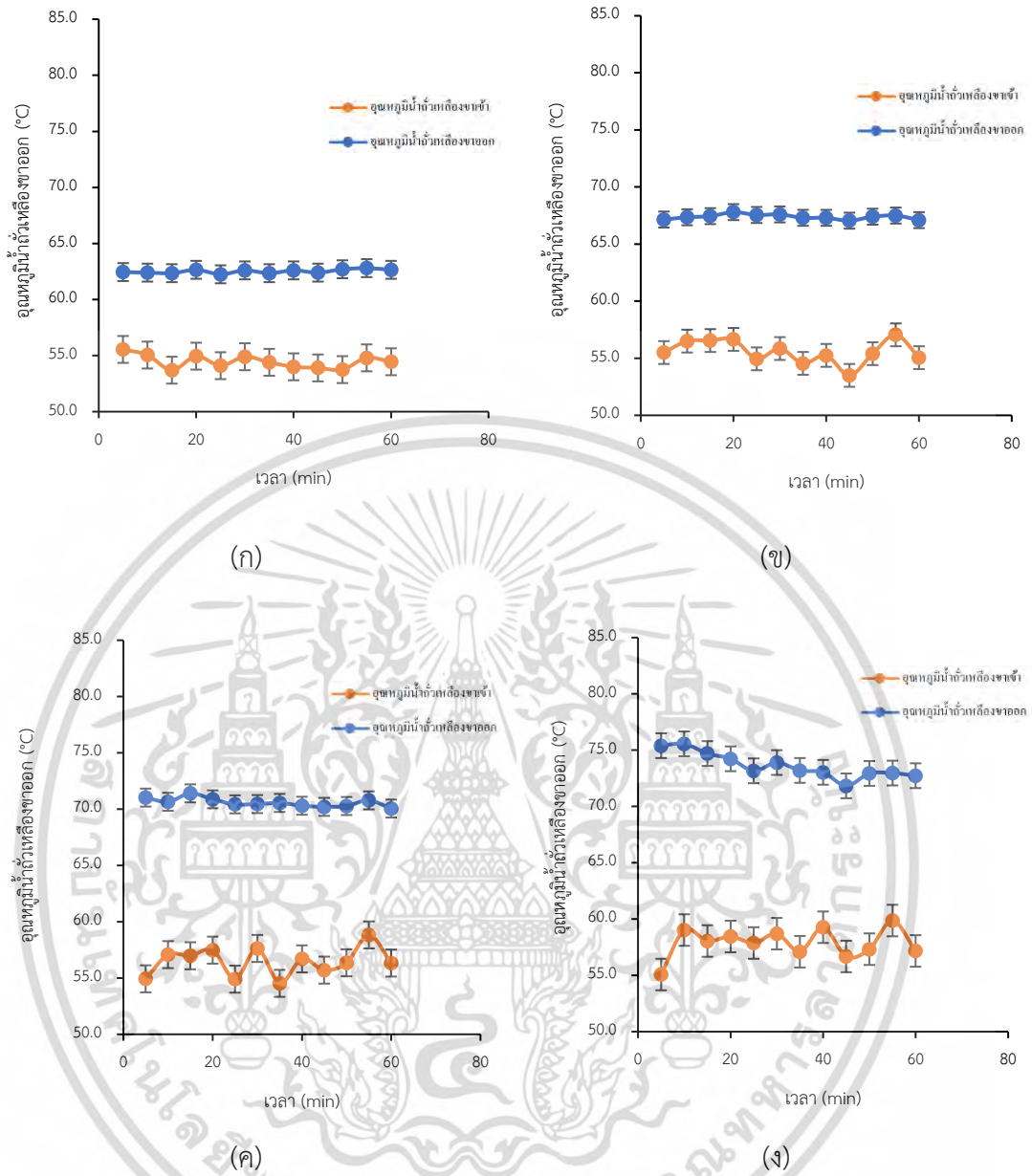
อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) เนื่องจากปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่ส่งผลต่อมวลของคราบน้ำั่วเหลือง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวและปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำไฉ่เหลวต่อความต้านทานความร้อนของคราบน้ำไฉ่เหลวที่เวลา 60 min

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำไฉ่เหลวขาออกกับเวลา

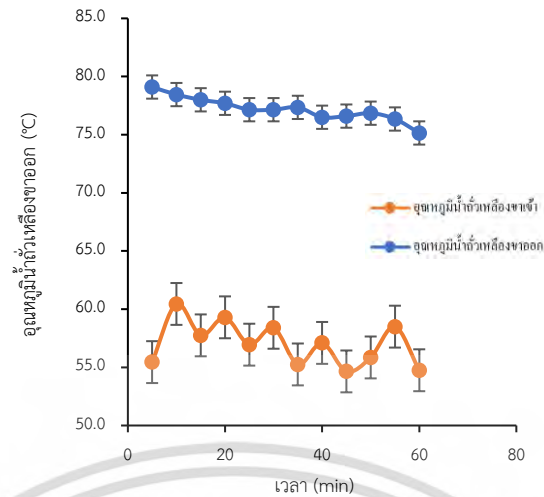
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำไฉ่เหลวขาออกกับเวลา จากรูปที่ 4.10 พบว่า ที่อุณหภูมิพื้นผิวต่ำกว่า 75 °C อุณหภูมิน้ำไฉ่เหลวขาออกที่วัดได้เป็นอุณหภูมิที่โปรตีนไฉ่เหลวเพิ่งเริ่มเสียสภาพธรรมชาติทำให้การก่อตัวของชั้นคราบเกิดเป็นชั้นบางและยังไม่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำให้อุณหภูมิน้ำไฉ่เหลวขาออกคงที่ภายในระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min ในขณะที่อุณหภูมิพื้นผิวสูงกว่า 80 °C เริ่มมีการก่อตัวของชั้นคราบอย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง เนื่องจากชั้นคราบที่เกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่เป็นเหมือนฉนวนความร้อน (Awad, 2011) อุณหภูมิน้ำไฉ่เหลวขาออกจึงลดลงเมื่อเวลาการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระยะเวลาการให้ความร้อนแก่น้ำไฉ่เหลว 60 min ยังไม่สามารถทำให้อุณหภูมิน้ำไฉ่เหลวขาออกเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady State) จึงไม่สามารถพิจารณาพฤติกรรมการสะสมของคราบน้ำไฉ่เหลวบนพื้นผิวร้อนจากการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิน้ำไฉ่เหลวขาออกได้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำดื่มเหลือขาออกกับเวลา ที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ

(ก) 65 °C, (ข) 70 °C, (ค) 75 °C, (ง) 80 °C และ (จ) 85 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(จ)

รูปที่ 4.10 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่หัวเครื่องซากออกกับเวลาที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ

(ก) 65 °C, (ข) 70 °C, (ค) 75 °C, (ง) 80 °C และ (จ) 85 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองการทำนายมวลของคราบน้ำถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติด้วยการใช้ทฤษฎี Buckingham Pi พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น มีดังนี้ อุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (T_s) จำนวน 5 ระดับ ได้แก่ 65, 70, 75, 80 และ 85 °C ตามลำดับ ปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ที่ประมาณ (%TS) 15% และ 20% (w/w) ตามลำดับ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำถั่วเหลืองขาเข้า (T_{pi}) ที่ 55 °C ความเร็วการไหลของน้ำถั่วเหลือง (v) 0.048 ms^{-1} เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน (t) 3600 s ระยะห่างระหว่างแผ่น (b) 0.003 m พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด (S_{exch}) 431.5 cm^2 พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อแผ่น (S_0) 86.3 cm^2 ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำถั่วเหลือง (C_p) 7.93 และ 9.18 $\text{J kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ความหนืด (μ) และความหนาแน่น (ρ) ที่ระดับต่าง ๆ สามารถจัดกลุ่มตัวแปรได้ 12 กลุ่ม จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติกับปริมาณของตัวแปรต่าง ๆ พบว่า กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\frac{tv}{S_0^{0.5}}$, $\frac{b}{S_0^{0.5}}$ และ $\frac{S_{exch}}{S_0}$ เป็นคงที่ และจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า กลุ่มตัวแปรไร้มิติ %TS ไม่ส่งผลต่อ $\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho}$ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) จึงทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองให้เหลือกลุ่มตัวแปรดังสมการที่ 5.1

$$\frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} = [0.000125 \cdot \left(\frac{T_{po} - T_{pi}}{T_s - T_{po}}\right)^{3.657} \cdot \left(\frac{\rho v 2b}{\mu}\right)^{0.007} \cdot \left(\frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}\right)^{0.683}] - 0.994 \quad (5.1)$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho}$ กับ $\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$,

$$\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu} \quad \text{และ} \quad \pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2} \quad \text{สามารถสรุปได้ ดังนี้}$$

$$1) \pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})} \text{ เพิ่มขึ้นส่งผลให้มวลของคราบน้ำั่วเหลืองทั้งหมดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้อง}$$

กับอุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นส่งผลต่อมวลของคราบน้ำั่วเหลืองทั้งหมดที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.94

$$2) \pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu} \text{ มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับมวลของคราบน้ำั่วเหลืองทั้งหมดที่}$$

เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ -0.77 ซึ่งสอดคล้องกับความหนืด และความหนาแน่นของน้ำั่วเหลืองที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากการเพิ่มปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำั่วเหลือง ซึ่งส่งผลให้ $\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$ มีค่าน้อยลง แต่มวลของคราบน้ำั่วเหลืองเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$)

$$3) \pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2} \text{ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับมวลของคราบน้ำั่วเหลือง โดยที่สมบัติ}$$

ทางความร้อนของน้ำั่วเหลือง และผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิน้ำั่วเหลืองมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการเกาะติดของคราบน้ำั่วเหลืองเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.98 มวลของคราบน้ำั่วเหลืองแปรผันตรงกับ π_4

$$\text{สำหรับการทำนายมวลคราบน้ำั่วเหลืองในขอบเขตของ } 0.65 \leq \pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} \leq 9.98, 2.33$$

$$\leq \pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})} \leq 3.29, 21.30 \leq \pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu} \leq 42.39, 10325 \leq \pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2} \leq$$

27890 โดยนำมวลของคราบน้ำั่วเหลืองที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับค่ามวลคราบน้ำั่วเหลืองที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยของการทำนาย มีค่าเท่ากับ 10.04%

มวลของคราบน้ำั่วเหลืองที่ได้จากแบบจำลองสามารถนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานของคราบน้ำั่วเหลืองที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ซึ่งบ่งชี้ว่าประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ลดลง เนื่องจากค่าความต้านทานของคราบน้ำั่วเหลืองเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ภายในระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยการสร้างแบบจำลองการทำนายมวลของคราบน้ำั่วเหลืองที่เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น แบบจำลองอาจนำไปใช้เป็นข้อมูลการประมาณการเกิดคราบในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นได้ สำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือเป็นเครื่องมือในการช่วยประกอบการวิเคราะห์สำหรับการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในอนาคตการพัฒนาแบบจำลองการทำนายมวลของคราบ และการศึกษาการพฤติกรรมเกิดคราบของน้ำั่วเหลือง ควรพัฒนาดังนี้

1) การพิจารณาความต้านทานความร้อนของคราบตามเวลาในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อใช้อธิบาย พฤติกรรมของการเกิดคราบที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ จากการเก็บข้อมูลมวลของคราบตลอดระยะเวลาการให้ความร้อน เนื่องจากการเกาะติดและการหลุดออกของคราบเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2) การทดลองเพื่อหาระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของคราบ เพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ในแบบจำลอง ทำให้แบบจำลองสามารถพิจารณาค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่สภาวะสมดุล และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลาใด ๆ ที่ลดลงจากการสะสมของคราบ โดยมีจุดประสงค์การพิจารณาเพื่อประกอบการตัดสินใจหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาดอุปกรณ์ ซึ่งโดยทั่วไปมักทำความสะอาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลง (Demirsky และคณะ, 2016)

3) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคราบ เพื่อหาองค์ประกอบหลักในการเกิดคราบน้ำั่วเหลือง และมีการทดลองในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดจริงที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยใช้พารามิเตอร์ในแบบจำลองของงานวิจัยนี้วางแผนการทดลอง

บรรณานุกรม

- Riaz N.M. 2006. "Soy Applications in Food." **CRC Press Taylor & Francis Group**. London, Newyork.
- Vanga S.K., Raghavan V. 2018. "How well do plant-based alternatives fare nutritionally compared to cow's milk?". **J Food Sci Technol**. 55(1): 10-20.
- Astolf M.L., Marconi E., Protano C. and Canepari S. 2020. "Comparative elemental analysis of dairy milk and plant-based milk alternatives". **Food Control**. 116, 107327.
- Wolf W.J., Cowan J.C. and Wolff H. 1971. "Soybeans as a food source". **Critical Reviews in Food Science & Nutrition**. 2(1): p. 81-158.
- Ono T., Choi M. R., Ikeda, A. and Odagiri S. 1991. "Changes in the composition and size distribution of soymilk protein particles by heating". **Agricultural Biology Chemistry**. 55, 2291-2297.
- Wang J., et al. 2018. "A Comparative Study on Fouling and Cleaning Characteristics of Soy Protein Isolate (SPI)". **International Journal of Food Engineering**. 14(4).
- Thanh V.H. and Shibasaki K. 1977. "Beta-conglycinin from soybean proteins. Isolation and immunological and physicochemical properties of the monomeric forms". **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Protein Structure**. 490(2): p. 370-384.
- Wolf W.J. 1993. "Sulphydryl content of glycinin: effect of reducing agents". **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 1993. 41(2): p. 168-176.
- Teixeira A.A. 2014. "Thermal food preservation techniques (pasteurization, sterilization, canning and blanching)". **Conventional and advanced food processing technologies**. p. 115-128.
- Mota F.A., Carvalho E. and Ravagnani M. 2015. "Modeling and design of plate heat exchanger". **Heat Transfer Studies and Applications**. p. 165-199.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Liener, I. 1958. "Effect of heat on plant proteins". **Processed plant protein foodstuffs**. p. 79-122.
- Wilkins, W.F., Mattick, L.R. and Hand, D.B. 1967 . "Effect of processing method on oxidative off-flavors of soybean milk". **Food Technology**. 21, pp. 1630-1633.
- Nelson, A.I., Steinberg, M.D. and Wei, L.S. 1976. Illinois process for preparation of soymilk. **Journal of Food Science**. 41, pp. 57-61.
- Awad, M. M. 2011. "Fouling of heat transfer surfaces. In Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations, and Industrial Systems". Belmiloudi, A.; InTech: Rijeka, Croatia. pp. Ch. 20.
- Bansal, B. and Chen, X.D. 2006. "A critical review of milk fouling in heat exchangers". **Compr Rev Food Sci F**. 5(2), pp. 27-33.
- Lalande, M. and Tissier, J.P. 1985. "Fouling of heat transfer surfaces related to β -lactoglobulin denaturation during heat processing of milk". **Biotechnology Progress**. 1(2), pp. 131-139.
- Blanpain-Avet, P., André, C., Khaldi, M., Bouvier, L., Petit, J. and Six, T. 2016. "Predicting the distribution of whey protein fouling in a plate heat exchanger using the kinetic parameters of the thermal denaturation reaction of β -lactoglobulin and the bulk temperature profiles". **Journal of Dairy Science**. 99(12), pp. 9611-9630.
- Guo, J., et al. 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(14): p. 3782-3791.
- Belmar-Beiny, M., et al. 1993., "The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling". **Journal of Food Engineering**, 19(2): p. 119-139.
- Ling, A.C. and Lund, D.B. 1978. "Fouling of Heat Transfer Surfaces by Solutions of Egg Albumin". **Journal of Food Protection**. 41(3), pp. 187-194.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Pan, F. and Chen, X.D., Mercadé-Prieto R., Xiao, J. 2019. “Numerical simulation of milk fouling: Taking fouling layer domain and localized surface reaction kinetics into account”. **Chemical Engineering Science**. 197, pp. 306-316.
- Post, S. 2011. **Applied and Computational Fluid Mechanics**, 1st ed. Jones & Bartlett Publishers: Burlington. USA. Ch4, pp. 157-200
- Fryer, P. J., Robbins, P. T., Green, C., Schreier, P. J. R., Pritchard, A. M., Hasting, A. P. M., Royston, D. G. and Richardson, J. F. 1996. “A Statistical Model for Fouling of a Plate Heat Exchanger by Whey Protein Solution at UHT Conditions”. **Food and Bioproducts Processing**, 74(4), pp. 189-199
- Gu, Y., Bouvier, L., Tonda, A. and 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.
- Delaplace, G., Loubière, K., Ducept, F. and Jeantet, R. 2015. **Dimensional analysis of food processes**, 1st ed., ISTE Press – Elsevier. Great Britain, UK, pp. 1-73
- Zhang, B.Y., Xu, S., Villalobos-Santeli, J.A., Huang, J.Y. 2020. “Fouling characterization of camel milk with comparison to bovine milk”. **Journal of Food Engineering**. 285, pp. 110085
- Nakanishi, K., Sakiyama, T. and Imamura, K. 2001. “On the adsorption of proteins on solid surfaces, a common but very complicated phenomenon.” **Journal of bioscience and bioengineering**. 91(3) : 233-244.
- Schreier, P.J.R., Toyoda, I., Belmar-Beiny, M.T. and Frye,r P.J. 1994. “A Kinetic Model for Fouling in Milk Processing.” 805-807. in: Yano, T., Matsuno, R. and Nakamura, K. **Developments in Food Engineering**. Boston : Springer.
- Iwabuchi, S and Yamauchi, F. 1987. “Determination of glycinin and beta-conglycinin in soybean proteins by immunological methods”. **J Agr Food Chem**. 35(2), pp. 200–05.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Liu, Z., 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 Research International**. 37, pp. 815-822
- Kohyama, K., Murata, M., Tani, F., Sano, Y. and Doi, E. 1995. "Effects of Protein Composition on Gelation of Mixtures Containing Soybean 7S and 11S Globulins". **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, 59(2), pp. 240-245
- Kohyama, K. and Nishinari, K. 1993. "Rheological studies on the gelation process of soybean 7 S and 11 S proteins in the presence of glucono- δ -lactone". **J. Agric. Food Chem.** 41, pp. 8-14
- DeMan, J. M., DeMan, L. and Gupta S. 1986. "Texture and microstructure of soybean curd (tofu) as affected by different coagulants". **Food Structure**. 5(1) pp.83-89
- Bott, T.R. 1995. **Fouling of Heat Exchangers**. Amsterdam : Elsevier Science B.V.
- 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". **Chemical Engineering Science**. 101, pp. 432-450.
- Alhuthalia, S., Delaplace, G., Macchietto, S. and Bouvier, L. 2022. "Whey protein fouling prediction in plate heat exchanger by combining dynamic modelling, dimensional analysis, and symbolic regression". **Food and Bioprocess Processing**. 134, pp.163-180.
- Qingjun, Z., Yufei, H., Yeming, C. and Xiangzhen, K. 2020. "Fouling behavior of soy milk in plate heat exchanger". **Food and Fermentation industries**. 46(13), pp. 182-189.
- Liu, K. 1997. "Chemistry and Nutritional Value of Soybean Components". In Soybeans. Springer, Boston, MA. Pp. 25-113.
- Campeato, O. 2020. "**Artificial intelligence, machine learning, and deep learning**".

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Oguntunde, A. O., and Akintoy, O. A. 1991. "Measurement and comparison of density, specific heat and viscosity of cow's milk and soymilk". **Journal of Food Engineering**. 13(3), pp. 221-230.
- Chen, X.D., and Bala, P. 1998. "Investigation of the influences of surface and bulk temperatures upon fouling of milk components onto a stainless steel probe". In **Fouling and cleaning in food processing '98**, Jesus College, Cambridge, England, 6-8 April.
- Kessler, H. G., and Beyer, H. J. 1991. "Thermal denaturation of whey proteins and its effect in dairy technology". **International Journal of biological macromolecules**. 13(3), pp. 165-173.
- Demirsky, O.V., Kapustenko, P.O., Khavin, G.L., Arsenyeva, O.P., Matsegora, O.I., Kusakov, S.K., and Bocharnikov, I.O. 2016. "Investigation of Fouling in Plate Heat Exchangers at Sugar Factory." **Chemical Engineering Transactions**. 52, pp. 583-588.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
การสร้างชุดของแปรรูปมิติและการสร้างแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการสร้างชุดขอตัวแปรไร้มิติ โดยการวิเคราะห์มิติ

ขั้นตอนที่ 1

ตัวแปรเป้าหมายและปริมาณทางกายภาพที่เป็นอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรเป้าหมาย ในตารางที่ 3.2 แสดงในสมการที่ 1

$$m_f = f(\rho, \mu, T_s - T_{po}, \nu, \Delta T_p, t, b, S_{exch}, S_0, C_p, \%TS) \quad (1)$$

ขั้นตอนที่ 2

กำหนดมิติของปริมาณทางกายภาพ 4 มิติ ได้แก่ มวล (M) ความยาว (L) เวลา (T) และ อุณหภูมิ (K)

ขั้นตอนที่ 3

จัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ทั้งหมด 8 กลุ่ม แสดงในสมการที่ 2 โดย 12 (จำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด) ลบด้วย 4 (จำนวนของมิติพื้นฐาน)

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 4

สร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติโดยอันดับแรกสร้างเมทริกซ์มิติ (Dimensional matrix) โดยนำพารามิเตอร์ทั้งหมดจัดอยู่ในรูปของมิติพื้นฐาน เช่น V_1 คือ ความเร็ว หน่วยเป็น ms^{-1} เขียนในรูปตัวแปรอิสระเป็น $V_1 = M^0 L^1 T^{-1}$ เป็นต้น จากนั้นนำเลขชี้กำลังของมิติพื้นฐานใส่ลงไปในเมทริกซ์มิติ ดังแสดงในรูปที่ 1 ทฤษฎีบทวาสซี-บักกิงแฮมทำให้ตัวเลขไร้มิติถูกแสดงในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (π_i) ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทางกายภาพที่กำลังศึกษา ถูกสร้างขึ้นโดยใช้การดำเนินการทางเมทริกซ์ นำตัวแปรทางกายภาพบางตัวมาจัดกลุ่มอยู่ในกลุ่มแปรที่ถูกเรียกว่าตัวแปรซ้ำ จากนั้นนำมาประกอบเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เชื่อมโยงกับตัวแปรทางกายภาพที่เหลืออยู่ซึ่งถูกเรียกว่าตัวแปรไม่ซ้ำ กลุ่มตัวแปรไร้มิติ (π_i) ได้มาจากการหารตัวแปรทางกายภาพที่ไม่ซ้ำแต่ละตัวด้วยผลคูณของตัวแปรซ้ำที่ยกกำลังเลขชี้กำลังต่างๆ ซึ่งเลขชี้กำลังดังกล่าวของตัวแปรซ้ำแสดงในตารางที่ ก.1 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการดำเนินการทางเมทริกซ์ จากรูปที่ ก.1 โดยมีเงื่อนไขในการเลือกตัวแปรทางกายภาพซ้ำว่ามีมิติของตัว

แปรทางกายภาพเข้าต้องครอบคลุมมิติพื้นฐานที่จำเป็นทั้งหมดสำหรับการแสดงมิติของปริมาณทางกายภาพที่ระบุไว้

$[m_f] = M^1 L^0 T^0 K^0$	m_f	t	ΔT_p	μ	b	S_{exch}	C_p	%TS	S_0	v	ρ	$T_s - T_{po}$
$[t] = M^0 L^0 T^1 K^0$	K	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
$[\Delta T_p] = M^0 L^0 T^0 K^1$	M	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
$[\mu] = M^1 L^{-1} T^{-1} K^0$	L	0	0	0	-1	1	2	0	2	1	-3	0
$[b] = M^0 L^1 T^0 K^0$	T	0	1	0	-1	0	-2	0	0	-1	0	0
$[S_{exch}] = M^0 L^2 T^0 K^0$												
$[C_p] = M^0 L^2 T^{-2} K^{-1}$												
$[%TS] = M^0 L^0 T^0 K^0$												
$[S_0] = M^0 L^2 T^0 K^0$												
$[v] = M^0 L^1 T^{-1} K^0$												
$[\rho] = M^1 L^{-3} T^0 K^0$												
$[T_s - T_{po}] = M^0 L^0 T^0 K^1$												

รูปที่ ก.1 การสร้างเมทริกซ์มิติ

ตารางที่ ก.1 เลขชี้กำลังของตัวแปรเข้า

	m_f	t	ΔT_p	μ	b	S_{exch}	C_p	%TS
S_0	1.5	0.5	0	0.5	0.5	1	0	0
v	0	-1	0	1	0	0	2	0
ρ	1	0	0	1	0	0	0	0
$T_s - T_{po}$	0	0	1	0	0	0	-1	0

หมายเหตุ: คอลัมน์สอดคล้องกับตัวแปรทางกายภาพที่ไม่ซ้ำ และแถวคือตัวแปรเข้า

กลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้จากทฤษฎีบททาสซี-บักกิงแฮมแสดงในสมการที่ 3

$$\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} = f(\pi_2 = \frac{t v}{S_0^{0.5}}, \pi_3 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}, \pi_4 = \frac{\mu}{\rho v S_0^{0.5}}, \pi_5 = \frac{D_h}{S_0^{0.5}}, \pi_6 = \frac{S_{exch}}{S_0}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}, \pi_8 = \%TS) \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 5

ตัวแปรไร้มิติถูกจัดเรียงใหม่เพื่อให้เป็นกลุ่มตัวแปรที่รู้จัก โดย $\pi_4 = \frac{\mu}{\rho v S_0^{0.5}}$ ถูกจัดรูปแบบกลุ่มแปรไร้มิติ โดยคูณด้วยเลขชี้กำลัง -1 แล้วคูณด้วย π_5 จากนั้นคูณเข้าด้วย 2 แสดงในสมการที่ 4 ทำให้ π_4 เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) แสดงในสมการที่ 5

$$\pi_4 = (\pi_4)^{-1} \times \pi_5 \quad (4)$$

$$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu} = Re \quad (5)$$

ขั้นตอนที่ 6

ตรวจสอบความเป็นอิสระของตัวแปรไร้มิติ

	m_j	t	ΔT_p	μ	b	S_{exch}	C_p	%TS	S_0	v	ρ	$T_s - T_{po}$
π_1	1	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	1	0
π_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0
π_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0.5	1	1	0
π_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0.5	0	0	0
π_6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
π_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	1
π_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

พบว่ากลุ่มตัวแปรอิสระที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 เมื่อนำมาสร้างเมทริกซ์ มีค่า Rank(A) = 8 ซึ่งเท่ากับจำนวนของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ 8 กลุ่ม จึงสรุปได้ว่ากลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้ดังกล่าวเป็นอิสระเชิงเส้น

การสร้างแบบจำลอง

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติกับการทดลอง กลุ่มไร้มิติเหล่านี้ถูกแปลงโดยการใส่ข้อมูลจากการทดลองลงในแต่ละกลุ่มไร้มิติแล้วถ่ายโอนไปยังโปรแกรมทางสถิติ (IBM SPSS เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Statistics V.28) สำหรับการสร้างแบบจำลองโดยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear regression) มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1

นำข้อมูลจากการทดลองแทนค่าลงไปในสมการที่ 5 ได้ขอบเขตของกลุ่มตัวแปรแสดงตารางที่ ก.2

$$\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} = f(\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}, \pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}) \quad (6)$$

ตารางที่ ก.2 ขอบเขตของกลุ่มตัวแปร

อุณหภูมิพื้นผิว (°C)	$\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho}$	$\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$	$\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$	$\pi_4 = \left(\frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2} \right)$
65	0.650	2.33	41.800	10326
	0.632	2.33	41.800	10326
	0.901	2.33	31.950	11953
	1.136	2.33	31.950	11953
70	1.922	2.75	38.585	13767
	2.089	2.75	38.585	13767
	2.299	2.75	29.492	15938
	2.690	2.75	29.492	15938
75	4.524	3.00	38.585	17209
	5.091	3.00	38.585	17209
	4.995	3.00	29.492	19922
	5.846	3.00	29.492	19922
80	6.021	3.17	30.096	20651
	7.467	3.17	30.096	20651
	7.144	3.17	23.414	23906
	8.430	3.17	23.414	23906
85	8.158	3.29	25.505	24093
	9.288	3.29	25.505	24093
	9.204	3.29	20.179	27891
	9.977	3.29	20.179	27891

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 2

นำข้อมูลจากตารางที่ ก.2 ถ่ายโอนไปยังโปรแกรมทางสถิติ มีขั้นตอนดังนี้

1. ข้อมูลขอบเขตของกลุ่มตัวแปรมาใส่ในโปรแกรม แสดงในรูปที่ ก.2

	Pi1	Pi2	Pi3
1	.65	1.00	30.10
2	.63	1.00	30.10
3	.90	1.00	25.56
4	1.14	1.00	25.56
5	1.92	2.00	30.10
6	2.09	2.00	30.10
7	2.30	2.00	25.56
8	2.69	2.00	25.56
9	4.52	3.00	23.15
10	5.09	3.00	23.15
11	5.00	3.00	19.17
12	5.85	3.00	19.17
13	6.02	4.00	20.06
14	7.47	4.00	20.06
15	7.14	4.00	16.14
16	8.43	4.00	16.14
17	8.16	5.00	20.06
18	9.29	5.00	20.06
19	9.20	5.00	16.14
20	9.98	5.00	16.14

รูปที่ ก.2 ใส่ข้อมูลในโปรแกรม

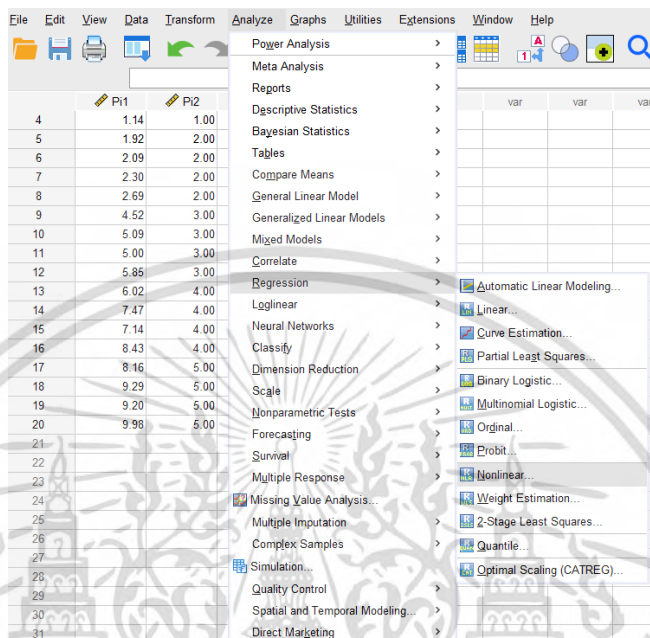
2. เลือก Variable View เพื่อตั้งค่าข้อมูล แสดงในรูปที่ ก.3

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure	Role
1	P1	Numeric	8	2		None	None	5	Right	Scale	Input
2	P2	Numeric	8	2		None	None	5	Right	Scale	Input
3	P3	Numeric	8	2		None	None	5	Right	Scale	Input
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											
31											
32											
33											
34											
35											
36											
37											
38											

รูปที่ ก.3 ระบุชื่อ ชนิด และจำนวนทศนิยมของข้อมูล

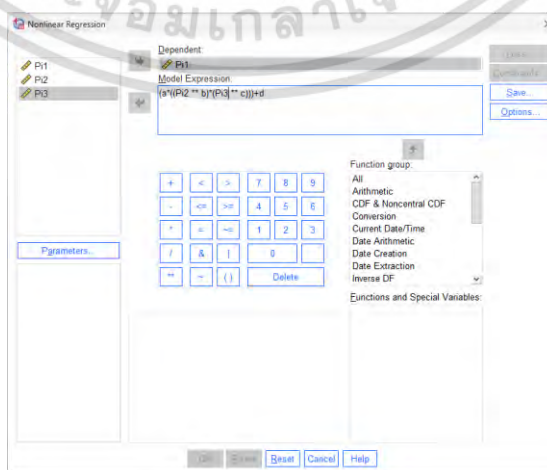
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือก Analyze >> Regression >> Nonlinear เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ ก.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

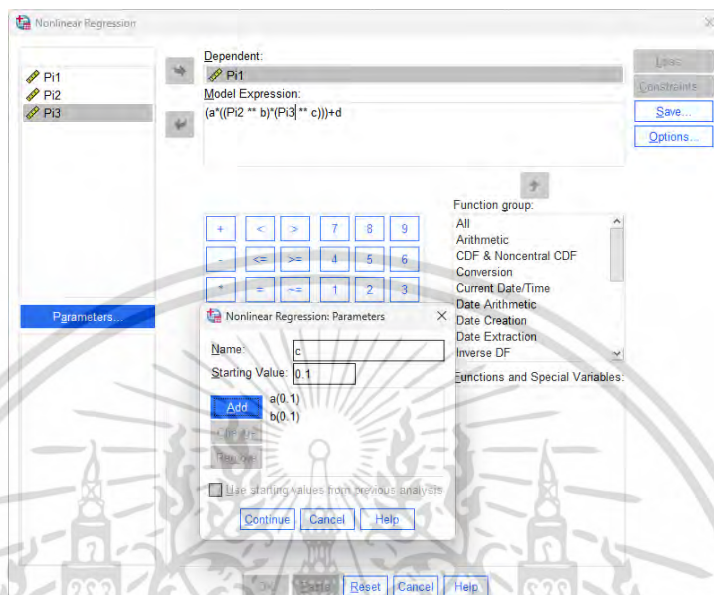
4. เลือกข้อมูลของ $\pi_1 = \frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho}$ ใน Dependent และระบุ $\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$, $\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$ และ $\pi_4 = \left(\frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2} \right)$ ใน Model Expression โดยโมเดลเป็นรูปแบบ $\pi_1 = (a^{**}(\pi_2^{**} b)^{**}(\pi_3^{**} c)^{**}(\pi_4^{**} d))^{**} f)$



รูปที่ ก.5 ระบุตัวแปรต้น และตัวแปรตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

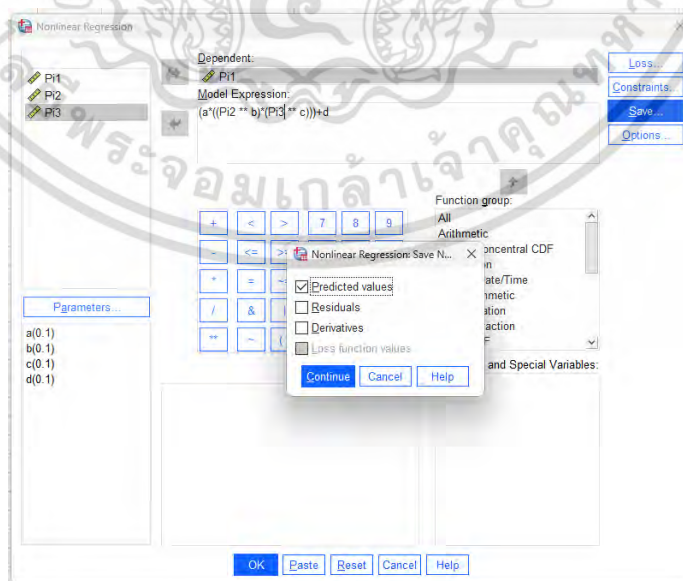
5. เลือก Parameters >> ระบุค่าเริ่มต้นของเลขชี้กำลัง (a b c และ d) ในสมการ >> Continue



รูปที่ ก.6 ระบุค่าเริ่มต้นของเลขชี้กำลังสำหรับสร้างแบบจำลอง

6. เลือก Save >> Predicted values >> Continue >> OK

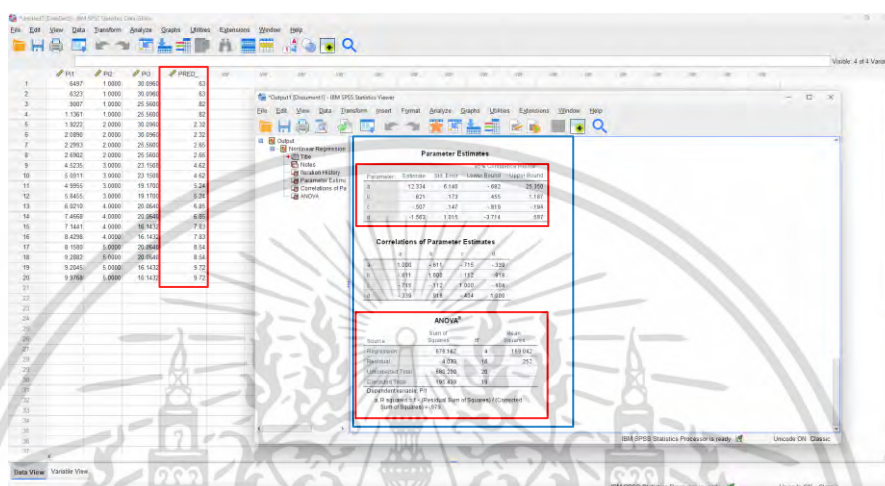
เพื่อให้โปรแกรมแสดงค่าที่แบบจำลองทำนายออกมาตอนสร้างโมเดล



รูปที่ ก.7 เลือกให้โปรแกรมแสดงค่าที่แบบจำลองทำนาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น แบ่งออกเป็น ค่าที่แบบจำลองทำนายได้แสดงในหน้า IBM SPSS Statistics Data Editor ส่วนเลขชี้กำลังในแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) แสดงใน IBM SPSS Statistics Viewer



รูปที่ ก.8 ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองด้วยการวิเคราะห์ความถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

8. นำเลขชี้กำลังมาแทนใส่ลงไปในแบบจำลองต้นแบบ ได้เป็นสมการที่

$$\frac{m_f}{S_0^{1.5} \rho} = [0.000125 \cdot \left(\frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})} \right)^{3.657} \cdot \left(\frac{\rho v 2b}{\mu} \right)^{0.007} \cdot \left(\frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2} \right)^{0.683}] - 0.994 \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองการเกิดคราบของน้ำถั่วเหลืองทั้งหมด 40 การทดลอง ใช้การออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยแบ่งการทดลองจาก กลุ่มตัวแปรไร้มิติ เป็นกลุ่มการทดลอง โดยมีอุณหภูมิพื้นผิว 5 ระดับ ได้แก่ 65, 70, 75, 80 และ 85 °C และปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำถั่วเหลือง 2 ระดับ คือ 15% และ 20% (w/w) หลังจากจัดการทดลองได้ทั้งหมด 10 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ ข.1 นำไปจัดชุดการทดลอง โดยทดลอง 4 ชุด ในแต่ละการทดลอง แสดงการจัดการชุดการทดลองในตารางที่ ข.1 แล้วนำไปชุดการทดลองทั้ง 40 ชุด ไปสุ่มแล้วจะได้แผนการทดลองในตารางที่ ข.2

โดยที่กลุ่มตัวแปรไร้มิติ $\pi_3 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$, $\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$, $\pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$ และ $\pi_8 = \%TS$

$\pi_3 = \frac{(T_{po} - 55)}{(65 - T_{po})}$	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 15\%$	การทดลองที่ 1
	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 20\%$	การทดลองที่ 2
$\pi_3 = \frac{(T_{po} - 55)}{(70 - T_{po})}$	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 15\%$	การทดลองที่ 3
	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 20\%$	การทดลองที่ 4
$\pi_3 = \frac{(T_{po} - 55)}{(75 - T_{po})}$	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 15\%$	การทดลองที่ 5
	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 20\%$	การทดลองที่ 6
$\pi_3 = \frac{(T_{po} - 55)}{(80 - T_{po})}$	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 15\%$	การทดลองที่ 7
	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 20\%$	การทดลองที่ 8
$\pi_3 = \frac{(T_{po} - 55)}{(85 - T_{po})}$	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 15\%$	การทดลองที่ 9
	$\pi_4 = \frac{\rho v 2b}{\mu}, \pi_7 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$	@ $\pi_8 = \%TS = 20\%$	การทดลองที่ 10

รูปที่ ข.1 การจัดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข.1 ชุดการทดลอง

ซ้ำที่	การทดลองที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	103
2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	102
3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	103
4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	104

*หมายเหตุ: ตัวเลข ij หมายถึง i = การทดลอง, j = ซ้ำที่ เช่น 12 คือ การทดลองที่ 1 ซ้ำที่ 2 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 แผนการทดลองการเกิดคราบน้ำอ้วเหลือง

การทดลอง	ชุดการทดลอง	อุณหภูมิพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)	อุณหภูมิน้ำอ้ว เหลืองขาเข้า (°C)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดของน้ำอ้ว เหลือง (%)	
	1	52	75	55	15
	2	74	80	55	15
	3	22	65	55	20
	4	92	85	55	15
	5	42	70	55	20
	6	102	85	55	20
	7	61	75	55	20
	8	32	70	55	15
	9	11	65	55	15
	10	51	75	55	15
	11	24	65	55	20
	12	82	80	55	20
	13	53	75	55	15
	14	73	80	55	15
	15	54	75	55	15
	16	83	80	55	20
	17	31	70	55	15
	18	101	85	55	20
	19	41	70	55	20
	20	93	85	55	15
	21	23	65	55	20
	22	34	70	55	15
	23	71	80	55	15
	24	63	75	55	20
	25	103	85	55	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 (ต่อ) แผนการทดลองการเกิดคราบน้ำอ้าวเหลือง

การทดลอง	ชุดการทดลอง	อุณหภูมิพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน (°C)	อุณหภูมิน้ำอ้าว เหลืองขาเข้า (°C)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดของน้ำอ้าว เหลือง (%)	
	26	64	75	55	15
	27	43	80	55	15
	28	84	65	55	20
	29	13	85	55	15
	30	104	70	55	20
	31	81	85	55	20
	32	21	75	55	20
	33	33	70	55	15
	34	91	65	55	15
	35	12	75	55	15
	36	44	65	55	20
	37	62	80	55	20
	38	72	75	55	15
	39	14	80	55	15
	40	92	75	55	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำถั่วเหลือง

นำน้ำถั่วเหลืองและกากจากการทำน้ำถั่วเหลืองที่ได้ ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง (CDR-30, CST, ใต้หวน) เพื่อคำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids, %TS) ในน้ำถั่วเหลือง คำนวณจากน้ำหนักทั้งหมดที่วัดแสดงในสมการที่ 1

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักถั่วเหลืองหลังผ่านการแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักกากถั่วเหลืองที่ได้}}{\text{น้ำหนักของน้ำถั่วเหลือง}} \times 100 \quad (1)$$

หลังจากได้ถั่วเหลืองจากการแช่น้ำไว้ 12 hr ถั่วเหลืองที่บวมน้ำจะมีน้ำหนัก 2 kg เมื่อแช่ในน้ำสะอาด 3L ต่อถั่ว 1 kg และมีน้ำหนัก 3 kg เมื่อแช่ในน้ำ 3L ต่อถั่ว 1.5 kg หลังจากนำไปเข้าเครื่องบดน้ำถั่วเหลืองได้กากน้ำถั่วเหลืองในปริมาณ 1.4 และ 2.2 kg ตามลำดับ และได้น้ำถั่วเหลืองประมาณ 4 ± 1 kg การคำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำถั่วเหลือง คำนวณได้ดังนี้

ปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำถั่วเหลืองเท่ากับ 15% และ 20% (w/w) แสดงในตารางที่

ค.1

ตารางที่ ค.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของน้ำถั่วเหลืองจากการเตรียมวัตถุดิบ

น้ำหนักน้ำถั่วเหลืองบวม kg	น้ำหนักกากถั่วเหลือง kg	น้ำหนักน้ำถั่วเหลือง kg	ปริมาณของแข็งทั้งหมด %
2.0 ± 0.03	1.4 ± 0.04	4.0 ± 0.1	15.0 ± 0.44
3.0 ± 0.03	2.2 ± 0.04	4.0 ± 0.1	20.0 ± 0.75

* น้ำหนักน้ำถั่วเหลืองบวม คือ น้ำหนักถั่วเหลืองหลังผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 12 hr

คำนวณได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (\%)} = \frac{2 \text{ kg} - 1.4 \text{ kg}}{4 \text{ kg}} \times 100 = 15\% \text{ (w/w)}$$

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (\%)} = \frac{3 \text{ kg} - 2.2 \text{ kg}}{4 \text{ kg}} \times 100 = 20\% \text{ (w/w)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลของคราบน้ำมันที่เหลือจากการทดลอง แบ่งข้อมูลเป็นชุดข้อมูลทั้งหมด 2 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 ใช้สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง (2 ชั่วโมงในแต่ละระดับอุณหภูมิ) แสดงในตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 มวลของคราบน้ำมันที่เหลือใช้สำหรับการพัฒนาแบบจำลอง

อุณหภูมิพื้นผิวร้อน	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	มวลคราบของน้ำมันที่เหลือ
°C	%	g
65	15	0.542
		0.527
70	15	1.602
		1.741
75	15	3.770
		4.243
80	15	5.018
		6.223
85	15	6.799
		7.741
65	20	0.765
		0.965
70	20	1.953
		2.285
75	20	4.243
		4.965
80	20	6.068
		7.160
85	20	7.818
		8.474

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดที่ 2 เพื่อนำไปทดสอบความแม่นยำของสร้างแบบจำลอง (อีก 2 ชุดที่เหลือในแต่ละระดับอุณหภูมิ) แสดงในตารางที่ ค.3

ตาราง ค.3 มวลของคราบน้ำถั่วเหลืองใช้ทดสอบความแม่นยำของสร้างแบบจำลอง

อุณหภูมิพื้นผิวร้อน	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	มวลคราบของน้ำถั่วเหลือง
°C	%	g
65	15	0.556
		0.534
70	15	1.655
		1.629
75	15	4.045
		4.129
80	15	5.185
		5.767
85	15	7.521
		7.075
65	20	0.769
		0.882
70	20	2.162
		2.168
75	20	4.449
		4.650
80	20	6.666
		6.620
85	20	8.234
		7.694

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลของอุปกรณ์

ตาราง ค.4 มวลของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

หมายเลขแผ่นทดลอง	มวล (g)
1	67.266
2	67.599
3	67.901
4	66.659
5	66.471
6	67.157
7	66.430

ตาราง ค.5 มวลของแผ่นแผ่นสแตนเลสบางที่ใช้หาความหนาแน่นของคราบน้ำแก้วเหลือง

การทดลองที่	มวล (g)
1	0.196
2	0.192
3	0.195

ตาราง ค.6 มวลของกระป๋องอลูมิเนียมพร้อมปิดฝาที่ใช้หาความชื้นของคราบ

กระป๋องอลูมิเนียม	มวล (g)
1	14.960
2	15.344
3	15.518

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง
สมบัติของคราบน้ำัก้วเหลียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง.1 ความหนาแน่นของคราบน้ำแก้วเหลือง

ลำดับ แผ่น	มวลของคราบตัวอย่าง		ปริมาตรของคราบ ตัวอย่างเฉลี่ย ($\times 10^{-9} \text{ m}^3$)	ความหนาแน่น (kgm^{-3})
	เฉลี่ย (g)	รัศมี (m)		
2	0.0101	0.004	9.9289	1017.2238
3	0.0105	0.0039	9.7807	1073.5326
4	0.0102	0.0039	9.8547	1035.0388
2	0.0078	0.0036	7.5402	1034.4544
3	0.0080	0.0036	7.6648	1043.7276
4	0.0079	0.0036	7.7908	1014.0126
2	0.0069	0.0035	6.6482	1037.8637
3	0.0068	0.0035	6.7628	1005.4866
4	0.0070	0.0034	6.5914	1061.9819
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1036

ตาราง ง.2 ปริมาณความชื้นของคราบน้ำแก้วเหลือง

ตัวอย่าง ที่	น้ำหนักตัวอย่างคราบก่อนอบ		น้ำหนักตัวอย่างคราบหลังอบ		ปริมาณความชื้น (%)
	(g)	(g)	(g)	(g)	
1	0.122	0.034			65.164
2	0.150	0.051			61.333
3	0.138	0.035			69.203
ปริมาณความชื้นเฉลี่ย					65.233

ค่าการนำความร้อนของคราบจากน้ำแก้วเหลืองคำนวณได้ดังนี้

$$k_f = (-0.2125) + (7.08 \times 10^{-3} \cdot 65) = 0.248 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ
การวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดคราบทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของ $\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	131.354	4	32.838	174.8	<.001
Within Groups	2.818	15	0.188		
Total	134.172	19			

ตารางที่ จ.2 การทดสอบความแตกต่างของ $\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$

$\pi_2 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$	N	Subset for alpha = 0.01				
		1	2	3	4	5
1	4	0.683				
2	4		1.903			
3	4			4.318		
4	4				6.060	
5	4					7.631

ตารางที่ จ.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของ $\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	116.997	5	23.399	19.074	<.001
Within Groups	17.175	14	1.227		
Total	134.172	9			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.4 การทดสอบความแตกต่างของ $\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$

$\pi_3 = \frac{\rho v 2b}{\mu}$	N	Subset for alpha = 0.01		
		1	2	3
1.0273	2	0.545		
1.0252	2	0.8255		
1.0253	4	2.8645	2.8645	
1.0235	4	3.3573	3.3573	
1.0238	4		6.387	6.387
1.0222	4			7.304

ตารางที่ จ.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของกลุ่มตัวแปร $\pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	121.912	4	30.478	286.917	<.001
Within Groups	1.593	15	0.106		
Total	123.505	19			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.4 การทดสอบความแตกต่างของ $\pi_4 = \frac{C_p \cdot (T_s - T_{po})}{v^2}$

$\pi_4 = \frac{C_p}{v^2 \cdot (T_s - T_{po})}$	N	Subset for alpha = 0.01						
		1	2	3	4	5	6	7
552.55	2	0.545						
610.67	2	0.825	0.825					
672.56	2		1.642	1.642				
743.30	2			2.165				
783.33	2				4.0870			
865.72	2				4.549	4.549		
887.24	2					5.476		
980.56	2						6.643	
985.78	2						7.298	7.298
1089.46	2							7.964

ตารางที่ จ.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของ $\pi_5 = \%TIS$

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.298	1	2.298	0.214	0.649
Within Groups	193.142	18	10.730		
Total	195.441	19			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของมวลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ปริมาณของแข็ง 15%

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	133.725	9	14.858	332.857	<.001
Within Groups	0.446	10	0.045		
Total	134.172	19			

ตารางที่ จ.8 การทดสอบความแตกต่างของมวลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ปริมาณของแข็ง 15%

Surface temperature		Subset for alpha = 0.01				
(°C)	N	1	2	3	4	5
65	4	0.539				
70	4		1.657			
75	4			4.047		
80	4				5.548	
85	4					7.284

ตารางที่ จ.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของมวลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ปริมาณของแข็ง 20%

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	144.316	4	36.079	397.572	<.001
Within Groups	1.361	15	0.091		
Total	145.677	19			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.10 การทดสอบความแตกต่างของมวลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ปริมาณของแข็ง 20%

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.01				
		1	2	3	4	5
65	4	0.845				
70	4		2.142			
75	4			4.577		
80	4				6.629	
85	4					8.055

ตารางที่ จ.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัยของความหนืด ที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ ที่ปริมาณของแข็ง 15% และ 20% (w/w)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Intercept	0.004	1	0.004	2978.2744	<.001
ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในน้ำแก้วเหลือง	0.000067	1	0.000067	50.3180	<.001
อุณหภูมิพื้นผิวร้อน	0.001	3	0.000175	131.3850	<.001

ตารางที่ จ.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัยของความหนาแน่น ที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ ที่ปริมาณของแข็ง 15% และ 20% (w/w)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Intercept	26759694.839	1	26759694.839	10871829.583	<.001
ปริมาณของแข็ง ทั้งหมดในน้ำแก้วเหลือง	2800.872	1	2800.872	1137.928	<.001
อุณหภูมิพื้นผิวร้อน	18.202	3	6.067	2.465	0.100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของความต้านทานความร้อนของคราบน้ำถั่วเหลืองกับอุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.000014	4	0.000003	62.664	<.001
Within Groups	2.75×10^{-7}	5	5.5×10^{-8}		
Total	0.000014	9			

ตารางที่ จ.14 การทดสอบความแตกต่างของมวลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ปริมาณของแข็ง 15%

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.01			
		1	2	3	4
65	2	0.0003			
70	2	0.0010	0.0010		
75	2		0.0019	0.0019	
80	2			0.0027	0.0027
85	2				0.0036

ตารางที่ จ.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของความต้านทานความร้อนของคราบน้ำถั่วเหลืองกับปริมาณของแข็งทั้งหมดต่าง ๆ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.25×10^{-7}	1	2.25×10^{-7}	0.130	0.728
Within Groups	0.000014	8	0.000002		
Total	0.000014	9			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ภาคผนวก ฉ
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Article

Development of Mathematical Model to Predict Soymilk Fouling Deposit Mass on Heat Transfer Surfaces Using Dimensional Analysis

Eakasit Sritham¹, Navaphattra Nunak^{1,*}, Ekarin Ongwongsakul¹, Jedsada Chaishome¹, Gerhard Schleinig² and Taweepol Suesut¹

¹ School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand; eakasit.sr@kmitl.ac.th (E.S.); 65016105@kmitl.ac.th (E.O.); jedsada.ch@kmitl.ac.th (J.C.); taweepol.su@kmitl.ac.th (T.S.)

² Department of Food Science and Technology, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU), 1190 Vienna, Austria; gerhard.schleinig@boku.ac.at

* Correspondence: navaphattra.nu@kmitl.ac.th

Abstract: The formation of fouling deposits on heat exchanger surfaces is one of the major concerns in thermal processes. The fouling behavior of food materials is complex, and its mechanism remains, in general, unclear. This study was aimed at developing a predictive model for soymilk fouling deposit formed on heated surfaces using dimensional analysis. Relevant variables affecting fouling deposit mass could be grouped into six dimensionless terms using Buckingham's pi-theorem. Experimental data were obtained from a lab-scale plate heat exchanger. A simple model developed using the experimental data under the process conditions with the product inlet temperature, the product outlet temperature, and plate surface temperature in the ranges of 50–55 °C, 65–70 °C, and 70–85 °C, respectively, exhibited a good performance in the prediction of soymilk fouled mass. The correlation coefficient between the predicted and experimental values of fouled mass was 0.97 with an average relative error of 9.03%. Within the ranges of product inlet temperature and plate surfaces temperature studied, this model offers an opportunity to estimate soymilk fouling mass with acceptable accuracy.

Keywords: fouling; soymilk deposit; dimensional analysis; fouling mass model



Citation: Sritham, E.; Nunak, N.; Ongwongsakul, E.; Chaishome, J.; Schleinig, G.; Suesut, T. Development of Mathematical Model to Predict Soymilk Fouling Deposit Mass on Heat Transfer Surfaces Using Dimensional Analysis. *Computation* **2023**, *11*, 83. <https://doi.org/10.3390/computation11040083>

Academic Editor: Ali Cemal Benim

Received: 9 March 2023

Revised: 12 April 2023

Accepted: 13 April 2023

Published: 18 April 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Pasteurization with a plate heat exchanger (PHE) is commonly used in the dairy milk and plant-based milk industry to ensure product safety, quality, and extending product shelf life [1]. In addition, heating could also eliminate off-flavors of plant-based milk products such as soymilk [2,3], oat milk, almond milk, and other milk produced from several varieties of nuts. During thermal processing, protein in milk products tend to denature, aggregate, or interact with other components, leading to deposit formation on contact surfaces [4]. The fouling formation within the range of pasteurization temperature from 75 to 100 °C contains mainly protein denaturation, which is a combined effect of unfolding and aggregation phenomena [5]. The protein denaturation could generate on the heat exchanger surface and build up deposits. Deposit formation, also known as fouling, is a severe problem in industrial processes including food processing plants as it can decrease the efficiency of heat exchangers [6] and increase the pressure drop in the system. Once the fouling occurs, the production line needs to be stopped for cleaning to recover the initial operating condition.

The fouling behavior of protein in milk during thermal processing is highly complex [7]; there are many variables affecting the fouling of protein on heating surfaces. These variables can be divided into three main groups, namely product variables (e.g., concentration [8–10], protein type [11], protein reactivity, denaturation, aggregation, and

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

deposition temperatures [12,13], physiological, thermal, and rheological properties [9]), process variables (e.g., flow velocity, inlet and outlet temperatures of product heating medium or surface temperature, and processing time [8,9,14]), and PHE configuration or equipment design variables (e.g., plate surface area and space between two plates [9]). Temperature is a key factor that strongly affects the thermal denaturation of protein leading to deposition of the protein on contact surface or fouling [11,13,15]. Belmar-Beiny et al. [14] have reported a nonlinear relationship between protein deposit mass formed on contact surface and temperature. Protein fouling behavior is complex, and the development of theoretical basis prediction model of this behavior requires thorough understanding of its mechanisms. For decades, a number of researchers have studied and tried to develop fouling models. Pan et al. [11] applied two-dimensional computational fluid dynamics (2D-CFD) incorporated with bulk and surface reaction kinetics for β -lactoglobulin (β -lg) and momentum, mass, and heat transfers to develop a predictive model for dairy milk fouling. The investigation using the obtained model revealed a two-stage growth behavior of fouling deposit layer on the contact surface of heat exchanger over the heating period. Indumathy et al. [16] proposed a one-dimensional fouling dynamic model of a high-temperature–short-time pasteurization process (HTST), called a plant model, to simulate temperature profiles at the exit of pasteurization process. This model was developed using the conservation of mass and energy principles together with the protein fouling model and validated with experimental data collected from the plant. Model improvement was then made with the log-mean-temperature-difference (LMTD) approach. This dynamic plant model could be used to simulate the outlet temperature of milk at the heating section, which is closely related to the formation of protein fouling layer. The outlet temperature of milk was used as a key parameter to control the inlet temperature of heating medium. However, the robustness of CFD and theoretical models are generally limited by a number of model assumptions and appropriate boundary conditions are difficult to assign. Moreover, the coupling of relevant fundamental transport equations and the physical, chemical, or biological kinetics is complex [17,18], which makes it difficult to interpret.

Fryer et al. [8] developed a statistical model using multiple linear regression (MLR) to correlate the data—e.g., inlet protein concentration, product flow rate, the temperature difference across the test section, and the amount of protein reacted. It was found that kinetics of denaturation and aggregation of whey protein solution within an ultra-high-temperature (UHT) process could be related to the degree of fouling and could be used to predict the heat transfer coefficients of heat exchangers. The ability of statistical models to predict a target variable depends on the size of data; a large number of experiments are generally required for the development of reliable models. Collecting such a great deal of data could consume a huge amount of resources—e.g., time, cleaning agent, electricity, energy, and raw material [18]. While the development of CFD, theoretical, and statistical models involves various limitations, a dimensional analysis (DA) technique can be used to establish a model without in-depth knowledge of the process studied. By the application of DA, several dimensional variables can be grouped into fewer dimensionless numbers. Not only can the DA help reducing the number of model parameters and complexity, but the number of experiments can be minimized [9,18]. Nowadays, DA is commonly used to develop the model for prediction of fouling deposit mass on heat transfer surfaces, especially in a case where reaction kinetics plays major role in the fouling mechanism. Petit et al. [12] applied the DA to identify the process relationships among β -lg denaturation level, aggregate size, fouling mass, inlet temperature and reactivities of β -lg concentrate, and hot water inlet temperature. It was found that the Arrhenius exponential factor of β -lg of unfolding reaction could be used to describe the denaturation, aggregation, fouling mechanism and used to be the guideline for controlling β -lg aggregation and fouling during heat treatments. Gu et al. [9] applied the DA technique by taking into account the composition and physicochemical properties, and the temperature of whey protein solutions to develop a predictive model for whey protein fouling mass in a PHE during thermal treatment. It was found that the obtained simple model helped to gain a better

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และอาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหาโดยไม่ต้องแจ้งให้ทราบล่วงหน้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

understanding of the fouling developed in the PHE within the parameter ranges studied, which would otherwise have a large number of variables and require deep knowledge of reaction kinetics. In another study by Georgiadis et al. [19], the authors developed a model using the 2D-CFD to predict the fouling behavior of dairy milk within the PHE. Though the model could describe thermal and hydraulic performances, prediction of fouling mass was limited due to the declaration of assumptions and the difficulty to identify the parameters used for the models. Alhuthali et al. [10] recently proposed a technique to expand the applicable range of theoretical-based models for capturing the fouling growth of whey protein using the DA. The adjusted fouling model showed the capability of the total mass and the deposit mass per channel for a wider range of product and process conditions even with a limited amount of experimental data used for the development.

It can be clearly seen in the literature that the temperatures of product and contact surface are highly influential variables that affect milk protein unfolding and deposition on hot surfaces. Nowadays, plant-based milk has gained popularity in consumer markets worldwide. This has brought about the need for research in a multitude of aspects to support the growth of the plant-based milk industry. The cleaning of processing lines could take up a large part of production costs as it involves time, cleaning agents, and other process utilities. Consequently, process efficiency may be improved by optimizing the cleaning protocol. An effective cleaning protocol requires a thorough understanding of the fouling behavior of the product. In addition, knowledge about fouling behavior would be also beneficial to PHE manufacturers. A better understanding of the behavior of fouling process may be gained through the study of fouling models.

Among a variety of plant-based milk products, soymilk has long stood out as one of the most favorable beverages. However, information about the thermal denaturation of proteins in soymilk is still very limited, making it difficult to develop an applicable prediction model for fouling behavior based on theoretical or statistical approaches. This study aimed to apply the DA technique to develop dimensionless groups among relevant variables of fouling and obtain a simple model for the prediction of soymilk fouling deposit mass formed on contact surfaces of PHE in the pasteurization temperature range.

2. Materials and Methods

2.1. Sample Preparation

Soymilk samples were freshly prepared before performing the experiments. Each sample was made with 1000 g of soybeans. The beans were washed, soaked in distilled water for 12 h at room temperature (25 ± 2 °C), drained, and rinsed. The beans were then ground at room temperature using a soymilk grinder, and distilled water was continually added during grinding. Soybean residue was automatically separated from raw soymilk. The total solid of raw soymilk samples was approximately 15% (*w/w*).

2.2. Experimental Set-Up

A laboratory-scale high-temperature, short-time (HTST) pasteurizer (FT75 Laboratory Pasteuriser, Armfield, UK) with some modifications was used in this study. Heat treatment was made in the heat exchanger section of the pasteurizer. The modification was made on the sample and water feeding system. A schematic diagram of the experimental set-up is given in Figure 1, a holding tank, two 22 L water baths (Mettert, Germany, an accuracy of ± 0.3 °C), two pumps, fluid supply lines, and a temperature-control sub-system. The heating section consisted of 7 corrugated heat transfer plates made from stainless steel of approximately 0.1 mm thickness. The plates were arranged for the countercurrent flow of two fluids in one channel-per-pass. The projected area of each corrugated heat transfer plate (S_0) was 86.3 cm^2 ($L_w \times L_h$; 75 mm \times 115 mm) and total heat exchanging projected surface area (S_{exch}) was 431.5 cm^2 . The average space between 2 plates (b) is 3 mm. Hot water was used as a heating medium. A holding tank contained 8 L of soymilk sample. Thermocouple sensors (K-type) were installed in storage tanks and a holding tank to record and monitor the inlet and outlet temperatures of water and soymilk every 30 s during the

exchanging projected surface area (S_{exch}) was 431.5 cm². The average space between plates (b) is 3 mm. Hot water was used as a heating medium. A holding tank contained 40 L of soy milk sample. Thermocouple sensors (K-type) were installed in both tanks. In a holding tank to record and monitor the inlet and outlet temperatures of water and soy milk every 30 s during the experiments. Heat loss from the system was neglected. In the flowing fluid system was neglected and so the flowing fluid system was assumed to be isothermal.

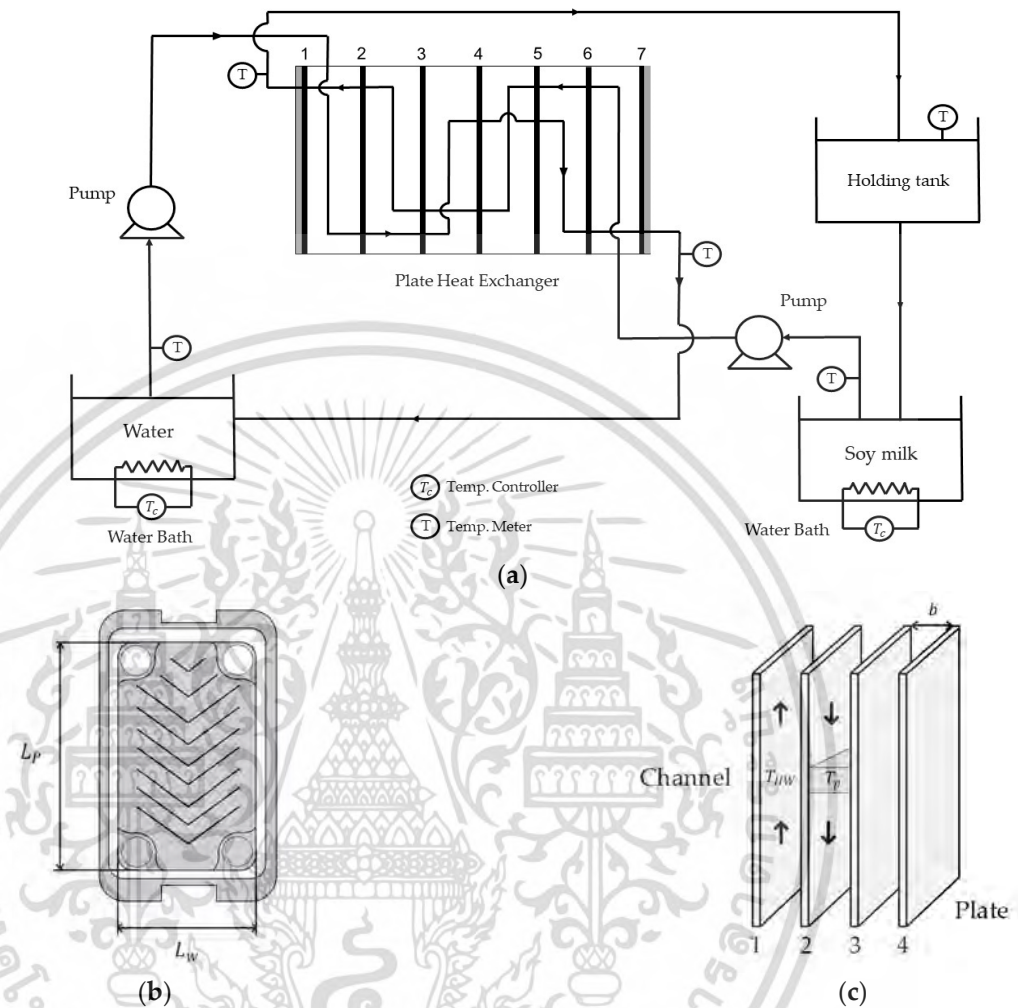


Figure 1. (a) Schematic diagram of the fouling test apparatus; (b) dimension of heat exchanger plate; (c) product (downward arrow) and heating medium (upward arrow) flow directions.

2.3. Fouling Experiments

The effect of fouling surface temperature (T_s) was studied in a range of 65–85 °C. The T_s was controlled by recirculating hot water through the PHE at a constant velocity of 0.408 m s⁻¹. The T_s was found to be in a range of ±1.5 °C from hot water temperature. A water bath with temperature control unit was used to preheat soy milk from room temperature to 45 °C. Soy milk was circulated through the pasteurizer using a peristaltic pump to achieve the desired inlet temperature (T_{pi}) of 50 °C and 55 °C after which the production run time was started. The density (ρ) and dynamic viscosity (μ) of soy milk at an average temperature of 65 °C were 1045 kg m⁻³ [20] and 0.038 kg m⁻¹ s⁻¹ [21], respectively. The velocity of soy milk in the channel of heat exchanger (v) was kept constant at 0.048 m s⁻¹, which corresponded to the Reynolds numbers (Re) of 7.92, indicating the laminar flow regime. In each fouling experiment, soy milk was recirculated through the experimental setup for approximately 70 min. The fouling deposit mass was assumed to form on the heating surface after the first 10 min. Therefore, the heating time (t) for each test run was 60 min.

After finishing each test run, the plates of heat exchanger were dismantled from the frame and put on a table in an inclined position of 30 degrees at ambient temperature for 5 min. Then, individual fouled plates were weighed with a digital balance (Vibra-AB323, Shinko Denshi, China, a resolution of 0.001 g, and an accuracy of ±0.003 g). The fouling

deposit mass (m_f) was then calculated by subtracting the mass of fouled plat with that of dry-cleaned plate. The deposit mass formed on the 7th plate was the fouling of unheated surface by soymilk. Therefore, total fouling deposit mass was collected from the 2nd to 6th plates.

2.4. Dimensional Analysis of Fouling Deposit Mass

The general scheme of dimensional analysis (DA) includes listing the related physical variables, constructing, and rearranging dimensionless numbers, and analyzing the process relationships. In this study, there were nine variables, with four fundamental dimensions, namely mass (M), length (L), time (T), and temperature (K), which affected the fouling deposit mass formed on the PHE—the target variable. It should be noted that deep understanding of the mechanisms and reaction kinetics of the fouling was not applied here. That means DA allows the development of a simple prediction model without in-depth knowledge about fouling phenomenon. The chosen variables (given in Table 1) were only practical product, process, and design parameters.

Table 1. Selected variables for the DA of soymilk fouling deposit mass in the PHE.

Type of Variable	Symbol	Variable Name	Unit	Dimension
Target variable	m_f	Fouling mass	kg	M^1
Physical variables Product	ρ	Density of product ¹	$kg\ m^{-3}$	M^1L^{-3}
	μ	Dynamic viscosity of product ¹	$kg\ m^{-1}s^{-1}$	$ML^{-1}T^{-1}$
Process	$T_s - T_{po}$	The difference of surface temperature and the product outlet temperature	K	K^1
	v	Velocity of product ¹	ms^{-1}	LT^{-1}
	$\Delta T_p = T_{po} - T_{pi}$	The difference of inlet and outlet temperatures of product	K	K^1
	t	Heating time ¹	s	T^1
Design	D_h	Hydraulic diameter ¹	m	L
	S_{exch}	Total heat exchanging projected surface area ¹	m^2	L^2
	S_0	Projected surface area per plate ¹	m^2	L^2

¹ Fixed variables as explained in Sections 2.2 and 2.3.

The dimensional matrix of all variables and their dimensions is presented in Table 2. The Vaschy–Buckingham theorem (π -theorem) was applied to a set of physical variables to determine the maximum dimensionless numbers. All physical variables were divided into a set of non-repeated variables and a set of repeated variables. The repeated variables must be selected so that their dimensions are independent and cover all the fundamental dimensions of all relevant physical variables. Accordingly, the number of repeated variables shall be equal to the number of fundamental dimensions [18]. Therefore, in this study, four variables including the hydraulic diameter of a flow channel (D_h), the velocity of soymilk (v), the density of soymilk (ρ), and the difference between surface temperature and the product outlet temperature ($T_s - T_{po}$), were chosen as the repeated variables.

Table 2. Dimensional matrix of target and physical variables.

	m_f	t	ΔT_p	μ	S_0	S_{exch}	D_h	v	ρ	$T_s - T_{po}$
K	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
M	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
L	0	0	0	-1	2	2	1	1	-3	0
T	0	1	0	-1	0	0	0	-1	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Following Buckingham’s pi-theorem, the ten variables—target and physical variables—were grouped into six dimensionless numbers by subtracting the number of variables (10 variables) with the fundamental dimensions (4 dimensions) as given in Equation (1).

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) \tag{1}$$

The dependent π term (π_1), fouling deposit mass, can be expressed as a function of dimensionless groups as given in Equation (2).

$$\pi_1 = \frac{m_f}{D_h^3 \rho} = f\left(\pi_2 = \frac{tv}{D_h}, \pi_3 = \frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}, \pi_4 = \frac{\mu}{\rho v D_h}, \pi_5 = \frac{S_0}{D_h^2}, \pi_6 = \frac{S_{exch}}{D_h^2}\right) \tag{2}$$

The term π_4 was then rearranged by multiplying the exponent with -1 , yielding the π_4' known as Reynolds number as presented in Equation (3).

$$\pi_4' = \frac{\rho v D_h}{\mu} = Re \tag{3}$$

Since D_h is twice the size of the average space between two plates (b), Equation (3) will be rewritten as given in Equation (4).

$$Re = \frac{\rho v 2b}{\mu} \tag{4}$$

The dimensionless numbers for predicting the fouling deposit mass of soymilk are described as follows:

- (1) π_1 relates to the total fouling deposit mass formed on PHE, density of product, and the hydraulic diameter of the plate;
- (2) π_2 relates to the duration that the product contacts with the heated plate;
- (3) π_3 is the ratio of the difference of product outlet and inlet temperatures to the difference of surface and product outlet temperatures;
- (4) π_4' is Reynolds number;
- (5) π_5 is the ratio of the projected surface area per plate to the hydraulic diameter of the plate;
- (6) π_6 is the ratio of the total heat exchanging projected surface area to the hydraulic diameter of the flow channel.

2.5. Statistical Analysis

The fouling experiments (54 runs) were conducted using the completely randomized design (CRD) by considering the dimensionless numbers (π terms) as experimental variables. Experimental data were equally divided into two parts. The first part one was used for model development, and another part was used for model validation. Nonlinear regression was carried out with a statistical package (IBM SPSS Statistics V.28). All statistical analyses were made at 0.05 level of significance.

3. Results and Discussion

3.1. Predictive Model for Soymilk Fouling Deposit Mass on Heated Surface

The development of a predictive model in this study provided relationships among relevant variables in terms of six dimensionless numbers that could be beneficial for further study. Since the temperatures of product and heated surface are the most influential factors, the process in this experiment was performed so that the terms $\pi_2 = \frac{tv}{D_h}$, $\pi_4 = Re$, $\pi_5 = \frac{S_0}{D_h^2}$, and $\pi_6 = \frac{S_{exch}}{D_h^2}$ were kept constant at 28,800, 7.92, 238.88, and 1198.61, respectively. The configuration of the system and operating conditions are shown in Figure 2. As the terms $\pi_2, \pi_4, \pi_5,$ and π_6 were fixed, the model could be further simplified by bundling those fixed terms into a single constant term. That said, the configuration of the system was reduced from six to one internal measure. The effect of product and surface temperatures

The development of a predictive model in this study provided relationships among relevant variables in terms of six dimensionless numbers that could be beneficial for further study. Since the temperatures of product and heated surface are the most influential factors, the process in this experiment was performed so that the terms $\pi_2 = \frac{tv}{D_h}$, $\pi_4 = Re$, $\pi_5 = \frac{S_0}{D_h^2}$, and $\pi_6 = \frac{S_{exch}}{D_h^2}$ were kept constant at 28,800, 7.92, 238.88, and 1198.617 respectively. The configuration of the system and operating conditions are shown in Figure 2. As the terms π_2, π_4, π_5 , and π_6 were fixed, the model could be further simplified by bundling those fixed terms into a single constant term. That said, the configuration of the system was simplified to the form of one internal measure. The effect of product and surface temperatures on the fouling mass was inferred from π_3 . Therefore, the predictive model in Equation (2) was simplified to the form given in Equation (5).

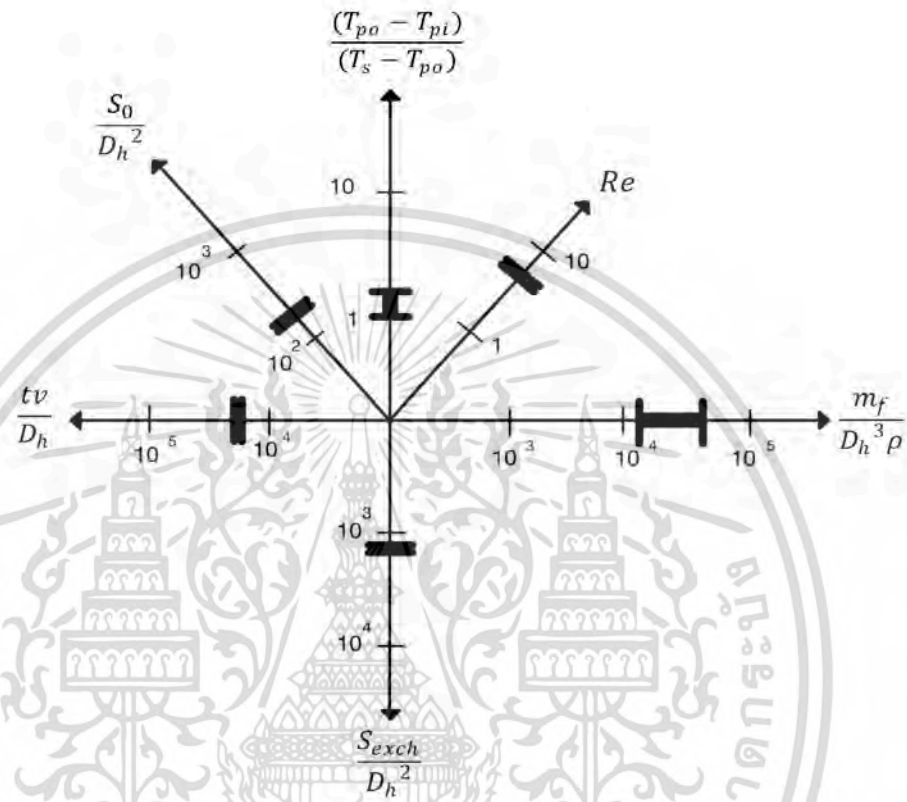
$$\frac{m_f}{D_h^3 \rho} = f\left(\frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}\right) \quad (5)$$


Figure 2. The configuration of the system and operating conditions with six internal measures. Black bars with initials at each end are the range of operating points used by each of the parameters individually.

The fouling model to predict the deposit mass of soymilk formed on hot surfaces was developed from the experimental data in the range of $8464.32 \leq \pi_1 \leq 53,504.34$ and $1.35 \leq \pi_3 \leq 3.21$. The term of π_3 was varied by changing the inlet temperature of heating medium and soymilk. Experimental temperature setting and the corresponding product outlet temperature are given in Table 3.

The fouling model to predict the deposit mass of soymilk formed on hot surfaces was developed from the experimental data in the range of $8464.32 \leq \pi_1 \leq 53,504.34$ and $1.35 \leq \pi_3 \leq 3.21$. The term of π_3 was varied by changing the inlet temperature of heating medium and soymilk. Experimental temperature setting and the corresponding product outlet temperature are given in Table 3.

Product Inlet Temperature (T_{pi} , °C)	Surface Temperature (T_s , °C)	Product Outlet Temperature (T_{por} , °C)
50	65	60.43 ± 0.34
50	70	65.67 ± 0.21
50	75	67.07 ± 0.46
50	80	70.24 ± 0.05
55	65	61.62 ± 0.28
55	70	66.85 ± 0.15
55	75	69.29 ± 0.24
55	80	70.73 ± 0.68
55	85	72.25 ± 0.11

Data are means ± SD (n = 3).

Total accumulated mass was collected from the second to sixth plates within 1 h after the surface and product inlet temperatures reached the designed levels. Experimental data

Data are means ± SD (n = 3).

Total accumulated mass was collected from the second to sixth plates within 1 h after the surface and product inlet temperatures reached the designed levels. Experimental data on fouling mass as a function of temperature ratio (π_3) are given in Figure 3. It was found that at the surface temperature (T_s) of 65 °C and product inlet temperature (T_{pi}) of 50 °C and 55 °C the fouling mass as a function of temperature ratio (π_3) was approximately 6.16 g and 5.16 g, respectively. The fouling mass at the surface temperature of 50 °C and product inlet temperature of 65 °C was 1.22 g and 1.22 g, respectively. These conditions corresponded to the π_3 term of 2.23 and 2.31, respectively. Close inspection on heated plates revealed that there was only a thin layer of fouling mass present on the surface. The total fouling mass was only a thin layer of fouling mass present on the surface with conditions of approximately 1.19 g. On the other hand, in the range of 2.23–2.31, the fouling mass was higher (5.77–7.0 g), considerably larger than the product fouling mass (1.0–1.3 g) even higher (6.7–7.0 g), considerably larger than the product fouling mass (1.0–1.3 g), was observed. We do not consider the data in Figure 3, except of the fouling conditions data in red, which were excluded from the model development. The fouling mass data in red were excluded from the model development. The fouling mass data in red were excluded from the model development. The fouling mass data in red were excluded from the model development.

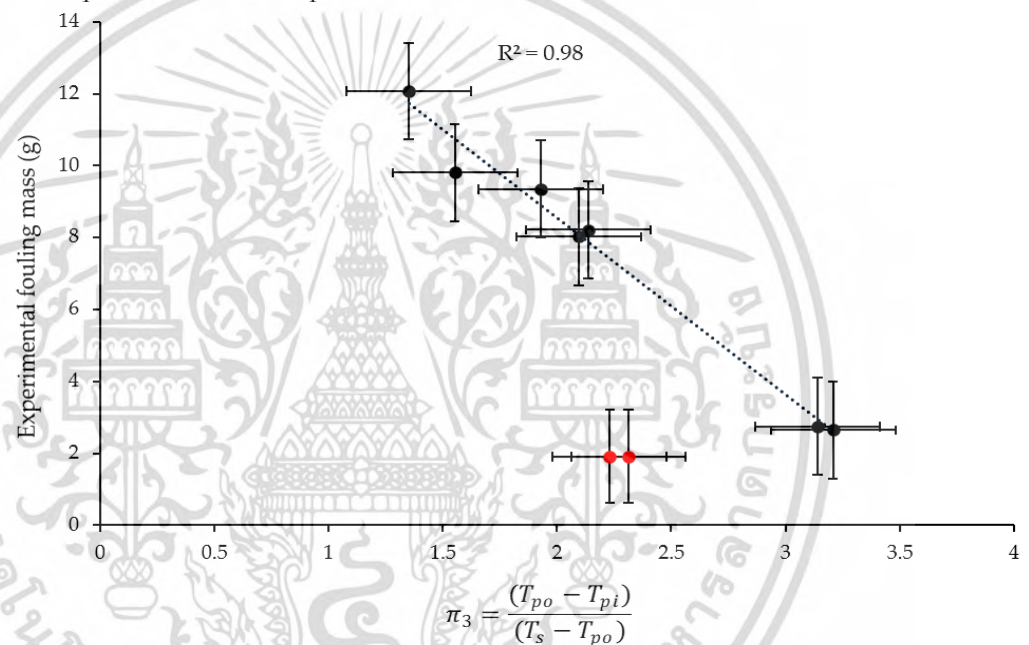


Figure 3. The evolution of total soy milk fouling mass formed on heat exchanger plates at various dimensionless process parameters. Data are means and error bars are standard deviation (n = 3). A regression line was obtained with the data marked in black. Operating conditions corresponding to the data marked in red were excluded from the model development.

It was observed that, in general, m_f was dependent on product inlet and surface temperatures, as could be clearly observed from the trend in Figure 3, where m_f tends to decrease linearly with π_3 . The term in the left-hand side of Equation (5) could be written as $m_f = \pi_1 (D_h^3 \rho)$. Since D_h and density were treated as constants, it could be inferred from Figure 3 that π_1 highly correlated with π_3 ($r^2 = 0.98$).

The relationship among process parameters in terms of π_1 and π_3 was then analyzed from the data obtained from the experimental conditions with $50 \text{ °C} \leq T_{pi} \leq 55 \text{ °C}$ and $70 \text{ °C} \leq T_s \leq 85 \text{ °C}$ allowing the product outlet temperature to fall to the range of 65 °C to 70 °C. These experimental conditions corresponded to the range of π_3 values from 1.35 to 3.21, and the obtained π_1 ranged from 11,719.53 to 53,504.34. Then, the process relationship was statistically analyzed using nonlinear regression yielding the model parameter values shown in Table 4.

Table 4. Results of nonlinear regression analysis for the fouling deposit mass.

π_3	Exponent	Standard Error	p-Value
$\frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})}$	0.053	0.208	<0.001

The resulting predictive model of soymilk fouling deposit mass as a function of the product inlet and outlet temperatures, and the heated surface temperature is presented in Equations (6) and (7).

$$\pi_1 = \left[-827,413.79 \cdot (\pi_3)^{0.053} \right] + 891,754.96 \tag{6}$$

$$m_f = \left[-186.76 \cdot \left(\frac{(T_{po} - T_{pi})}{(T_s - T_{po})} \right)^{0.053} \right] + 201.29 \tag{7}$$

3.2. Effect of Temperature

The effects of heat exchanger surface temperature and the product inlet temperature on soymilk fouling deposits that occurred during the thermal processing were investigated. Under the temperature conditions applied in this study, the effect of fouling surface temperature was evaluated at five different levels of temperature including 65, 70, 75, 80, and 85 °C and product inlet temperatures of 50 and 55 °C. Figure 4 shows images of wet soymilk fouling formed on the heat exchanger plates after 60 min at different temperature conditions. The higher the temperatures of the heated surface and of the inlet soymilk, the higher the amount of soymilk deposit developed on the plates.



Figure 4. Typical images of soymilk fouling deposit mass on the 2nd plate after 60 min at different experimental conditions. (a) $T_{pi} = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s = 65\text{ }^\circ\text{C}$. (b) $T_{pi} = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s = 70\text{ }^\circ\text{C}$. (c) $T_{pi} = 50\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s = 75\text{ }^\circ\text{C}$. (d) $T_{pi} = 55\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s = 80\text{ }^\circ\text{C}$. (e) $T_{pi} = 55\text{ }^\circ\text{C}$, $T_s = 85\text{ }^\circ\text{C}$.

3.3. Prediction Performance of the Developed Model

The predicted total mass of wet soymilk deposits formed on the heat exchanger plates was calculated from the term π_1 which is the response of the model (Equations (6) and (7)), within a range of $11,719.53 \leq \pi_1 \leq .34$ and $1.35 \leq \pi_3 \leq 3.21$. The plot between the predicted and experimental values is given in Figure 5. Even though this model was de-

The fouling mass tended to increase with the increasing surface temperature. The dramatic increase in fouling mass was observed when the surface temperature was higher than 75 °C at a soymilk inlet temperature of 55 °C. At these temperature conditions, the proteins in soymilk would have already denatured and formed a fouling deposit mass on the surface. Iwabuchi and Yamauchi [23,24] have reported that during the thermal processing of soymilk, β -conglycinin and glycinin, which are the two major components of soy proteins and sensitive to heat treatment, may affect the thermal efficiency of the heat exchanger and play an important role in the formation of fouling deposit. At a temperature above 65 °C, β -conglycinin begins to denature and interact with other proteins to form deposits on a surface. At higher temperatures (above approximately 80 °C), glycinin plays a major role in soymilk deposition [25,26]. Qingjun et al. [27] studied the fouling behavior of soymilk in plate heat exchanger at different inlet temperatures (30, 50, and 70 °C) and found that the fouling factor of soymilk increased with the increasing product inlet temperature. The soymilk fouling mass increased at every increment of soymilk inlet temperature. These fouling characteristics were in good agreement with those reported by Wang et al. [15], Zhang and Xu [28], and Chen and Bala [29] who studied the fouling deposit behavior of soymilk, camel milk, and dairy milk, respectively.

3.3. Prediction Performance of the Developed Model

The predicted total mass of wet soymilk deposits formed on the heat exchanger plates was calculated from the term π_1 which is the response of the model (Equations (6) and (7)), within a range of $11,719.53 \leq \pi_1 \leq 0.34$ and $1.35 \leq \pi_3 \leq 3.21$. The plot between the predicted and experimental values is given in Figure 5. Even though this model was developed using limited number of experimental data, it can be seen that the predicted values were in good agreement with the experimental values of soymilk fouling deposit mass with a correlation coefficient (r) of 0.97. Figure 6 shows the relative error of the predictions, which were within 9.50% with a mean relative error of 9.03%; this level of relative error was considerably low compared to the literature values [10,12]. The findings provided an opportunity to estimate fouling mass using the model developed with DA approach. The robustness of this model may be improved and verified with experimental data from further studies carried out under slightly different experimental conditions, e.g., design of heating plate, physical properties of soymilk.

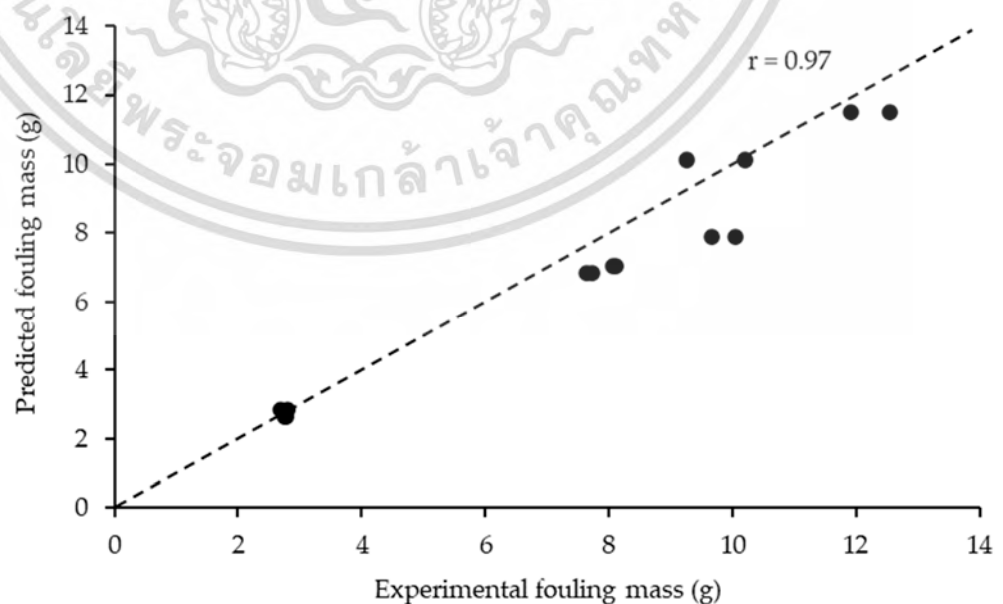


Figure 5. Comparison of predicted and experimental fouling deposit mass of soymilk formed on the heat exchanger plates. Experimental values were obtained with $50\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{pi} \leq 55\text{ }^\circ\text{C}$, $70\text{ }^\circ\text{C} \leq T_s \leq 85\text{ }^\circ\text{C}$, and $65\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{po} \leq 70\text{ }^\circ\text{C}$.

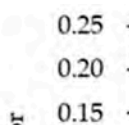


Figure 5. Comparison of predicted and experimental fouling deposit mass of soymilk formed on the heat exchanger plates. Experimental values were obtained with $50\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{pi} \leq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $65\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{po} \leq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

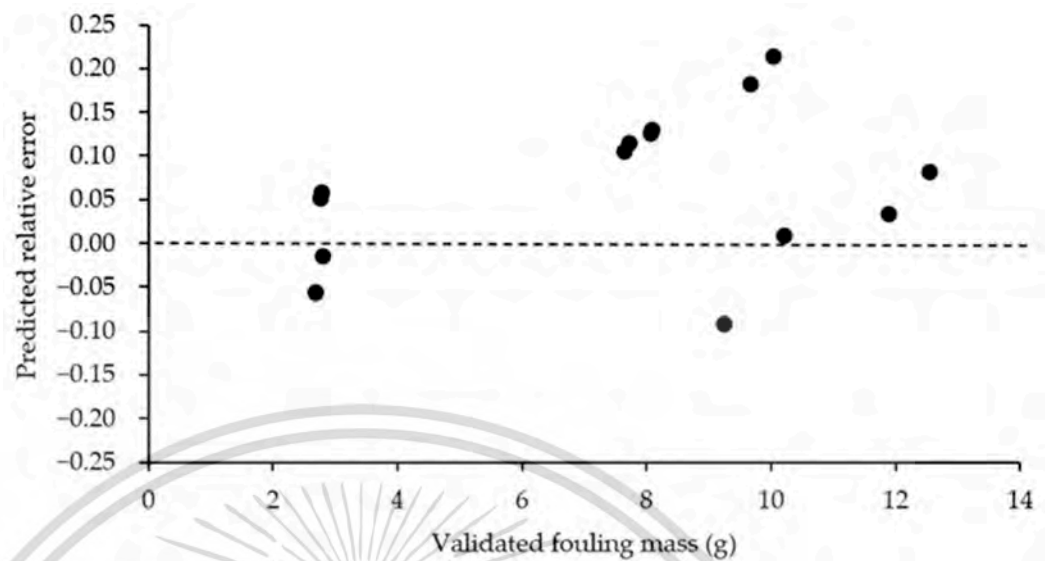


Figure 6. The relative error of the predicted model compared to the experimental values of soymilk fouling deposit mass. Validation data were obtained with $50\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{pi} \leq 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_s \leq 85\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $65\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{po} \leq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Conclusions

Based on the dimensional analysis approach, relevant variables of fouling deposit mass could be grouped into six dimensionless terms. A simple prediction model for soymilk fouling deposit mass (m_f) formed on a plate heat exchanger was developed by focusing on product and surface temperatures. The data used in the development of the model were obtained from process conditions with the product inlet temperature (T_{pi}), the product outlet temperature (T_{po}), and plate surface temperature in the ranges of $50\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $65\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$, and $70\text{--}85\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. A high correlation coefficient of 0.97 with an average relative error of 9.03% was observed from the plot between predicted and experimental value of fouled mass. The findings suggest the capability of a simple dimensionless model to estimate soymilk fouling deposit mass within the variables ranges studied.

Author Contributions: Conceptualization, E.S. and N.N.; methodology, E.S., N.N., T.S. and G.S.; software, E.O.; validation, E.S., N.N. and E.O.; formal analysis, E.S. and N.N.; investigation, N.N.; resources, E.O. and T.S.; data curation, E.O. and J.C.; writing—original draft preparation, E.S., N.N. and G.S.; writing—review and editing, E.S., N.N. and G.S.; visualization, T.S. and J.C.; supervision, E.S. and N.N.; project administration, E.O., J.C. and T.S.; funding acquisition, N.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was financially supported by the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Research Fund under contract number 2562-02-01-032.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Teixeira, A.A. Thermal Food Preservation Techniques (Pasteurization, Sterilization, Canning and Blanching). In *Conventional and Advanced Food Processing Technologies*, 1st ed.; Bhattacharya, S., Ed.; John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2015; Volume 2, pp. 115–128. [CrossRef]
- Wilkens, W.F.; Mattick, L.R.; Hand, D.B. Effect of processing method on oxidative off-flavors of soybean milk. *Food Technol.* **1967**, *21*, 1630–1633.

เนื้อหาสาระนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Nelson, A.I.; Wei, L.S.; Steinberg, M.P. Foods from whole soybeans. In *World Soybean Research Conference II: Proceedings*, 1st ed.; Corbin, F.T., Ed.; West view press: Boulder, CO, USA, 1980; pp. 745–776. [\[CrossRef\]](#)
4. Bansal, B.; Chen, X.D. A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Compr. Rev. Food Sci. F* **2006**, *5*, 27–33. [\[CrossRef\]](#)
5. Quevedo, M.; Kulozik, U.; Karbstein, H.P.; Emin, M.A. Kinetics of denaturation and aggregation of highly concentrated β -lactoglobulin under defined thermomechanical treatment. *J. Food Eng.* **2020**, *274*, 109825. [\[CrossRef\]](#)
6. Awad, M.M. Fouling of heat transfer surfaces. In *Heat Transfer—Theoretical Analysis, Experimental Investigations, and Industrial Systems*; Belmiloudi, A., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2011; p. Ch. 20. [\[CrossRef\]](#)
7. Fox, P.F. *Heat-Induced Changes in Milk*, 2nd ed.; International Dairy Federation: Brussels, Belgium, 1995.
8. Fryer, P.J.; Robbins, P.T.; Green, C.; Schreier, P.J.R.; Pritchard, A.M.; Hasting, A.P.M.; Royston, D.G.; Richardson, J.F. A Statistical Model for Fouling of a Plate Heat Exchanger by Whey Protein Solution at UHT Conditions. *Food Bioprod. Process.* **1996**, *74*, 189–199. [\[CrossRef\]](#)
9. Gu, Y.; Bouvier, L.; Tonda, A.; Delaplace, G. A mathematical model for the prediction of the whey protein fouling mass in a pilot scale plate heat exchanger. *Food Control* **2019**, *106*, 106729. [\[CrossRef\]](#)
10. Alhuthali, S.; Delaplace, G.; Macchietto, S.; Bouvier, L. Whey protein fouling prediction in plate heat exchanger by combining dynamic modelling, dimensional analysis, and symbolic regression. *Food Bioprod. Process.* **2022**, *134*, 163–180. [\[CrossRef\]](#)
11. Pan, F.; Chen, X.D.; Mercadé-Prieto, R.; Xiao, J. Numerical simulation of milk fouling: Taking fouling layer domain and localized surface reaction kinetics into account. *Chem. Eng. Sci.* **2019**, *197*, 306–316. [\[CrossRef\]](#)
12. Petit, J.; Six, T.; Moreau, A.; Ronse, G.; Delaplace, G. β -lactoglobulin denaturation, aggregation, and fouling in a plate heat exchanger: Pilot-scale experiments and dimensional analysis. *Chem. Eng. Sci.* **2013**, *101*, 432–450. [\[CrossRef\]](#)
13. Blanpain-Avet, P.; André, C.; Khaldi, M.; Bouvier, L.; Petit, J.; Six, T. Predicting the distribution of whey protein fouling in a plate heat exchanger using the kinetic parameters of the thermal denaturation reaction of β -lactoglobulin and the bulk temperature profiles. *J. Dairy Sci.* **2016**, *99*, 9611–9630. [\[CrossRef\]](#)
14. Belmar-Beiny, M.T.; Gotham, S.M.; Paterson, W.R.; Fryer, P.J.; Pritchard, A.M. The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. *J. Food Eng.* **1993**, *19*, 119–139. [\[CrossRef\]](#)
15. Wang, J.; Li, L.; Fu, N.; Mercadé-Prieto, R.; Chen, X.D. A Comparative Study on Fouling and Cleaning Characteristics of Soy Protein Isolate (SPI). *Int. J. Food Eng.* **2018**, *14*, 20170381. [\[CrossRef\]](#)
16. Indumathy, M.; Sobana, S.; Rames, C.P. Modelling of fouling in a plate heat exchanger with high temperature pasteurisation process. *Appl. Therm. Eng.* **2021**, *189*, 116674. [\[CrossRef\]](#)
17. Post, S. *Applied and Computational Fluid Mechanics*, 1st ed.; Jones & Bartlett Publishers: Burlington, VT, USA, 2011; Chapter 4; pp. 157–200.
18. Delaplace, G.; Loubière, K.; Ducept, F.; Jeantet, R. *Dimensional Analysis of Food Processes*, 1st ed.; ISTE Press-Elsevier: Great Britain, UK, 2015; pp. 1–73.
19. Georgiadis, M.C.; Macchietto, S. Dynamic modelling and simulation of plate heat exchangers under milk fouling. *Chem. Eng. Sci.* **2000**, *55*, 1605–1619. [\[CrossRef\]](#)
20. Oguntunde, A.O.; Akintoye, O.A. Measurement and comparison of density, specific heat and viscosity of cow's milk and soymilk. *J. Food Eng.* **1991**, *13*, 221–230. [\[CrossRef\]](#)
21. Liu, Z.; Chang, S.K.C.; Li, L.; Tatsumi, E. Effect of selective thermal denaturation of soybean proteins on soymilk viscosity and tofu's physical properties. *Food Res. Int.* **2004**, *37*, 815–822. [\[CrossRef\]](#)
22. Yang, W.; Li, D.; Chen, X.D.; Mercadé-Prieto, R. Effect of calcium on the fouling of whey protein isolate on stainless steel using QCM-D. *Chem. Eng. Sci.* **2018**, *117*, 501–508. [\[CrossRef\]](#)
23. Iwabuchi, S.; Yamauchi, F. Determination of glycinin and beta-conglycinin in soybean proteins by immunological methods. *J. Agr. Food Chem.* **1987**, *35*, 200–205. [\[CrossRef\]](#)
24. Iwabuchi, S.; Yamauchi, F. Electrophoretic analysis of whey proteins present in soybean globulin fractions. *J. Agr. Food Chem.* **1987**, *35*, 205–209. [\[CrossRef\]](#)
25. Mo, X.; Sun, X. Thermal and mechanical properties of plastics molded from urea-modified soy protein isolates. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2001**, *78*, 867–872. [\[CrossRef\]](#)
26. Nagano, T.; Akasaka, T.; Nishinari, K. Study on the heat-induced conformational changes of β -conglycinin by FTIR and CD analysis. *Food Hydrocolloid* **1995**, *9*, 83–89. [\[CrossRef\]](#)
27. Qingjun, Z.; Yufei, H.; Yeming, C.; Xiangzhen, K. Fouling behavior of soy milk in plate heat exchanger. *Food Ferment. Ind.* **2020**, *46*, 182–189.
28. Zhang, B.Y.; Xu, S.; Villalobos-Santeli, J.A.; Huang, J.Y. Fouling characterization of camel milk with comparison to bovine milk. *J. Food Eng.* **2020**, *285*, 110085. [\[CrossRef\]](#)
29. Chen, X.D.; Bala, P. Investigation of the influences of surface and bulk temperatures upon fouling of milk components onto a stainless steel probe. In *Fouling and Cleaning in Food Processing'98*; Jesus College: Cambridge, UK, 1998.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเอกรินทร์ องค์กรวงศ์สกุล
 วัน เดือน ปีเกิด 20 ตุลาคม พ.ศ.2542 จังหวัดนนทบุรี
 ที่อยู่ บ้านเลขที่ 53/726 ถนนติวานนท์ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอปาก
 เกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120
 ประวัติการศึกษา 2565 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร สถาบัน
 เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์และผลงานวิจัย - ปริญญาโทเรื่อง “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ
 ทำนายการเกิดคราบน้ำแก้วเหลืองบนพื้นผิวร้อนโดยวิธี
 วิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ” ปี พ.ศ. 2565
 - นำเสนองานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาแบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์เพื่อทำนายมวลของคราบน้ำแก้วเหลืองบนพื้นผิว
 ถ่ายเทความร้อนโดยใช้การวิเคราะห์เชิงมิติ” ในวารสาร
 Computation 2023, 11(4), 83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้