

พฤติกรรมการเกิดคราบไขแดงเหลวบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
FOULING BEHAVIOR OF LIQUID EGG YOLK ON HEAT TRANSFER SURFACE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564
KMITL-2021-EN-M-270-052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FOULING BEHAVIOR OF LIQUID EGG YOLK ON HEAT TRANSFER SURFACE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2021-EN-M-270-052



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมการเกิดคราบไขแดงเหลวบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
นักศึกษา	นายบัณฑิต สัมฤทธิ์โสภาค
รหัสประจำตัว	63601209
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. นวภัทรา หนูนาค

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอพฤติกรรมการเกิดคราบไขแดงบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิว (60-80 องศาเซลเซียส) ต่อพฤติกรรมการเกิดคราบ จลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบ และการทำความสะอาดคราบไขแดง จากการทดลองพบว่า การเกาะติดของไขแดงบนพื้นผิวร้อนแสดงพฤติกรรมแบบเข้าสู่สมดุล และไม่ปรากฏระยะเหนี่ยวนำของการเกิดคราบ อุณหภูมิพื้นผิวร้อนส่งผลต่อการเกาะติดของคราบไขแดง โดยค่าความต้านทานความร้อนของคราบ มวลของคราบ ความหนาของคราบ และอัตราการเกิดคราบไขแดงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) จากการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบ พบว่าการเกิดคราบไขแดงสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับศูนย์ โดยมีพลังงานก่อกัมมันต์ 85.47 กิโลจูลต่อโมล และแฟกเตอร์ความถี่เท่ากับ 5.02×10^6 เมื่อแช่คราบไขแดงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวในการเกิดคราบที่สูงขึ้นส่งผลให้เวลาในช่วงเริ่มต้นก่อนการหลุดออกของคราบนานขึ้น อัตราการหลุดออกของคราบลดลง และปริมาณคราบที่หลงเหลืออยู่หลังทำความสะอาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$)

Thesis Title	Fouling Behavior of Liquid Egg Yolk on Heat Transfer Surface
Student	Mr.Badin Somlitsopak
Student ID.	63601209
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navapattra Nunak

ABSTRACT

This research presents the fouling behavior of egg yolk deposits on 304 stainless steel surface in a laboratory plate heat exchanger. The objective was to study the influences of surface temperature, from 60°C to 80°C, on fouling behavior, fouling kinetics, and cleaning characteristic of egg yolk deposits. It was found that the fouling resistance curve of egg yolk exhibited asymptotic behavior without the induction period. The surface temperature significantly affected egg yolk fouling resistance, fouling mass, fouling thickness, and fouling rate ($p < 0.01$). The egg yolk fouling kinetics was well fitted with a zero-order reaction with the activation energy of 85.47 kJ/mol and the frequency factor of 5.02×10^6 . By soaking egg yolk deposits on the heated surface in 0.1% sodium hydroxide solution at room temperature, it was found that the increasing of fouling temperature significantly resulted in the longer initial removal period, the slower removal rate, and the larger remaining amount of the deposit ($p < 0.01$).

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.นงภัทรา หนูนาถ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิด รวมถึงช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสตัย และ ผศ. ดร.เจษฎา ชัยโณม ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการทำวิจัย ครั้งนี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณคุณแม่ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษา คอยสนับสนุน เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ขอขอบคุณสมาชิกในครอบครัวทุกท่านทั้งครอบครัว “สัมฤทธิ์โสภาค” และ “มุสิกพงศ์” ที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณปู่และ คุณย่า ผู้ที่คอยอบรม เลี้ยงดู สั่งสอน จนสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณนายอำรรหม มงคลชัยสิทธิ์ และนายอำนาจ คุตะคุ ที่กรุณาช่วยให้คำปรึกษาในเรื่อง การสร้างชุดทดลอง การใช้เครื่องตัดเลเซอร์ ตลอดจนการออกแบบทางวิศวกรรม ขอขอบคุณนางสาว เบญจรัตน์ นุชนาฎ ที่กรุณาช่วยเหลือ สนับสนุน และให้คำปรึกษา และขอขอบคุณนางสาวเมธินี สงไทย ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนเรื่องการทดลองเสมอมา

ขอขอบคุณน้องทิวและน้องเจแปน จากภาควิชาวิศวกรรมวัดคุม ที่กรุณาช่วยซ่อมเซนเซอร์วัด ฟลักซ์ความร้อน จนทำให้การทดลองสามารถดำเนินต่อไปได้

ขอขอบคุณนางสาวอัญชลี ไกรสาสัย ที่ทำหน้าที่เป็นเหมือนพี่สาว คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ขอขอบคุณนายปัญญาพล กิमानนท์ รุ่นพี่ที่คอยเล่าประสบการณ์การเรียนในระดับบัณฑิตศึกษา และคอยชี้แนะแนวทาง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณนางสาวปิยาภา แสงสกุล ที่คอยสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการทำวิจัย ขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อน ๆ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร และโรงเรียนสุราษฎร์ธานี จนทำให้วิทยานิพนธ์ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

บดินทร์ สัมฤทธิ์โสภาค

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.....	3
1.6 รายละเอียดของงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การเกิดคราบ.....	5
2.1.1 กลไกและประเภทของการเกิดคราบ.....	5
2.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบจากอาหารเหลว.....	6
2.1.3 ผลกระทบจากการเกิดคราบ.....	8
2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคราบกับเวลา.....	10
2.1.5 การตรวจสอบการเกิดคราบ.....	13
2.2 การพาสเจอร์ไรส์ไข่แดงเหลว.....	14
2.3 การวิเคราะห์จุลณพลศาสตร์.....	17
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
2.4.1 การศึกษาการเกิดคราบอาหาร.....	19
2.4.2 การวิเคราะห์จุลณพลศาสตร์การเกิดคราบอาหาร.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การทำความสะอาดคราบไขแดง.....	21
2.4.4 การเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน.....	22
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	23
3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ.....	23
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	23
3.1.2 การทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ.....	27
3.2 การทดลองการเกิดคราบไขแดง.....	29
3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง.....	29
3.2.2 การทดลองการเกิดคราบ.....	29
3.2.3 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดคราบไขแดง.....	30
3.3 การทดลองการทำความสะอาดคราบไขแดง.....	35
3.3.1 รายละเอียดการทดลอง.....	35
3.3.2 การวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลการทำความสะอาด.....	35
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง.....	38
4.1 กลไกและพฤติกรรมของการเกิดคราบไขแดง.....	38
4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อพฤติกรรมของการเกิดคราบและการทำ ทำความสะอาดคราบไขแดง.....	42
4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อพฤติกรรมของการเกิดคราบ ไขแดง.....	42
4.2.2 จลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบไขแดง.....	49
4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อการทำความสะอาดคราบไข แดง.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
บรรณานุกรม.....	62
ภาคผนวก.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทั่วไปของไข่แดง.....	17
2.2 โปรตีนที่พบในไข่แดง.....	17
3.1 รายละเอียดชุดทดลองการเกิดคราบ.....	24
3.2 รายละเอียดเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง FHF02.....	26
4.1 การวิเคราะห์การถดถอยของการเข้าสู่สมดุลของคราบไข่แดง.....	44
4.2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ.....	50
4.3 ตัวแปรที่เกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การเกิดคราบไข่แดง.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกการเกิดคราบ.....	6
2.2 ค่าความต้านทานของคราบที่ลดลงช่วงเริ่มต้น.....	8
2.3 คราบที่เกาะบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	9
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของคราบกับเวลา.....	11
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของคราบกับเวลาแบบพินเลี้ยง.....	12
2.6 โครงสร้างของลิโพโปรตีน.....	14
2.7 ขั้นตอนการแปรรูปไข่แดง.....	15
2.8 กลไกการเกาะติดของโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	16
3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ.....	23
3.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	25
3.3 แผนภาพการทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ.....	28
3.4 การเตรียมตัวอย่างทดลอง.....	29
3.5 คราบไข่แดงที่เกาะบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม.....	30
3.6 การวัดมวลคราบไข่แดง.....	31
3.7 การวัดความหนาคราบ.....	32
3.8 การแช่คราบไข่แดงในสารทำความสะอาด.....	35
3.9 การวิเคราะห์พื้นที่คราบไข่แดง.....	36
3.10 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Color Threshold ระบบสี RGB.....	36
4.1 ตัวอย่างคราบไข่แดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมหลังสิ้นสุดการทดลอง (90 นาที) ที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ.....	38
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานของคราบไข่แดงกับเวลา ที่อุณหภูมิพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 70 องศาเซลเซียส.....	40
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของคราบไข่แดงที่เวลาใด ๆ.....	43
4.4 อัตราการเกิดคราบไข่แดงเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ.....	43
4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อความต้านทานของคราบไข่แดงที่เวลา 90 นาที	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อความหนาเฉลี่ยและมวลของคราบไขแดง ที่เวลา 90 นาที.....	45
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาคราบกับความต้านทานคราบไขแดง.....	46
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาคราบไขแดงที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจากการทดลอง.....	47
4.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน.....	48
4.10 การเข้าสู่สมดุลของค่าความต้านทานของคราบไขแดงเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ.....	49
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยากับส่วนกลับของอุณหภูมิพื้นผิว.....	52
4.12 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่คราบในการทำความสะอาด.....	55
4.13 อัตราการหลุดออกของคราบไขแดงที่เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที	56
4.14 พื้นที่การหลุดออกของคราบไขแดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 60 องศาเซลเซียส.....	57
4.15 พื้นที่การหลุดออกของคราบไขแดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 65 องศาเซลเซียส.....	57
4.16 พื้นที่การหลุดออกของคราบไขแดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 70 องศาเซลเซียส.....	58
4.17 พื้นที่การหลุดออกของคราบไขแดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 75 องศาเซลเซียส.....	58
4.18 พื้นที่การหลุดออกของคราบไขแดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 80 องศาเซลเซียส.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไข่แดง มีสมบัติเป็นสารช่วยทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsifiers) และสารทำให้เกิดเจล (Gelling agent) (Mine & Zhang, 2013) จึงเป็นวัตถุดิบที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในอาหารหลายชนิด เช่น เค้ก ขนมอบ ไอศกรีม น้ำสลัด และมายองเนส เป็นต้น จากอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณประชากรทำให้ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากไข่ไก่มีปริมาณขึ้นเพิ่มขึ้นตลอด 30 ปีที่ผ่านมา (ปี ค.ศ. 1990-2019) และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต โดยในปี ค.ศ. 2019 ผลิตภัณฑ์จากไข่เพิ่มขึ้นร้อยละ 20.75 จากปี 2009 (Shahbandeh, 2021) โดยอุตสาหกรรมได้แปรรูปไข่แดงเป็น ไข่แดงเหลวพาสเจอร์ไรส์และไข่แดงผง เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ลดค่าใช้จ่ายการขนส่ง และเพิ่มอายุการเก็บรักษา ซึ่งการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์และความปลอดภัยของผู้บริโภคต้องอาศัยกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน โดยการพาสเจอร์ไรส์ไข่แดงส่วนใหญ่ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น เนื่องจากมีอัตราส่วนของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อขนาดของเครื่องสูง สามารถปรับพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้ และง่ายต่อการถอดล้างและซ่อมบำรุง (Gut et al., 2005) โดยการพาสเจอร์ไรส์ไข่แดง ดำเนินการที่อุณหภูมิ 61.1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 นาที หรือ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6.2 นาที (USDA, 1969) เพื่อทำลายจุลินทรีย์ก่อโรค และเนื่องจากไข่แดงมีองค์ประกอบที่สามารถเสียสภาพทางโครงสร้างได้เมื่อได้รับความร้อน (Le Denmat et al., 1999) จึงทำให้กระบวนการแปรรูปไข่แดงโดยใช้ความร้อนมีคราบเกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

การเกิดคราบส่งผลให้ประสิทธิภาพและสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องจักรลดลง ความดันสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น และเพิ่มค่าใช้จ่ายในทางเศรษฐศาสตร์ เช่น ทำให้ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้น เนื่องจากมีความจำเป็นต้องออกแบบให้สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ถึงอุณหภูมิที่กำหนดเมื่อมีคราบเกิดขึ้น ส่งผลให้เครื่องจักรมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าขนส่ง ค่าติดตั้ง ค่าบำรุงรักษาสูงขึ้น ค่าเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการทำ ความสะอาดสูงขึ้นอีกด้วย (Goode et al., 2013) จึงถือได้ว่าการเกิดคราบเป็นปัญหาสำคัญในการแลกเปลี่ยนความร้อน (Awad, 2011) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากอาหารเป็น สารชีวโมเลกุลที่เปลี่ยนโครงสร้างได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน จึงสามารถพบการเกิดคราบได้ใน

กระบวนการแปรรูปอาหาร (Schnöing et al., 2020) โดยสิ่งสำคัญที่อุตสาหกรรมอาหารต้องคำนึงถึง

ไม่่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ความปลอดภัยทางอาหาร (Bott, 1995) การเกิดคราบในระหว่างกระบวนการถนอมอาหารอาจทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ลดต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ทำให้อาหารที่ได้อาจไม่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค นอกจากนี้การเกิดคราบยังสัมพันธ์กับการทำความสะอาด ความซับซ้อนทางองค์ประกอบของคราบส่งผลถึงความยากและเวลาที่ใช้ทำความสะอาด (Gordon et al., 2012) นอกจากนี้ คราบที่หลงเหลือจากการทำความสะอาดที่ไม่สมบูรณ์ยังเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ซึ่งอาจปนเปื้อนไปสู่อาหารในระหว่างกระบวนการการผลิตได้ (Bott, 1995) อุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นต้องเข้าใจและติดตามกลไกการเกิดคราบ เพื่อควบคุมกระบวนการผลิต รักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และความปลอดภัยของผู้บริโภค

ในปัจจุบันการติดตามเกิดคราบอาหารระหว่างกระบวนการผลิตสามารถตรวจสอบหลายวิธี เช่น การวัดความเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบใช้ไฟฟ้า (Ling & Lund, 1978) การวัดการลดลงของอุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Narataruksa et al., 2010) และการใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน (Davies et al., 1997, Nigo et al., 2009, Zhang et al., 2019) เป็นต้น โดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่หลากหลาย เช่น การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) (Bouvier et al., 2014) การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) (Rosa et al., 2019) การวิเคราะห์มิติตัวแปร (Gu et al., 2019) และการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ (Blanpain-Avet et al., 2016) เป็นต้น โดยปัจจัยที่ทำให้อาหารเกิดคราบ ได้แก่ อัตราการไหล สมบัติของอาหาร สมบัติของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุณหภูมิ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Awad, 2011) งานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับคราบอาหารที่มีความซับซ้อนทางองค์ประกอบและโครงสร้าง เช่น คราบนม และเวย์โปรตีน เป็นต้น โดยองค์ประกอบหลักที่ทำให้อาหารเกิดคราบ คือ โปรตีน ซึ่งจัดเป็นคราบที่ยากต่อการทำความสะอาด เมื่อพิจารณาคราบไข่แดง ซึ่งเป็นคราบที่มีความซับซ้อนทางโครงสร้างและองค์ประกอบ (Helbig et al., 2019) และจัดเป็นคราบประเภทที่ 3 ตามการจำแนกของ Fryer & Asteriadou (2009) (Yang et al., 2019) แต่ยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมเกิดคราบไข่แดง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ส่งผลต่อการทำความสะอาด ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวร้อน โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวร้อนที่มีต่อการเกิดคราบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นและการทำความสะอาดคราบไข่แดง และอธิบายลักษณะการเกิดคราบด้วยจลนพลศาสตร์ โดยวัดค่าความต้านทานความร้อนของคราบด้วยวิธีวัดความ

เปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อน โดยใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวร้อนต่อพฤติกรรมการเกิดคราบ จลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบ และการทำความสะอาดคราบไข่แดง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ไข่ไข่แดงเหลวพาสเจอร์ไรส์เป็นอาหารที่ทำให้เกิดคราบ

1.3.2 ใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 พื้นผิว 2B เป็นพื้นผิวร้อน

1.3.3 ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเป็นชุดทดลองการเกิดคราบ

1.3.4 วัดค่าความต้านทานความร้อนของคราบ ด้วยวิธีวัดความเปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อน โดยใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

1.3.5 การทำความสะอาดคราบใช้การแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดคราบอาหาร กลไกและประเภทของการเกิดคราบ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ ผลกระทบจากการเกิดคราบ การทำความสะอาดคราบไข่แดง องค์ประกอบของไข่แดง และการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์

1.4.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคราบอาหาร การวัดค่าความต้านทานความร้อนของคราบ ด้วยวิธีวัดความเปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อน และวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบ

1.4.3 ออกแบบการทดลอง สร้างชุดทดลองสำหรับศึกษาการเกิดคราบไข่แดง และทำการทดลองเบื้องต้น

1.4.4 ดำเนินการทดลองการเกิดคราบไข่แดง

1.4.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถอธิบายพฤติกรรมการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวร้อนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.2 สามารถอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการเกิดคราบ จลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบ และการทำความสะอาดคราบได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การเกิดคราบ การพาสเจอร์ไรส์ไข่แดง เหลว การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงชุดทดลองการเกิดคราบ การทดลองการเกิดคราบไข่แดง การทดลองการทำ ความสะอาดคราบไข่แดง และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

บทที่ 4 กล่าวถึงกลไกและพฤติกรรมการเกิดคราบไข่แดงและอิทธิพลของอุณหภูมิต่อ พฤติกรรมการเกิดคราบและการทำความสะอาดคราบไข่แดง

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดคราบ

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

2.1.1 กลไกและประเภทของการเกิดคราบ

การเกิดคราบเป็นกระบวนการที่เป็นพลวัต มีความซับซ้อน และมีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์หลายด้าน เช่น การถ่ายเทมวล ความร้อน และโมเมนตัม เป็นต้น (Awad, 2011) การเกิดคราบ มีกลไกหลัก 2 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.1 คือ กลไกการเกาะติดและกลไกการหลุดออก โดยที่กลไกการเกาะติด ประกอบด้วยกลไกย่อย คือ การก่อตัวของอนุภาคที่ทำให้เกิดคราบในของไหล การถ่ายเทมวลของอนุภาคจากของไหลไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และการเกาะติดของอนุภาคคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนกลไกการหลุดออก ประกอบด้วยกลไกย่อย คือ การหลุดออกของคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและการถ่ายเทมวลของอนุภาคคราบที่หลุดออกจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนไปยังของไหล โดยผลต่างระหว่างอัตราการเกาะติดและการหลุดออกของคราบ (สมการที่ 2.1) เรียกว่า แฟคเตอร์การเกิดคราบ (Fouling factor, F_f) ซึ่งแสดงถึงปริมาณการสะสมของอนุภาคบนพื้นผิวที่สนใจ โดยสามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานความร้อนของคราบ (Fouling resistance, R_f) การเปลี่ยนแปลงความหนาของคราบ หรือการเปลี่ยนแปลงมวลมวลของคราบ (Awad, 2011)

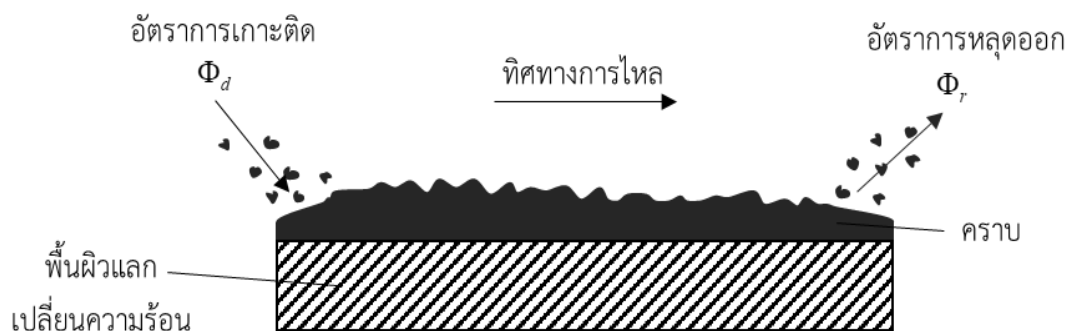
$$F_f = \Phi_d - \Phi_r \quad (2.1)$$

โดยที่ F_f คือ แฟคเตอร์การเกิดคราบ

Φ_d คือ อัตราการเกาะติดของคราบ

Φ_r คือ อัตราการหลุดออกของคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดคราบ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Awad (2011)

การเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถจำแนกตามประเภทของอนุภาคที่ทำให้เกิดคราบได้เป็น 2 ลักษณะ คือ คราบจากอนุภาคกลุ่มสารอินทรีย์ เช่น สารชีวโมเลกุล โพลีเมอร์ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เป็นต้น และอนุภาคกลุ่มสารอนินทรีย์ เช่น ฝุ่น ออกไซด์ของโลหะ และเกลือแคลเซียม เป็นต้น (Bott, 1995) นอกจากนี้การเกิดคราบยังสามารถจำแนกตามกลไกการเกิดได้เป็น 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) ในบางกรณี การสะสมของคราบอาหารบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน อาจไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเกิดจากกลไกใดเพียงกลไกเดียว แต่เป็นการรวมกันของหลายกลไก และคราบอาหารส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน จัดเป็นการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา และยังทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติได้ (Bott, 1995)

2.1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบจากอาหารเหลว

การเกิดคราบจากอาหารเหลวมีลักษณะเป็นกระบวนการแบบไม่คงตัว โดยมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ สามารถจำแนกได้เป็น ปัจจัยที่เกี่ยวกับสมบัติของอาหารเหลว และปัจจัยที่เกี่ยวกับลักษณะของกระบวนการ โดยมีรายละเอียดดังนี้ (Awad, 2011)

1) ปัจจัยที่เกี่ยวกับสมบัติของอาหารเหลว เช่น ความหนืด ความหนาแน่น และความเข้มข้น สารก่อคราบ เป็นต้น โดยสมบัติของอาหารเหลวส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการเกิดคราบ เช่น ความเข้มข้นของสารก่อคราบส่งผลต่ออัตราและปริมาณการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี (Ling & Lund,

1978) และสมบัติของอาหารเหลวส่งผลต่อปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความหนืดและความหนาแน่น ส่งผลต่อชั้นขอบเขตการไหล (Viscous sublayer) และค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง เป็นต้น

2) ปัจจัยที่เกี่ยวกับลักษณะของกระบวนการ เช่น ความเร็วในการไหลของอาหารเหลว สมบัติของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และอุณหภูมิ เป็นต้น โดยความเร็วในการไหล ส่งผลต่อชั้นขอบเขตการไหล เลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) ค่าความเค้นเฉือนที่ผนัง ความแข็งแรงของคราบ (Deposit strength) และความสามารถในการยึดติดของคราบ (Stickability) เป็นต้น ส่วนสมบัติของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ ชนิดของวัสดุ พลังงานอิสระพื้นผิว (Surface free energy) และความหยาบผิว เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบในระยะเหนียวนำ ส่วนอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดคราบ สามารถจำแนกได้เป็นอุณหภูมิพื้นผิว (Surface temperature) และอุณหภูมิของอาหารเหลว (Bulk temperature) โดยอุณหภูมิพื้นผิวส่งผลต่อการเกิดคราบในลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดและชนิดของสารก่อคราบ เช่น อุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณคราบอาหารจากปฏิกิริยาเคมีและคราบอาหารจากการตกผลึกสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ เช่น การเกิดผลึกหรือการเปลี่ยนสภาพโครงสร้างเกิดง่ายขึ้นที่อุณหภูมิสูง ส่วนอุณหภูมิของอาหารเหลว เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพโครงสร้างของสารก่อคราบและการถ่ายเทมวล โดยที่อุณหภูมิส่งผลต่อการเกิดคราบของอาหารเหลวกลุ่มโปรตีนดังนี้

- อุณหภูมิพื้นผิว เป็นตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดการเกิดคราบของอาหารเหลวกลุ่มโปรตีน เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวเป็นหนึ่งในปัจจัยที่ทำให้โปรตีนเสียสภาพธรรมชาติและเกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการเพิ่มอุณหภูมิพื้นผิวส่งผลให้อัตราการเกาะติดของคราบโปรตีนสูงขึ้น (Ling & Lund, 1978) และส่งผลให้คราบโปรตีนมีความแข็งแรงมากขึ้น (Zhang et al., 2020) เนื่องจากปริมาณพันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนและโปรตีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น (Nakanishi et al., 2001)

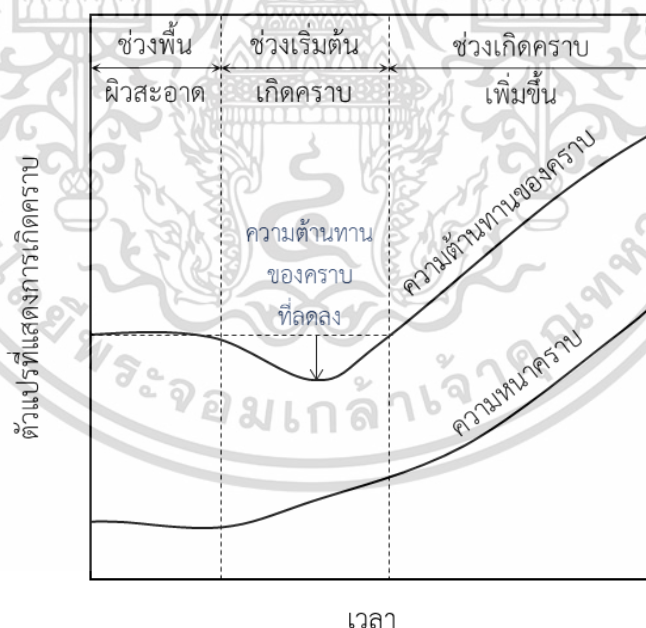
- อุณหภูมิอาหารเหลว เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาเปลี่ยนสภาพของโครงสร้างโปรตีนในอาหาร หากอุณหภูมิอาหารเหลวสูงกว่าอุณหภูมิพื้นผิว โครงสร้างโปรตีนจะเกิดการรวมตัวกันเองและไม่เกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (Ling & Lund, 1978) แต่หากอุณหภูมิของเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิพื้นผิวร้อนมาก ๆ จะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลของอนุภาคโปรตีนที่เสียสภาพออกจากบริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น ส่งผลให้การเกาะติดของโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดได้น้อยลง (Schreier et al., 1994)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอากาศเหลว ส่งผลโดยตรงต่อค่าการถ่ายเทความร้อนและอัตราการเกิดคราบ โดยผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราและปริมาณการเกาะติดของโปรตีนเพิ่มขึ้น (Ling & Lund, 1978) อย่างไรก็ตาม ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิอากาศเหลวจะส่งผลก็ต่อเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนสูงพอที่จะทำให้โปรตีนสามารถเสียสภาพธรรมชาติและเกิดการเกาะติดได้

2.1.3 ผลกระทบจากการเกิดคราบ

การเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลกระทบในหลายแง่มุม ทั้งด้านการแลกเปลี่ยนความร้อน ด้านพลศาสตร์การไหล และด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นต้น การเกิดคราบส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากคราบที่เกิดขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดการไหลลดลง ในอีกมุมหนึ่งคราบที่เกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นยังทำให้การไหลมีลักษณะปั่นป่วนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของคราบลดลงช่วงขณะหนึ่ง จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นจากความหนาคราบที่เพิ่มขึ้น โดยค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่ลดลงช่วงเริ่มต้นแสดงดังรูปที่ 2.2

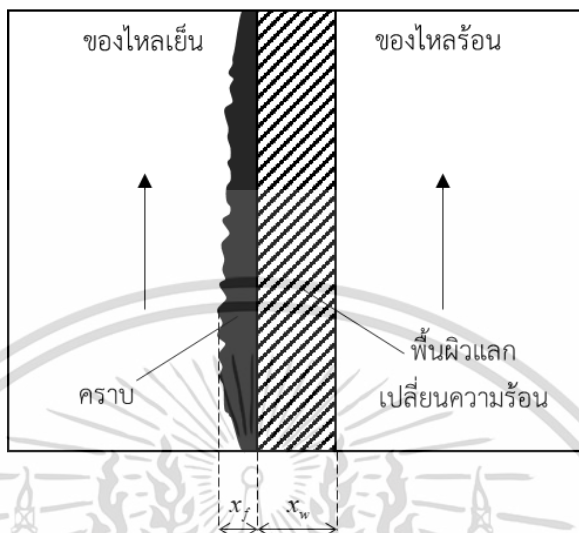


รูปที่ 2.2 ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่ลดลงช่วงเริ่มต้น

ที่มา: ดัดแปลงจาก Awad (2011)

นอกจากนี้การเกิดคราบยังส่งผลต่อสมรรถนะและประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ชั้นคราบที่เกิดขึ้นเปรียบเสมือนชั้นความต้านทานความร้อนที่เพิ่มขึ้น และส่งผลต่อค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบ (U) ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบพิจารณาได้จากสมการที่ 2.2



รูปที่ 2.3 คราบที่เกาะบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
ที่มา: ดัดแปลงจาก Bott (1995)

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{x_f}{\lambda_f} + \frac{x_w}{\lambda_w} + \frac{1}{h_2} \quad (2.2)$$

โดย h_1, h_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนฝั่งของไหลเย็นและของไหลร้อน (วัดต่อตารางเมตร-เคลวิน) ตามลำดับ λ_f, λ_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคราบและของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (วัดต่อเมตร) ส่วน x_f, x_w คือ ความหนาของคราบและความหนาของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (เมตร) โดยพจน์ x_f / λ_f เป็นส่วนที่เกิดจากคราบจึงเรียกว่า ความต้านทานความร้อนของคราบ (Bott, 1995)

สมรรถนะและประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ลดลงจากการเกาะติดของคราบบนพื้นผิว เนื่องจากในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจำเป็นต้องกำหนดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนให้เพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปต้นทุนที่เพิ่มขึ้นนี้คิดเป็นร้อยละ 30 ของราคาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Goode et al., 2013) การที่อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ขึ้นส่งผลต่อค่าขนส่งและค่าติดตั้ง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวก (ค่าน้ำ สารทำความสะอาด และอุปกรณ์ในระบบทำความสะอาด เช่น ถังเก็บสารเคมีที่ต้องมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดใหญ่ขึ้น) และค่าบำรุงรักษา คราบที่เกิดขึ้นทำให้สมรรถนะของอุปกรณ์ลดลง จึงส่งผลต่อค่าเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อน และค่าความดันสูญเสียในระบบที่สูงขึ้น ส่งผลต่อพลังงานที่ต้องจ่ายให้กับปั๊ม นอกจากนี้การเกิดคราบยังสัมพันธ์กับเวลาในการทำความสะดวก (Wilson, 2018) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ลดลงเนื่องจากการหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาด (Goode et al., 2013)

2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลา

ในการศึกษาลักษณะการเกิดคราบของกระบวนการต่าง ๆ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาลักษณะการเกิดคราบของระบบได้ โดยพิจารณาได้จากสมการที่

2.3

$$\frac{Q}{A} = U \Delta T \quad (2.3)$$

โดยที่ $\frac{Q}{A}$ คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร)

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน)

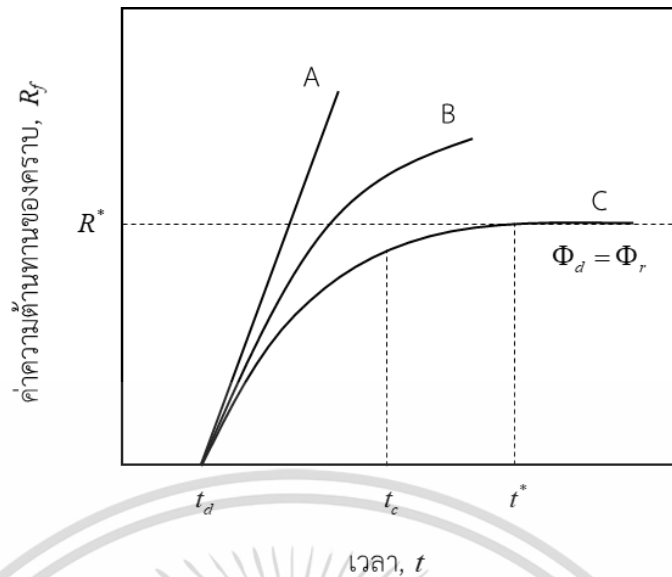
ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

เมื่อนำส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบที่เวลาต่าง ๆ ($1/U_t$) มาเปรียบเทียบกับค่าที่สถานะเริ่มต้น ($1/U_0$) ผลต่างที่ได้ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ลดลงเนื่องจากการเกิดคราบหรือค่าความต้านทานความร้อนของคราบ แสดงดังสมการที่ 2.4 (Schnöing et al., 2020)

$$R_f = \frac{1}{U_t} - \frac{1}{U_0} \quad (2.4)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลา เรียกว่า “Fouling curve” (Bott, 1995, Awad, 2011) โดยกราฟความสัมพันธ์ในอุดมคติรูปแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่

2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลา

ที่มา: ดัดแปลงจาก Bott (1995) และ Awad (2011)

จากรูปที่ 2.4 ช่วงเวลาเริ่มต้นถึงเวลา t_d เรียกว่า ระยะเริ่มต้นหรือระยะเหนี่ยวนำการเกิดคราบ (Initial period หรือ Induction period) เป็นช่วงที่ยังไม่มีคราบเกิดขึ้นจึงมีค่าความต้านทานความร้อนของคราบเท่ากับ 0 ระยะดังกล่าวแตกต่างกันไปในคราบแต่ละชนิด การเกิดคราบบางชนิดอาจไม่ปรากฏระยะเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถทำนายได้ การพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลาที่จะกล่าวในลำดับถัดไปจึงไม่พิจารณาช่วงระยะเหนี่ยวนำการเกิดคราบ โดยความสัมพันธ์สามารถจำแนกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้ (Awad, 2011)

1) การเกิดคราบแบบเส้นตรง (Linear fouling curve, A) เป็นการเกิดคราบที่มีอัตราการเกาะติดคงที่โดยไม่มีอัตราการหลุดออก ($\Phi_d = C, \Phi_r = 0$ โดย C แทนค่าคงที่ใด ๆ) หรือมีผลต่างระหว่างอัตราการเกาะติดและอัตราการหลุดออกของคราบเป็นค่าคงที่ ($\Phi_d - \Phi_r = C$) การเกิดคราบในลักษณะนี้สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเส้นตรงทางคณิตศาสตร์แสดงดังสมการที่ 2.5 โดยที่ a คือ ความชันของกราฟการเกิดคราบแบบเส้นตรง และ t คือ เวลา

$$R_f = at \tag{2.5}$$

2) การเกิดคราบแบบเส้นโค้ง (Falling rate fouling curve, B) เป็นการเกิดคราบที่มีการเพิ่มขึ้นของคราบแบบไม่เป็นเชิงเส้น เกิดทั้งในกรณีที่มีอัตราการเกาะติดลดลงในขณะที่อัตราการหลุดออกคงที่ หรือเกิดจากคราบที่มีอัตราการเกาะติดคงที่และมีอัตราการหลุดออกเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การเกิดคราบแบบเข้าสมดุล (Asymptotic fouling curve, C) เป็นการเพิ่มขึ้นของคราบจนถึงจุดหนึ่งที่เกิดคราบมีค่าอัตราการเกาะติดเท่ากับอัตราการหลุดออก ($\Phi_d = \Phi_r$) ที่จุดนี้คราบจะมีค่าความต้านทานความร้อนคงที่ เรียกว่า ความต้านทานความร้อนคราบที่จุดสมดุล (R_f^*) จากรูปที่ 2.4 t^* คือระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลซึ่งใช้เวลาต่างกันในคราบแต่ละชนิด ต่อมา Kern และ Seaton (1959) ได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายพฤติกรรมของการเกิดคราบแบบสมดุล แสดงดังสมการที่ 2.6 (Awad, 2011)

$$R_f = R_f^* \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{0.63t^*} t\right) \right] \quad (2.6)$$

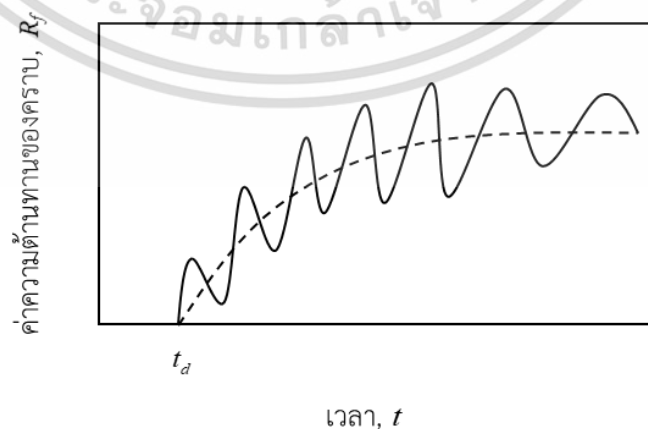
โดยที่ R_f คือ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่เวลา t (ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์)

R_f^* คือ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่สภาวะสมดุล (ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์)

t^* คือ เวลาในการเข้าสู่สมดุลการเกิดคราบ (นาทีก) (Taborak et al., 1972)

t คือ เวลา (นาทีก)

ในการทดลองค่าความต้านทานความร้อนของคราบค่าที่ได้อาจไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลาในอุดมคติที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากการเกาะติดและการหลุดออกของคราบเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา พฤติกรรมการเกิดคราบที่ได้อาจมีลักษณะขึ้นลงเป็นฟันเลื่อย (Sawtooth) ดังรูปที่ 2.5 แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของจุดต่าง ๆ (เส้นประในรูปที่ 2.5) สามารถใช้อธิบายกลไกการเกิดคราบได้ใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลา ในอุดมคติที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลาแบบฟันเลื่อย

ที่มา: ดัดแปลงจาก Bott (1995) และ Awad (2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 การตรวจสอบการเกิดคราบ

การตรวจสอบการเกิดคราบ สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการวัดทางตรงและทางอ้อม โดยมีรายละเอียดดังนี้ (Awad, 2011)

1) การวัดมวลคราบ เป็นวิธีวัดคราบทางตรงที่เหมาะสมกับการวัดในระดับห้องปฏิบัติการ จำเป็นต้องอาศัยเครื่องชั่งที่มีความแม่นยำสูง เนื่องจากมวลของคราบที่เกิดขึ้นหรือมวลของคราบที่เปลี่ยนแปลงไปมักมีปริมาณเล็กน้อยและยากต่อการสังเกตและตรวจวัด

2) การวัดความหนาคราบ เป็นวิธีวัดคราบทางตรงที่ปฏิบัติได้ยากเนื่องจากคราบที่เกิดขึ้นมักมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร (Awad, 2011) การวัดจึงจำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือที่ละเอียดแม่นยำ นอกจากนี้ยังยากต่อการเข้าถึงการตรวจวัด เนื่องจากการเกิดคราบมักเกิดขึ้นในระบบปิด

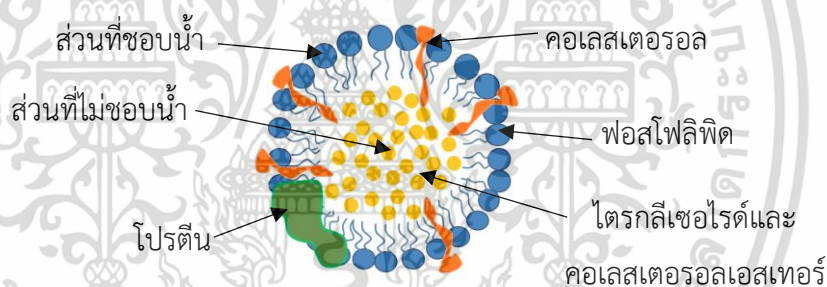
การวัดที่กล่าวไว้ข้างต้น เช่น การวัดมวลหรือการวัดความหนาเป็นวิธีที่ยากต่อการปฏิบัติในกระบวนการจริงเนื่องจากสามารถเข้าตรวจวัดได้เมื่อกระบวนการเสร็จสิ้นลงแล้ว แต่อย่างไรก็ตามการติดตามการเกิดคราบอย่างต่อเนื่องตลอดกระบวนการโดยไม่รบกวนการผลิต เป็นสิ่งที่อุตสาหกรรมให้ความสำคัญ

3) การวัดค่าการถ่ายเทความร้อน เป็นการวัดคราบทางอ้อมจากการเปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อน โดยค่าการถ่ายเทความร้อนที่ลดลงเกิดจากการลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบ เนื่องจากชั้นคราบที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นฉนวนความร้อน โดยมีสมมุติฐานคือ การเกิดคราบต้องไม่ส่งผลกับพลศาสตร์การไหลของของไหลในระบบ อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถวัดได้หลายกระบวนการ เช่น การวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสและศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (กรณีที่เป็นเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้า) (Ling & Lund, 1978, Li et al., 2013) การวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิขาออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Narataruksa et al., 2010) และการวัดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ความร้อน (Davies et al., 1997, Zhang et al., 2019, Zhang et al., 2020) เป็นต้น

4) การวัดค่าความดันสูญเสีย เป็นวิธีทางเลือกที่ใช้วัดการเกิดคราบในระบบ โดยมีหลักการคือคราบที่เกิดขึ้นส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดในการไหลมีขนาดลดลง ทำให้ความดันสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น มักทำการวัดควบคู่กับการวัดความหนาคราบ โดยตัวแปรที่ใช้เป็นดัชนีการเกิดคราบ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นผิว (Friction factor) นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น ๆ เช่น การใช้ลำแสงเลเซอร์ การสังเกตด้วยตาเปล่า การวัดกัมมันตรังสี และการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เป็นต้น (Awad, 2011)

2.2 การพาสเจอร์ไรส์ไข่แดงเหลว

ไข่แดง เป็นแหล่งอาหารที่ให้ไขมันไม่อิ่มตัว ฟอสโฟลิพิด และคอเลสเตอรอล (Nys & Guyot, 2011) เนื่องจากมีสมบัติเป็นสารช่วยทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsifiers) และสารทำให้เกิดเจล (Gelling agent) (Mine & Zhang, 2013) จึงนิยมใช้เป็นองค์ประกอบในอาหาร เช่น เค้ก ขนมอบ ไอศกรีม น้ำสลัด และมายองเนส เป็นต้น ไข่แดงคิดเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักไข่ไก่สด มีปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ มากกว่าร้อยละ 50 (Nys & Guyot, 2011) และมีองค์ประกอบหลัก คือ น้ำ ลิพิด และโปรตีน องค์ประกอบโดยทั่วไปของไข่แดง แสดงดังตารางที่ 2.1 และปริมาณโปรตีนที่พบในไข่แดง แสดงดังตารางที่ 2.2 โดยลิพิดส่วนใหญ่มีโครงสร้างที่รวมกับโปรตีน เรียกว่า ลิโปโปรตีน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นทรงกลม ด้านในของลิโปโปรตีน ประกอบด้วยโมเลกุลกลุ่มที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น ไตรกลีเซอไรด์และคอเลสเตอรอล และส่วนด้านนอกเป็นโมเลกุลที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) ได้แก่ ฟอสโฟลิพิดและโปรตีน จากโครงสร้างดังกล่าวจึงทำให้ไข่แดงเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Strixner & Kulozik, 2011)



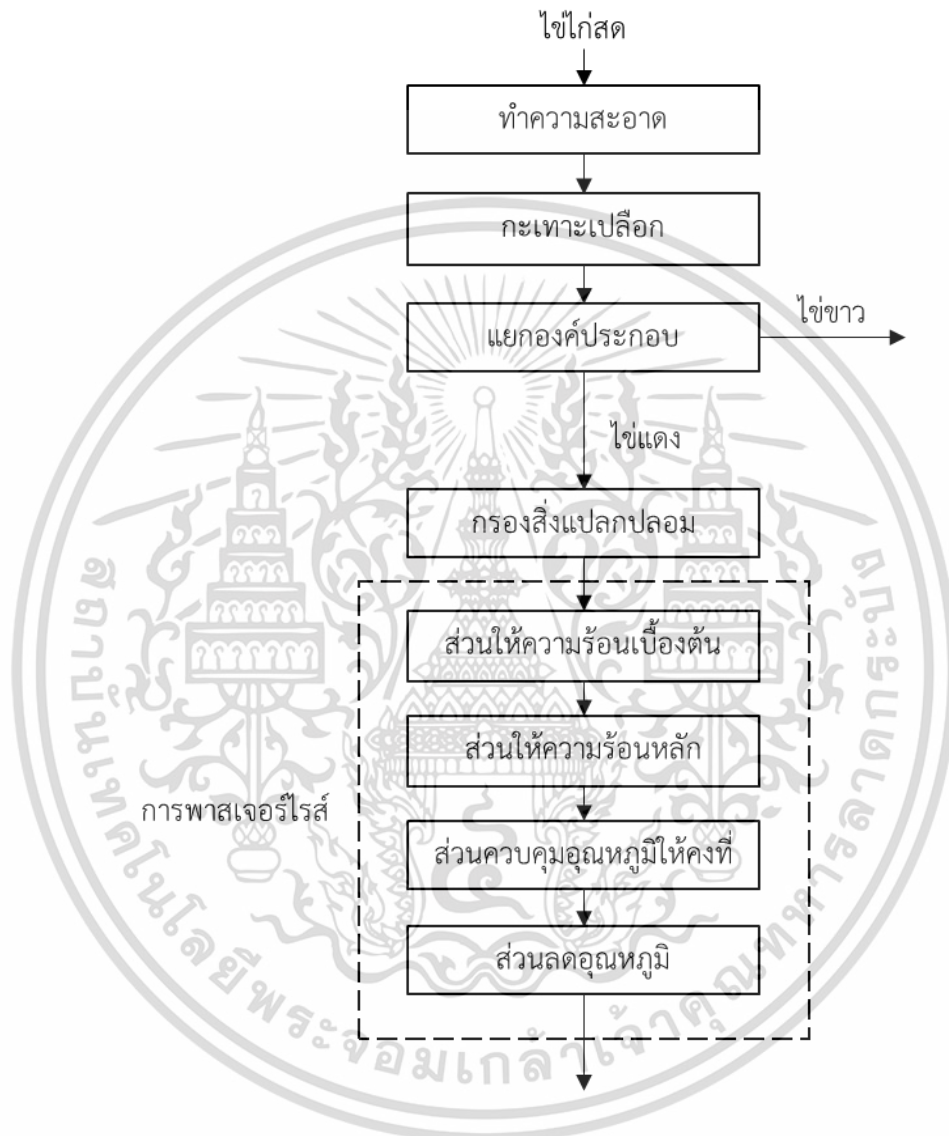
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของลิโปโปรตีน

ที่มา : อัญชลี, 2563

เนื่องจากไข่แดงเป็นอาหารที่สามารถเน่าเสียได้ จึงได้มีการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายรูปแบบ เช่น ไข่แดงเหลว ไข่แดงผง และไข่แดงแช่เยือกแข็ง เป็นต้น ขั้นตอนการแปรรูปไข่แดงแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยผลิตภัณฑ์จากไข่แดงทุกชนิดมีกระบวนการเริ่มต้นที่เหมือนกันและจำเป็นต้องผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ ที่มีจุดประสงค์เพื่อทำลายเป็นจุลินทรีย์ก่อโรค (*Salmonella spp.*) การพาสเจอร์ไรส์ไข่แดงส่วนใหญ่ดำเนินการที่อุณหภูมิ 61.1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3.5 นาที หรือ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6.2 นาที (USDA, 1969) โดยทั่วไปนิยมใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น เนื่องจากมีอัตราส่วนของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนต่อขนาดของเครื่องสูง สามารถปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้ และง่ายต่อการถอดล้างและซ่อมบำรุง (Gut et al., 2005) โดยการพาสเจอร์ไรส์ไข่แดงสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนให้ความร้อนเบื้องต้น ส่วนให้ความร้อนหลัก ส่วนควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และส่วนลดอุณหภูมิ



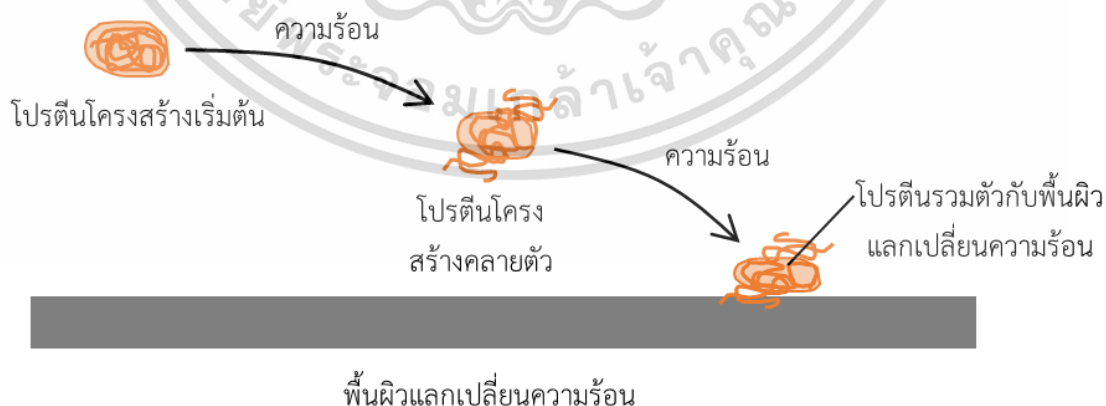
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการแปรรูปไข่แดง

การพาสเจอร์ไรส์ไข่แดงในส่วนให้ความร้อนเบื้องต้นและส่วนให้ความร้อนหลัก ไข่แดงเหลวจำเป็นต้องสัมผัสกับความร้อน จึงทำให้โปรตีนและลิโปโปรตีนที่อยู่ในไข่แดงเกิดการเสียสภาพธรรมชาติได้ โดยการเสียสภาพธรรมชาติของโครงสร้างไข่แดง เกิดจากโปรตีนกลุ่ม Plasma (Denmat et al., 1999) ที่ประกอบด้วย โปรตีนไลเวติน ซึ่งจัดเป็นโปรตีนโกลบูลาร์ (Globular protein) (เสียสภาพธรรมชาติที่ 60 องศาเซลเซียส) และโปรตีนลิโฟไวเทลลินิน ซึ่งเป็นลิโฟโปรตีนที่มีโครงสร้างรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับลีพิด (เสียดสภาพธรรมชาติที่ 70 องศาเซลเซียส) และเมื่อได้รับความร้อนอีกครั้ง ส่วนที่คลายตัวออกจะเกิดการรวมตัวกลับอีกครั้ง (Protein aggregation) โดยการรวมตัวของโปรตีนสามารถเกิดได้ทั้งการรวมตัวระหว่างโปรตีนกับโปรตีนเกิดเป็นตะกอนของโปรตีนแขวนลอยอยู่ในสารละลาย และการรวมตัวระหว่างโปรตีนกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำให้เกิดคราบ (Bott, 1995)

กลไกการเกาะติดของโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งการเกิดคราบในช่วงเริ่มต้นเกิดจากการรวมตัวกันของโครงสร้างโปรตีนกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยตรง จากกลไกการดูดซับโปรตีนของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน (Protein adsorption) ซึ่งพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมีพื้นผิวชั้นนอกเป็นออกไซด์ของโครเมียม มีสมบัติเป็นแอมโฟเทริก (Amphoteric) ที่พื้นผิวสามารถเกิดได้ทั้งประจุบวกและประจุลบ เนื่องจากความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิว (Nakanishi et al., 2001) โดยพันธะหลักที่ใช้ยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวกับโครงสร้างของคราบ คือ แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) (Nakanishi et al., 2001) และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำ (Hydrophilic interaction) เมื่อการเกิดคราบดำเนินต่อไป จะเกิดการรวมตัวกันของโปรตีนที่เสียดสภาพแล้วกับชั้นคราบเดิม โดยพันธะระหว่างโมเลกุลที่มีบทบาทในการยึดโครงสร้างของคราบไขแดง คือ พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ แรงแวนเดอร์วาลส์ และพันธะไดซัลไฟด์ (ณัฐม, 2550) โดยการเกิดเจลของโปรตีนในไขแดงส่วนใหญ่จัดเป็นการปฏิกริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (Cordobés et al., 2004) และมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ในการเสียดสภาพธรรมชาติ เท่ากับ 340.5 ± 12.2 กิโลจูลต่อโมล (Shibata-ishiwatari et al., 2018)



รูปที่ 2.8 กลไกการเกาะติดของโปรตีนบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Nakanishi et al. (2001) และ Bott (1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทั่วไปของไข่แดง (Strixner & Kulozik, 2011)

องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
น้ำ	48
ลิพิด (ไตรกลีเซอไรด์, ฟอสโฟลิพิด, สเตอรอยด์)	34
โปรตีน (ไลเวติน, ฟอสไวติน, ลิโพไวเทลลิน, ลิโพไวเทลลินิน)	16
คาร์โบไฮเดรต (กลูโคสโมเลกุลอิสระ)	0.2
วิตามิน (A, D, E, K, B1, B2, B6, B13)	0.2
เกลือแร่ (P, Ca, Na, K, Cl, S, Mg, Fe)	1

ตารางที่ 2.2 โปรตีนที่พบในไข่แดง (Strixner & Kulozik, 2011)

โปรตีนในไข่แดง	ปริมาณ (%)
ไลเวติน (α -, β -, γ -Livetins)	10
ฟอสไวติน (Phosvitin)	4
ลิโพไวเทลลิน (α -, β -Lipovitellin = HDL-apo)	16
ลิโพไวเทลลินิน (Lipovitellin = LDL-apo)	68

2.3 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ (Kinetics analysis)

จลนพลศาสตร์ คือ การศึกษากลไกการเกิดและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Missen et al., 1999) ใช้สำหรับวิเคราะห์อัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยมีอันดับปฏิกิริยา (Order of reaction) เป็นตัวเลขบ่งชี้ความสัมพันธ์ระหว่างสารตั้งต้นกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา แบ่งได้เป็น 3 อันดับ ได้แก่ ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หนึ่ง และสอง โดยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ปฏิกิริยาที่คงที่ ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น สมการอัตราของปฏิกิริยาอันดับศูนย์ แสดงดังสมการที่ 2.7 ในขณะที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นยกกำลังหนึ่ง แสดงสมการอัตราดังสมการที่ 2.8 ส่วนปฏิกิริยาอันดับสอง อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ซึ่งอาจมีชนิดเดียวหรือสองชนิดก็ได้ โดยสมการอัตราแสดงดังสมการที่ 2.9 (Upadhyay, 2006)

$$a_0 = mt + a \quad (2.7)$$

$$\ln a_0 = mt + \ln a \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{a_0} = mt + \frac{1}{a} \quad (2.9)$$

โดยที่ a_0 คือ ปริมาณสารตั้งต้น

a คือ ปริมาณสารตั้งต้นที่เวลา t

m คือ ค่าคงที่อัตรา

t คือ เวลา

โดยปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ได้แก่ ธรรมชาติของสารตั้งต้น ความเข้มข้น ความดัน และ อุณหภูมิ เป็นต้น นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับอุณหภูมิ ยังสามารถพิจารณาได้จากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) แสดงดังสมการที่ 2.10 (Upadhyay, 2006)

$$k = Z \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2.10)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

Z คือ แฟกเตอร์ความถี่ (frequency factor)

E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (กิโลจูลต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่า 8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

พลังงานก่อกัมมันต์ หมายถึง ค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดที่สามารถทำให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้ โดยปฏิกิริยาที่ใช้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์สูงจะเกิดได้ยากกว่าปฏิกิริยาที่ใช้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ต่ำ ส่วนแฟกเตอร์ความถี่ เป็นค่าเฉพาะสำหรับปฏิกิริยาหนึ่ง ๆ ที่แสดงความถี่ของการชนกันของโมเลกุล (Upadhyay, 2006) ในปัจจุบันได้มีการนำการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ไปใช้กับงานด้านอาหาร เช่น การวิเคราะห์การเสถียรภาพของสารกลุ่มโปรตีน (Shibata-ishiwatari et al., 2018) การเปลี่ยนแปลงความหนืดของของอาหารเหลว (Atilgan & Unluturk, 2008) และการเกิดคราบอาหาร (Blanpain-Avet et al., 2016, Fryer et al., 1994, Ling & Lund, 1978, Schteier et al., 1994) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ การศึกษาการเกิดคราบอาหาร การวิเคราะห์ จลนพลศาสตร์การเกิดคราบอาหาร การทำความสะอาดคราบไขแดง และการเสียสภาพธรรมชาติของ โปรตีน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 การศึกษาการเกิดคราบอาหาร

การศึกษาการเกิดคราบอาหารนิยมศึกษาในอาหารที่มีองค์ประกอบเป็น โปรตีน เนื่องจากเป็น สารที่ทำให้เกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจัดเป็นคราบที่ยากต่อการทำความสะอาด โดยมีงานวิจัย จำนวนมากที่ศึกษาการเกิดคราบอาหารกลุ่มนี้ เช่น

Ling & Lund (1978) ศึกษาการเกิดคราบของไข่ขาวจากโปรตีนอัลบูมินบนพื้นผิวอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และวัดค่าความต้านทาน ความร้อนของคราบด้วยวิธี วัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความ ต้านทานความร้อนของคราบกับเวลา โดยตัวแปรที่เลือกศึกษา คือ ความเข้มข้นของโปรตีน อัตราการ ไหลของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิพื้นผิว อุณหภูมิของไหล และการปรับสภาพพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ผลการทดลองสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของโปรตีนและผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอุณหภูมิไข่ขาว ที่สูงขึ้น ส่งผลต่ออัตราการเกิดคราบเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์และการปรับสภาพ พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ส่งผลกับอัตราการเกิดคราบไข่ขาวในการทดลอง

Narataruksa et al. (2010) ศึกษาการเกิดคราบจากกะทิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ แฉ่น ที่อุณหภูมิ 50-70 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 2-6 ลิตรต่อนาที โดยวัดค่าความต้านทาน ความร้อนของคราบจากค่าการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิน้ำกะทิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของคราบลดลง เนื่องจากกะทิมีสถียรภาพทางความร้อนต่ำ เมื่อ คราบกะทิได้รับอุณหภูมิสูง โครงสร้างโปรตีนที่ล้อมรอบลิติดจะเสียสภาพ ทำให้ลิติดซึ่งเป็นสารกลุ่มที่ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำหลุดออกจากโครงสร้างของคราบ กะทิ ส่วนอัตราการไหลที่ สูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานความร้อนของคราบลดลงเช่นกัน จากการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดคราบ พบว่าน้ำกะทิแสดงพฤติกรรมเกิดการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุล โดยน้ำกะทิจัดเป็นการเกิดคราบจากสาร แฉนวนลอยจากสารกลุ่มไฟเบอร์ในกะทิ และเป็นการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมีจากโปรตีนในกะทิ

Li et al. (2013) เปรียบเทียบการเกิดคราบและการทำความสะอาดคราบโปรตีนโอวัลบูมิน และเวย์โปรตีนบนพื้นผิวร้อนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม โดยอาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อคำนวณค่าความต้านทาน ความร้อนของคราบ ผลการทดลองการเกิดคราบพบว่าที่เวลาเท่ากันโปรตีนจากไข่ขาวมีความต้านทานความร้อนสูงกว่าโปรตีนเวย์ และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลาแบบเข้าสู่สมดุล ส่วนการทำความสะดวกโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าคราบที่เกิดจากโปรตีนไข่ขาวทำความสะดวกได้ยากกว่าและไม่พบสภาวะที่เหมาะสมในการทำความสะดวกคราบไข่ขาว ในช่วงความเข้มข้นของสารทำความสะดวกร้อยละ 0-2.0

Zhang et al. (2019) ศึกษาอิทธิพลของน้ำตาลที่เติมในผลิตภัณฑ์ต่อการเกิดคราบเวย์โปรตีนบนพื้นผิวร้อน ทดลองการเกิดคราบโดยใช้อุปกรณ์ทดลองแบบจานหมุน (Spinning Disc Apparatus : SDA) ที่อุณหภูมิน้ำร้อน 95 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ 68 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงมุมในการหมุน 5.2 เรเดียนต่อวินาที วัดค่าความต้านทานความร้อนของคราบโดยใช้เซนเซอร์วัดพลังค์ความร้อน การทดลองเลือกศึกษาผลของน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ต่อพฤติกรรมการเกิดคราบ ผลการทดลองพบว่า เวย์โปรตีนมีความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลาเป็นแบบเข้าสู่สมดุล และการเติมน้ำตาลลงในผลิตภัณฑ์ส่งผลให้มวลและความต้านทานความร้อนของคราบลดลงร้อยละ 30 เนื่องจากน้ำตาลช่วยให้จุดเสียดสีสภาพของโปรตีนสูงขึ้น

Zhang et al. (2020) เปรียบเทียบการเกิดคราบจากนมวัวกับการเกิดคราบจากนมอูฐโดยใช้อุปกรณ์ทดลองแบบจานหมุน วัดค่าความต้านทานความร้อนของคราบด้วยเซนเซอร์วัดพลังค์ความร้อน ทำการทดลองที่อุณหภูมิพื้นผิว 71-79 องศาเซลเซียส ความเค้นเฉือนที่แผ่นทดลอง 0.03-3.14 นิวตันต่อตารางเมตร ผลการทดลองพบว่าทั้งนมวัวและนมอูฐแสดงลักษณะการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุล โดยนมอูฐมีค่าความต้านทานความร้อนของคราบและอัตราการเกิดคราบต่ำกว่านมวัว และโครงสร้างคราบมีความพรุนสูงกว่า ซึ่งการเกิดคราบของนมวัวเกิดจากโปรตีนเบตา-แลคโตโกลบูลิน ส่วนการเกิดคราบของนมอูฐเกิดจากโปรตีนเคซีน และแอลฟา-แลคตัลบูมิน

2.4.2 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบอาหาร

Ling & Lund (1978) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบไข่ขาว โดยใช้สมการของอาร์เรเนียสวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนต่ออัตราการเกิดคราบไข่ขาว ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเกิดคราบไข่ขาว และแสดงค่าพลังงานก่อกัมมันต์ในการเกิดคราบไข่ขาว เท่ากับ 40 กิโลแคลอรีต่อโมล (ประมาณ 167.47 กิโลจูลต่อโมล) และจลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบจากโปรตีนไข่ขาวสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยา

อันดับศูนย์ ซึ่งกำหนดโดยกลไกการรวมตัวกันของโปรตีนที่เสียสภาพธรรมชาติบนพื้นผิวร้อนมากกว่า กลไกการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน

Fryer et al. (1994) ศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดคราบนม โดยระบุว่าเป็นการเกิดคราบจาก ปฏิกิริยาเคมี และตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดคราบ คือ อุณหภูมิพื้นผิวที่ทำให้เกิดคราบ โดย โปรตีนเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้นมเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ผลการทดลอง พบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ในการเกิดคราบนมมีค่าน้อยกว่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่ทำให้โปรตีนในนม เสียสภาพ ต่อมา Schteier et al., 1994 ได้นำเสนอตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคราบเวย์โปรตีน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้นมเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน และพบว่ากลไกการเกิด คราบของเวย์โปรตีนสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลไกย่อยคือ การเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน และการ รวมตัวกันของโปรตีนที่เสียสภาพธรรมชาติ ซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและสอง ตามลำดับ (Schteier et al., 1994)

Blanpain-Avet et al. (2016) ศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดคราบนม และสร้างแบบจำลอง สำหรับทำนายการเกิดคราบจากเวย์โปรตีนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น โดยศึกษาที่น้ำ ร้อนอุณหภูมิ 72.8-98.5 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์พบว่ากลไกการเสียสภาพ ธรรมชาติของโปรตีน และการรวมตัวกันของโปรตีนที่เสียสภาพธรรมชาติ ส่งผลต่อการเกิดคราบ โดย พลังงานก่อกัมมันต์ของการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนมีค่า 304.7 กิโลจูลต่อโมล มีค่ามากกว่า พลังงานก่อกัมมันต์ของการรวมตัวกันของโปรตีนที่เสียสภาพธรรมชาติ ที่มีค่า 111 กิโลจูลต่อโมล

2.4.3 การทำความสะอาดคราบไข่แดง

Gordon et al. (2012) ศึกษาการทำความสะอาดคราบเจลาตินและไข่แดง โดยตรวจวัดการ เปลี่ยนแปลงความหนาด้วยวิธี scanning Fluid Dynamic Gauge (sFDG) และเปรียบเทียบการทำ ความสะอาดคราบไข่แดงที่ไม่ผ่านความร้อนกับไข่แดงที่ผ่านความร้อนอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 1 และ 2 ชั่วโมง พบว่าคราบไข่แดงที่ผ่านความร้อนทำให้การบวมของคราบเกิดได้ยากและใช้ เวลาในการทำความสะอาดที่นานกว่า และเสนอว่าแรงที่ส่งผลให้คราบไข่แดงหลุดออกจนเกือบหมดมี ขนาดมากกว่า 10 นิวตันต่อตารางเมตร

Yang et al. (2019) ศึกษาการทำความสะอาดคราบไข่แดง โดยเปรียบเทียบไข่แดงที่ยังไม่เกิด การเสียสภาพทางโปรตีนกับคราบไข่แดงที่โปรตีนเกิดการเสียสภาพแล้ว โดยการอบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทำความสะอาดโดยใช้การไหลแบบต่อเนื่องและแบบพัลส์ (Pulsed flow) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการล้างทำความสะอาดไข่แดงคือ ความเข้มข้นของสารละลาย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และผลของการทำความสะอาดไข่แดงที่โปรตีนเกิดการเสียสภาพแล้วทำความสะอาดได้ยากกว่า

2.4.4 การเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน

Nakamura et al. (1982) ศึกษาการเกิดเจลจากความร้อนของลิโปโปรตีนความหนาแน่นต่ำ (LDL) และเปรียบเทียบกับเกิดการเกิดเจลของโปรตีนไข่ขาวและนมวัว ในช่วงอุณหภูมิช่วง 50-85 องศาเซลเซียส และ pH 2-10 โดยการวัดสภาพแข็งเกร็งของเจล (Rigidity) ผลการทดลองพบว่า ลิโปโปรตีนในไข่แดงสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 70 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เจลของไข่แดงมีปริมาณและสภาพแข็งเกร็งสูงขึ้น

Denmat et al. (1999) ศึกษาการเสียสภาพธรรมชาติของโครงสร้างไข่แดง ที่อุณหภูมิระดับพาสเจอร์ไรส์ช่วง 55-76 องศาเซลเซียส โดยแบ่งไข่แดงออกเป็น 2 ส่วน คือ Plasma ที่ประกอบด้วยโปรตีนไลเวตินและลิโปโวลเทลินิน และส่วน Granules ที่ประกอบด้วยโปรตีนฟอสโวลเทตินและลิโปโวลเทลินิน โดยผลการทดลองพบว่า Plasma เป็นส่วนที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิสูงกว่า Granules โดยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า โปรตีนไลเวตินใน Plasma เริ่มเสียสภาพที่อุณหภูมิ 62 องศาเซลเซียส และลิโปโวลเทลินิน เสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิ 72-76 องศาเซลเซียส

Nakanishi et al. (2001) ได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับโปรตีนบนพื้นผิวของแข็ง โดยระบุว่ากลไกการดูดซับและการเกาะติดของโครงสร้างโปรตีนบนพื้นผิวร้อนเกิดจากโปรตีนกลุ่มที่เสียสภาพแล้ว โดยเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic interaction) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำ (Hydrophilic interaction) และแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พันธะที่ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของโปรตีนมีปริมาณเพิ่มขึ้น

Cordobés et al. (2004) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิช่วง 60-90 องศาเซลเซียส ต่อการเกิดเจลของโปรตีน และศึกษาโครงสร้างของเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและส่องกราด ผลการทดลองระบุว่า การเกิดเจลของโปรตีนในไข่แดงเกิดจากการเสียสภาพธรรมชาติของโครงสร้างเพียงบางส่วน (น้อยกว่าร้อยละ 20 ของโครงสร้างเดิม) โดยไข่แดงสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ซึ่งกลไกการเสียสภาพส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ การเพิ่มอัตราการให้ความร้อนส่งผลให้ไข่แดงเกิดเจลเร็วขึ้น และการเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนส่งผลต่ออุณหภูมิเกิดเจล โดยเจลที่เกิดที่อุณหภูมิต่ำจะมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับไข่แดงที่ไม่ได้รับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

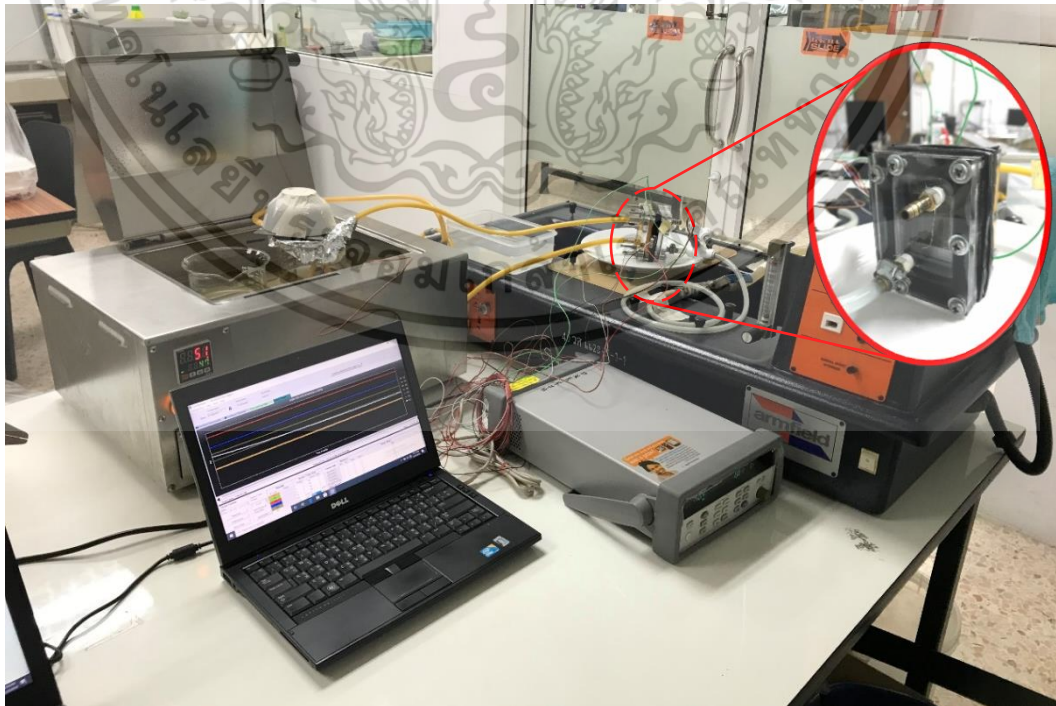
บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

ชุดทดลองการเกิดคราบ ดัดแปลงจากเครื่องพาสเจอร์ไรส์ระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Pasteuriser – FT75, Armfield, อังกฤษ) แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย หม้ออุ่นน้ำ จำนวน 2 เครื่อง ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) ปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ ภาชนะบรรจุตัวอย่าง และชุดวัดการเกิดคราบ ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์บันทึกข้อมูล เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน และสายเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิจำนวน 8 จุด เชื่อมต่อสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล โดยใช้โปรแกรม Benchlink Data Logger 3 รุ่น 4.3 พัฒนาโดย Keysight Technologies (แคลิฟอร์เนีย, สหรัฐอเมริกา) รายละเอียดการใช้โปรแกรมแสดงดังภาคผนวก ค. และรายละเอียดอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดชุดทดลองการเกิดคราบ

หมายเลข	รายละเอียด
1	หม้ออุ่นน้ำ (Memmert, เยอรมัน) ขนาด 10 ลิตร ความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ ± 0.3 องศาเซลเซียส
2	หม้ออุ่นน้ำ (Memmert, เยอรมัน) ขนาด 22 ลิตร ความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิ ± 0.3 องศาเซลเซียส
3	ปั๊มรีดท่อ (Laboratory Pasteuriser – FT75, Armfield, อังกฤษ)
4	ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Laboratory Pasteuriser – FT75, Armfield, อังกฤษ)
5	อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ (รายละเอียดดังภาคผนวก จ.)
6	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 พื้นผิว 2B ความหยาบผิว 0.4 ไมโครเมตร ขนาด 90x65x1 มิลลิเมตร
7	เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง (FHF02, Hukseflux Thermal Sensors, เนเธอร์แลนด์) (คุณลักษณะเฉพาะแสดงดังตารางที่ 3.2) ปฏิบัติ
8	ภาชนะบรรจุตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร
9	อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (34972A, Agilent, มาเลเซีย) ต่อกับช่องรับสัญญาณ (34901A, Agilent, มาเลเซีย) ความละเอียด 6 ตำแหน่ง
10	คอมพิวเตอร์ (intel CORE i7)
$T_1 - T_8$	สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ความแม่นยำ ± 2.2 องศาเซลเซียส

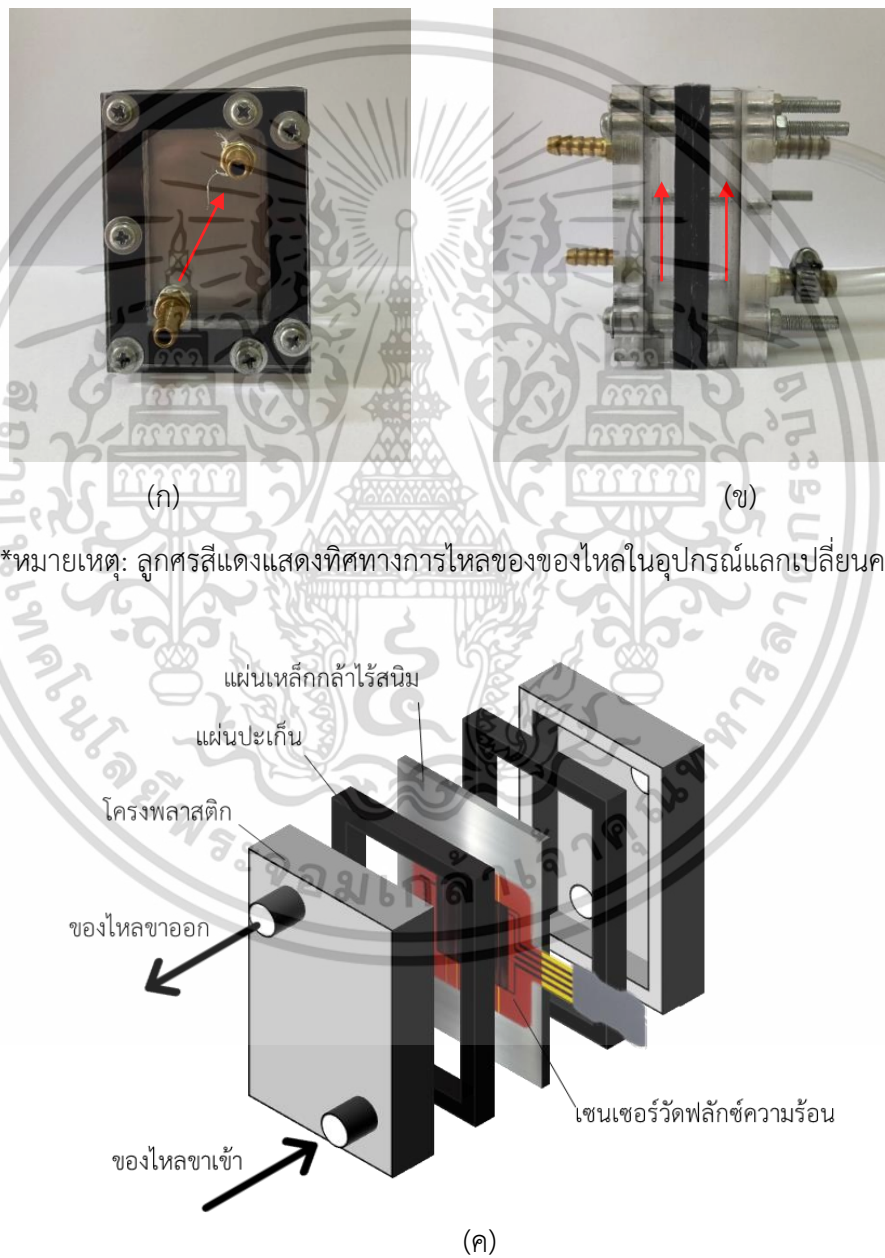
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ก และ ข) ประกอบด้วยโครงสร้างหลายชั้น ได้แก่ แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม จำนวน 1 แผ่น กั้นตรงกลางระหว่างโครงสร้างภายนอกทั้ง 2 ด้าน ซึ่งทำจากแผ่นอะคริลิกโปร่งใส ความหนา 10 มิลลิเมตร ระหว่างแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนกับโครงสร้างภายนอกมีชั้นปะเก็นสีดำทำจากซิลิโคนทนความร้อน (High temp RTV silicone) สำหรับป้องกันการรั่วซึมของของเหลว โครงสร้างต่าง ๆ ประกอบเข้ากันด้วยสกรู M5 ยาว 80 มิลลิเมตร จำนวน 7 ตัว เพื่อให้ง่ายต่อการถอดประกอบและเก็บตัวอย่างหลังการทดลอง เมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้วโครงสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นมีขนาดภายนอก 65x90x50 มิลลิเมตร ภายในมีช่องสำหรับการไหล 2 ช่อง มีระยะห่างระหว่างแผ่นกับโครงสร้าง 10 มิลลิเมตร มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 40x60 ตารางมิลลิเมตร โดยทิศทางการ

ไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบไหลในทิศทางเดียวกันจากด้านล่างขึ้นด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า

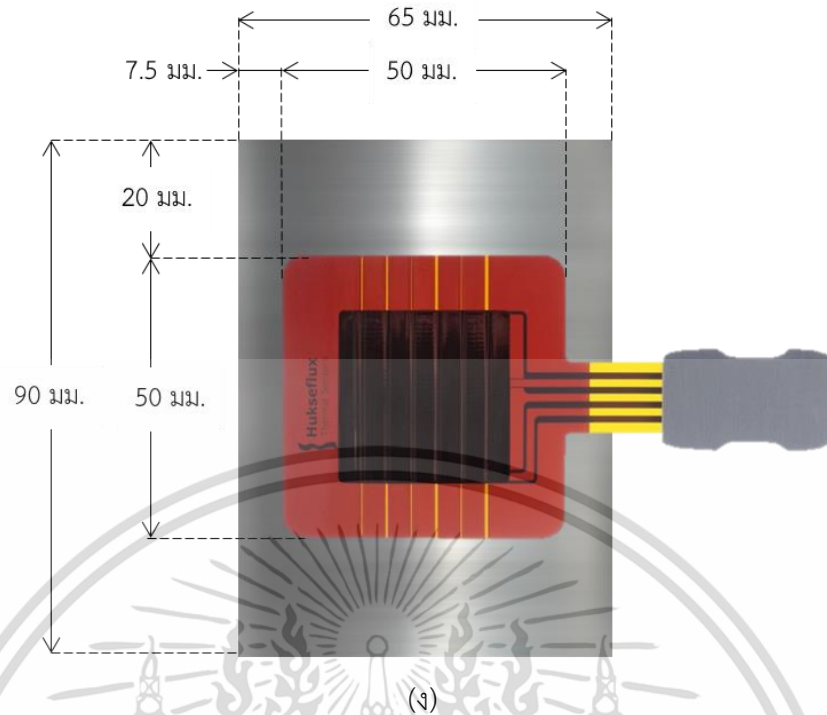
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณกลางแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้านที่สัมผัสน้ำร้อนติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง (FHF02, Hukseflux Thermal Sensors, เนเธอร์แลนด์) โดยใช้ซิลิโคนนำความร้อน (CTG8, Maxtor, จีน) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 12.8 วัตต์ต่อเมตร ประสานระหว่างเซนเซอร์และแผ่นทดลองเพื่อป้องกันการเกิดช่องอากาศที่อาจส่งผลกับค่าการถ่ายเทความร้อน ขนาดและการติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.2 (ค และ ง) รายละเอียดเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง FHF02 แสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง (ค) การประกอบอุปกรณ์

แลกเปลี่ยนความร้อน และ (ง) ขนาดและการติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 (ต่อ) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านข้าง (ค) การประกอบ
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ (ง) ขนาดและการติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง FHF02

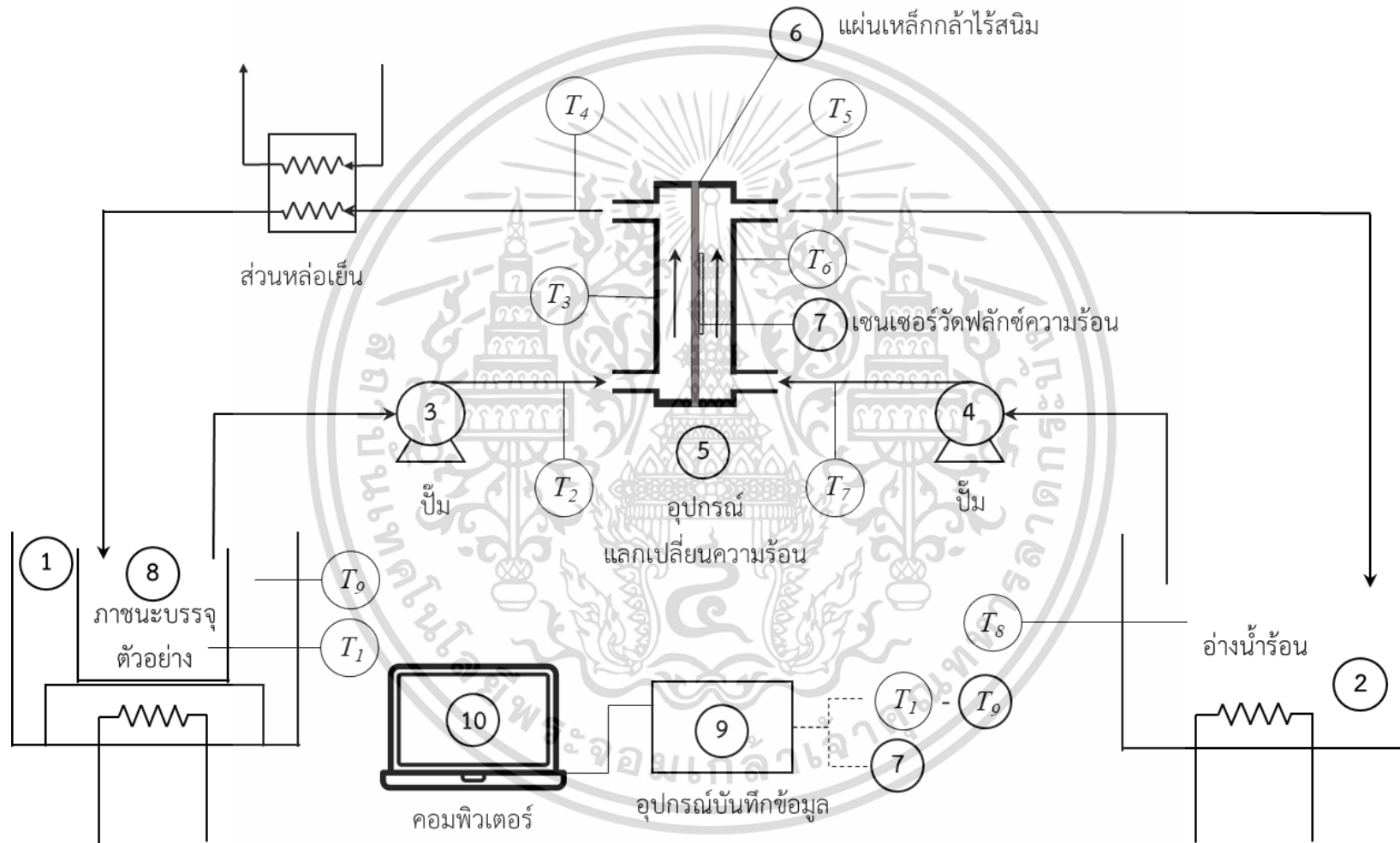
ตัวแปร	รายละเอียด
ขนาด	50x50x0.9 มิลลิเมตร
พื้นที่วัดฟลักซ์ความร้อน	9 ตารางเซนติเมตร
ชนิดของเซนเซอร์	แบบพาสซีฟ (Passive sensor)
สัญญาณขาออก	ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง
ช่วงการวัด	-10 ถึง 10 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร
ค่าความไว (sensitivity)	5.95×10^{-6} โวลต์ต่อ(วัตต์ต่อตารางเมตร)
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	0.29 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน
อุณหภูมิใช้งาน	-40 ถึง 150 องศาเซลเซียส
ความไม่เป็นเชิงเส้น	$< \pm 2\%$
เวลาตอบสนอง	10 วินาที
เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ	เทอร์มอคัปเปิล ชนิด T ความแม่นยำ ± 1.0 องศาเซลเซียส
มาตรฐาน IP	IP67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในประโยชน์ใดๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ

การทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ อธิบายดังรูปที่ 3.3 โดยหมายเลขในรูปสัมพันธ์กับรายละเอียดของอุปกรณ์ดังตารางที่ 3.1 เริ่มต้นจากเปิดการทำงานของหม้ออุ่นน้ำ (หมายเลข 1 และ 2) และปรับอุณหภูมิ โดยหม้ออุ่นน้ำหมายเลข 1 ใช้สำหรับให้ความร้อนไข่แดงพาสเจอร์ไรส์ที่ใช้ในการทดลอง และหม้ออุ่นน้ำหมายเลข 2 ใช้สำหรับให้ความร้อนน้ำที่นำไปใช้เพื่อการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีเทอร์มอคัปเปิล (หมายเลข T_8 และ T_9) สำหรับวัดอุณหภูมิในหม้ออุ่นน้ำ เมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดแล้วจึงนำไข่แดงเหลวที่ใช้ในการทดลองการเกิดคราบ ใส่ลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (หมายเลข 8) ปิดฝาภาชนะเพื่อป้องกันการสูญเสียไอน้ำระหว่างการทดลอง ภายในภาชนะมีเทอร์มอคัปเปิล (หมายเลข T_1) สำหรับวัดอุณหภูมิไข่แดง เมื่ออุณหภูมิไข่แดงได้ตามที่กำหนดแล้วจึง เริ่มต้นการทดลองโดยเปิดการทำงานของปั๊มรีดท่อ (หมายเลข 3) และปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (หมายเลข 4) สำหรับส่งของไหลที่อยู่ในอ่างน้ำร้อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข 5) ซึ่งเป็นบริเวณที่ศึกษาการเกิดคราบ โดยมีเซนเซอร์วัดพลังค์ความร้อนทำงานร่วมกับเทอร์มอคัปเปิล ชนิด T (หมายเลข 7) สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อน และอุณหภูมิพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และเทอร์มอคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของไหลก่อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข T_2 สำหรับวัดอุณหภูมิไข่แดงและ T_7 สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำร้อน) อุณหภูมิของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (หมายเลข T_3 สำหรับวัดอุณหภูมิไข่แดงและ T_6 สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำร้อน) และอุณหภูมิของไหลหลังออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (T_4 สำหรับวัดอุณหภูมิไข่แดงและ T_5 สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำร้อน) หลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน น้ำร้อนจะไหลกลับไปยังหม้ออุ่นน้ำอีกครั้งก่อนวนกลับมาใช้ใหม่ ส่วนไข่แดงเหลวจะได้รับการระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิห้อง (24 ± 0.5 องศาเซลเซียส) ก่อนไหลกลับเข้าภาชนะบรรจุตัวอย่างและไหลวนกลับเข้าส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนอีกครั้งจนกว่าการทดลองจะเสร็จสิ้น



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ

3.2 การทดลองการเกิดคราบไขแดง

3.2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ไขแดงเหลวพาสเจอร์ไรส์บรรจุขวดปริมาตร 2 ลิตร ตรา โอวีเอฟ (OVF) แสดงดังรูปที่ 3.4 (ก) เก็บที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับเป็นตัวอย่างทดลอง โดยมีอายุการใช้งานภายใน 24 ชั่วโมงหลังเปิดขวด และไม่มีการนำไขแดงที่ผ่านการทดลองแล้วกลับมาใช้ซ้ำ การทดลองการเกิดคราบไขแดงเหลวปริมาตร 400 มิลลิลิตร ในหนึ่งการทดลอง โดยเริ่มต้นจากการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ไขแดงเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะบรรจุตัวอย่าง ผ่านน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิ 50 ± 0.5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งไขแดงเหลวมีอุณหภูมิ 40 ± 0.5 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนก่อนเริ่มทดลอง (Lung & Lund, 1978) จึงเริ่มการทดลอง โดยการให้ความร้อนเบื้องต้นใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาที และไขแดงที่อยู่ในภาชนะบรรจุสำหรับการให้ความร้อนเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 3.4 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 การเตรียมตัวอย่างทดลอง (ก) ไขแดงเหลวพาสเจอร์ไรส์ขนาด 2 ลิตร ตรา โอวีเอฟ (OVF) (ข) การให้ความร้อนไขแดงเบื้องต้น

3.2.2 การทดลองการเกิดคราบ

หลังจากการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ไขแดงเหลวจนได้อุณหภูมิตามที่กำหนดแล้ว จึงเปิดการทำงานของปั๊มเพื่อส่งไขแดงและน้ำร้อนเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและเริ่มจับเวลา โดยในงานวิจัยได้ศึกษาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ คือ อุณหภูมิพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้-สนิม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน 5 ระดับ ได้แก่ 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส โดยพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมได้รับความร้อนจากน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70, 75, 80, 85 และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีปัจจัยควบคุม คือ อัตราการไหลของน้ำร้อนและไข่แดง เท่ากับ 48.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที และ 4.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยการไหลของไข่แดงเหลวในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นแสดงลักษณะการไหลแบบราบเรียบ ซึ่งสอดคล้องกับการไหลในระดับอุทศาสตร์ (Re<1200) (Gut et al., 2005) ทำการทดลองการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมระยะเวลา 90 นาที หลังจากเปิดการทำงานของปั๊ม ระหว่างการทดลองบันทึกข้อมูลค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม อุณหภูมิพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และอุณหภูมิของไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ (หมายเลข T_1 ถึง T_9 ดังรูปที่ 3.3) ที่ได้จากเทอร์มอคัปเปิลและเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์ในลำดับถัดไป โดยการทดลองการเกิดคราบไข่แดงทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3.2.3 การวัดและวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดคราบไข่แดง

หลังการทดลองการเกิดคราบสิ้นสุดลง ทำการถอดประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากนั้นนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมมาเช็ดทำความสะอาดไข่แดงเหลวที่เปื้อนอยู่นอกพื้นที่การวิเคราะห์คราบ และนำแผ่นทดลองที่มีคราบไข่แดงเกาะไปวัดตัวแปรต่าง ๆ ทันที โดยเริ่มจากมวลคราบไข่แดงตามด้วยการวัดความหนา การวัดใช้เวลาไม่เกิน 30 นาที โดยตัวอย่างคราบไข่แดงที่เกาะบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมหลังการถอดประกอบอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 คราบไข่แดงที่เกาะบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การวัดมวล

มวลคราบไขแดงวัดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน) ความละเอียด 0.001 กรัม โดยนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคราบเกาะมาวัดทั้งแผ่น ทำการวัด 1 ครั้ง เปรียบเทียบผลต่างระหว่างน้ำหนักแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (ข้อมูลน้ำหนักแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมแสดงดังภาคผนวก ก.) ก่อนการทดลองการเกิดคราบและหลังการทดลองการเกิดคราบ เพื่อหามวลของคราบไขแดง และนำเสนอมวลของคราบไขแดงในหน่วยกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป การวัดมวลของคราบไขแดงแสดงดังรูปที่ 3.6

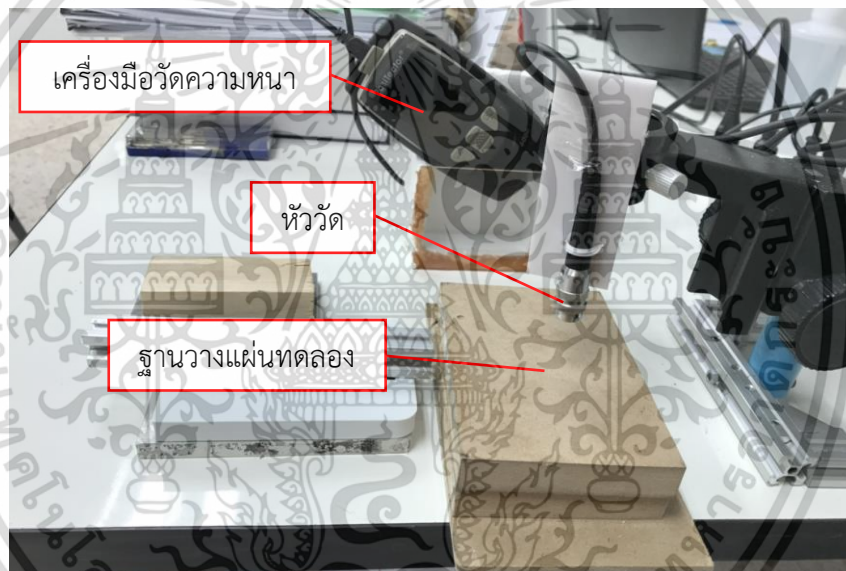
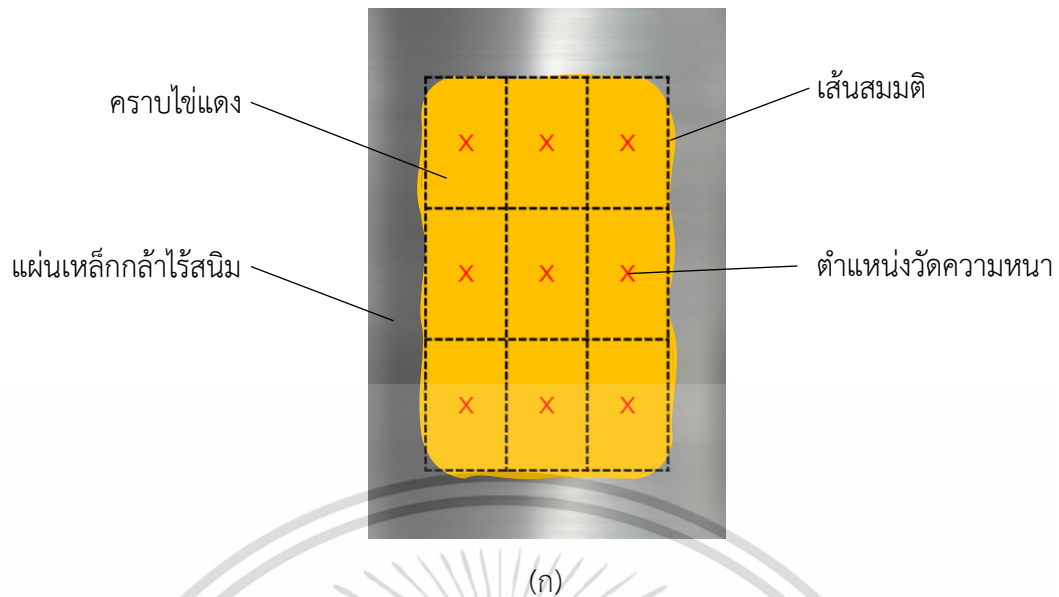


รูปที่ 3.6 การวัดมวลคราบไขแดง

2) การวัดความหนาคราบ

ความหนาคราบไขแดงวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนา (Positector 6000 FNS1, DelFelsko, สหรัฐอเมริกา) ความละเอียด 1 ไมโครเมตร วัดความหนา 9 ตำแหน่ง ทั่วทั้งแผ่นทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) ตำแหน่งละ 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าที่วัดได้ทั้งหมดคำนวณเป็นค่าความหนาของคราบบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเฉลี่ย เพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป โดยชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูปที่ 3.7 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การวัดความหนาคราบ (ก) ตำแหน่งการวัดความหนาคราบไขแดง

(ข) ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความหนา

3) การวัดและการวิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของคราบ

ค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงวัดโดยใช้วิธีวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เริ่มต้นจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) พิจารณาได้จากสมการที่ 2.3 (หัวข้อที่ 2.1.4) โดยค่าฟลักซ์ความร้อน (Q/A) ได้จากอัตราส่วนระหว่างสัญญาณขาออกของเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน (V_{output}) กับค่าความไวของเซนเซอร์ (S) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงดังสมการที่ 3.1 และผลต่างของอุณหภูมิทั้ง 2 ด้านของแผ่นทดลอง ได้จากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลในที่มีค่าเท่ากับ $T_6 - T_3$

$$\frac{Q}{A} = \frac{V_{output}}{S} \quad (3.1)$$

ค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงคำนวณได้จากผลต่างของส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ($1/U_i$) กับค่าที่สภาวะเริ่มต้นการทดลอง ($1/U_0$) แสดงดังสมการที่ 2.4 (แสดงดังหัวข้อที่ 2.1.4)

จากนั้นวิเคราะห์การเกิดคราบโดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงกับเวลา สร้างเส้นแนวโน้มการเกิดคราบและหาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคราบ ได้แก่ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่สภาวะสมดุล (R_f^*) และเวลาในการเข้าสู่สมดุล (t^*) ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองการเกิดคราบที่นำเสนอโดย Kern & Seaton (1959) แสดงดังสมการที่ 2.6 (หัวข้อที่ 2.1.4) และคำนวณหาค่าร้อยละการเข้าสู่สมดุลของค่าความต้านทานความร้อน จากอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่เวลาใด ๆ กับค่าความต้านทานความร้อนที่สภาวะสมดุล (R_f/R_f^*)

สำหรับอัตราการเกิดคราบ พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงกับเวลา คำนวณได้จากสมการที่ 3.2 และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน พิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาใด ๆ กับที่สภาวะเริ่มต้น (U_i/U_0)

$$k = \frac{\Delta R_f}{\Delta t} \quad (3.2)$$

โดยที่ k คือ อัตราการเกิดคราบ ((ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์)ต่อนาที)
 ΔR_f คือ ผลต่างของค่าความต้านทานความร้อนคราบไขแดง (ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์)
 Δt คือ ผลต่างของเวลา ในที่นี้พิจารณาทุก 10 นาที

4) การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบไขแดง

จลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบไขแดง เป็นการวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่ออัตรา

การเกิดคราบไขแดงจากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงในระหว่างการ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นใบเก็บระเบียนดำเนินการ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลอง โดยการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์พิจารณาการเกิดคราบไขแดงจากช่วงเริ่มต้นจนถึงร้อยละ 80 ของค่าความต้านทานความร้อนคราบที่สภาวะสมดุล ($0.8 R_f^*$) และเปรียบเทียบปฏิกิริยาการเกิดอันดับศูนย์และอันดับหนึ่ง ซึ่งได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงกับเวลา (กราฟ $R_f - t$) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงกับเวลา (กราฟ $\ln R_f - t$) ตามลำดับ โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ (k_0) พิจารณาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงกับเวลา (กราฟ $R_f - t$) แสดงดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 โดยที่ $R_{f(t=0)}$ คือ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่เวลาเริ่มต้น

$$R_f(t) = k_0 t + R_{f(t=0)} \quad (3.3)$$

$$k_0 = \frac{\Delta R_f}{\Delta t} \quad (3.4)$$

สำหรับค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (k_1) พิจารณาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของค่าความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลา (กราฟ $\ln R_f - t$) แสดงดังสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$\ln R_f(t) = k_1 t + \ln R_{f(t=0)} \quad (3.5)$$

$$k_1 = \frac{\Delta \ln R_f}{\Delta t} \quad (3.6)$$

โดยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ พลังงานก่อกัมมันต์ และแฟกเตอร์ความถี่ ซึ่งได้จากสมการความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียส ดังสมการที่ 2.10 (หัวข้อที่ 2.3) หาโดยนำค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์และหนึ่ง ($\ln k_0$ และ $\ln k_1$) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับส่วนกลับของอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน ($1/T$) และทำการการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น จะได้ความชันของกราฟมีค่า เท่ากับ อัตราส่วนระหว่างค่าลบของพลังงานก่อกัมมันต์กับค่าคงที่ของแก๊ส ($-E_a / R$) และจุดตัดแกนตั้งมีค่า เท่ากับ ค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของแฟกเตอร์ความถี่ ($\ln Z$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลองการทำความสะอาดคราบไข่แดง

3.3.1 รายละเอียดการทดลอง

การทดลองการทำความสะอาดคราบเริ่มขึ้นภายใน 30 นาที หลังการทดลองการเกิดคราบ การวัดมวล และการวัดความหนาเสร็จสิ้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของคราบที่อาจส่งผลกระทบต่อ การทำความสะอาด ทำการทดลองโดยการจุ่มแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคราบไข่แดงเกาะอยู่ลงในสารทำความสะอาดปริมาตร 1 ลิตร เพื่อศึกษาการหลุดออกของคราบเชิงพื้นที่ โดยมีสารทำความสะอาดเป็น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยมวลต่อปริมาตร การทดลองทำขึ้นที่อุณหภูมิห้อง (25.1 ± 1.4 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเลือกความเข้มข้นในการทำ ความสะอาดตามงานวิจัยของ Helbig et al. (2019) ที่ได้รับบุสภาวะที่เหมาะสมสำหรับทำความสะอาด คราบไข่แดงโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 0-0.5 โดยการแช่คราบไข่แดงใน สารทำความสะอาดแสดงดังรูปที่ 3.8



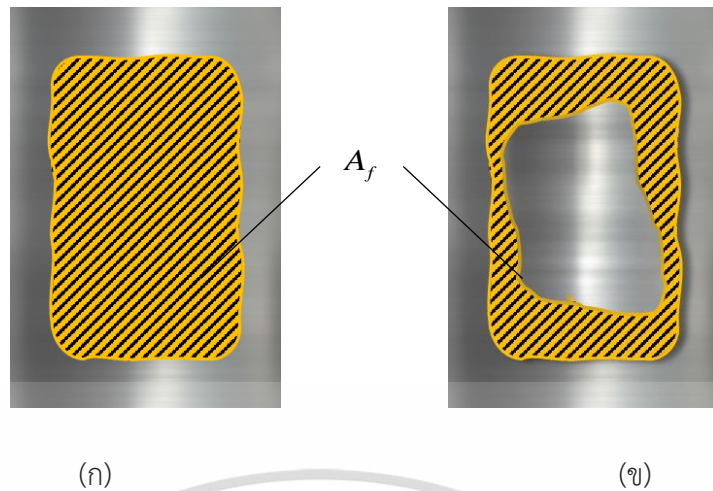
รูปที่ 3.8 การแช่คราบไข่แดงในสารทำความสะอาด

3.3.2 การวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลการทำความสะอาด

ข้อมูลจากการทดลองทำความสะอาด อาศัยการวิเคราะห์การหลุดออกของคราบไข่แดงในสาร ทำความสะอาด โดยใช้เครื่องมือวัดความนำไฟฟ้า (EUTCH CON 150, Thermo SCIENTIFIC, สิงคโปร์) ความละเอียด 0.01 มิลลิซีเมนส์ และการหลุดออกของคราบในเชิงพื้นที่ ตามงานวิจัยของ Yang et al. (2019) โดยคราบที่เหลือบนพื้นผิว (A_f) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่คราบที่ เวลาใด ๆ กับ พื้นที่คราบเริ่มต้น (A_f / A_0) การวิเคราะห์พื้นที่คราบไข่แดง แสดงดังรูปที่ 3.9

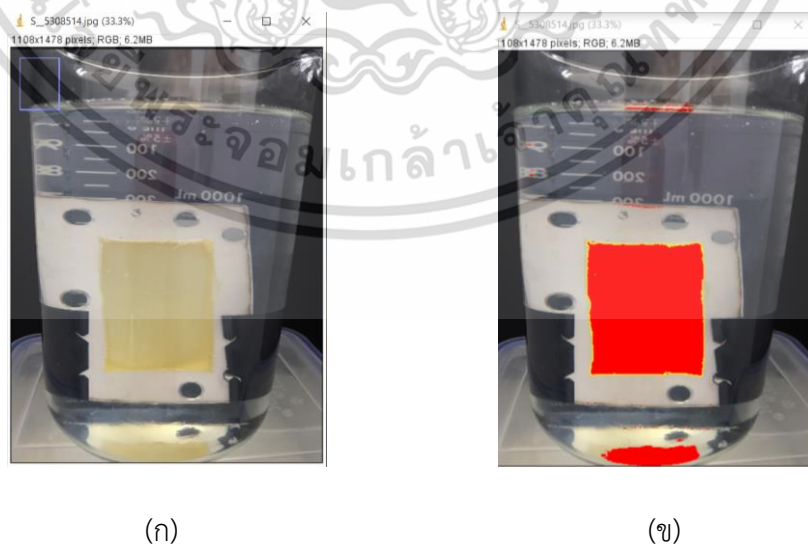
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ อนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 การวิเคราะห์พื้นที่คราบไขแดง (ก) ที่เวลาเริ่มต้น $A_f = A_0$ (ข) ที่เวลาใด ๆ $A_f = A_t$

โดยค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 0-1 จะมีค่าเป็น 1 ที่สภาวะเริ่มต้นทำความสะอาด และมีค่าเท่ากับ 0 ที่สภาวะการทำความสะอาดสมบูรณ์ (Yang et al., 2019) การทดลองบันทึกภาพโดยกล้องถ่ายภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (iPhone7, Apple, จีน) ความละเอียด 12 ล้านพิกเซล รูรับแสงขนาด $f/1.8$ บันทึกภาพนิ่ง และอ่านค่าความนำไฟฟ้าของสารทำความสะอาดทุก 10 นาที ภาพที่ได้นำไปวิเคราะห์การหลุดออกของคราบแข็งพื้นที่ด้วย โปรแกรม Image J รุ่น 1.53e พัฒนาโดยสถาบันพัฒนาสุขภาพแห่งชาติ (National institutes of health, แมริแลนด์, สหรัฐอเมริกา) วิเคราะห์พื้นที่ภาพโดยใช้คำสั่ง Color Threshold ระบบสี RGB รายละเอียดการใช้โปรแกรม Image J แสดงดังภาคผนวก ง. และตัวอย่างภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์การหลุดออกของคราบแสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการใช้คำสั่ง Color Threshold ระบบสี RGB (ก) คือ ภาพก่อนใช้คำสั่ง Color Threshold และ (ข) ภาพหลังใช้คำสั่ง Color Threshold

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การออกแบบการทดลองใช้แบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 และ 0.99 เพื่อบ่งชี้ความแตกต่างระหว่างกลุ่มตัวอย่าง และวิเคราะห์ความแตกต่างด้วยวิธีของตุกี (Tukey's HSD test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 เส้นกราฟการเกิดคราบที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ สร้างจากการวิเคราะห์การถดถอยหลายตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Multiple nonlinear regression) การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบไขแดงใช้การวิเคราะห์การถดถอยแบบเป็นเชิงเส้น (Linear regression)



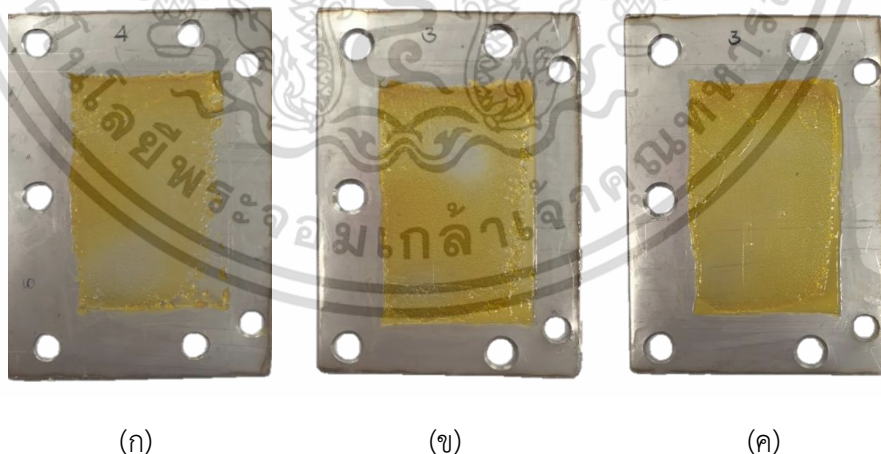
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

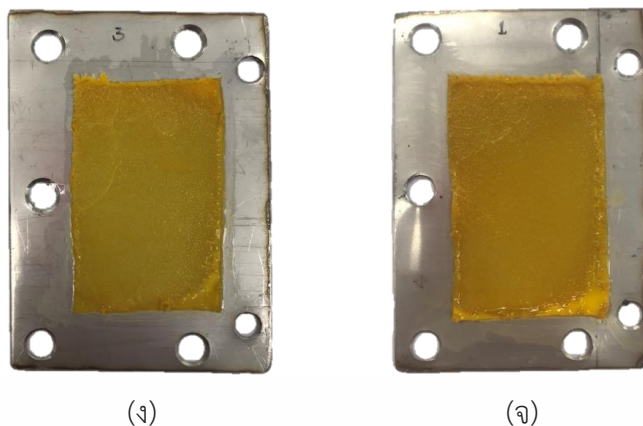
4.1 กลไกและพฤติกรรมการเกิดคราบไข่แดง

จากการทดลองการเกิดคราบไข่แดงเหลวบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ พบว่า มีคราบไข่แดงเกิดขึ้นบนแผ่นทดลองทุกช่วงอุณหภูมิ โดยคราบไข่แดงมีลักษณะเป็นเจลสีเหลือง ส้ม โปรงแสง เกาะแน่นอยู่บนแผ่นทดลอง ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งคราบจากอาหารกลุ่มที่มีลิพิดและโปรตีน เป็นองค์ประกอบ (เช่น กะทิ นมวัว และนมอูฐ เป็นต้น) เกิดจากกลไกการเกาะติดของโครงสร้างโปรตีนที่เสียสภาพธรรมชาติแล้วบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยลิพิดไม่มีบทบาทในปฏิกิริยาทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคราบอย่างมีนัยสำคัญ (Zhang et al., 2019) เช่น การเกิดคราบจากกะทิ ที่มีอัตราส่วนระหว่างลิพิดและโปรตีนสูงกว่าไข่แดง โดย Narataruksa et al. (2010) ระบุว่าแม้ลิพิด จะมีปริมาณสูง แต่โปรตีนยังเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้กะทิเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้น จึงพิจารณาการเกิดคราบไข่แดงเป็นคราบที่เกิดจากจากปฏิกิริยาเคมีของสารกลุ่มโปรตีน เช่นเดียวกับคราบกะทิ (Narataruksa et al., 2010) คราบนมวัว และคราบนมอูฐ (Zhang et al., 2020)



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างคราบไข่แดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมหลังสิ้นสุดการทดลอง (90 นาที) ที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ (ก) 60 องศาเซลเซียส, (ข) 65 องศาเซลเซียส, (ค) 70 องศาเซลเซียส, (ง) 75 องศาเซลเซียส และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



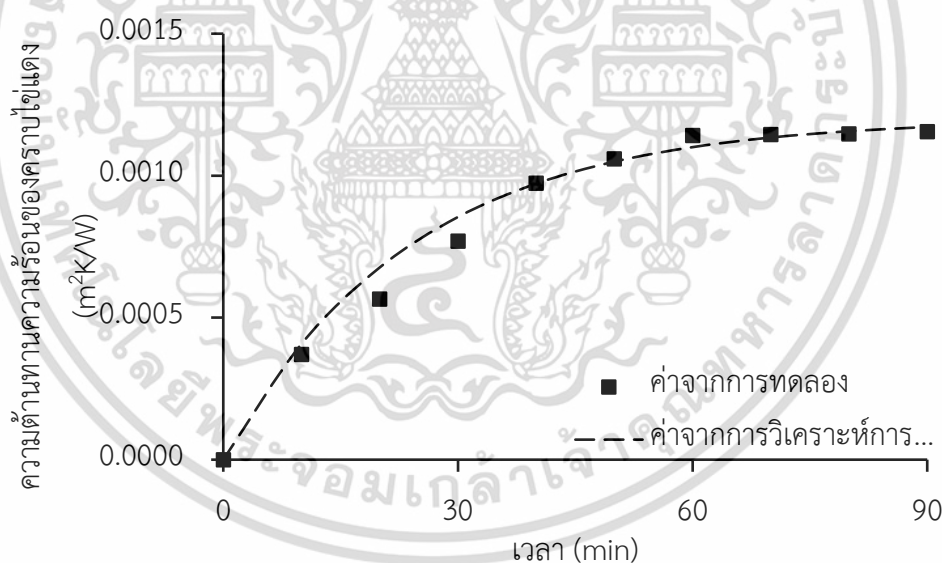
รูปที่ 4.1 (ต่อ) ตัวอย่างคราบไขแดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมหลังสิ้นสุดการทดลอง (90 นาที) ที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ (ก) 60 องศาเซลเซียส, (ข) 65 องศาเซลเซียส, (ค) 70 องศาเซลเซียส, (ง) 75 องศาเซลเซียส และ (จ) 80 องศาเซลเซียส

คราบไขแดงที่เกาะติดบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดจากโปรตีนกลุ่ม Plasma (Le Denmat et al., 1999) ในไขแดง ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนไลเวตินและโปรตีนลิโฟเวเทลลินิน (ลิโฟโปรตีนความหนาแน่นต่ำ: LDL) ได้รับความร้อนและเกิดการเสียสภาพธรรมชาติ ซึ่งโปรตีนไลเวตินเสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และโปรตีนลิโฟเวเทลลินินเสียสภาพธรรมชาติที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส (Le Denmat et al., 1999) และเกิดการคลายตัว (Cordobés et al., 2004) เมื่อโครงสร้างตั้งกล่าวสัมผัสกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง จะเกิดการรวมตัวของโครงสร้างโปรตีนที่เสียสภาพแล้วบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดเป็นคราบไขแดงชั้นแรก ซึ่งเกิดจากกลไกการดูดซับโปรตีนที่เสียสภาพแล้วของพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ที่มีโครงสร้างชั้นนอกเป็นออกไซด์ของโครเมียม ด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) (Nakanishi et al., 2001) และแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำ (Hydrophilic interaction) สำหรับคราบชั้นที่สองเป็นการเกาะติดบนชั้นคราบเดิม จากการรวมตัวกันของโครงสร้างโปรตีนที่เสียสภาพแล้วบนชั้นโปรตีน ซึ่งพันธะระหว่างโมเลกุลที่มีบทบาทในการยึดโครงสร้างของคราบไขแดง คือ พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ แรงแวนเดอร์วาลส์ และพันธะไดซัลไฟด์ (ณัฐมล, 2550)

คราบที่เกิดขึ้นส่งผลต่อกระบวนการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากชั้นคราบที่เกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่เป็นเหมือนชั้นฉนวนความร้อน (Awad, 2011) สามารถพิจารณาได้จากค่าความต้านทานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้บ่งชี้ปริมาณการเกิดคราบและพฤติกรรมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดคราบไขมัน โดยใช้อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นปัจจัยที่ควบคุมกลไกเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขมันที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิและเวลาใด ๆ พบว่า การเกิดคราบไขมันมีลักษณะและแนวโน้มเดียวกันในทุกอุณหภูมิ โดยรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของคราบไขมันกับเวลา ที่อุณหภูมิพื้นผิว 70 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่า ความต้านทานความร้อนของคราบไขมันเพิ่มขึ้นต่อเนื่องอย่างไม่เป็นเชิงเส้นในช่วงเริ่มต้น โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานความร้อนอย่างต่อเนื่องตามความหนาของคราบที่เพิ่มขึ้นนี้ แสดงถึงการถ่ายเทความร้อนไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่เริ่มมีการเกาะติดของคราบไขมันในชั้นแรก หรือไม่ได้รับผลกระทบต่อพลศาสตร์การไหลของไหลในระบบ (Awad,2011) ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อนที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงของความหนาคราบไขมัน จึงมีความคลาดเคลื่อนน้อยและมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของคราบไขมันกับเวลา ที่อุณหภูมิพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม 70 องศาเซลเซียส

พฤติกรรมการสะสมของคราบไขมันเหลวบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถพิจารณาได้จากกราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขมันที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุล (Asymptotic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fouling) นั่นคือ ที่สภาวะสมดุลของการเกิดคราบ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบมีแนวโน้มคงที่ อัตราการเกาะติดมีค่าเท่ากับอัตราการหลุดออกของคราบ หรือไม่มีอัตราการเกิดคราบเพิ่มขึ้น (Bott, 1995, Awad, 2011) เนื่องจากชั้นคราบที่เกาะบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนมีความหนาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวหน้าระหว่างไข่แดงเหลืองและชั้นคราบลดลง โดยคราบไข่แดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำ จึงทำให้ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนทั้งหมดไปที่ผิวหน้าระหว่างชั้นคราบกับไข่แดงเหลืองได้ ส่งผลต่ออัตราการเกิดคราบและความแข็งแรงของคราบ และเมื่อความหนาของคราบเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ที่อุณหภูมิผิวหน้าระหว่างไข่แดงเหลืองและชั้นคราบต่ำกว่าจุดที่สามารถทำให้โปรตีนในไข่แดงเสียสภาพธรรมชาติ การเกาะติดของชั้นคราบใหม่จึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ พิจารณาได้จากค่าความต้านทานความร้อนของคราบซึ่งมีแนวโน้มคงที่ โดยพฤติกรรมการเกิดเกาะติดของคราบไข่แดงมีลักษณะเช่นเดียวกับอาหารกลุ่มที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไข่ขาว (Li et al., 2013) นมวัว (Zhang et al., 2020) เวย์โปรตีน (Zhang et al., 2019) หรือกะทิ (Law et al., 2009, Narataruksa et al., 2010) อย่างไรก็ตาม ค่าความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงมีปริมาณที่แตกต่างกับค่าความต้านทานความร้อนของคราบชนิดอื่น เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีและปัจจัยในการทดลองที่แตกต่างกัน

การเกาะติดของคราบไข่แดงบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดขึ้นทันทีที่เริ่มการทดลอง นั่นคือ การสะสมของคราบไข่แดงไม่แสดงระยะเหนี่ยวนำของการเกิดคราบ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดคราบของอาหารเหลวชนิดอื่น เช่น การเกิดคราบน้ำกะทิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Narataruksa et al., 2010) การเกิดคราบนมและเวย์โปรตีนในชุดทดลองแบบจานหมุน (Zhang et al., 2019, Zhang et al., 2020) และการเกิดคราบไข่ขาวในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Li et al., 2013) เป็นต้น โดยระยะเหนี่ยวนำการเกิดคราบมีความสัมพันธ์กับหลายปัจจัย เช่น ความหยาบผิว อุณหภูมิพื้นผิว และชนิดของสารก่อคราบ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ระยะเหนี่ยวนำการเกิดคราบ เป็นช่วงเวลาที่ไม่สามารถทำนายได้ (Awad, 2011) การเกิดคราบบางชนิดอาจปรากฏระยะเหนี่ยวนำที่อุปกรณ์หนึ่ง แต่เมื่อเปลี่ยนกระบวนการให้ความร้อนอาจไม่ปรากฏระยะเหนี่ยวนำของการเกิดคราบ (Law et al., 2009, Narataruksa et al., 2010) โดยการปรับสภาพพื้นผิวและการเคลือบพื้นผิวด้วยสารป้องกันการเกิดคราบสามารถเพิ่มระยะเหนี่ยวนำการเกิดคราบได้ (Ling & Lund, 1978) ซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวที่มีต่อพฤติกรรมเกิดการเกิดคราบและการทำความสะอาดคราบไขแดง

อุณหภูมิพื้นผิวที่ทำให้เกิดคราบ เป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อทั้งกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนและการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี (Awad, 2011) ในส่วนนี้นำเสนออิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวที่มีต่อพฤติกรรมเกิดการเกิดคราบไขแดง การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์คราบไขแดง และอิทธิพลต่อการทำความสะอาดคราบไขแดง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวที่มีต่อพฤติกรรมเกิดการเกิดคราบไขแดง

จากการทดลองการเกิดคราบไขแดงบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวมีผลต่อเกิดการเกาะติดของไขแดง ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความต้านทานความร้อนของคราบ อัตราการเกิดคราบ ความหนาเฉลี่ยของคราบ มวลของคราบ และสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์ ดังนี้

1) ความต้านทานความร้อนและอัตราการเกิดคราบไขแดง

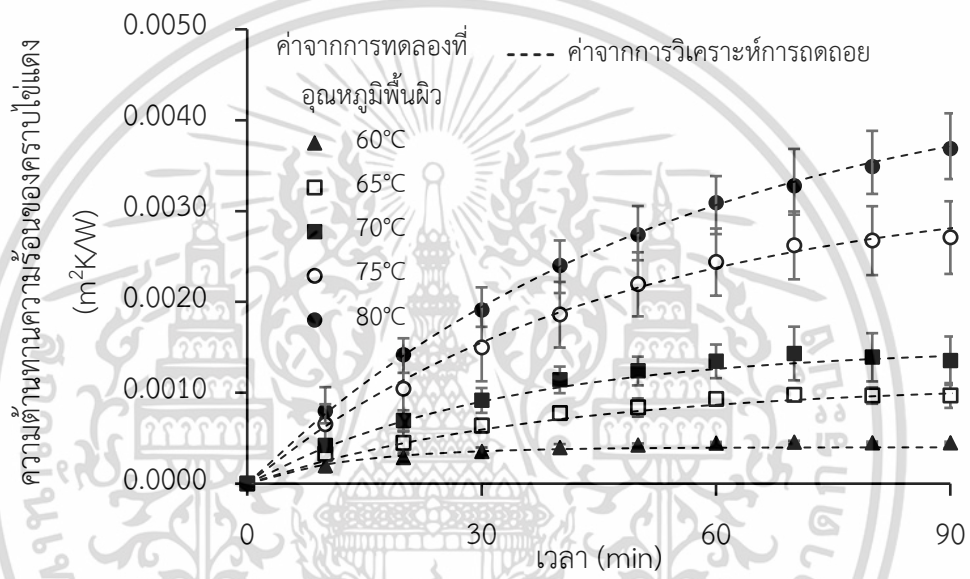
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนและอัตราการเกิดคราบไขแดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่เวลาใด ๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ โดยเส้นประในรูปแสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานความร้อนและอัตราการเกิดคราบที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามสมการแบบจำลองการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุลของ Kern & Seaton (1959) (สมการที่ 2.6 หัวข้อที่ 2.1.4)

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 - 4.5 พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานความร้อนซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณการเกาะติดของคราบไขแดงและอัตราการเกิดคราบไขแดงบนพื้นผิว ($p < 0.01$) โดยเมื่อพิจารณาระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เวลาเดียวกัน อุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของคราบและอัตราการเกิดคราบไขแดงมีค่าเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลา 90 นาที ค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส ที่ 0.0037 ± 0.0004 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ และลดลงเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวลดลง ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Ling & Lund (1978) ที่ศึกษาการเกิดคราบของโปรตีนไข่ขาว และ Zhang et al. (2020) ที่ศึกษาการเกิดคราบของโปรตีนในนมอูฐ อย่างไรก็ตาม ผลวิจัยที่ได้นี้ขัดแย้งกับงานวิจัยของ Narataruksa et al. (2010) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับการเกิดคราบของกะทิ โดย พบว่า เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้นค่าความต้านทานความร้อนของคราบกะทิลกลับมีค่าลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้

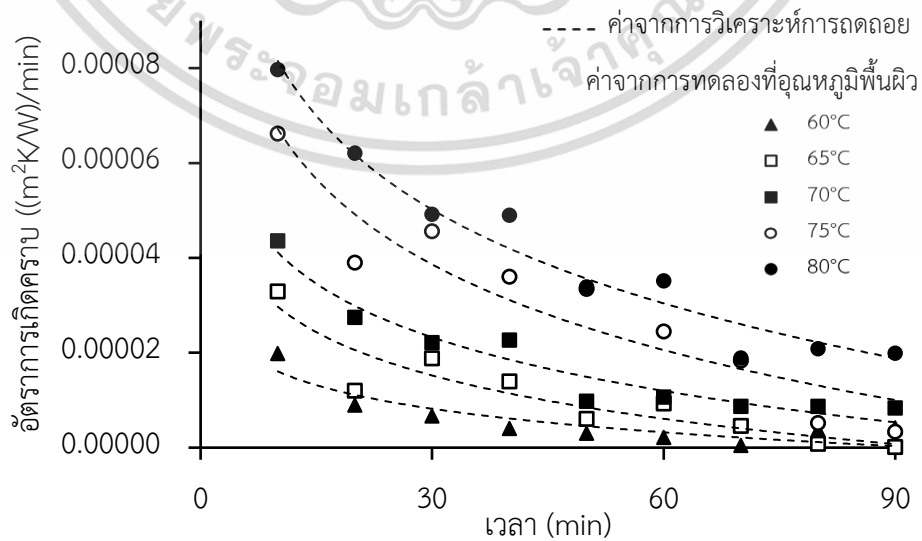
โครงสร้างโปรตีนที่ล้อมรอบลิพิดเสียหาย ทำให้ลิพิดซึ่งเป็นสารกลุ่มที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนต่ำหลุดออกจากโครงสร้างของคราบ ความต้านทานความร้อนของคราบกะทิจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สังเกตได้จากชั้นไขมันที่ลอยขึ้นหลังกะทิผ่านการให้ความร้อน ในขณะที่ไข่แดงมีโครงสร้างที่ทนต่อความร้อนได้สูงกว่ากะทิ เนื่องจากโปรตีนกะทิเริ่มเสียสภาพธรรมชาติตั้งแต่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (Narataruksa et al., 2010) ทำให้ไข่แดงมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) สูงกว่า ลิพิดส่วนใหญ่จึงไม่หลุดออกจากโครงสร้างของคราบ สังเกตได้จากการไม่พบชั้นไขมันในภาชนะบรรจุไข่แดงหลังสิ้นสุดการทดลอง แม้ว่าโครงสร้างทางเคมีของไข่แดงจะมีการรวมตัวกันของโปรตีนและลิพิดใกล้เคียงกับโครงสร้างกะทิก็คตาม

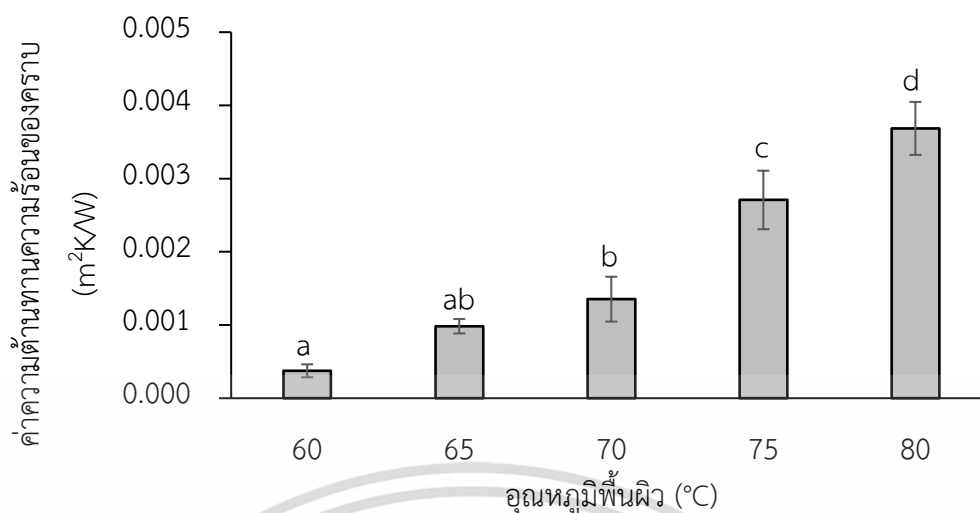


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงที่เวลาใด ๆ



รูปที่ 4.4 อัตราการเกิดคราบไข่แดงเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ: ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงที่เวลา 90 นาที

การเกิดคราบที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ มีระยะเวลาการเข้าสู่สมดุล และค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่จุดสมดุลแตกต่างกัน พิจารณาได้จากการวิเคราะห์การถดถอยของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงที่เวลาใด ๆ กับแบบจำลองการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุลของ Kern & Seaton (1959) (สมการที่ 2.6 หัวข้อที่ 2.1.4) ดึงเส้นประในรูปที่ 4.3 โดยค่าความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงที่สภาวะสมดุล กับเวลาในการเข้าสู่สมดุลที่ได้จากการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์การถดถอยของการเข้าสู่สมดุลของคราบไข่แดง

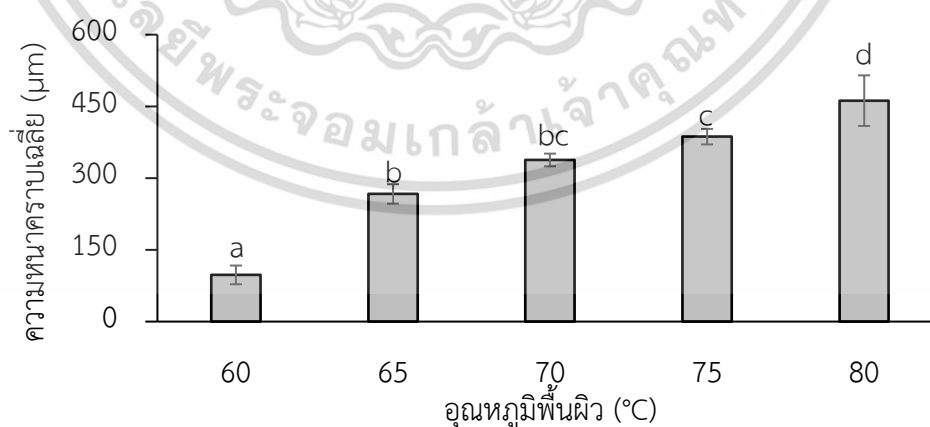
อุณหภูมิพื้นผิว (องศาเซลเซียส)	การวิเคราะห์การถดถอย		R ²
	ความต้านทานความร้อนของคราบที่สภาวะสมดุล (ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์)	เวลาการเข้าสู่ สมดุล (นาที)	
60	0.0004±0.0000a	31.45±7.11a	0.98
65	0.0011±0.0002ab	51.70±15.00b	0.98
70	0.0015±0.0004b	61.29±11.02c	0.99
75	0.0033±0.0013c	74.87±10.95d	0.99
80	0.0046±0.0005d	86.74±11.19e	0.99

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 สามารถพิจารณาได้ว่า อุณหภูมิพื้นผิวส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงที่สภาวะสมดุลและค่าคงที่ของเวลาในการเข้าสู่สมดุล ($p < 0.01$) โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้คราบใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนานขึ้น และมีความต้านทานความร้อนที่สภาวะสมดุลสูงขึ้น ในการเกิดคราบที่อุณหภูมิพื้นผิว 60 องศาเซลเซียส คราบไขแดงมีระยะเวลาการเข้าสู่สมดุล 31.45 ± 7.11 นาที และความต้านทานความร้อนของคราบที่จุดสมดุลมีค่า 0.004 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงที่อุณหภูมิพื้นผิว 60 องศาเซลเซียส รูปที่ 4.3 ที่พบว่า ค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงแทบไม่เปลี่ยนแปลงหลังเวลา 30 นาที ส่วนการเกิดคราบที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส พบว่า คราบมีระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลนานที่สุดที่เวลา 86.74 ± 11.19 นาที และมีความต้านทานความร้อนของคราบที่จุดสมดุลสูงสุดที่ 0.0046 ± 0.0005 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์

2) ความหนาเฉลี่ยและมวลของคราบไขแดง

ค่าความหนาเฉลี่ยและมวลของคราบไขแดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานความร้อน โดยความหนาคราบเฉลี่ยและมวลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของคราบสูงขึ้น (Awad, 2011) ที่เวลาในการเกิดคราบ 90 นาที พบว่า ความหนาเฉลี่ยและมวลของคราบได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากอุณหภูมิพื้นผิว ($p < 0.01$) โดยมีค่าความหนาคราบเฉลี่ยสูงสุด 462 ± 53 ไมโครเมตร และมีมวลคราบสูงสุด 0.061 ± 0.004 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส และมีค่าต่ำสุด ที่อุณหภูมิพื้นผิว 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.6



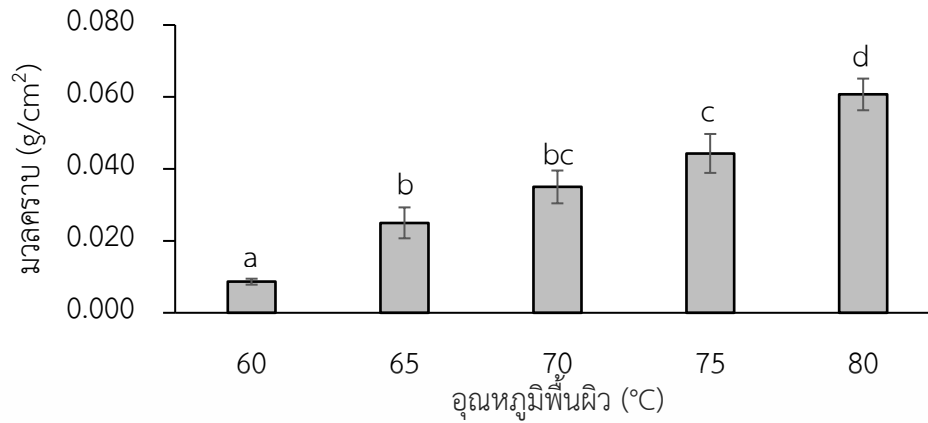
(ก)

หมายเหตุ: ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

รูปที่ 4.6 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อ (ก) ความหนาคราบเฉลี่ย และ (ข) มวลของคราบไขแดงที่

เวลา 90 นาที

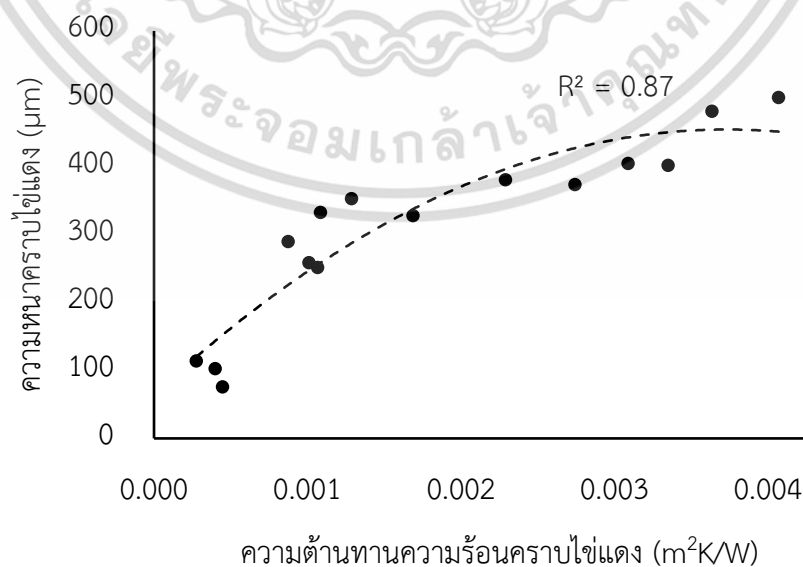
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

หมายเหตุ: ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
รูปที่ 4.6 (ต่อ) อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อ (ก) ความหนาคราบเฉลี่ย และ (ข) มวลของคราบไ้
แดงที่เวลา 90 นาที

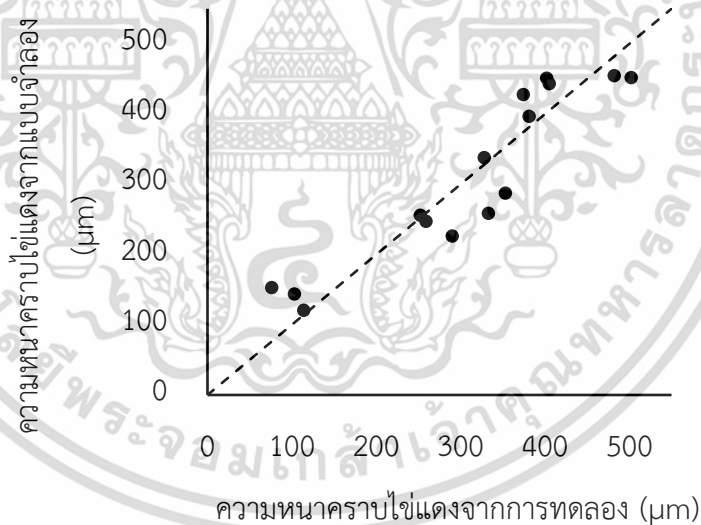
เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความหนาคราบเฉลี่ยหลังสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 90 นาที กับความต้านทานความร้อนของคราบไ้แดง ดังรูปที่ 4.7 พบว่าความหนาคราบเฉลี่ยแปรผันตามค่าความต้านทานความร้อนของคราบไ้แดง และมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งสามารถนำมาสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายความหนาคราบเฉลี่ยได้แสดงดังสมการที่ 4.1 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.87 และมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับ 0.18 โดยที่ x_f คือ ความหนาคราบเฉลี่ย (ไมโครเมตร) ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความหนาคราบที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาคราบกับความต้านทานความร้อนคราบไ้แดง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x_f = -2.80 \times 10^7 R_f^2 + 2.09 \times 10^5 R_f + 64.6 \quad (4.1)$$

แบบจำลอง (สมการที่ 4.1) ใช้ทำนายความหนาคราบเฉลี่ยบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ค่าความต้านทานความร้อนช่วง 0.0003-0.0041 ตารางเมตร-เคลวินต่อวัตต์ ภายใต้สมมติฐานเกี่ยวกับค่าความนำความร้อนของคราบไขแดง ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉลี่ยตลอดทั้งกระบวนการ และเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าสำหรับงานวิจัยนี้ ค่าความหนาที่ทำนายได้จึงมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นจึงจำเป็นต้องศึกษาเรื่องการเปลี่ยนแปลงของค่าความนำความร้อนของคราบในระหว่างกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติม โดยความหนาเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองนอกจากจะส่งผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าความดันลดในระบบและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายการไหลที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ ซึ่งในอุตสาหกรรมใช้เป็นตัวแปรหนึ่งในการตัดสินใจหยุดกระบวนการผลิตเพื่อทำความสะอาด (ณัฐพล, 2560)



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาคราบไขแดงที่ได้จากแบบจำลองกับค่าจากการทดลอง

3) สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

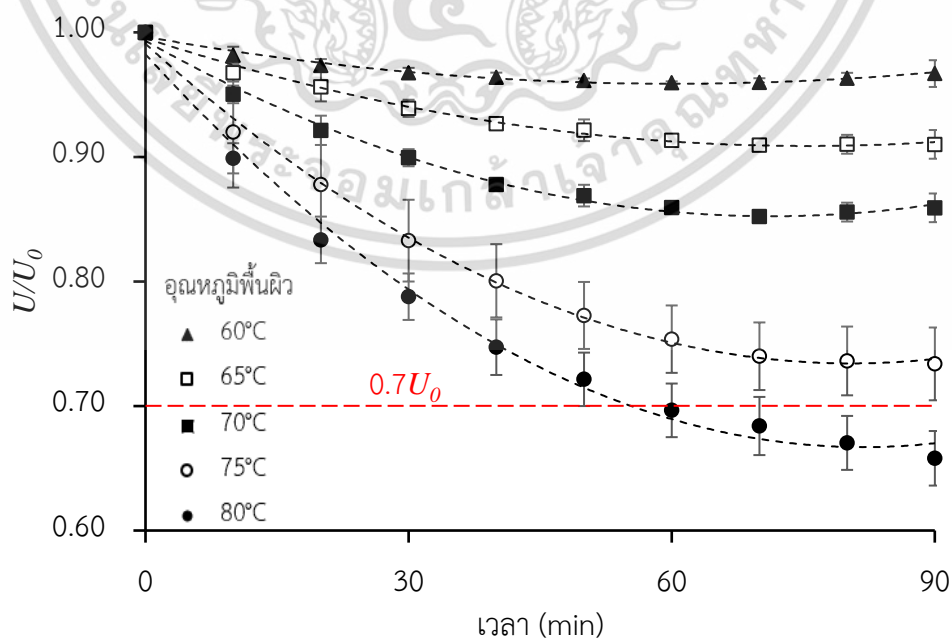
รูปที่ 4.9 แสดงอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลาใด ๆ กับที่เวลาเริ่มต้น (U/U_0) ซึ่งหมายถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นการทดลองที่ยังไม่มีคราบเกิดขึ้น โดยพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง เนื่องจากการเกาะติดของคราบขัดขวางการแลกเปลี่ยนความร้อน

เมื่อพิจารณารูปภาพความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถแบ่งกลุ่มอุณหภูมิพื้นผิวที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลา 90 นาที ได้ 2 กลุ่ม ได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิวช่วง 60-70 องศาเซลเซียส ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหลังสิ้นสุดการทดลองลดลงจากสภาวะเริ่มต้นน้อยกว่าร้อยละ 20 ซึ่งถือเป็นค่าที่ยอมรับได้ในมุมมองของการแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนอุณหภูมิพื้นผิวช่วง 75-80 องศาเซลเซียส มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหลังสิ้นสุดการทดลองลดลงจากสภาวะเริ่มต้นมากกว่าร้อยละ 20 โดยที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลา 90 นาที ลดลงจากสภาวะเริ่มต้นร้อยละ 34 ± 2

ตัวเลขค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลาใด ๆ อาจนำไปใช้ในการตัดสินใจหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาดอุปกรณ์ได้ ซึ่งโดยทั่วไปมักทำความสะอาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงร้อยละ 30-40 จากค่าเริ่มต้น ($0.7-0.6 U_0$) (Demirskyy et al., 2016) ซึ่งการทดลองการเกิดคราบที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 70 ของสภาวะเริ่มต้น ($0.7 U_0$) ก่อนเวลา 60 นาที ซึ่งอาจใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเพื่อหยุดกระบวนการผลิตและทำความสะอาดได้ อย่างไรก็ตาม การทดลองที่อุณหภูมิพื้นผิวต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส ไม่พบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าร้อยละ 30 จึงอาจต้องใช้เกณฑ์การพิจารณาอื่นเพื่อหยุดกระบวนการผลิตและทำความสะอาด



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

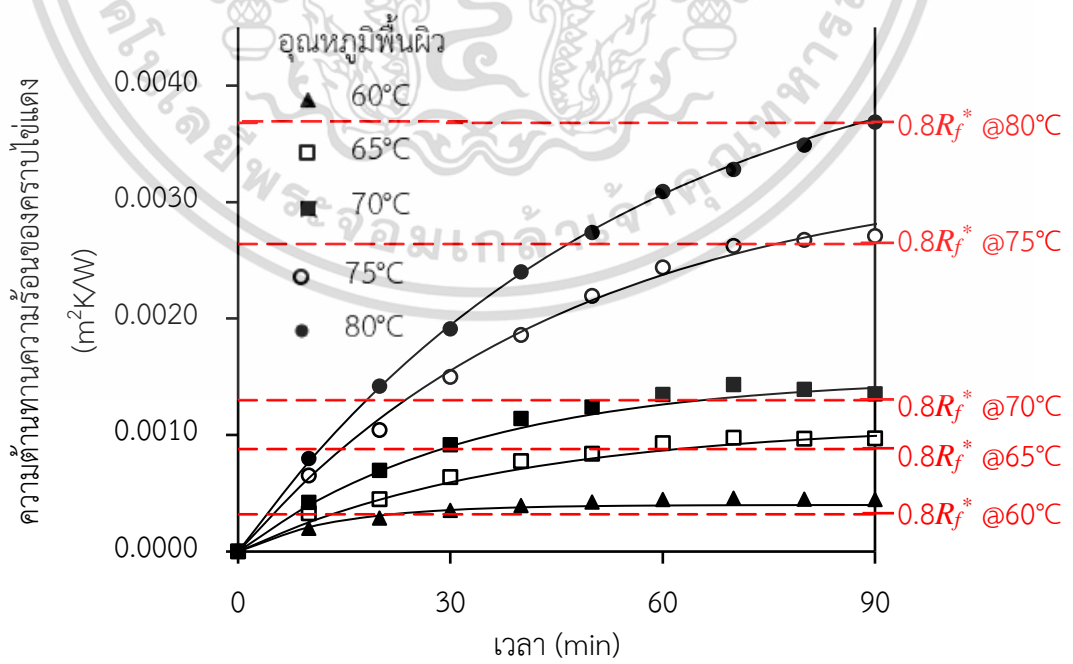
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 จลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบไขมัน

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบไขมัน เป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวที่มีต่อการอัตราการเกิดคราบไขมัน พิจารณาได้จากความเป็นเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขมันที่เวลาใด ๆ โดยปฏิกิริยาอันดับศูนย์ หมายถึง ความสัมพันธ์มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ส่วนปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง หมายถึง ความสัมพันธ์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ และอันดับหนึ่ง คือ อัตราการเกิดคราบไขมันที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขมันที่เวลาใด ๆ

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดคราบไขมัน จากช่วงเริ่มต้นจนถึงร้อยละ 80 ของค่าความต้านทานความร้อนคราบที่สภาวะสมดุล ($0.8 R_f^*$) ดังรูปที่ 4.10 (เส้นประสีแดง คือ ค่าร้อยละ 80 ของความต้านทานความร้อนคราบที่สภาวะสมดุลของอุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ) สามารถวิเคราะห์ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์และหนึ่งของการทดลองที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 จากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยากับส่วนกลับของอุณหภูมิพื้นผิวหน่วยเคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และผลการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบไขมันจากการวิเคราะห์การถดถอยแบบเป็นเชิงเส้น ได้แก่ พลังงานก่อกัมมันต์ แฟกเตอร์ความถี่ และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสิ้นใจ แสดงดังตารางที่ 4.3



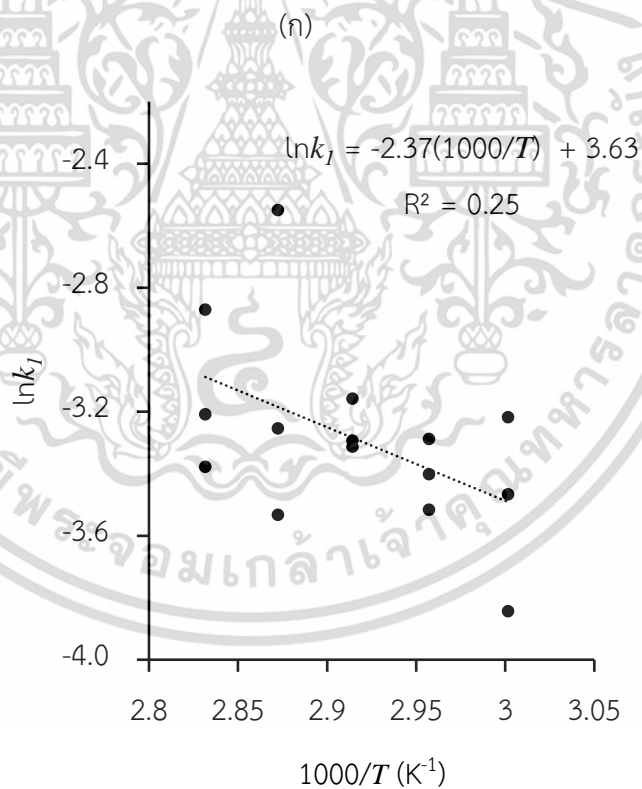
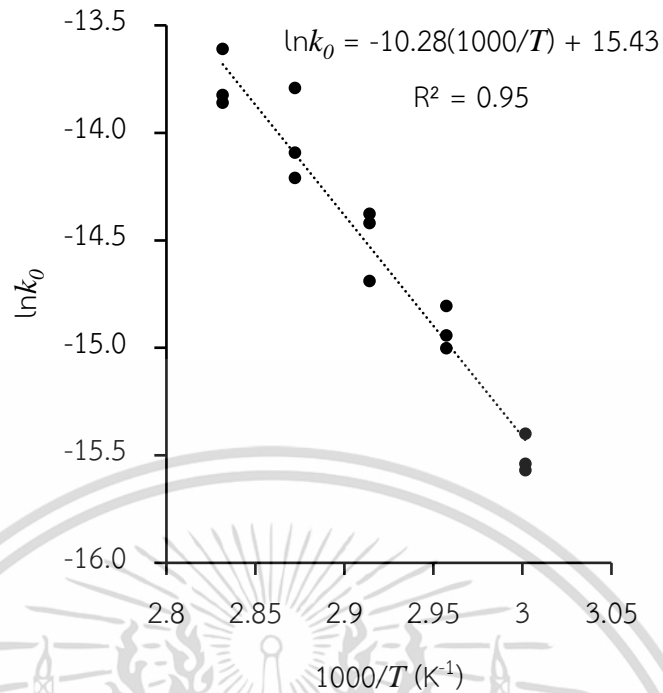
รูปที่ 4.10 การเข้าสู่สมดุลของค่าความต้านทานความร้อน ($0.8 R_f^*$) ของคราบไขมันเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ

อุณหภูมิพื้นผิว (°C)	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์		ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	
	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_0)	ค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_1)	ค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา
		($\ln k_0$)		($\ln k_1$)
60	2.052×10^{-7}	-15.3993	0.0214	-3.8444
	1.783×10^{-7}	-15.5398	0.0400	-3.2189
	1.730×10^{-7}	-15.5700	0.0312	-3.4673
65	3.717×10^{-7}	-14.8052	0.0297	-3.5166
	3.054×10^{-7}	-15.0016	0.0373	-3.2888
	3.240×10^{-7}	-14.9425	0.333	-3.4022
70	5.461×10^{-7}	-14.4205	0.0371	-3.2941
	5.702×10^{-7}	-14.3773	0.0425	-3.1583
	4.171×10^{-7}	-14.6899	0.0364	-3.3132

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ระดับอุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ

อุณหภูมิพื้นผิว (°C)	ปฏิกิริยาอันดับศูนย์		ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง	
	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_0)	ค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของ	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (k_1)	ค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของ
		ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\ln k_0$)		ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\ln k_1$)
75	6.739×10^{-7}	-14.2102	0.0386	-3.2545
	10.245×10^{-7}	-13.7913	0.0292	-3.5336
	7.582×10^{-7}	-14.0923	0.0781	-2.5498
80	12.274×10^{-7}	-13.6106	0.0341	-3.3785
	9.567×10^{-7}	-13.8598	0.0566	-2.8717
	9.904×10^{-7}	-13.8252	0.0404	-3.2089



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา ($\ln k_0$, $\ln k_1$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิพื้นผิวหน่วยเคลวิน ($1000/T$) (ก) ปฏิกิริยาอันดับศูนย์, (ข) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรที่เกี่ยวกับจลนพลศาสตร์การเกิดคราบไข่แดง

อันดับปฏิกิริยา	พลังงานก่อกัมมันต์ (กิโลจูลต่อโมล)	แฟกเตอร์ความถี่	R ²
อันดับศูนย์	85.47	5.02×10 ⁶	0.95
อันดับหนึ่ง	19.71	37.71	0.25

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบไข่แดง พบว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ สามารถอธิบายกลไกการเกิดคราบไข่แดงได้ดีกว่าปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากผลการทดลองที่ได้ เข้ากับรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ได้ดีกว่าและแสดงค่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R²) ที่ 0.95 ซึ่งสูงกว่าการวิเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง จึงสรุปได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาอันดับศูนย์ ใช้อธิบายอัตราการเกิดคราบไข่แดงได้ดีกว่า โดยอันดับปฏิกิริยาการเกิดคราบไข่แดงสามารถพิจารณาในมุมของการดูดซับของโปรตีนบนผิวแลกเปลี่ยนความร้อนได้ว่า ปฏิกิริยาอันดับศูนย์แสดงการดูดซับโปรตีนบนพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นแบบเป็นเชิงเส้น ส่วนปฏิกิริยาอันดับหนึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของการดูดซับโปรตีนแบบฟังก์ชันเลขชี้กำลัง (Unuabonah et al., 2019) อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การเกิดคราบ เป็นการประยุกต์ใช้สมการจลนพลศาสตร์เคมี ที่ใช้อธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาให้กลไกการเกิดคราบไข่แดงเป็นกลไกที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี สมการจลนพลศาสตร์ที่ได้ จึงใช้อธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดคราบไข่แดง โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ling & Lund (1978) ที่ใช้ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ อธิบายการเกิดคราบไข่ขาวบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์การเกิดคราบไข่แดง ได้แก่ พลังงานก่อกัมมันต์ซึ่งเป็นปริมาณพลังงานที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดคราบมีค่า 85.47 กิโลจูลต่อโมล และแฟกเตอร์ความถี่ที่เปรียบเสมือนค่าสัมประสิทธิ์ของสมการจลนพลศาสตร์มีค่า 5.02×10⁶

ดังนั้น สมการจลนพลศาสตร์การเกิดคราบไข่แดงที่ใช้สำหรับหาค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิพื้นผิวในการเกิดคราบต่าง ๆ สามารถแสดงในรูปแบบของสมการอาร์เรเนียส ได้ดังสมการที่ 4.2 โดยที่ R คือค่าคงที่ของแก๊ส มีค่า 8.314 จูลต่อโมลเคลวิน และ T คือ อุณหภูมิพื้นผิวในหน่วยเคลวิน

$$k = 5.02 \times 10^6 \exp\left(\frac{-85.47}{RT}\right) \quad (4.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิเคราะห์พลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดคราบไขแดง พบว่า พลังงานมีค่าน้อยกว่า พลังงานก่อกัมมันต์ของการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนไขแดงที่ได้รับความร้อน ซึ่งมีค่ามากกว่า ประมาณ 4 เท่า คือ 340.5 ± 12.2 กิโลจูลต่อโมล (Shibata-ishiwatari et al., 2018) สอดคล้องกับ งานวิจัยของ Ling & Lund (1978) ที่พบว่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดคราบไขขาวน้อยกว่า พลังงานก่อกัมมันต์ของการเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนไขขาว ประมาณ 4 เท่า ซึ่งสามารถอธิบาย ได้ว่า การเกิดคราบไขแดงไม่ได้ควบคุมจากกลไกการเสียสภาพธรรมชาติ แต่ควบคุมโดยการเกาะติด ของอนุภาคไขแดงที่เสียสภาพแล้วบนพื้นผิวร้อน (Ling & Lund, 1978) โดยพลังงานก่อกัมมันต์ของ กระบวนการเกาะติดของอนุภาคที่เสียสภาพแล้วบนพื้นผิวร้อนมักมีค่าน้อยกว่ากระบวนการการเสีย สภาพธรรมชาติของโปรตีน ประมาณ 3 เท่า (Blanpain-Avet et al., 2016) การที่พลังงานก่อกัม มันต์ของการเกิดคราบน้อยกว่าการเสียสภาพธรรมชาติเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถพบได้การเกิด คราบจากโปรตีน ทั้งในไขขาวและเวย์โปรตีน (Ling & Lund, 1978, Fryer et al., 1994) ส่วนค่า แปรผันของความถี่ในการศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดคราบเป็นเพียงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ใช้ใน การคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น

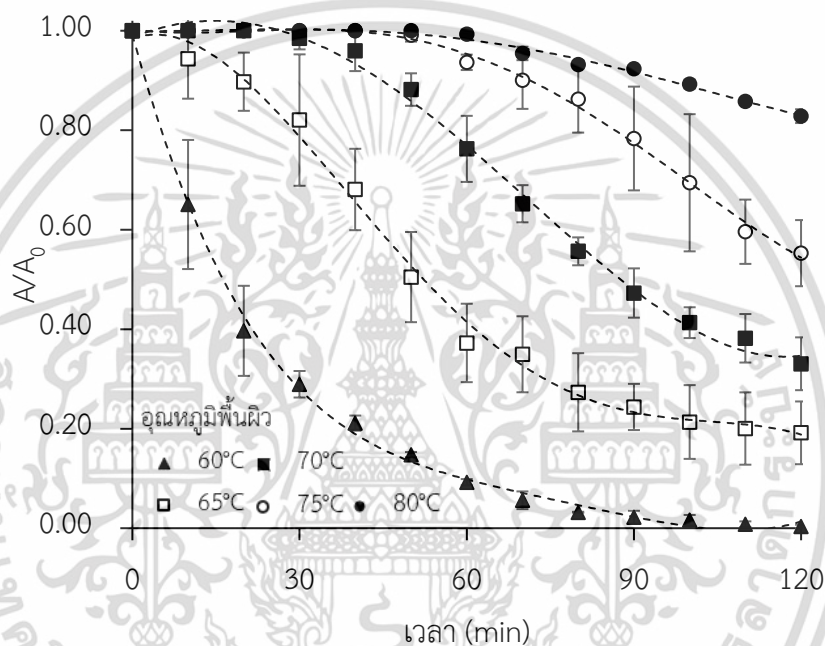
4.2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบไขแดง

จากการทดลองการสะสมของคราบไขแดงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีอุณหภูมิบน พื้นผิวแตกต่างกัน ระยะเวลา 90 นาที จากนั้นนำแผ่นคราบไขแดงไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง และพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ ค่าความนำไฟฟ้าของสารทำความสะอาด และค่าพื้นที่การหลุดออกของคราบไขแดง ทุก 10 นาที ระยะเวลา 120 นาที พบว่า ค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้ค่อนข้างคงที่ ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณคราบที่ น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของสารทำความสะอาด จึงไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่า ความนำไฟฟ้าของสารทำความสะอาดได้

เมื่อพิจารณาลักษณะการหลุดออกของคราบไขแดงในเชิงพื้นที่ ดังรูปที่ 4.12 พบว่า ลักษณะการหลุดออกของคราบไขแดงใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Yang et al. (2019) ที่ศึกษาการทำ ความสะอาดคราบไขแดงบนพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เช่นเดียวกัน โดยสามารถ อธิบายผลของอุณหภูมิพื้นผิวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบ ได้จากระยะเวลาก่อนคราบเริ่มหลุด ออก อัตราการหลุดออกของคราบ และพื้นที่คงเหลือของคราบหลังการแช่ในสารทำความสะอาด 120 นาที รายละเอียดมีดังนี้

1) ระยะเวลาก่อนคราบเริ่มหลุดออก

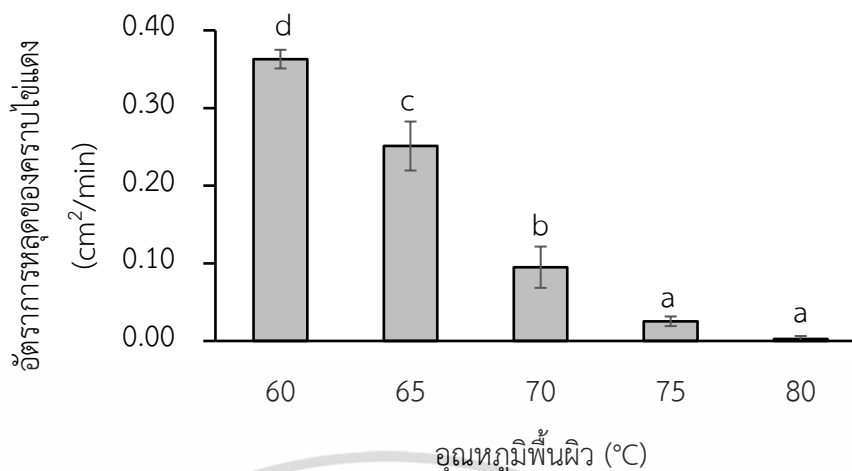
รูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิว ส่งผลต่อระยะเวลาก่อนที่คราบจะเริ่มหลุดออกอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นใช้ระยะเวลาในการแช่จนคราบเริ่มหลุดออกนานขึ้น พิจารณาได้จากที่อุณหภูมิพื้นผิว 60 องศาเซลเซียส คราบไขแดงหลุดออกจากพื้นผิวทันทีเมื่อเริ่มต้นทำความสะอาด ส่วนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลาประมาณ 60 นาที คราบจึงเริ่มหลุดออก



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่คราบในการทำความสะอาด

2) อัตราการหลุดออกของคราบ

จากการพิจารณาอัตราการหลุดออกของคราบเชิงพื้นที่ดังรูปที่ 4.13 พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวส่งผลต่ออัตราการหลุดออกของคราบที่แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา 60 นาที อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยที่อุณหภูมิพื้นผิวสูง มีอัตราการหลุดออกของคราบต่ำ เนื่องจากคราบไขแดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงมีความสามารถในการยึดเกาะและมีความแข็งแรงมาก (Zhang et al., 2019) โดยที่อุณหภูมิพื้นผิว 80 องศาเซลเซียส อัตราการหลุดของคราบในช่วง 60 นาที มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หรือคราบมีการหลุดออกจากพื้นที่น้อยมาก



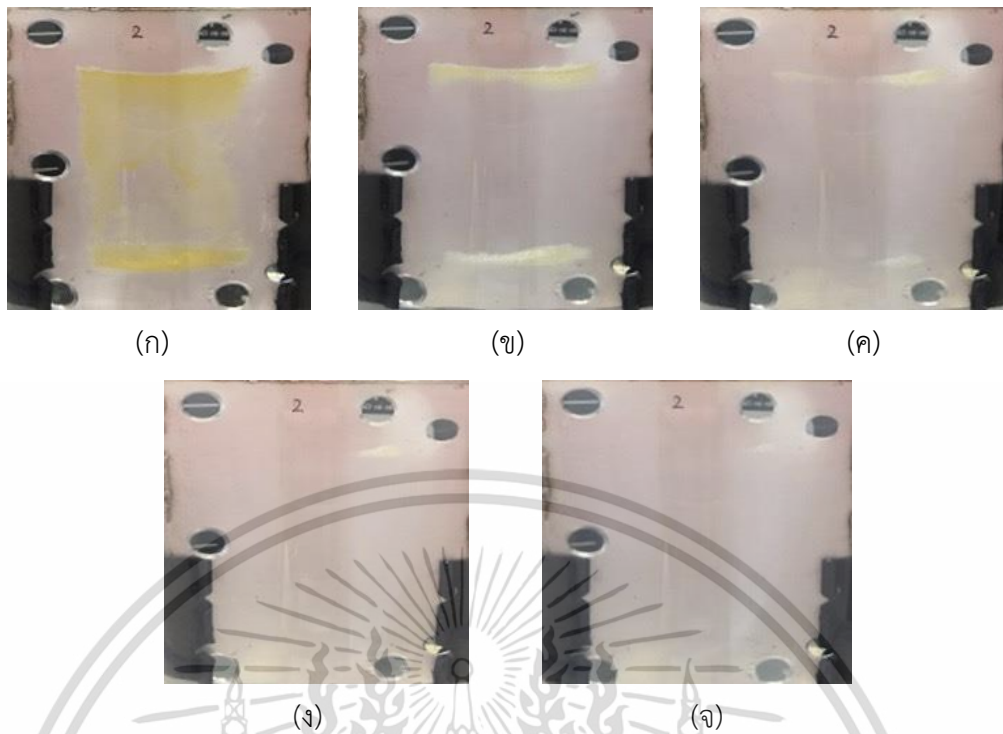
หมายเหตุ : ตัวอักษรเหนือแท่งกราฟที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

รูปที่ 4.13 อัตราการหลุดออกของคราบไผ่แดงที่เวลาในการทำความสะอาด 60 นาที

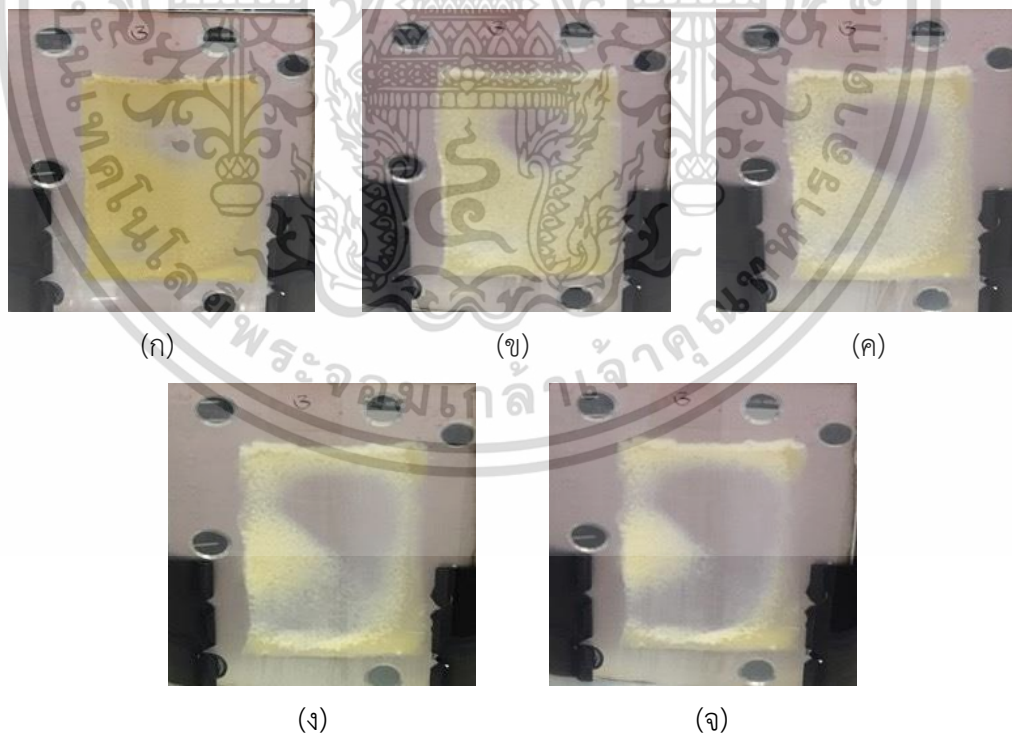
3) พื้นที่คงเหลือของคราบหลังการแช่ในสารทำความสะอาด 120 นาที

นอกจากอุณหภูมิพื้นผิวจะส่งผลต่อระยะเวลาที่คราบเริ่มหลุดออกและอัตราการหลุดออกของคราบแล้ว ยังส่งผลต่อพื้นที่คงเหลือของคราบหลังการแช่ในสารทำความสะอาด 120 นาทีอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยอุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นทำให้คราบหลุดออกได้ยากมากขึ้น พื้นที่คงเหลือของคราบหลังการแช่ในสารทำความสะอาด 120 นาที จึงมาก พิจารณาได้จากคราบไผ่แดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวร้อน 60 องศาเซลเซียส สามารถทำความสะอาดได้ทั้งหมดในเวลา 90 นาที ส่วนคราบไผ่แดงที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาทำความสะอาดผ่านไป 120 นาที ยังมีพื้นที่คงเหลือของคราบคิดเป็นร้อยละ 19-83 ของพื้นที่คราบเริ่มต้น โดยตัวอย่างของพื้นที่การหลุดออกของคราบไผ่แดงที่อุณหภูมิพื้นผิวต่าง ๆ ที่เวลา 0-120 นาที แสดงดังรูปที่ 4.14 – 4.18

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิพื้นผิวส่งผลต่อระยะเวลาและความยากในการทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) ทั้งในประเด็นระยะเวลาก่อนคราบเริ่มหลุดออก อัตราการหลุดออกของคราบ และพื้นที่คงเหลือของคราบหลังการแช่ในสารทำความสะอาด 120 นาที สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gordon et al. (2012) ที่ระบุว่าคราบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ร้อนกว่าจะมีช่วงการบวมของคราบที่นานขึ้นและใช้เวลานานกว่าการทำความสะอาดจะสมบูรณ์ (Gordon et al., 2012)

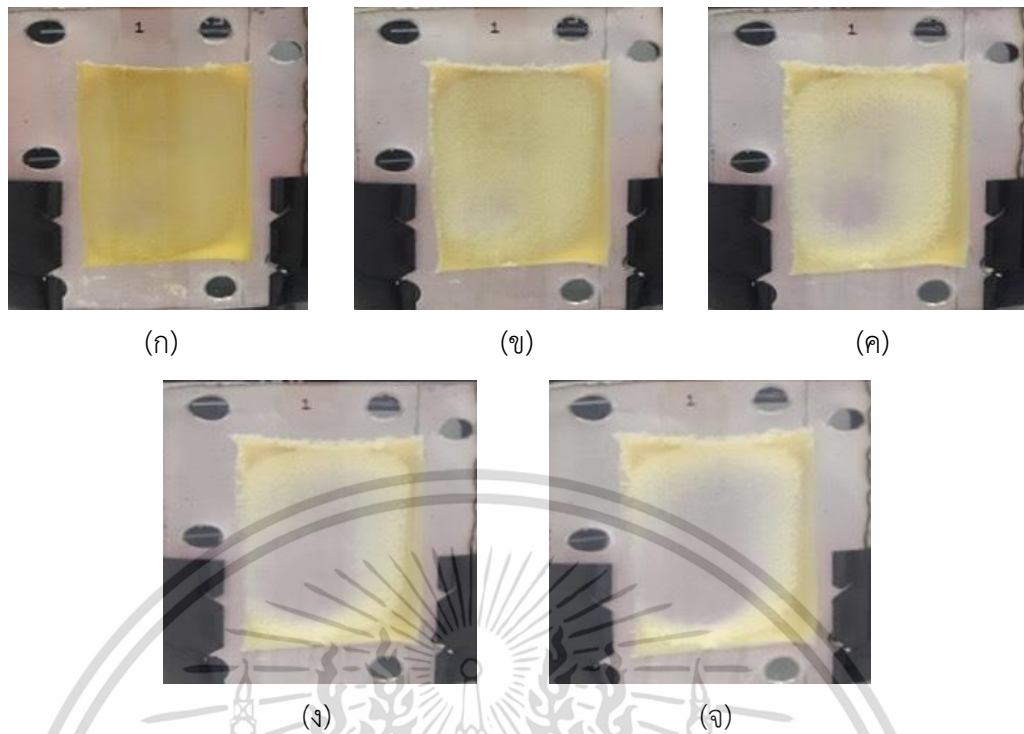


รูปที่ 4.14 พื้นที่การหลุดออกของคราบไข่แดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 60 องศาเซลเซียส
(ก) 0 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 60 นาที, (ง) 90 นาที และ (จ) 120 นาที

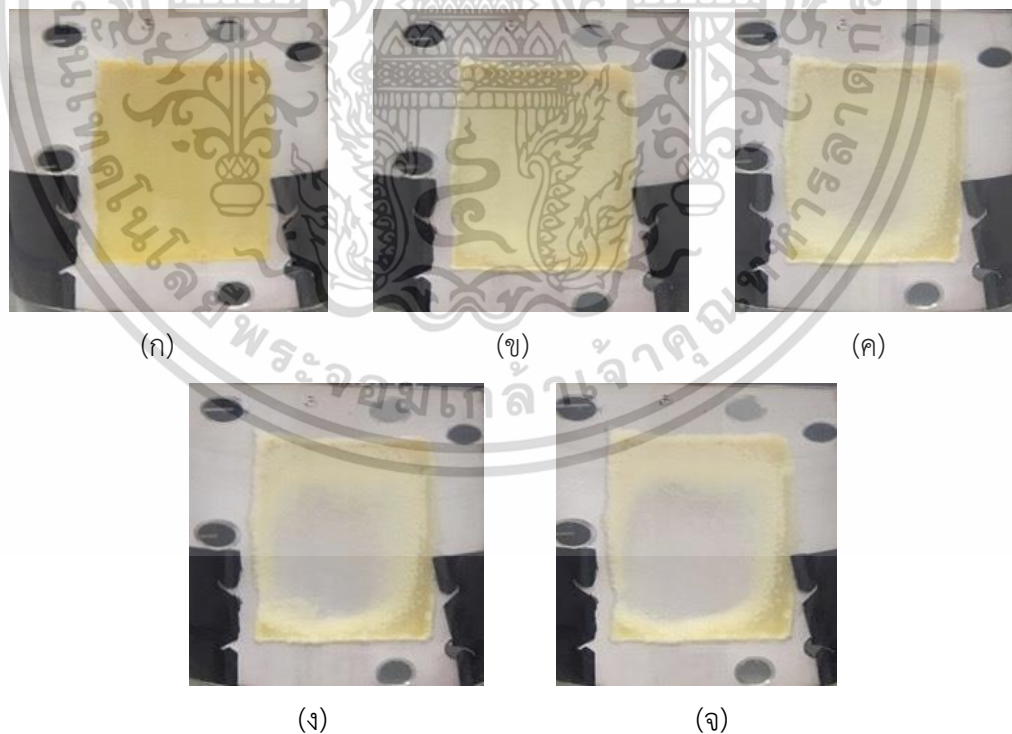


รูปที่ 4.15 พื้นที่การหลุดออกของคราบไข่แดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 65 องศาเซลเซียส
(ก) 0 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 60 นาที, (ง) 90 นาที และ (จ) 120 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

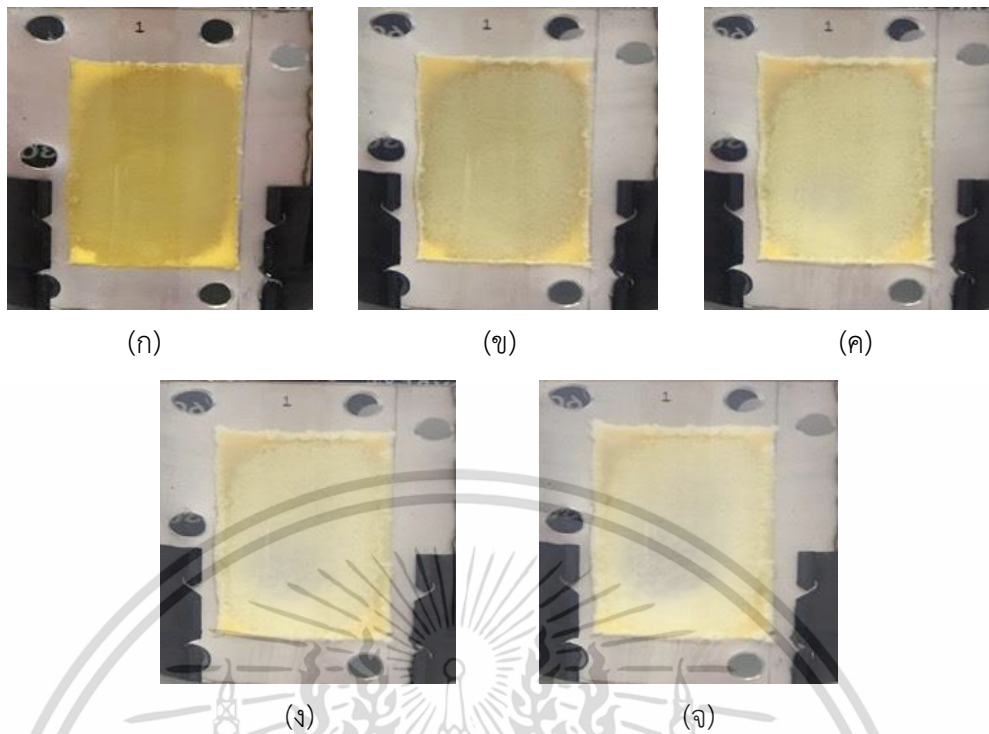


รูปที่ 4.16 พื้นที่การหลุดออกของคราบไข่แดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 70 องศาเซลเซียส
(ก) 0 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 60 นาที, (ง) 90 นาที และ (จ) 120 นาที



รูปที่ 4.17 พื้นที่การหลุดออกของคราบไข่แดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 75 องศาเซลเซียส
(ก) 0 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 60 นาที, (ง) 90 นาที และ (จ) 120 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 พื้นที่การหลุดออกของคราบไขแดงเกิดที่อุณหภูมิผิวการเกิดคราบ 80 องศาเซลเซียส
(ก) 0 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 60 นาที, (ง) 90 นาที และ (จ) 120 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การเกิดคราบเป็นปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร ดังนั้น เพื่อทำความเข้าใจธรรมชาติของกระบวนการเกิดคราบ งานวิจัยนี้จึงนำเสนออิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อพฤติกรรมการเกิดคราบและการทำความสะอาดคราบไขแดง ซึ่งผลทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ไขแดงแสดงพฤติกรรมการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิพื้นผิวในการเกิดคราบช่วง 60-80 องศาเซลเซียส โดยการเกิดคราบไม่แสดงระยะเหนียวน้ำ และคราบที่เกิดขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงพลศาสตร์การไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

2) การเพิ่มอุณหภูมิพื้นผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลต่อพฤติกรรมการเกิดคราบไขแดง โดยทำให้คราบไขแดงใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนานขึ้น และมีค่าความต้านทานของคราบไขแดงที่สถานะสมดุลสูงขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้อัตราการเกิดคราบ มวลคราบ ความหนาคราบ และความต้านทานของคราบไขแดงหลังสิ้นสุดการทดลองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยค่าความต้านทานของคราบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ลดลง

3) การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการเกิดคราบไขแดง พบว่า คราบเกิดจากกลไกการเกาะติดของอนุภาคโพรตีนหรือลิโปโพรตีนที่เสียสภาพแล้วบนพื้นผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยพฤติกรรมการเกิดคราบไขแดงสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับศูนย์ แสดงค่าพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ 85.47 กิโลจูลต่อโมล และแฟกเตอร์ความถี่เท่ากับ 5.02×10^6 โดยสมการจลนพลศาสตร์การเกิดคราบไขแดง แสดงดังนี้

$$k = 5.02 \times 10^6 \exp\left(\frac{-85.47}{RT}\right)$$

4) การทำความสะอาดคราบไขแดงด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยมวลต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้อง แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ทำให้เกิดการเกาะติด

ของคราบ ส่งผลต่อการทำความสะอาดคราบไขแดง โดยอุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นทำให้การทำความสะอาดคราบเป็นไปได้ยากและใช้เวลาในการทำความสะอาดที่นานขึ้น

ผลการทดลองที่ได้ เช่น ค่าความต้านทานความร้อน อัตราการเกิดคราบ ความหนา หรือมวลของคราบ อาจนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หรือใช้ประกอบการตัดสินใจในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนไขแดงเหลวได้ อย่างไรก็ตาม การนำข้อมูลไปใช้ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อคราบ เช่น ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ความหยาบผิว หรือลักษณะการไหล ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของการเกิดคราบได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยเกี่ยวกับการเกิดคราบไขแดงเป็นงานวิจัยที่ยังไม่แพร่หลายในวงการศึกษาการเกิดคราบอาหาร เพื่อเข้าใจการเกิดคราบไขแดงอย่างละเอียด การทดลองอาจประยุกต์ใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของคราบ เพื่อหาลำดับองค์ประกอบหลักในการเกิดคราบไขแดง หรือการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ทำให้เห็นลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างคราบ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของการเกิดคราบ หรือพฤติกรรมทำความสะอาดได้ และเนื่องจากการเกิดคราบเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและเชื่อมโยงกับหลายปัจจัย ในอนาคตการศึกษาค้นคว้าการเกิดคราบไขแดงอาจครอบคลุมไปยังปัจจัยทดลองอื่น ๆ เช่น การทดลองในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดจริงที่ใช้ในอุตสาหกรรมหรือทดลองกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนรูปแบบอื่น เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเกิดคราบ โดยอาจประยุกต์การวิเคราะห์การเกิดคราบร่วมกับการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ หรือขยายการทดลองการเกิดคราบยังอาหารชนิดอื่น เช่น อาหารกลุ่มที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ หรืออาหารที่มีไขแดงเป็นส่วนผสม เป็นต้น หรือศึกษาผลของการเติมสารบางอย่าง เช่น เกลือหรือน้ำตาลลงในผลิตภัณฑ์ ที่อาจมีผลช่วยส่งเสริมหรือป้องกันการเกาะติดของคราบไขแดงได้ นอกจากนี้การหาวิธีการป้องกันการเกิดคราบ เช่น การปรับสภาพพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน หรือการใช้วัสดุเคลือบผิว ยังเป็นอีกหนึ่งหัวข้อที่ยังไม่ได้รับการตรวจสอบกับการเกิดคราบไขแดง

บรรณานุกรม

- ณัฐมล จินดาพรรณ. 2550. “องค์ประกอบและสมบัติในการทาหน้าที่ของไข่แดง.” วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 3(1) : 14-21.
- ณัฐพล จุลวณ. 2560. “การศึกษาสภาวะการไหลที่เหมาะสมเพื่อลดการเกิดตะกอนในอุตสาหกรรมนม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- อัญชลี ไกรสาสิทธิ์. 2563. “กลไกการทำความสะอาดคราบไข่แดงด้วยฟิล์มของเหลว.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Atilgan, M.R. and Unluturk, S. 2008. “Rheological properties of Liquid Egg Products (LEPS).” *International Journal of Food Properties*. 11 : 296-309
- Awad, M.M. 2011. “Fouling of Heat Transfer Surfaces.” 505-542. in Belmiloudi A. **Heat transfer - theoretical analysis, experimental investigations and industrial system**. Rijeka : InTech.
- Blanpain-Avet, P., André, C., Khaldi, M., Bouvier, L., Petit, J., Six, T., Jeantet, R., Croguennec, T. and Delaplace, G. 2016. “Predicting the distribution of a 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 : 9611-9630.
- Bott, T.R. 1995. **Fouling of Heat Exchangers**. Amsterdam : Elsevier Science B.V.
- Bouvier, L., Moreau, A., Ronse, G., Six, T., Petit, J. and Delaplace, G. 2014. “A CFD model as a tool to simulate b-lactoglobulin heat-induced denaturation and aggregation in a plate heat exchanger.” *Journal of food engineering* 136 : 56-63.
- Cordobés, F., Partal, P. and Guerrero, A., 2004 “Rheology and microstructure of heat-induced egg yolk gels.” *Rheologica acta*. 43 : 184-195.
- Davies, T.J., Henstridge, S.C., Gillham, C.R. and Wilson, D.I. 1997. “Investigation of whey protein deposit properties using heat flux sensors.” **Food and bioproducts processing**, 75(2) : 106-110.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Demirskyy, 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 : 583-588.
- Denmat, M.L., Anton, M. and Gandemer, G. 1999. "Protein denaturation and emulsifying properties of plasma and granules of egg yolk as related to heat treatment." **Journal of food science**. 64(2) : 194-197.
- Fryer, P.J., and Asteriadou, K., 2009. "A prototype cleaning map: A classification of industrial cleaning process." **Trends in food Science & Technology**. 20 : 255-262.
- Fryer, P.J., Belmar-Beiny, M.T. and Schreier, P.J.R. 1994. "Fouling and Cleaning: Mechanisms and Models." 24-29. in: Yano, T., Matsuno, R. and Nakamura. K. **Developments in Food Engineering**. Boston : Springer.
- Goode, K.R., Asteriadou, K., Robbins, P.T. and Fryer, P.J. 2013. "Fouling and Cleaning Studies in the Food and Beverage Industry Classified by Cleaning Type." **Comprehensive reviews in food science and food safety**. 12 : 121-143.
- Gordon, P.W., Brooker, A.D.M., Chew, Y.M.J., Letzelter, N., York, D.W. and Wilson, D.I. 2012. "Elucidating enzyme-based cleaning of protein soils (gelatine and egg yolk) using a scanning fluid dynamic gauge." **Chemical Engineering Research and Design**. 90 : 162-171.
- 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.
- Gut, J., Pinto, J., Gabas, A.L. and Telis-Romero, J. 2005. "Continuous pasteurization of egg yolk: Thermophysical properties and process simulation." **Journal of food process engineering**. 28(2) : 181-203.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Helbig, M., Zahn, S., Böttcher, K., Rohm, H. and Majschak, J.-P. 2019. "Laboratory methods to predict the cleaning behavior of egg yolk layers in a flow channel." **Food and Bioproducts Processing**. 113 : 108-117.
- Kern, D.Q. and Seaton, R.E. 1959. "A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling." **British Chemical Engineering**. 14(5) : 258-262.
- Law, H.Y., Ong, C., Aziz, N.A., Taip, F. and Muda, N. 2009. "Preliminary work on coconut milk fouling deposits study." **International Journal of Engineering & Technology**. 9(10) : 8-13.
- Le Denmat, M., Anton, M. and Gandemer, G. 1999. "Protein Denaturation and Emulsifying Properties of Plasma and Granules of Egg Yolk as Related to Heat Treatment." **Journal of Food Science**. 64(2) : 194-197.
- Li, L., Lv, H.T., Deng, R.P., Liao, Z.K., Wu, X.E. and Chen, X.D. 2013. "Experimental investigation of egg ovalbumin scaling on heated stainless steel surface and scale-removal compared with that of whey protein." **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. 107 : 198-204
- Ling, A.C. and Lund D.B. 1978. "Fouling of heat transfer surfaces by solutions of egg albumin." **Journal of food protection**. 41(3) : 187-194.
- Mine, Y. and Zhang, H. 2013. "Egg components in food systems." 215-241. in Eskin, N.A.M. and Shahidi, F. **Biochemistry of foods**. USA : Academic press.
- Missen, R.W., Mims, C.A. and Saville, B.A. 1999. **Introduction to chemical reaction engineering and kinetics**. New York : John Wiley & Sons.
- 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.
- Narataruksa. P., Pichitvittayakarn W., Heggs P.J. and Tia S. 2010. "Fouling behavior of coconut milk at pasteurization temperatures." **Applied thermal engineering**. 30 : 1387-1395.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Nigo, R.Y., Chew, Y.M. J., Houghton, N.E., Paterson, W.R. and Wilson D.I. 2009. "Experimental studies of freezing fouling of model food fat solutions using a novel spinning disc apparatus." **Energy & Fuels**. 23 : 6131-6145.
- Nys, Y. and Guyot, N. 2011. "Egg formation and chemistry." 83-132. In Nys, Y., Bain, M. and Immerseel, F.V. **Improving the Safety and Quality of Eggs and Egg Products Egg Chemistry, Production and Consumption**. Cornwall : Woodhead.
- Rosa, M.T.M.G., Guimarães, D.H.P. and Arce, P.F. 2019. "Experimental measurements and simulation of the fouling phenomena of natural proteins." **International journal of heat and mass transfer**. 129 : 1075-1085.
- Schnöing, L., Augustin, W. and Scholl, S. 2020. "Fouling mitigation in food processes by modification of heat transfer surfaces: A review." **Food and Bioproducts Processing**. 121 : 1-19.
- Schreier, P.J.R., Toyoda, I., Belmar-Beiny, M.T. and Frye, 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.
- Shahbandeh, M. 2021. **Global egg production from 1990 to 2019 (in 1,000 metric tons)**. [Online]. Available : <https://www.statista.com/statistics/263972/egg-production-worldwide-since-1990/>. Accessed 10 March 2021.
- Shibata-Ishiwatari, N., Takagi, T., Fukuoka, M. and Sakai, N. 2018. "Kinetic Studies on the Effect of Salt on the Thermal Denaturation of Egg Constituents." **Japan Journal of Food Engineering**. 19(1) : 49-56
- Strixner, T. and Kulozik, U. 2011. "Egg proteins." 150-209 .in Phillips, G.O. and Williams, P.A. **Handbook of Food Proteins**. Cornwall : Woodhead.
- Taborek, J., Aoki, T., Ritter, R.B., Palen, J.W. and Knudsen, J.G. 1972. "Predictive Methods for Fouling Behavior." **Chemical Engineering Progress**. 68(7) : 69-78.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Unuabonah, E.I., Omorogie, M.O. and Oladoja, N.A. 2019. “Modeling in adsorption: fundamentals and applications.” 85-118. in Kyzas, G.Z. and Mitropoulos, A.C. **Composite nanoadsorbents**. India : Elsevier.
- Upadhyay S.K. 2008. **Chemical Kinetics and Reaction Dynamics**. New Delhi : Anamaya.
- USDA. 1969. “**ARS74-48. Egg pasteurization manual.**” California : United States Department of Agriculture.
- Wilson, D.W. 2018. “Fouling during food processing – progress in tackling this inconvenient truth.” **Current opinion in food science**. 23 : 105-112.
- Yang, J., Kjellberg, K., Jensen, B.B.B., Nordkvist, M., Gernaey, K.V. and Krühne, U., 2019. “Investigation of the Cleaning of Egg Yolk Deposits from Tank Surfaces Using Continuous and Pulsed Flows.” **Food and Bioproducts Processing**. 113 : 154–167.
- Zhang, B.Y., Lu, J. and Huang, J.Y. 2019. “Effect of sugar on the fouling behavior of whey protein.” **Food and bioproducts processing**. 113 : 2-9.
- Zhang, B.Y., Xu, S., Villalobos-Santeli, J.A. and Huang, J.Y. 2020. “Fouling characterization of camel milk with comparison to bovine milk.” **Journal of food engineering**. 285.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการเกิดคราบไ้แดง

อุณหภูมิ พื้นผิว (°C)	การทดลองที่	หมายเลข แผ่น ทดลอง	ความต้านทาน คราบไ้แดง เป็นเวลา 90 นาที (m ² K/w)	มวลคราบ ไ้แดง (g)	ความหนา คราบไ้แดง (µm)
60	1	5	0.0003	0.008	76
	2	2	0.0004	0.009	103
	3	5	0.0004	0.009	114
65	1	4	0.0009	0.021	252
	2	4	0.001	0.025	259
	3	1	0.0011	0.029	290
70	1	3	0.0011	0.031	328
	2	3	0.0013	0.034	333
	3	3	0.0017	0.04	353
75	1	2	0.0023	0.04	374
	2	1	0.0027	0.04	381
	3	2	0.0031	0.051	405
80	1	1	0.0034	0.06	402
	2	1	0.0036	0.062	482
	3	1	0.0041	0.066	502

ตารางที่ ก.2 มวลของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

หมายเลขแผ่นทดลอง	มวล (g)
1	42.023
2	43.358
3	43.840
4	44.765
5	43.082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 การวิเคราะห์การถดถอยของพฤติกรรมการเกิดคราบไขแดง

อุณหภูมิพื้นผิว (°C)	การทดลองที่	ความต้านทานคราบไข	ค่าคงที่ของเวลา (min)
		ที่สภาวะสมดุล (m ² K/w)	
60	1	0.0004	11.79
	2	0.0004	12.85
	3	0.0004	13.52
65	1	0.0010	23.01
	2	0.0012	25.00
	3	0.0011	28.57
70	1	0.0015	36.43
	2	0.0020	32.00
	3	0.0012	34.09
75	1	0.0032	47.26
	2	0.0033	48.65
	3	0.0034	43.05
80	1	0.0050	53.13
	2	0.0043	50.82
	3	0.0041	52.50

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการทำความสะอาดคราบไขแดง

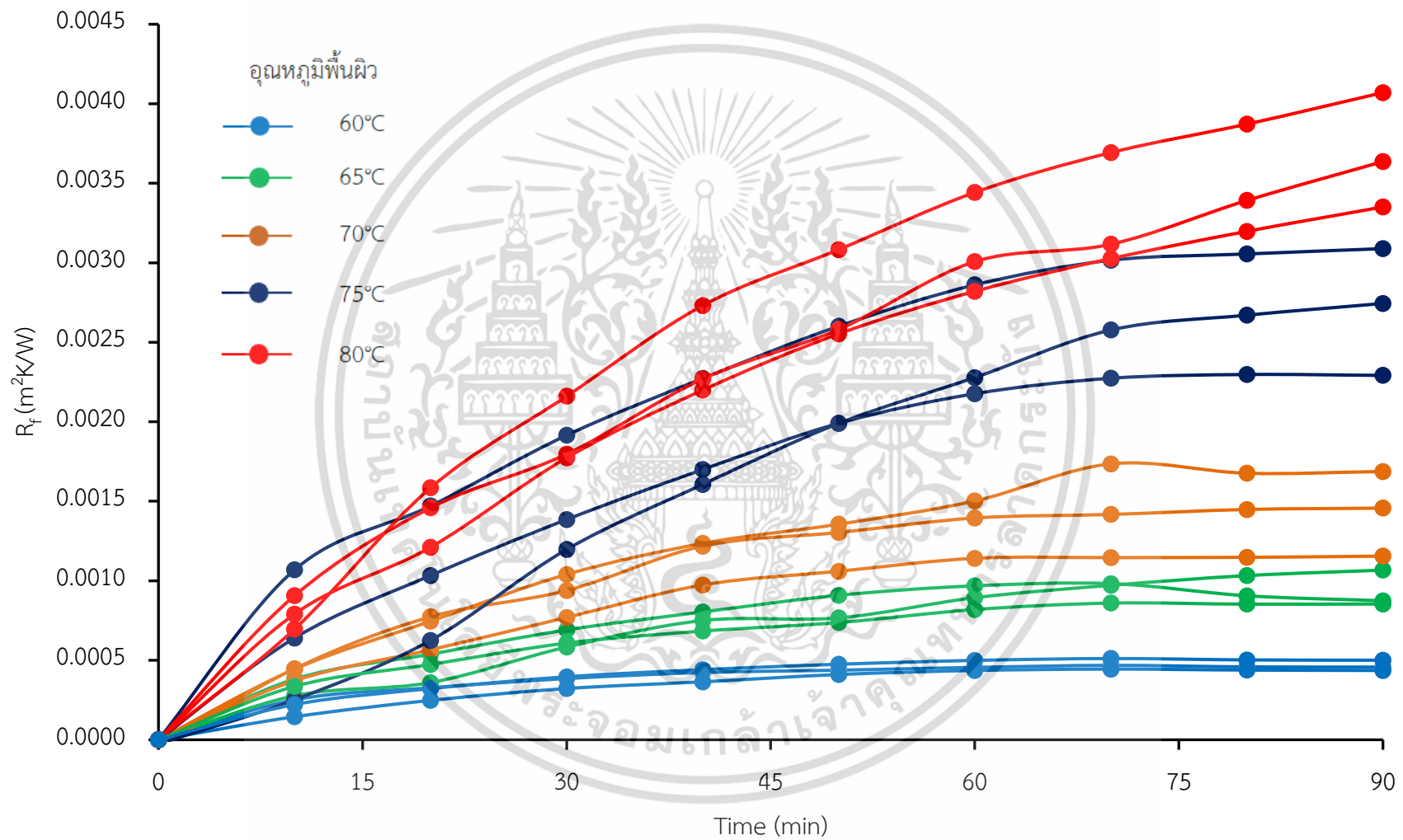
อุณหภูมิ พื้นผิว (°C)	การทดลองที่	อัตราการหลุดออก	พื้นที่คราบหลังการทำ	เวลาที่คราบ เริ่มหลุด (min)
		ของคราบ (cm ² /min)	ความสะอาด (%)	
60	1	0.36	0.00	10
	2	0.36	0.01	10
	3	0.36	0.00	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ผลการทดลองการทำความสะอาดคราบไข่แดง

อุณหภูมิ พื้นผิว (°C)	การ ทดลองที่	อัตราการหลุดออก ของคราบ (cm ² /min)	พื้นที่คราบหลังการทำ ความสะอาด (%)	เวลาที่คราบเริ่ม หลุด (min)
65	1	0.23	0.24	20
	2	0.27	0.15	10
	3	0.25	0.19	20
70	1	0.08	0.37	40
	2	0.11	0.29	30
	3	0.09	0.33	40
75	1	0.03	0.51	50
	2	0.02	0.60	60
	3	0.03	0.55	60
80	1	0.00	0.84	60
	2	0.01	0.82	70
	3	0.00	0.83	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานคราบไ้แดงกับเวลาที่การทดลองต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของความต้านทานคราบไข่แดงที่เวลา 90 นาที

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2.19E-05	4	5.47E-06	69.00	0.0000
Within Groups	7.93E-07	10	7.93E-08		
Total	2.27E-05	14			

ตารางที่ ข.2 การทดสอบความแตกต่างของความต้านทานคราบไข่แดงที่เวลา 90 นาที

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
60	3	0.0004			
65	3	0.0010	0.0010		
70	3		0.0014		
75	3			0.0027	
80	3				0.0037

ตารางที่ ข.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของมวลคราบไข่แดง

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	4.87E-03	4	1.22E-03	66.84	0.0000
Within Groups	1.82E-04	10	1.82E-05		
Total	5.05E-03	14			

ตารางที่ ข.4 การทดสอบความแตกต่างของมวลคราบไข่แดง

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
60	3	0.009				
65	3		0.025			
70	3		0.035	0.035		
75	3			0.044		
80	3					0.062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของความหนาคราบไขแดง

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	230100	4	57525	71.36	0.0000
Within Groups	8061	10	806		
Total	238161	14			

ตารางที่ ข.6 การทดสอบความแตกต่างของความหนาคราบไขแดง

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
60	3	98			
65	3		267		
70	3		338	338	
75	3			387	
80	3				462

ตารางที่ ข.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของความต้านทานคราบไขแดงที่สภาวะสมดุล

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.36E-05	4	8.40E-06	103.22	0.0000
Within Groups	8.13E-07	10	8.13E-08		
Total	3.44E-05	14			

ตารางที่ ข.8 การทดสอบความแตกต่างของความต้านทานคราบไขแดงที่สภาวะสมดุล

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
60	3	0.0004			
65	3	0.0011	0.0011		
70	3		0.0015		
75	3			0.0033	
80	3				0.0046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของคราบ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7692.56	4	1923.14	162.145	0.000
Within Groups	118.61	10	11.86		
Total	7811.16	14			

ตารางที่ ข.10 การทดสอบความแตกต่างของระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของคราบ

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
60	3	21.45				
65	3		51.70			
70	3			61.29		
75	3				74.87	
80	3					86.74

ตารางที่ ข.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าคงที่ของอัตราการหลุดออกของคราบ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	0.2819	4	0.0705	503.452	0.000
Within Groups	0.0014	10	0.0001		
Total	0.2833	14			

ตารางที่ ข.12 การทดสอบความแตกต่างของอัตราการหลุดออกของคราบ

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
80	3	0.00				
75	3		0.03			
70	3			0.09		
65	3				0.25	
60	3					0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าคงที่ของพื้นที่คราบ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1.24	4	0.309	266.216	0.000
Within Groups	0.01	10	0.001		
Total	1.25	14			

ตารางที่ ข.14 การทดสอบความแตกต่างของค่าคงที่ของพื้นที่คราบหลังการทำความสะอาด

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
60	3	0.00				
65	3		0.19			
70	3			0.33		
75	3				0.55	
80	3					0.83

ตารางที่ ข.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวของค่าคงที่ของเวลาที่คราบเริ่มหลุด

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7226.67	4	1806.67	67.750	0.000
Within Groups	266.67	10	26.67		
Total	7493.33	14			

ตารางที่ ข.16 การทดสอบความแตกต่างของเวลาที่คราบเริ่มหลุด

Surface temperature (°C)	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
60	3	10.00			
65	3	16.67			
70	3		36.67		
75	3			56.67	
80	3				66.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



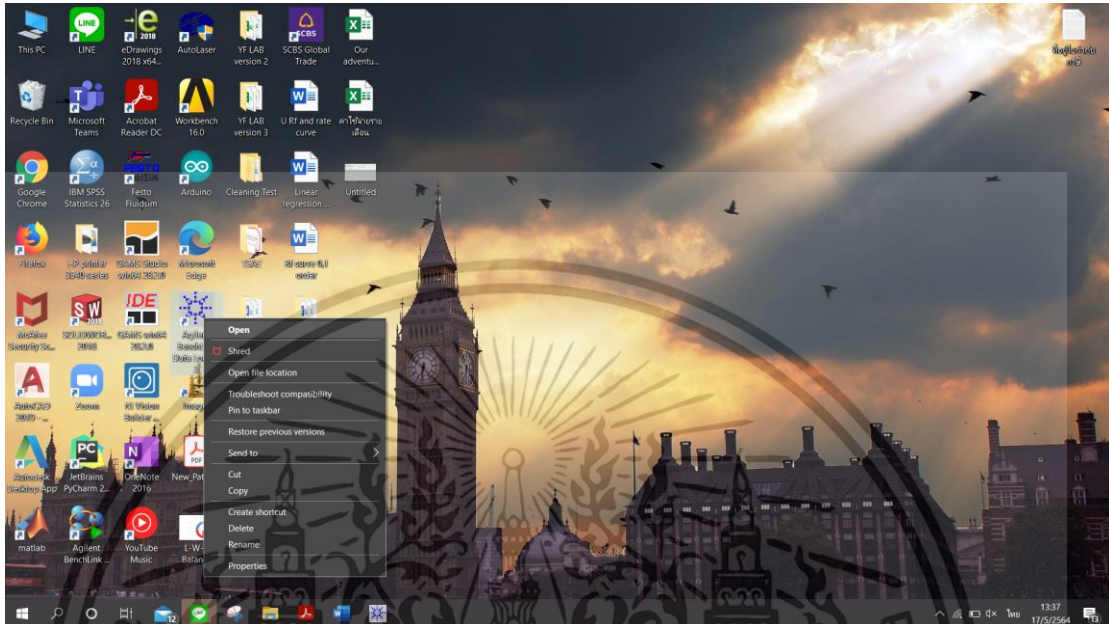
ภาคผนวก ค

การใช้งานโปรแกรม Benchlink Data Logger 3. Version 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

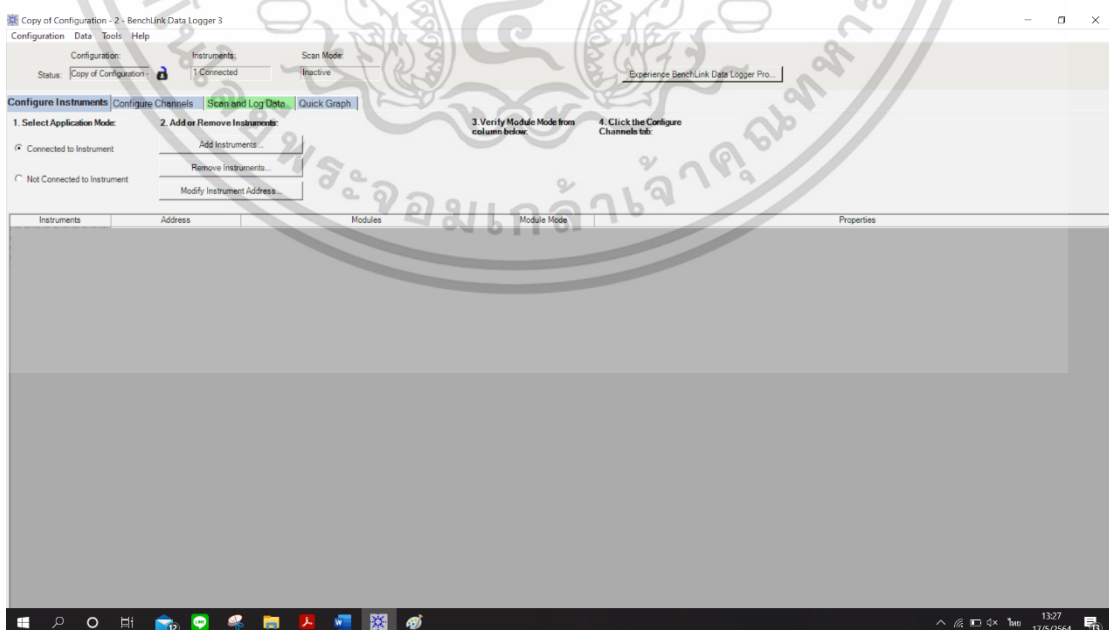
การใช้งานโปรแกรม Benchlink Data Logger 3. Version 4.3

1. เปิดเข้าใช้งานโปรแกรม คลิก open >> yes เพื่อเปิดใช้งาน



รูปที่ ค.1 เปิดเข้าใช้งานโปรแกรม

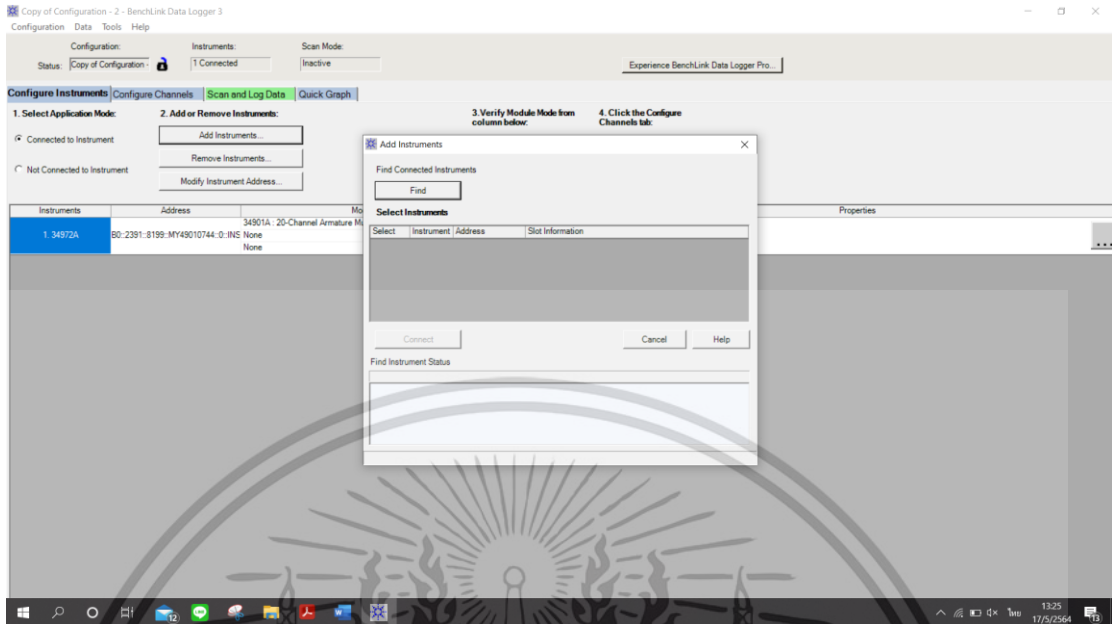
2. เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์ คลิก Add Instruments...



รูปที่ ค.2 เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์

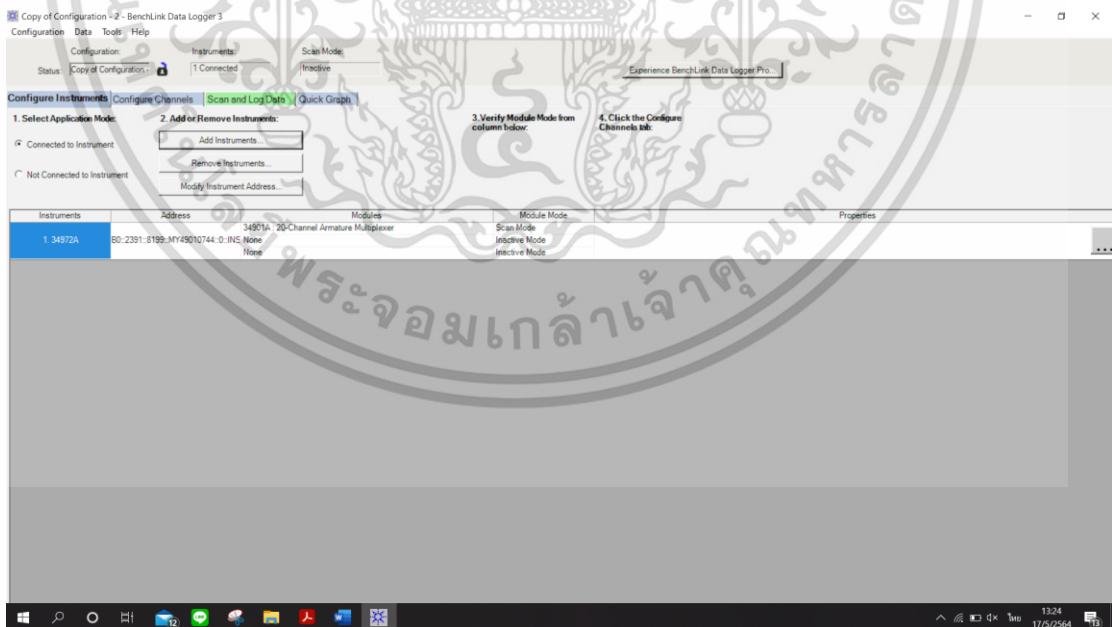
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค้นหาอุปกรณ์ คลิก Find แล้วคลิก Connect เพื่อเชื่อมต่ออุปกรณ์



รูปที่ ค.3 เชื่อมต่อสายสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์

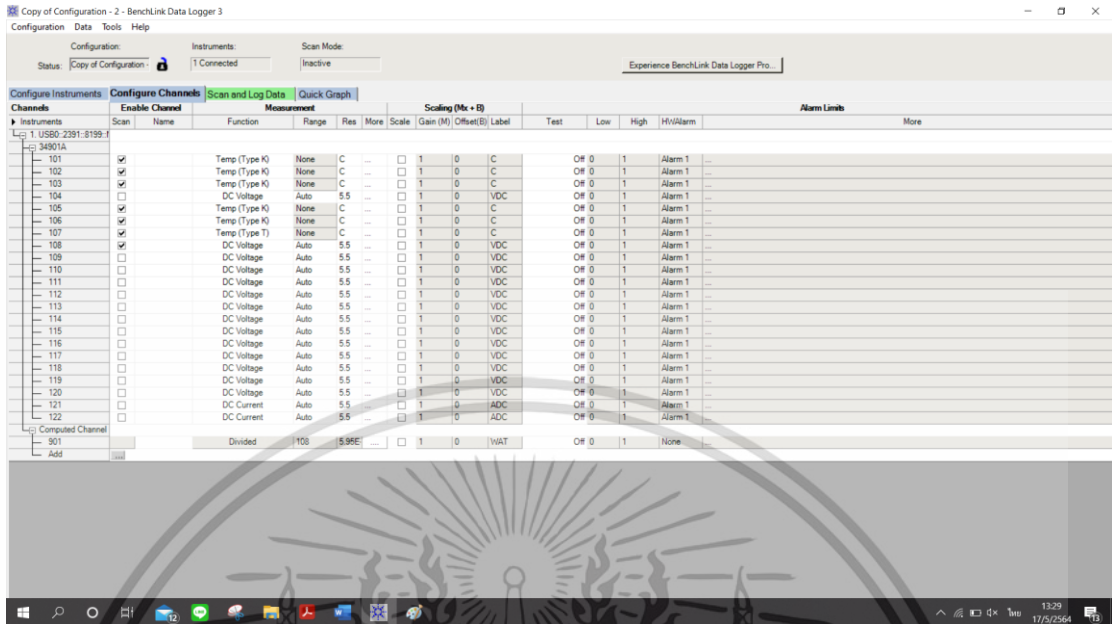
4. อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อจะแสดงขึ้นบริเวณแถบ Configure Instruments



รูปที่ ค.4 แถบ Configure Instruments

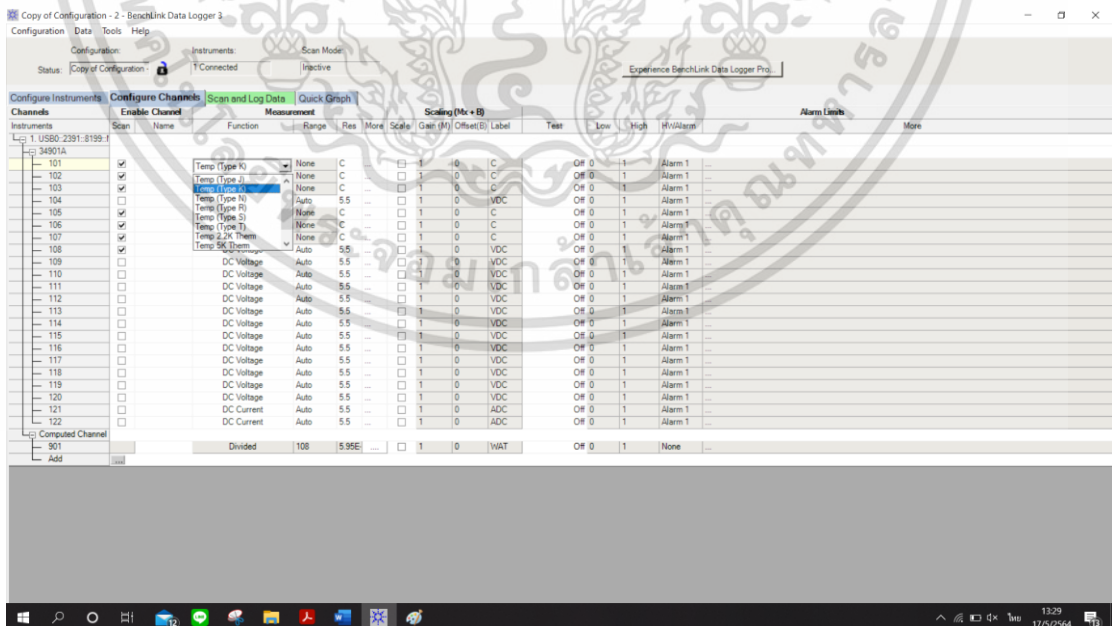
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คลิกที่แถบ Configure Channels เพื่อตั้งค่าสัญญาณ



รูปที่ ค.5 แถบ Configure Channels

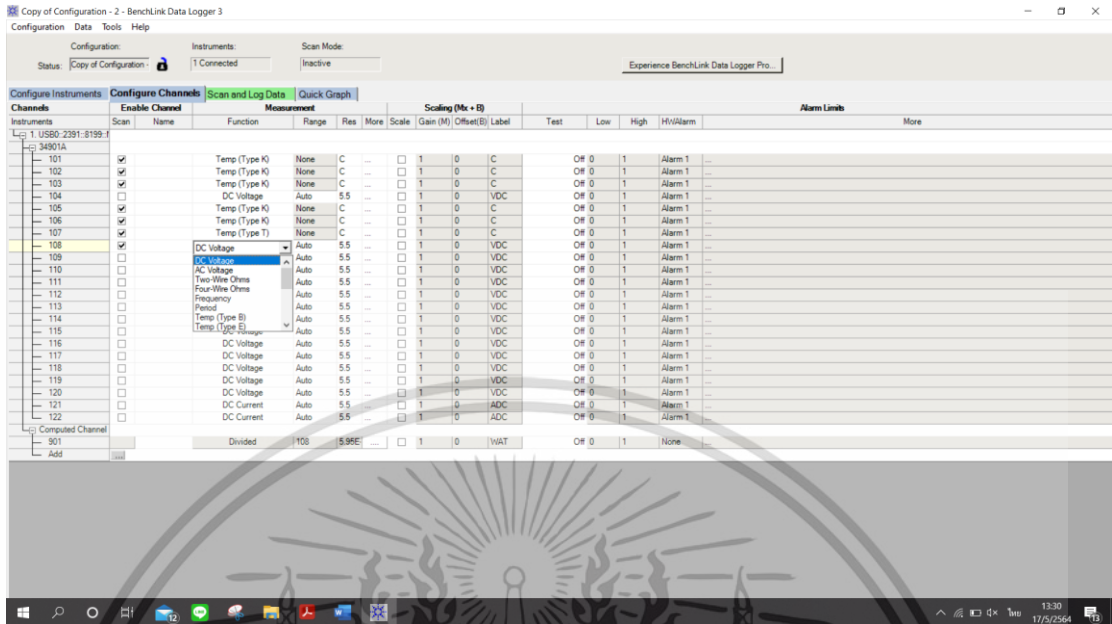
6. สำหรับสัญญาณจากเทอร์มอคัปเปิล เลือก Temp แล้วเลือกชนิดของเทอร์มอคัปเปิล Temp (Type K) หรือ Temp (Type T) ที่ Measurement function



รูปที่ ค.6 การตั้งค่าเทอร์มอคัปเปิล

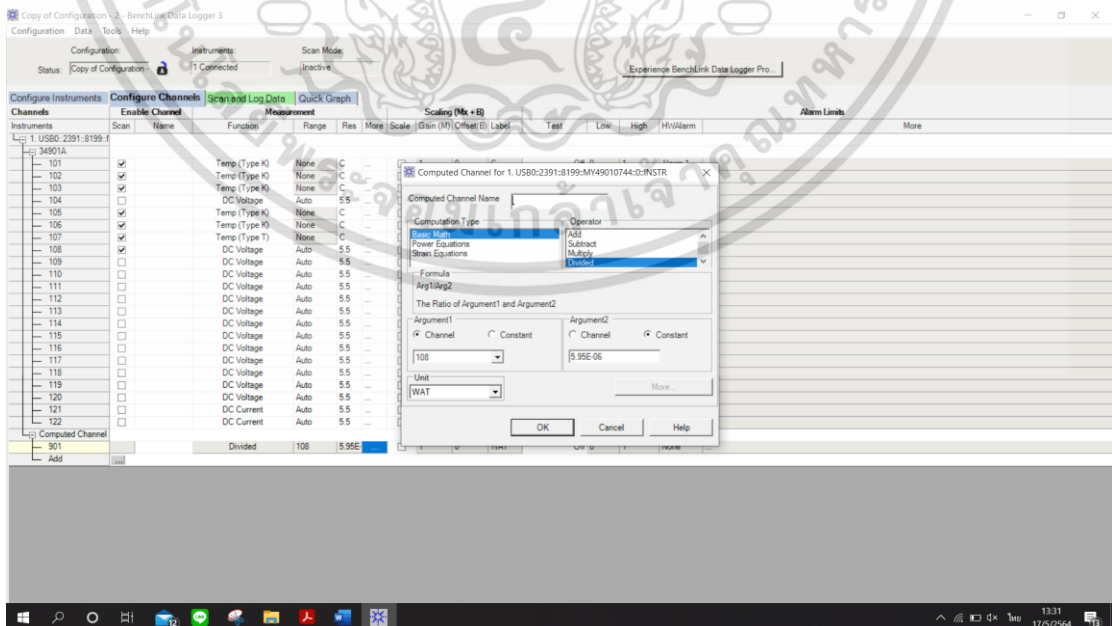
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. สำหรับสัญญาณจากเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน เลือก DC Voltage ที่ Measurement function



รูปที่ ค.7 การตั้งค่าเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

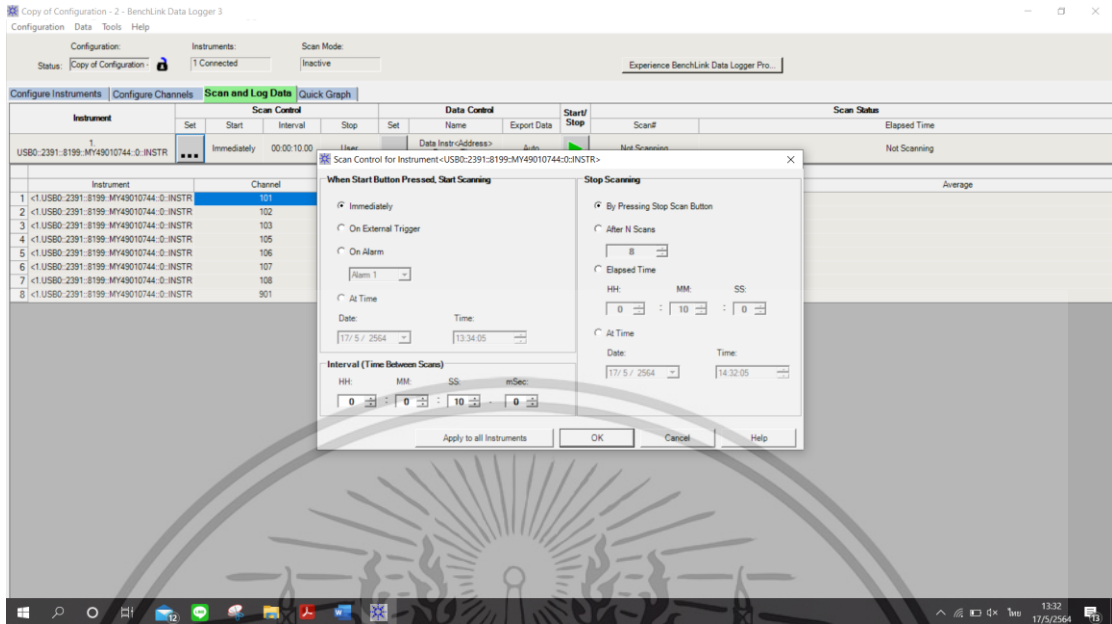
8. สำหรับการแปลงสัญญาณจากเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน คลิก Add ที่ Computed Channel เลือก Basic Math >> Divided >> เลือก Argument 1 เป็นสัญญาณ DC Voltage จากเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน, เลือก Argument 2 เป็น ค่าความไวของเซนเซอร์ (Sensitivity) >> OK



รูปที่ ค.8 การแปลงสัญญาณจากเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

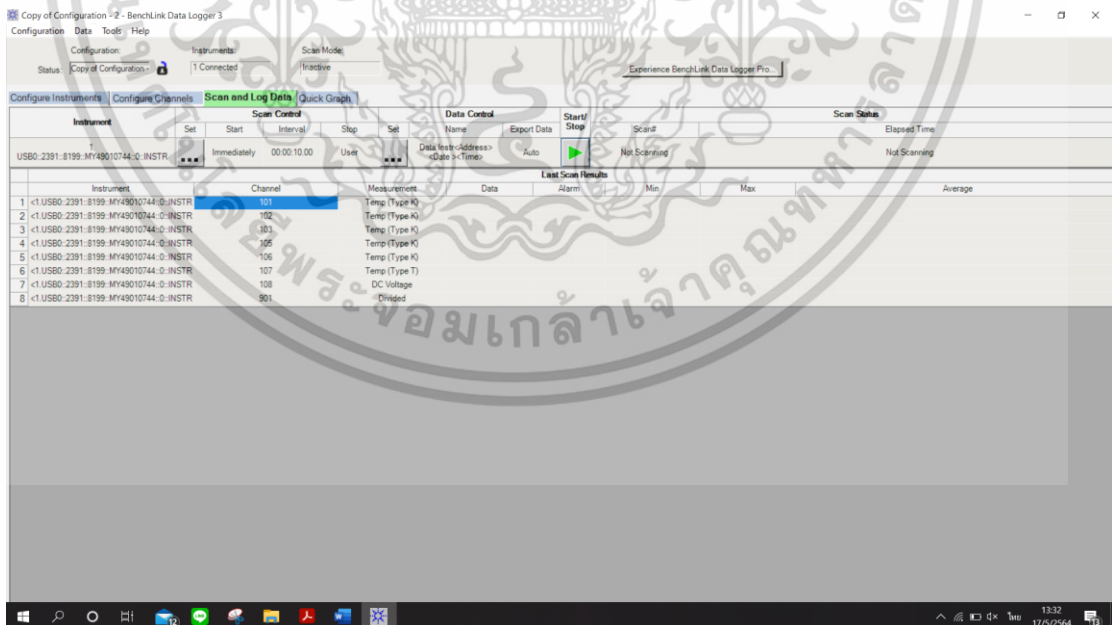
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ตั้งค่าเวลาในการรับสัญญาณที่แถบ Scan and Log Data คลิก Set ที่ Scan Control



รูปที่ ค.9 การตั้งค่าเวลาในการรับสัญญาณที่แถบ Scan and Log Data

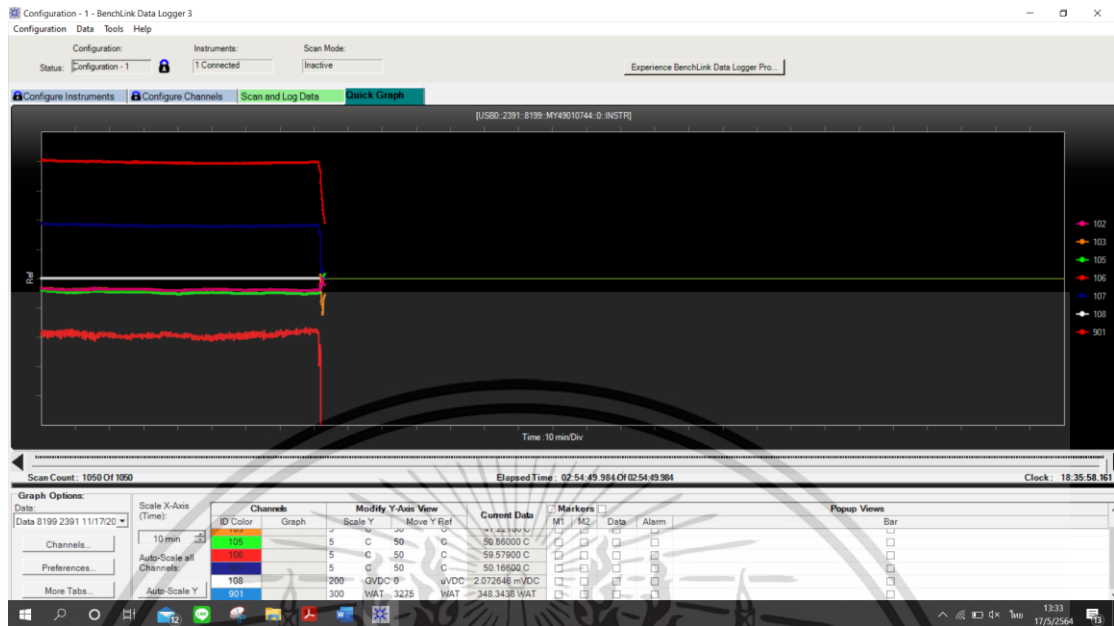
10. เริ่มต้นรับสัญญาณ คลิก ที่ Start/Stop



รูปที่ ค.10 การเริ่มต้นรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. สัญญาณที่ได้จะแสดงในแถบ Quick Graph



รูปที่ ค.11 แถบ Quick Graph

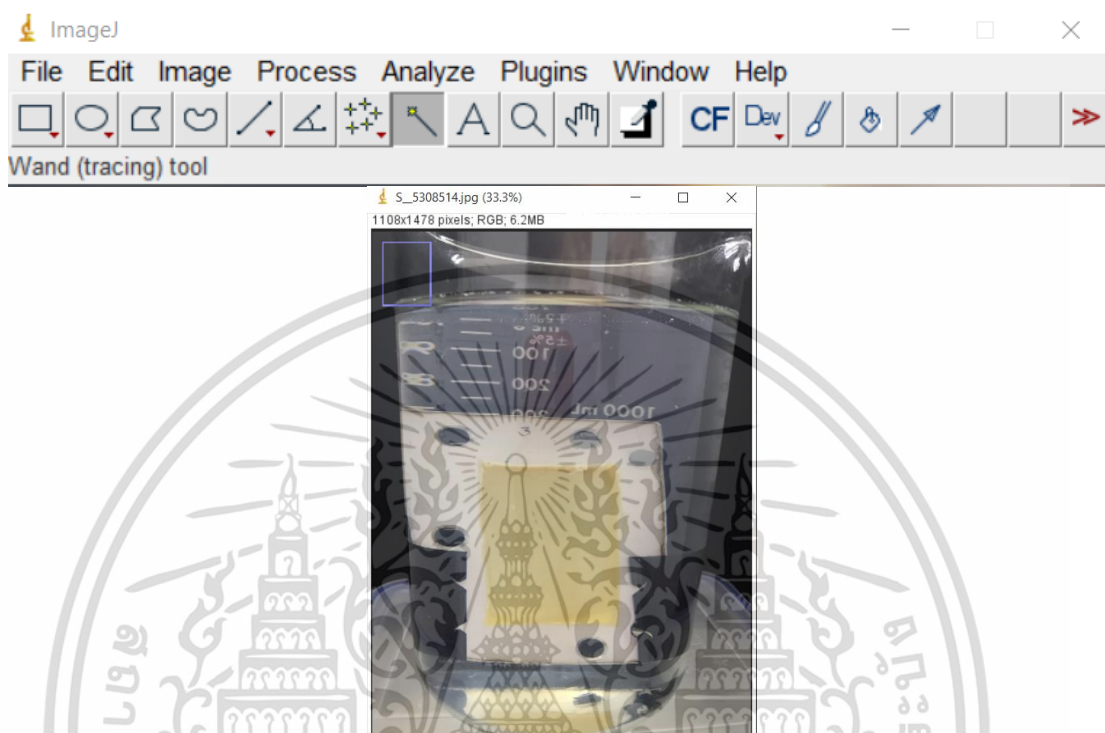
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

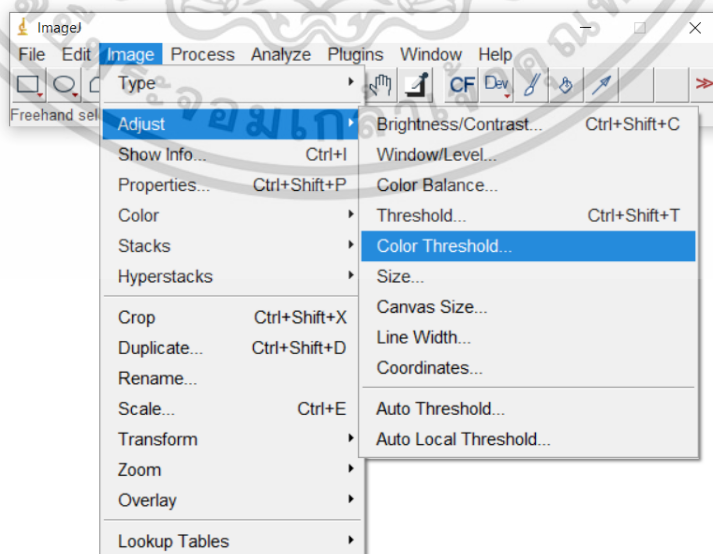
การใช้โปรแกรม Image J ในการวิเคราะห์การหลุดออกของคราบไข่แดง

1. เปิดเข้าใช้งานโปรแกรม Image J เปิดภาพที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ ง.1 เปิดเข้าใช้งานโปรแกรม Image J

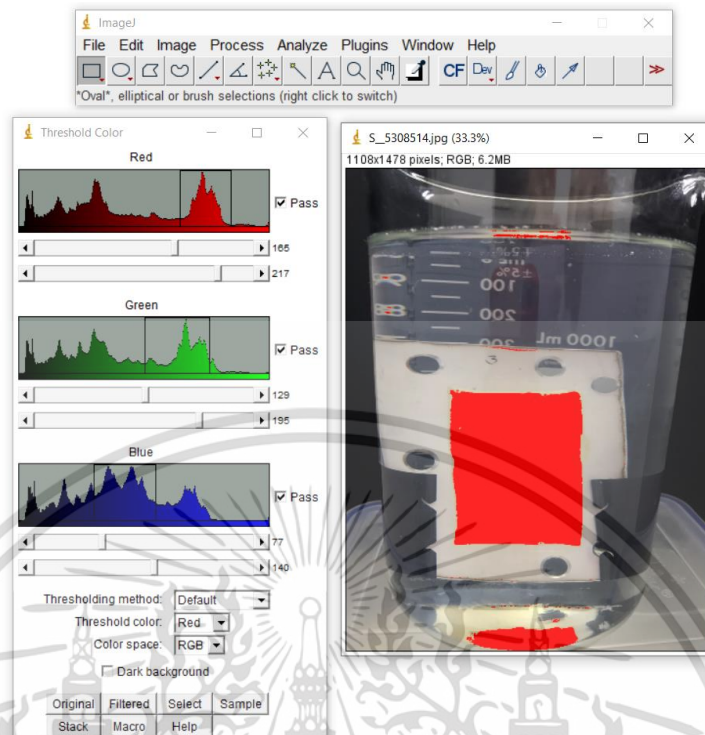
2. คลิก Image >> Adjust >> Color Threshold...



รูปที่ ง.2 การเข้าใช้งาน Color Threshold โปรแกรม Image J

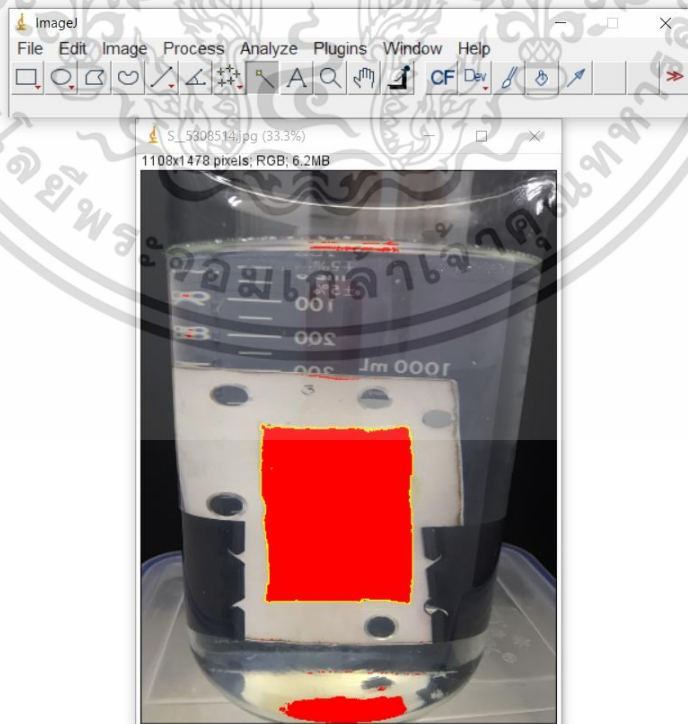
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือกใช้ระบบสี RGB ปรับค่า R, G, B ตามที่ต้องการ



รูปที่ ง.3 การตั้งค่า Color Threshold

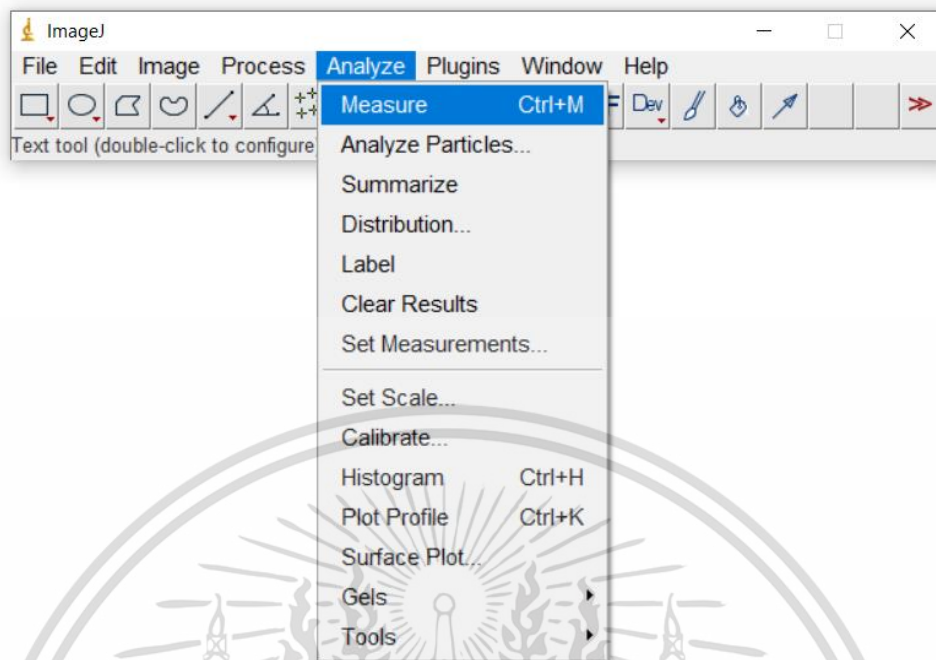
4. คลิก  (Wand tool) แล้วคลิกพื้นที่ที่ต้องการ



รูปที่ ง.4 การเลือกพื้นที่ที่ต้องการ

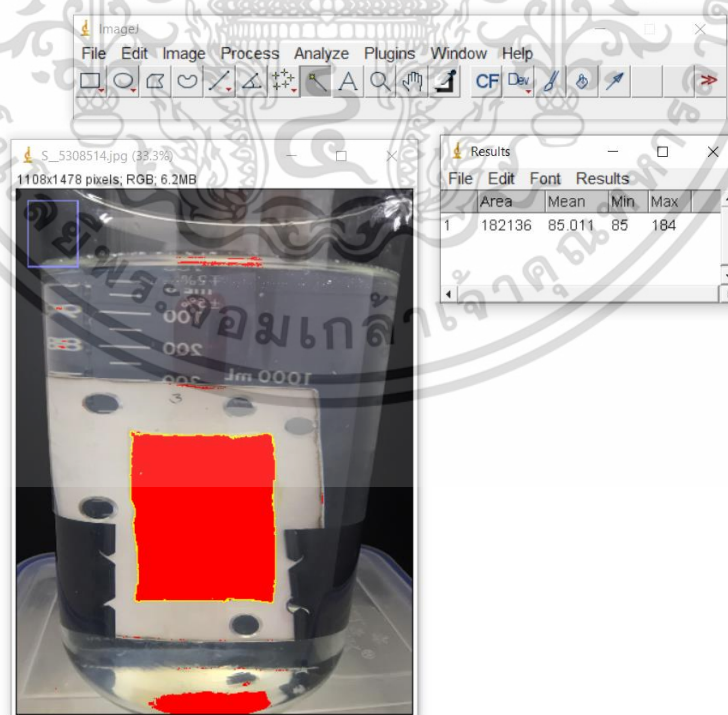
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คลิก Analyze >> Measure



รูปที่ ง.5 การเข้าใช้งาน Measure โปรแกรม Image J

6. พื้นที่ที่วัดได้จะแสดงบนหน้าต่าง Results



รูปที่ ง.6 หน้าต่าง Results แสดงค่าพื้นที่ที่วัดได้

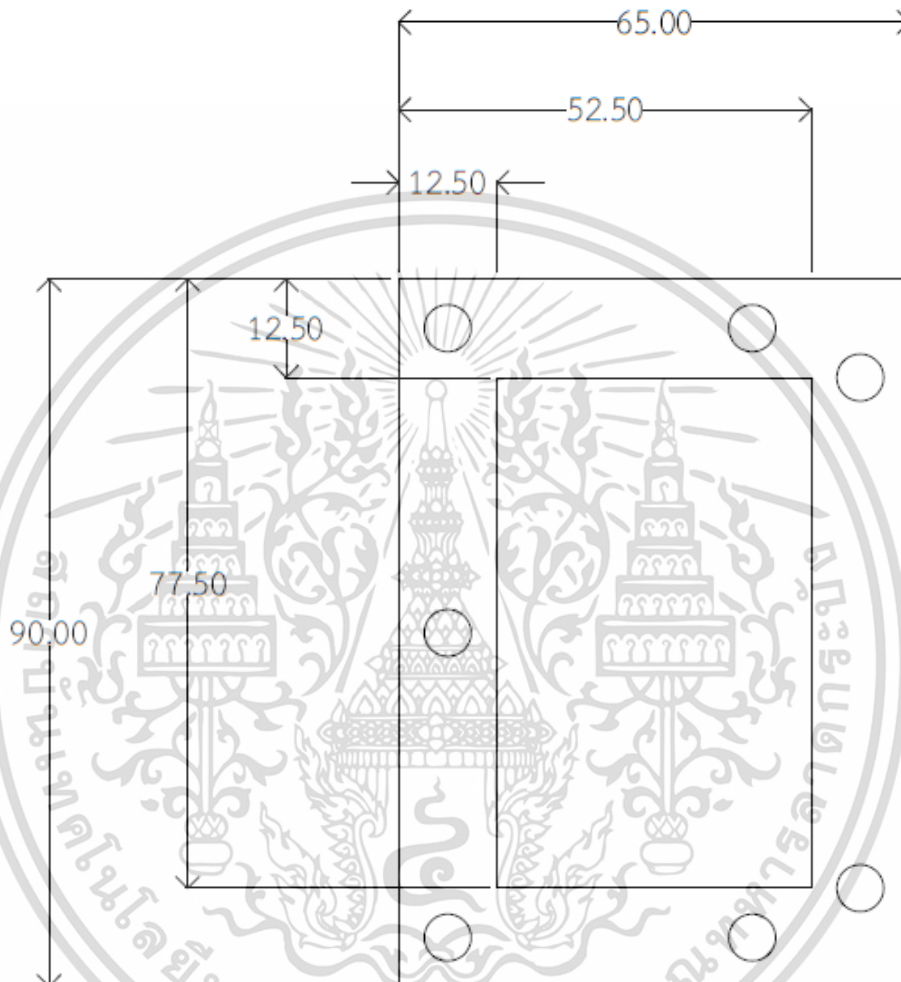
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ
การออกแบบขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับ
ห้องปฏิบัติการ

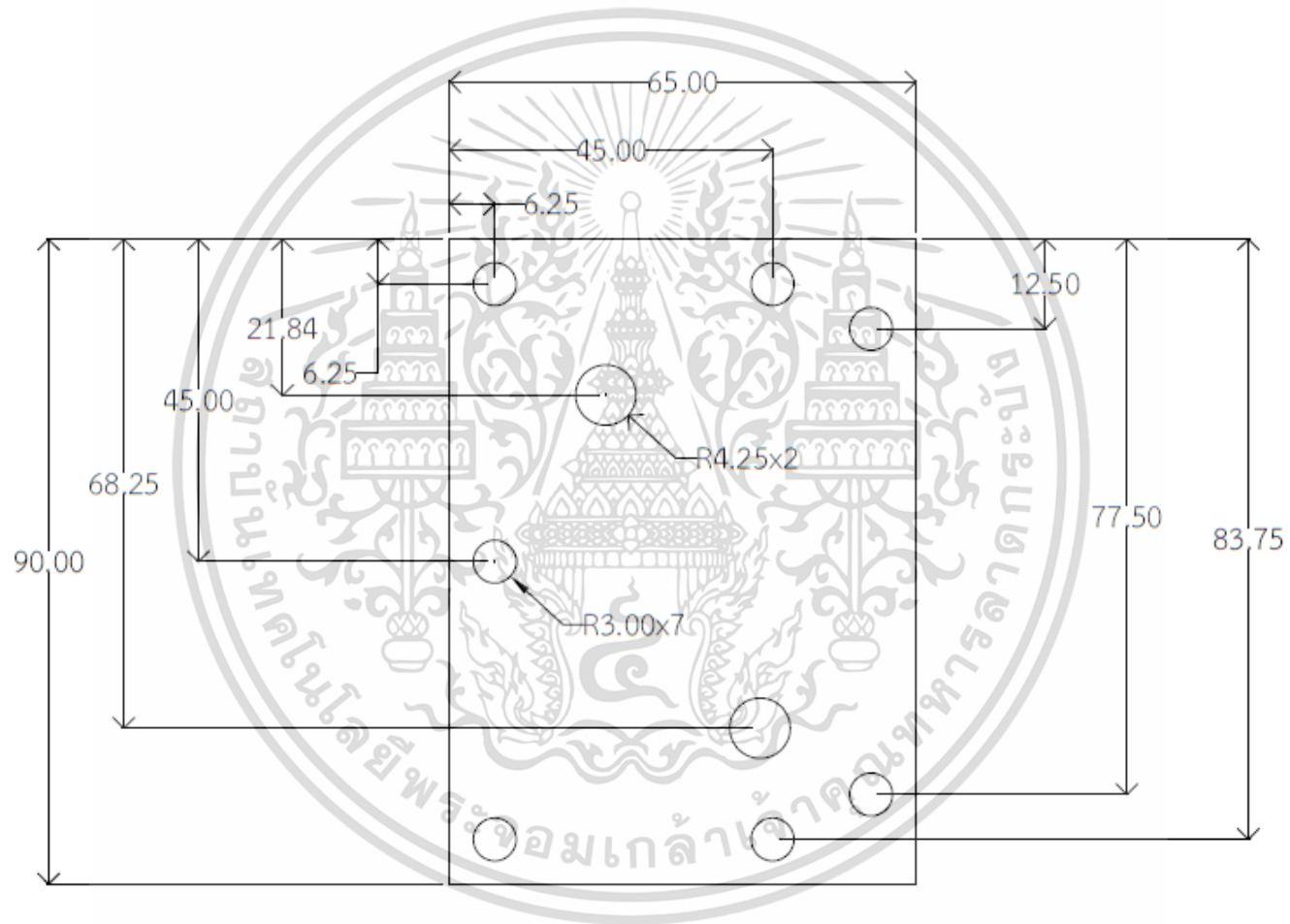
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ จ.1 ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.2 ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการ



ภาคผนวก ฉ

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TSAE 2021

การประชุมวิชาการ

สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย

ระดับนานาชาติ ครั้งที่ 14 และระดับชาติ ครั้งที่ 22 ประจำปี 2564

The 14th TSAE International Conference &

The 22nd TSAE National Conference

May 12-13, 2021

Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

Organized by Department of Agricultural Engineering,

Faculty of Engineering, Khon Kaen University(KKU) &

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **Thai Society of Agricultural Engineering(TSAE)**



แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวร้อน: กรณีศึกษาคราบไข่แดง

An empirical model for the prediction of food fouling on heating surface: A case study of egg yolk fouling

บดินทร์ สัมฤทธิ์โสภาค^{1**}, เจษฎา ชัยโฉม¹, นวภัทรา หนูนาค¹

Badin Somlitsopak^{1**}, Jedsada Chaishome¹, Navaphattra Nunak¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 10520.

¹Department of food engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520.

**Corresponding author: E-mail: 63601209@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายมวลของคราบไข่แดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทำด้วยแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความหยาบผิวเฉลี่ย 0.4 μm โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิว (60-80°C) และระยะเวลาในการให้ความร้อน (1,800-5,400 s) จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลต่อการเกาะติดของคราบไข่แดงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) โดยอุณหภูมิพื้นผิวที่สูงขึ้นส่งผลให้มวลของคราบเพิ่มขึ้น จากการเสียสภาพธรรมชาติของสารกลุ่มโปรตีนและลิโปโปรตีนในไข่แดงเมื่อได้รับความร้อน โดยมวลของคราบไข่แดง (m_f) สามารถทำนายได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์มิติตัวแปรและการถดถอย ภายใต้ขอบเขตการทดลองของตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้ อุณหภูมิน้ำร้อน (θ_w) อุณหภูมิไข่แดงเหลว (θ_b) อัตราการไหลของไข่แดง (v) และ เวลาในการให้ความร้อน (t) เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างกลุ่มตัวอย่างกับค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่า แบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 6.67

คำสำคัญ: พื้นผิวร้อน, การเกิดคราบ, ไข่แดง

Abstract

This paper proposes an empirical model for the prediction of egg yolk deposits on a 304 stainless steel heat transfer surface with an average roughness of 0.4 μm . The effect of a surface heated to a temperature of 60 to 80°C at 1,800 to 5,400 s was investigated. The results showed that the surface temperature and heating time had a significant effect on egg yolk fouling on stainless steel surfaces ($p < 0.01$). Egg yolk deposits increased with increased time and surface temperature due to the thermal denaturation of egg yolk proteins and lipoproteins. The mass of deposits (m_f) could be estimated from the dimensions and regression analysis with the constraints of hot water temperature (θ_w), bulk temperature (θ_b), product flow rate (v), and heating time (t). When comparing the predicted and validated data, its model showed an average relative error at 6.67%.

Keywords: Heating surface, Fouling, Egg yolk

➤ บทนำ

การเกิดคราบ (Fouling) เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน (Bott, 1995) ส่งผลให้ออกสารถเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง (Awad, 2011) เนื่องจากมีความจำเป็นต้องออกแบบให้สามารถแลกเปลี่ยนความ

ในทางเศรษฐศาสตร์ การเกิดคราบเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายให้กับ

อุตสาหกรรม เช่น ทำให้ราคาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือ

เครื่องจักรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางความร้อนสูงขึ้น

เนื่องจกมีความจำเป็นต้องออกแบบให้สามารถแลกเปลี่ยนความ

ไม่วารณใดๆ หงสน อักทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนได้ถึงอุณหภูมิที่กำหนดเมื่อมีคราบเกิดขึ้น ส่งผลให้เครื่องจักรมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าขนส่ง ค่าติดตั้ง และค่าบำรุงรักษาสูงขึ้น อีกทั้งส่งผลให้ค่าเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวกสูงขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้การเกิดคราบยังนำไปสู่การหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาด ทำให้ต้องสูญเสียเวลาในการผลิตไปกับกระบวนการทำความสะอาด ส่งผลให้ผลผลิตสินค้าได้ในปริมาณที่น้อยลง (Awad, 2011) ในอุตสาหกรรมอาหาร สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงในการการผลิต คือ ความปลอดภัยของผู้บริโภค กระบวนการทางความร้อนมีจุดประสงค์เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่อาจเป็นอันตรายและการเพิ่มอายุการเก็บรักษาสินค้า (Plett, 1992) การเกิดคราบอาหารจากกระบวนการให้ความร้อน อาจทำให้การทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร

การทำนายการเกิดคราบมีความจำเป็นอย่างยิ่งทั้งในมุมมองของผู้ออกแบบ เพื่อออกแบบให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนได้แม้ในขณะที่มีคราบเกิดขึ้นและในมุมมองของอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อใช้ในการตัดสินใจหยุดการผลิตเพื่อทำความสะอาดในเวลาที่เหมาะสม ในปัจจุบันได้มีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการทำนายการเกิดคราบอาหารด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) (Bouvier et al., 2014) การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) (Rosa et al., 2019) และการวิเคราะห์มิติตัวแปร (Gu et al., 2019) เป็นต้น การศึกษาการเกิดคราบอาหารส่วนใหญ่ เกิดขึ้นกับอาหารกลุ่มที่มี โปรตีนและ ลิพิด เป็นองค์ประกอบ เช่น กะทิ (Narataruksa et al., 2010) ไข่ขาว (Ling & Lund, 1978) และ เวย์โปรตีน (Zhang et al., 2019) เป็นต้น อาหารกลุ่มนี้เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดคราบที่ทำความสะดวกยาก เนื่องจากความซับซ้อนทั้งโครงสร้างและองค์ประกอบ แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาคาบอาหารที่เกิดบนพื้นผิวร้อนยังไม่ครอบคลุมถึงอาหารทุกชนิด

12 – 13 พฤษภาคม 2564 จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ครอบคลุมการจัดเป็นคราบที่มีทั้งโครงสร้างและองค์ประกอบที่ซับซ้อน ทำให้ยากต่อการทำความสะอาด (Pérez-Mohedano et al., 2015) เนื่องจากไข่แดงมีองค์ประกอบสำคัญ คือ ลิพิดและ โปรตีน (Strixner & Kulozik, 2011) ในปัจจุบันอุตสาหกรรมอาหารได้ผลิตไข่แดงออกมาทั้งในรูปของไข่แดงผงและไข่แดงเหลว พาสเจอร์ไรส์ เพื่อความสะดวกในการขนส่ง การจัดเก็บ ตลอดจนตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค โดยกระบวนการผลิตต้องอาศัยกระบวนการทางความร้อนซึ่งก่อให้เกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายมวลของคราบบนพื้นผิวร้อน โดยอาศัยการวิเคราะห์มิติตัวแปรร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองและสร้างแบบจำลองจากความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย โดยเลือกศึกษาคราบที่เกิดจากกระบวนการให้ความร้อนไข่แดง

➤ อุปกรณ์และวิธีการ

➤ การเตรียมวัตถุดิบ

ไข่แดงเหลวพาสเจอร์ไรส์บรรจุขวดปริมาตร 2 dm³ ตรา โอวีเอฟ (OVF) เก็บที่อุณหภูมิ 4±1°C ใช้สำหรับเป็นตัวอย่างทดลอง โดยมีอายุการใช้งานภายใน 24 ชั่วโมงหลังเปิดขวด และไม่มีกรนำไข่แดงที่ผ่านการทดลองแล้วกลับมาใช้ซ้ำ การทดลองเริ่มต้นจากการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่ไข่แดงเหลวปริมาตร 0.4 dm³ ที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ ผ่านน้ำซึ่งควบคุมอุณหภูมิ 50±0.5°C จนกระทั่งไข่แดงมีอุณหภูมิ 40±0.5°C จึงเริ่มการทดลอง ใช้ระยะเวลาประมาณ 1800 s สมบัติของไข่แดงคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ 2 (Gut et al., 2005) เมื่อ θ_b คือ อุณหภูมิไข่แดง (°C)

$$\rho = 1133.2 - 0.057\theta_b \quad (1)$$

$$C_p = 2629.0 + 2.39\theta_b \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

➤ ชุดทดลองการเกิดคราบไข่แดงในระดับปฏิบัติการ

ชุดทดลอง ประกอบด้วย หม้ออุ่นน้ำ (Memmert, เยอรมัน) จำนวน 2 เครื่อง ขนาด 22 dm³ และ 10 dm³ เพื่อใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนและไข่แดงตามลำดับ ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump), ปั๊มรีดท่อ (Peristaltic pump) และชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น แสดงดัง Figure 1 โครงสร้างภายนอกทำจากแผ่นอะคริลิก และมีแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 พื้นผิว 2B ความหยาบผิว 0.4 μm ขนาด 40x65x1 mm กั้นตรงกลาง ภายในมีระยะห่างระหว่างแผ่นกับโครงสร้าง 10 mm มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 2400 mm² ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำร้อนและพื้นผิวร้อนระหว่างการทดลอง โดยบันทึกข้อมูลทุก 10 s

เมื่อไข่แดงเหลวมีอุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ (40±0.5°C) ปั๊มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal pump) และปั๊มรีดท่อ (peristaltic pump) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนและไข่แดงที่ 48.3 cm³ s⁻¹ และ 4.2 cm³ s⁻¹ ตามลำดับ ผ่านพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน โดยไหลในทิศทางเดียวกัน หลังจากนั้นน้ำร้อนจะไหลกลับไปยังหม้ออุ่นน้ำอีกครั้งก่อนวนกลับมาใช้ใหม่ ส่วนไข่แดงเหลวจะได้รับการระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิห้อง (24±0.5°C) ก่อนไหลกลับเข้าปั๊มเกอร์และไหลวนกลับเข้าส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนอีกครั้งจนกว่าการทดลองจะเสร็จสิ้น

ปัจจัยการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ 70, 75, 80, 85 และ 90°C ซึ่งทำให้แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิเท่ากับ 60, 65, 70, 75 และ 80°C ตามลำดับ และเวลาในการให้ความร้อนที่ 1800, 3600 และ 5400 s หลังการทดลองนำแผ่นทดลองมาชั่งมวลของคราบไข่แดงด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล (Vibra-AB323, Shinko Denshi, จีน) ความละเอียด 0.001 g ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยใช้ข้อมูลสร้างแบบจำลอง 2 ชุด และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองอีก 1 ชุด

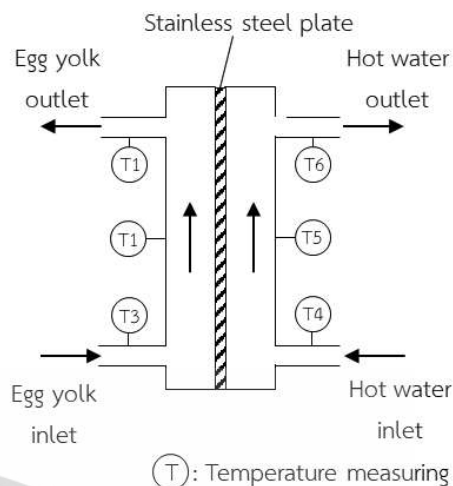


Figure 1 Fouling test cell.

การวิเคราะห์มิติตัวแปร

การวิเคราะห์มิติตัวแปรใช้การสร้างความสัมพันธ์ด้วยทฤษฎีบท Buckingham Pi มีตัวแปรเป้าหมายคือ มวลของคราบไข่แดง (m_f) ซึ่งพิจารณาในมุมของการสะสมมวลต่อหน่วยพื้นที่ ส่วนตัวแปรอื่น ๆ เกี่ยวกับสมบัติของไข่แดงและกระบวนการให้ความร้อน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของไข่แดง ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) และความจุความร้อน (C_p) ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิของไข่แดง และส่งผลต่อการเกิดคราบ (Awad, 2011) ส่วนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการให้ความร้อน ประกอบด้วย อุณหภูมิไข่แดง-เหลว (θ_h), อุณหภูมิน้ำร้อน (θ_w) โดยอุณหภูมิทั้ง 2 สัมพันธ์กับการเกิดคราบจากปฏิกิริยาเคมี (Bott, 1995) อัตราการไหลเชิงปริมาตรของไข่แดง (v) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สัมพันธ์กับความเร็วในการเคลื่อนที่และความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดลอง และเวลาในการให้ความร้อน (t) มิติของตัวแปรทั้งหมดแสดงรายละเอียดดัง Table 1 โดยมีมิติพื้นฐาน 4 มิติ ได้แก่ มวล (M) ความยาว (L) เวลา (T) และอุณหภูมิ (K) การสร้างแบบจำลองอาศัยความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่นำเสนอโดย Gu et al. (2019)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12 – 13 พฤษภาคม 2564 จัดประชุมโดย มหาวิทยาลัยขอนแก่น correlation) แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยหลายตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Multiple nonlinear regression) การวิเคราะห์ทางสถิติ ทั้งหมดอาศัยการคำนวณโดยใช้โปรแกรม SPSS Statistics รุ่น 26 พัฒนาโดยบริษัท IBM (นิวยอร์ก, สหรัฐอเมริกา)

➤ การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การออกแบบการทดลองใช้แบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) และวิเคราะห์ ความแตกต่างด้วยวิธีของดินแดน (Duncan's multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.95 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้น และตัวแปรตามแสดงด้วยค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's

Table 1 Influencing and target parameters in fouling process of egg yolk.

Parameter category	Symbol	Name	Unit	Dimension
Target parameter	m_f	Egg yolk fouling mass per unit area	kg m ⁻²	M ¹ L ⁻²
Product parameters	ρ	Egg yolk density	kg m ⁻³	M ¹ L ⁻³
	C_p	Specific heat capacity of egg yolk	J kg ⁻¹ .°C ⁻¹	L ² T ⁻² K ¹
Process parameters	θ_b	Bulk temperature	°C	K ¹
	θ_w	Hot water temperature	°C	K ¹
	v	Product volume flow rate	m ³ s ⁻¹	L ³ T ⁻¹
	t	Heating time	s	T ¹

➤ ผลและวิจารณ์

➤ การเกิดคราบไข่แดง

จากการทดลองการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวร้อน มวลของคราบ ไข่แดงที่เกิดขึ้นแสดงดัง Table 2 โดยข้อมูลแสดงให้เห็นว่าทั้ง อุณหภูมิพื้นผิวและเวลาในการให้ความร้อนส่งผลต่อการเพิ่มขึ้น ของมวลคราบไข่แดงอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.01) ด้วยค่า สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.55 และ 0.72 ตามลำดับ (p<0.01) เมื่อ พิจารณาเวลาในการเกิดคราบ การให้ความร้อนไข่แดงตั้งแต่ เริ่มต้นจนถึงเวลา 1800 s พบว่าอุณหภูมิแทบไม่ส่งผลกับการเกิด ของคราบไข่แดง และที่เวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มวลของคราบไข่แดงเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิพื้นผิวส่งผลให้มวลของคราบที่เกาะบน แผ่นทดลองเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิพื้นผิว 80°C มีมวลของคราบไข่แดงสูงที่สุด และลดลงตามลำดับเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งสามารถอนุมานได้ว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่กำหนดปริมาณการเกิดคราบ

ไข่แดง จากการสังเกตคราบไข่แดงที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดลองด้วยตาเปล่าพบว่า คราบมีลักษณะเป็นเจลโปร่งแสง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nakamura et al. (1982) ที่ศึกษาการเกิดเจล (Gelation) ของไข่แดงที่อุณหภูมิช่วง 50-85°C และพบว่า ลิโปโปรตีน ในไข่แดงสามารถเกิดเจลได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 65°C โดยกลไกดังกล่าวควบคุมโดยอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เจลของไข่แดงมีปริมาณ และสภาพแข็ง-เกร็ง (Rigidity) เพิ่มขึ้น ซึ่งลิโปโปรตีนเป็นโมเลกุลที่เสียสภาพธรรมชาติได้ง่าย (Le Denmat et al., 1999) และสามารถเกิดเจลได้เมื่อได้รับความร้อน (Nakamura et al., 1982) อย่างไรก็ตามการทดลองมีคราบเกิดขึ้นที่อุณหภูมิพื้นผิว 60°C ซึ่งอาจเกิดจากโปรตีนกลุ่มอื่น ที่เสียสภาพธรรมชาติได้ง่ายกว่า เช่น ไลเวติน (Le Denmat et al., 1999) เมื่อเปรียบเทียบกับเกิดการคราบอาหารชนิดอื่นที่มีส่วนประกอบของลิพิดและโปรตีน พบว่าปริมาณของลิพิดไม่ส่งผลต่อการเกิดคราบ (Zhang et al., 2019)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดคราบของน้ำกะทิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดย Narataruksa et al. (2010) ระบุว่าโปรตีนเป็นองค์ประกอบสำคัญที่อาหารเกิดคราบ ส่วนลิพิดไม่มีบทบาทในปฏิกิริยาการเกิดคราบ จึงอาจพิจารณาได้ว่าการเกิดคราบไขแดงบนพื้นผิวร้อนมีส่วนมาจากการเสียดสีของโปรตีนในไขแดงเป็นหลัก แบบจำลองการเกิดคราบไขแดง

จากการจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติตามทฤษฎีบท Buckingham โดยเลือกใช้ตัวแปรซ้ำในการกลุ่มตัวแปรไร้มิติ คือ ความหนาแน่น (ρ) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) อุณหภูมิความร้อน (θ_w) และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของไขแดง (v) จากการวิเคราะห์สามารถจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติได้ 3 กลุ่ม แสดงดังสมการที่ 3

$$\Pi_1 = \frac{m_f^2 \sqrt{C_p \theta_w}}{\rho^2 v} = f \left(\Pi_2 = \frac{t^2}{v \sqrt{C_p \theta_w^3}}, \Pi_3 = \frac{\theta_b}{\theta_w} \right) \quad (3)$$

โดยกลุ่มตัวแปรที่ 1 (Π_1) เกี่ยวข้องกับมวลที่เกิดขึ้นบนแผ่นทดลอง ตัวแปรกลุ่มที่ 2 (Π_2) สัมพันธ์กับเวลาในการให้ความร้อน และตัวแปรกลุ่มที่ 3 (Π_3) แสดงอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิของไขแดงต่อน้ำร้อน จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ แบบจำลองที่ได้ แสดงดังสมการที่ 4

$$\Pi_1 = 2.171 \times 10^{-4} \left[(\Pi_2)^{0.594} (\Pi_3)^{-6.498} \right] + 2.042 \quad (4)$$

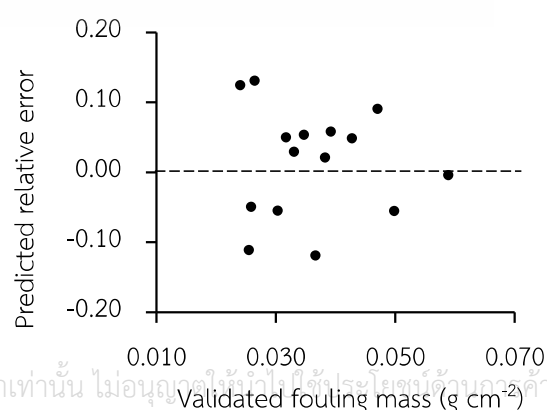
Table 2 Fouling mass of egg yolk at difference surface temperature and heating time.

Surface temperature (°C)	Egg yolk fouling mass* (g cm ⁻²)		
	1800 s	3600 s	5400 s
60	0.024 ^{aA} ±0.003	0.031 ^{abA} ±0.001	0.031 ^{bA} ±0.001
65	0.025 ^{aA} ±0.003	0.036 ^{bAB} ±0.002	0.038 ^{bB} ±0.001
70	0.026 ^{aA} ±0.002	0.039 ^{bBC} ±0.002	0.044 ^{bB} ±0.002
75	0.025 ^{aA} ±0.003	0.044 ^{bCD} ±0.001	0.051 ^{bC} ±0.004
80	0.030 ^{aA} ±0.004	0.049 ^{bD} ±0.005	0.058 ^{bC} ±0.005

*All the values represent the means of two replicates. Values with different letters in lower case in the same row were significantly different (p<0.05). Values with

different letters in upper case in the same column of the category were significantly different (p<0.05).

โดยแบบจำลองสร้างจากการทดลองในช่วง $3.6 \leq \Pi_1 \leq 31.4$, $5726.7 \leq \Pi_2 \leq 75138.7$ และ $0.4 \leq \Pi_3 \leq 0.6$ สามารถใช้เพื่อทำนายมวลของคราบได้โดยเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างที่นำมาสร้างแบบจำลองพบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.93 และการทำนายมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์



ไม่ต่ำกว่า 0.93 และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

ไม่ต่ำกว่า 0.93 และค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

เฉลี่ยร้อยละ 7.39 และเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องพบว่า แบบจำลองที่ได้สามารถทำนายข้อมูลโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 6.67 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองกับข้อมูลของกลุ่มที่ใช้ตรวจสอบแสดงดัง Figure 2 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าค่าที่ได้จากการทำนายกระจายตัวทั้งมากกว่าและน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดลองอย่างสมมาตร สอดคล้องกับ Figure 3 ที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์กับมวลของคราบ

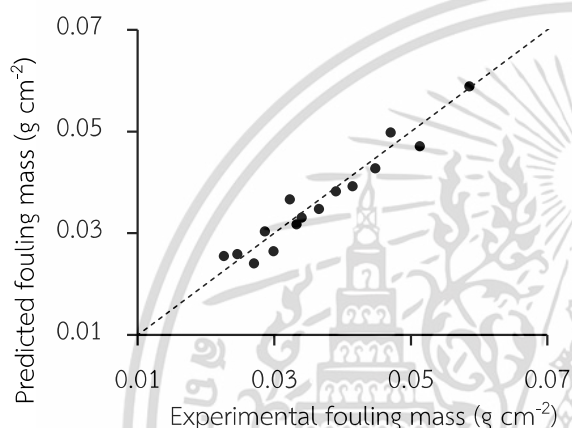


Figure 2 Predicted and experimental fouling mass on heating surface.

Figure 3 Predicted fouling mass relative error for validated experimental fouling mass.

➤ สรุป

จากการศึกษาการเกิดคราบไขมันบนพื้นผิวร้อนที่ระดับอุณหภูมิพื้นผิวและเวลาในการให้ความร้อนที่ต่างกันผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1) อุณหภูมิพื้นผิวและเวลาในการให้ความร้อน มีความสัมพันธ์กับการเกิดคราบไขมันอย่างมีนัยสำคัญ โดยการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาส่งผลให้คราบมีมวลเพิ่มขึ้น

2) การวิเคราะห์มิติตัวแปรเพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายมวลของคราบไขมัน สามารถทำนายมวลของคราบไขมันได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เฉลี่ยร้อยละ 6.67

งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามการทำนายมวลของคราบไขมันแดงนอกช่วงของการสร้างแบบจำลองยังไม่ได้รับการตรวจสอบ เนื่องจากกระบวนการเกิดคราบขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายประการ การทดลองในอนาคตอาจครอบคลุมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบของคราบ การศึกษาอิทธิพลของอัตราการของผลิตภัณฑ์ รวมถึงอาจประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนเพื่อวิเคราะห์การเกิดคราบในมุมมองของการเปลี่ยนความร้อน

➤ เอกสารอ้างอิง

Awad, M.M. 2011. Fouling of Heat Transfer Surfaces. In: Belmiloudi, A. (Ed.), Heat Transfer - Theoretical Analysis Experimental Investigations and Industrial Systems (pp. 505-542.). Rijeka: InTech.

Bott, T.R. 1995. Fouling of Heat Exchangers. (1st ed.). Amsterdam: Elsevier Science B.V.

Bouvier, L., Moreau, A., Ronse, G., Six, T., Petit, J., Delaplace, G. 2014. A CFD model as a tool to simulate b-lactoglobulin heat-induced denaturation and aggregation in a plate heat exchanger. Journal of Food Engineering 136, 56-63.

Gu, Y., Bouvier, L., Tonda, A., Delaplace, G. 2019. A mathematical model for the prediction of the whey protein fouling mass in a pilot scale plate heat exchanger. Food Control 106, 1-10.

Gut, J.A.W., Pinto, J.M., Gabas, A.L., Telis-Romero, J. 2005. Continuous Pasteurization of Egg yolk: Thermophysical Properties and Process Simulation. Journal of Food Process Engineering 28(2), 181-203.

Le Denmat, M., Anton, M., Gandemer, G. 1999. Protein Denaturation and Emulsifying Properties of Plasma and Granules of Egg Yolk as Related to Heat Treatment. Journal of Food Science 64(2), 194-197.

- Ling, A.C., Lund, D.B. 1978. Fouling of Heat Transfer Surfaces by Solutions of Egg Albumin. *Journal of Food Protection* 41(3), 187-194.
- Nakamura, R., Fukano, T., Taniguchi, M. 1982. Heat-induced gelation of hen's egg yolk low density lipoprotein (LDL) dispersion. *Journal of Food Science* 47, 1449-1453.
- Narataruksa, P., Pichitvittayakarn, W., Heggs, P.J., Tia, S. 2010. Fouling behavior of coconut milk at pasteurization temperatures. *Applied Thermal Engineering* 30, 1387-1395.
- Pérez-Mohedano, R., Letzelter, N., Bakalis, S. 2015. Development of a swelling-removal model for the scanning fluid dynamic gauge. *Food and Bioprocess Processing* 93, 269-282.
- Plett, E. 1992. Cleaning and Sanitation. In: Heldman, D.R., Lund, D.B. (Eds.), *Handbook of Food Engineering* (pp. 719-740.). New York: MARCEL DEKKER Inc.
- Rosa, M.T.M.G., Guimarães, D.H.P., Arce, P.F. 2019. Experimental measurements and simulation of the fouling phenomena of natural proteins. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 129, 1075-1085.
- Strixner, T., Kulozik, U. 2011. Egg proteins. In: Phillips, G.O., Williams, P.A. (Eds.), *Handbook of Food Proteins* (pp. 150-209). Cornwall: Woodhead Publishing Ltd.
- Zhang, B.Y., Lu, J., Huang, J.Y. 2019. Effect of sugar on the fouling behavior of whey protein. *Food and Bioprocess Processing* 113, 2-9.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายบดินทร์ สัมฤทธิ์โสภาค
วัน เดือน ปีเกิด	13 มกราคม พ.ศ.2541 จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 442/23 ถนนตลาดใหม่ ตำบลตลาด อำเภอเมืองฯ จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000
ประวัติการศึกษา	2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร (เกียรตินิยมอันดับ 1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์และผลงานวิจัย	- ปริญญาโทเรื่อง “การตรวจสอบพื้นผิวแบบอัตโนมัติของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ด้วยเทคนิคลำแสงเลเซอร์ตัดขวาง 3 มิติ” ปี พ.ศ. 2563 - นำเสนองานวิจัยเรื่อง “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวร้อน: กรณีศึกษาคราบไข่แดง” (Award of good presentation) ในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 22 ปี พ.ศ. 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้