

การตรวจและติดตามการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
โดยใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

DETECTION AND MONITORING OF FOOD FOULING ON HEAT TRANSFER
SURFACE USING HEAT FLUX SENSOR



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2567

KMITL-2024-EN-M-117-301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DETECTION AND MONITORING OF FOOD FOULING ON HEAT TRANSFER
SURFACE USING HEAT FLUX SENSOR



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD AND AGRICULTURAL INTELLIGENCE ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-M-117-301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจและติดตามการเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน
นักศึกษา	นายวรปัญญา สุธานุภาพุฒิ
รหัสประจำตัว	66016164
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. นวภัทรา หนูนา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิว ($60^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$) ต่อกลไกการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเวลาจริงด้วยเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน และอธิบายเชื่อมโยงถึงกลไกการทำความสะอาดคราบ จากการทดลอง พบว่า เส้นกราฟการเกิดคราบไข่แดงเป็นแบบเข้าสู่สมดุล โดยเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวสูงขึ้น ค่าความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงที่สภาวะสมดุล (R_f^*) เพิ่มขึ้น เวลาในการเข้าสู่สมดุลของการเกิดคราบ (t^*) เพิ่มขึ้น ระยะเวลาของการก่อตัวของอนุภาคโปรตีนในไข่แดงลดลง และการถ่ายเทมวลของอนุภาคโปรตีนในไข่แดงเหลวไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น โดยคราบที่เกิดจากพื้นผิวอุณหภูมิสูงสามารถพิจารณาเป็นคราบที่ไม่มีสมบัติการละลายกลับ สำหรับการทำความสะอาดด้วยการแช่คราบไข่แดงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีกลไกการแพร่และการละลายเป็นกลไกหลัก คราบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 70°C โปรตีนมีการสร้างโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรง จึงใช้ระยะเวลาในการทำให้คราบบวม เพื่อลดลงแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ เมื่อเปรียบเทียบกับคราบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า

Thesis Title	Detection and Monitoring of Food Fouling on Heat Transfer Surface using Heat Flux Sensor
Student	Mr.Worapanya Suthanupaphwut
Student ID.	66016164
Degree	Master of Engineering
Program	Food and Agricultural Intelligence Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Navapattra Nunak

ABSTRACT

This research aimed to study and to describe the influence of surface temperature (60 - 80°C) on the mechanism of egg yolk deposits formation on the heat transfer surface in real time using a heat flux sensor. In addition, the cleaning mechanism of fouling deposits formed on hot surfaces at different temperatures was also explained. It was found that egg yolk fouling curves exhibited an asymptotic pattern. The asymptotic fouling factor (R_f^*) and time (t^*) increased, the induction period of egg yolk proteins formation in the bulk of the fluid decreased, and the transport of the fouling deposits in the bulk of the fluid to the heat transfer surface increased with the increasing surface temperature. The fouling deposits formed at the high surface temperature could be considered as non-solubility foulants. For cleaning by immersion of egg yolk deposits in NaOH solution, the diffusive dissolution was the main mechanism. The deposits formed on the surface heated at a temperature higher than 70°C had a strong network structure of proteins. This causes the swelling and the reducing of cohesive force took a longer time comparing to the deposits formed at a lower temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ. ดร.นวกัทรာ หนูนาค อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ทวีพล ชี้อัสตัย และ ผศ. ดร.เจษฎา ชัยโถม สำหรับการให้คำแนะนำ จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์ในงานวิจัยฉบับนี้ ขอมอบให้กับผู้เกี่ยวข้องทุกคน

วรปัญญา สุธานุภาพุฒิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
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 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การเกิดคราบอาหารสะสมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน.....	5
2.1.1 การเกิดคราบ.....	5
2.1.2 ความต้านทานความร้อนของคราบ.....	6
2.1.3 กลไกการเกิดคราบสะสมและการหลุดออกของคราบอาหาร.....	7
2.2 เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบเทอร์โมไพล์.....	9
2.3 ไข่แดงเหลวและการให้ความร้อนไข่แดงเหลว.....	11
2.4 การทำความสะอาดคราบโปรตีน.....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.5.1 การเกิดคราบสะสมของอาหารที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ.....	14
2.5.2 การทำความสะอาดคราบอาหารที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ.....	16
2.5.3 การติดตามการเกิดคราบด้วยวิธีวัดการถ่ายเทความร้อน.....	18
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	19
3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ.....	19
3.2 การทดลองการเกิดคราบไข่แดง.....	22
3.3 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทำความสะอาดคราบไขแดง.....	25
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง.....	27
4.1 การเกิดคราบไขแดงบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	27
4.1.1 การวิเคราะห์การถ่ายความร้อนระหว่างการเกิดคราบ.....	27
4.1.2 กลไกการเกิดคราบไขแดง.....	35
4.2 กลไกทำความสะอาดคราบไขแดง.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	41
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	41
5.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อกลไกการเกิดคราบ.....	41
5.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อกลไกการทำความสะอาดคราบ.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
บรรณานุกรม.....	44
ภาคผนวก.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 การหลุดออกของคราบไขแดงที่เกิดจากการเกาะติดบนพื้นผิวอุณหภูมิต่าง ๆ.....	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นกราฟการเกิดคราบ.....	7
2.2 โครงสร้างภายในเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน.....	9
2.3 การติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนบนผิวท่อ.....	10
2.4 โครงสร้างของไลโปโปรตีน.....	11
2.5 การหลุดออกของคราบเวย์โปรตีน.....	13
2.6 กลไกการทำความสะอาดคราบเวย์โปรตีน.....	14
2.7 กลไกการทำความสะอาดคราบไข่แดง.....	17
3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ.....	19
3.2 (ก) ไตอะแกรมชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ขนาดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ค) ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และน้ำร้อน (ง) การติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน และ (จ) มิติของเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง.....	20
3.3 แผนภาพการทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ.....	25
3.4 การแช่คราบไข่แดงในสารละลาย NaOH.....	26
4.1 ตัวอย่างการถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิวแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ.....	28
4.2 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิวแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ.....	29
4.3 ตัวอย่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงกับระยะเวลาให้ความร้อน (ก) 90 min และ (ข) 10 min แรกของกระบวนการ ที่อุณหภูมิแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ.....	30
4.4 เส้นกราฟการเกิดคราบไข่แดงที่เกิดจากอุณหภูมิแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ.....	32
4.5 เส้นกราฟการเกิดคราบและการเข้าสู่สมดุลของคราบไข่แดงที่เกิดจากอุณหภูมิแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ก) 60°C (ข) 65°C (ค) 70°C (ง) 75°C (จ) 80°C.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการทางความร้อนในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารและเครื่องดื่มส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อความปลอดภัยของอาหารและการยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ (Teixeira, 2014) โดยวิธีพาสเจอร์ไรส์เป็นหนึ่งในกระบวนการทางความร้อนที่นิยมสำหรับการทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียและจุลินทรีย์ก่อโรค รวมถึงการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิดในอาหารเหลว เช่น การพาสเจอร์ไรส์ไข่แดงที่อุณหภูมิ 61.1°C ระยะเวลา 3.5 min หรือ 60°C ระยะเวลา 6.2 min (USDA, 1969) เป็นต้น

ในระหว่างการให้ความร้อนอาหารเหลวผ่านพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน อาหารจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพทางโครงสร้าง (Le Denmat et al., 1999, Schnöing et al., 2020) ก่อให้เกิดคราบเกาะติดและสะสมบนพื้นผิวร้อน หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า การเกิดฟาวลิง (Fouling) (Gut et al., 2005; Le Denmat et al., 1999) โดยเกิดการคราบสะสมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลดลง และอาจทำให้กระบวนการฆ่าเชื้อไม่สมบูรณ์ ส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นด้านคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร (Awad, 2011; Bansal and Chen, 2006; Bott, 1995) นอกจากนี้ การเกิดฟาวลิงยังส่งผลทำให้ค่าความดันสูญเสียในระบบเพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์ เช่น ค่าไฟฟ้า ค่าบำรุงรักษา รวมถึงค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการทำความสะอาดเพิ่มขึ้นด้วย (Goode et al., 2013)

กลไกการเกิดคราบของอาหารเหลวสะสมบนพื้นผิวร้อนในระหว่างกระบวนการฆ่าเชื้อได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก โดยนักวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน และเวลาในการแปรรูป ที่มีต่อพฤติกรรมการเกิดคราบสะสมของอาหารเหลวชนิดต่าง ๆ เช่น เวย์โปรตีนและนม (Belmar-Beiny et al., 1993; Fryer et al., 1996; Gu et al., 2019; Phinney et al., 2017; Zhang et al., 2020) โปรตีนไข่ขาว (Egg albumin) (Ling and Lund, 1978) กะทิ (Narataruksa et al., 2010) และนมถั่วเหลือง (Sritham et al., 2023; Wang et al., 2018) เป็นต้น โดยพบว่า อุณหภูมิพื้นผิวที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์เป็นตัวแปรสำคัญที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพโครงสร้างของอาหารและทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสะสมของคราบบนพื้นผิว (Blanpain-Avet et al., 2016; Pan et al., 2019; Wang et al., 2018)

จากความซับซ้อนของโครงสร้างอาหารที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อนและเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวร้อน สิ่งนี้ส่งผลกระทบต่อข้อกำหนดวิธีการทำความสะอาดที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ นักวิจัยส่วนใหญ่จึงพยายามสร้างความเข้าใจถึงพฤติกรรมที่เกิดคราบอาหารที่สะสมบนพื้นผิว เพื่อเชื่อมโยงไปสู่ข้อกำหนดวิธีการทำความสะอาด (Gordon et al., 2012) โดยการติดตามการเกาะติดของคราบแบบเวลาจริงจะช่วยทำให้เข้าใจพฤติกรรมที่เกิดคราบของอาหารชนิดต่าง ๆ ได้ ซึ่งมีหลายวิธี ได้แก่ การวัดความดันสูญเสีย (Riverol and Napolitano, 2005) การวัดอุณหภูมิผลิตภัณฑ์ทางออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Narataruksa et al., 2010) ซึ่งวิธีทั้งสองนี้มีข้อจำกัดด้านความไวต่อการตรวจจับการเกาะติดของคราบ การวัดตัวแปรทางไฟฟ้า (Ling and Lund, 1978) โดยวิธีนี้จำเป็นต้องกระตุ้นด้วยไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนจึงไม่เป็นที่นิยม การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงและการสั่นสะเทือน Wallhäuser et al. (2011) และ Pereira et al. (2008) ใช้วิธีนี้สำหรับตรวจสอบการก่อตัวของคราบไขมันเนยคั้นรูปบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม และการก่อตัวของไบโอฟิล์มบนแผ่นพีวีซี อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ รวมถึงค่าที่วัดได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของคราบเพียงจุดเดียว นอกจากนี้ ยังมีวิธีการตรวจติดตามการเกิดคราบด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนโดยใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน ซึ่งวิธีนี้เป็นการวัดเชิงพื้นที่เหมาะสำหรับการประเมินการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นคราบแบบเวลาจริง

ปัจจุบันความต้องการผลิตภัณฑ์แปรรูปจากไข่แดงมีเพิ่มมากขึ้น การแปรรูปและการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน เพื่อคุณภาพ ความปลอดภัย และการยืดอายุของผลิตภัณฑ์ จึงเป็นสิ่งจำเป็น (Shahbandeh, 2023) โดยความร้อนที่ใช้อยู่ในย่านอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโปรตีนไข่แดง ก่อให้เกิดคราบที่มีโครงสร้างซับซ้อนเกาะติดบนพื้นผิวของอุปกรณ์ในระหว่างกระบวนการ และยากต่อการทำความสะอาด อย่างไรก็ตาม การศึกษาการเกิดคราบของไข่แดงบนพื้นผิวร้อนยังคงค่อนข้างจำกัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกของการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ และอธิบายเชื่อมโยงถึงกลไกการทำความสะอาด โดยใช้วิธีการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานความร้อนของคราบแบบเวลาจริง ด้วยเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน คราบอาหารที่ใช้เป็นกรณีศึกษา คือ คราบไข่แดงที่เกาะติดในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อตรวจและติดตามการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวร้อนด้วยเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน
2. เพื่ออธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อกลไกการเกิดคราบและกลไกการทำความสะอาดคราบไข่แดง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นระดับห้องปฏิบัติการเป็นชุดทดลองการเกิดคราบ โดยลักษณะการไหลในชุดทดลองนี้เป็นการไหลแบบราบเรียบ
2. ใช้ไข่แดงเหลวพาสเจอร์ไรส์เป็นตัวอย่างอาหาร
3. ใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 พื้นผิว 2B เป็นพื้นผิวร้อน
4. ทำความสะอาดคราบที่สะสมบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีการแช่ในสารทำความสะอาด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีการเกิดคราบ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ วิธีตรวจและติดตามการเกิดคราบ
2. ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกลไกการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวร้อนและกลไกการทำความสะอาด
3. วางแผนการทดลองและทำการทดลองเบื้องต้น
4. ดำเนินการทดลองการเกิดคราบไข่แดงและวิเคราะห์ผลการทดลอง
5. ประเมินและสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้วิธีวิเคราะห์รูปแบบการเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน
2. สามารถอธิบายอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวร้อนต่อกลไกการเกาะติดและกลไกการทำความสะอาดคราบไข่แดงบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กลไกการเกิดคราบบนพื้นผิวร้อน การเสียสภาพของโปรตีนระหว่างการเกิดคราบไ้แดงบนพื้นผิวร้อน เช่น เซอร์วัตฟลักซ์ความร้อน การวิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของคราบ กลไกการทำความสะอาดคราบโปรตีน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงชุดทดลองการเกิดคราบ การทดลองการเกิดคราบ การวิเคราะห์ค่าความต้านทานความร้อน และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

บทที่ 4 กล่าวถึงอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวร้อนต่อกลไกการเกาะติดและกลไกการทำความสะอาดคราบไ้แดงบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

บทที่ 5 กล่าวถึง บทสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเกิดคราบอาหารสะสมบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

2.1.1 การเกิดคราบ

โดยทั่วไป “การเกิดคราบ (Fouling)” หมายถึง การสะสมและก่อตัวของอนุภาคที่ไม่พึงประสงค์บนพื้นผิวของอุปกรณ์ สามารถเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวใด ๆ ที่สัมผัสกันระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งนอกจากทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสูญเสียความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแล้ว การเกิดคราบเกาะบนพื้นผิวยังทำให้พื้นที่หน้าตัดลดลง ความดันตกคร่อมอุปกรณ์จึงเพิ่มขึ้น การเกิดคราบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญในอุตสาหกรรมที่ยังไม่ได้รับการแก้ไข และยากที่จะเข้าใจ เนื่องจากความซับซ้อนของกระบวนการ ซึ่งประกอบด้วยหลายกระบวนการร่วมกัน ได้แก่ กระบวนการทางเคมี ความสามารถในการละลาย การกัดกร่อน และกระบวนการทางชีวภาพ โดยปรากฏการณ์ของการเกิดคราบอธิบายได้ด้วยหลักการถ่ายเทโมเมนตัม การถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะที่ไม่คงตัว (Bott, 1995, Awad, 2011) อุตสาหกรรมอาหารเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดคราบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คราบที่เกิดจากกลุ่มสารอินทรีย์หรือคราบอาหารในกระบวนการแปรรูปและการฆ่าเชื้อด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของอาหาร (Bansal and Chen, 2006)

การเกิดคราบมีหลายประเภท (Awad, 2011) สำหรับการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนใหญ่เป็นประเภทปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction fouling) โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ทำให้โปรตีนในอาหารเสียสภาพธรรมชาติและเกิดการเกาะติดบนพื้นผิว (Bott, 1995) กระบวนการเกิดคราบ (Fouling processes) ประกอบด้วย กระบวนการเกิดคราบสะสม (Deposition process และกระบวนการหลุดออก (Removal process) รายละเอียดมีดังนี้

- 1) กระบวนการเกิดคราบสะสม ประกอบด้วย กลไกการก่อตัวของอนุภาคในของไหล กลไกการถ่ายเทมวลของอนุภาคในของไหลไปยังพื้นผิวที่สัมผัสกับของไหล และกลไก การก่อตัว/การเกาะติด ของอนุภาคคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัมผัสกับของไหล
- 2) กระบวนการหลุดออก ประกอบด้วย กลไกการหลุดออกของคราบ และของอนุภาคในของไหลไปยังพื้นผิวที่สัมผัสกับของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ความต้านทานความร้อนของคราบ (Fouling resistance)

อัตราการเพิ่มจำนวนของคราบสะสม (Deposit growth rate) พิจารณาได้จากผลต่างระหว่างอัตราการเกิดคราบสะสม (Deposition rate, Φ_d) และอัตราการหลุดออกของคราบ (Removal rate, Φ_r) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความต้านทานความร้อนของคราบ (Fouling resistance หรือ Fouling factor, R_f) และมวลของคราบ โดยเมื่อคราบเริ่มก่อตัวสะสมบนพื้นผิวหนาขึ้นหรือมีมวลของคราบเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานความร้อนของคราบจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากชั้นของคราบมีค่าความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างมวลของคราบที่สะสมต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (m_f) กับค่าความต้านทานความร้อนของคราบ แสดงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$m_f = \rho_f x_f = \rho_f \lambda_f R_f \quad (2.1)$$

$$R_f = \frac{m_f}{\rho_f \lambda_f} = \frac{x_f}{\lambda_f} \quad (2.2)$$

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของคราบ λ_f คือ ค่าการนำความร้อนของคราบ และ x_f คือ ความหนาของคราบ

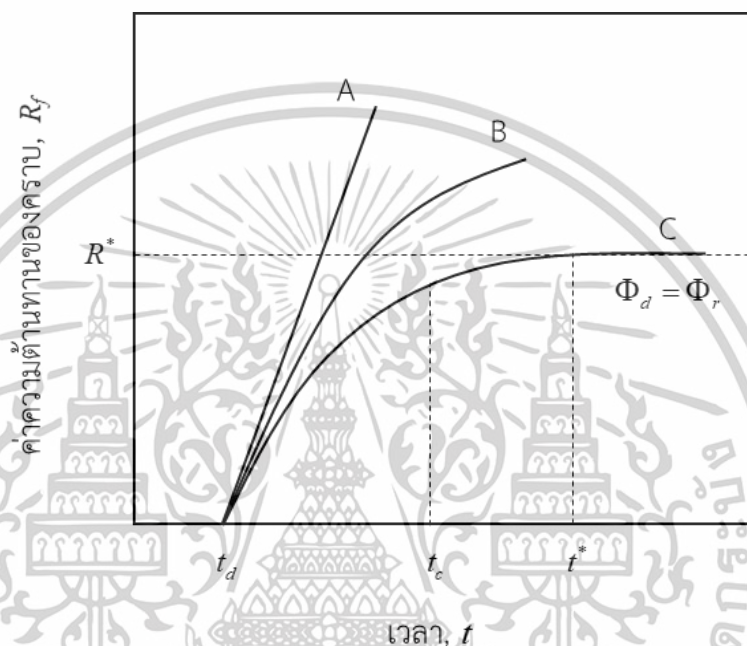
กระบวนการเกิดคราบมีหลายรูปแบบ สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบกับเวลา หรือเรียกว่า เส้นการเกิดคราบ (Fouling curve) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยค่า t_d คือ ช่วงเวลาเริ่มต้นของกระบวนการ หรือระยะเหนี่ยวนำ (Delay or Initial or Induction period, t_d) ซึ่งยังไม่ปรากฏการก่อตัวของคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยรายละเอียดของเส้นการเกิดคราบแต่ละรูปแบบ มีดังนี้

รูปแบบ A เส้นกราฟการเกิดคราบแบบเส้นตรง (Linear fouling curve) มีลักษณะการเกิดคราบที่เกิดจากกระบวนการเกิดคราบสะสมเป็นหลัก โดยมีค่าอัตราการเกิดคราบสะสมคงที่และค่าอัตราการหลุดออกน้อยมากหรือใกล้เคียง “ศูนย์” การเกิดคราบรูปแบบนี้ มวลของคราบสะสมจะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นอย่างคงที่ตามเวลา

รูปแบบ B เส้นกราฟการเกิดคราบแบบเส้นโค้ง (Falling rate fouling curve) กระบวนการเกิดคราบรูปแบบนี้ประกอบด้วย การเกิดคราบสะสมและการหลุดออก ซึ่งอัตราการเกิดคราบสะสมจะ

ลดลงในขณะที่อัตราการหลุดออกคงที่หรือเพิ่มขึ้นโดยไม่มีสภาวะเข้าสู่สมดุลระหว่างการเกิดคราบและการหลุดออก การเกิดคราบรูปแบบนี้มวลของคราบสะสมจะเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างไม่เป็นเชิงเส้น

รูปแบบ C เส้นกราฟการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุล (Asymptotic fouling curve) เมื่อการเกิดคราบเข้าสู่สมดุลระหว่างอัตราการเกิดคราบสะสมและอัตราการหลุดออก (Asymptotic fouling factor, R_f^*) คราบที่สะสมบนพื้นผิวจะมีความหนาคงที่



รูปที่ 2.1 เส้นกราฟการเกิดคราบ

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

2.1.3 กลไกการเกิดคราบสะสมและการหลุดออกของคราบอาหาร

กระบวนการเกิดคราบประกอบด้วยหลายกลไก โดยประเภทของการเกิดคราบแต่ละประเภทมักมีกลไกเฉพาะที่ส่งผลโดยตรง กรณีของการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนใหญ่ประกอบด้วยกลไก (Awad 2011) ดังต่อไปนี้

1) การก่อตัวของอนุภาคในของไหล (Formation of the foulant materials in the bulk of the fluid) เป็นกลไกแรกที่เกิดขึ้นในกระบวนการเกิดคราบ ก่อนที่จะเริ่มมีอนุภาคก่อตัวขึ้นบนพื้นผิว เมื่อพิจารณาจากกราฟของการเกิดคราบ (รูปที่ 2.1) กลไกการก่อตัวอยู่ในช่วงระยะเริ่มต้นของกระบวนการหรือระยะเหนี่ยวนำ (Initial or Induction period, t_d) ปัจจัยที่ส่งผลต่อช่วงระยะ t_d ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วของของไหล ชนิดและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของไหล ชนิดของวัสดุทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิว และลักษณะของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยระยะเหนี่ยวนำของการเกิดคราบประเภท ปฏิกริยาทางเคมี มีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวเพิ่มขึ้น

2) การถ่ายมวลของอนุภาคในของไหล (Transport of the fouling species in the bulk of the fluid) ไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน กลไกการถ่ายมวลนี้เกิดจากกลไกย่อยหนึ่งกลไกหรือ หลายกลไกร่วมกัน เช่น

2.1) การแพร่กระจาย (Diffusion) เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลขององค์ประกอบในของไหลไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากความเข้มข้นขององค์ประกอบในของไหลและความเข้มข้น บริเวณที่อยู่ติดกับพื้นผิวมีค่าแตกต่างกัน

2.2) อิเล็กโทรโฟรีซิส (Electrophoresis) เกี่ยวข้องกับแรงกระทำทางไฟฟ้า โดยของไหลต่าง ชนิด มีค่าประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันบางชนิดอาจเคลื่อนที่เข้าหาหรือผลักรออกจากพื้นผิว ปัจจัยที่ส่งผล ต่อกลไกนี้ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้าของของไหล ค่าความเป็นกรดต่างของของไหล อุณหภูมิ และ ความเร็วของของไหล และแรงพื้นผิว เช่น ลอนดอน-แวนเดอร์วาลส์ เป็นต้น

3) การเกาะติดของอนุภาคบนพื้นผิว (Attachment of the fouling species to the surface) เกี่ยวข้องกับทั้งกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี โดยกลไกนี้ยังไม่เป็นที่เข้าใจกันดีนัก ปัจจัย สำคัญที่มีบทบาทต่อกระบวนการยึดเกาะ ได้แก่ สภาพพื้นผิว (พลังงานอิสระที่พื้นผิว (Surface free energy) ความสามารถในการเปียกน้ำ (Wettability)) ของพื้นผิว และความน่าจะเป็นในการเกาะติด โดยปัจจัยทั้งสามนี้กระทำร่วมกันและพร้อมกันก่อให้เกิดการเกาะติดของอนุภาคบนพื้นผิว พื้นผิวที่ไม่ มีความสามารถในการเปียกน้ำเป็นพื้นผิวที่มีพลังงานต่ำ จะมีระยะเหนี่ยวนำนานกว่าพื้นผิวที่เปียกน้ำ หรือมีพลังงานสูง และเกิดการเกาะติดของอนุภาคน้อยกว่า นอกจากนี้ การทำพื้นผิวให้เรียบหรือมีค่า ความหยาบผิวต่ำ จะช่วยลดความสามารถในการเปียกน้ำ ทำให้การเกาะติดลดลง หรือเป็นการยึด ระยะเวลาเหนี่ยวนำของกระบวนการเกิดคราบนั่นเอง

4) การหลุดของคราบสะสมออกจากพื้นผิว (Removal of the fouling deposits from the surface) กลไกนี้อาจเกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดคราบสะสมหรืออาจไม่เกิดขึ้นพร้อมกันก็ได้ การหลุด ออกของคราบเกิดจากกลไกใดกลไกหนึ่งหรือหลายกลไกร่วมกัน เช่น

4.1) แรงเฉือน เป็นผลมาจากความเค้นเฉือนที่ของไหลกระทำบนชั้นของคราบสะสม โดยเมื่อ เกิดการก่อตัวของคราบสะสม พื้นที่หน้าตัดที่ของไหลไหลผ่านจะลดลง เป็นเหตุให้ความเร็วเฉลี่ยของ ของไหลเพิ่มสูงขึ้นที่อัตราการไหลเชิงมวลคงที่ ความเค้นเฉือนจึงเพิ่มขึ้น หากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่า มากกว่าแรงยึดเกาะภายใน คราบบางส่วนที่ติดอยู่บนผิวจะหลุดออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

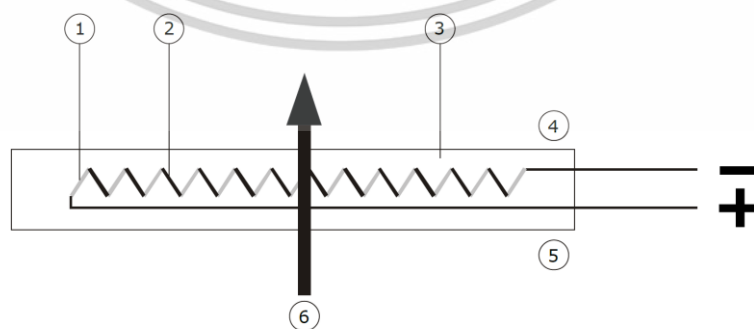
4.2) การละลายกลับ (Re-solution) คราบสะสมอาจละลายกลับไปยังของไหล หากคราบสะสมนี้มีสมบัติการละลาย (Solubility) โดยทั่วไปคราบสะสมมีข้อสันนิษฐานว่าไม่มีสมบัติการละลายในขณะที่ยึดตัว การละลายอาจเกิดขึ้นในกรณีที่สมบัติของคราบมีการเปลี่ยนแปลง หรือของไหลมีการเปลี่ยนแปลง หรือเกิดจากทั้งสองอย่าง ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงชั่วขณะของอุณหภูมิ ความเร็ว ความดัน และตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น คราบสะสมประเภทชีวภาพ หากอุณหภูมิสูงเพียงพอจนสามารถฆ่าสิ่งมีชีวิตที่สะสมเป็นคราบได้ แรงยึดเกาะบนพื้นผิวจะน้อยลง ทำให้คราบสะสมหลุดกลับสู่ของไหลอีกครั้ง

4.3) การกัดเซาะ (Erosion) กลไกนี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของคราบ รวมถึงรูปแบบของพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน (ถ้ามี) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับคราบประเภทการตกผลึก

5) การถ่ายเทมวลจากพื้นผิวที่สัมผัสของไหลไปยังของไหล (Transport from the deposit-fluid interface to the bulk of the fluid) กลไกนี้ขึ้นอยู่กับมวลและปริมาตรของชั้นคราบที่หลุดลอกออกมาด้วยแรงทางกลของของไหล หากชั้นของคราบที่ลอกออกมีขนาดใหญ่เพียงพอ อาจย้ายไปที่เกาะบนพื้นผิวจุดอื่นในระบบ ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการหลุดออกของคราบ คือ ความยาวนานของคราบที่สะสม ซึ่งอาจทำให้คราบมีความแข็งแรงมากขึ้นหรืออาจอ่อนตัวลง

2.2 เซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบเทอร์โมไฟล์

เซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน (Heat flux sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2) โดยปริมาณความร้อนที่วัดได้จะได้รับการแปลงให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้า เซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบเทอร์โมไฟล์ ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลหลายตัวเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างภายในเซ็นเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

ที่มา: User Manual Hukseflux FHF02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างภายในเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบเทอร์โมโพลี ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลหลายตัวเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าแบบอนุกรม โดยเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวเชื่อมต่อกันด้วยโลหะอัลลอยด์สองชนิด (หมายเลข 1 และ 2) ซึ่งจุดต่อทั้งสองด้าน เรียกว่า รอยต่อเย็น (หมายเลข 4) และรอยต่อร้อน (หมายเลข 5) อยู่บนพื้นผิวของเซนเซอร์ในตำแหน่งตรงข้ามกัน (ด้านหน้าและด้านหลังของเซนเซอร์) เมื่อรอยต่อทั้งสองมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะเกิดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตขึ้น ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้านี้แปรผันตรงกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างรอยต่อร้อนและเย็น การต่อเทอร์โมคัปเปิลหลายตัวเข้าด้วยกันแบบอนุกรมจะช่วยขยายสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน

ในสภาวะคงตัวของการถ่ายเทความร้อน ฟลักซ์ความร้อน (q'' , หมายเลข 6) ที่ถ่ายเทผ่านเซนเซอร์ที่มีความหนา (L) จะแปรผันตรงกับผลต่างของอุณหภูมิด้านหน้าและด้านหลังของเซนเซอร์ และค่าการนำความร้อนโดยเฉลี่ย (k) ของเซนเซอร์ (หมายเลข 3) แสดงความสัมพันธ์ตามกฎของฟูเรียร์ดังสมการที่ 2.3

$$q'' = -k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.3)$$

ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเซนเซอร์ สามารถวัดได้จากค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่สร้างจากเทอร์โมโพลี (V_{output}) โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตรงกับฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเซนเซอร์ และปรับค่าให้ถูกต้องด้วยค่าความไวของเซนเซอร์ (S) ซึ่งได้จากการสอบเทียบเซนเซอร์จากผู้ผลิต ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.4

$$q'' = \frac{V_{output}}{S} \quad (2.4)$$

ตัวอย่างการติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 2.3



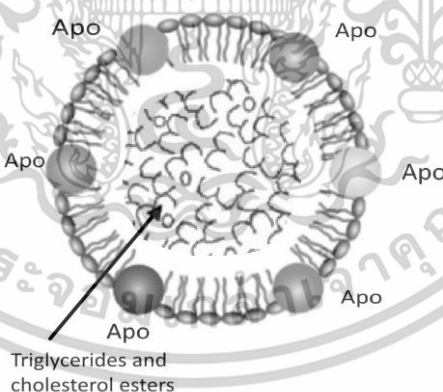
รูปที่ 2.3 การติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวท่อ

ที่มา: User Manual Hukseflux FHF02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ไข่แดงเหลวและการให้ความร้อนไข่แดงเหลว

ไข่แดง เป็นแหล่งอาหารที่ดีเยี่ยม โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของไข่แดงสด ประกอบด้วย น้ำ 50% ลิพิด 30% โปรตีน 16% และองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น แร่ธาตุและคาร์โบไฮเดรต และมีสมบัติเชิงหน้าที่ ได้แก่ การเกิดฟอง (foaming) การเกิดเจล (Gelation) และการเกิดอิมัลชัน (Emulsification) ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารหลายชนิด เช่น เค้ก ไอศกรีม ผลิตภัณฑ์อบ มายองเนส และน้ำสลัด เป็นต้น (Kiosseoglou, 2003; Mine and Zhang, 2013; Strixner and Kulozik, 2011) หากไม่รวมน้ำองค์ประกอบส่วนใหญ่ของไข่แดง คือ ลิพิดและโปรตีน ซึ่งรวมตัวกันอยู่ในรูปของไลโปโปรตีน (Lipoprotein) ประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ ฟอสโฟลิพิด คอเลสเตอรอล และมีโปรตีน Apo ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โปรตีนหลักในไข่แดงประกอบด้วย ไลโปโปรตีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Lipoprotein, LDL) 66% ไลโปโปรตีนความหนาแน่นสูง (High Density Lipoprotein, HDL) 16% ซึ่งเป็นโปรตีนที่รวมตัวอยู่กับลิพิด และโปรตีนอิสระในรูปของ globular (ไลเวติน (Lipetin) ฟอสฟิวติน (Phosvitin) และอื่น ๆ (Anton et al., 2003) โดยองค์ประกอบของ LDL ประกอบด้วย ลิพิด 88% และโปรตีน 10% ในขณะที่ HDL ประกอบด้วย ลิพิด 25% และ โปรตีน 75% (Anton, 2007) องค์ประกอบของไข่แดงอยู่ในรูปของแกรนูล (ฟอสฟิวติน และ HDL) และพลาสมา (ไลเวติน และ LDL) ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของไลโปโปรตีน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Anton et al. (2003)

เมื่อไข่แดงได้รับความร้อนจะเกิดสภาพเป็นเจล ซึ่งเกิดจากการเสียสภาพทางความร้อนและสร้างโครงร่างตาข่ายระหว่างโปรตีน (Kiosseoglou, 2003; Anton et al., 2001) โดยกระบวนการเกิดเจลในไข่แดงเกิดจากการเสียสภาพของโปรตีน ApoB บางส่วนซึ่งเป็นโปรตีนใน LDL โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 68°C โปรตีน ApoB ใน LDL เสียสภาพทางธรรมชาติและเกิดการคลายตัว จากนั้นเกิดปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างโมเลกุลด้วยแรงทางกายภาพ ทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายขึ้น ค่าความหนืดปรากฏของไข่แดงเหลวจึงมีค่าสูงขึ้น (Le Denmatt, 1999) เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอีกสารแขวนลอยของไข่แดงจะเกิดเจล ซึ่งมีลักษณะข้นมากเกินกว่าจะกระจายในของเหลวได้อีก จึงเกิดการตกตะกอนขึ้น และที่อุณหภูมิ 80°C โปรตีนจะเกิดการสูญเสียสภาพ (Guilmineau and Kulozik, 2006; Helbig et al., 2019; Yang et al., 2019) ในขณะที่โปรตีนใน HDL ไม่ได้เป็นตัวหลักที่ทำให้เกิดเจล เนื่องจากมีความไวต่อความร้อนน้อยกว่าและมีโครงสร้างเป็น globular มากกว่า LDL แต่ช่วยทำให้โครงร่างตาข่ายของเจลสมบูรณ์ขึ้น (Le Demit et al., 1999) จะเห็นได้ว่าการเกิดคราบไข่แดงเกิดจากโปรตีนเป็นหลัก แม้ว่าไข่แดงจะมีลิพิดเป็นองค์ประกอบหลักก็ตาม (Pérez et al., 2016)

2.4 การทำความสะอาดคราบโปรตีน

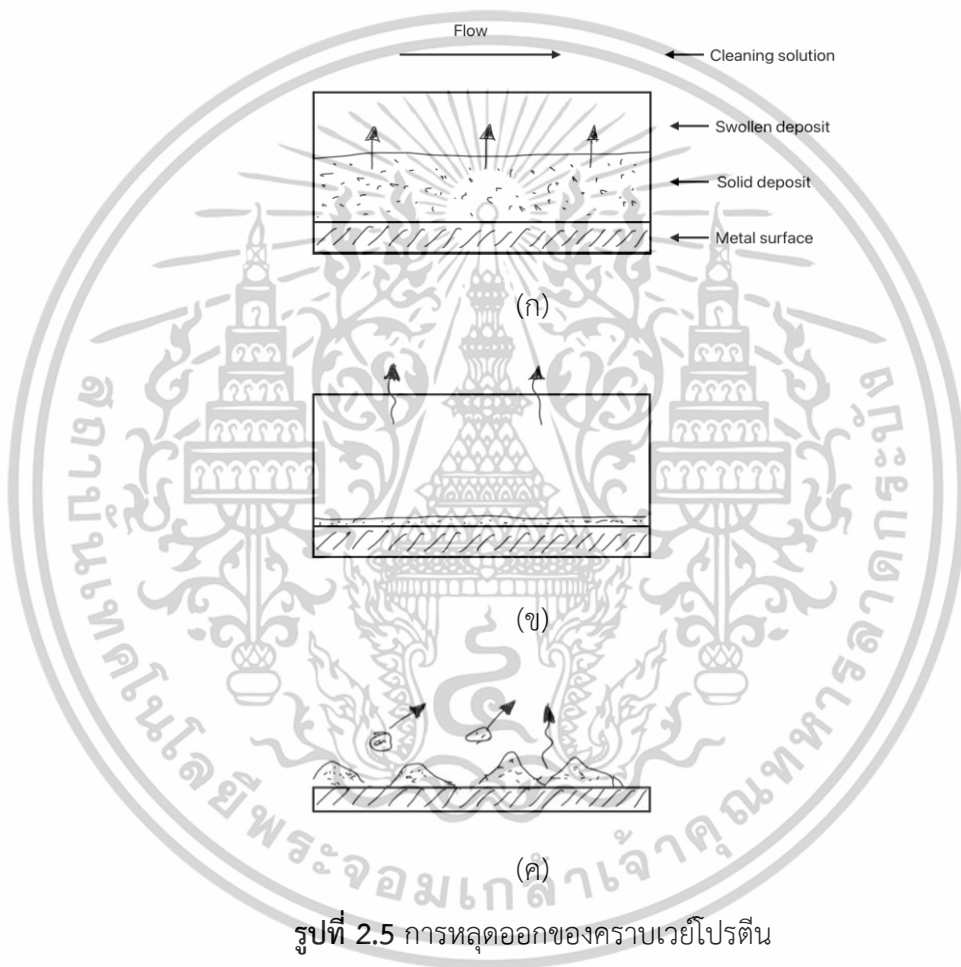
ขั้นตอนการทำความสะอาดคราบโปรตีนแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการบวม (Swelling stage) ช่วงคงตัว (Uniform stage) และช่วงการหลุดออก (Decay stage) โดยตัวอย่างขั้นตอนการหลุดออกของคราบเวย์โปรตีนโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (Gillham et al., 1999) แสดงดังรูปที่ 2.5 อธิบายได้ดังนี้

ช่วงการบวม (รูปที่ 2.5 ก) ประกอบด้วย การบวม (Swelling) และการละลาย (Dissolution) เป็นช่วงที่คราบสัมผัสกับสารละลายต่าง ทำให้โปรตีนในคราบเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทำลายพันธะระหว่างโปรตีน เกิดเป็นช่องว่างระหว่างโครงสร้าง สารละลายสามารถแทรกตัวเข้าไปภายในคราบได้ด้วยกลไกการแพร่ ทำให้คราบเกิดการบวม หากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในช่วงนี้สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบได้ อนุภาคขนาดเล็กของคราบจะหลุดออกไปกับสารละลายด้วยกลไกการละลาย

ช่วงคงตัว (รูปที่ 2.5 ข) ประกอบด้วย การบวม การละลาย และการยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ (Cohesion) เป็นช่วงที่คราบหลุดออกด้วยอัตราคงที่โดยอาศัยแรงเฉือนที่สารละลายกระทำกับคราบ ในกรณีที่พันธะระหว่างคราบมีความแข็งแรงมากกว่าแรงเฉือน คราบจะไม่สามารถหลุดออกจากกันได้ สารละลายยังคงแพร่เข้าไปในคราบอย่างต่อเนื่อง คราบจะบวมมากขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ความหนาของคราบจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน หากแรงเฉือนของสารละลายมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ คราบบางส่วนจะหลุดออกไปกับสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงการหลุดออก (รูปที่ 2.5 ค) ประกอบด้วย การยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ และการยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิว (Adhesion) เป็นช่วงที่คราบหลุดออกอย่างช้า ๆ จากการเอาชนะแรงยึดติดกับพื้นผิวของอุปกรณ์ (Bird and Fryer, 1991; Xin et al., 2002) เมื่อแรงเฉือนจากสารละลายมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ คราบจะหลุดออกจากกันอย่างต่อเนื่องจนเหลือคราบที่ติดอยู่กับพื้นผิว ซึ่งในช่วงนี้ยังคงมีปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกับคราบ โดยคราบยังคงเกิดการละลายอยู่ ทั้งนี้หากแรงเฉือนของสารละลายมากกว่าแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิว จะทำให้คราบลอกออกจากพื้นผิวได้



รูปที่ 2.5 การหลุดออกของคราบเวย์โปรตีน

ที่มา ดัดแปลงจาก Gillham et al., (1999)

Mercadé-Prieto and Chen (2006) และ Joppa et al. (2017) สรุปกลไกที่เกี่ยวข้องกับการทำความสะอาดคราบโปรตีน (รูปที่ 2.6) ดังนี้

1) การแพร่และการละลาย (Diffusive dissolution) การแพร่ของสารละลายเข้าไปในคราบ ทำให้พื้นที่ระหว่างคราบหลุดออกจากกัน โปรตีนที่ขดตัวกันเป็นก้อนเกิดการคลายตัวบางส่วนและสามารถจับกับน้ำได้ มีช่องว่างระหว่างคราบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้คราบเกิดการบวม และเป็นการเพิ่ม

พื้นที่สัมผัสภายในโครงสร้างกับสารทำความสะอาด ทำให้สารละลายภายนอกสามารถแพร่ผ่านเข้าไป
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เอกสารนี้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้อีก หากการแพร่ของสารละลายดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง สารละลายจากภายนอกเข้ามาแทนที่ ช่องว่างเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น จนทำให้คราบหลุดออกจากกันได้และหลุดออกไปกับสารละลาย เรียกกลไกนี้ว่า “การละลาย” โดยทิศทางและความเร็วของการแพร่สัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของความเข้มข้น

2) การแยกออกจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ (Cohesive separation) การทำลายพันธะที่ยึดเหนี่ยวภายในคราบ ทำให้คราบหลุดแยกออกจากกัน

3) การหลุดออกจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ (Viscous shifting) การเลื่อนตำแหน่งของคราบทั้งชิ้นเมื่อได้รับแรงเฉือนหรือแรงดันที่มากกว่าแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ หรือกล่าวได้ว่า คราบเริ่มเกิดการไหล

4) การลอกออก (Adhesive detachment) การลอกคราบที่ยึดเหนี่ยวกันออกจากพื้นผิว โดยแรงที่มากระทำกับคราบมีค่ามากกว่าแรงยึดเกาะระหว่างคราบกับพื้นผิวแต่น้อยกว่าแรงยึดกันระหว่างภายในคราบ

คราบที่มีความหนามาก ขั้นตอนการกำจัดในช่วงคงตัวและช่วงการหลุดออกเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากคราบจะหลุดออกในเป็นช่วงนี้มากที่สุด จากกลไกการละลายซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของคราบที่สามารถละลายได้ (ตัวถูกละลาย) ไปยังสารละลาย (ตัวทำละลาย) (Xin et al., 2002) โดยช่วงการหลุดออก แรงกระทำทางกลมีผลต่อการหลุดออกของคราบเป็นหลัก แต่หากในช่วงนี้สารละลายมีอัตราการไหลต่ำ กลไกการละลายยังคงมีผลอยู่ (Xin et al., 2002)



รูปที่ 2.6 กลไกการทำความสะอาดคราบเวย์โปรตีน

ที่มา ดัดแปลงจาก Joppa et al. (2017)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การเกิดคราบสะสมของอาหารที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ

ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนเกิดการเสียสภาพของโปรตีนในอาหารซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดคราบเกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน แม้ว่าอาหารบางชนิดมีองค์ประกอบของไขมัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นส่วนใหญ่ เช่น ไข่แดง และกะทิ แต่การเกิดคราบมาจากการเสียสภาพของโปรตีนเป็นหลัก (Pérez et al., 2016) นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาเกี่ยวกับประเด็นดังกล่าว ดังนี้

1) การเกิดคราบจากการเสียสภาพของโปรตีนในกะทิ

Law et al. (2009) Narataruksa et al. (2010) และ Saikhwan et al. (2022) ศึกษาการเกิดคราบของกะทิบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในระหว่างกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ และพบว่า ไขมันและโปรตีนมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดคราบของกะทิ โดยไขมันเป็นองค์ประกอบหลักของกะทิ ซึ่งโปรตีนอัลบูมินและโกลบูลินที่มีอยู่ในกะทิจะทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์เป็นฟิล์มโปรตีนหุ้มอนุภาคไขมันในกะทิ เมื่อกะทิได้รับความร้อนโปรตีนที่ไม่ทนร้อนจะเกิดการเสียสภาพ ก่อให้เกิดโครงสร้างโปรตีนที่ซับซ้อน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการจับตัวกันของอนุภาคไขมันและเกาะติดบนพื้นผิวร้อน

2) การเกิดคราบจากการเสียสภาพของโปรตีนในนม

Fryer et al. (1996) และ Gu et al. (2019) อธิบายการเกิดคราบในกระบวนการแปรรูปนมเกิดจากกลไกการเสียสภาพของโปรตีนและการตกตะกอนของแร่ธาตุหลัก โดยการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 65 ถึง 100 °C เป็นการเกิดคราบแบบปฏิกิริยาเคมี โดยความร้อนเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสียสภาพของโปรตีน ดังนั้น องค์ประกอบส่วนใหญ่ของคราบนมในช่วงอุณหภูมินี้ จึงมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก Zhang et al. (2020) ศึกษาการเกิดคราบของนมวัวเปรียบเทียบกับนมอูฐ พบว่าคราบของนมทั้งสองชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยคราบนมอูฐมีความพรุนที่มากกว่า ซึ่งการเกิดคราบของนมวัวเกิดจากการเสียสภาพของโปรตีน β -แลคโตโกลบูลิน (β -lactoglobulin) เป็นหลัก ส่วนการเกิดคราบของนมอูฐเกิดจากโปรตีนเคซีน และ α -แลคตัลบูมิน (α -lactalbumin)

3) การเกิดคราบจากการเสียสภาพของโปรตีนในไข่แดงเหลว

Tsutsui (1988) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของไข่แดงเหลว พบว่า ค่าความหนืดของไข่แดงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 65°C และไข่แดงเริ่มจับตัวเป็นก้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70°C Le Denmat et al. (1999) ศึกษาการเสียสภาพของโปรตีนพลาสมาและแกรนูลซึ่งเป็นองค์ประกอบของไข่แดง ในช่วงอุณหภูมิพาสเจอร์ไรส์ (55 - 76°C) พบว่า โปรตีนพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนมากกว่าแกรนูล โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 69°C ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของโปรตีนและความหนืดปรากฏของพลาสมา และเริ่มเกิดโครงสร้างตาข่ายมีลักษณะเป็นเจลเหนียวแน่นที่อุณหภูมิ 75°C ในขณะที่โปรตีนแกรนูลเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงจากความร้อนที่อุณหภูมิ 76°C โดย γ -ไลเวติน (γ -livetin) และ α -ไลเวติน (α -livetin) ในพลาสมาเสียสภาพที่

อุณหภูมิ 60°C และ 69°C ตามลำดับ (Dixon และ Cotterill, 1981) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเสียสภาพของโปรตีนไข่แดงเป็นสาเหตุของการเกิดคราบ

2.5.2 การทำความสะอาดคราบอาหารที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ

นักวิจัยหลายท่าน ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมหลุดออกของคราบที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ ได้แก่

1) การทำความสะอาดคราบเวย์โปรตีน

Gillham et al. (1999) และ Xin et al. (2002) ศึกษาการทำความสะอาดคราบเวย์โปรตีนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ อุณหภูมิและอัตราการไหลของสารทำความสะอาด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ ช่วงของการทำความสะอาดคราบเวย์โปรตีนแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงการบวม ช่วงคงที่ และช่วงการหลุดออก โดยอุณหภูมิของสารทำความสะอาดส่งผลอย่างมากกับช่วงการบวมและช่วงคงที่ เนื่องจากความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ในขณะที่อัตราการไหลของสารทำความสะอาดส่งผลกับช่วงการหลุดออก โดยส่งผลอย่างชัดเจนที่อุณหภูมิต่ำ

2) การทำความสะอาดคราบกะทิ

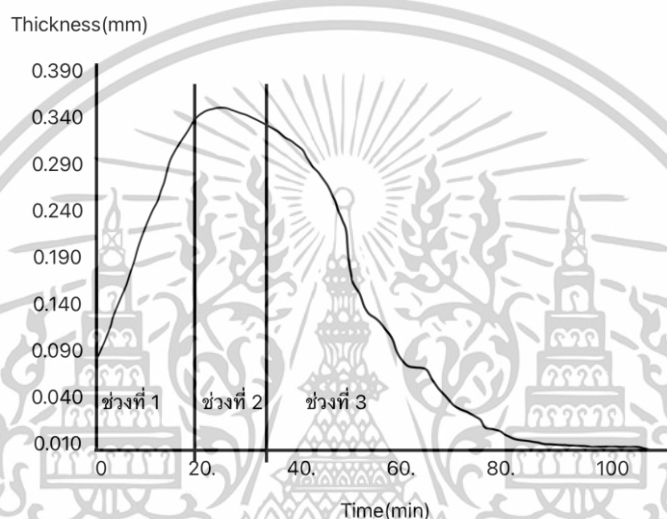
Saikhwan et al. (2015) ศึกษาการทำความสะอาดคราบกะทิที่เกิดจากกระบวนการให้ความร้อนแบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7-12 พบว่า คราบเกิดการบวมเพียงเล็กน้อยในสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่า 10 โปรตีนและไขมันบางส่วนในคราบกะทิสามารถกำจัดออกได้ด้วยสารละลาย NaOH แม้ว่าจะไม่สามารถกำจัดออกได้ทั้งหมด แต่การแช่คราบในสารละลาย NaOH ช่วยทำให้คราบบวม และแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบลดลง อย่างไรก็ตาม หากคราบกะทิเกิดจากการให้ความร้อนแบบต่อเนื่องความแข็งแรงของพันธะที่ยึดเหนี่ยวภายในคราบจะมากขึ้น ชนิดของสารทำความสะอาดและสภาวะที่เหมาะสมควรต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติม

3) การทำความสะอาดไข่แดง

Pérez et al. (2015) ศึกษาพฤติกรรมทำความสะอาดคราบไข่แดงโดยใช้เทคนิค Scanning Fluid Dynamic Gauge (sFDG) สารทำความสะอาดที่ใช้ คือ สารละลาย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (w/v) ที่อุณหภูมิ 50°C สามารถแบ่งการหลุดออกของคราบได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้ ช่วงการบวม ช่วงคงตัว และช่วงการหลุดออก ดังรูปที่ 2.7 ช่วงแรกของการทำความสะอาด เริ่มจากคราบสัมผัสกับสารทำความสะอาด เกิดการแพร่และปฏิกิริยาเคมี ทำให้คราบเกิดการบวมมีความหนาเพิ่มขึ้น บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของคราบอาจมีการละลายออกมาแต่ยังไม่หลุดออกจากกัน ในช่วงคงตัว คราบยังคงบวมอย่างต่อเนื่อง บางส่วนเกิดการละลาย และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบลดลง แต่คราบยังไม่สามารถหลุดออกจากกันได้ ความหนาของคราบในช่วงคงตัวนี้จึงมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อมีแรงภายนอกจากสารทำความสะอาดมากระทำกับคราบ และแรงภายนอกนี้สามารถเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบได้ (Cohesion) คราบจะหลุดแยกออกจากกันเรื่อย ๆ จนเหลือคราบที่ยึดติดการพื้นผิว ซึ่งต้องแรงมากพอเพื่อเอาชนะการยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิว (Adhesion)



รูปที่ 2.7 กลไกการทำความสะอาดคราบไขแดง

ที่มา ดัดแปลงจาก Pérez et al. (2015)

Helbig et al. (2019) ศึกษาการทำความสะอาดคราบไขแดงโดยใช้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ อุณหภูมิ 24°C, 42°C และ 60°C โดยคราบไขแดงที่นำมาใช้ศึกษาผ่านการอบที่อุณหภูมิ 80°C นาน 9 min มีความหนาเฉลี่ย 110 μm พบว่า การทำความสะอาดที่ความเข้มข้นต่ำ ทำให้เวลาการทำความสะอาดลดลง และการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ช่วยทำให้คราบบวมได้มากขึ้น

Yang et al. (2019) ศึกษาการทำความสะอาดคราบไขแดงภายในถัง โดยใช้คราบไขแดงที่ยังไม่เกิดการเสียหายทางโปรตีนและคราบไขแดงที่โปรตีนเกิดการเสียหายแล้ว ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.1 0.3 และ 0.5 (w/v) อุณหภูมิ 25°C, 45°C และ 55°C และอัตราการไหล 0.9 1.2 และ 1.5 m^3/h พบว่า การล้างทำความสะอาดคราบไขแดงควรใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่ำที่อุณหภูมิสูง (0.1% (w/v) และ 55°C) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

อัตราการไหลสูง ($1.5 \text{ m}^3/\text{h}$) และพบว่าการทำความสะอาดคราบไขแดงที่โปรตีนเกิดการเสียสภาพแล้วยากกว่าคราบสดที่เกิดจากโปรตีนยังไม่เสียสภาพ

2.5.3 การติดตามการเกิดคราบด้วยวิธีวัดการถ่ายเทความร้อน

นักวิจัยหลายท่านได้นำหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงของค่าการถ่ายเทความร้อน เพื่อตรวจสอบและติดตามการเกิดคราบอาหารบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเวลาจริง โดยมีตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

Narataruksa et al. (2010) ศึกษาผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของกะทิที่มีต่ออัตราการเกิดคราบบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นในระหว่างกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ ด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ทางออก อุณหภูมิที่ทางเข้า อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้าและทางออก จากนั้นคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและค่าความต้านทานความร้อนของคราบ (R_f) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามการเกิดคราบในระหว่างกระบวนการ โดยพบว่า ค่าความต้านทานความร้อนของคราบเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของกะทิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่โปรตีนเกิดการเสียสภาพ ซึ่งทำให้เกิดคราบแบบปฏิกิริยาทางเคมีโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และการเกิดคราบแบบตกตะกอนจากไขมัน ในสภาวะที่อุณหภูมิสูง โปรตีนจะเสียสภาพมากขึ้นทำให้ความสามารถในการจับตัวกับอนุภาคไขมันบนพื้นผิวร้อนน้อยลง ความต้านทานความร้อนของคราบจึงลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ หากอัตราการไหลของกะทิลดลง ความต้านทานความร้อนของคราบจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการหลุดออกของคราบลดลงจากแรงเฉือนที่ลดลง

Zhang et al. (2019) และ (2020) ใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนสำหรับศึกษาพฤติกรรมของการเกิดคราบของสารละลายเวย์โปรตีนที่มีส่วนผสมของน้ำตาลต่างชนิดกัน ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส และศึกษาพฤติกรรมของการเกิดคราบของนมต่างชนิดกัน ได้แก่ นมวัวและนมอูฐ โดยอุปกรณ์ทดลองเป็นแบบจานหมุนติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน จำนวน 3 ตัว บนแผ่นจาน จากนั้นคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเซนเซอร์ โดยสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงตามการเกิดคราบสะสมที่มากขึ้น เนื่องจากคราบมีค่าความสามารถในการนำความร้อนที่ต่ำ เมื่อคราบสะสมมากขึ้นค่าความต้านทานความร้อนของคราบจึงเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าความต้านทานความร้อนของคราบสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เวลาใด ๆ กับเวลาเริ่มต้น (0 s)

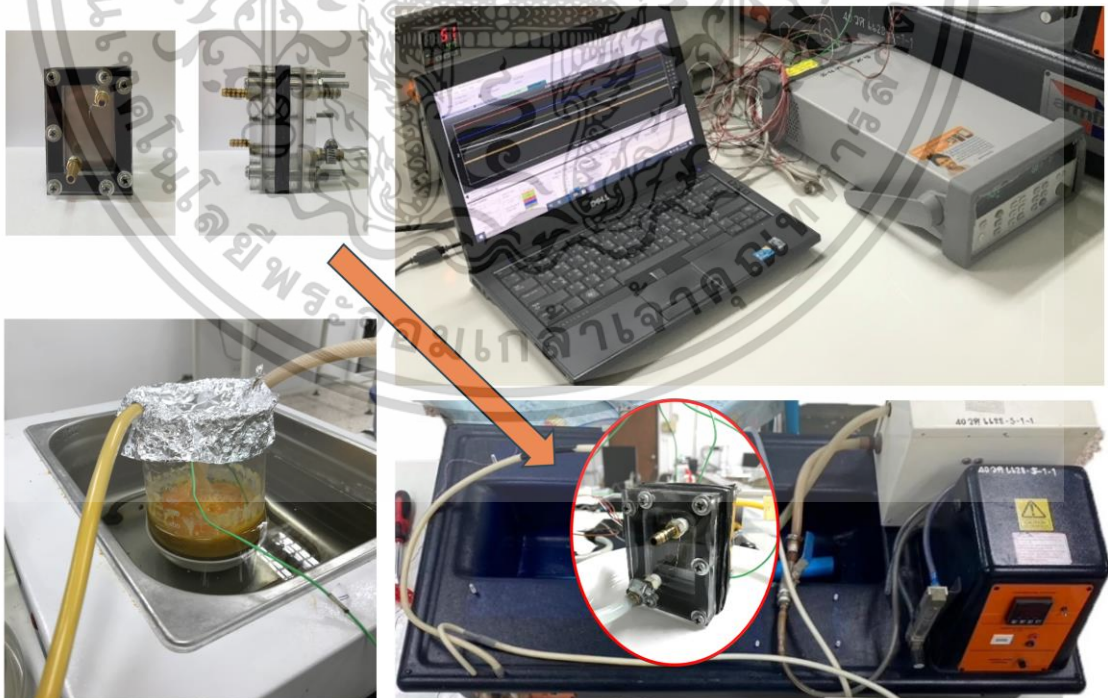
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ

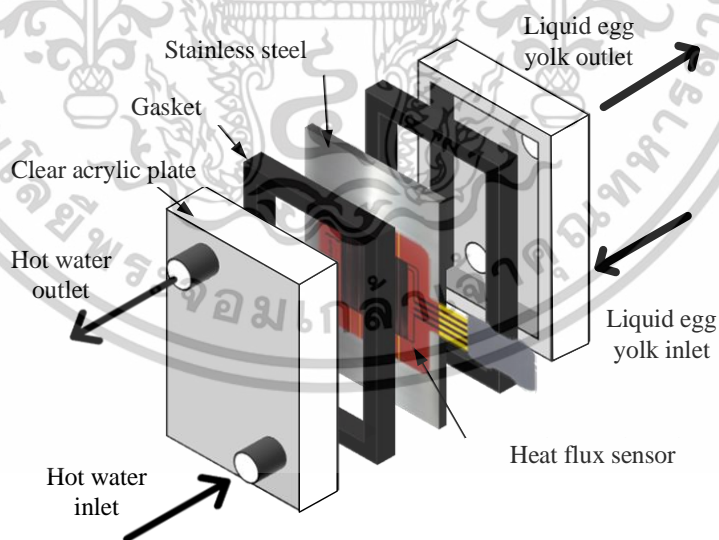
ชุดทดลองการเกิดคราบที่ใช้ในการทดลองนี้ ดัดแปลงจากเครื่องพาสเจอร์ไรส์ระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Pasteurizer – FT75, Armfield, อังกฤษ) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ชุดทดลองประกอบด้วย หม้ออุ่นน้ำ (INS-0182, Memmert, เยอรมัน) ขนาด 22 L และ 10 L ป้อนแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ป้อนรีดท่อ (Peristaltic pump) บิกเกอร์บรรจุตัวอย่าง ขนาด 1 L อุปกรณ์บันทึกอุณหภูมิ (34972A, Agilent Technologies, Inc., USA) สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเรียบติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง (FHF02, Hukseflux Thermal Sensors, เนเธอร์แลนด์) ไว้ภายใน ซึ่งเป็นส่วนที่ดัดแปลงจากเครื่องพาสเจอร์ไรส์ต้นแบบ สายเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมดและสายสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล และประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อติดตามการเกาะติดของคราบไข่แดงบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นเรียบ



รูปที่ 3.1 ชุดทดลองการเกิดคราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (รูปที่ 3.2 ก) เลือกใช้แบบแผ่นเรียบเพื่อให้สามารถติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนได้แนบสนิทกับแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 2B ความหยาบผิวเฉลี่ย $0.4 \mu\text{m}$ ขนาดความกว้าง ความยาว และความหนาของแผ่นเท่ากับ 65 mm 90 mm และ 1.0 mm ตามลำดับ (รูปที่ 3.2 ข) ประกอบทั้งสองด้านด้วยแผ่นอะคริลิกใส ความหนา 10 mm ยึดไว้เป็นชุดเดียวกัน ใช้ปะเก็นยางทนความร้อนกั้นระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับแผ่นอะคริลิกใสเพื่อป้องกันการรั่วซึม ช่องว่างตรงกลางระหว่างแผ่นทั้งสองด้านมีระยะห่าง เท่ากับ 10 mm ใช้สำหรับเป็นช่องเปิดให้ของไหลสามารถไหลผ่านเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกันได้ โดยกำหนดเส้นทางการไหลของของไหลทั้งสองชนิดให้เป็นการไหลแบบขนาน (รูปที่ 3.2 ค) ช่องการไหลหนึ่งเตรียมไว้สำหรับตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในการทดลองนี้ คือ น้ำร้อน (ของไหลร้อน) และอีกช่องหนึ่งเตรียมไว้สำหรับไข่เหลว (ของไหลเย็น) ภายในช่องเปิดติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K เพื่อวัดอุณหภูมิของเหลว เมื่อประกอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว คงเหลือพื้นที่สำหรับถ่ายเทความร้อน เท่ากับ 24 cm^2 (W x L: 40 mm x 60 mm) (รูปที่ 3.2 ง) โดยมีพื้นที่ที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน เท่ากับ 9 cm^2 (W x L: 30 mm x 30 mm) โดยการถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 0.9 mm พิจารณาเป็นกลไกการนำความร้อนแบบมิติเดียว มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เท่ากับ $0.29 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (รูปที่ 3.2 จ)



(ก)

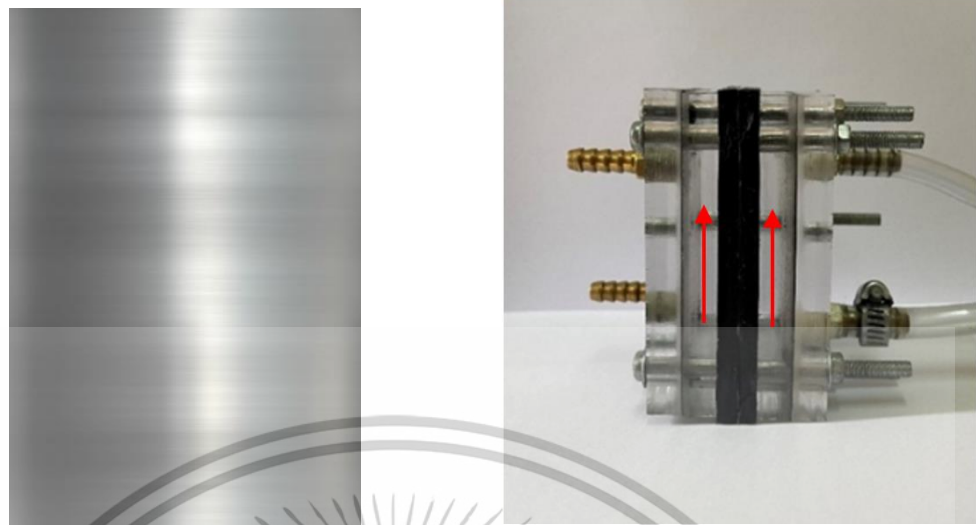
รูปที่ 3.2 (ก) ไดอะแกรมชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ขนาดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ค)

ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และน้ำร้อน (ง) การติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนบนแผ่น

แลกเปลี่ยนความร้อน และ (จ) มิติของเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

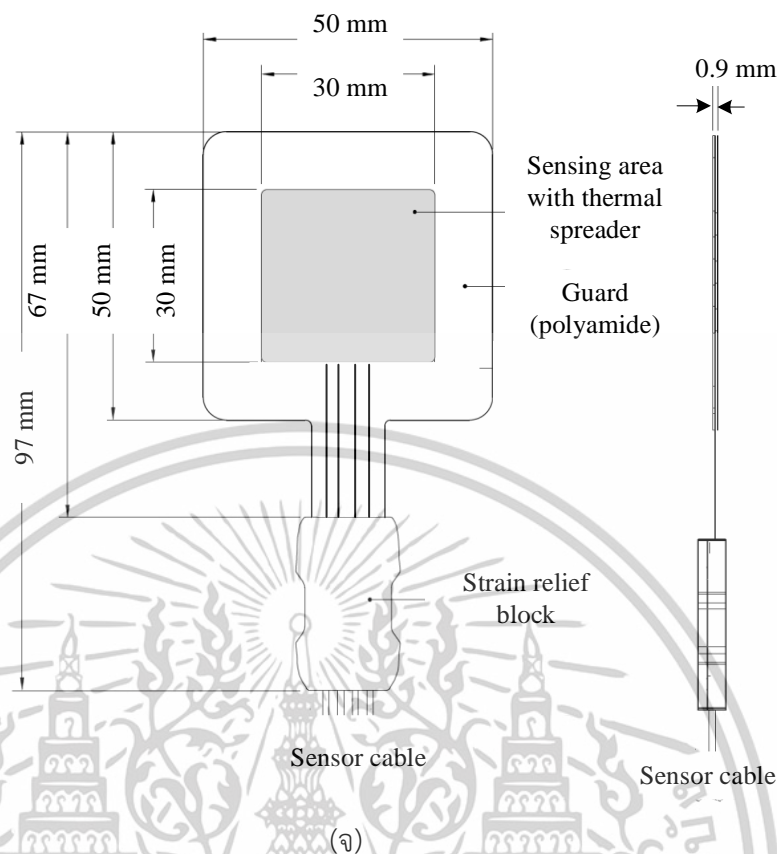
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง)

รูปที่ 3.2 (ต่อ) (ก) ไตอะแกรมชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ขนาดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ค) ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และน้ำร้อน (ง) การติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน และ (จ) มิติของเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 (ต่อ) (ก) ไดอะแกรมชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ขนาดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (ค) ทิศทางการไหลของผลิตภัณฑ์และน้ำร้อน (ง) การติดตั้งเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน และ (จ) มิติของเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนแบบแผ่นบาง

เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นแบบเทอร์โมไฟล์แผ่นบาง (เทอร์โมคัปเปิล ชนิด T) Hukseflux Thermal Sensors รุ่น FHF02 ชนิดพาสซีฟ ขนาดความกว้าง ความยาว และความหนา เท่ากับ 50 mm 50 mm และ 0.9 mm ตามลำดับ สัญญาณเอาต์พุตอยู่ในรูปแบบศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง ย่านการวัด -10 ถึง 10 kW/m² ค่าความไว (sensitivity) 5.95×10^{-6} V/W/m² อุณหภูมิใช้งาน -40°C ถึง 150°C ความไม่แม่นยำเชิงเส้น น้อยกว่า $\pm 2\%$ เวลาตอบสนอง 10 s ความแม่นยำในการวัดอุณหภูมิ $\pm 1.0^\circ\text{C}$ สามารถกันน้ำและฝุ่นได้ด้วยมาตรฐาน IP67

3.2 การทดลองการเกิดคราบไขแดง

การทดลองการเกิดคราบ ไขแดง เหลวพาสเจอร์ไรส์ ยี่ห้อ OVF บริษัท โอโว่ ฟู้ดเทค จำกัด บรรจุขวดปริมาตร 2 L จัดเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ $4 \pm 1^\circ\text{C}$ และทำการทดลองภายใน 24 h โดยก่อนเริ่มการทดลองการเกิดคราบ ไขแดงเหลวจะได้รับความร้อนขึ้นต้นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 4°C เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40°C โดยให้ความร้อนผ่านน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 50°C ในช่วงเวลาเดียวกันนั้น ชุดทดลองเกิดการเกิดคราบ เริ่มต้นเปิดการทำงานของหม้ออุ่นน้ำและปั้มน้ำร้อน สำหรับหมุนเวียนน้ำร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ที่อัตราการไหลคงที่ เท่ากับ $48.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ จนกระทั่งอุณหภูมิน้ำร้อนอุณหภูมิกึ่งที่ตามที่กำหนดไว้ จำนวน 5 ระดับ ได้แก่ 60°C, 65°C, 70°C, 75°C และ 80°C โดยที่อัตราการไหลของน้ำร้อนนี้ สามารถประมาณได้ว่าอุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าคงที่ ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิของน้ำร้อน

เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของไขแดงเหลวเป็นไปตามที่กำหนด จึงเปิดการทำงานของปั้มน้ำร้อนเพื่อสำหรับส่งไขแดงเหลวเข้าไปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นด้วยอัตราการไหล $4.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ ซึ่งจัดเป็นการไหลที่มีลักษณะแบบราบเรียบ (Laminar flow) และเริ่มจับเวลาการทดลอง ไขแดงเหลวหลังผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น จะไหลเข้าสู่ภาชนะพักตัวอย่าง เพื่อระบายความร้อน ก่อนไหลเข้าสู่ภาชนะบรรจุตัวอย่างภายในหม้ออุ่นไขแดงเหลว และไหลวนกลับเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นอีกครั้งจนการทดลองเสร็จสิ้น บันทึกค่าฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านชั้นคราบ แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน และเซนเซอร์ รวมถึงบันทึกค่าอุณหภูมิน้ำร้อนภายในช่องการไหล อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้า อุณหภูมิน้ำร้อนทางออก อุณหภูมิไขแดงเหลวภายในช่องการไหล อุณหภูมิไขแดงเหลวทางเข้า และอุณหภูมิไขแดงเหลวทางออก ทุก ๆ 10 s ระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่คราบ 90 min ต่อหนึ่งการทดลอง โดยทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ แผนภาพการทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบแสดงดังรูปที่ 3.3

3.3 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนใช้สำหรับวัดค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีคราบเกาะติด โดยคำนวณจากค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์ ซึ่งแสดงในรูปของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และค่าความไวของเซนเซอร์ ซึ่งกำหนดโดยผู้ผลิต ดังแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.1

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

โดย Q'' คือ การถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (W/m^2)
 V_{output} คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V)
 S คือ ค่าความไวของเซนเซอร์ ($\text{V}\cdot\text{m}^2/\text{W}$) กำหนดโดยผู้ผลิต ซึ่งในการทดลอง

นี้ใช้เซนเซอร์ที่มีค่าความไว เท่ากับ $5.95 \times 10^{-6} \text{ V}\cdot\text{m}^2/\text{W}$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาใด ๆ เปรียบเทียบกับที่เวลาเริ่มต้น โดยใช้สมการที่ 3.2 เพื่อวิเคราะห์ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่เกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่เวลาใด ๆ

$$U_t = \frac{Q_t''}{(T_h - T_c)} \quad (3.2)$$

โดย U_t	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลา t ไต ๆ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
Q_t''	คือ การถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่เวลาใด ๆ (W/m^2)
T_h	คือ อุณหภูมิน้ำร้อนภายในช่องการไหล (K)
T_c	คือ อุณหภูมิไ้แดงเหลวภายในช่องการไหล (K)

ปริมาณการเพิ่มความหนาของชั้นคราบที่เกาะติดบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของกระบวนการเกิดคราบ ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$R_f = \frac{1}{U_t} - \frac{1}{U_o} \quad (3.3)$$

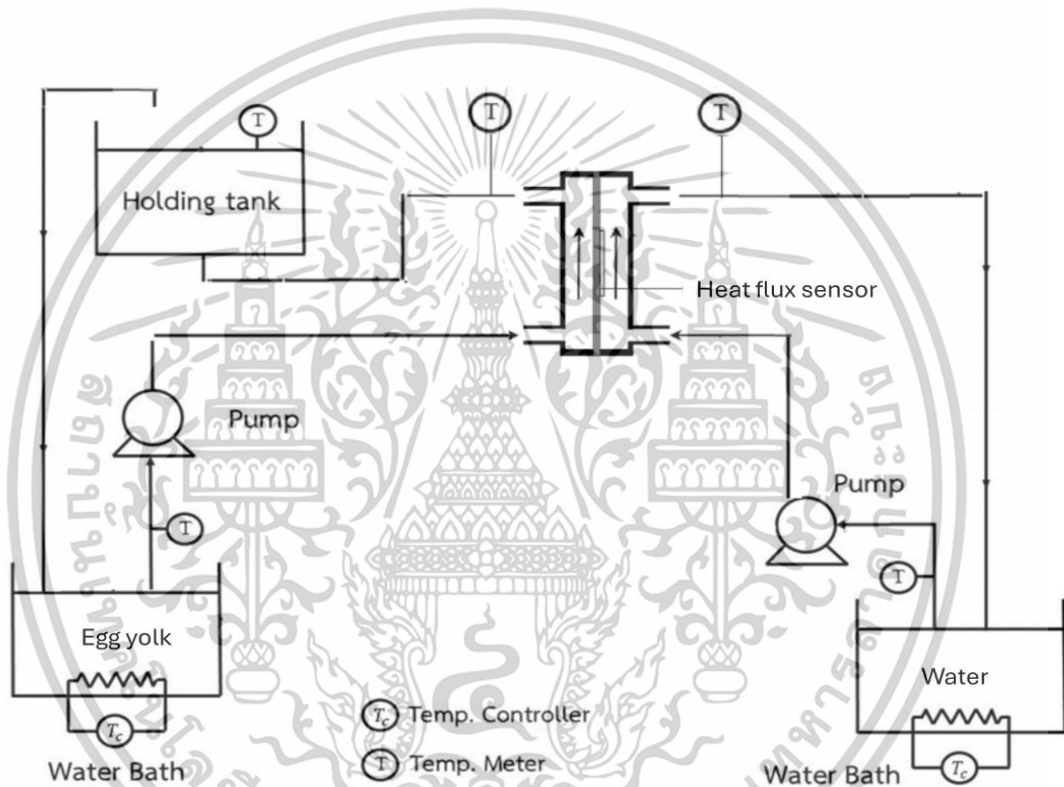
โดย R_f	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบ ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
U_t	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลา t ไต ๆ ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
U_o	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลาเริ่มต้น (0 s) ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

กรณีเส้นการเกิดคราบเป็นแบบเข้าสู่สมดุล (Asymptotic fouling curve) สามารถวิเคราะห์ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่สภาวะสมดุล และเวลาในการเข้าสู่สมดุล โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของ Kern & Seaton (1959) ดังแสดงในสมการที่ 3.4 ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อใช้สำหรับการอธิบายพฤติกรรมการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_f = R_f^* \left[1 - \exp \left(-\frac{1}{0.63t^*} t \right) \right] \quad (3.4)$$

โดย	R_f	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่เวลา t ใด ๆ ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
	R_f^*	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของคราบที่สภาวะสมดุล ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$)
	t^*	คือ เวลาในการเข้าสู่สมดุลการเกิดคราบ (min)
	t	คือ เวลา (min)



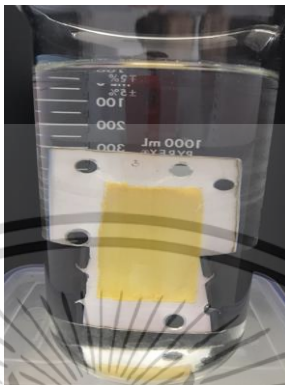
รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของชุดทดลองการเกิดคราบ

3.4 การทำความสะอาดคราบไขแดง

หลังการทดลองการเกิดคราบในแต่ละการทดลอง ทำการถอดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีคราบเกาะติดออกจากชุดอุปกรณ์ เช็ดทำความสะอาดบริเวณด้านนอกพื้นที่ถ่ายเทความร้อน วางเอียงทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 25°C) ระยะเวลา 5 min จากนั้นแช่แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนลงบีกเกอร์ ปริมาตร 1 L ซึ่งบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (w/v)

ที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 120 min ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยระหว่างการแช่ในสารละลาย NaOH เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกภาพด้วยกล้องบันทึกภาพตลอดระยะเวลาของการทดลอง วิเคราะห์ลักษณะการบวมจากการสังเกตและวิเคราะห์การหลุดออกของคราบไขแดงโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่เปรียบเทียบกับพื้นที่คราบเริ่มต้น



รูปที่ 3.4 การแช่คราบไขแดงในสารละลาย NaOH

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

งานวิจัยกำหนดให้อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคราบ โดยทำการศึกษา จำนวน 5 ระดับ ได้แก่ 60°C 65°C 70°C 75°C และ 80°C และมีปัจจัยควบคุม คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของไขแดงเหลวทางเข้าที่ 40°C อัตราการไหลของน้ำร้อนและไขแดงเหลว เท่ากับ $48.3\text{ cm}^3/\text{s}$ และ $4.2\text{ cm}^3/\text{s}$ ตามลำดับ ทำการทดลองการเกิดคราบไขแดงบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นระยะเวลา 90 min ออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear regression) เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ความต้านทานความร้อนของคราบไขแดงที่สภาวะสมดุล (R_f^*) และเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการเกิดคราบ (t^*) คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และสร้างเส้นกราฟการเกิดคราบที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ (IBM SPSS Statistics V.28)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การเกิดคราบไ้แดงบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน

4.1.1 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระหว่างการเกิดคราบ

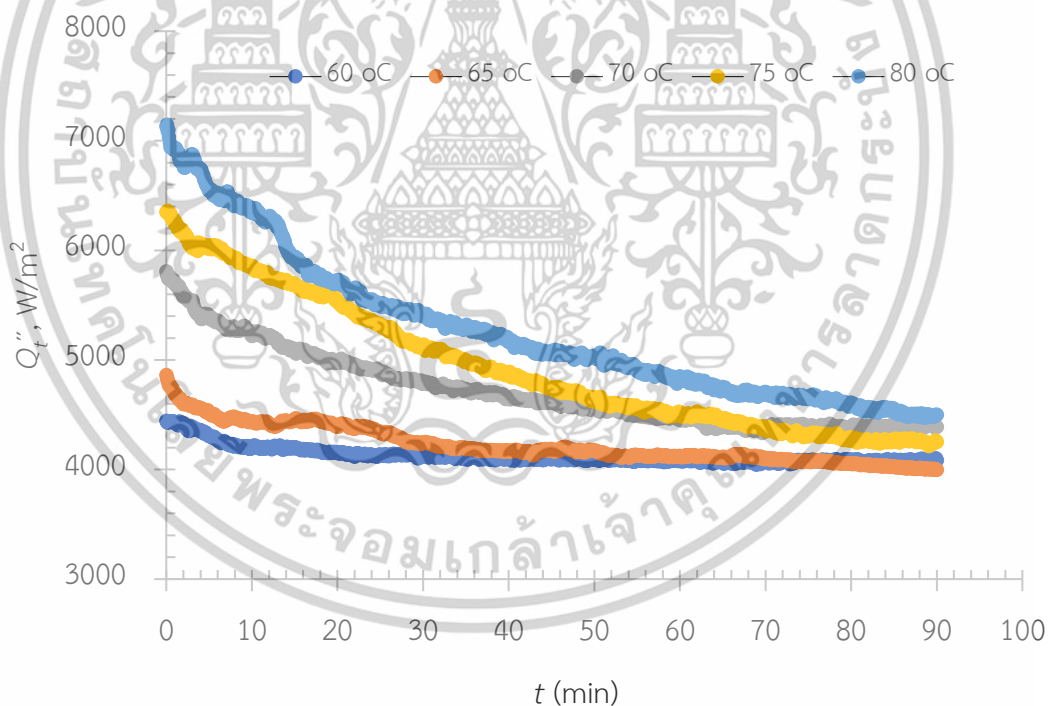
จากการทดลองให้ความร้อนไ้แดงเหลวโดยอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนผ่านแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งใช้เป็นพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า บริเวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเกิดคราบไ้แดงติดสะสมบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การเกาะติดของคราบไ้แดงแตกต่างกัน

งานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนสำหรับติดตามการเกิดคราบแบบเวลาจริงในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน อาศัยการวัดค่าความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเซนเซอร์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Q'') โดยติดแผ่นเซนเซอร์ไว้บนพื้นผิวของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนในช่องเปิดด้านน้ำร้อน อีกด้านหนึ่งของแผ่นสัมผัสกับไ้แดงเหลว ในระหว่างการทดลอง ทำการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต (V_{output}) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเซนเซอร์ วัดอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิไ้แดงเหลว จากนั้นคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเซนเซอร์ (สมการที่ 3.1) ที่เวลาการให้ความร้อนใด ๆ ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ในช่วงเริ่มต้นของการให้ความร้อน ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงที่สุด เมื่อเวลาผ่านไปไ้แดงเหลวที่สัมผัสกับพื้นผิวร้อน มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง จึงเริ่มเกิดการก่อตัวของคราบขึ้นบนแผ่นร้อน ซึ่งคราบเหล่านี้มีความสามารถในการนำความร้อนที่ต่ำ ค่าการถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนมายังไ้แดงเหลวจึงมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น หรือกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง (Awad, 2011) ซึ่งพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เวลา t ใด ๆ (U_t) คำนวณได้จากสมการที่ 3.2 ดังแสดงความสัมพันธ์ใน รูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวที่มีต่อการเกิดคราบ พบว่า อุณหภูมิของแหล่งความร้อนที่สูงขึ้น ทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวของเซนเซอร์ด้านที่สัมผัสกับน้ำร้อนและด้านที่สัมผัสกับไ้แดงเหลว (Temperature gradient, ΔT) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงขับ (Driving force) ของความร้อน ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์จึงมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยเมื่อเวลาผ่านไป การถ่ายเทความร้อนสำหรับทุกอุณหภูมิมีแนวโน้มลดลงตามการ

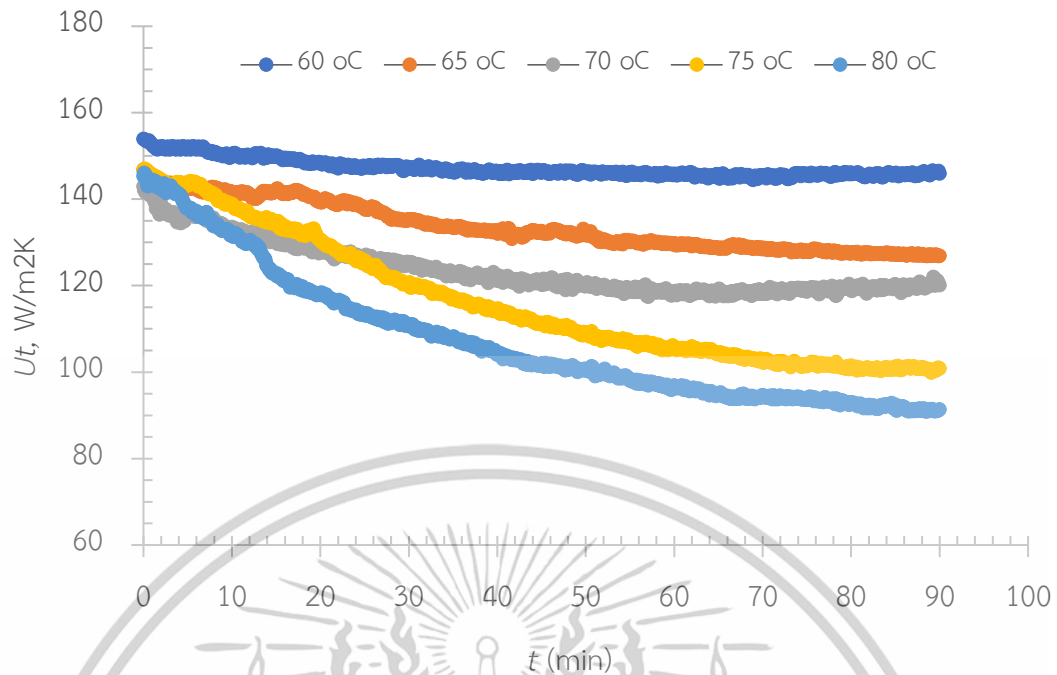
เกิดคราบที่เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงเริ่มต้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มลดลงในทุกอุณหภูมิพื้นผิวร้อน โดยพื้นผิวร้อนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุดมีค่าอัตราการลดลงมากที่สุด เนื่องจากพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับไข่แดงเหลวมากที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen and Bala (1998) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญของการเกิดคราบ โดยอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเสียดสภาพของโปรตีน (Kessler and Beyer, 1991) ก่อให้เกิดคราบซึ่งเป็นฉนวนความร้อนเกาะติดบนพื้นผิว ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งแปรผกผันกับความต้านทานการถ่ายเทความร้อน ($U_t \propto 1/R_f$) จึงมีอัตราการลดลงมากที่สุด จะเห็นได้ว่า การเกิดคราบอาหารเกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงค่า R_f ซึ่งสามารถพิจารณาจาก R_f ของคราบได้จากการเปรียบเทียบค่า R_f ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการให้ความร้อนกับค่า R_{f0} เริ่มต้น (พื้นผิวสะอาด)



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิวแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

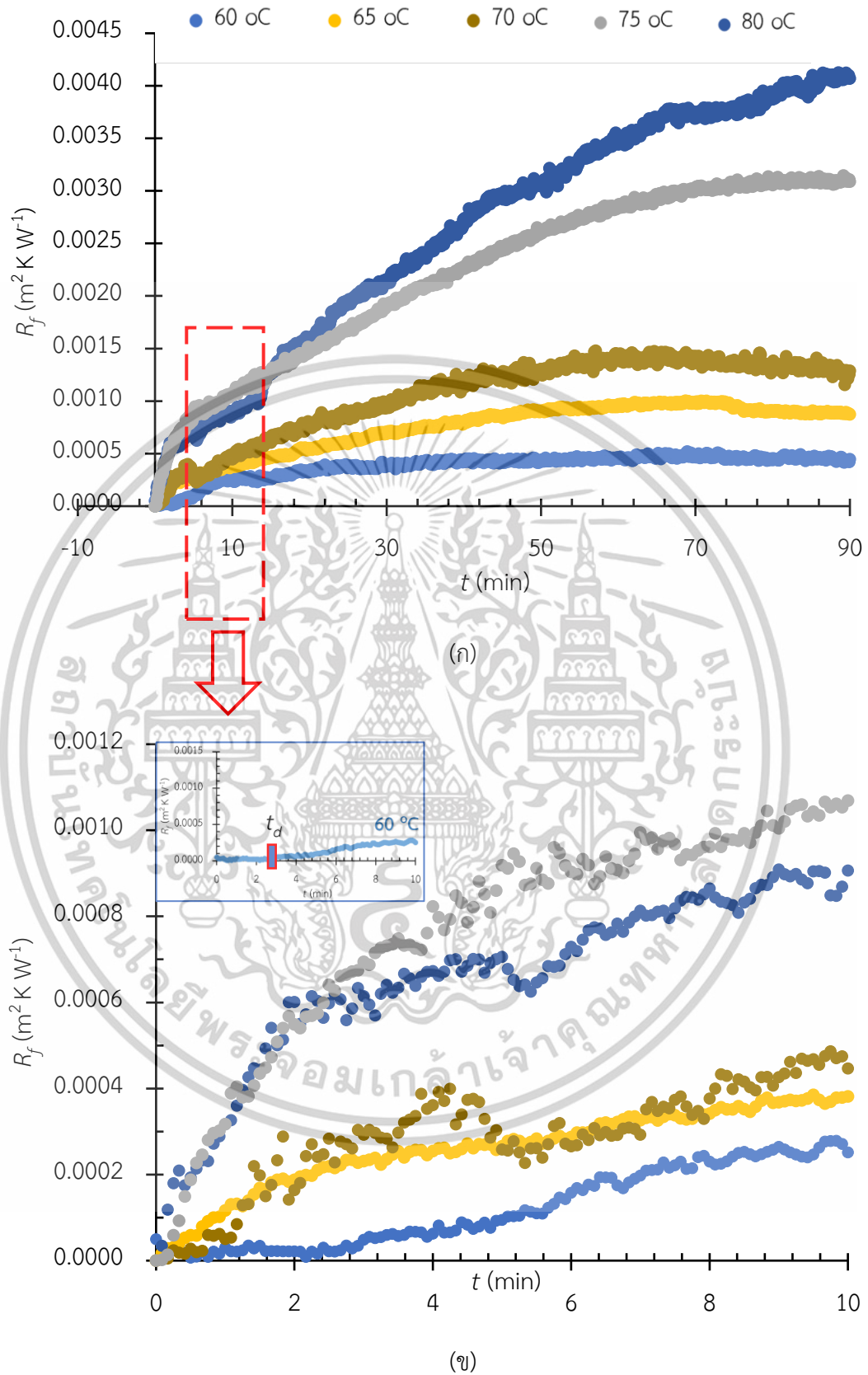


รูปที่ 4.2 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิว แล่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงค่า R_f ของคราบในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) เมื่อพิจารณาค่า R_f ของคราบ ในช่วงระยะเวลา 10 min แรก รูปที่ 4.3 (ข) พบว่า ที่อุณหภูมิพื้นผิว 60°C ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ ค่า R_f ของคราบ หรือกล่าวได้ว่า มีการเกาะติดของคราบไขแดงบนพื้นผิวร้อนน้อยมาก ในขณะที่อุณหภูมิพื้นผิวอื่น ๆ พบการเปลี่ยนแปลงค่า R_f ของคราบ ตั้งแต่เริ่มต้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 75°C และ 80°C สามารถ สังเกตการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจนตั้งแต่นาทีแรก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบ (R_f) และเวลาในการให้ความร้อน (t) เรียกว่า เส้นกราฟการเกิดคราบ ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะการเกิดคราบของไขแดงเหลวในช่วง อุณหภูมิ 60°C ถึง 80°C (รูปที่ 4.3 (ก)) พบความสัมพันธ์ $R_f - t$ อยู่ในรูปแบบเส้นกราฟการเกิดคราบ แบบเข้าสู่สมดุล (Asymptotic fouling curve) สอดคล้องกับเส้นกราฟการเกิดคราบของสารละลาย เวย์โปรตีน (Belmar-Beiny et al., 1993; Boxler et al., 2013, Zhang et al., 2019) และกะทิ (Narataruksa et al., 2010) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขมันแดงกับระยะเวลาให้ความร้อน (ก) 90

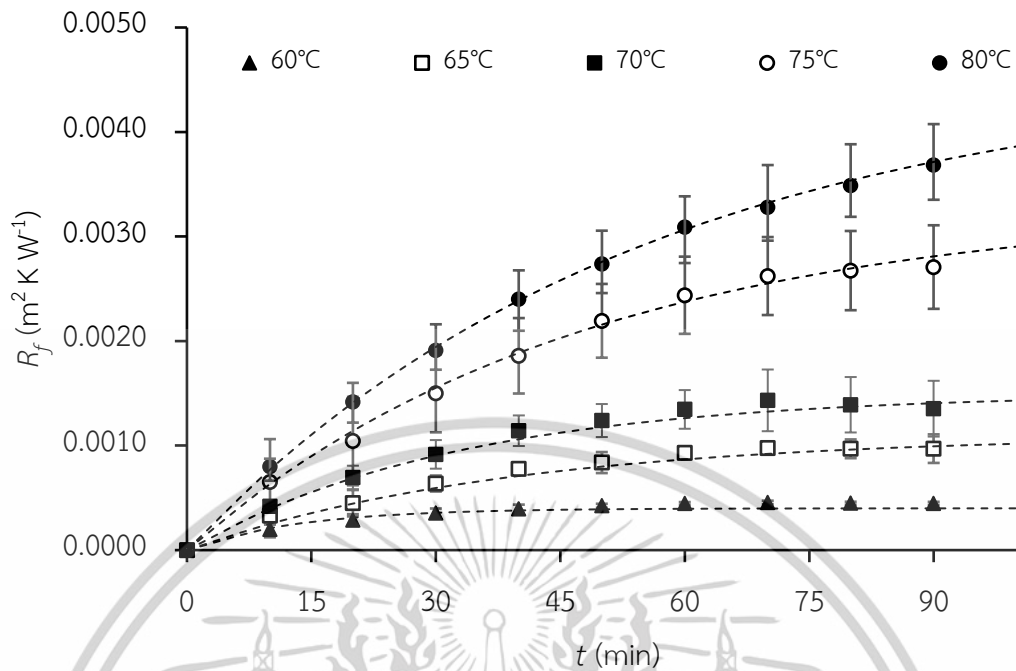
min และ (ข) 10 min แรกของกระบวนการ ที่อุณหภูมิแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

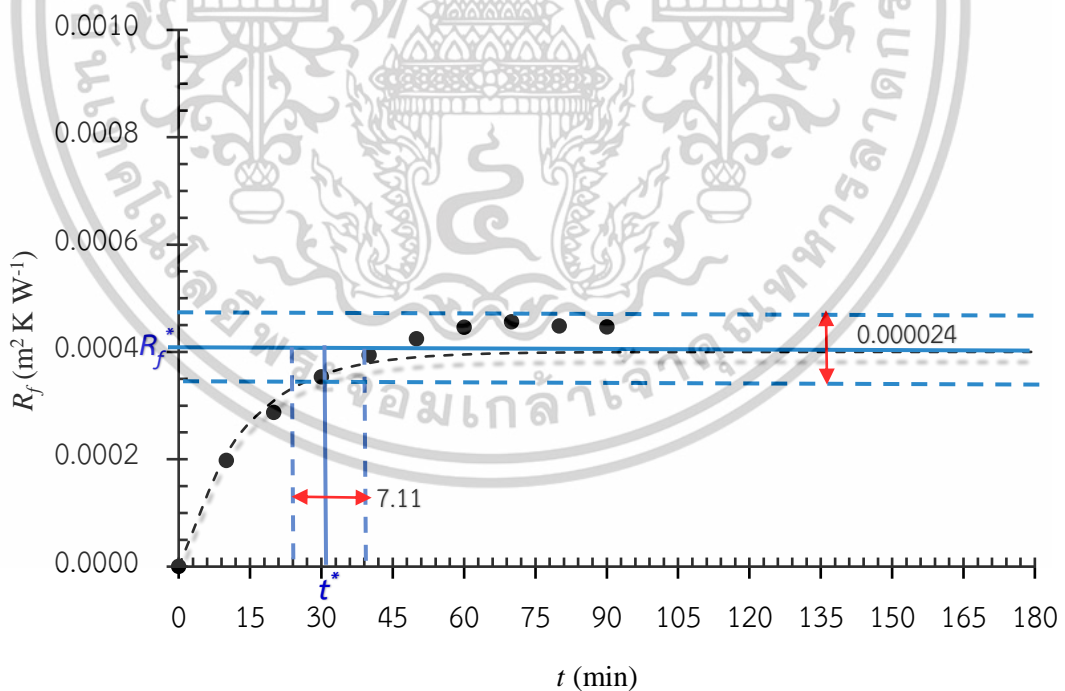
กระบวนการเกิดคราบของไข่แดงเกิดจากการเกิดคราบสะสมและการหลุดออก โดยในช่วงแรกเกิดการสะสมของคราบเป็นหลัก มีการหลุดออกของคราบน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย ในช่วงนี้ค่า R_f ของคราบเพิ่มขึ้นด้วยอัตราค่อนข้างคงที่ หรือมีค่าอัตราการเกิดคราบสะสมคงที่ เส้นกราฟ $R_f - t$ มีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง เมื่อถึงจุดหนึ่งค่า R_f ของคราบจะเริ่มเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง หรือมีอัตราการหลุดออกของคราบเพิ่มมากขึ้น เส้นกราฟ $R_f - t$ มีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเส้นโค้ง จนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุล (อัตราการสะสมของคราบและอัตราการหลุดออกมีค่าใกล้เคียงกัน) ซึ่งคราบที่สะสมบนพื้นผิวจะมีความหนาคงที่ (Bott, 1995; Awad, 2011) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75°C และ 80°C ระยะเวลา 90 min ช่วงการเข้าสู่สมดุลของการเกิดคราบไข่แดงบนพื้นผิวร้อน ไม่ปรากฏอย่างชัดเจน อัตราการเกิดคราบสะสมมีแนวโน้มลดลงในขณะที่อัตราการหลุดออกของคราบยังคงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยทั้งอัตราการเกิดคราบสะสมและอัตราการหลุดออกของคราบยังไม่เข้าสู่จุดสมดุล จำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาการให้ความร้อนนานขึ้น

เส้นกราฟความสัมพันธ์ $R_f - t$ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์การถดถอยกับแบบจำลองของ Kern & Seaton (1995) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากกว่า 0.98 แสดงดังรูปที่ 4.4 สามารถสังเกตรูปแบบของเส้นกราฟการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุลได้อย่างชัดเจน โดยพบว่าค่าความต้านทานความร้อนของคราบไข่แดงที่สภาวะสมดุล (R_f^*) และเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการเกิดคราบ (t^*) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิพื้นผิวร้อนที่สูงขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ R_f^* ที่ได้จากการทดลองการเกิดคราบไข่แดงที่อุณหภูมิพื้นผิวร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60°C ถึง 80°C มีค่าเท่ากับ $0.0004 \pm 2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ถึง $0.0046 \pm 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ และค่า t^* มีค่าเท่ากับ $31.4 \pm 7.1 \text{ min}$ ถึง $86.7 \pm 11.2 \text{ min}$ สำหรับอุณหภูมิพื้นผิวร้อน 60°C 65°C 70°C 75°C และ 80°C ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิพื้นผิวร้อนในช่วงอุณหภูมิ 75°C และ 80°C ได้จากการวิเคราะห์หันทอช่วงของการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



----- เส้นกราฟจากการวิเคราะห์การถดถอย

รูปที่ 4.4 เส้นกราฟการเกิดคราบไขแดงที่เกิดจากอุณหภูมิแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ

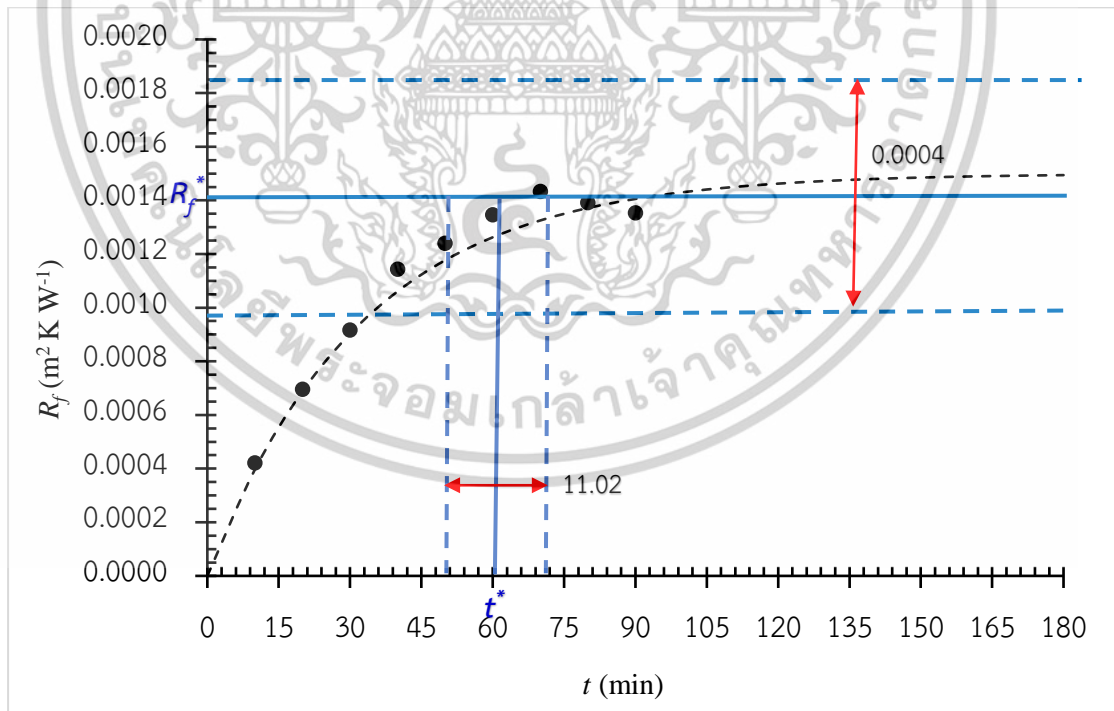
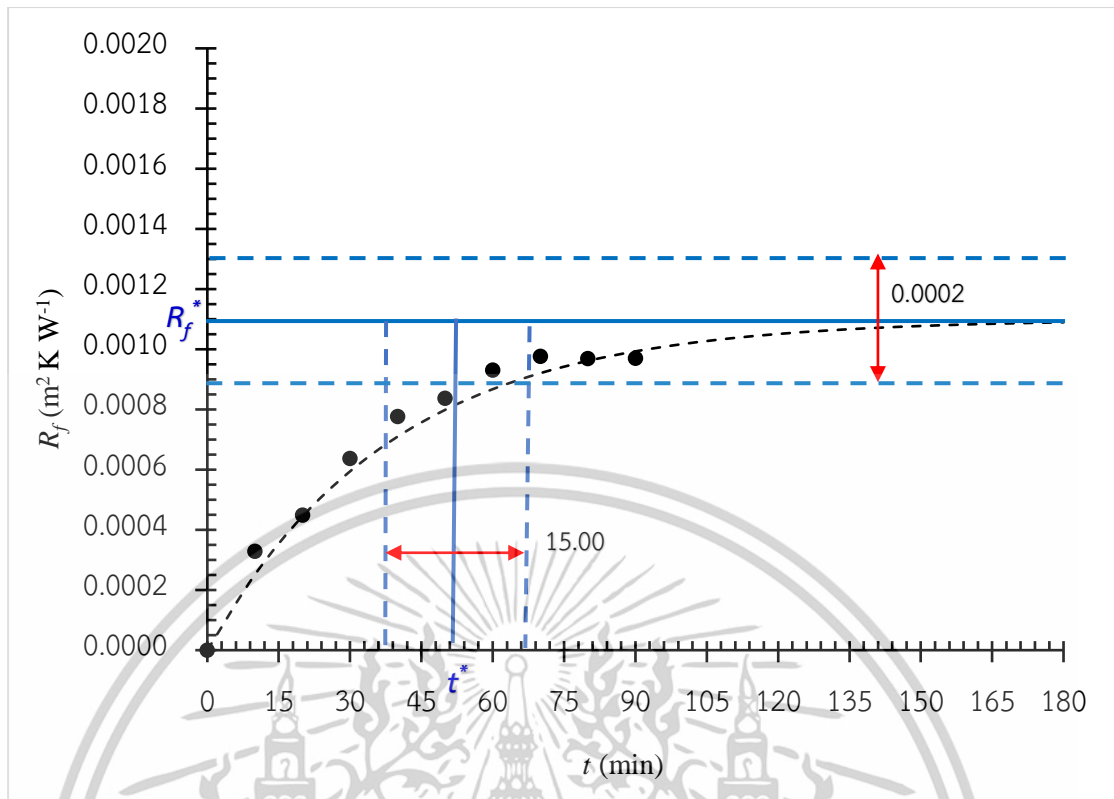


(ก)

รูปที่ 4.5 เส้นกราฟการเกิดคราบและการเข้าสู่สมดุลของคราบไขแดงที่เกิดจากอุณหภูมิแผ่น

แลกเปลี่ยนความร้อน (ก) 60°C (ข) 65°C (ค) 70°C (ง) 75°C (จ) 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

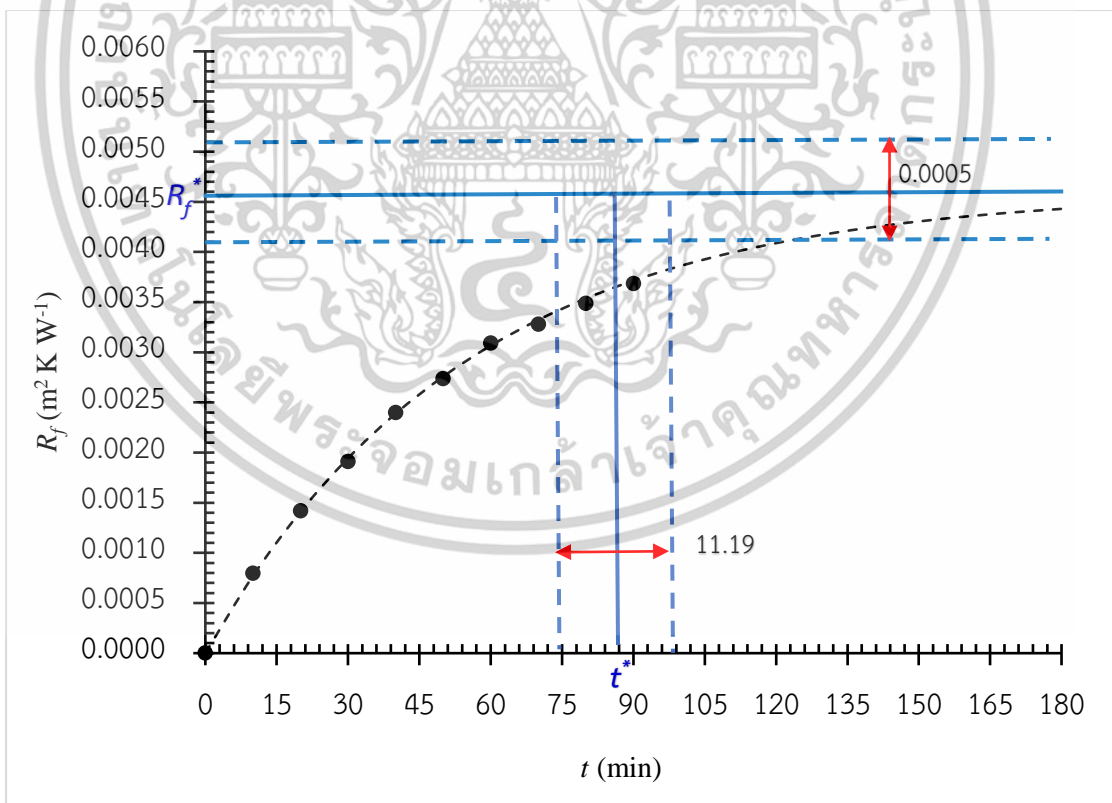
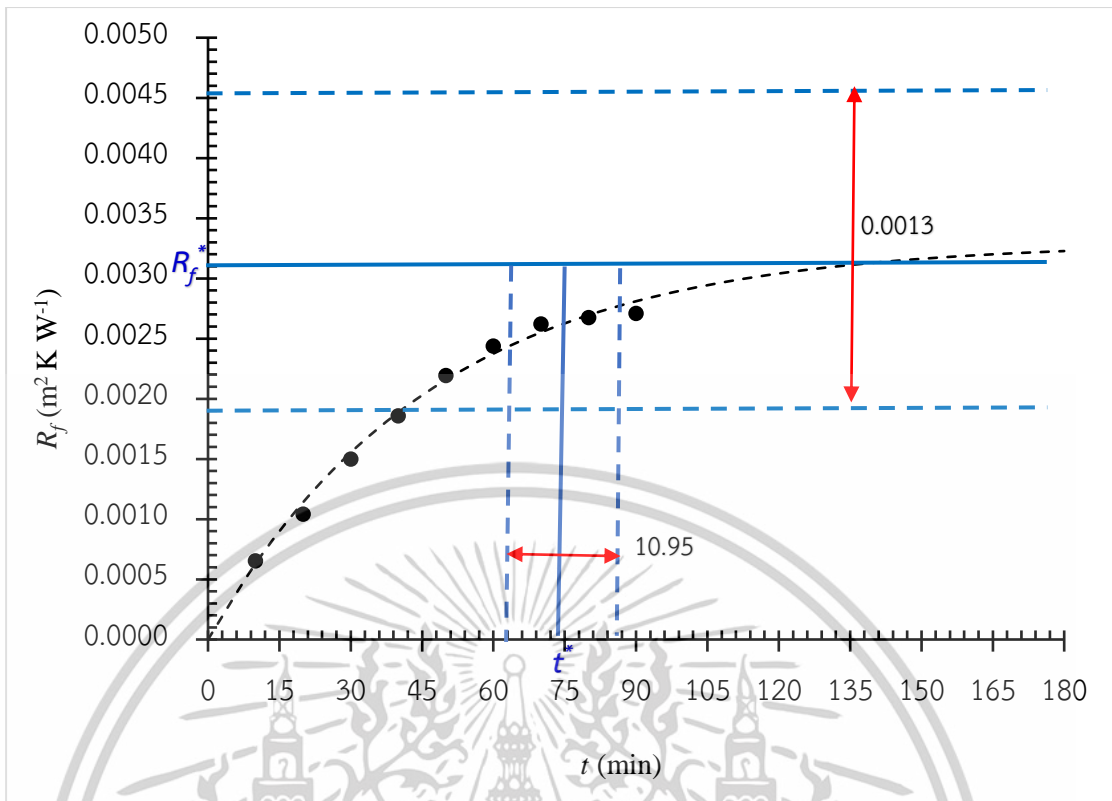


รูปที่ 4.5 (ต่อ) เส้นกราฟการเกิดคราบและการเข้าสู่สมดุลของคราบไข่แดงที่เกิดจากอุณหภูมิแผ่น

แลกเปลี่ยนความร้อน (ก) 60°C (ข) 65°C (ค) 70°C (ง) 75°C (จ) 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (ต่อ) เส้นกราฟการเกิดคราบและการเข้าสู่สมดุลของคราบไข่แดงที่เกิดจากอุณหภูมิแผ่น

แลกเปลี่ยนความร้อน (ก) 60°C (ข) 65°C (ค) 70°C (ง) 75°C (จ) 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นได้แก่เว็บไซต์ของศูนย์บริการวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 กลไกการเกิดคราบไขมัน

ภาพของคราบไขมันบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ถึง 80°C เป็นเวลา 90 min แสดงในตารางที่ 4.1 โดยที่อุณหภูมิ 75°C และ 80°C มีคราบไขมันสีเหลืองเกาะเต็มพื้นที่ ในขณะที่แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 60°C 65°C และ 70°C มีพื้นที่บางส่วนที่มีคราบเกาะติดน้อยในระดับที่สามารถสังเกตเห็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟการเกิดคราบในรูปที่ 4.3 (ก) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของคราบไขมัน (R_f) และเวลาในการให้ความร้อน (t) พบว่า เป็นรูปแบบเส้นกราฟการเกิดคราบแบบเข้าสู่สมดุล (Asymptotic fouling curve) โดยคราบไขมันจัดเป็นการเกิดคราบประเภทปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction fouling) โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเสถียรภาพของโปรตีน แม้ว่าองค์ประกอบหลักของไขมันประกอบด้วยลิพิดและโปรตีน แต่ลิพิดไม่ได้มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดคราบ (Zhang et al., 2019) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยการเกิดคราบของอาหารชนิดอื่น ที่มีลิพิดและโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักเช่นกัน เช่น กะทิ (Narataruksa et al., 2010) นมวัว และ นมอูฐ (Zhang et al., 2020) เป็นต้น

กระบวนการเกิดคราบ ประกอบด้วย กระบวนการเกิดคราบสะสมและกระบวนการหลุดออก โดยมีกลไกของการเกิดคราบไขมันบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนี้

1) การก่อตัวของอนุภาคโปรตีนในไขมันเหลว ซึ่งเป็นกลไกแรกๆของกระบวนการเกิดคราบ ในการทดลองการเกิดคราบไขมัน เมื่อพิจารณาแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 60°C ระยะเวลา 10 min แรก ดังรูปที่ 4.3 (ข) พบระยะเริ่มต้นของกระบวนการหรือระยะเหนี่ยวนำ (Initial or Induction period, t_d) ที่คราบไขมันเริ่มก่อตัวบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน โดยค่า t_d มีค่าประมาณ 3 min ในขณะที่ อุณหภูมิมากกว่า 65°C ถึง 80°C ไม่พบระยะการก่อตัวของคราบไขมัน ระยะ t_d ขึ้นกับหลายปัจจัยโดยอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อระยะการก่อตัว ซึ่งระยะเริ่มต้นของกระบวนการเกิดคราบประเภทปฏิกิริยาทางเคมีมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวร้อนเพิ่มสูงขึ้น (Awad, 2011) อุณหภูมิพื้นผิวที่แตกต่างกันส่งผลโดยตรงต่อการเกิดคราบ เนื่องจากโปรตีนแต่ละชนิดในไขมันเกิดการเสถียรภาพทางธรรมชาติที่อุณหภูมิเฉพาะแตกต่างกัน

เมื่อไขมันเหลวได้รับความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 68°C ทำให้โปรตีน ApoB ในไลโปโปรตีนความหนาแน่นต่ำ (LDL) เกิดการเสถียรภาพบางส่วนและคลายตัวออก Dixon and Cotterill (1981) พบการเสถียรภาพของ γ -ไลเวติน และ α -ไลเวติน ซึ่งเป็นโปรตีนพลาสมาในไขมัน ที่อุณหภูมิประมาณ 60°C และ 70°C โปรตีนส่วนที่คลายตัวออกจะสร้างโครงสร้างตาข่ายขึ้น เมื่อไขมันเหลวได้รับความ

ร้อนมากขึ้น จะเกิดเป็นตะกอนแล้วรวมตัวกันทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น หรือเกิดการเกาะติดบนพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tsutsui (1988) และ Le Denmat et al. (1999) พบว่า ค่าความหนืดของไข่แดงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 65°C โดยพบการเสียสภาพของโปรตีนพลาสมาที่อุณหภูมิ 70°C และโปรตีนเริ่มก่อตัวเป็นเจลที่อุณหภูมิ 75°C ในขณะที่โปรตีนแกรนูล ซึ่งเป็นโปรตีนฟอสโฟไลพิด และ HDL เริ่มเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิสูงกว่า 76°C และสูญเสียสภาพเมื่ออุณหภูมิ 80°C (Helbig et al., 2019; Yang et al., 2019) จะเห็นได้ว่า เมื่อให้ความร้อนกับไข่แดงเหลวผ่านแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ถึง 70°C คราบเกิดจากการเสียสภาพของโปรตีนพลาสมา ในขณะที่อุณหภูมิ 75°C และ 80°C คราบไข่แดงเกิดขึ้นอย่างชัดเจนจากการเสียสภาพของทั้งโปรตีนพลาสมาและแกรนูล ซึ่งการเสียสภาพของโปรตีนแกรนูลทำให้โครงสร้างตาข่ายที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงมากขึ้น

2) การถ่ายเทมวลของอนุภาคโปรตีนในไข่แดงเหลวไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอาศัยกลไกการแพร่กระจายของอนุภาคเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของอนุภาคโปรตีนในไข่แดงเหลวกับอนุภาคที่เกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิดการเสียสภาพธรรมชาติและการรวมตัวกันของโปรตีน เมื่ออนุภาคของโปรตีนในของเหลวมีความเข้มข้นมากขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทมวลไปเกาะติดบนพื้นผิวซึ่งมีความเข้มข้นของโปรตีนที่น้อยกว่า (Kessler and Beyer, 1991; Wang et al., 2018)

3) การเกาะติดของอนุภาคโปรตีนในไข่แดงเหลว โดยกลไกนี้เกี่ยวข้องกับทั้งกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี โดยสภาพ ลักษณะ และสมบัติของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดคราบ เช่น พื้นผิวที่เรียบและมีความสามารถในการเปียกน้ำต่ำ จะช่วยเพิ่มระยะเวลาเหนียวน้ำ (t_d) และช่วยลดการเกาะติด สำหรับงานวิจัยนี้ พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหยาบผิวต่ำ (0.4 μm) จัดเป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) และมีค่าความสามารถเปียกน้ำที่ดี (Wettability) จึงทำให้เกิดคราบเกาะติดได้ค่อนข้างง่าย

4) การหลุดของคราบไข่แดงออกจากพื้นผิว คราบไข่แดงที่เกิดจากการได้รับความร้อนอุณหภูมิมากกว่า 75°C เป็นคราบที่เกิดจากการเสียสภาพของทั้งโปรตีนพลาสมาและแกรนูล โครงสร้างตาข่ายที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรง จึงมีข้อสันนิษฐานว่าการเกิดคราบไข่แดงเกาะพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิสูง เป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (Cordobés et al., 2004) หรือไม่มีสมบัติการละลาย ในขณะที่ คราบไข่แดงที่เกิดขึ้นจากความร้อนอุณหภูมิ 60°C ถึง 70°C โครงสร้างตาข่ายมีความแข็งแรงน้อยกว่า ที่อุณหภูมิเหล่านี้ในระหว่างกระบวนการเกิดคราบ จึงอาจเกิดกลไกการละลายกลับร่วมกับกลไกการหลุดออกเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของไข่แดงเหลว โดยหากแรงเฉือนมีค่ามากกว่าแรงยึดเกาะภายในโครงสร้างของคราบ คราบบางส่วนจะหลุดออกไปกับของไหล อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ กำหนดความเร็วการไหลของไข่แดงเหลวเพียงระดับเดียว จึงไม่สามารถ

วิเคราะห์กลไกการหลุดออกของคราบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 กลไกการหลุดออกของคราบไข่แดง

ตารางที่ 4.1 แสดงภาพการแช่แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคราบไข่แดงเกาะอยู่ ในสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (w/v) ที่อุณหภูมิห้อง ทุก ๆ 10 min เป็นเวลา 120 min โดยคราบไข่แดงที่เกิดขึ้นบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน เกิดจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C ถึง 80°C เป็นเวลา 90 min จากการสังเกต พบว่า ในระหว่างการแช่คราบในสารละลาย NaOH 10 min แรก สีของคราบเปลี่ยนจากสีเหลืองเข้ม เป็นสีเหลืองที่จางลง และมีลักษณะการบวมเกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยคราบที่เกิดจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60°C และ 65°C เริ่มมีบางส่วนหลุดออกจากแผ่น ในขณะที่ คราบที่เกิดจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C ถึง 80°C เริ่มสังเกตเห็นการหลุดออก เมื่อเวลาผ่านไป 20 min โดยกระบวนการหลุดออกของคราบไข่แดงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และหลุดออกจนเกือบหมด เมื่อเวลาการแช่ผ่านไปประมาณ 60 min สำหรับคราบที่เกิดจากอุณหภูมิ 60°C ส่วนคราบที่เกิดจากอุณหภูมิต่ำกว่า 60°C เมื่อเวลาผ่านไป 120 min ยังคงปรากฏการหลงเหลือของคราบบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยคราบที่เกิดจากอุณหภูมิสูงที่สุด (80°C) คงเหลือมากที่สุด

การหลุดออกของคราบไข่แดงจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการแช่คราบในสารทำความสะอาด ประกอบด้วยกลไก ดังนี้

1) การแพร่และการละลาย (Diffusive dissolution) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อคราบไข่แดงที่เสียหายจากความร้อนสัมผัสกับสารละลาย NaOH จะเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้โปรตีนไข่แดงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย NaOH ทำลายพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และพันธะเปปไทด์ระหว่างโปรตีน ทำให้โปรตีนเกิดการคลายตัว สารละลายจึงแทรกตัวเข้าไปภายในโครงสร้างของคราบได้ (Xin, 2002) ทำให้คราบเกิดการบวม (Swelling) และหากน้ำล้อมรอบโปรตีนจะเกิดการแยกตัวของโปรตีนและหลุดออกไปกับสารละลาย หรือเกิดกลไกการละลาย (Dissolution) ขึ้น กลไกการแพร่ยังคงดำเนินต่อไป สารละลายแทรกตัวเข้าไปในคราบมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้คราบเกิดการบวม และแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบลดลง เมื่อพิจารณาภาพในตารางที่ 4.1 ที่เวลาเดียวกัน เช่น ที่ระยะเวลาการแช่ 20 min พบว่า คราบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 70°C โปรตีนเกิดการเสียหายและสร้างโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรง กลไกการแพร่และการละลายจึงใช้เวลานานกว่า และคราบมีลักษณะที่บวมและสีจางกว่าคราบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Yang et al. (2019)

ซึ่งเปรียบเทียบการทำทำความสะอาดคราบไข่แดงที่ยังไม่เกิดการเสียหายทางโปรตีนและคราบไข่แดงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



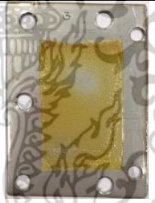

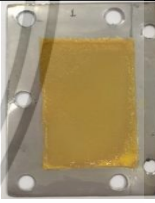
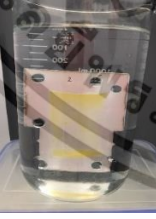


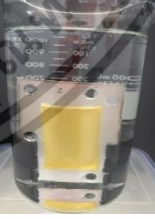

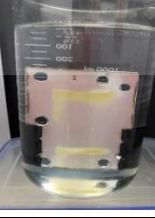
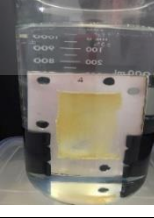
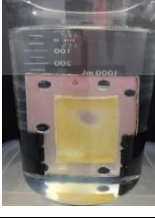
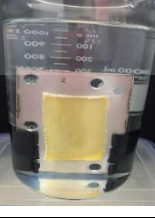
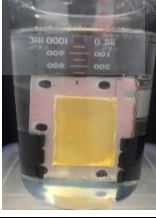
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรตีนเกิดการเสียสภาพแล้ว ภายใต้เงื่อนไขการทำความสะอาดเดียวกัน พบว่า การทำความสะอาดคราบไข่แดงที่โปรตีนเกิดการเสียสภาพแล้วยากกว่าคราบสดที่เกิดจากโปรตีนยังไม่เสียสภาพ

2) การแยกออกจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ (Cohesive separation) เมื่อสารละลาย NaOH แพร่เข้าไปภายในคราบไข่แดง ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคราบกับสารละลาย โปรตีนเกิดการคลายตัวและการทำลายพันธะระหว่างโปรตีน ทำให้คราบบวมและแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบลดลง หากมีแรงภายนอกมากกระทำที่มากพอคราบพร้อมที่จะหลุดแยกออกจากกัน

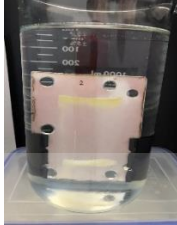
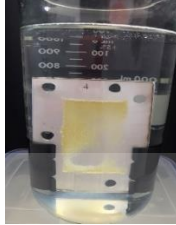
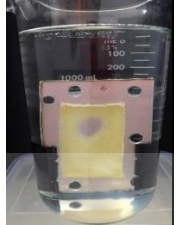
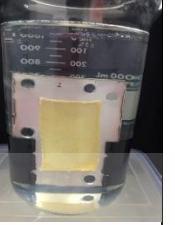
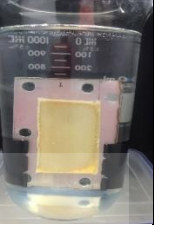



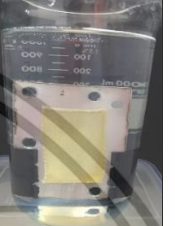
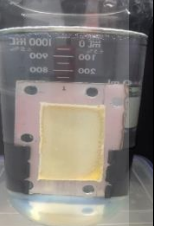

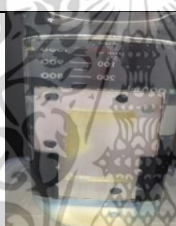
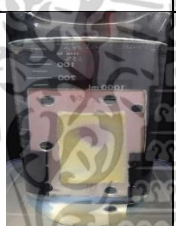

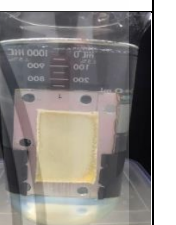
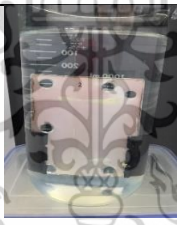
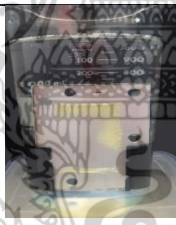


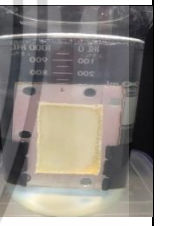




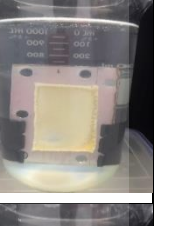
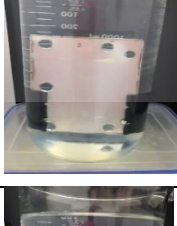
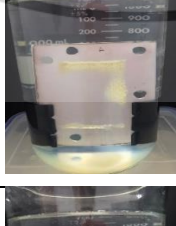
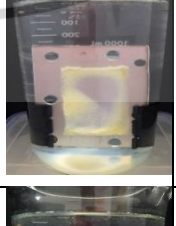
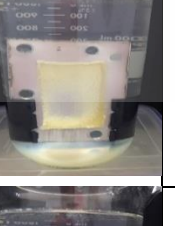
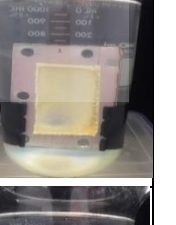

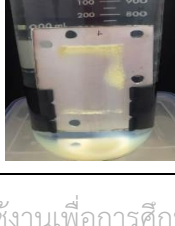
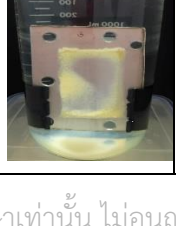
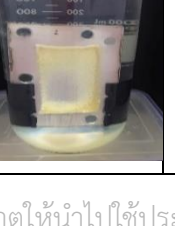

นอกจากนี้ การทำความสะอาดคราบไข่แดงยังประกอบด้วยกลไกอื่น ๆ ได้แก่ การหลุดออกจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ (Viscous shifting) และการลอกออก (Adhesive detachment) ซึ่งกลไกเหล่านี้ต้องอาศัยแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากแรงกระทำของสารทำความสะอาด อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการหลุดออกของคราบโดยอาศัยการแช่ในสารทำความสะอาด จึงไม่สามารถวิเคราะห์กลไกการหลุดออกของคราบเนื่องจากแรงเฉือนได้

ตารางที่ 4.1 การหลุดออกของคราบไข่แดงที่เกิดจากการเกาะติดบนพื้นผิวอุณหภูมิต่าง ๆ

เวลา	การหลุดออกของคราบไข่แดงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม				
	60°C	65°C	70°C	75°C	80°C
คราบไข่แดง					
0 min					
10 min					

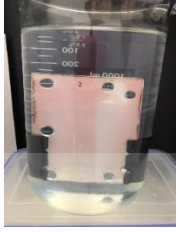
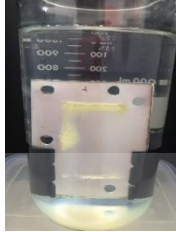
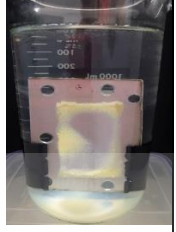
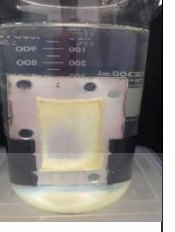
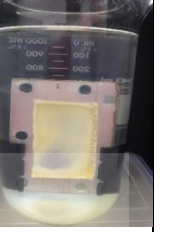
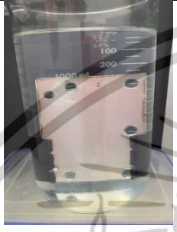



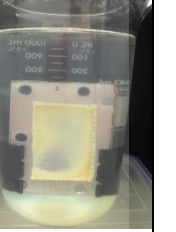

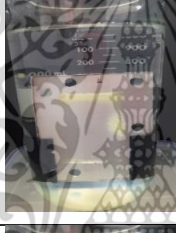
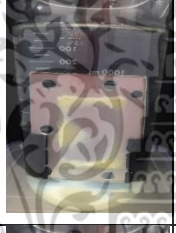


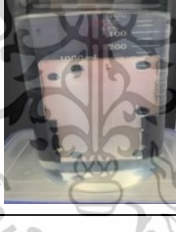
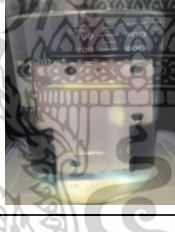


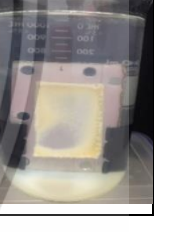
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) การหลุดออกของคราบไข่แดงที่เกิดจากการเกาะติดบนพื้นผิวอุณหภูมิต่าง ๆ

เวลา	การหลุดออกของคราบไข่แดงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม				
	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C
20 min					
30 min					
40 min					
50 min					
60 min					
70 min					
80 min					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) การหลุดออกของคราบไข่แดงที่เกิดจากการเกาะติดบนพื้นผิวอุณหภูมิต่าง ๆ

เวลา	การหลุดออกของคราบไข่แดงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม				
	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C	80 °C
90 min					
100 min					
110 min					
120 min					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

เส้นกราฟการเกิดคราบไ้แดงเกาะติดบนแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่อุณหภูมิพื้นผิว 60°C ถึง 80°C ได้จากการตรวจและติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานความร้อนของคราบไ้แดงแบบเวลาจริงด้วยเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน โดยพบว่า เส้นกราฟการเกิดคราบของไ้แดง ($R_f - t$) เป็นแบบเข้าสู่สมดุล (Asymptotic fouling curve) ในช่วงแรกเกิดการสะสมของคราบเป็นหลัก มีการหลุดออกของคราบน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย เส้นกราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง เมื่อถึงจุดหนึ่งค่า R_f ของคราบเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง หรือมีอัตราการหลุดออกของคราบเพิ่มมากขึ้น เส้นกราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเส้นโค้ง จนกระทั่งเข้าสู่จุดสมดุล (อัตราการสะสมของคราบและอัตราการหลุดออกมีค่าใกล้เคียงกัน) ซึ่งคราบที่สะสมบนพื้นผิวจะมีความหนาคงที่ และจากการวิเคราะห์การถดถอย (ข้อมูล $R_f - t$) กับแบบจำลองของ Kern & Seaton (1995) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบค่าความต้านทานความร้อนของคราบไ้แดงที่สภาวะสมดุล ($R_{f,s}$) และเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการเกิดคราบ (t^*) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิพื้นผิวร้อนที่สูงขึ้น โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิพื้นผิวร้อนในช่วงอุณหภูมิ 75°C และ 80°C ได้จากการวิเคราะห์ห้นอกช่วงของการทดลอง

5.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อกลไกการเกิดคราบ

กลไกของการเกิดคราบไ้แดงบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน ประกอบด้วย

1) การก่อตัวของอนุภาคโปรตีนในไ้แดงเหลว ซึ่งสามารถพิจารณาผลของอุณหภูมิได้จากระยะเริ่มต้นของกระบวนการหรือระยะเหนียวน้ำ (Initial or Induction period, t_d) และอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานการเกิดคราบ โดยอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อระยะการก่อตัว ซึ่งระยะเริ่มต้นของกระบวนการเกิดคราบประเภทปฏิกิริยาทางเคมีมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวร้อนเพิ่มสูงขึ้น อุณหภูมิพื้นผิวที่แตกต่างกันส่งผลโดยตรงต่อการเกิดคราบ เนื่องจากโปรตีนแต่ละชนิดในไ้แดงเกิดการเสียสภาพทางธรรมชาติที่อุณหภูมิเฉพาะแตกต่างกัน

2) การถ่ายเทมวลของอนุภาคโปรตีนในไ้แดงเหลวไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอาศัยกลไกการแพร่กระจายของอนุภาคเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของอนุภาคโปรตีนในไ้

แดงเหลวกับอนุภาคที่เกาะติดบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้เกิดการเสียสภาพธรรมชาติและการรวมตัวกันของโปรตีน เมื่ออนุภาคของโปรตีนในของเหลวมีความเข้มข้นมากขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทมวลไปเกาะติดบนพื้นผิวซึ่งมีความเข้มข้นของโปรตีนที่น้อยกว่า

3) การเกาะติดของอนุภาคโปรตีนในไข่แดงเหลวบนพื้นผิว โดยงานวิจัยนี้ พื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหยาบผิวต่ำ ($0.4 \mu\text{m}$) จัดเป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) และมีค่าความสามารถเปียกน้ำที่ดี (Wettability) จึงทำให้เกิดคราบเกาะติดได้ค่อนข้างง่าย

4) การหลุดของคราบไข่แดงออกจากพื้นผิว คราบไข่แดงที่เกิดจากการได้รับความร้อนอุณหภูมิมากกว่า 75°C เป็นคราบที่มีความแข็งแรง จึงมีข้อสันนิษฐานว่าการเกิดคราบไข่แดงเกาะพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิสูง เป็นปฏิกิริยาที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ หรือไม่มีสมบัติการละลาย ในขณะที่ ที่อุณหภูมิต่ำโครงสร้างตาข่ายมีความแข็งแรงน้อยกว่า จึงอาจเกิดกลไกการละลายกลับร่วมกับกลไกการหลุดออกเนื่องจากแรงเฉือน

5.1.2 อิทธิพลของอุณหภูมิพื้นผิวต่อกลไกการทำความสะอาดคราบ

การทำความสะอาดคราบไข่แดงจากพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการแช่คราบในสารทำความสะอาด ประกอบด้วยกลไก ดังนี้

1) การแพร่และการละลาย (Diffusive dissolution) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อคราบไข่แดงที่เสียสภาพจากความร้อนสัมผัสกับสารละลาย NaOH จะเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้โปรตีนไข่แดงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย NaOH ทำลายพันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน และพันธะเปปไทด์ระหว่างโปรตีน ทำให้โปรตีนเกิดการคลายตัว สารละลายจึงแทรกตัวเข้าไปภายในโครงสร้างของคราบได้ ทำให้คราบเกิดการบวม (Swelling) และหากน้ำล้อมรอบโปรตีนจะเกิดการแยกตัวของโปรตีนและหลุดออกไปกับสารละลาย หรือเกิดกลไกการละลาย (Dissolution) ขึ้น คราบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 70°C โปรตีนเกิดการเสียสภาพและสร้างโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรง กลไกการแพร่และการละลายจึงใช้ระยะเวลาานานกว่า และคราบมีลักษณะที่บวมและสีจางกว่าคราบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า

2) การแยกออกจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ (Cohesive separation) เมื่อสารละลาย NaOH แพร่เข้าไปภายในคราบไข่แดง ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคราบกับสารละลาย โปรตีน

เกิดการคลายตัวและการทำลายพันธะระหว่างโปรตีน ทำให้คราบขมและแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบลดลง หากมีแรงภายนอกมากกระทำที่มากพอคราบพร้อมที่จะหลุดแยกออกจากกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลสรุปจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อทั้งการเกิดคราบและการทำความสะอาด โดยงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายผลของอุณหภูมิต่อกลไกการเกิดคราบและการหลุดออกของคราบไขแดง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองมีตัวแปรควบคุมหลายตัว จึงไม่สามารถอธิบายกลไกที่เกี่ยวข้องได้ครบทั้งหมด ดังนั้น จึงควรดำเนินงานวิจัยต่อในประเด็นดังนี้

1) ควรเพิ่มระยะเวลาทดลองการเกิดคราบหรือการให้ความร้อนกับไขแดงเหลวนานขึ้น ในช่วงอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 75°C และ 80°C เนื่องจากช่วงการเข้าสู่สมดุลของการเกิดคราบไขแดงบนพื้นผิวร้อนยังไม่ปรากฏอย่างชัดเจน อัตราการเกิดคราบสะสมและอัตราการหลุดออกของคราบยังไม่เข้าสู่จุดสมดุล งานวิจัยสรุปผลการวิจัยภายใต้แนวโน้มที่เกิดขึ้นโดยอาศัยการวิเคราะห์การถดถอยนอกช่วงการทดลอง

2) ควรเพิ่มความเร็วการไหลของไขแดงเหลวเป็นอีกหนึ่งตัวแปรในการศึกษากลไกการเกิดคราบ เนื่องจากกลไกการหลุดออกของคราบ อาจเกิดขึ้นร่วมกันระหว่างแรงเฉือนและการละลายกลับ อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ กำหนดความเร็วการไหลของไขแดงเหลวเพียงระดับเดียว จึงไม่สามารถวิเคราะห์กลไกการหลุดออกของคราบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงเฉือนได้

3) ควรเพิ่มความเร็วการไหลของสารทำความสะอาดเป็นอีกหนึ่งตัวแปรในการศึกษากลไกการหลุดออกของคราบระหว่างการทำความสะอาด เนื่องจากในการทำความสะอาดคราบไขแดงยังประกอบด้วยกลไกอื่น ๆ อีก ได้แก่ การหลุดออกจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคราบ (Viscous shifting) และการลอกออก (Adhesive detachment) ซึ่งกลไกเหล่านี้ต้องอาศัยแรงเฉือน ซึ่งเกิดจากแรงกระทำของสารทำความสะอาด อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการหลุดออกของคราบโดยอาศัยการแช่ในสารทำความสะอาด จึงไม่สามารถวิเคราะห์กลไกการหลุดออกของคราบเนื่องจากแรงเฉือนได้

4) หากแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดพื้นที่รับความร้อนของเซนเซอร์วัดฟลักซ์ความร้อน ควรเพิ่มจำนวนจุดติดตั้งเซนเซอร์ให้เหมาะสมกับขนาดพื้นที่แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อลดการนำความร้อนจากพื้นที่ส่วนเกิน ซึ่งจะส่งผลต่างของจุดวัดอุณหภูมิลดลง ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- Anton, M. 2007. **Bioactive Egg Compounds: Subpart 1 Egg Yolk Compounds**. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Anton, M., Denmat, M.L., Beaumal, V. and Pilet, P. 2001. "Filler Effects of Oil Droplets on The Rheology or Heat-set Emulsion Gel Prepared with Egg Yolk and Egg Yolk Fractions." **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. 64: 194-197.
- Anton, M., Matinet, V., Dalgalarrodo, M., Beaumal, V., David-Briand, E. and Rabesona, H. 2003. "Chemical and Structural Characterisation of Low-Density Lipoproteins Purified from Hen Egg Yolk." **Food Chem**. 83: 175-183.
- Awad, M. M. 2011. "Fouling of Heat Transfer Surfaces. In Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations, and Industrial Systems." Belmiloudi, A.; InTech: Rijeka, Croatia. Ch. 20.
- Bansal, B. and Chen, X.D. 2006. "A Critical Review of Milk Fouling in Heat Exchangers." **Compr Rev Food Sci F**. 5(2): 27-33.
- Belmar-Beiny, M.T., Gotham, S.M., Paterson, W.R., Fryer, P.J. and Pritchard, A.M. 1993. "The Effect of Reynolds Number and Fluid Temperature in Whey Protein Fouling." **Journal of Food Engineering**. 19(2): 119-139.
- Bird, M.R. and Fryer, P.J. 1991. "An Experimental Study of The Cleaning of Surfaces Fouled by Whey Proteins." **Food Bioprod. Process**. 69: 13-21.
- Blanpain-Avet, P., André, C., Khaldi, M., Bouvier, L., Petit, J. and Six, T. 2016. "Predicting the distribution of whey protein fouling in a plate heat exchanger using the kinetic parameters of the thermal denaturation reaction of β -lactoglobulin and the bulk temperature profiles". **Journal of Dairy Science**. 99(12): 9611-9630.
- Bott, T.R. 1995. **Fouling of Heat Exchangers**. Amsterdam : Elsevier Science B.V.
- Boxlter, C., Augustin, W. and Scholl, S. 2013. "Fouling of Milk Components on DLC Coated Surfaceds at Pasteurization and UHT Temperatures." **Food Bioprod. Process**. 91(4): 336-347.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Chen, X.D., and Bala, P. 1998. "Investigation of The Influences of Surface and Bulk Temperatures upon Fouling of Milk Components onto A Stainless Steel Probe". In **Fouling and cleaning in food processing'98**, Jesus College, Cambridge, England, 6–8 April.
- Cordobés, F., Partal, P. and Guerrero, A. 2004. "Rheology and Microstructure of Heat-Induced Egg Yolk Gels." **Rheol. Acta.** 43: 184-195.
- Dixon, D.K., and Cotterill, O.J. 1981. "Electrophoretic and Chromatographic Changes in Egg Yolk Proteins due to Heat." **Journal of Food Science.** 46: 981-983.
- Fryer, P. J., Robbins, P. T., Green, C., Schreier, P. J. R., Pritchard, A. M., Hasting, A. P. M., Royston, D. G. and Richardson, J. F. 1996. "A Statistical Model for Fouling of a Plate Heat Exchanger by Whey Protein Solution at UHT Conditions". **Food and Bioproducts Processing**, 74(4): 189-199.
- Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M. and Wilson, D.I. 1999. "Cleaning-In-Place of Whey Protein Fouling Deposits: Mechanisms Controlling Cleaning.", **Trans IChemE**, 77, part C: 127-136
- 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Guilmineau, F. and Kulozik, U. 2006. "Impact of A Thermal Treatment on The Emulsifying Properties of Egg Yolk. Part 1: Effect of The Heating Time." **Food Hydrocolloids**. 20: 1105-1113.
- 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.
- 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 Bioprod. Process**. 113: 108-117.
- Hukseflux Thermal Sensors B.V. "User Manual FHF02". [Online]. Available: Download software, user manuals and more (hukseflux.com). 2023.
- Joppa, M., Köhler, H., Rüdiger, F., Majschak, J.-P., Fröhlich, J. 2017. "Prediction of Cleaning by Means of Computational Fluid Dynamics: Implication of The Pre-Wetting of a Swellable Soil." **Proc. Int. Conf. Heat Exch. Fouling Clean**. 12th, 245-255.
- Kern, D.Q. and Seaton, R.E. 1959. "A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling." **British Chemical Engineering**. 14(5): 258-262.
- Kessler, H. G., and Beyer, H. J. 1991. "Thermal Denaturation of Whey Proteins and Its Effect in Dairy Technology." **International Journal of biological macromolecules**. 13(3): 165-173.
- Kiosseoglou, V. 2003. Egg Yolk protein Gels and Emulsions. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**. 8 (4): 365-370. [Online]
<https://doi.org/10.1016/j.cocis.2003.08.014>
- 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- 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.
- 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.
- Mercadé-Prieto, R. and Chen, X.D. 2006. "Dissolution of Whey Protein Concentrate Gels in Alkali. **A.I.Ch.E. Journal**. 52(2): 792-803.
- 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.
- 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.
- Pan, F. and Chen, X.D., Mercadé-Prieto R., Xiao, J. 2019. "Numerical Simulation of Milk Fouling: Taking Fouling Layer Domain and Localized Surface Reaction Kinetics into Account". **Chemical Engineering Science**. 197: 306-316.
- Pereira, A., Mendes, J., & Melo, L. F. (2008). "Using Nanovibrations to Monitor Biofouling." **Biotechnology and Bioengineering**, 99(6): 1407-1415.
- Pérez-Mohedano, R., Letzelter, N. and Bakalis, S. 2015. "Development of A Swelling-Removal Model for The Scanning Fluid Dynamic Gauge." **Food and Bioproducts Processing**. 93: 269-282.
- Pérez-Mohedano, R., Letzelter, N. and Bakalis, S. 2016. "Swelling and Hydration Studies on Egg Yolk Samples via Scanning Fluid Dynamic Gauge and Gravimetric Tests." **J. Food Eng**. 169, 101-113.
- Phinney, D.M., Feldman, A., and Heldman, D. 2017. "Modeling High Protein Liquid Beverage Fouling during Pilot Scale Ultra-High Temperature (UHT) Processing." **Food and Bioproducts Processing**. 106: 43-52.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Riverol, C., and Napolitano, V. 2005. “Estimation of Fouling in A Plate Heat Exchanger through The Application of Neural Networks.” **Journal of Chemical Technology & Biotechnology.** 80(5): 594-600.
- Saikhwan, p., Somana, J., and Konkamdee, W. 2022. “Fouling Mechanisms of Coconut Milk Foulants Formed during Pasteurization.” **Food and Bioproducts Processing.** 136: 184-195.
- Saikhwan, P., Thongchan, S., Jumwan, N., Thungsiabyuan, p., Sakdanuphap, J., Boonsom, S., Kraitong, P., Danwanichakul, P. 2015. “Cleaning Studies of Coconut Milk Foulants Formed during Heat Treatment Process.” **Food and Bioproducts Processing.** 93: 166-175.
- 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.
- Sritham, E., Nunak, N., Ongwongsakul, E., Chaishome, J., Schleining, G., and Suesut, T. 2023. “Development of Mathematical Model to Predict Soymilk Fouling Deposit Mass on Heat Transfer Surfaces using Dimensional Analysis.” **Computation.** 11: 83.
- Strixner, T. and Kulozik, U. 2011. “Egg Proteins.” 150-209. In Phillips, G.O. and Williams, P.A. **Handbook of Food Proteins.** Cornwall: Woodhead.
- Teixeira A.A. 2014. “Thermal Food Preservation Techniques (Pasteurization, Sterilization, Canning and Blanching)”. **Conventional and advanced food processing technologies.** 115-128.
- Tsutsui, T. 1988. Functional Properties of Heat-Treated Egg Yolk Low Density Lipoprotein. **Journal of Food Science.** 53: 1103-1106.
- USDA. 1969. “**ARS74-48. Egg pasteurization manual.**” California: United States Department of Agriculture.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Wang, J., Li, L., Fu, N., Mercade-Prieto, R., and Chen, X.D. A. 2018. Comparative Study on Fouling and Cleaning Characteristics of Soy Protein Isolate (SPI). **Int. J. Food Eng.** 14: 20170381.
- Wallhäußer, E., Hussein, W. B., Hussein, M. A., Hinrichs, J., and Becker, T. M. 2011. “On the Usage of Acoustic Properties Combined with An Artificial Neural Network - A New Approach of Determining Presence of Dairy Fouling.” **Journal of Food Engineering**, 103(4): 449-456.
- Xin, H. Chen, X.D. and özkan, N. 2002. “Whey Protein-Based Gel as a Model Material for Studying Initial Cleaning Mechanisms of Milk Fouling.” **Journal of Food Science**. 67: 2702-2711.
- 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 Bioprod. Process.** 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: 110085



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effects of heat transfer surface temperature on liquid egg yolk fouling

Eakasit SRITHAM¹, Navaphattra NUNAK^{1,*}, Worapanya SUTHANUPAPHWUT¹,
Badin SOMLITSOPAK¹, Jedsada CHAISHOME¹, Taweepol SUESUT¹

Abstract

This study was aimed at investigating the effects of different surface temperatures (60–80 °C) on the formation of egg yolk deposits on heat transfer surface. Experimental data from the fouling period were fitted with zero- and first-order reaction models and the reaction kinetics of fouling was obtained using the Arrhenius equation. Egg yolk fouling curves exhibited an asymptotic pattern showing only fouling and post-fouling periods. The fouling resistance at transition point increased with the increasing surface temperature. The zero-order reaction model was well describing the reaction rate of egg yolk fouling. The obtained activation energy of 85.47 kJ/mol was less than that for thermal denaturation of egg yolk proteins. The fouling process of egg yolk was mainly controlled by the deposition reaction.

[Keywords] liquid egg yolk, egg yolk deposit, fouling, fouling resistance, kinetics, surface temperature

1. Introduction

Egg yolk is an excellent source of nutrients. Its pronounced functional properties including foaming, gelation, and emulsification, make it become an important ingredient for a variety of food products such as cakes, ice cream, baking products, mayonnaise, and salad. Egg yolk generally contains 48 % water, 34 % fat, 16 % protein, and other bioactive components. Most egg yolk proteins are bound to lipids to form lipoproteins and some globular proteins. (Kiosseoglou, 2003; Mine et al., 2013; Strixner et al., 2011). Pasteurization of liquid egg yolk is a common practice to reduce unwanted microorganisms and to eliminate pathogenic microorganisms as to ensure product safety and quality (Shahbandeh, 2023), and to extend product shelf-life. Egg yolk pasteurization is usually conducted at 61.1 °C for 3.5 min or at 60 °C for 6.2 min (USDA, 1969). However, egg yolk is sensitive to heat treatment. Some egg yolk proteins may be denatured during pasteurization causing deposits on the heating surfaces, commonly known as fouling (Gut et al., 2005; Le Denmat et al., 1999). Fouling on heat transfer surfaces is one of the major concerns in thermal processing. It could cause a decrease in heat transfer efficiency and the target process temperature may not be reached. In the process of food manufacturing, the consequence of fouling could impose issues not only on product safety but also on quality (Awad, 2011; Bansal et al., 2006; Bott, 1995).

For over decades, fouling on the heating surfaces has been a topic of interest for many researchers. The studies were mostly conducted on whey protein and dairy milk with the primary focus on operational factors that affect fouling behavior such as product flow rate, product temperature, heat transfer surface

temperature, and processing time (Belmar-Beiny et al., 1993; Fryer et al., 1996; Gu et al., 2019; Phinney et al., 2017; Zhang et al., 2020). The studies on deposit formation of other biological fluids on heated surfaces have also reported in some literature, such as egg albumin (Ling et al., 1978), coconut milk (Narataruksa et al., 2010), and soymilk (Sritham et al., 2023; Wang et al., 2018). However, studies on egg yolk fouling are rarely found.

According to literature, fats have little effect on the fouling of milk (Visser et al., 1997) and coconut milk (Narataruksa et al., 2010), although their compositions and rheological behaviors are different. Previous research studies found that the changes of functional properties of liquid egg yolk during heat treatment mainly occurred from protein denaturation. Tsutsui (1988) reported that the viscosity of yolk sharply increased at the temperatures above 65 °C and yolk coagulated at around 70 °C. Le Denmat et al. (1999) investigated the protein denaturation of plasma and granules, the constituents of yolk, in a range of pasteurization temperatures (55–76 °C). They reported that plasma was more sensitive to heat treatment than granules and started to form strong cohesive gels at 75 °C. Protein solubility and apparent viscosity of plasma was not affected by heat treatment at the temperature below 69 °C, whereas those of granules were not modified up to 76 °C. The denaturation temperature of γ -livetins and α -livetins in plasma were 60 °C and 69 °C, respectively (Dixon et al, 1981). The findings indicate that egg yolk fouling is due to denaturation of proteins.

Heating process is generally done over the temperature range covering the denaturation temperature of egg yolk resulting in the change of egg yolk structure. This makes the egg yolk

Received: 20 December 2023, Accepted: 6 March 2024

¹ School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

* Corresponding author: navaphattra.nu@kmitl.ac.th

เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

deposits on heat transfer surfaces to be a complex soil which is difficult to remove. Thus, many researchers have tried to understand the cleaning mechanisms of egg yolk fouling (Helbig et al., 2015; Helbig et al., 2019; Pérez-Mohedano et al., 2015; Yang et al., 2018). Regarding food safety and the efficiency of thermal processing, a thorough understanding on the behavior of egg yolk fouling deposits would be indispensable to help justifying the cleaning procedure of food processing equipment. As protein denaturation, which lead to deposits on contact surfaces, is strongly dependent on the temperature (Blanpain-Avet et al., 2016; Pan et al., 2019; Wang et al., 2018), the fouling kinetics of liquid egg yolk becomes a subject of interest. Based on the knowledge of egg yolk fouling kinetics, the prediction of fouling thickness might help to develop a proper cleaning procedure. The objective of this study was to investigate the effects of temperature within the pasteurization zone (60–80 °C) on the behavior of egg yolk fouling formed on heat transfer surface.

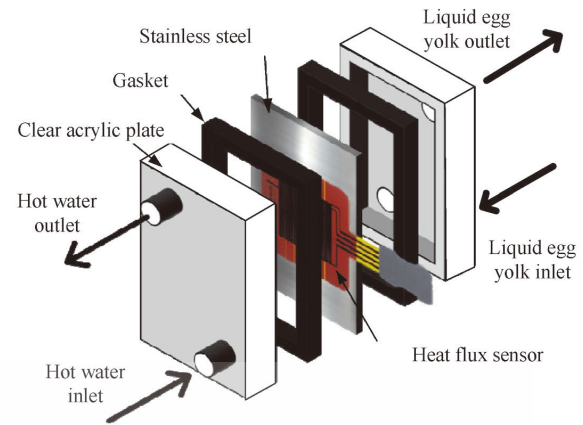
2. Materials and methods

2.1. Experimental setup

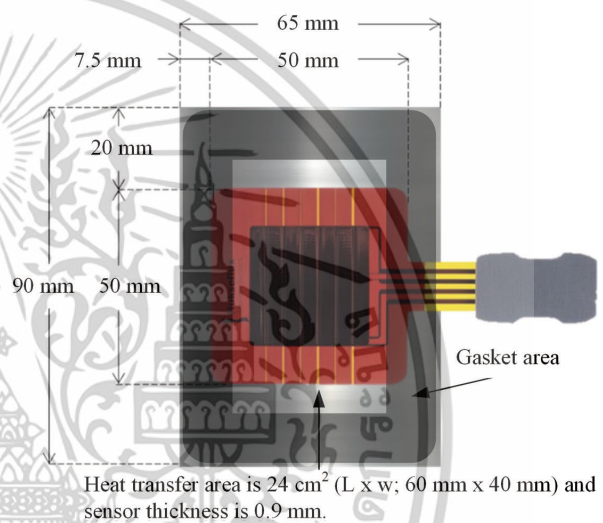
A laboratory-scale plate heat exchanger developed for egg yolk fouling study (Sritham et al., 2023) with some modifications was used in this study. The modification was made on the heat transfer section. A schematic view of the fouling test section is shown in Fig. 1. The fouling test section consists of a stainless-steel plate (2B SS 304, 0.4 average surface roughness, 65 mm × 90 mm, 1.0 mm thickness) placed between two clear acrylic plates (thickness of 10 mm) clamped together in a single block. Elastomeric gaskets seal the space between plates forming a series of parallel channels, where fluids flow. The channel gap is approximately 10 mm. A thin heat flux sensor containing T-type thermocouple (FHF02, Hukseflux Thermal Sensors B.V., The Netherlands) is mounted on the stainless-steel flat plate to measure the heat flux and temperature. The heat transfer area is 24 cm² (L × W; 60 mm × 40 mm). The fouling apparatus was configured for the parallel flow of two fluids with one channel for the heating medium (hot) and liquid egg yolk (cold) sides and measured their temperatures with K-type thermocouples. A data logger (34972 A, Agilent Technologies, Inc., USA) interface with a computer is used for data acquisition of temperatures and heat transfer through the flat plate to monitor the fouling of egg yolk deposits.

2.2. Fouling experiments

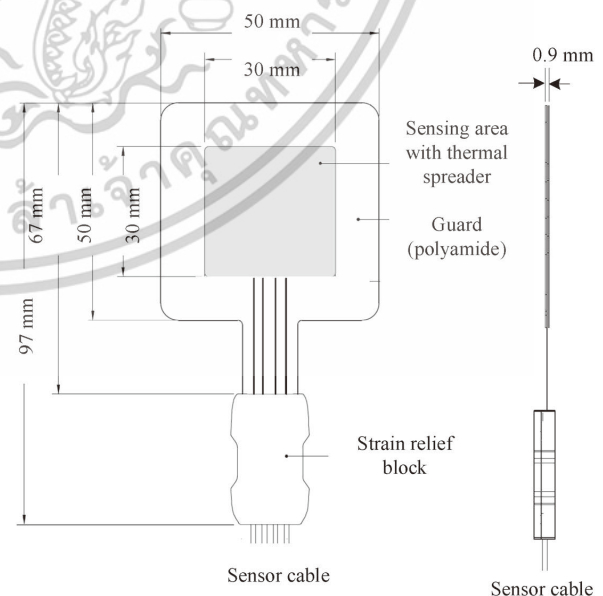
Pasteurized liquid egg yolk containing 12% protein (OVO Foodtech Co., Ltd., Thailand) was purchased from a supermarket and kept at 4 ± 1 °C and performed the test within 24 h. Before each fouling test, liquid egg yolk was preheated from 4 °C to 40 °C, at which no denaturation and aggregation of deposits occurred (Ling et al., 1978), in a beaker placed in a water bath with temperature controller (~50 °C). Then, liquid egg yolk was



(a) Liquid egg yolk and heating medium flow directions



(b) Dimension of heat transfer area



(c) Dimension of heat flux sensor

Fig. 1 Schematic view of a plate heat exchanger with heat flux sensor mounted on the heat transfer surface

และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

circulated through the heat transfer area using a peristaltic pump with the constant flow rate of $4.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ throughout the test, which provided a laminar flow condition. At the outlet of the fouling section, liquid egg yolk was recirculated back to a preheated beaker and then to the fouling test section again. The heat transfer surface was heated by circulating heating medium (hot water) at a constant flow rate of $48.3 \text{ cm}^3/\text{s}$ until reach to the studied temperatures. Five temperatures of heat transfer surface at 60, 65, 70, 75, and 80°C were tested. During the experiment, egg yolk deposits were formed on the heated sample plate. The output of heat flux sensor and thermocouples was recorded every 10 s and converted to heat flux value. Each fouling experiment was performed for a heating period of 90 min.

2.3. Heat transfer analysis

The heat transfer through the fouled plate (Q'') was measured by the heat flux sensor. The voltage output (V_{output}) obtained from heat flux sensor was converted to heat flux value using the manufacturer's specification (FHF02, Hukseflux Thermal Sensors B. V.), that is sensor sensitivity ($S = 5.95 \times 10^{-6} \text{ V W}^{-1} \text{ m}^2$):

$$Q'' = \frac{V_{\text{output}}}{S} \quad (1)$$

The temperatures of liquid egg yolk (T_c) and hot water (T_h) were recorded as a function of time and used to calculate the overall heat transfer coefficient at any time (U_t) during fouling experiment by the Eq. (2).

$$U_t = \frac{Q_t''}{(T_h - T_c)} \quad (2)$$

The growth of egg yolk deposits could be determined from the changes in thermal resistance of fouling or fouling factor (R_f) over heating time, which were calculated by the overall heat transfer coefficient at any time by the following expression.

$$R_f = \frac{1}{U_t} - \frac{1}{U_0} \quad (3)$$

Where U_t and U_0 are the overall heat transfer coefficient after fouling at time t and at initial stage or clean surface, respectively.

2.3. Fouling kinetics analysis

The influence of heat transfer surface temperature on the rate of egg yolk deposits formation during heat treatment was studied. The kinetics, considered as non-elementary reactions or overall reactions, were analyzed from in-line deposits by monitoring the changes in thermal resistance values during the fouling experiment. The zero- and first-order reactions models, expressed as linear and exponential relationships, were used to calculate the reaction rate of egg yolk fouling as given in Eqs. (4) and (5).

$$R_f(t) = k_0 t + R_{f0} \quad (4)$$

$$\ln[R_f(t)] = k_1 t + \ln(R_{f0}) \quad (5)$$

Where $R_f(t)$ is the thermal resistance after fouling at time t , R_{f0} is the thermal resistance at initial stage ($t=0$ s), and k_0 and k_1 are the reaction rate constants for zero- and first-order kinetics, respectively. Equations (4) and (5) were applied to experimental data. The better fitting model, compared from the coefficients of determination (R^2), will be used to describe the reaction rate of egg yolk fouling at different surface temperatures.

The relationship between $\ln(k_0)$ or $\ln(k_1)$ and the reciprocal of surface temperature ($1/T$) in Kelvin can be expressed in Eq. (6), known as the "Arrhenius equation".

$$k = Z \times \exp\left(\frac{-E_a}{R \times T}\right) \quad (6)$$

Where Z is the frequency factor, E_a is the activation energy representing the sensitivity of the reaction rate of changes in temperature, and where R is the universal gas constant ($R = 8.314 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kmol}^{-1}$). An Arrhenius equation has been used to describe the changes in reaction rate of thermal protein denaturation of egg white and yolk (Abbasnezhad et al., 2015; Shibata-Ishiwatari et al., 2018), egg albumin fouling (Ling et al., 1978), milk fouling (Fryer et al., 1994; Schreier et al., 1994), whey protein fouling (Blanpain-Avet et al., 2016), and high protein beverage fouling (Phinney et al., 2017).

2.5. Statistical analysis

The experiments were conducted using a completely randomized design. Treatments were made in triplicate. Data analyses including the analysis of variance (ANOVA), Tukey's HSD test, and linear and multiple non-linear regressions were performed with a statistical package (SPSS Statistics V.28, IBM corp., USA). All analyses were made at a significance level of 0.05.

3. Results and discussion

3.1. Fouling behavior of egg yolk

Deposit formation experiments were carried out to investigate egg yolk foulants formed on stainless-steel surface during heat treatment. The appearance of egg yolk foulants was a translucent yellow-orange gel that adheres tightly to the test plate. Although the main composition of egg yolk contains lipids and proteins, the fouling mechanism mainly occurred by chemical reaction of protein substances. Lipids do not play a significant role (Zhang et al., 2019). Similar results were also observed from other foods highly containing lipids and proteins such as coconut milk fouling (Narataruksa et al., 2010), cow milk fouling, and camel milk fouling (Zhang et al., 2020).

During the experiment, the heat flux output and the temperatures of hot water and liquid egg yolk were measured and calculated as fouling resistance or fouling factor, R_f . The process of fouling could be described from the changes in the fouling resistance with reference to time, which is known as a

fouling curve (Awad, 2011). The fouling curves of egg yolk at different surface temperatures are presented in Fig. 2. In this study, the curves show asymptotic patterns with two periods, which are the fouling period and the post-fouling period. The “induction or initial period” seems to disappear from the fouling curves. It could be described that egg yolk deposits immediately formed on the heated surface after the experiment started. The heat through the foul plate was recorded and calculated to fouling resistance values, although they were very low. The fouling behavior of egg yolk had a similar pattern to the findings of several protein rich foods such as egg ovalbumin fouling in double tube heat exchanger (Li et al., 2013), milk and whey protein fouling on the spinning disc (Zhang et al., 2019; 2020), and coconut milk fouling in plate heat exchanger (Law et al., 2009; Narataruksa et al., 2010). Awad (2011) pointed out that the induction period depends on several factors such as surface roughness, surface temperature, and type of fouling solution, which makes it difficult to predict. It has been reported that the induction period of food fouling was not always observable. Apparently, the presence of induction period also closely correlates with the preparation and treatment for the heating surface of the food processing equipment (Law et al., 2009; Narataruksa et al., 2010).

At the initial stage of egg yolk fouling, the R_f increased rapidly with time in a non-linear trend over a certain time, which depends on the surface temperature. This period of fouling curve is known as “fouling period”. The time that fouling rate started to decrease, was the transition point from “fouling period” to “post-fouling period”. In the post-fouling period, the R_f slightly increased which indicated that the deposition rate and the removal rate approaching the equilibrium state (Awad, 2011; Bott, 1995). From the heat transfer point of view, the test plate, covered with the deposit layer, which performed as thermal insulation, caused the deposit surface temperature to decrease and leading to reduce the thermal driving forces. Thus, the lower or constant R_f values are obtained. The R_f at the transition point is called “asymptotic fouling factor”, R_f^* at equilibrium time, t^* .

3.2. Effect of surface temperature

In general, the fouling curves of egg yolk showed similar patterns (Fig. 2). It has been widely reported in literature that fouling curves of most food materials were of asymptotic patterns (Law et al., 2009; Li et al., 2013; Narataruksa et al., 2010; Zhang et al., 2019; 2020). In this study, complete asymptotic fouling patterns were observed at almost all surface temperatures except at 80 °C where the last part of the pattern was not observable, probably due to the limitation of time in this experiment. The higher the temperature, the longer the time a fouling process takes to show a complete asymptotic pattern (Law et al., 2009; Li et al., 2013; Narataruksa et al., 2010; Zhang et al., 2019; 2020). It was also found that the

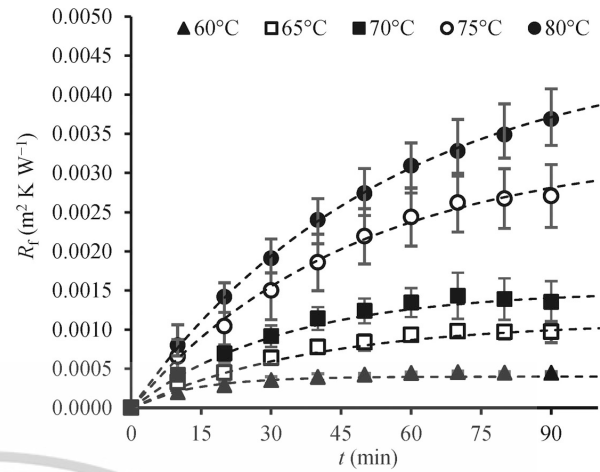


Fig. 2 Fouling curves of egg yolk as a function of heating time at different surface temperatures

Table 1 Fouling characteristics of liquid egg yolk at different surface temperatures

Temperature (°C)	R_f^* ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$)	t^* (min)
60	0.0004±0.0000 ^a	31.45±7.11 ^a
65	0.0011±0.0002 ^{ab}	51.70±15.00 ^b
70	0.0015±0.0004 ^b	61.29±11.02 ^c
75	0.0033±0.0013 ^c	74.87±10.95 ^d
80	0.0046±0.0005 ^d	86.74±11.19 ^e

All the values represent the means of three replicates ($n=3$). Values with different letters in the same column were significantly different ($p<0.05$).

fouling period tended to shorten with the increasing surface temperature.

The model of Kern and Seaton (1959) in Eq. (7), developed from a multiple non-linear regression analysis, was fitted to the R_f and t data (dashed lines in Fig. 2) with a high coefficient of determination ($R^2>0.98$). The R_f^* and t^* values of the fouling curve were characterized to investigate the fouling behavior of liquid egg yolk at different surface temperatures as summarized in Table 1.

$$R_f = R_f^* \times \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{0.63t^*} t\right) \right] \quad (7)$$

The influence of the surface temperature on the fouling behavior of egg yolk was obvious as can be seen in Table 1. Within the surface temperature range of 60–70 °C, R_f^* values were not significant different with an average value of 0.001. The R_f^* values increased significantly when the surface temperatures were higher than this range ($p < 0.05$). By increasing the surface temperatures from 70 °C to 75 °C and from 75 °C to 80 °C, the R_f^* values increased by 120 % and 39.4 %, respectively, indicating that the egg yolk deposits were susceptible to higher temperature. These results are in agreement with Ling et

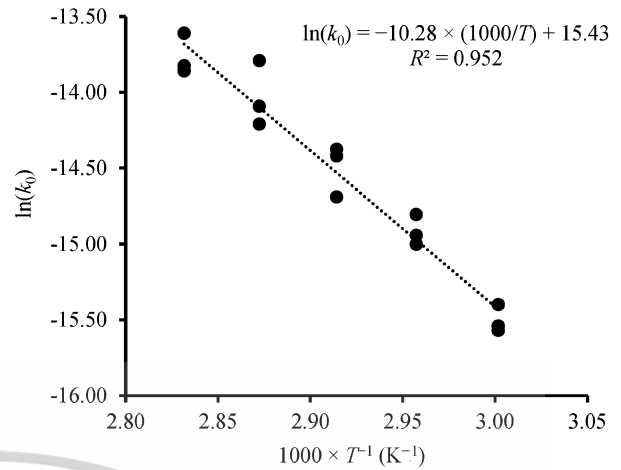
al. (1978) who studied the fouling of egg white proteins and Zhang et al. (2020) who studied the fouling of camel milk proteins. However, these results are in contrast with a study by Narataruksa. et al. (2010), who studied the fouling of coconut milk and found that the R_f of coconut milk decreased with increasing the surface temperature. This may be due to that egg yolk has a higher thermal stability than coconut milk. Concurrently, the transition or equilibrium time, t^* , increased obviously among surface temperatures from 60 °C to 80 °C.

3.3. Kinetics of egg yolk fouling

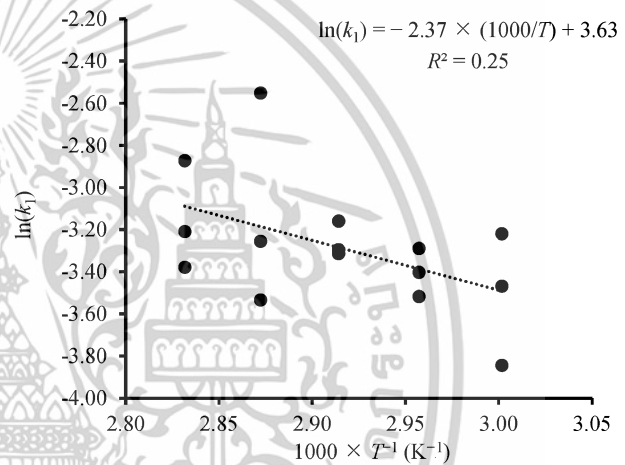
In this study, the kinetics of egg yolk fouling was analyzed from the fouling period where the accumulation of egg yolk deposits progressively increases. The R_f data up to $0.8R_f^*$ were considered. The reaction models, Eqs. (4) and (5), were used to construct linear plots of $R_f(t)$ and $\ln[R_f(t)]$ against time. The R^2 values were found to be in a range of 0.94–0.99 and 0.91–0.96 for zero- and first-order reaction models, respectively. The reaction rate constants for zero-order (k_0) and for first order (k_1) models were inferred from the gradient of the plots in Fig. 3 (a) and Fig. 3 (b), respectively. The Arrhenius activation energy (E_a) was determined by plotting $\ln k_0$ or $\ln k_1$ against the reciprocal of surface temperature ($1/T$). Fig. 3 (a) shows a clear linear relationship with $R^2 > 0.95$ while there was no trend for the plot in Fig. 3 (b). Therefore, a zero-order reaction was chosen to describe the behavior of egg yolk fouling. Our findings are in agreement with that from previous studies (Ling et al, 1978) in which a zero-order model was used to explain the formation of deposits from egg albumin proteins on heat exchange surfaces. As a result, Eq. (6), the egg yolk fouling activation energy, which is the amount of energy used in the fouling reaction, was 85.47 kJ/mol and the frequency factor, which is the coefficient of the kinetic equation, was 5.02×10^6 . It was found that the activation energy of egg yolk fouling in this experiment was approximately 4 times less than that of egg yolk proteins denatured by thermal process, which was 340.5 kJ/mol (Shibata-ishiwatari et al., 2018). Similar findings were reported by Ling et al (1978) where the activation energy of egg albumin fouling was approximately 4 times less than that of the thermal denaturation of egg albumin proteins. As a result, it could be interpreted that the fouling of egg proteins was not controlled by the denaturation reaction, instead it is mainly controlled by the deposition of denatured proteins on the hot surface. The same phenomenon was also found in whey protein fouling (Fryer et al., 1994).

4. Conclusions

The fouling curves of egg yolk at different surface temperatures in a pasteurization region (60–80 °C) were of asymptotic pattern without induction period. The fouling resistance sharply increased with time in a non-linear trend over a certain period until reaching the equilibrium stage. It was found that the



(a) A zero-order reaction model



(b) A first-order reaction model

Fig. 3 Arrhenius plot for calculation of activation energy of egg yolk fouling

asymptotic fouling factor, R_f^* , was not significantly different over the surface temperature range of 60–70 °C. This value increased significantly when the surface temperatures were higher (75 °C and 80 °C). The equilibrium time, t^* , increased significantly at every increment of surface temperature in this experiment. The thermal resistance obtained from the fouling period was well fitted with the zero-order reaction model. The value of the Arrhenius activation energy of egg yolk fouling (85.47 kJ/mol) indicated that the fouling was mainly controlled by the deposition of denatured proteins.

Acknowledgments

This work was financially supported by the School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Research Fund under contract number 2567-02-01-023.

Declaration of Conflicting Interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Abbasnezhad, B. et al. 2015. Modeling of rheological characteristics of liquid egg white and yolk at different pasteurization temperatures. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 9: 359–368. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9243-6>
- Awad, M. M. 2011. Fouling of heat transfer surfaces. *Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems*, ed. A. Belmiloudi. 505–542. UK: IntechOpen Limited. <https://doi.org/10.5772/13696>
- Belmar-Beiny, M. T. et al. 1993. The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. *Journal of Food Engineering*. 19 (2): 119–139. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(93\)90038-L](https://doi.org/10.1016/0260-8774(93)90038-L)
- Blanpain-Avet, P. et al. 2016. Predicting the distribution of whey protein fouling in a plate heat exchanger using the kinetic parameters of the thermal denaturation reaction of β -lactoglobulin and the bulk temperature profiles. *Journal of dairy science*. 99 (12): 9611–9630. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-10957>
- Bott, T. R. 1995. *Fouling of Heat Exchangers*. The Netherlands: Elsevier Science B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-82186-7.X5000-3>
- Bansal, B. et al. 2006. A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 5 (2): 27–33. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00080.x>
- Dixon, D. K. et al. 1981. Electrophoretic and chromatographic changes in egg yolk proteins due to heat. *Journal of Food Science*. 46 (4): 981–983. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb02971.x>
- Fryer, P. J. et al. 1994. Fouling and cleaning: Mechanisms and models. *Proceedings of the 6th International Congress on Engineering and Food*. 24–29. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2674-2>
- Fryer, P. J. et al. 1996. A statistical model for fouling of a plate heat exchanger by whey protein solution at UHT conditions. *Food and Bioproducts Processing*. 74 (4): 189–199. <https://doi.org/10.1205/096030896531181>
- Gu, Y. et al. 2019. A mathematical model for the prediction of the whey protein fouling mass in a pilot scale plate heat exchanger. *Food Control*. 106: 106729. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106729>
- Gut, J. A. W. et al. 2005. Continuous pasteurization of egg yolk: thermophysical properties and process simulation. *Journal of Food Process Engineering*. 28 (2): 181–203. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2005.00416.x>
- Helbig, M. et al. 2019. Laboratory methods to predict the cleaning behavior of egg yolk layers in a flow channel. *Food and Bioproducts Processing*. 113: 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.11.005>
- Helbig, M. et al. 2015. Description of the cleaning mechanism of a model food soil using an optical detection method and the FDG technique. *Proceedings of the 11th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. 256–263.
- Kern, D. Q. et al. 1959. A theoretical analysis of thermal surface fouling. *British Chemical Engineering*. 4 (5): 258–262.
- Kiosseoglou, V. 2003. Egg yolk protein gels and emulsions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 8 (4–5): 365–370. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(03\)00094-3](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(03)00094-3)
- Law, H. Y. et al. 2009. Preliminary work on coconut milk fouling deposits study. *International Journal of Engineering & Technology (IJET)*. 9 (10): 8–13.
- Le Denmat, M. et al. 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15863.x>
- Li, L. et al. 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. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.01.056>
- Ling, A. C. et al. 1978. Fouling of heat transfer surfaces by solutions of egg albumin. *Journal of Food Protection*. 41 (3): 187–194. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-41.3.187>
- Narataruksa, P. et al. 2010. Fouling behavior of coconut milk at pasteurization temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 30 (11–12): 1387–1395. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.02.028>
- Mine, Y. et al. 2013. Chapter 5 - Egg components in food systems. *Biochemistry of Foods*, ed. N.A.M. Eskin et al. 215–241. USA: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091809-9.00005-4>
- Phinney, D. M. et al. 2017. Modeling high protein liquid beverage fouling during pilot scale ultra-high temperature (UHT) processing. *Food and Bioproducts Processing*. 106: 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.08.007>
- Pan, F. et al. 2019. Numerical simulation of milk fouling: Taking fouling layer domain and localized surface reaction kinetics into account. *Chemical Engineering Science*. 197: 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.021>
- Pérez-Mohedano, R. et al. 2015. Development of a swelling-removal model for the scanning fluid dynamic gauge. *Food and Bioproducts Processing*. 93: 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.10.001>
- Schreier, P. J. R. et al. 1994. A kinetic model for fouling in milk processing. *Developments in Food Engineering*, ed. T. Yano et al. 805–807. USA: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2674-2_262
- Shahbandeh, M. 2023. Global egg production from 1990 to 2021. USA: Statista Inc. <https://www.statista.com/statistics/263972/egg-production-worldwide-since-1990/>
- Shibata-Ishiwatari, N. et al. 2018. Kinetic studies on the effect of salt on the thermal denaturation of egg constituents. *Japan Journal of Food Engineering*. 19 (1): 49–56. <https://doi.org/10.11301/jsfe.17501>
- Sritham, E. et al. 2023. Development of mathematical model to predict soymilk fouling deposit mass on heat transfer surfaces using dimensional analysis. *Computation*. 11 (4): 83. <https://doi.org/10.3390/computation11040083>
- Strixner, T. et al. 2011. 7 - Egg proteins. *Handbook of food proteins*, ed. G. O. Phillips et al. 150–209. UK: Woodhead Publishing Limited <https://doi.org/10.1533/9780857093639.150>
- Tsutsui, T. 1988. Functional properties of heat-treated egg yolk low density lipoprotein. *Journal of Food Science*. 53 (4): 1103–1106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb13539.x>
- USDA (United States Department of Agriculture), 1969. *Egg pasteurization manual*. USA: USDA. <https://www.ams.usda.gov/media/1000000/1969-egg-pasteurization-manual.pdf>
- Visser, J. et al. 1997. *Fouling of heat exchangers in the dairy industry*. USA: Butterworth-Heinemann.

- Experimental Thermal and Fluid Science. 14 (4): 407–424.
[https://doi.org/10.1016/s0894-1777\(96\)00142-2](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(96)00142-2)
- Wang, J. et al. 2018. Comparative study on fouling and cleaning characteristics of soy protein isolate (SPI). *International Journal of Food Engineering*. 14 (4): 20170381.
<https://doi.org/10.1515/ijfe-2017-0381>
- Yang, J. et al. 2018. Investigation of the cleaning of egg yolk deposits from tank surfaces using continuous and pulsed flows. *Food and Bioproducts Processing*. 113: 154–167.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.10.007>
- Zhang, B. Y. et al. 2019. Effect of sugar on the fouling behavior of whey protein. *Food and Bioproducts Processing*. 113: 2–9.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.10.002>
- Zhang, B. Y. et al. 2020. Fouling characterization of camel milk with comparison to bovine milk. *Journal of Food Engineering*. 285: 110085.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110085>
- (URLs on references were accessed on 10 May 2024.)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายวรปัญญา สุธานภาพุฒิ
ประวัติการศึกษา 2533 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
2541 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาบริหารธุรกิจ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
ประสบการณ์และผลงานวิจัย - บทความวิจัยเรื่อง “Effects of heat transfer surface temperature on liquid egg yolk fouling” ในวารสาร Engineering in Agriculture, Environment and Food 2024, 17 (2), 59-65.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้