

ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสุก
บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

EFFECT OF FALLING LIQUID FILM CHARACTERISTIC ON CLEANING
OF STARCH PASTE ON STAINLESS STEEL SURFACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูง
บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

EFFECT OF FALLING LIQUID FILM CHARACTERISTIC ON CLEANING
OF STARCH PASTE ON STAINLESS STEEL SURFACE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF FALLING LIQUID FILM CHARACTERISTIC ON CLEANING
OF STARCH PASTE ON STAINLESS STEEL SURFACE



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูกบนพื้นผิวเหล็กกล้า
ไร้สนิม

EFFECT OF FALLING LIQUID FILM CHARACTERISTIC ON CLEANING OF STARCH
PASTE ON STAINLESS STEEL SURFACE

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|---------------------|-------------|--------------|----------|
| 1. นางสาวณัฐสุภรณ์ | ราชาเดช | รหัสประจำตัว | 57010471 |
| 2. นางสาวพิมพ์พันธ์ | ผาสุพรรณ | รหัสประจำตัว | 57010907 |
| 3. นายศักรินทร์ | แสงสุรินทร์ | รหัสประจำตัว | 57011236 |

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ. ดร. นวกัฑรา หนูนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูงบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม	
นักศึกษา	นางสาวณัฐสุภรณ์	ราชาเดช
	นางสาวพิมพ์พันธ์	ผาสุพรรณ
	นายศักรินทร์	แสงสุรินทร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.นวกัษรา หนูนา	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2560	

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูงบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ที่วางตัวในมุม 30, 60 และ 80 องศา กับแนวราบ ด้วยอัตราการไหลของสารทำความสะอาด 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล เป็นตัวแทนของสารทำความสะอาด และตรวจสอบการล้างคราบแป้งสูงซึ่งมีลักษณะใสออกจากแผ่นทดสอบโดยเทคนิคภาพย่านอินฟราเรด ปรับภาพในรูปแบบระดับสีเทาเพื่อวิเคราะห์พื้นที่ด้วยโปรแกรม NI Vision Builder สำหรับใช้ศึกษาลักษณะการหลุดของคราบจากการทดลองพบว่า การทำความสะอาดพื้นผิวที่เอียงทำมุม 80 องศา ทำได้ยากที่สุด โดยสามารถแบ่งลักษณะการหลุดออกของคราบแป้ง ออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงการบวมตัวของคราบ ใช้อัตราการไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบ หรือที่อัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถเกิดฟิล์มของเหลวสัมผัสกับพื้นผิวหน้าทั้งหมดของคราบ ช่วงต่อไปคือ ช่วงการหลุดออกอย่างรวดเร็วและช่วงการหลุดอย่างช้า ควควบคุมให้ฟิล์มของไหลมีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่

Project Title Effect of falling liquid film characteristic on cleaning of starch paste on stainless steel surface

Students Ms.Natsuporn Rachadech
Ms.Pimonpan Phasupan
Mr.Sakkarin Saengsurin

Project Advisor Assoc. Prof. Dr.Navaphattra Nunak

Degree Bachelor of Engineering

Program Food Engineering

Academic Year 2017

ABSTRACT

This project presents the effect of falling liquid film characteristic on cleaning of starch paste from stainless steel surfaces that inclined at 30° , 60° and 80° horizontally on the different flow rate of 100, 200 and 300 liters per hour with 0.5%w/w of sodium hydroxide. Infrared thermography technique was used to determine the soil removal during cleaning process. The NI Vision Builder was used to convert an infrared color image to a grayscale image for evaluating the cleaning profile studies. From the experiment, it was found that the surface inclined at 80° was the most difficult condition for soil removal from the surface. Considering the cleaning profile, it could be divided into three stages, namely the swelling stage which falling liquid film flow should be controlled at laminar or at lower flow letting liquid film contact to the soil. The next stage was a rapid stage and a gradual stage which the liquid film should be controlled at extreme turbulent flow.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ได้รับความช่วยเหลือจาก รศ. ดร.นวกัทธา หนูนาค อาจารย์ที่ปรึกษา ปริญญาานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการช่วย แก้ปัญหา รวมถึงอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน จนกระทั่งโครงการวิจัยสามารถ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภายในภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน ที่ได้ให้ความสะดวก ในการยืมอุปกรณ์และห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านผู้ประสาทวิชา ความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณนางสาวเมธินี สงไทย ที่ให้คำปรึกษาการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนการวิเคราะห์ ภาพถ่ายด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ชุดทดลองการไหลเพื่อทำความ สะอาดคราบแป้งสูกบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

ขอขอบคุณ บริษัท อุตสาหกรรมแป้งไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ สตาร์ชมันสำปะหลังเพื่อใช้ในโครงการงานชิ้นนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวิพล ซื่อสัตย์ และ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่เอื้อเพื่อ สถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการวิจัยจนกระทั่งสามารถทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้ เสร็จสมบูรณ์

ขอบคุณเพื่อน ๆ ที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นแรงผลักดัน แรงสนับสนุนในการเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจ ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	3
2.1 คราบแป้งสุก	3
2.1.1 การสะสมของคราบแป้งสุก	3
2.1.2 ลักษณะการหลุดออกของคราบ	5
2.2 ปัจจัยด้านลักษณะการไหลที่ส่งผลต่อการทำความสะอาดแบบชะล้างด้วยฟิล์มของเหลว	5
2.3 จลนศาสตร์การทำความสะอาด	5
2.4 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด	6
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.5.1 การศึกษาลักษณะการทำความสะอาดตะกรันของแข็ง	7
2.5.2 การศึกษาพฤติกรรมทำความสะอาดด้วยฟิล์มของเหลว	8
2.5.3 การศึกษาจลนศาสตร์การทำความสะอาด	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง	10
3.1 วัสดุทดลองและอุปกรณ์	10
3.1.1 ตัวอย่างพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม	10
3.1.2 ชุดอุปกรณ์ทดลอง	10
3.2 การเตรียมตัวอย่างแผ่นทดสอบ	12
3.3 ชุดทดลอง	14
3.4 วิธีการทดลอง	16
3.5 การประเมินการทำความสะอาด	18
3.5.1 ค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด	19
3.5.2 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด	19
3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	19
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	20
4.1 การวิเคราะห์พื้นที่คราบแป้งสุก	20
4.1.1 การปรับภาพถ่ายย่านอินฟราเรดด้วยโปรแกรม Smart View 4.1	20
4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่คราบแป้งสุกด้วยโปรแกรม NI Vision Builder	26
4.2 ลักษณะการทำความสะอาดคราบแป้งสุก	27
4.3 การประเมินการทำความสะอาด	30
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผลการวิจัย	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	35
บรรณานุกรม	36
ภาคผนวก	38

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการเตรียมตัวอย่างน้ำแข็งสุก	11
3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับปาดน้ำแข็งสุกบนพื้นผิวตัวอย่าง และเตรียมคราบแข็งสุก	12
3.3 ส่วนประกอบของชุดทดลองสำหรับทำความสะอาดคราบแข็งสุก บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม	14
4.1 ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อเวลาการทำความสะอาดคราบร้อยละ 95 ของพื้นที่คราบทั้งหมด	29
4.2 ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดช่วงที่ 1	31
4.3 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดและค่าคงที่อัตราการทำมาสะอาดช่วงที่ 2	32
4.4 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดช่วงที่ 3	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเกิดคราบแป้งสุกบนพื้นผิวอุปกรณ์	3
2.2 กราฟการทำความสะอาด แบ่งประเภทปัญหาการทำความสะอาดตามลักษณะของ ตะกอน และสารทำความสะอาด	4
3.1 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316	10
3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการเตรียมตัวอย่างน้ำแป้งสุก	10
3.3 ชุดอุปกรณ์สำหรับการปาดน้ำแป้งสุก	11
3.4 ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมคราบแป้งสุก	11
3.5 พื้นที่คราบแป้งสุกบนแผ่นทดสอบ	13
3.6 ชุดทดลองสำหรับการทำความสะอาดคราบแป้งสุกบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม	14
3.7 ลักษณะรางรองรับการไหลของสารทำความสะอาด	15
3.8 การล้างคราบแป้งสุกบนพื้นผิวทดสอบ	16
3.9 ภาพถ่ายย่านอินฟราเรดของคราบแป้งสุกบนแผ่นทดสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน	17
3.10 การปรับภาพถ่ายย่านอินฟราเรดด้วยโปรแกรม Smart View 4.1	17
3.11 การวัดพื้นที่คราบแป้งสุกบนพื้นผิวทดสอบด้วยโปรแกรม NI Vision Builder	18
4.1 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการ ปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 30 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 100 ลิตรต่อชั่วโมง	21
4.2 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการ ปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 30 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 200 ลิตรต่อชั่วโมง	22
4.3 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการ ปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 30 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 300 ลิตรต่อชั่วโมง	22
4.4 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการ ปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 60 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 100 ลิตรต่อชั่วโมง	23
4.5 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการ ปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 60 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 200 ลิตรต่อชั่วโมง	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับสภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 60 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 300 ลิตรต่อชั่วโมง	24
4.7 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับสภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 80 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 100 ลิตรต่อชั่วโมง	24
4.8 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับสภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 80 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 200 ลิตรต่อชั่วโมง	25
4.9 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับสภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 80 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 300 ลิตรต่อชั่วโมง	25
4.10 การทดลองวัดค่าความเข้มสีของภาพบริเวณแผ่นทดสอบ	26
4.11 การกำหนดค่าความเข้มสีเพื่อแบ่งพื้นที่คราบแบ่งสุกกับพื้นที่ของแผ่นทดสอบ	26
4.12 ลักษณะการหลุดออกของคราบบนพื้นผิวทดสอบร้อยละ 95 ที่มุมและอัตราการไหลต่าง ๆ	28
4.13 ความสัมพันธ์ของ $\ln(A)$ กับเวลา ในการทำความสะอาดคราบบนแผ่นทดสอบวางตัวทำมุม 80 องศา กับแนวราบ ที่อัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา

กระบวนการผลิตและแปรรูปอาหารที่ปราศจากสิ่งปนเปื้อนและมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภคเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ผลิตต้องคำนึงถึง โดยเฉพาะการผลิตในระดับอุตสาหกรรม เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ต้องมั่นใจว่าสามารถทำความสะอาดพื้นผิวสัมผัสอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่เป็นแหล่งปนเปื้อนไปสู่อาหาร (Tamime et al., 2008) ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต (แป้ง หรือ สตาร์ช) เช่น การผลิตซอสมะเขือเทศ การให้ความร้อนในระหว่างกระบวนการเพื่อให้แป้งสุก (Gelatinization) ส่งผลให้อาหารมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวอุปกรณ์กลายเป็นตะกอนของแข็ง (Cohesive solids) ต้องทำความสะอาดด้วยสารทำความสะอาดที่มีสภาพเป็นด่าง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุปกรณ์จึงมีความสะอาดเพียงพอ (Fryer และ Asteriadou et al., 2009) โดยการสะสมของสารอินทรีย์ลักษณะนี้ นิยมใช้การทำความสะอาดแบบเปียกแบบไม่ถอดชิ้นส่วนอุปกรณ์ ซึ่งอุปกรณ์ในระบบเปิด เช่น ถัง นิยมติดตั้งหัวสเปรย์บอลสำหรับพ่นสารทำความสะอาดให้กระทบผนังด้านใน ทำให้เกิดเป็นฟิล์มของเหลว ไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งลักษณะฟิล์มของเหลวที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาดคราบบนพื้นผิวเป็นอย่างมาก โดย Fuchs et al. (2013 และ 2015) ได้ศึกษาลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีผลต่อพฤติกรรมทำความสะอาดของแซนแทนกัม พบว่า ค่าความเค้นเฉือนของผนังเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวที่เพิ่มขึ้น และได้เปรียบเทียบพฤติกรรมทำความสะอาดที่พื้นผิวมุม 30, 60 และ 90 องศา พบว่ามุมของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการทำความสะอาดเพิ่มขึ้น

การทำความสะอาดในอุตสาหกรรมมีข้อจำกัดด้านต้นทุนในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากระยะเวลาการทำความสะอาด ปริมาณสารทำความสะอาด และค่าไฟฟ้า (Khalid et al., 2016) กระบวนการทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของคราบ ลักษณะของพื้นผิวสัมผัสอาหาร และชนิดของสารทำความสะอาด โดยการตรวจสอบการสะสมของสารอินทรีย์บนพื้นผิว เป็นขั้นตอนที่สำคัญ ซึ่งอาจใช้การสังเกตด้วยสายตาหรือการใช้กล้องย่านการมองเห็น (Visible region) หรืออาจใช้เทคนิคการเรืองแสงผสมไปในคราบ (Fuchs et al., 2013) ซึ่งมีราคาสูง หรืออาจใช้กล้องย่านอินฟราเรด (Infrared region) ซึ่งสามารถตรวจสอบการสะสมของสารอินทรีย์บนพื้นผิวได้โดยอาศัยความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Ndukaife et al., 2015) และสามารถตรวจสอบคราบที่มีลักษณะใสได้

การประเมินการทำความสะอาดด้วยตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด (Cleaning performance indicator) ด้านเวลา และปริมาณสารทำความสะอาด เป็นแนวทางการประเมินที่พบได้บ่อยที่สุดในอุตสาหกรรม (Köhler et al., 2015) เพื่อพิจารณาต้นทุนการทำความสะอาดแต่ละไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน และสามารถคิดเป็นต้นทุนการทำความสะอาดรวมได้ หากแต่ไม่สามารถทำนายการทำความสะอาด
สะอาดได้ ต้องพิจารณาตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดร่วมกับจลนศาสตร์การทำความสะอาด
เพื่อทำนายการทำความสะอาดโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ในการอธิบายลักษณะการ
เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น และนำมาประเมินการทำความสะอาดด้วยค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด (k)
ในแต่ละช่วงการเปลี่ยนแปลงของตะกรัน ทำให้สามารถเลือกรูปแบบการทำความสะอาดได้อย่าง
เหมาะสม (Khalid et al., 2015 และ 2016)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสุก
บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่อัตราการไหลและการวางตัวของแผ่นตัวอย่างทดสอบในมุมต่าง ๆ โดย
พิจารณาตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดร่วมกับจลนศาสตร์การทำความสะอาด (Cleaning
kinetics) ด้วยค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) ศึกษาผลของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำความสะอาด และมุมต่าง ๆ ของพื้นผิว
เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีผลต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสุก
- 2) ออกแบบวิธีการทำความสะอาดที่เหมาะสม สำหรับการทำความสะอาดคราบแป้งสุกออก
จากพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) คราบแป้งมันสำปะหลังสุก
- 2) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ค่าความขรุขระเฉลี่ย 0.8 ไมโครเมตร โดยมีวิธีการเตรียม
พื้นผิว คือ การขัดเงาทางกล
- 3) อัตราการไหลของสารทำความสะอาด อยู่ในช่วงลักษณะการไหลฟิล์มของเหลวแบบ
เปลี่ยนแปลง (Transient) และแบบปั่นป่วน (Turbulent)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้องค์ความรู้ และหลักฐานที่แสดงถึงการทำความสะอาดคราบแป้งสุกบนพื้นผิวเหล็กกล้า
ไร้สนิมที่มีแตกต่างกันตามอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำความสะอาด และมุมเอียงของพื้นผิว
เหล็กกล้าไร้สนิม
- 2) ได้วิธีการทำความสะอาดที่เหมาะสม สำหรับการทำความสะอาดคราบแป้งสุกออกจาก
พื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

บทที่ 2

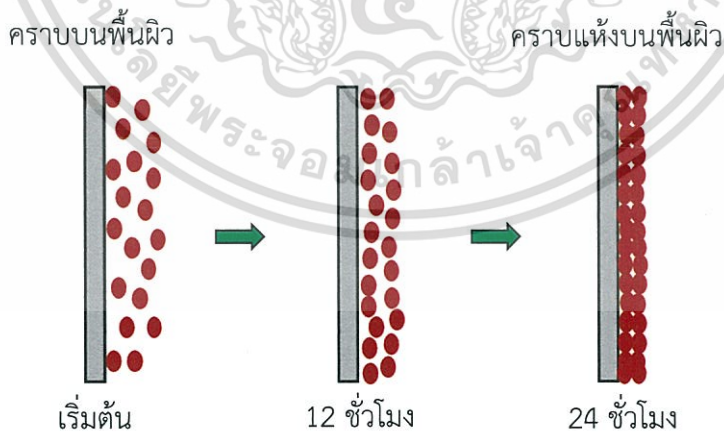
ตรวจเอกสาร

2.1 คราบแป้งสุก

คราบแป้งสุก (Dried starch paste) จัดเป็นสิ่งสกปรกจำพวกสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรต โดยในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารนิยมใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารจำพวกสารเพิ่มความข้นหนืด สารเพิ่มความคงตัว เช่น แป้ง หรือสตาร์ชมันสำปะหลัง ในการผลิต ซอสมะเขือเทศ เป็นต้น

2.1.1 การสะสมของคราบแป้งสุก

การเกาะติดของคราบแป้งสุก เกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งมีได้รับความร้อนจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การสุกของแป้ง (Gelatinization) ทำให้โมเลกุลภายในของเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อนทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชในเม็ดแป้ง สายพอลิเมอร์ของอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) ที่อัดแน่นอยู่ในเม็ดแป้งจะคลายตัว และรวมตัวกับน้ำที่ล้อมรอบ โดยอุณหภูมิที่เกิดการสุกของแป้ง (Gelatinization temperature) อยู่ในช่วง 60 - 70 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงนี้เม็ดแป้งยังคงมีสภาพอยู่ได้แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เม็ดแป้งมีลักษณะการพองตัวเพิ่มขึ้นและมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกิดลักษณะของน้ำแป้งข้นหนืด (Rujirapisit, 2006) ทำให้เกิดการเกาะติดกับพื้นผิวสัมผัสอาหาร และเกิดการทับถมของคราบแป้งสุกบนพื้นผิวมากขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป หรือพื้นผิวสัมผัสอาหารได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้คราบแป้งสุกเกาะติดกับพื้นผิวสัมผัสอาหารมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดคราบแป้งสุกบนพื้นผิวอุปกรณ์

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก Monk (2014)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกาะติดดังกล่าวเกิดขึ้นในลักษณะการเกิดการทับถม ความหนาของคราบ (X_f , m) สามารถคำนวณตาม Awad (2011) ดังสมการที่ 2.1

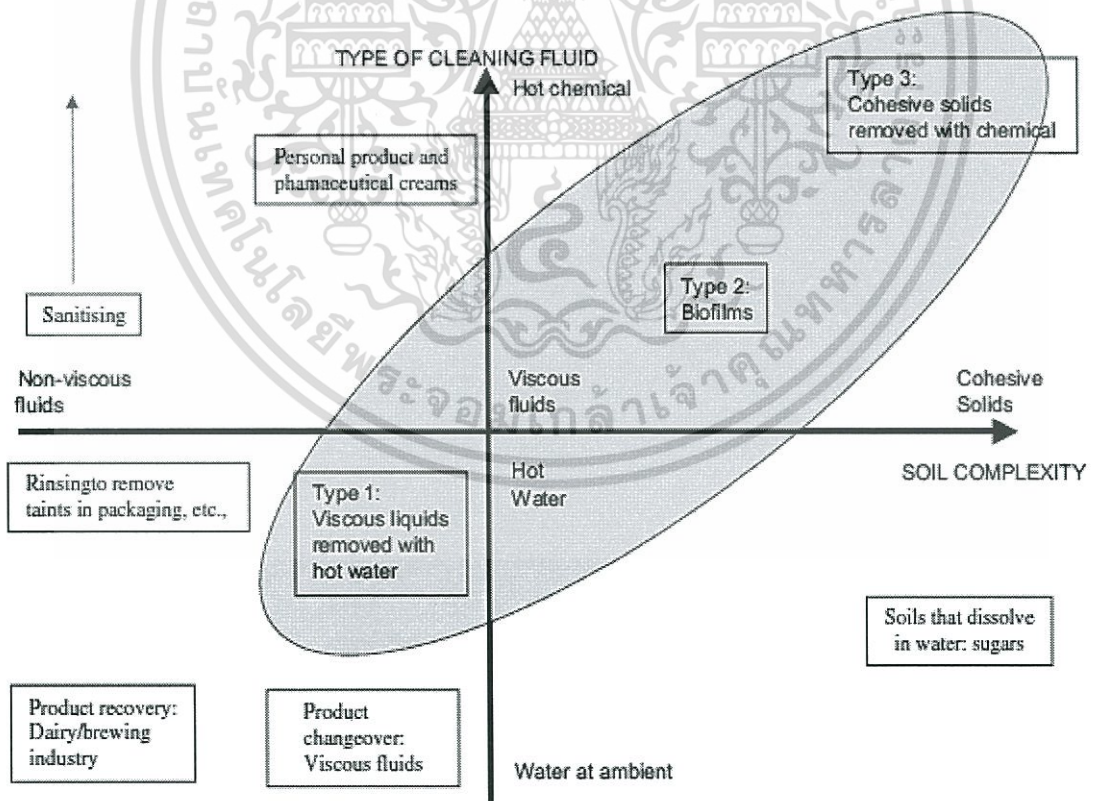
$$X_f = R_f \lambda_f \quad (2.1)$$

เมื่อ R_f คือ ความต้านทานที่เกิดจากคราบ ($m^2 \cdot K / W$)

λ_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$)

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการเกาะติดของคราบ ได้แก่ อัตราการไหลของคราบ อุณหภูมิของพื้นผิว ชนิดของวัสดุ และความขรุขระของพื้นผิว (Awad, 2011) เป็นต้น

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพการทำความสะอาด (Cleaning map) ของ Fryer และ Asteriadou (2009) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของคราบที่เกาะติดบนพื้นผิว (แกนนอน) และชนิดสารทำความสะอาด (แกนตั้ง) ในประเด็นของสารเคมี และอุณหภูมิ โดยบริเวณพื้นที่แรเงาแสดงปัญหาการทำความสะอาดที่พบในอุตสาหกรรมอาหาร แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะการเกาะติด และวิธีการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน ซึ่งคราบแบ่งสู่กจัดอยู่ในกลุ่มที่ 3 คือ ตะกรันของแข็ง (Cohesive solid) จำเป็นต้องทำความสะอาดด้วยสารเคมี จึงจะสามารถทำความสะอาดพื้นผิวสัมผัสอาหารได้อย่างเพียงพอ



รูปที่ 2.2 กราฟการทำความสะอาด แบ่งประเภทปัญหาการทำความสะอาด

ตามลักษณะของตะกรัน และสารทำความสะอาด

ที่มา: Fryer และ Asteriadou (2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะการหลุดออกของคราบ

ลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุก มี 2 แบบ ได้แก่ ความเสียหายของแรงเชื่อมแน่นภายในคราบ (Bulk cohesive failure) คือ ความเสียหายระหว่างโมเลกุลหรืออนุภาคของสารชนิดเดียวกัน และความเสียหายของแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิวของแผ่นทดสอบ (Surface adhesive failure) คือ ความเสียหายระหว่างโมเลกุลหรืออนุภาคต่างชนิดกัน แต่ความเสียหายของแรงยึดติดภายในคราบจะแสดงลักษณะการหลุดออกให้เห็นได้ชัดเจนกว่า ดังเช่น การหลุดออกของซอสมะเขือเทศอบแห้ง (Fryer et al., 2006) และลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุกเกิดขึ้น 3 กระบวนการประกอบด้วย การบวม การหลุดออกอย่างรวดเร็ว และการหลุดออกอย่างช้า (Patrick et al., 2014) มีความคล้ายคลึงกับกระบวนการหลุดออกของโปรตีนนม (Xin et al., 2003; Gillham et al., 1999)

2.2 ปัจจัยด้านลักษณะการไหลที่ส่งผลต่อการทำความสะอาดแบบชะล้างด้วยฟิล์มของเหลว

พิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม (Reynolds number, Re_f) (Fuchs, 2014) แสดงดังสมการที่ 2.2

$$Re_f = \frac{\dot{V}}{B \cdot v} \quad (2.2)$$

เมื่อ \dot{V} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของฟิล์มของเหลว (m^3/s)
 B คือ ความกว้างของฟิล์มของเหลว (m)
 v คือ ความหนืดจลน์ของฟิล์มของเหลว (m^2/s)

โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ตามลักษณะการไหล ได้แก่ การไหลแบบราบเรียบ และไม่มีคลื่นเกิดขึ้น (Smooth laminar, $Re_f < 4$) การไหลแบบราบเรียบที่มีคลื่นเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของฟิล์ม (Transient หรือ Laminar wavy, $4 < Re_f < 400$) และการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งจะเกิดคลื่นขึ้นทั้งภายในและผิวหน้าของฟิล์ม (Turbulent หรือ wavy, $Re_f > 400$)

2.3 จลนศาสตร์การทำความสะอาด

จลนศาสตร์การทำความสะอาด เป็นการเปลี่ยนแปลงของคราบเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากแรงที่กระทำจากการไหลของสารทำความสะอาด (Fluid mechanics) และปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) นับว่ามีความสำคัญต่อระบบการทำความสะอาดแบบ CIP เนื่องจากทำให้เข้าใจกลไกของการทำความสะอาด และสามารถจัดการกระบวนการทำความสะอาดรูปแบบต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Lelievre et al. (2002) ศึกษาการสร้างสมการทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณิตศาสตร์แบบปฏิบัติการอันดับหนึ่งเพื่อศึกษาการหลุดออกของจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับ Grant et al. (1996) และ Dickinson et al.,(1995) ที่ใช้สมการจลนศาสตร์การทำความสะอาดของคราบตะกรันของอาหาร

ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ในรูปแบบของสมการปฏิบัติการอันดับหนึ่ง ส่วนใหญ่จลนศาสตร์การทำความสะอาดศึกษาการเปลี่ยนแปลงในลักษณะมวลหรือพื้นที่ ดังสมการที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบที่เวลาใด ๆ ($A(t)$) (Khalid et al., 2015; 2016)

$$A(t) = A_0 e^{-kt} \quad (2.3)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่เริ่มต้นของคราบ (cm^2)

k คือ ค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด (min^{-1})

t คือ ช่วงเวลา (min)

ทั้งนี้ สามารถประเมินการทำความสะอาดด้วยค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด (k) ในแต่ละช่วงของกระบวนการเปลี่ยนแปลงของตะกรัน ทำให้สามารถเลือกรูปแบบการทำความสะอาดได้อย่างเหมาะสม

2.4 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด

ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด (Cleaning performance indicators) เป็นแนวทางการประเมินที่พบได้บ่อยที่สุดในอุตสาหกรรม เพื่อปรับปรุงการทำความสะอาดโดยคำนึงถึงสิ่งที่ใช้ไปในระบบทั้งหมด เช่น การลดต้นทุนรวม โดยเฉพาะเจาะจงไปที่ปัจจัยด้านต้นทุนของแต่ละองค์กร โดยเกณฑ์ทางอุตสาหกรรมที่พบบ่อย คือ เวลาในการทำความสะอาด และปริมาณของสารทำความสะอาดที่ใช้รวมถึงพลังงาน เช่น พลังงานไฟฟ้าสำหรับปั๊ม หรือเครื่องทำความร้อน ซึ่งสิ่งเหล่านี้สามารถระบุเป็นอัตราค่าใช้จ่ายของแต่ละส่วนและสามารถรวมกันได้ โดย Köhler et al. (2015) กล่าวว่า ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดที่นิยมใช้ประเมินการทำความสะอาดในอุตสาหกรรมแสดงดังสมการที่ 2.4

$$E_i = \frac{m}{i} \quad (2.4)$$

เมื่อ m คือ มวลของคราบที่ทำความสะอาดได้ (kg)

i คือ ปัจจัยสำคัญต่าง ๆ ซึ่งแตกต่างกันไปในแต่ละอุตสาหกรรม เช่น เวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด (min) หรือปริมาณสารทำความสะอาด (m^3) หรือพลังงานที่ใช้ในการทำความสะอาด (J) หรือต้นทุนการทำความสะอาด (บาท) หรืออื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1. การศึกษาลักษณะการทำความสะอาดตะกรันของแข็ง

Gillham et al. (1999) ศึกษากระบวนการทำความสะอาดเวย์โปรตีนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5% โดยน้ำหนัก ในช่วงอุณหภูมิ 20 ± 80 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลที่มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 500 ± 5000 โดยตรวจสอบการทำความสะอาดด้วยการลดลงของมวลและการเปลี่ยนแปลงความต้านทานความร้อนของคราบ พบว่า ลักษณะการหลุดออกของเวย์โปรตีนประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การบวมตัว การหลุดอย่างรวดเร็วสม่ำเสมอ และการหลุดออกอย่างช้า โดยผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลมีผลต่อการทำความสะอาดเวย์โปรตีนเฉพาะช่วงการหลุดอย่างรวดเร็วสม่ำเสมอ และการหลุดออกอย่างช้า

Gillham et al. (2000) ศึกษากระบวนการทำความสะอาดเวย์โปรตีนด้วยการไหลแบบพัลส์เพื่อเพิ่มอัตราการทำความสะอาด โดยจำลองการเกาะติดด้วยการหมุนวนของเวย์โปรตีนร้อยละ 3.5 โดยมวล ภายในระบบอย่างต่อเนื่อง และทำความสะอาดด้วยการใช้สารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล ด้วยการหมุนเวียนเช่นเดียวกัน และตรวจสอบเฉพาะจุดจากค่าความต้านทานความร้อนของตะกรัน ซึ่งความเร็วในการไหลเท่ากับ 0.1 - 0.3 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิห้องโดยพบว่า อัตราการไหลของลักษณะการไหลแบบพัลส์ไม่ส่งผลต่อช่วงการบวมของเวย์โปรตีน

Patrick et al. (2013) ศึกษาพฤติกรรมการหลุดออกของตะกรันของแข็งพรีเจลาตินไนซ์สตาร์ชบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิห้องด้วยเทคนิคการตรวจสอบตะกรันแบบใช้สารเรืองแสงเฉพาะจุด (Local Phosphorescence detection หรือ LPD) และแบบไดนามิกของไหล (Fluid dynamic gauging method หรือ FDG) พบว่า LPD บ่งชี้เวลาในการทำความสะอาดได้ดี ในขณะที่ FDG ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกการกำจัดได้ด้วย โดยทั้งสองวิธีสามารถระบุได้ว่ามีพฤติกรรมการหลุดออกเหมือนกัน คือ การบวมในขั้นต้น การหลุดออกอย่างรวดเร็ว และลดลงในช่วงท้าย

Xin et al. (2003) ศึกษาพัฒนารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการขจัดคราบของโปรตีนนมจากพื้นผิว โดยดำเนินการทดลองภายใต้สภาวะอัตราการไหล 0.07 - 0.62 เมตรต่อวินาที (Re เท่ากับ 2,400 - 21,000) อุณหภูมิ 35 - 85 องศาเซลเซียส ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 โดยมวล และปริมาณของเวย์โปรตีนเข้มข้น 205 - 747 กรัมต่อตารางเมตร จากการทดลอง พบว่า ลักษณะการหลุดออกของคราบ แบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ระยะเวลาบวมตัว ระยะลดลงอย่างรวดเร็วสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงการไหล และการลดลงอย่างช้าของคราบที่เหลืออยู่ โดยแต่ละช่วงนำมาพิจารณาเพื่อสร้างแบบจำลองการทำนายความสำเร็จของกระบวนการทำความสะอาดภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2. การศึกษาพฤติกรรมการทำความสะอาดด้วยฟิล์มของเหลว

Fuchs et al. (2013) ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของฟิล์มของเหลวที่มีผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดแขนแทนกัม โดยใช้ชุดทดลองระดับปฏิบัติการด้วยเทคนิคสารเรืองแสง พบว่าพฤติกรรมการไหลของฟิล์มของเหลวต่อการทำความสะอาด ความเค้นเฉือนผนังและความเร็วเฉลี่ยมีความเกี่ยวข้องกัน และเมื่ออัตราการไหลของฟิล์มของเหลวเพิ่มขึ้น อัตราการทำความสะอาดเพิ่มขึ้นด้วย

Fuchs et al. (2015) ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการไหลของฟิล์ม และพฤติกรรมการทำความสะอาดด้วยฟิล์มของเหลวแขนแทนกัม เช่นเดียวกับ Fuchs et al. (2013) โดยพิจารณาเพิ่มเติมที่มุมเอียงของพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมต่าง ๆ (30 – 90 องศา) โดยมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 1,190 – 3,110 และศึกษาผลของการเตรียมพื้นผิวแผ่นทดสอบ พบว่า อัตราการทำความสะอาดเพิ่มขึ้น เมื่อมุมเอียงของพื้นผิว และอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ผลเนื่องมาจากค่าความเค้นเฉือนผนังที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าความขรุขระต่ำไม่ช่วยให้ผลของการทำความสะอาดดีขึ้น

Lerch et al. (2013) ศึกษาความสามารถในการทำสะอาดพื้นผิวที่มีคราบไรโบฟลาวินด้วยฟิล์มของเหลวแบบ WIP ทั้งผลเนื่องจากพารามิเตอร์ของการทำความสะอาด เช่น ลักษณะคราบที่ต่างกัน (คราบที่ถูกทำให้เปียกชุ่มก่อน และคราบแห้ง) มุมเอียงพื้นผิวทดสอบ อุณหภูมิของสารทำความสะอาดอัตราการไหลของสาร และลักษณะของพื้นผิว เช่น ชนิดของวัสดุ กระบวนการเตรียมผิวของแผ่นทดสอบ โดยพบว่า คราบที่เปียกแล้วสามารถทำความสะอาดดีกว่า เนื่องจากฟิล์มของเหลวสามารถชะล้าง และทำลายคราบได้ง่าย มุมเอียงน้อยทำความสะอาดได้ง่ายกว่า เป็นผลเนื่องจากการถ่ายเทมวลสาร และอัตราการไหลที่มากขึ้นทำให้ทำความสะอาดได้มากขึ้น แต่อุณหภูมิไม่มีผลต่อการทำความสะอาด ส่วนลักษณะของพื้นผิว พบว่า การเตรียมพื้นผิวส่งผลต่อการทำความสะอาดคราบ

2.5.3. การศึกษาจลนศาสตร์การทำความสะอาด

Dickinson et al. (1995) ศึกษาการสร้างแบบจำลองจลนศาสตร์การยึดติดของแบคทีเรียบนพื้นผิวของวัสดุชีวภาพ ในขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ โดยตรวจสอบแบคทีเรียบนพื้นผิวด้วยกล้องวิดีโอแบบจุลทรรศน์ ผลทดลองพบว่า แบบจำลองคณิตศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง สะท้อนถึงความน่าจะเป็นของการยึดติดและหลุดออกของแบคทีเรีย อันเป็นผลมาจากความเค้นเฉือน โดยความถูกต้องของแต่ละรูปแบบ ได้รับการทดสอบโดยการวิเคราะห์ทางสถิติ กับข้อมูลที่เป็นผลมาจากการศึกษาทดลองความยึดเกาะของ *Staphylococcus aureus*. บนพื้นผิวโพลีเมอร์

Grant et al. (1996) ศึกษาการหลุดออกของแคลเซียมฟอสเฟสบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวและทำความสะอาดทางกล จากการทดลองพบว่า แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งครอบคลุมทั้งผลของอัตราการไหล และค่าความเป็นกรดเบสของสารทำความสะอาดที่มีต่ออัตรา

การหลุดออก โดยสอดคล้องกับการทำความสะอาดในช่วงความเป็นกรดเบส และอัตราการไหลของสารทำความสะอาดที่ทำการทดลองในระดับปฏิบัติการ

Khalid et al. (2015) ศึกษาจลนศาสตร์การกำจัดคราบน้ำฝรั่งเข้มข้น (Pink guava puree) บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมในกระบวนการ CIP ภายในท่อ ด้วยสารละลายเบส โดยพิจารณาอุณหภูมิ ความเข้มข้นและความเร็วของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยตรวจวัดพื้นที่ที่มีคราบด้วยกล้องวิดีโอทุก ๆ 1 นาที และวิเคราะห์พื้นที่การเกาะติดของคราบด้วยการประมวลผลด้วยภาพถ่ายโดยใช้โปรแกรม Image J เพื่อสร้างรูปแบบการทำความสะอาด (Cleaning Profile) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ของจลนศาสตร์การทำความสะอาด เพื่อหาค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด ทั้งช่วงที่คราบลดลงอย่างรวดเร็ว และลดลงอย่างช้า ๆ พบว่า กระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (พิจารณาจากค่าคงที่อัตราการทำความสะอาดที่สูงที่สุด) คือ อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก และความเร็วสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.2 เมตรต่อวินาที โดยใช้เวลา 2 นาที

Khalid et al. (2016) ศึกษาวิธีการทางจลนศาสตร์สำหรับการประเมินกระบวนการทำความสะอาดในทางเศรษฐศาสตร์ของตะกรันน้ำฝรั่งเข้มข้นจากพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อนำมาเลือกการออกแบบกระบวนการทำความสะอาด ได้แก่ การทำความสะอาดแบบขั้นสุด (Extreme cleaning) การทำความสะอาดแบบปกติ (Optical cleaning) และการทำความสะอาดแบบปกติที่มีการวนน้ำซ้ำ (Optical cleaning with water circulation) ซึ่งจากการศึกษา พบว่าการทำความสะอาดแบบปกติที่มีการวนน้ำซ้ำมีประสิทธิภาพมากที่สุด นั่นคือ มีต้นทุนที่ต่ำที่สุด

Lelievre et al. (2002) ศึกษาการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์แบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของจลนศาสตร์การทำความสะอาด เพื่อทำนายประสิทธิภาพการทำความสะอาดตะกรันที่มีทั้งการเกาะติดและหลุดออกเกิดขึ้นพร้อมกันของสปอร์ของจุลินทรีย์ *Bacillus cereus*. ที่แยกมาจากการผลิตในอุตสาหกรรมนม และพิจารณาเฉพาะในส่วนที่ไม่มีความร้อนมาเกี่ยวข้อง ภายใต้ลักษณะการไหลแบบสภาวะคงตัวในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่า การกำจัดตะกรันดังกล่าวขึ้นอยู่กับทั้งปฏิกิริยาของสารทำความสะอาด คือ อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และเงื่อนไขทางอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic) หรือลักษณะของไหลที่มีการเคลื่อนที่โดยพิจารณาความเค้นเฉือนผนังเป็นหลัก ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ $N(t) = N_0 e^{-kt}$ เมื่อ N_0 เป็น ค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของจุลินทรีย์บนพื้นผิว (CFU/cm²) และ k เป็นค่าคงที่อัตราการหลุดออกของคราบ และ t คือ เวลาใด ๆ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง

3.1 วัสดุทดลองและอุปกรณ์

3.1.1 ตัวอย่างพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

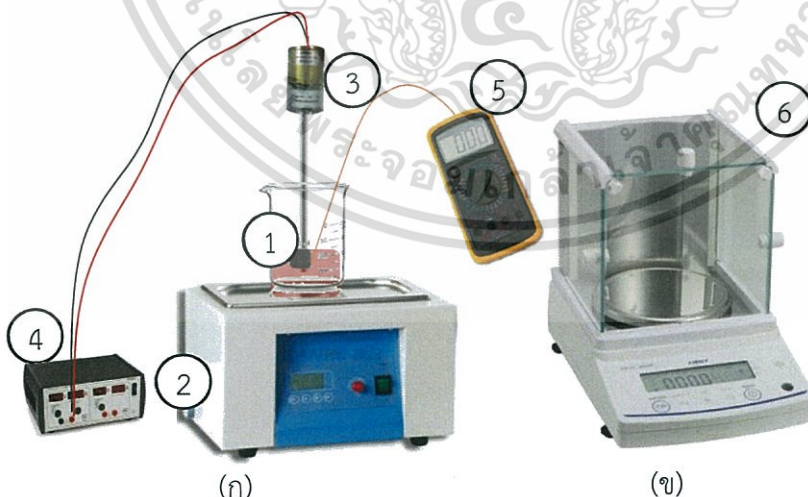
แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 ขนาด 4×10 เซนติเมตร ที่มีการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีการขัดเงาทางกล มีค่าความขรุขระเฉลี่ย 0.8 ไมโครเมตร ความหนา 0.4 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1 จำนวน 6 แผ่น



รูปที่ 3.1 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

3.1.2 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

รายละเอียดของชุดอุปกรณ์สำหรับการเตรียมตัวอย่างน้ำแป้งสุก แสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 โดยอุปกรณ์รูปที่ 3.3 และ 3.4 ใช้สำหรับปาดน้ำแป้งสุกลงบนแผ่นทดสอบ และเตรียมคราบแป้งสุก โดยใช้รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ แสดงดังตารางที่ 3.2

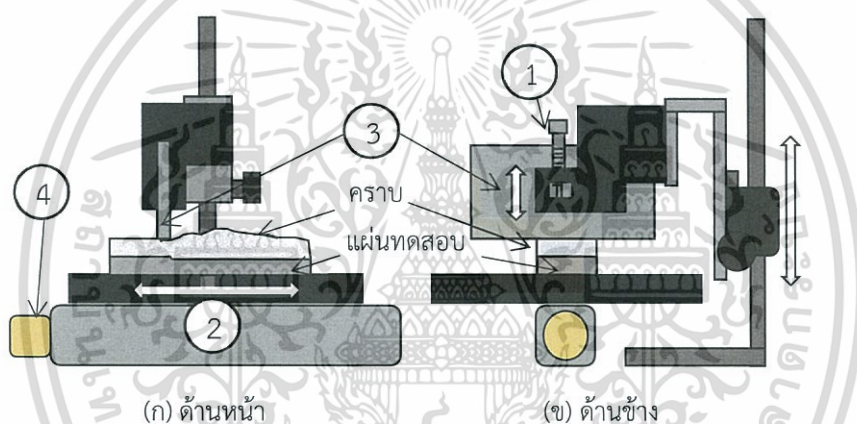


รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการเตรียมตัวอย่างน้ำแป้งสุก

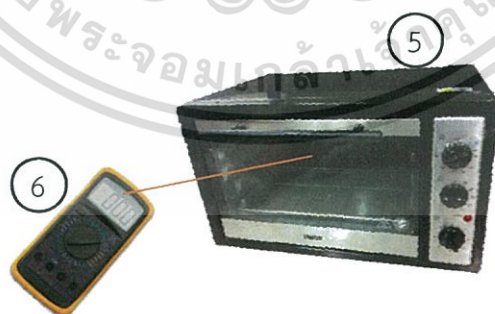
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการเตรียมตัวอย่างน้ำแข็งสุก

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดทดลอง
1	บีกเกอร์ 250 มิลลิลิตร
2	อ่างควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น BWS-10)
3	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที (รุ่น ZYTD520) ต่อกับใบกวนขนาดเล็ก
4	หม้อแปลงไฟฟ้าโวลต์ต่ำ 2 ระบบ AC/DC 0 – 24 โวลต์
5	เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (รุ่น FLUKE 54IIB Thermometer S2)
6	เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 3 ตำแหน่ง (รุ่น VIBRA AB323, SHINKO DENSHI)



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์สำหรับการปาดน้ำแข็งสุก



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมคราบแข็งสุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับปาดน้ำแข็งสูกบนพื้นผิวทดสอบและเตรียมคราบแข็งสูก

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดทดลอง
1	ไมโครมิเตอร์ ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
2	แผ่นเลื่อนแนวราบ ความเร็วคงที่ 2.48 ± 0.05 เซนติเมตรต่อวินาที
3	แผ่นสำหรับปาดน้ำแข็งสูกทำจากวัสดุอะลูมิเนียม
4	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 - 24 โวลต์ ความเร็วรอบ 60 - 150 รอบต่อนาที
5	เตาอบไฟฟ้า (รุ่น ZANUSSI)
6	เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (รุ่น FLUKE 54IIB Thermometer S2) ช่วงอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ถึง 20, องศาเซลเซียส 200

3.2 การเตรียมตัวอย่างแผ่นทดสอบ

เตรียมน้ำแข็งความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยมวลต่อปริมาตร (ภาคผนวก 1.1) โดยชั่งน้ำหนักแข็งมันสำปะหลัง 7 กรัมด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตรด้วยบีกเกอร์ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ผสมในบีกเกอร์ จากนั้นนำหม้อแปลงไฟฟ้าต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าของใบกวนขนาดเล็ก เพื่อจ่ายกระแสไฟทำให้ใบกวนเกิดการหมุน แล้วให้ความร้อนบีกเกอร์น้ำแข็งผ่านน้ำร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อวัตรระดับน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิจากระดับที่วางบีกเกอร์ต้องมีความสูง 10 เซนติเมตร เริ่มการกวนผสมน้ำแข็ง โดยใช้ความเร็วรอบการหมุนใบกวน 100 รอบต่อนาที จนกระทั่งน้ำแข็งมีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แล้วคงอุณหภูมิเป็นเวลา 30 นาที จึงปรับลดความเร็วรอบการหมุนใบกวนเป็น 50 รอบต่อนาที และลดอุณหภูมิลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิน้ำแข็งที่อุณหภูมินี้ จนกว่าจะเตรียมแผ่นทดสอบเสร็จ เพื่อป้องกันการคืนตัวของแข็งสูก โดยตลอดระยะเวลาการเตรียมน้ำแข็งวัตรอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล

การปาดน้ำแข็งสูกลงบนพื้นผิวทดสอบ กำหนดให้พื้นที่การปาดน้ำแข็งสูกเป็น 3×9 เซนติเมตร (รูปที่ 3.5) ด้วยการใช้สติ๊กเกอร์ใส่ติดบนแผ่นทดสอบเข้ามาด้านในจากขอบแผ่นเป็นระยะ 0.5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักแผ่นทดสอบเริ่มต้นด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก และหาค่าความหนาแน่นของน้ำแข็งสูก โดยใช้บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตวงน้ำแข็งสูกปริมาตร 20 มิลลิลิตร และชั่งน้ำหนักน้ำแข็งสูกในบีกเกอร์ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก จากนั้น เตรียมชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับปาดน้ำแข็งสูกบนพื้นผิวทดสอบโดยกดปุ่มเลื่อนแผ่นเลื่อนแนวราบซึ่งต่ออยู่กับมอเตอร์ไฟฟ้ามายังจุดเริ่มต้น และวางแผ่นทดสอบลงบนแผ่นเลื่อน ปรับระดับแผ่นสำหรับปาดน้ำแข็งสูกให้ติดกับพื้นผิวทดสอบพอดี จึงปรับสเกลไมโครมิเตอร์ 0.8 มิลลิเมตร ให้แผ่นสำหรับปาดคราบอยู่เหนือพื้นผิวทดสอบ จากนั้น นำน้ำแข็งสูกที่เตรียมไว้เทลงบนพื้นผิวทดสอบ และกดปุ่มให้แผ่นเลื่อนแนวราบเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปาดน้ำแข็งสุกเรียบร้อยแล้วทั้งแผ่นทดสอบแล้ว จึงชั่งน้ำหนักแผ่นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก ได้น้ำหนักน้ำแข็งสุกบนแผ่นทดสอบ มีความหนา 0.8 ± 0.1 มิลลิเมตร โดยคำนวณจากความหนาแน่นและมวลของน้ำแข็งสุก จากนั้นนำสติกเกอร์ใสที่ติดบนแผ่นทดสอบออกแล้ว จึงให้ความร้อนแผ่นทดสอบด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงชั่งน้ำหนักแผ่นทดสอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักได้น้ำหนักคราบแข็งสุก มีความหนา 0.06 ± 0.01 มิลลิเมตร สอดคล้องกับความหนาของคราบแข็งสุกที่คำนวณจากสมการที่ 1 ได้ดังนี้

กำหนดให้ R_f ประมาณ $0.125 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (Challa et al., 2015) และ λ_f เฉลี่ยประมาณ $0.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (Lan et al., 2000)

จากสูตร

$$X_f = R_f \lambda_f$$

$$X_f = 0.125 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \times 0.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$X_f = 0.0625 \text{ mm}$$

นั่นคือ ความหนาของคราบแข็งสุกตามทฤษฎี มีค่าเป็น 0.0625 มิลลิเมตร

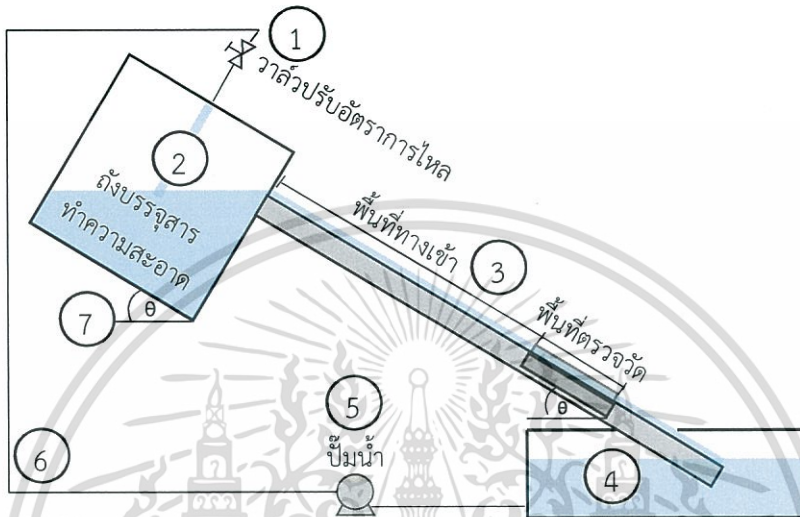


รูปที่ 3.5 พื้นที่คราบแข็งสุกบนแผ่นทดสอบ

โดยน้ำแข็งสุกเปื่อยมีลักษณะเป็นของไหลชั้นหนืด และคราบแข็งสุกมีลักษณะเป็นตะกอนของแข็งแห้งและบาง จากนั้น เก็บแผ่นทดสอบไว้ในกล่องควบคุมความชื้นห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งทำการทดลอง

3.3 ชุดทดลอง

ชุดทดลองนี้ใช้สำหรับศึกษาลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุกบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการวางตัวในลักษณะเอียงทำมุมต่าง ๆ กับแนวราบ โดยอาศัยหลักการน้ำล้นจำลองการเกิดเป็นฟิล์มของเหลวบนพื้นผิวอุปกรณ์ในระบบเปิดและถึง หรือไหลลงไปตามแรงโน้มถ่วงของโลก ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.3



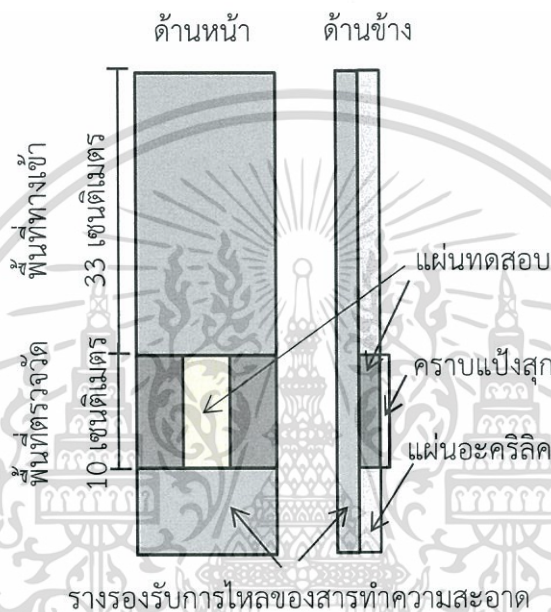
รูปที่ 3.6 ชุดทดลองสำหรับการทำความสะอาดคราบแป้งสุกบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบชุดทดลองสำหรับทำความสะอาดคราบแป้งสุกบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม

หมายเลข	ส่วนประกอบของชุดทดลอง
1	วาล์วปรับอัตราการไหลของสารทำความสะอาด (รุ่น SANWA)
2	ถังบรรจุสารทำความสะอาด ขนาด 5 ลิตร
3	รางรองรับการไหลของสารทำความสะอาดทำจากแผ่นอะลูมิเนียม ขนาด 12 x 50 เซนติเมตร มีขอบกั้น 2.7 เซนติเมตร ตลอดความยาว
4	ภาชนะรองรับสารทำความสะอาด ขนาด 15 ลิตร
5	ปั้มน้ำตู้ปลา (รุ่น SONIC POWER HEAD AP1200)
6	สายยางลำเลียงสารทำความสะอาด
7	บริเวณปรับมุม (โครงเหล็กฉากรองรับอ่างบรรจุสารทำความสะอาด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรางรองรับการไหลของสารทำความสะอาด ออกแบบให้มีพื้นที่ทางเข้าเป็น 33 เซนติเมตร เพื่อให้มั่นใจได้ว่าฟิล์มของเหลวเข้าสู่สภาวะคงตัว และมีความหนาเกือบคงที่ (Takamasa and Hazuku, 2000) โดยตั้งแต่พื้นที่ตรวจวัดจะมีความหนาของรางน้อยกว่าพื้นที่ทางเข้า 0.4 เซนติเมตร ใช้ในการวางแผ่นทดสอบในการล้างคราบแข็งสกปรก และพื้นที่หลังจากพื้นที่ตรวจวัดมีการใช้แผ่นอะคริลิกความหนา 0.4 เซนติเมตรประกบกับรางรองรับการไหล ใช้เป็นขอบเขตในการวางแผ่นทดสอบ และป้องกันไม่ให้แผ่นทดสอบหลุดออกจากรางรองรับการไหลขณะทำการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะรางรองรับการไหลของสารทำความสะอาด

โดยการใช้งานชุดทดลองเริ่มจาก การปรับระดับมุมเอียงของรางรองรับการไหลของสารทำความสะอาดที่ต้องการทดลองด้วยการปรับที่บริเวณปรับมุม จากนั้น เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล (ภาคผนวก 1.3) ปริมาณ 12 ลิตร เเทลงในภาชนะรองรับสารทำความสะอาดแล้ว จึงปรับระดับอัตราการไหลของสารทำความสะอาดด้วยวาล์ว จากนั้น เปิดปั้มน้ำให้สารทำความสะอาดลำเลียงผ่านสายยางจากภาชนะรองรับไปยังอ่างบรรจุสารทำความสะอาดด้านบน จนกระทั่งของเหลวล้นไหลลงมาที่รางรองรับการไหลเป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้พื้นผิวของรางรองรับการไหลเปียก และทุกพื้นที่ผิวของรางรองรับการไหลสัมผัสกับฟิล์มของเหลวได้อย่างทั่วถึง จึงปิดปั้มน้ำและวางแผ่นทดสอบจำนวน 3 แผ่นเรียงติดกันบริเวณพื้นที่ตรวจวัดโดยวางแผ่นทดสอบตรงกลาง และแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่มีคราบประกบ 2 ข้าง จากนั้น เปิดปั้มน้ำให้สารทำความสะอาดไหลลงมาที่รางรองรับการไหล เมื่อสารทำความสะอาดสัมผัสกับพื้นผิวทดสอบ บริเวณพื้นที่ตรวจวัด จึงเริ่มนับเป็นเวลาเริ่มต้นของการล้างคราบแข็งสกปรกบนพื้นผิวทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.8 หลังจากนั้น สารทำความสะอาดไหลลงมาที่ภาชนะรองรับสารทำความสะอาดถูกลำเลียงผ่านสายยางเอกสารถนเป็นเอกสารถนที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังอ่างบรรจุสารทำความสะอาดด้านบนด้วยปั้มน้ำ เป็นการออกแบบระบบวนน้ำซ้ำ ทำให้สามารถล้างคราบแป้งสุกได้อย่างต่อเนื่อง และประหยัดปริมาณสารทำความสะอาดที่ใช้ในการทดลอง



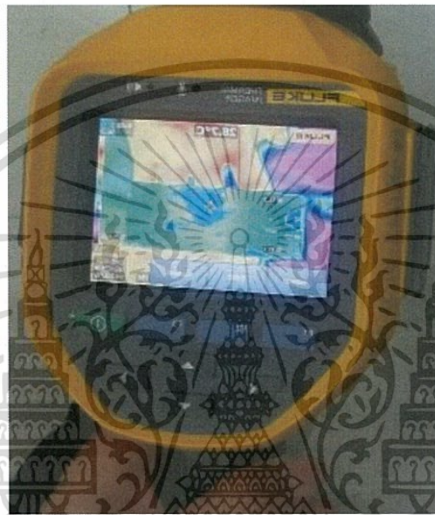
รูปที่ 3.8 การล้างคราบแป้งสุกบนพื้นผิวทดสอบ

3.4 วิธีการทดลอง

เริ่มการล้างคราบแป้งสุกโดยใช้ชุดทดลองข้างต้น เมื่อล้างคราบเป็นเวลา 30 วินาที จึงนำแผ่นทดสอบออกจากชุดทดลอง และวางแผ่นทดสอบเอียงทำมุม 45 องศากับแนวราบ เป็นเวลา 1 นาที ทำให้ของเหลวบนพื้นผิวคราบไหลออกจากแผ่นทดสอบ จากนั้น ตั้งค่ากล้องถ่ายภาพความร้อน (รุ่น FLUKE Ti400 Infrared Camera) โดยตั้งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity) ของคราบแป้งสุกมีค่าเป็น 0.95 (Zanoni et al., 1995) และอุณหภูมิพื้นหลัง (Background Temperature) ได้มาจากการวัดอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติด้วยเทอร์โมคัปเปิล ก่อนการบันทึกภาพถ่ายความร้อนมีป้องกันรังสีความร้อนที่สะท้อนจากภายนอกเข้าสู่กล้องถ่ายภาพความร้อน โดยใช้ฉากดำป้องกันรังสีความร้อนจากด้านหลังกล้องถ่ายภาพความร้อนแล้ว จึงนำแผ่นอะลูมิเนียมมาให้ความร้อนผ่านน้ำร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยวางแผ่นอะลูมิเนียมในอ่างควบคุมอุณหภูมิ และระดับน้ำร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิสูงพอดีกับขอบด้านข้างของแผ่นอะลูมิเนียม จึงวางแผ่นทดสอบลงบนแผ่นอะลูมิเนียมเป็นเวลา 10 วินาที และบันทึกภาพย่านอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.9 ในการบันทึกภาพถ่ายย่านอินฟราเรด ผู้บันทึกภาพต้องคำนึงความคมชัดของภาพถ่าย และอุณหภูมิจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิของน้ำที่ระเหยจากพื้นที่ผิวแผ่นทดสอบบริเวณที่คราบแป้งสุกหลุดออกหมด ส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิของรังสีความร้อนที่กล้องถ่ายภาพความร้อนได้รับเกิดความผิดพลาดได้ โดยทำความสะอาดจนพื้นที่คราบที่ถูกกำจัดออกมากกว่าร้อยละ 95 ของคราบทั้งหมด โดยพิจารณาด้วยพื้นที่จากภาพระดับสเกลสีเทาในโปรแกรม NI Vision Builder

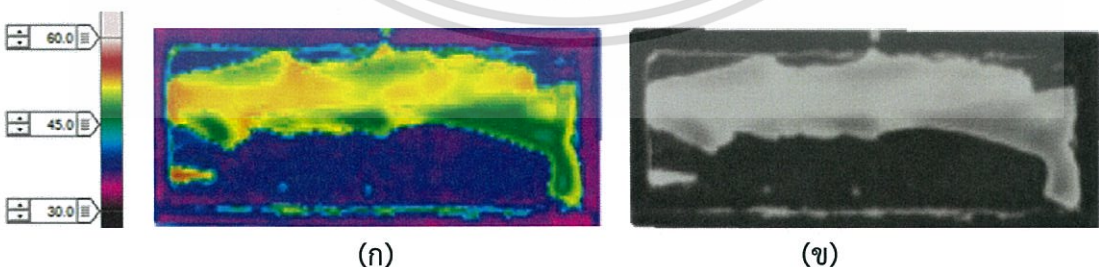
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองนี้ต้องการเปรียบเทียบผลของอัตราการไหล 3 ระดับ ได้แก่ 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง และเปรียบเทียบผลของมุมพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมทำมุม 3 ระดับ ได้แก่ 30, 60 และ 80 องศา กับแนวราบ ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ ซึ่งอัตราการไหลดังกล่าวข้างต้น เป็นตัวแทนของการไหลช่วงเปลี่ยนแปลง ช่วงปั่นป่วนระยะเริ่มต้น และปั่นป่วนอย่างเต็มที่ พิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลด์ของฟิล์ม คำนวณดังสมการที่ 2 โดยกำหนดให้ B เท่ากับ 0.12 เมตร, v เท่ากับ 0.9025×10^{-6} ตารางเมตรต่อวินาที และ \dot{V} เท่ากับ 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง จึงได้ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเป็น 256.48, 512.97 และ 769.46 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายย่านอินฟราเรดของคราบแข็งสูกบนแผ่นทดสอบด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

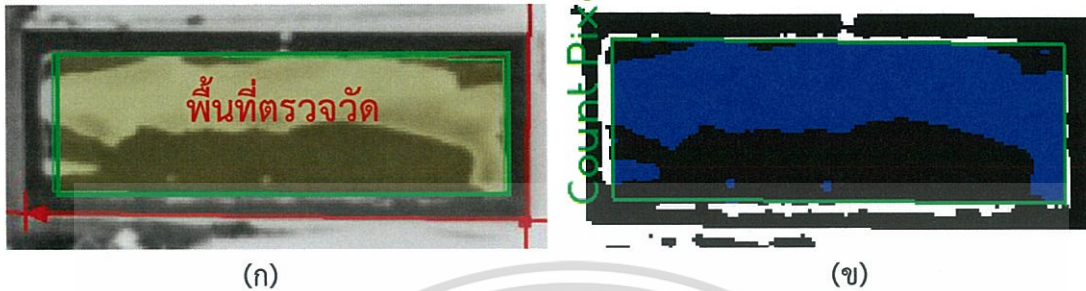
จากนั้น ใช้โปรแกรม Smart View 4.1 ในการปรับภาพถ่ายย่านอินฟราเรดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยปรับระดับ (Level) อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30 – 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีช่วงกว้าง (Span) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) และกำหนดรูปแบบของภาพเป็นระดับสเกลสีเทา (Gray scale) แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข)



รูปที่ 3.10 การปรับภาพถ่ายย่านอินฟราเรดด้วยโปรแกรม Smart View 4.1

หลังจากนั้น ใช้โปรแกรม NI Vision Builder วิเคราะห์พื้นที่คราบแข็งสูกที่เหลือนบนแผ่นทดสอบ กำหนดพื้นที่ที่ตรวจวัดคราบแข็งสูก ขนาด 3×9 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.11 (ก) และรูปแบบของภาพเป็นระดับสเกลสีเทา จากนั้น กำหนดค่าเทรชโฮลด์ (Threshold) จากค่าความเข้มสีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปเซประยะขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Intensity) ของภาพ (มีค่าตั้งแต่ 0 – 255) เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างคราบแป้งสุกกับพื้นผิวทดสอบ จึงสามารถวิเคราะห์ปริมาณแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นทดสอบได้ด้วยการใช้โปรแกรมกำหนดพื้นที่สีขาวเป็นพื้นที่ของคราบแป้งสุก ซึ่งโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์พื้นที่ที่เป็นสีขาวภายในพื้นที่ตรวจวัด จนกระทั่งได้ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลือบนแผ่นทดสอบ



รูปที่ 3.11 การวัดพื้นที่คราบแป้งสุกบนพื้นผิวทดสอบด้วยโปรแกรม NI Vision Builder

3.5 การประเมินการทำความสะอาด

การประเมินการทำความสะอาดเพื่อออกแบบรูปแบบการทำความสะอาดตามลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุก พิจารณาพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

3.5.1 ค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด

การประเมินการทำความสะอาด โดยใช้จลนศาสตร์การทำความสะอาดแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง แสดงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่คราบแป้งสุกบนพื้นผิวทดสอบ ดังสมการที่ 2.3 โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ดังสมการที่ 3.1 จึงสามารถหาค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด จากค่าความชันแนวโน้มเชิงเส้นตรงของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของลอการิทึมธรรมชาติของพื้นที่คราบกับเวลาการทำความสะอาด

$$\ln(A(t)) = -kt + \ln(A_0) \quad (3.1)$$

เมื่อ A_0 คือ พื้นที่เริ่มต้นของคราบ (cm^2)

k คือ ค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด (min^{-1})

t คือ ช่วงเวลา (min)

3.5.2 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด

การประเมินการทำความสะอาด โดยใช้ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดที่ดัดแปลงจากสมการที่ 2.4 โดยพิจารณาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของคราบแป้งสุกที่ทำความสะอาดได้ กับเวลาที่ใช้การทำความสะอาด และปริมาณสารทำความสะอาด แสดงดังสมการที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

$$E_t = \frac{A}{t} \quad (3.2)$$

$$E_f = \frac{A}{f} \quad (3.3)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ของคราบที่ทำความสะอาดได้ ณ ช่วงเวลาใดๆ (cm²)

t คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด (min)

f คือ ปริมาณสารทำความสะอาดที่ใช้ ณ ช่วงเวลาใดๆ (dm³ หรือ l)

3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลกระทบท่อตัวแปรตอบสนองทุกกรณีทั้งหมด 9 ทรีตเมนต์ โดยทำการทดลอง 2 ปัจจัย คือ มุมเอียงของพื้นผิวทดสอบแตกต่างกันในแนวราบ และอัตราการไหลของสารทำความสะอาด

การทดลองนี้จัดสิ่งทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และดำเนินการแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design ; CRD) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) แบ่งการวิเคราะห์เป็นสองส่วน คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) หากพบว่ามีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's Multiple Comparison ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p < 0.05) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สถิติสำเร็จรูป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

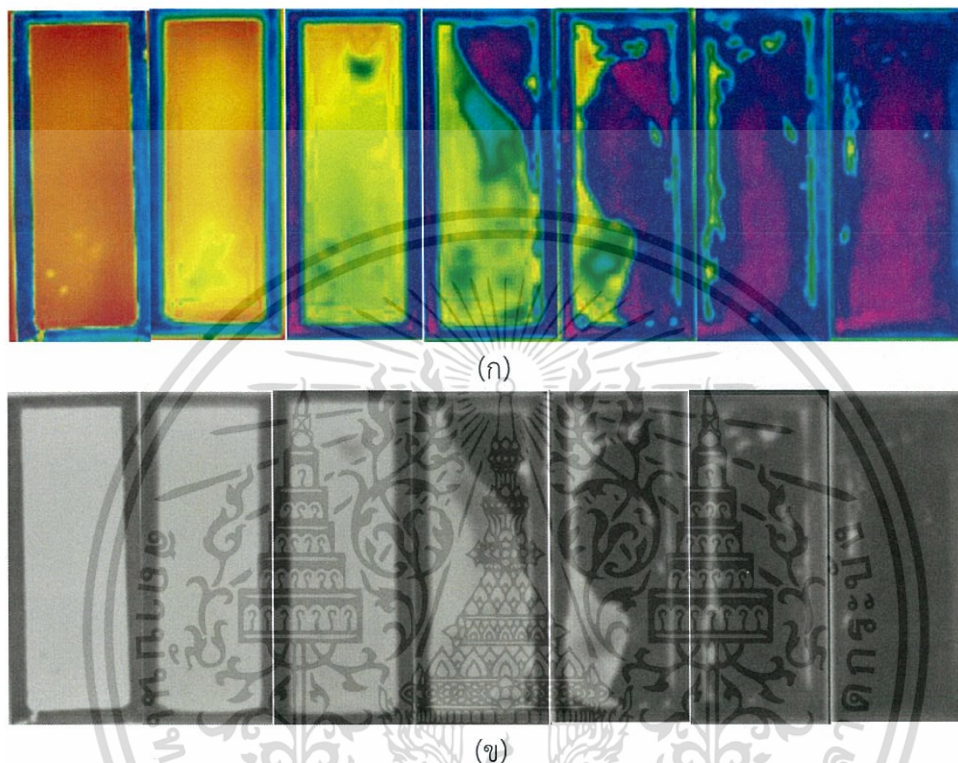
4.1 การวิเคราะห์พื้นที่คราบแป้งสุก

จากการทดลองได้กำหนดการทำความสะอาดคราบแป้งสุกจนกระทั่งพื้นที่คราบที่ถูกกำจัดออกมากกว่าร้อยละ 95 ของคราบทั้งหมด สำหรับการจำลองการทำความสะอาดคราบแป้งสุกบนพื้นผิวทดสอบที่มุม 30, 60 และ 80 องศา กับแนวราบ ด้วยอัตราการไหลของสารทำความสะอาด 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง โดยนำภาพถ่ายย่านอินฟราเรดที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ 2 ขั้นตอน ดังนี้

4.1.1 การปรับภาพถ่ายย่านอินฟราเรดด้วยโปรแกรม Smart View 4.1

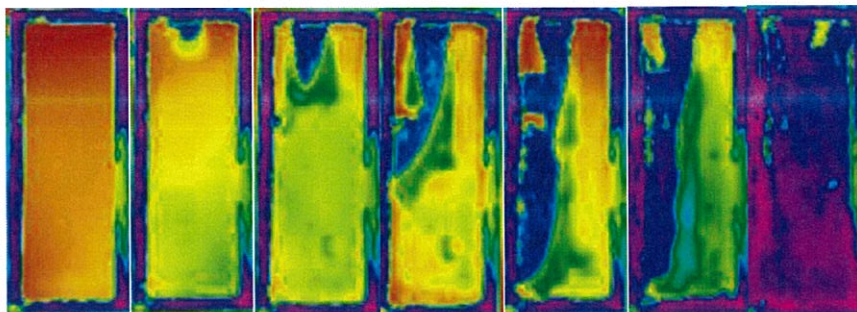
จากภาพถ่ายย่านอินฟราเรดที่ได้จากการทำความสะอาดคราบแป้งสุกจนกระทั่งพื้นที่คราบหลุดออกจากแผ่นทดสอบมากกว่าร้อยละ 95 ของคราบทั้งหมด ใช้โปรแกรม Smart View 4.1 ปรับภาพถ่ายย่านอินฟราเรด โดยปรับระดับ (Level) อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30 – 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีช่วงกว้าง (Span) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ให้ทุกภาพอยู่ในระดับ และความกว้างของอุณหภูมิที่กำหนด ดังรูปที่ 4.1 (ก) ถึงรูปที่ 4.9 (ก) แสดงให้เห็นว่า สีที่ปรากฏในภาพถ่ายย่านอินฟราเรดมีอุณหภูมิจากสูงไปต่ำเป็นสีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว สีฟ้า สีน้ำเงิน และสีม่วง ตามลำดับ จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป พบว่า คราบแป้งสุกในช่วงเริ่มต้นการทำความสะอาดจะมีอุณหภูมิสูง และจะมีอุณหภูมิต่ำลง เมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งคราบแป้งสุกเริ่มมีการหลุดออก เนื่องจากสารทำความสะอาดถ่ายโอนมวลสาร และทำปฏิกิริยากับพันธะภายในโครงสร้างของคราบแป้งสุกทำให้เกิดการบวมตัวขึ้น จึงทำให้ความหนาคราบแป้งสุกบนแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาการนำความร้อนจากพื้นผิวทดสอบจนถึงพื้นผิวคราบแป้งสุก พบว่า อุณหภูมิของวัสดุแปรผกผันกับค่าความหนาของวัสดุ (Frank et al., 2007) ดังนั้น บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำจึงเป็นบริเวณที่คราบเกิดการบวมตัว ภาพถ่ายหลังจากคราบหลุดออกปรากฏให้เห็นอุณหภูมิของแผ่นทดสอบต่ำกว่าอุณหภูมิของคราบ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแผ่นทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.28 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของคราบแป้งสุกที่มีค่าเท่ากับ 0.95 สำหรับในการทดลองสนใจลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุก จึงปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนในกล้องถ่ายภาพความร้อน เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของคราบแป้งสุก ทำให้อุณหภูมิที่ปรากฏของแผ่นทดสอบมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิแผ่นทดสอบที่แท้จริง เมื่อทำการวิเคราะห์ความหนาของคราบจากภาพถ่าย เห็นได้ว่ามีบริเวณที่คราบบวมตัวขึ้นมากจนทำให้มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแผ่นทดสอบ จึงทำให้ไม่สามารถแบ่งแยกพื้นที่คราบ

แป้งสุก และพื้นผิวของแผ่นทดสอบได้อย่างชัดเจน จึงทำการปรับภาพถ่ายย่านอินฟราเรดเป็นระดับสเกลสีเทา ดังรูปที่ 4.1 (ก) ถึงรูปที่ 4.9 (ข) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของคราบแป้งสุก กับพื้นผิวทดสอบได้จากความเข้มสีของภาพ โดยบริเวณพื้นที่สีขาว (ค่าความเข้มสีของภาพมาก) เป็นพื้นที่ของคราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นทดสอบ

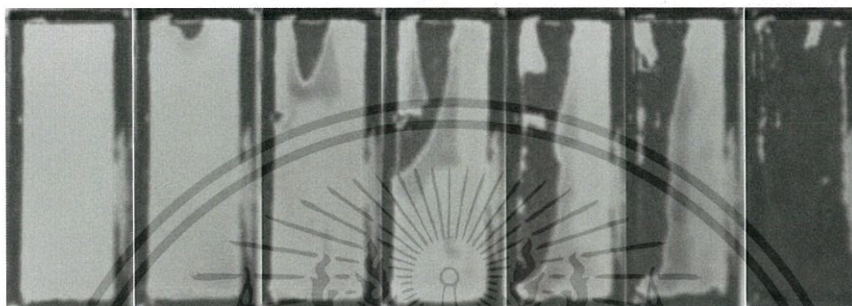


รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 30 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 100 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

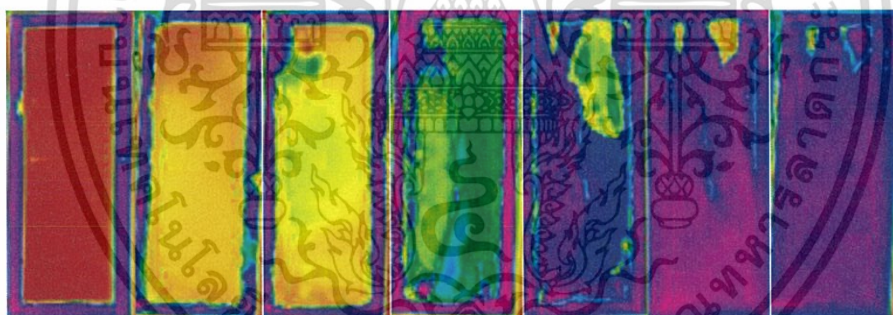


(ก)

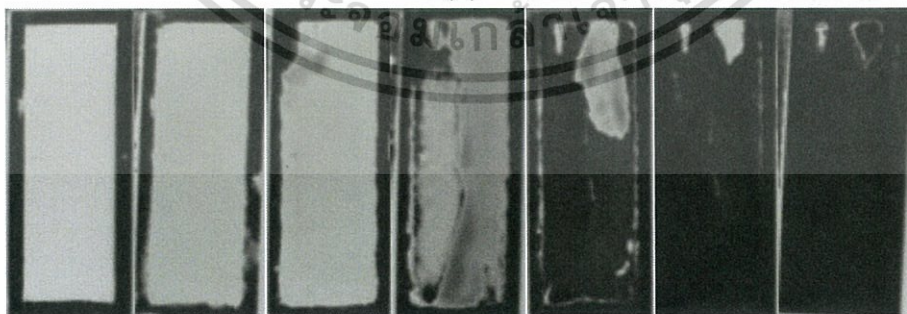


(ข)

รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 30 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 200 ลิตรต่อชั่วโมง



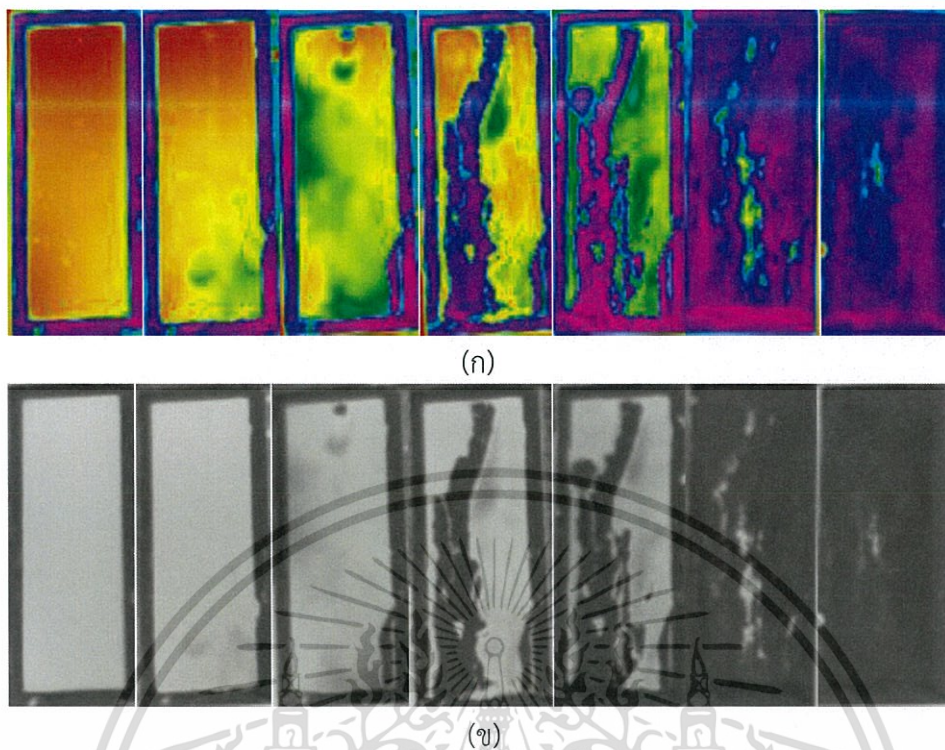
(ก)



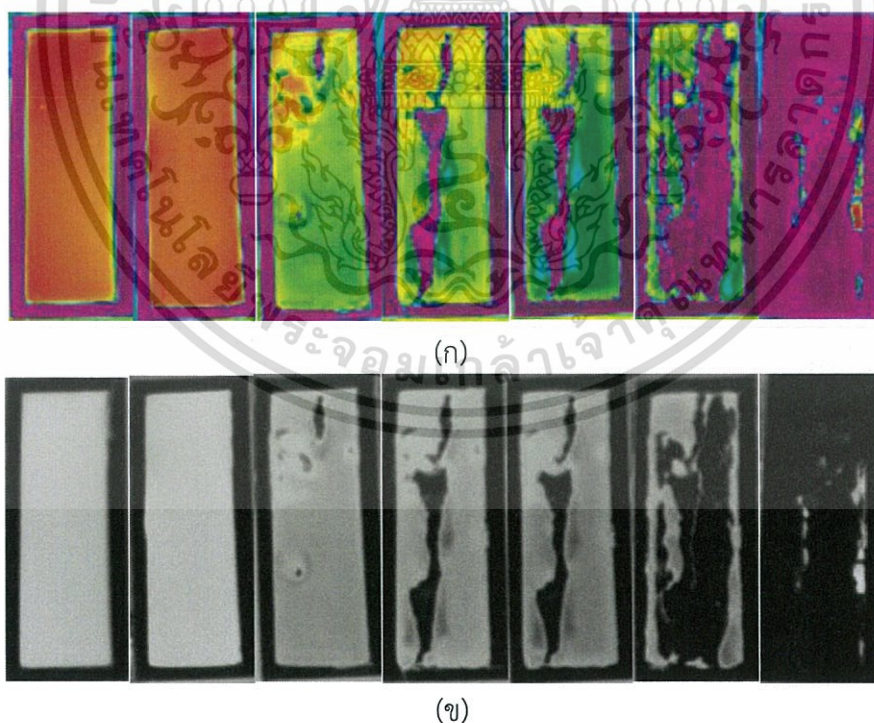
(ข)

รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพสเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 30 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 300 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

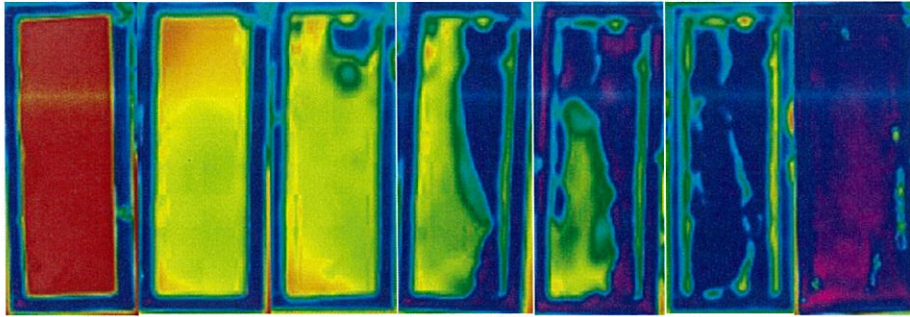


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพ สเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 60 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 100 ลิตรต่อชั่วโมง

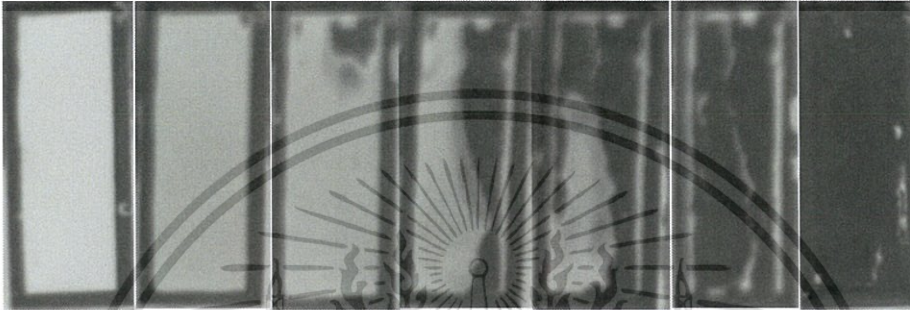


รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพ สเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 60 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 200 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

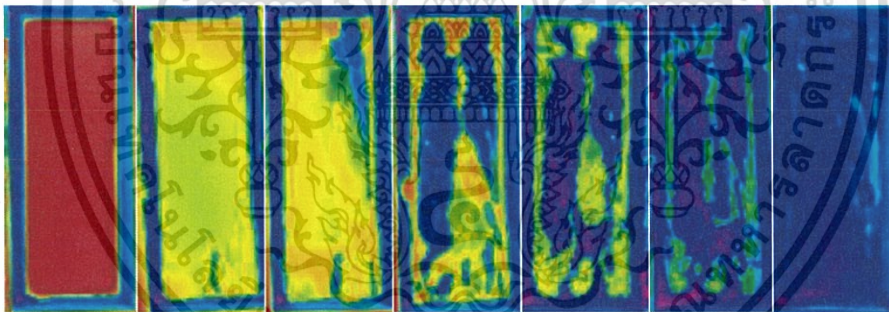


(ก)

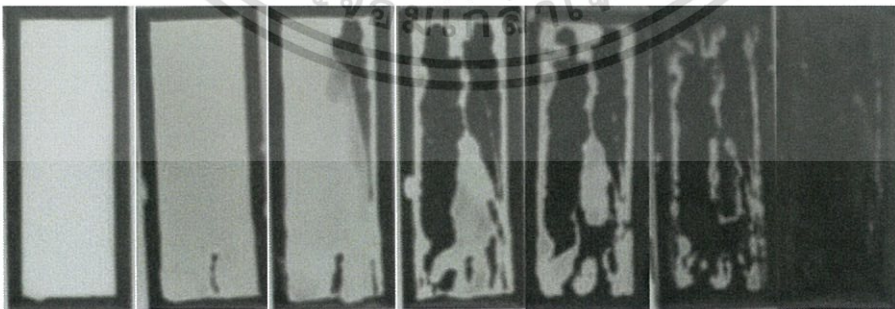


(ข)

รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพ สเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 60 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 300 ลิตรต่อชั่วโมง



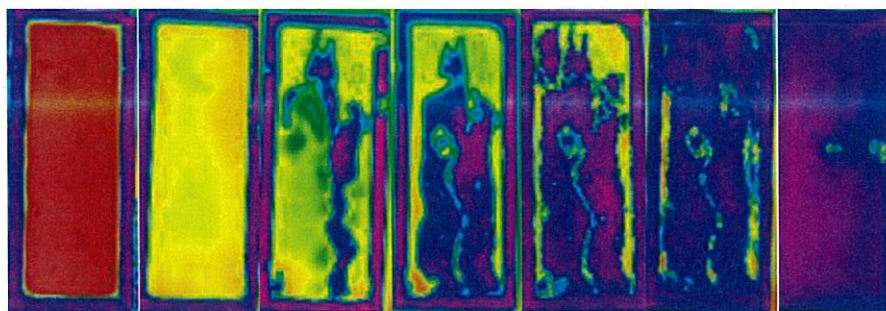
(ก)



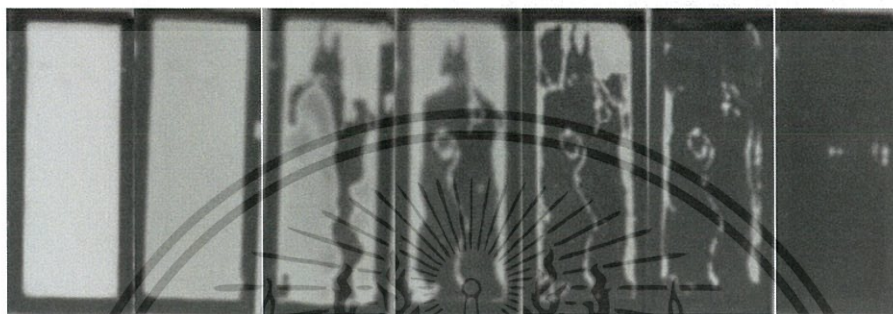
(ข)

รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพ สเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 80 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 100 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

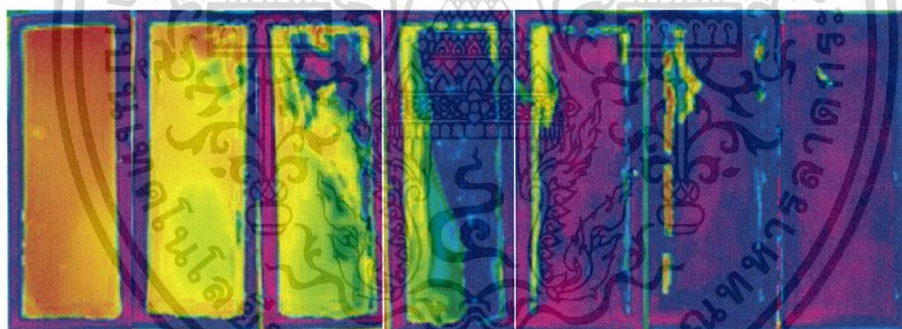


(ก)

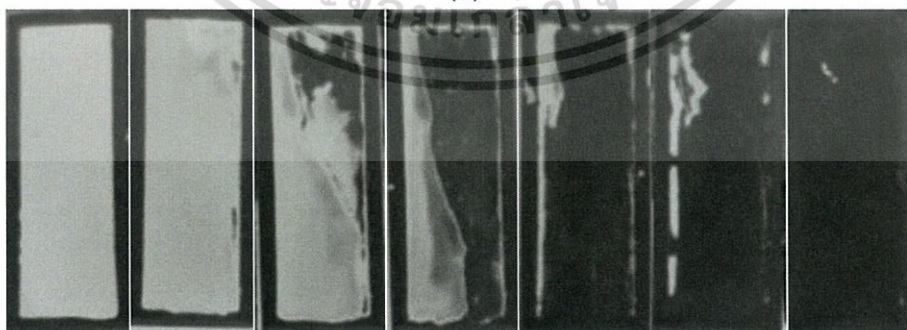


(ข)

รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพ สเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 80 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 200 ลิตรต่อชั่วโมง



(ก)



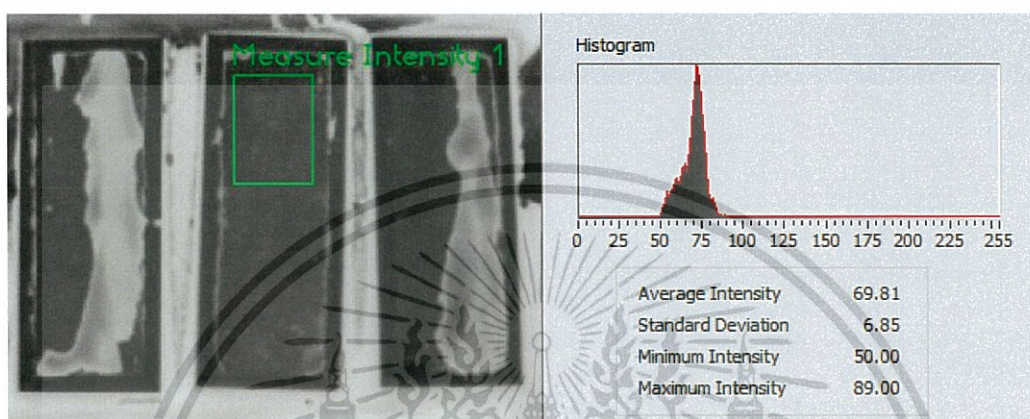
(ข)

รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบเมื่อเวลาผ่านไป (ก) ก่อน (ข) หลังการปรับภาพ สเกลสีเทา ที่พื้นผิววางตัวทำมุม 80 องศา อัตราการไหลสารทำความสะอาด 300 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

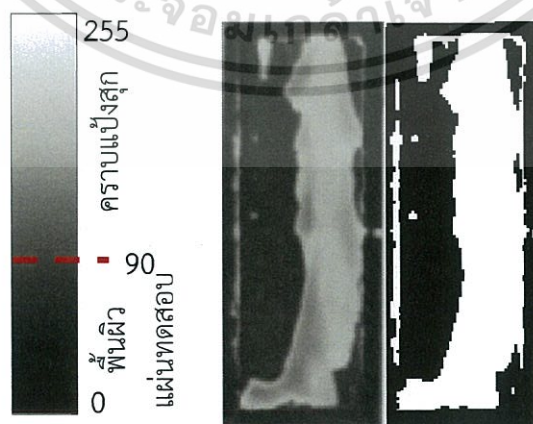
4.1.2 การวิเคราะห์พื้นที่คราบแป้งสุกด้วยโปรแกรม NI Vision Builder

จากภาพย่านอินฟราเรดที่ปรับแล้วทำการวิเคราะห์พื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลือนบนแผ่นทดสอบด้วยโปรแกรม NI Vision Builder โดยกำหนดพื้นที่ตรวจวัดคราบแป้งสุก ขนาด 3×9 เซนติเมตร และรูปแบบของภาพเป็นระดับสเกลสีเทา จากนั้น กำหนดค่าเทรสโฮลด์จากค่าความเข้มสีของภาพเป็น 90 เนื่องจากการทดลองวัดค่าความเข้มสีสูงสุดของแผ่นทดสอบจะอยู่ที่ประมาณ 80 – 90 แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การทดลองวัดค่าความเข้มสีของภาพบริเวณแผ่นทดสอบ

กำหนดให้บริเวณที่มีค่าความเข้มสีตั้งแต่ 90 ขึ้นไป แสดงดังรูปที่ 4.11 เป็นบริเวณที่ยังคงมีคราบแป้งสุกเหลืออยู่บนแผ่นทดสอบ เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างคราบแป้งสุกกับพื้นผิวทดสอบ สามารถวิเคราะห์ปริมาณแป้งสุกที่เหลือนอยู่บนแผ่นทดสอบได้ โดยกำหนดพื้นที่สีขาวเป็นพื้นที่ของคราบแป้งสุก เพื่อศึกษาลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุกบนพื้นผิว และพื้นที่สีดำเป็นพื้นที่ของพื้นผิว เหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อศึกษาบริเวณพื้นผิวที่ทำความสะอาดหมด งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุก จึงวิเคราะห์ผลพื้นที่สีขาวในพื้นที่ตรวจวัดได้ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลือนบนแผ่นทดสอบ



รูปที่ 4.11 การกำหนดค่าความเข้มสีเพื่อแบ่งพื้นที่คราบแป้งสุก กับพื้นที่ของแผ่นทดสอบ

4.2 ลักษณะการทำความสะอาดคราบแป้งสุก

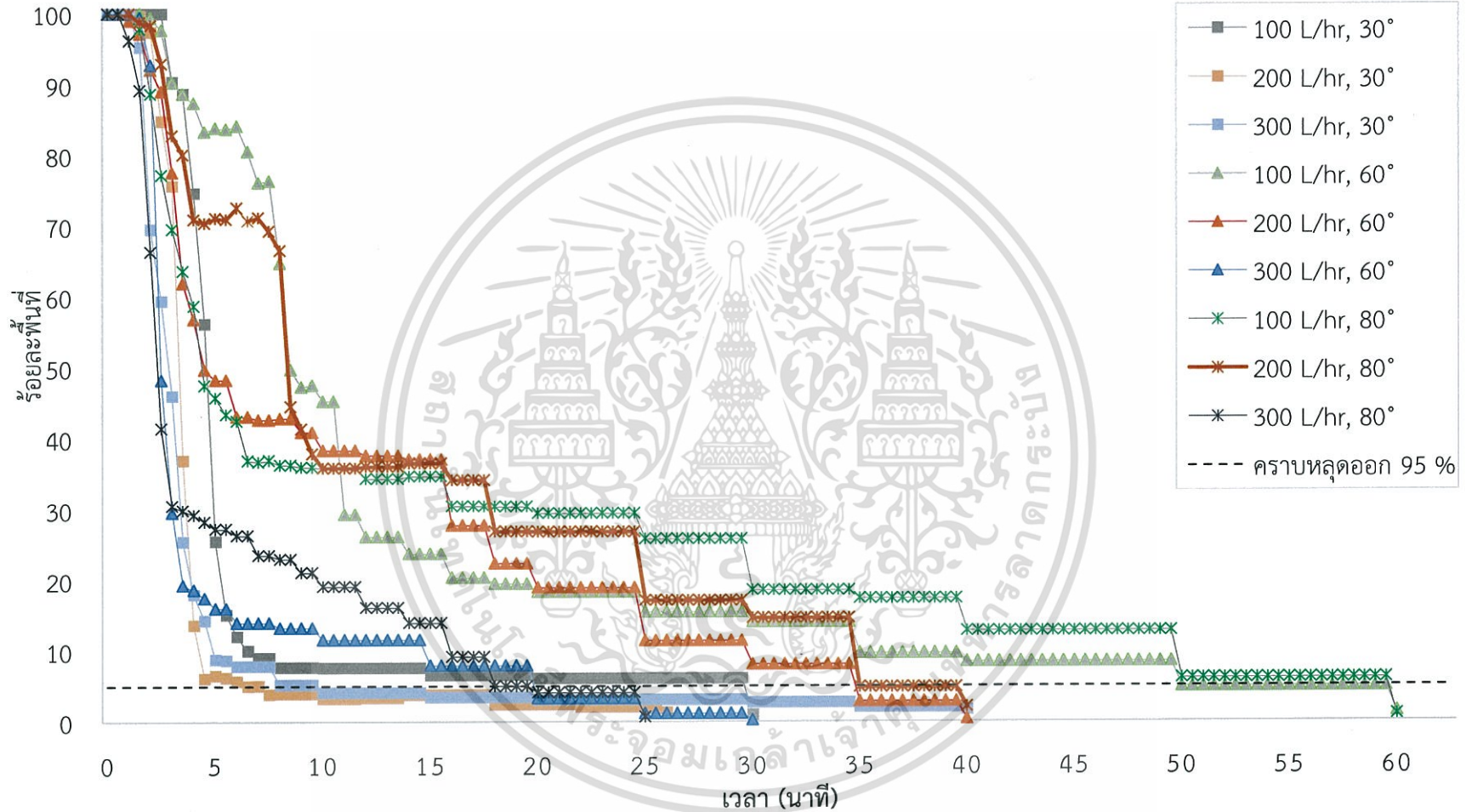
ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุกที่ร้อยละ 95 ของคราบทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า ลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสุก สอดคล้องกับแป้งข้าวโพดแบบพรีเจลาติไนซ์ของ Patrick et al. (2014) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 ช่วงการบวมตัว เป็นช่วงที่พื้นที่ของคราบแป้งสุกบนแผ่นทดสอบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากผลของเวลาในการสัมผัสระหว่างคราบแป้งสุกกับสารทำความสะอาด ซึ่งเกิดการถ่ายโอนมวลสารของสารทำความสะอาดเข้าสู่ภายในคราบ และทำปฏิกิริยากับคราบจนเกิดการบวมตัวขึ้น โดยโมเลกุลของสารทำความสะอาดเข้าไปทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลภายในคราบแป้งสุก และแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิวของแผ่นทดสอบ (Fuchs et al., 2013) จากการทดลอง พบว่า เวลาที่ใช้ในช่วงการบวมลดลง เมื่อมุมและอัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนที่มากขึ้น ทำให้คราบบริเวณที่บวมหลุดออกอย่างรวดเร็ว

ช่วงที่ 2 ช่วงการหลุดอย่างรวดเร็ว เป็นช่วงที่พื้นที่การเกาะติดของคราบแป้งสุกบนแผ่นทดสอบลดลงอย่างรวดเร็ว (0.6 ตารางเซนติเมตรต่อนาที ขึ้นไป) เนื่องจากผลของแรงเฉือนจากสารทำความสะอาด ทำให้เกิดการหลุดออกของคราบที่บวมแล้ว (Fuchs et al., 2013) ซึ่งเกิดจากทั้งความเสียหายจากแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ และความเสียหายซึ่งเกิดจากแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิวของแผ่นทดสอบ จากการทดลอง พบว่า อัตราการหลุดออกที่มุมการวางตัวของพื้นผิวน้อยมากกว่าที่มุมมาก แต่อัตราการหลุดออกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของสารทำความสะอาดมากขึ้น โดยพิจารณาจากความชันของกราฟลักษณะการหลุดออกของช่วง สาเหตุเนื่องจากที่มุมน้อยคราบบวมมากกว่าจึงหลุดออกเร็วกว่าที่มุมมาก และอัตราการไหลมาก จะเกิดแรงเฉือนคราบได้มากกว่าที่อัตราการไหลน้อย

ช่วงที่ 3 ช่วงการหลุดอย่างช้า เป็นช่วงที่พื้นที่ของคราบบนแผ่นทดสอบลดลงอย่างช้า (0 - 0.59 ตารางเซนติเมตรต่อนาที) เนื่องจากคราบบางส่วนที่เหลืออยู่บนพื้นผิวของแผ่นทดสอบเป็นคราบที่ยังไม่เกิดการบวม หรือเป็นคราบบางที่บวมไม่เต็มที่ จึงต้องการทั้งแรงเฉือนจากการไหลของสารทำความสะอาด เพื่อทำลายแรงยึดติดระหว่างคราบบางที่เหลืออยู่กับพื้นผิวของแผ่นทดสอบ และเวลาสัมผัสระหว่างสารทำความสะอาดกับคราบเพื่อการบวมตัว จากการทดลอง พบว่า ผลของมุมและอัตราการไหลส่งผลต่อเวลาในการกำจัดคราบออกจนกว่าคราบเหลือร้อยละ 5 โดยที่มุม 30 องศา ที่อัตราการไหลของสารทำความสะอาดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน พบว่า ใช้เวลาช่วงที่ 3 ใกล้เคียงกับช่วงที่ 1 เป็นผลจากที่มุม 30 องศา คราบมีเวลาสัมผัสกับสารทำความสะอาดตลอดพื้นผิวมากกว่ามุมอื่น จึงมีการถ่ายโอนมวลด้วยการแพร่และทำปฏิกิริยาทำให้คราบบวมตัวมากกว่า และหลุดออกอย่างรวดเร็วด้วยแรงเฉือนที่มากในช่วงที่ 2 และเหลือคราบบางเล็กน้อยในช่วงที่ 3 จึงใช้เวลาน้อยลงในการกำจัดคราบ ในขณะที่มุมอื่น ๆ เวลาในการทำความสะอาดมากกว่าช่วงอื่น ๆ อย่างชัดเจน โดยที่มุมมากเวลาที่ใช้เวลาที่เพิ่มมากขึ้น แต่ที่อัตราการไหลมากเวลาที่ใช้จะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะการหลุดออกของคราบบนพื้นผิวทดสอบร้อยละ 95 ที่มุมและอัตราการไหลต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาผลของลักษณะฟิล์มของเหลวต่อเวลาการทำความสะอาดคราบร้อยละ 95 ของพื้นที่คราบทั้งหมด แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ที่มุม 30 องศา ใช้ระยะเวลาการทำความสะอาดคราบร้อยละ 95 ของพื้นที่คราบทั้งหมดน้อยกว่าที่มุม 60 และ 80 องศา อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เป็นผลเนื่องจากที่มุม 30 องศา มีเวลาการสัมผัสระหว่างสารทำความสะอาดกับคราบมากกว่ามุม 60 และ 80 องศา ซึ่งเป็นผลจากมวลของเหลวไหลลงตามแรงโน้มถ่วงโลกช้ากว่ามุมอื่นจึงเกิดการถ่ายโอนมวล โดยกระบวนการแพร่ได้มากกว่า สอดคล้องกับผลการทดลองของ Lerch et al. (2013) พบว่าที่มุมเอียง 67 องศา กับแนวราบ สามารถทำความสะอาดโรโบฟลาวินได้รวดเร็วกว่ามุมตั้งฉากกับแนวราบ โดยอธิบายผลในลักษณะการถ่ายเทมวลสารเช่นเดียวกัน แต่ผลการทดลองนี้ไม่สอดคล้องกับ Fuchs et al. (2015) ที่ศึกษาลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีผลต่อพฤติกรรมการทำความสะอาดของแซนแทนกัม พบว่า มุมการวางตัวของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการทำความสะอาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของความเค้นเฉือนของผนังเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการแพร่มีความสำคัญน้อยมากกับแซนแทนกัม จึงเป็นสาเหตุทำให้ผลการทดลองมีความแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลของสารทำความสะอาด พบว่า ที่อัตราการไหลมากขึ้น ระยะเวลาที่ใช้จะน้อยลง เนื่องจากผลของปริมาณสารทำความสะอาดมากขึ้น ทำให้ความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความเค้นเฉือนกระทำกับคราบ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Fuchs et al. (2015) และ Lerch et al. (2013) พบว่า ที่อัตราการไหลสูงมีทำความสะอาดได้ดีกว่าที่อัตราการไหลต่ำ โดยทั้งมุมและอัตราการไหลมีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.1 ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อเวลาการทำความสะอาดคราบร้อยละ 95 ของพื้นที่คราบทั้งหมด

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	เวลาการทำความสะอาดคราบร้อยละ 95 ของพื้นที่คราบทั้งหมด (นาที)		
	มุมเอียงของพื้นผิว (องศา)		
	30	60	80
100	22.47±6.62 ^{Aa}	52.17±4.66 ^{Bc}	55.69±2.60 ^{Bc}
200	8.89±1.41 ^{Aa}	31.69±4.53 ^{Bb}	35.00±0.33 ^{Bb}
300	8.25±0.97 ^{Aa}	15.46±0.40 ^{ABa}	19.19±2.96 ^{Ba}

^{A, B} : อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

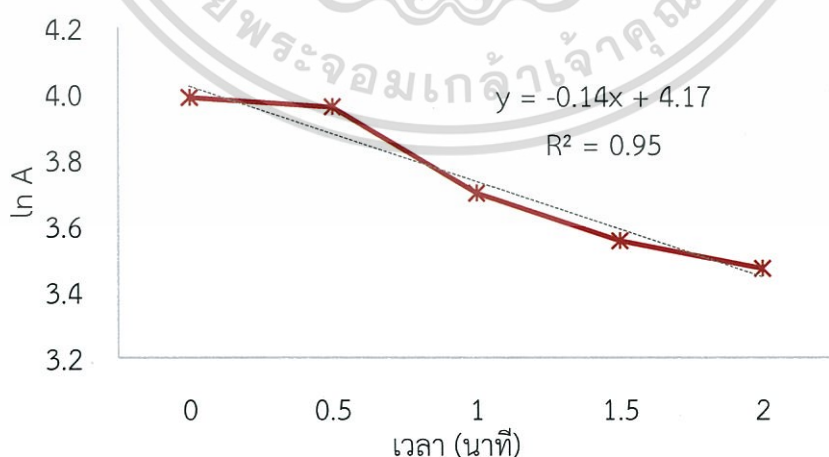
^{a, b, c} : อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.3 การประเมินการทำความสะอาด

พิจารณาผลของอัตราการไหลต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูง เฉพาะที่มุม 80 องศา เนื่องจากเป็นมุมที่ทำความสะอาดยากกว่ามุม 30 และ 60 องศา และใกล้เคียงกับมุมตั้งฉากกับแนวราบที่พบมากในพื้นที่ผิวสัมผัสอาหารของเครื่องจักรและอุปกรณ์ เช่น ถังผสมต่าง ๆ เพื่อออกแบบรูปแบบการทำความสะอาด ตามลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสูง โดยประเมินการทำความสะอาดด้วยพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

ช่วงที่ 1 ช่วงการบวมตัวของคราบ เป็นผลจากเนื่องจากการการสัมผัสระหว่างคราบแป้งสูงกับสารทำความสะอาด เกิดการถ่ายโอนมวลสารของสารทำความสะอาดเข้าสู่ภายในคราบโดยการแพร่ และทำปฏิกิริยากับคราบจนเกิดการบวมตัวขึ้น โดยพื้นที่ของคราบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น จึงประเมินการทำความสะอาดจากเวลาที่ใช้ในการบวมตัว ตั้งแต่คราบสัมผัสกับสารทำความสะอาดจนเริ่มหลุดออกจากพื้นผิวเป็นหลัก

ช่วงที่ 2 ช่วงการหลุดออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลจากแรงเฉือนจากสารทำความสะอาด ทำให้เกิดการหลุดออกของคราบที่บวมแล้ว ทั้งความเสียหายจากแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบ และความเสียหายซึ่งเกิดจากแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิวของแผ่นทดสอบ ดังนั้น จึงประเมินการทำความสะอาดด้วยตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด ทั้งด้านเวลา (E_t) และสารทำความสะอาด (E_p) ซึ่งเป็นปัจจัยด้านต้นทุนที่สำคัญในอุตสาหกรรม (Köhler et al., 2015) และเนื่องจากเป็นช่วงที่ควบคุมอัตราการทำความสะอาด (Patrick et al., 2014) จึงวิเคราะห์กลศาสตร์การทำความสะอาด และหาค่าคงที่อัตราการทำความสะอาดเฉลี่ย (k) จากความชันเส้นแนวโน้มของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของ $\ln(A)$ กับเวลาในการทำความสะอาดคราบบนแผ่นทดสอบ ดังรูปที่ 4.13 ทั้งนี้พิจารณาตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านเวลาเป็นหลัก



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของ $\ln(A)$ กับเวลา ในการทำความสะอาดคราบบนแผ่นทดสอบวางตัวทำมุม 80 องศา กับแนวราบ ที่อัตราการไหล 300 ลิตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และช่วงที่ 3 ช่วงการหลุดอย่างช้า เนื่องจากคราบบางส่วนที่เหลื่ออยู่บนพื้นผิวของแผ่นทดสอบเป็นคราบที่ยังไม่เกิดการบวม หรือเป็นคราบบางที่บวมไม่เต็มที่ จึงต้องการทั้งแรงเฉือนจากการไหลของสารทำความสะอาด เพื่อทำลายแรงยึดติดระหว่างคราบบางที่เหลื่ออยู่กับพื้นผิวของแผ่นทดสอบ และเวลาสัมผัสระหว่างสารทำความสะอาดกับคราบเพื่อการบวมตัว ดังนั้น จึงประเมินการทำความสะอาดด้วยตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด ทั้งด้านเวลา (E_t) และสารทำความสะอาด (E_s) โดยพิจารณาตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านเวลาเป็นหลัก

รูปแบบการทำความสะอาดคราบแป้งสก ที่พิจารณาจากพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินการทำความสะอาดตามลักษณะการหลุดออกของคราบแป้งสก แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 ช่วงการบวมตัวของคราบ ประเมินการทำความสะอาดจากเวลาที่ใช้ในการบวมตัว แสดงดังตารางที่ 4.2 ตั้งแต่คราบสัมผัสกับสารทำความสะอาดจนเริ่มหลุดออกจากพื้นผิว โดยเวลาที่ใช้ในการบวมตัวมาก แสดงถึงเวลาในการสัมผัสมาก จากการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ลดลง เนื่องจากเมื่อความหนาฟิล์มมาก ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือนมาก แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Gillham et al. (2000) ที่พบว่า อัตราการไหลของลักษณะการไหลแบบพัลส์ไม่ส่งผลต่อช่วงการบวมของเวย์โปรตีน ทั้งนี้ คราบแป้งสกต้องการเวลาสัมผัสเพื่อให้เกิดการบวมก่อน และหลุดออกอย่างรวดเร็วในขั้นตอนถัดไป ดังนั้น ที่อัตราการไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบ หรือที่อัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถเกิดฟิล์มของเหลวสัมผัสกับพื้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของคราบจึงเหมาะสมต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสกในช่วงการบวมตัว และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายด้านปริมาณสารทำความสะอาด

ตารางที่ 4.2 ผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดช่วงที่ 1

มุมเอียงของพื้นผิว (องศา)	อัตราการไหลสารทำความสะอาด (ลิตรต่อชั่วโมง)	เวลาทำความสะอาดเฉลี่ย (นาที)
80	100	1.00 ± 0.00^{ns}
	200	0.75 ± 0.35^{ns}
	300	0.75 ± 0.35^{ns}

^{ns} : ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ช่วงที่ 2 ช่วงการหลุดออกอย่างรวดเร็ว ประเมินการทำความสะอาดด้วยตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด ร่วมกับค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด พบว่า ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านเวลา (E_t) ที่แสดงถึงอัตราการหลุดออกของคราบได้มาก จากการทดลองพบว่า ที่อัตราการไหลในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่ มีค่ามากกว่าที่อัตราการไหลในช่วงการไหลที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p <$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.05) เป็นผลเนื่องจากคราบที่บวมต้องการแรงเฉือน เพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวภายในคราบและแรงยึดติดระหว่างคราบกับพื้นผิวทดสอบ เมื่ออัตราการไหลมากขึ้น มีแรงเฉือนมากมากระทำจึงหลุดออกอย่างรวดเร็วมากและการไหลปั่นป่วนอย่างเต็มที่ซึ่งก่อให้เกิดแรงเฉือนภายในที่ทำให้คราบหลุดได้มากขึ้นโดยผลการทดลองสอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการทำความสะอาดที่แสดงถึงอัตราการทำความสะอาดเช่นเดียวกัน แต่พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และเมื่อพิจารณาตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านปริมาณสารทำความสะอาด (E_p) ที่บ่งบอกถึงความคุ้มค่าของปริมาณสารทำความสะอาด พบว่า ผลของอัตราการไหลไม่มีผลต่อความคุ้มค่าของปริมาณสารทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังนั้น อัตราการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่จึงมีความเหมาะสมกับช่วงการหลุดออกอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 4.3 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดและค่าคงที่อัตราการทำความสะอาดช่วงที่ 2

มุมเอียงของ พื้นผิวทดสอบ (องศา)	อัตราการไหลสาร ทำความสะอาด (ลิตรต่อชั่วโมง)	E_t (ตารางเซนติเมตร ต่อนาที)	E_p (ตารางเซนติเมตร ต่อลิตร)	k (นาที่ ⁻¹)
80	100	2.93 ± 0.53^a	1.76 ± 0.32^{ns}	0.04 ± 0.01^{ns}
	200	3.01 ± 0.29^a	0.90 ± 0.09^{ns}	0.04 ± 0.00^{ns}
	300	8.52 ± 2.38^b	1.70 ± 0.48^{ns}	0.11 ± 0.03^{ns}

^{a, b} : อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} : ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

และช่วงที่ 3 ช่วงการหลุดอย่างช้า ประเมินการทำความสะอาดด้วยตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด ดังตารางที่ 4.4 พบว่า ที่อัตราการไหลช่วงการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านเวลา (E_t) มากกว่าอัตราการไหลช่วงเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงถึงอัตราการหลุดออกของคราบที่มากกว่า เป็นผลเนื่องจากคราบที่เหลืออยู่ ต้องการทั้งเวลาสัมผัสเพื่อการบวม และแรงจากการไหลของสารทำความสะอาด เพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวภายในและแรงยึดติด และเมื่อพิจารณาตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านปริมาณสารทำความสะอาด (E_p) พบว่า ผลของอัตราการไหลไม่มีผลต่อความคุ้มค่าของปริมาณสารทำความสะอาดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ดังนั้น อัตราการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่จึงมีความเหมาะสมกับช่วงการหลุดออกอย่างช้า

ตารางที่ 4.4 ตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดช่วงที่ 3

มุมเอียงของ พื้นผิวทดสอบ (องศา)	อัตราการไหล สารทำความสะอาด (ลิตรต่อชั่วโมง)	E_t (ตารางเซนติเมตร ต่อนาที)	E_f (ตารางเซนติเมตร ต่อลิตร)
80	100	0.17 ± 0.02^a	0.10 ± 0.01^{ns}
	200	0.41 ± 0.02^b	0.12 ± 0.01^{ns}
	300	0.42 ± 0.07^b	0.08 ± 0.01^{ns}

^{a, b}: อักษรที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns}: ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้นำเสนอผลของลักษณะฟิล์มของเหลวที่มีต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูกบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 316 ที่วางตัวในมุม 30, 60 และ 80 องศา กับแนวราบ ด้วยอัตราการไหลของสารทำความสะอาด 100, 200 และ 300 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล เป็นตัวแทนของสารทำความสะอาด และตรวจสอบการล้างคราบแป้งสูกซึ่งมีลักษณะใสออกจากแผ่นทดสอบโดยเทคนิคการถ่ายภาพอินฟราเรด และปรับภาพเป็นรูปแบบระดับสเกลสีเทา เพื่อวิเคราะห์พื้นที่คราบแป้งสูกที่เหลืออยู่บนแผ่นทดสอบ สำหรับใช้ศึกษาลักษณะการหลุดของคราบ โดยพิจารณาพื้นที่คราบแป้งสูกจนกระทั่งคราบแป้งสูกถูกกำจัดออกมากกว่าร้อยละ 95 ของคราบทั้งหมด จากการทดลอง พบว่า มุม 80 องศา ใช้เวลาการทำความสะอาดคราบร้อยละ 95 ของพื้นที่คราบทั้งหมดมากที่สุด

ในการศึกษาครั้งนี้จึงใช้มุม 80 องศา สำหรับพิจารณาผลของอัตราการไหลต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูก เพื่อออกแบบรูปแบบการทำความสะอาด โดยพบว่า ลักษณะการหลุดออกของคราบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ช่วงการบวมตัวของคราบ ประเมินการทำความสะอาดจากเวลาที่ใช้ในการบวมตัว พบว่า อัตราการไหลไม่มีผลต่อเวลาการบวมตัวของคราบแป้งสูก ดังนั้น ที่อัตราการไหลในช่วงการไหลแบบราบเรียบ หรือที่อัตราการไหลต่ำสุดที่สามารถเกิดฟิล์มของเหลวสัมผัสกับพื้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของคราบจึงเหมาะสมต่อการทำความสะอาดคราบแป้งสูกในช่วงการบวมตัว ช่วงที่ 2 ช่วงการหลุดออกอย่างรวดเร็ว ประเมินการทำความสะอาดด้วยตัวบ่งชี้สมรรถนะ การทำความสะอาดร่วมกับค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด พบว่า ที่อัตราการไหลในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่ที่มีตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านเวลามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด ดังนั้น อัตราการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่จึงมีความเหมาะสมกับช่วงการหลุดออกอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม สามารถคาดการณ์การทำความสะอาดภายในช่วงจากสมการจลนศาสตร์การทำความสะอาดด้วยค่าคงที่อัตราการทำความสะอาด และช่วงที่ 3 ช่วงการหลุดอย่างช้า ประเมินการทำความสะอาดด้วยตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาด ที่อัตราการไหลช่วงการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าตัวบ่งชี้สมรรถนะการทำความสะอาดด้านเวลามากกว่าอัตราการไหลช่วงเปลี่ยนแปลง ดังนั้น อัตราการไหลแบบปั่นป่วนอย่างเต็มที่จึงมีความเหมาะสมกับช่วงการหลุดออกอย่างช้า

อย่างไรก็ตามการประมวลผลภาพถ่ายอินฟราเรดเป็นเทคนิคที่สามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของตะกอนของแข็งที่มีลักษณะใสได้เฉพาะเชิงพื้นที่เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของการตรวจวัดพื้นที่คราบแข็งด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน ด้วยเทคนิคการให้ความร้อนแผ่นทดสอบส่งผลทำให้ลักษณะการหลุดของคราบแข็งมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) งานวิจัยนี้ควรพัฒนาการตรวจวัดพื้นที่คราบด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อนในระดับปฏิบัติการด้านเทคนิคการให้ความร้อนแผ่นทดสอบไม่ส่งผลต่อลักษณะการหลุดของคราบแข็ง เพื่อศึกษาความหนาของคราบจากภาพถ่ายอินฟราเรดเชิงคุณภาพ ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการหลุดออกของคราบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ เทคนิคการภาพถ่ายอินฟราเรดสำหรับการตรวจสอบการสะสมของสารอินทรีย์ เป็นการถ่ายภาพบริเวณที่มีการสะสมของสารอินทรีย์ โดยในอุตสาหกรรมอาหาร การถ่ายภาพภาพถ่ายอินฟราเรดการสะสมของสารอินทรีย์นั้นทำได้ยาก เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่มักทำในกระบวนการปิดซึ่งไม่สามารถมองเห็นการสะสมของสารอินทรีย์ได้ จึงควรพัฒนาวิธีการถ่ายภาพภาพถ่ายอินฟราเรดให้สามารถถ่ายภาพบริเวณที่ไม่เกิดการสะสมของสารอินทรีย์ได้ เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

2) งานวิจัยนี้ควรพัฒนาโดยพิจารณาผลร่วมกับการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic, CFD) ในการจำลองการหลุดออกของคราบ เพื่อความถูกต้องแม่นยำ และสามารถประยุกต์ใช้แทนการสร้างชุดทดสอบ ซึ่งประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

บรรณานุกรม

- Awad, M.M. 2011. "Fouling of Heat Transfer Surfaces". *Heat Transfer Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems*. 505-542.
- Challa R., Johnston, D., Singh, V., Tumbleson, M., 2015, **Fouling characteristics of model carbohydrate mixture and their interaction effects**. *Food and Bioproducts Processing*. 93 (2015) 197 – 204.
- Dickinson, R. B., and Cooper. S. L., 1995, **Analysis of Shear-Dependent Bacterial Adhesion Kinetics to biomaterial Surfaces**, *AIChE J*, Vol. 41(9), pp. 2060-2174.
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine. 2007. Chapter 3 One-Dimensional, Steady-State Conduction. *Introduction to Heat Transfer 5th Edition*. 95 – 112.
- Fryer, P.J. and Asteriadou, K. 2009. **A prototype cleaning map: A classification of industrial cleaning process**. *Trends in food Science & Technology*, 20, 255 – 262.
- Fuchs, E. Boye, A. Stoye, H. Mauermann M. and Majschak, J.-P. 2013. **Influence of the film flow characteristic on the cleaning behavior**. *International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. 411-420.
- Fuchs, E. Boye, A. Murcek, R. and Majschak, J.-P. 2015. **An experimental comparison of film flow parameters and cleaning behavior of falling liquid films for different tilt angles**. *Food and Bioproducts Processing*.
- Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M., Wilson, D.I., 1999, **Cleaning-in-Place of whey protein fouling deposits: Mechanisms controlling cleaning**, *Food and Bioproducts Processing*, 77(2), 127-136.
- Grant, C. S., Webb, G. E., and Jeon, Y.W., 1996, **Calcium phosphate decontamination of stainless steel surfaces**, *AIChE J*, Vol. 42(3), pp. 861-875.
- Khalid, N.I. Nordin, N. Aziz, N.Ab. Nuraini, A.A. Taip, F.S. and Ahmedov, A. 2015. **Removal kinetic of pink guava puree fouling deposit from a stainless surface during alkaline cycle**. *Proceedings of International on Heat Exchanger fouling and cleaning -2015*.
- Khalid, N.I. Nordin, N. Aziz, N.Ab. Nuraini, A.A. Taip, F.S. and Ahmedov, A. 2016. **A removal kinetic approach for evaluation of economic cleaning of pink guava puree fouling deposit**. *Journal of Cleaner Production* 135 (2016) 1317 – 1326.

- Köhler, H., Stoye, H., Mauermann, M., Majschack, J. P., 2015, **How to assess cleaning? Evaluating the cleaning performance of moving impinging jets.** Food and Bioproducts Processing. 93 (2015) 327 – 332.
- Lan, Y., Fang, Q., Kocher, M. F., & Hanna, M. A., 2000, **Thermal properties of tapioca starch, International Journal of Food Properties, 3:1, 105-116.**
- Lelieve, C., Antonini, G., Faille, C., and Benezech, T., 2002, **CLEANING-IN-PLACE Modelling of Cleaning Kinetics of Pipes Soiled by Bacillus Spores Assuming a Process Combining Removal and Deposition,** TranslChemE, Vol. 80 C (7),pp. 305-311.
- Lerch, K., Hinrichs, J., Dittmer, P. and Rauschnable, J., 2013. **Cleanability of surfaces from active pharmaceutical ingredient surrogate riboflavin by falling film.** Chem. Ing. Tech. 85 (3), 323-332.
- Patrick W. Gordon, Schöler M., Föste H., Manuel, M., Augustin W., Y.M. John Chew, Scholl S., Majschak J-P and D. Ian Wilson, **A comparison of local phosphorescence detection and fluid dynamic gauging methods for studying the removal of cohesive fouling layers: Effect of layer roughness.** Food and Bioproducts Processing, 10.1016/j.fbp.2013.07.010, 92,1, (46-53), (2014).
- Takamasa, T. and Hazuku, T., 2000, **Measuring interfacial waves on film flowing down a vertical plate wall in the entry region using laser focus displacement meters,** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, no. 15, pp. 2807 – 2819.
- Tamime, A.Y. 2008. **Cleaning-in-Place: Dairy, Food and Beverage Operations Third Edition.** Blackwell Publishing.
- Xin, H. Chen, X.D., Ozkan, N., 2003, **A mathematical model of the removal of milk protein deposit, Proc. Heat Exchanger Fouling and Cleaning Fundamentals and Applications,** Santa Fe, USA.
- Zanoni, B., Peri, C., and Bruno, D., 1995, **Modelling of Starch Gelatinization Kinetics of Bread Crumb during Baking.** Lebensm.-Wiss. u.-Technol.. 28. 314-318.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

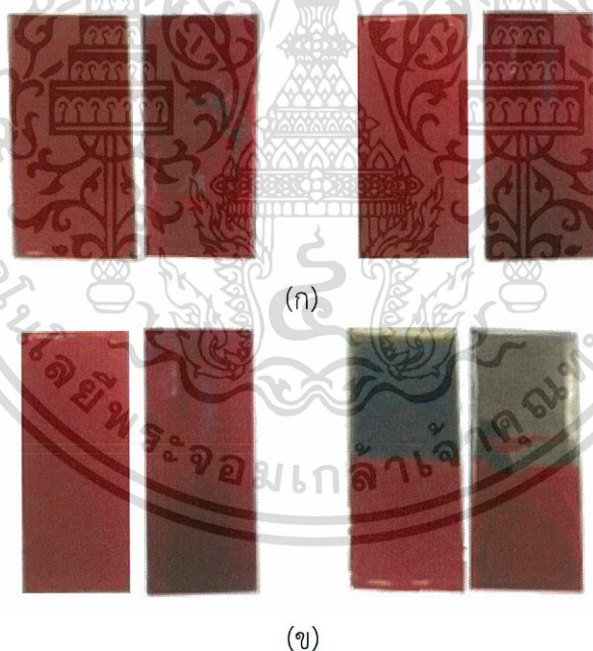


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การทดลองเบื้องต้น

1.1 ศึกษาวิธีการเตรียมคราบแป้งสุก

เตรียมตัวอย่างคราบแป้งสุกเพื่อใช้ในการจำลองคราบแป้งสุกในถังผสม ประกอบด้วยคราบแป้งสุก 2 ส่วน ได้แก่ คราบแป้งสุกส่วนเปียก และคราบแป้งสุกส่วนแห้ง เบื้องต้นได้ศึกษาการทดลองส่วนผสมน้ำแป้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งใช้น้ำแป้งสุกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยมีมวลต่อปริมาตร และร้อยละ 7 โดยมีมวลต่อปริมาตร ได้รับความร้อนผ่านน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนใบกวนที่ใช้ในกวนน้ำแป้งสุกคงที่ เป็นเวลา 20 นาที เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเกาะติดบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมจากการสังเกตด้วยสายตา และศึกษาการทำความสะดวกจากตรวจวัดจากพื้นที่ที่ลดลงของคราบ ทำให้ต้องทดลองวิธีทำให้คราบแป้งสุกมีความหนาตลอดทั้งแผ่นทดสอบ โดยใช้ส่วนผสมอาหารสีแดงผสมในน้ำแป้งสุกเพื่อให้สามารถสังเกตการหลุดออกของคราบด้วยสายตา จึงเคลือบน้ำแป้งสุกลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ขนาด 4 x 10 เซนติเมตร ความหนา 0.4 เซนติเมตร ที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ย 0.8 ไมโครเมตร ด้วยวิธีปาดน้ำแป้งสุกลงบนพื้นผิวทดสอบ และวิธีการจุ่มแผ่นทดสอบลงในน้ำแป้งสุก 3 วินาที จึงสังเกตคราบแป้งสุกบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยสายตา



รูปที่ 1 พิจารณาการเลือกเงื่อนไขในการเตรียมคราบแป้งสุก (ก) ลักษณะคราบแป้งสุก

เมื่อมีความเข้มข้นแตกต่างกันน้ำแป้งสุกความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 7 โดยมีมวลต่อปริมาตร ตามลำดับ

(ข) ลักษณะการคราบแป้งสุกด้วยการปาดคราบ และการจุ่มคราบ ตามลำดับ

จากการศึกษาวิธีการเตรียมคราบแป้งสุกที่ได้รับความร้อนผ่านน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที โดยน้ำแป้งสุกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยมวลต่อปริมาตร มีความเหนียวกว่าน้ำแป้งสุกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยมวลต่อปริมาตร เมื่อนำน้ำแป้งสุกทั้งสองมาเคลือบบนแผ่นทดสอบ พบว่า น้ำแป้งสุกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 7 โดยมวลต่อปริมาตร มีการเกาะติดบนพื้นผิวได้ดีกว่า แสดงดังรูปที่ 1 (ก)

จากรูปที่ 1 (ข) แสดงการศึกษาวิธีทำให้คราบแป้งสุก มีความหนาคงที่ตลอดทั้งแผ่น โดยการใช้วิธีจุ่มแผ่นทดสอบลงในน้ำแป้งสุกทำให้คราบมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น แต่มีความหนาของชั้นคราบแป้งสุกน้อยมาก เมื่อนำแผ่นทดสอบไปอบหรือปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง พบว่า คราบแป้งสุกหลุดลอกออกเป็นแผ่น และไม่สามารถจุ่มน้ำแป้งสุกเคลือบพื้นผิวทั้งหมดของแผ่นทดสอบได้ จึงเลือกวิธีการปาดน้ำแป้งสุกลงบนแผ่นทดสอบ ให้มีความหนา 1 มิลลิเมตรตลอดทั้งแผ่นทดสอบ

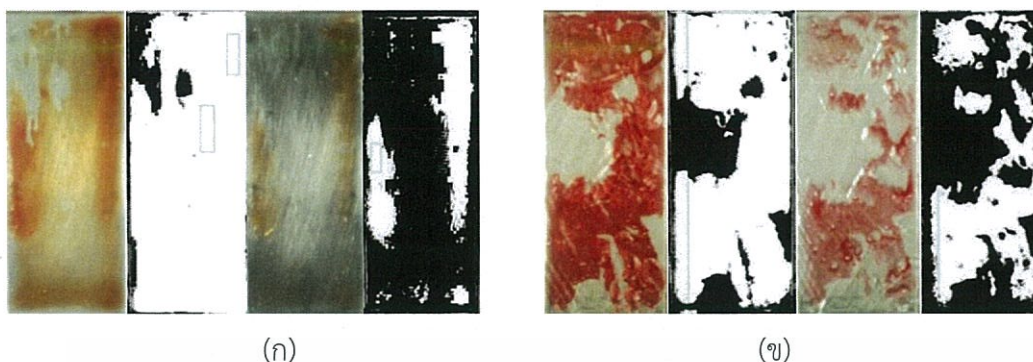
1.2 การตรวจวัดพื้นที่คราบแป้งสุกบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

เตรียมแผ่นทดสอบด้วยวิธีข้างต้น โดยเติมสีผสมอาหาร 2 ชนิด ได้แก่ สีผสมอาหารแบบผง (สีส้มแดง 735 ตราดาว) มวล 1 กรัม และ สีผสมอาหารแบบเจล (ไอซ์ซิ่ง คัลเลอร์ สีเรด ตราวิลตัน) ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร สำหรับขั้นตอนการเตรียมน้ำแป้งสุก ทำความสะอาดแผ่นทดสอบด้วยน้ำประปาที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ชุดทดลองข้างต้น ซึ่งปรับมุมการวางตัวพื้นผิว 30 องศา กับแนวราบ และปรับอัตราการไหลของสารทำความสะอาด 100 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาทำความสะอาด 20 นาที แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การบันทึกภาพด้วยกล้องยานการมองเห็น โดยใช้กล้อง CCD (Basler รุ่น acA2500-14gc) ในการบันทึกภาพและใช้โปรแกรม NI Vision Builder (Demo 2014) สำหรับประมวลผลการลดลงของคราบแป้งสุกบนแผ่นทดสอบตามเวลาจริง (Real time)

ส่วนที่ 2 การบันทึกภาพด้วยกล้องยานอินฟราเรด โดยให้ความร้อนแผ่นทดสอบ 60 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 10 นาที บันทึกภาพยานอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (FLUKE รุ่น Ti400 Infrared Camera) ทุก 2 นาที และปรับภาพถ่ายยานอินฟราเรดทุกภาพให้อยู่ในระดับอุณหภูมิ และช่วงอุณหภูมิเดียวกัน ด้วยโปรแกรม SmartView 4.1 โดยการเลือกวิธีตรวจสอบพื้นที่คราบแป้งสุกบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้วิธีการสังเกตด้วยสายตาเพื่อเปรียบเทียบลักษณะภาพถ่ายยานการมองเห็นกับภาพถ่ายยานอินฟราเรด

การศึกษาวีธีตรวจวัดด้วยภาพถ่ายยานการมองเห็นโดยใช้สีผสมอาหารแบบผง แสดงดังรูปที่ 2 (ก) การประมวลผลค่าพื้นที่คราบแป้งสุกมีความผิดพลาด เนื่องจากการสังเกตด้วยสายตา พบว่า เมื่อทำความสะอาดสีหลุดละลายไปกับน้ำ ทำให้เกิดคราบสีโสมบนแผ่นทดสอบ ซึ่งโปรแกรมตรวจวัดเป็นพื้นที่ของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม



รูปที่ 2 การประมวลผลภาพผ่านการมองเห็นของการล้างคราบแป้งสุกที่ผสมสีผสมอาหาร
(ก) แบบผง (ข) แบบเจล

การทดลองเปลี่ยนชนิดสีผสมอาหารเป็นแบบเจล จากการสังเกตพบว่า เมื่อทำความสะอาดคราบสีหลุดละลายไปกับน้ำน้อยกว่าการใช้สีผสมอาหารแบบผง ดังรูปที่ 2 (ข) เมื่อประมวลผลพื้นที่คราบแป้งสุกเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการตรวจวัดบริเวณคราบสีใส เช่นเดียวกัน จึงทำให้การใช้สีผสมอาหารไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสม สำหรับการตรวจวัดพื้นที่คราบแป้งสุกด้วยการวิเคราะห์ภาพผ่านการมองเห็น

ในการศึกษาวิธีตรวจวัดด้วยภาพย่านอินฟราเรด เมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายผ่านการมองเห็น แสดงดังรูปที่ 3 พบว่า สามารถตรวจวัดพื้นที่คราบสีใสที่เกาะติดบนแผ่นทดสอบได้ จึงเลือกใช้วิธีด้วยภาพย่านอินฟราเรดในการตรวจวัดพื้นที่คราบแป้งสุกบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม



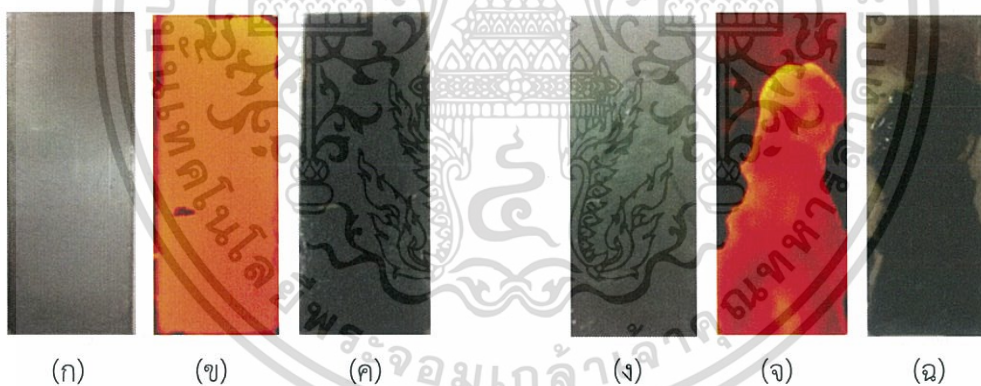
รูปที่ 3 การตรวจวัดพื้นที่การล้างคราบแป้งสุกด้วย
(ก) ภาพถ่ายผ่านการมองเห็น (ข) ภาพถ่ายอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ชนิดของสารทำความสะอาด

เตรียมแผ่นทดสอบด้วยวิธีข้างต้น ทำความสะอาดคราบด้วยสารทำความสะอาด 2 ชนิด คือน้ำประปา และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล ใช้ชุดทดลองข้างต้น ซึ่งปรับระดับมุม 30 องศา กับแนวราบ และปรับอัตราการไหลของสารทำความสะอาด 24 ลิตรต่อชั่วโมง โดยใช้เวลาทำความสะอาด 10 นาที ตรวจวัดพื้นที่คราบแห้งสุกบนแผ่นทดสอบด้วยวิธีการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยการเลือกชนิดของสารทำความสะอาด เพื่อทำความสะอาดคราบแห้งสุกบนแผ่นทดสอบใช้วิธีการสังเกตด้วยสายตา และการทดสอบความสะอาดด้วยสารละลายไอโอดีนเข้มข้น 1%

เมื่อเปรียบเทียบผลการทำความสะอาดคราบแห้งสุกด้วยน้ำประปา และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยมวล แสดงดังรูปที่ 4 พบว่า การทำความสะอาดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้คราบแห้งสุกเกิดการบวมตัวขึ้นมากกว่าการทำความสะอาดด้วยน้ำประปา เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้โมเลกุลของสารทำความสะอาดแทรกตัวจับกับโมเลกุลของคราบ ทำให้คราบมีการบวมตัวมากกว่าการทำความสะอาดด้วยน้ำประปา เมื่อทำการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน พบว่า การทำความสะอาดคราบแห้งสุกด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถทำความสะอาดคราบหลุดออกจากแผ่นทดสอบได้ดีกว่าการใช้น้ำประปาในการทำความสะอาด



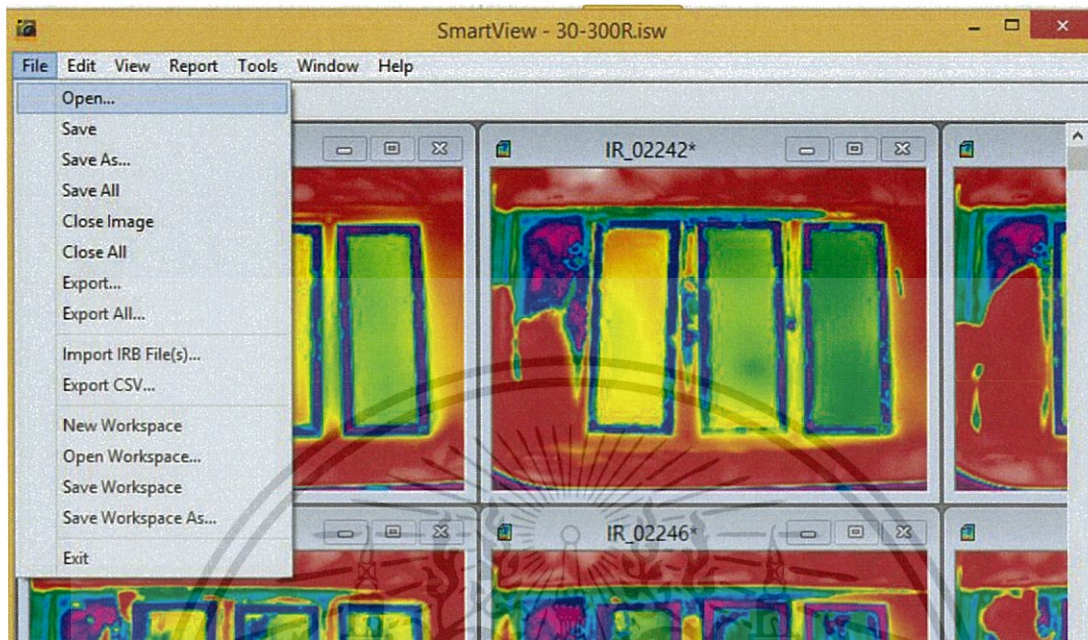
รูปที่ 4 การทำความสะอาดคราบแห้งสุกด้วย (ก, ข, ค) น้ำประปาและ (ง, จ, ฉ) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดย (ก และ ง) ภาพถ่ายย่านการมองเห็น (ข และ จ) ภาพถ่ายย่านอินฟราเรด และ (ค และ ฉ) การทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

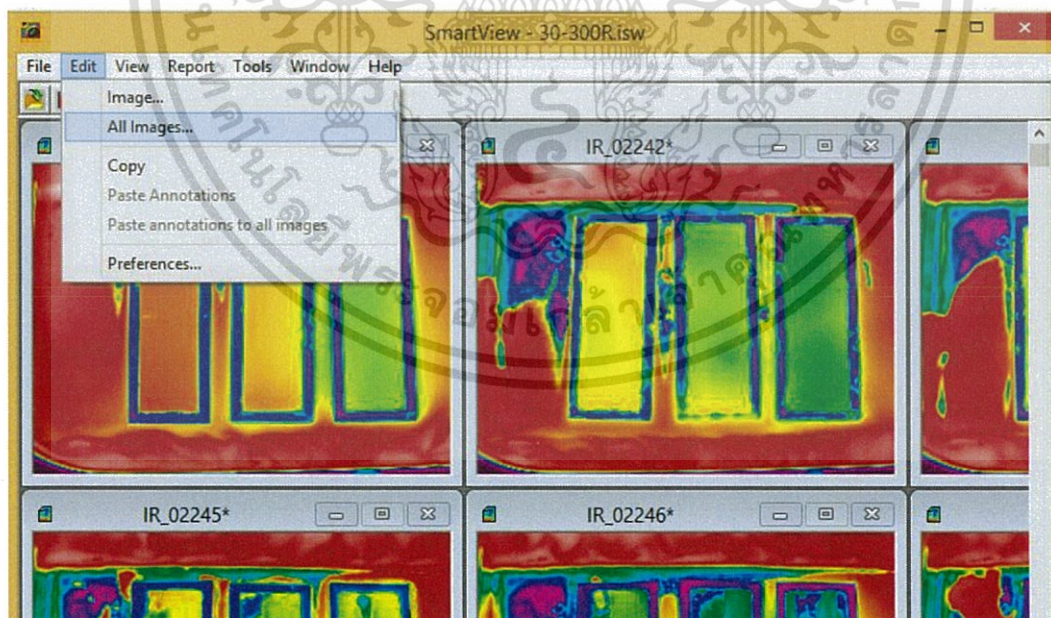
1) การใช้โปรแกรม Smart view 4.1

1.1 คลิกที่ File >>> Open เพื่อเปิดรูปภาพจากกล้องถ่ายภาพความร้อน



รูปที่ 5 การใช้โปรแกรม SmartView 4.1 (1)

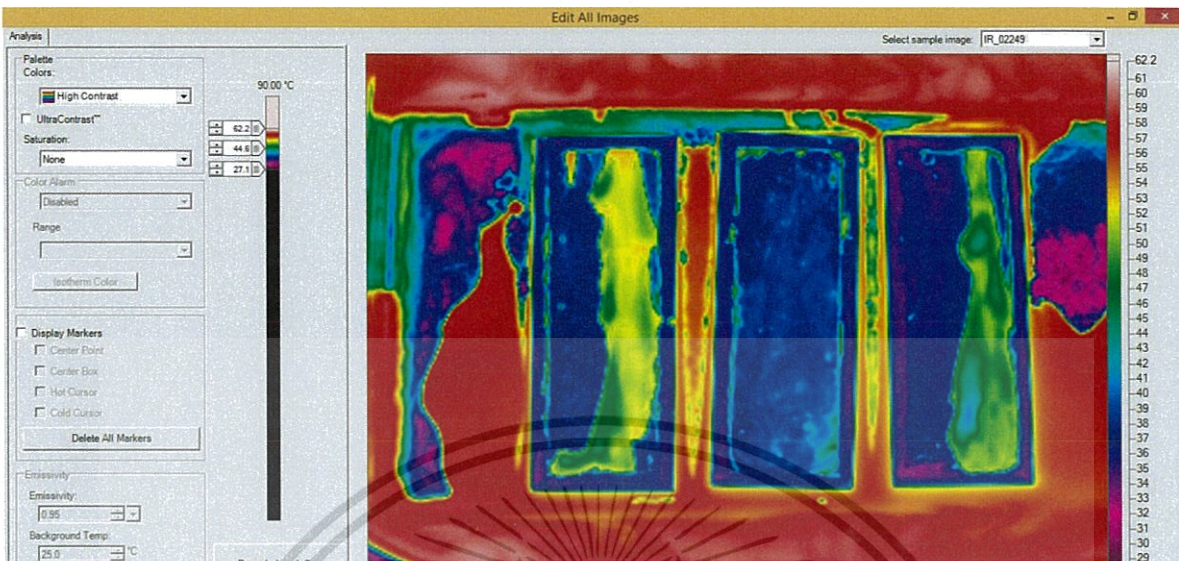
1.2 คลิกที่ Edit >>> All image เพื่อทำการปรับค่า



รูปที่ 6 การใช้โปรแกรม SmartView 4.1 (2)

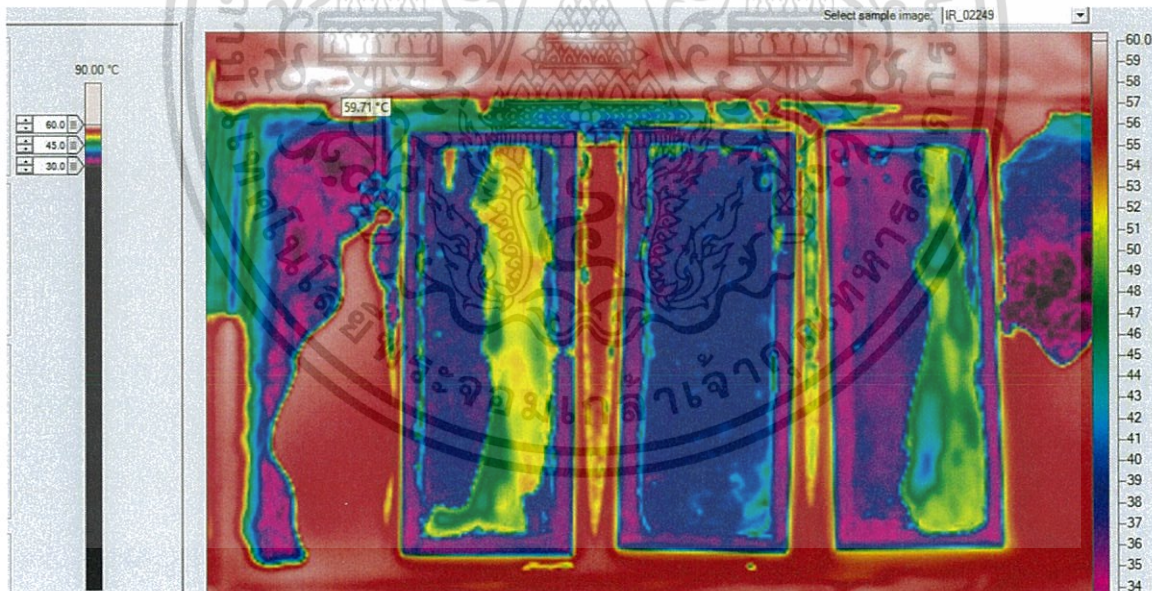
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ได้หน้าต่างการทำงานเพื่อปรับภาพทั้งหมด ดังรูป



รูปที่ 7 การใช้โปรแกรม SmartView 4.1 (3)

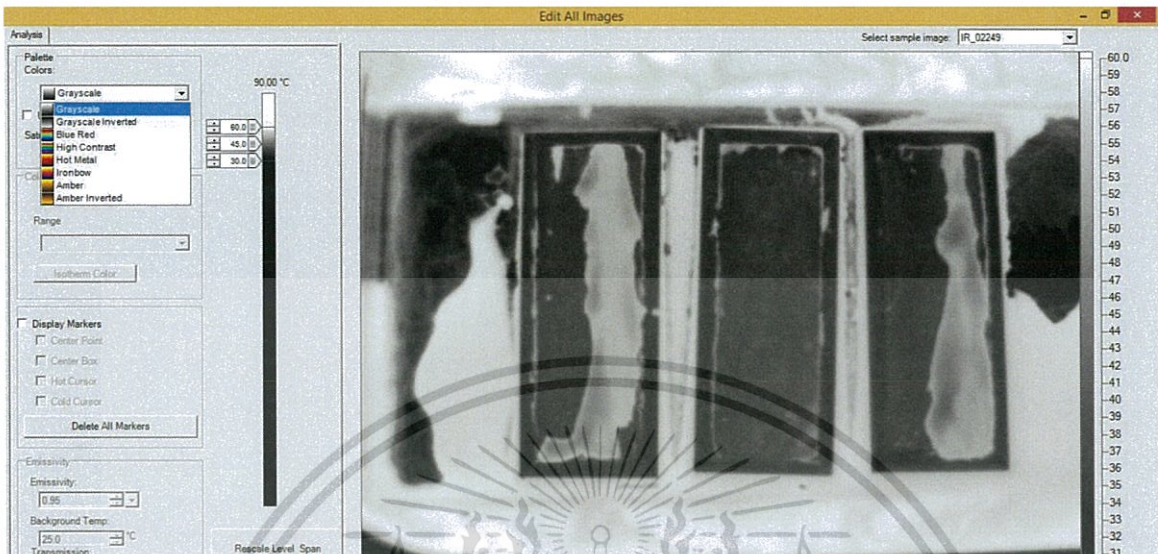
1.4 ปรับระดับ (Level) ให้อยู่ตั้งแต่ 30 – 60 องศาเซลเซียส ซึ่งมีช่วงกว้าง (Span) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 การใช้โปรแกรม 4.1 (4)

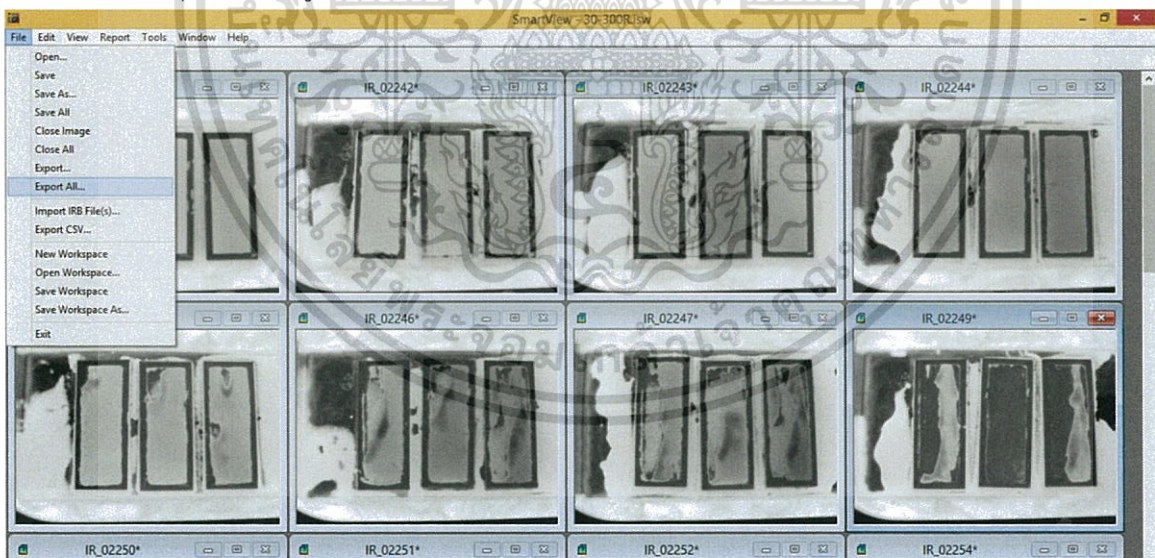
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 เลือก Palette Colors >>> Gray scale แล้วคลิก OK



รูปที่ 9 การใช้โปรแกรม SmartView 4.1 (5)

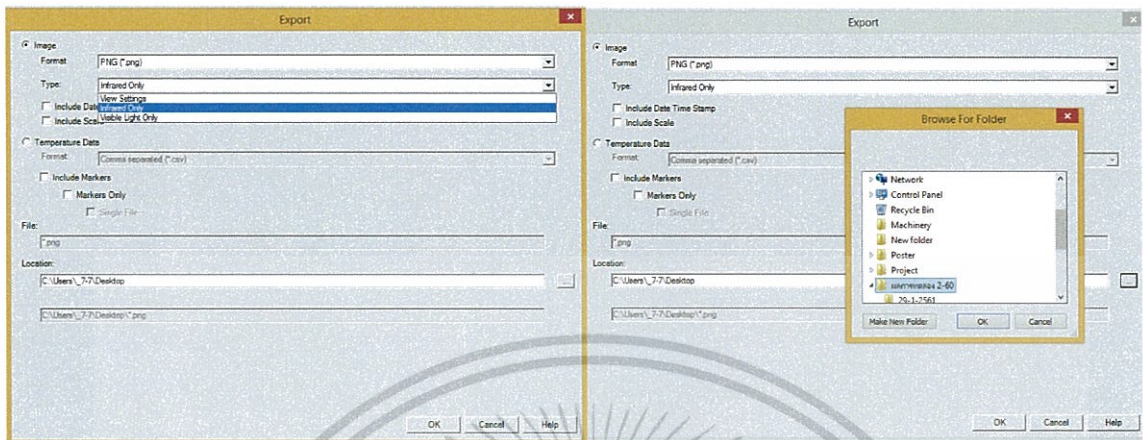
1.6 คลิกที่ File >>> Export All เพื่อบันทึกรูปภาพเป็นไฟล์ .PNG หรือ .JPG เพื่อใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่คราบแบ่งสูกที่เหลื่ออยู่บนพื้นผิวทดสอบ



รูปที่ 10 การใช้โปรแกรม SmartView 4.1 (6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 คลิกที่ Format เพื่อเลือกชนิดของไฟล์รูปภาพ และคลิก Type >>> Infrared Only เพื่อเลือกบันทึกเฉพาะภาพถ่ายย่านอินฟราเรด เท่านั้น



รูปที่ 11 การใช้โปรแกรม SmartView 4.1 (7)

2) การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014

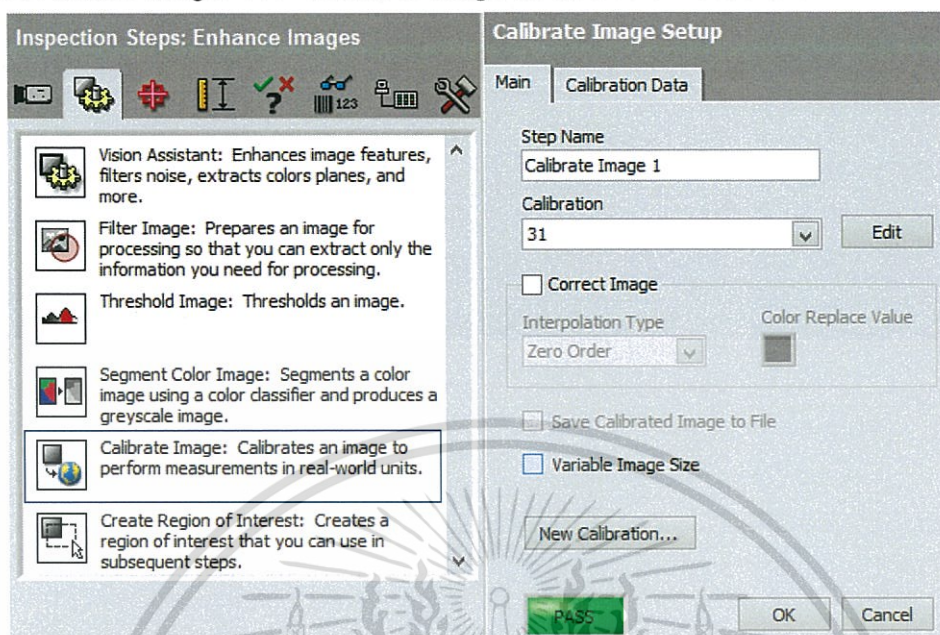
2.1 คลิกที่ Simulate Acquisition >> Path to Image เพื่อเปิดไฟล์รูปภาพที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 12 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 คลิกที่ Enhance Images >>> Calibrate Image แล้วเลือก New Calibration



รูปที่ 13 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (2)

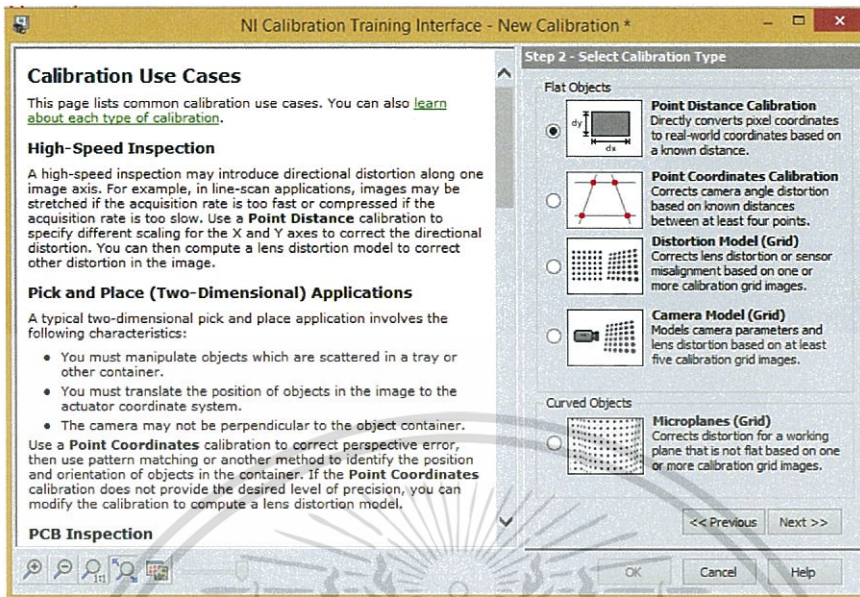
2.3 คลิกที่ Calibration Name เพื่อตั้งชื่อ แล้วจึงกด Next



รูปที่ 14 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (3)

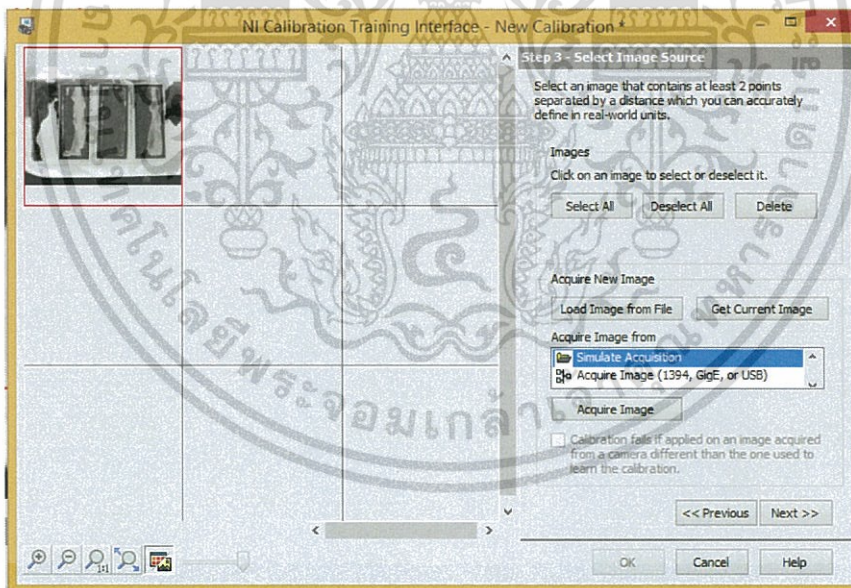
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 คลิกที่ Flat Objects >>> Point Distance Calibration >>> Next



รูปที่ 15 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (4)

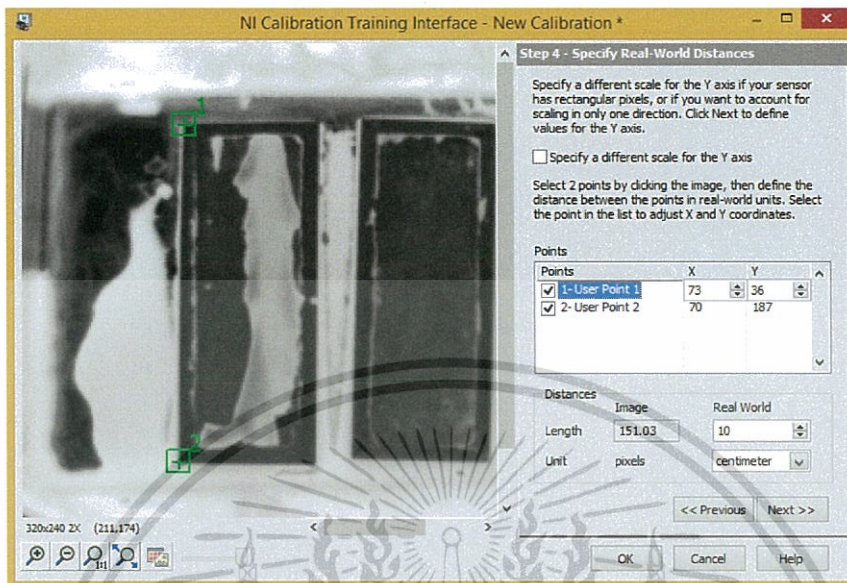
2.5 เลือกรูปภาพที่ต้องการ Calibrate แล้วคลิกที่ Get Current Image >>> Next



รูปที่ 16 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (5)

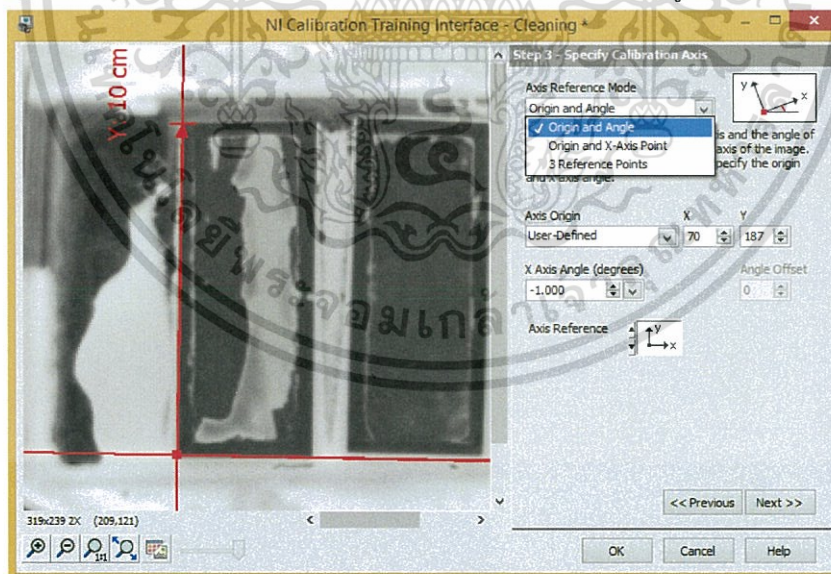
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กำหนดความยาวของแผ่นทดสอบที่ปรากฏกับขนาดความยาวจริงของแผ่นทดสอบ 10 เซนติเมตร แสดงดังรูป แล้วกด Next



รูปที่ 17 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (6)

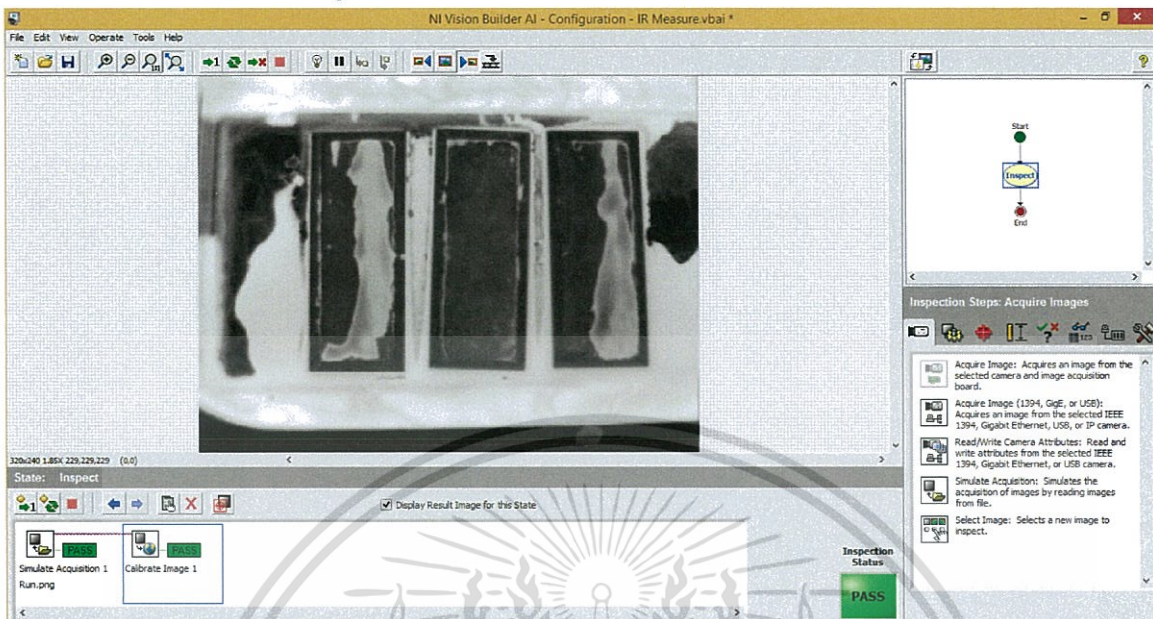
2.7 กำหนดแกนอ้างอิงวัตถุให้จุดกำเนิดอยู่ที่มุมล่างซ้ายของแผ่นทดสอบ โดยเลือก Axis Reference Mode เป็น Origin and Angle และกำหนดทิศทางที่ Axis Reference ดังรูป แล้วกด OK



รูปที่ 18 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (7)

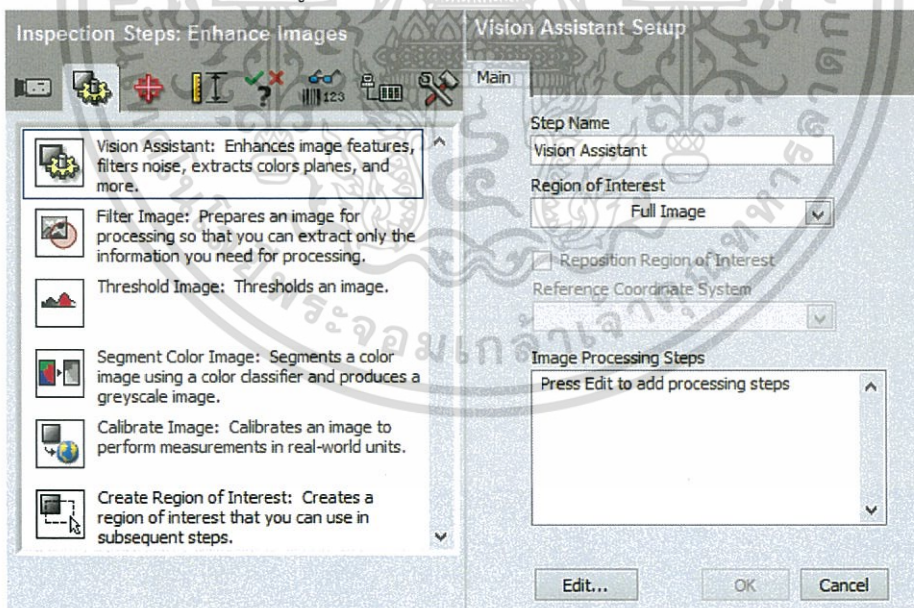
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ได้หน้าต่างการทำงาน ดังรูป



รูปที่ 19 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (8)

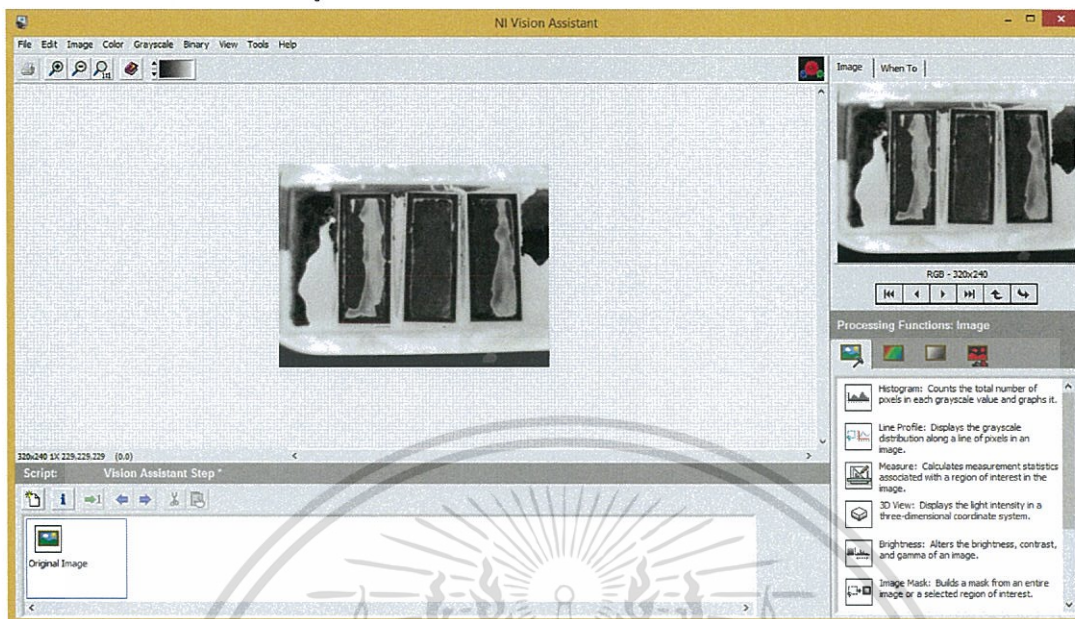
2.9 คลิกที่ Enhance Images >>> Vision Assistant ตั้งค่า Region of Interest >>> Full Image แล้วคลิก Edit เพื่อแก้ไขการปรับแต่งรูปภาพ



รูปที่ 20 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (9)

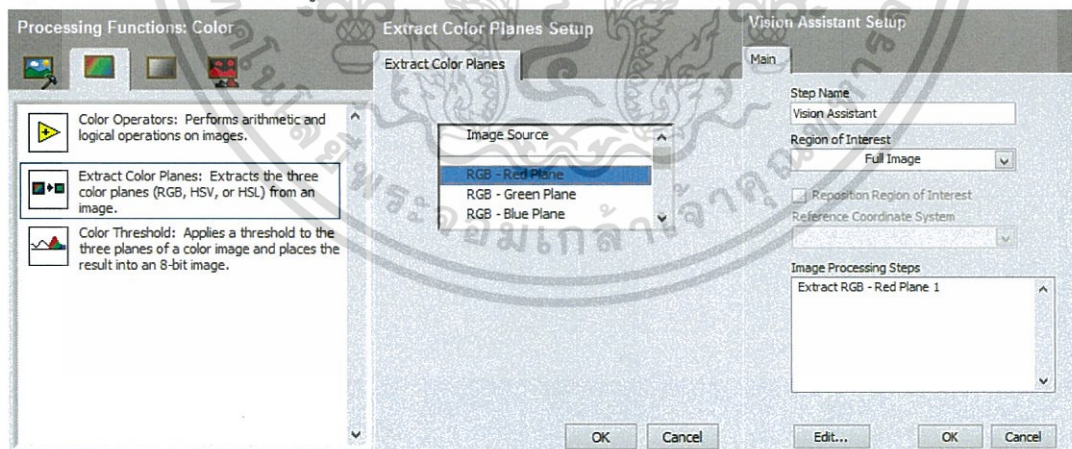
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ได้หน้าต่างการทำงาน ดังรูป



รูปที่ 21 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (10)

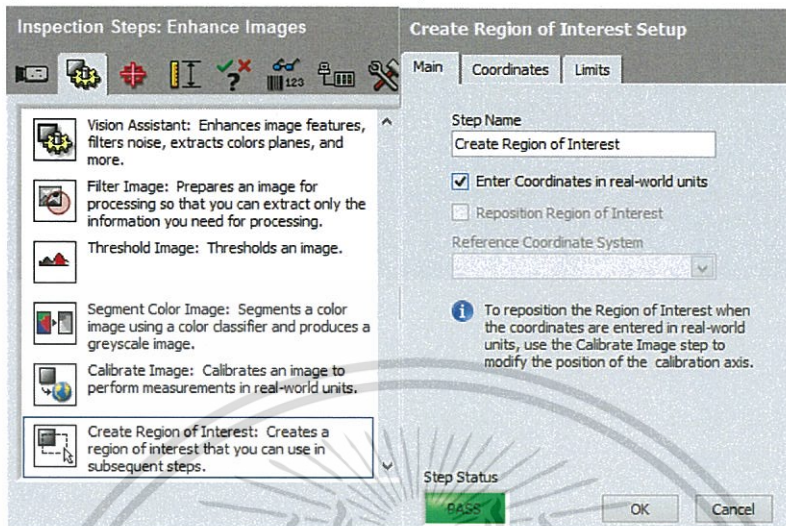
2.11 เลือก Processing Function : Color >>> Extract Color Planes >> RGB – Red Plane เพื่อปรับให้รูปภาพเป็นระดับสีเทา (Gray scale) ซึ่งมีค่าความเข้มสี (Intensity) อยู่เพียงระนาบสีแดง (Red Plane) เท่านั้น จากนั้น OK >> ปิดหน้าต่างการทำงาน แล้วกดอีกครั้ง OK ที่หน้าต่าง Vision Assistant Setup เพื่อยืนยันการปรับแต่งรูปภาพ



รูปที่ 22 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (11)

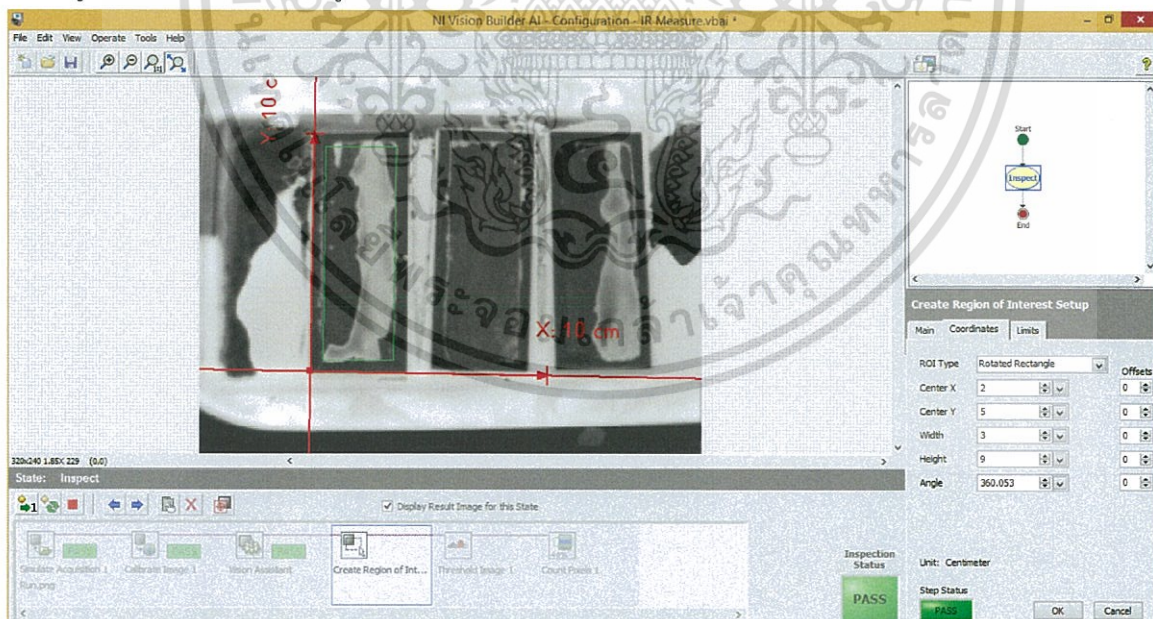
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 คลิกที่ Enhance Images >>> Create Region of Interest เลือก Enter Coordinates in real-world units ดังรูป เพื่อให้การกำหนดพื้นที่ตรวจวัดอยู่บนแกนอ้างอิง เท่านั้น



รูปที่ 23 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (12)

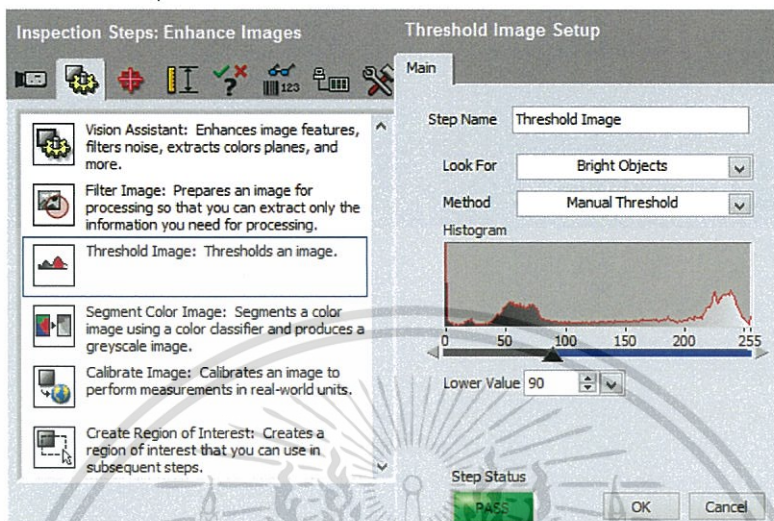
2.13 ตั้งค่าขนาดของพื้นที่ตรวจ โดยคลิก Create Region of Interest >>> Coordinates กำหนด ROI Type เป็น Rotated Rectangle กำหนดจุดศูนย์กลางแกน X จุดศูนย์กลางแกนแกน Y ความกว้าง และความสูงของพื้นที่ตรวจวัด ดังรูป



รูปที่ 24 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (13)

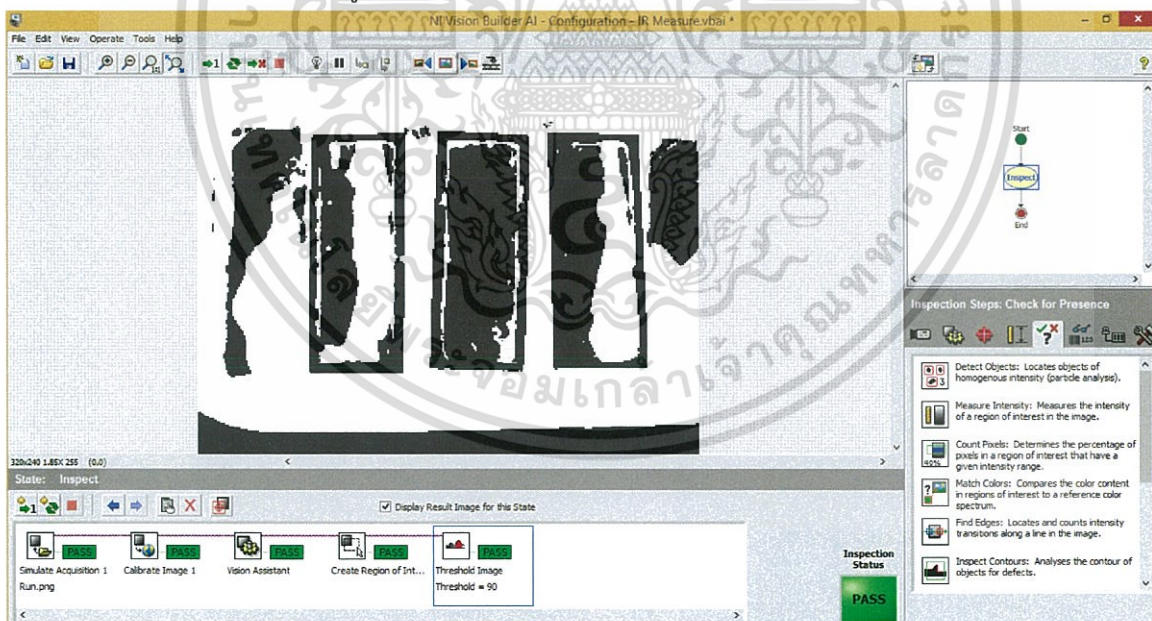
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 คลิกที่ Enhance Images >>> Threshold Image กำหนดค่าความเข้มสี (มีค่าตั้งแต่ 0 – 255) เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างคราบแป้งสุก กับพื้นผิวทดสอบ โดยกำหนดให้บริเวณที่มีค่าความเข้มสี ตั้งแต่ 90 ขึ้นไปเป็นคราบแป้งสุก สามารถกำหนดค่าที่ Lower Value เป็น 90 แล้วกด OK



รูปที่ 25 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (14)

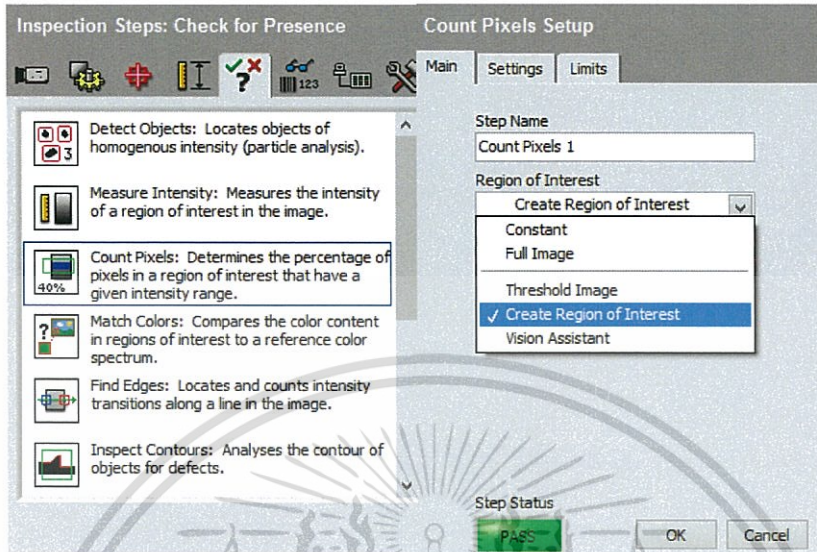
2.15 ได้หน้าต่างการทำงาน ดังรูป



รูปที่ 26 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (15)

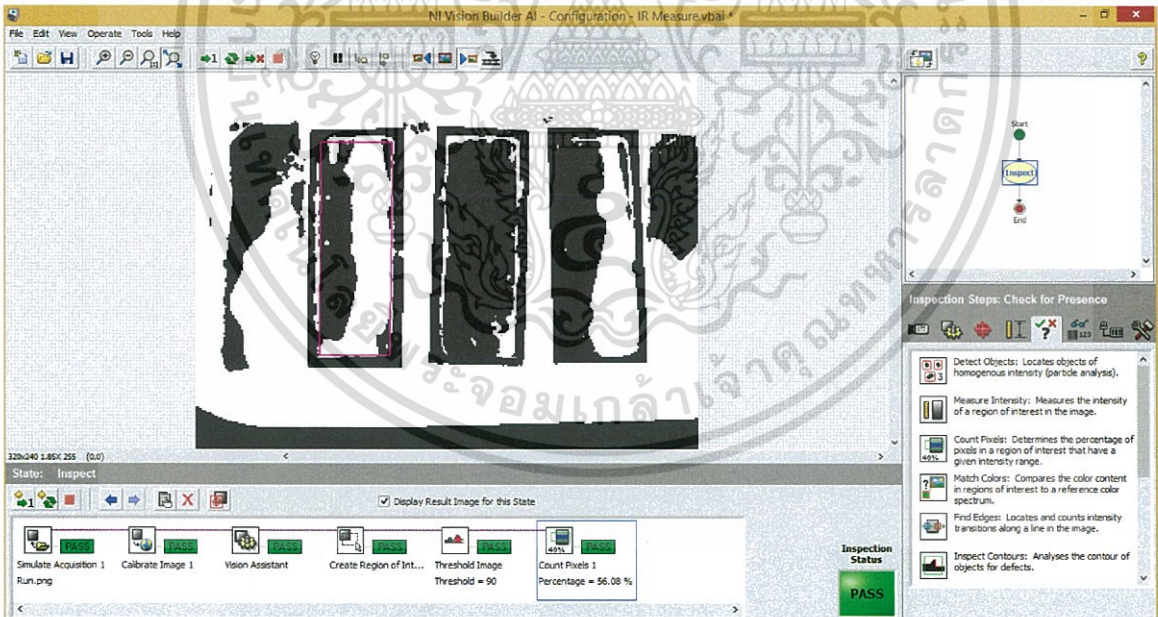
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.16 คลิกที่ Check for Presence >>> Count Pixels กำหนด Region of Interest เป็น Create Region of Interest ตามที่กำหนดค่าไว้ ดังรูปที่ 23 แล้วกด OK



รูปที่ 27 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (16)

2.17 โปรแกรมแสดงร้อยละพื้นที่ที่คราบแป้งสุกที่เหลือนบนพื้นผิวทดสอบที่ฟังก์ชัน Count Pixels 1 ดังรูป



รูปที่ 28 การใช้โปรแกรม NI Vision Builder AI 2014 (17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค.1 ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุ่มและอัตราการไหลต่าง ๆ

มุ่ม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาท)																
			เริ่มต้น	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	
30	100	1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.48	70.56	34.57	19.39	17.91	13.54	9.54	7.54	7.54	
		2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	80.84	79.04	78.69	77.78	31.68	12.33	10.41	10.41	10.41	10.41	
	200	1	100.00	100.00	100.00	99.75	89.13	75.26	57.87	30.87	21.47	17.03	10.08	9.98	9.02	9.02	9.02	9.02	
		2	100.00	100.00	100.00	90.92	49.97	43.61	34.14	20.02	14.44	11.46	7.44	7.28	6.58	6.58	6.58	6.58	
60	300	1	100.00	100.00	100.00	98.97	98.19	90.77	90.17	53.86	22.27	6.75	7.90	7.18	7.52	6.73	5.75	5.02	
		2	100.00	100.00	100.00	100.00	97.98	74.53	53.66	42.44	6.44	6.19	6.75	7.89	6.47	6.30	7.69	6.02	
	100	1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	98.84	98.19	96.33	94.83	93.71	93.69	93.65	93.44	90.28	84.96	84.92	
		2	100.00	100.00	100.00	100.00	98.74	96.55	82.50	81.07	79.98	73.01	74.15	73.84	74.90	70.85	67.32	67.83	
80	200	1	100.00	100.00	100.00	98.08	97.90	96.68	80.52	68.33	63.52	50.58	48.60	48.60	40.42	40.42	40.06	40.06	
		2	100.00	100.00	98.06	96.39	86.37	81.55	74.65	55.50	50.18	48.92	47.99	47.99	45.84	45.84	45.32	45.32	
	300	1	100.00	100.00	100.00	100.00	94.27	49.60	29.53	19.13	18.16	15.98	14.55	14.55	11.32	11.32	11.32	11.32	
		2	100.00	100.00	100.00	100.00	97.50	48.09	27.48	17.17	16.32	16.81	16.17	16.17	14.24	14.24	14.24	14.24	
	100	200	1	100.00	100.00	100.00	98.27	95.64	89.24	88.61	82.48	78.59	57.80	54.71	50.69	50.71	41.16	39.05	38.57
			2	100.00	100.00	100.00	97.39	81.80	65.20	50.51	44.76	38.80	37.13	36.78	36.12	34.24	32.67	34.37	35.30
		300	1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	96.67	94.71	94.43	87.02	86.33	85.78	85.51	85.74	83.98	85.64	85.04
			2	100.00	100.00	100.00	97.57	96.70	89.24	70.94	65.76	54.75	54.47	56.35	56.36	59.34	57.53	56.71	53.49
300	1	100.00	100.00	99.08	95.68	71.31	39.18	24.39	23.69	22.71	21.43	19.79	19.79	18.62	18.62	17.70	17.70		
	2	100.00	100.00	93.46	82.83	61.33	43.67	36.67	36.07	35.77	35.13	34.72	34.72	34.07	34.07	29.40	29.40		

ตาราง ค.1 (ต่อ) ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมและอัตราการไหลต่าง ๆ

มุม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาทีก)															
			8.00	8.50	9.00	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00	12.50	13.00	13.50	14.00	14.50	15.00	
30	100	1	6.21	6.21	6.21	6.21	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	5.34	
		2	9.10	9.10	9.10	9.10	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	8.95	7.74	
	200	1	5.84	5.84	5.84	5.84	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.02	
		2	4.55	4.55	4.55	4.55	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	3.37	2.76	
	300	1	4.87	4.87	4.87	4.87	4.35	4.35	4.35	4.35	4.59	4.59	4.59	4.59	4.59	5.27	5.27	5.27
		2	5.47	5.47	5.47	5.47	4.16	4.16	4.16	4.16	4.76	4.76	4.76	4.76	4.76	5.47	5.47	5.47
60	100	1	85.37	63.98	61.45	62.97	61.99	61.99	30.79	30.79	29.11	29.11	29.11	29.11	25.16	25.16	25.16	
		2	44.11	35.52	33.10	32.11	28.53	28.53	27.86	27.86	23.22	23.22	23.22	23.22	22.35	22.35	22.35	
	200	1	39.04	39.04	37.08	37.08	34.59	34.59	34.59	34.59	34.07	34.07	34.07	34.07	32.88	32.88	32.88	
		2	46.72	46.72	44.76	44.76	42.13	42.13	42.13	42.13	41.22	41.22	41.22	41.22	41.27	41.27	41.27	
	300	1	9.77	9.77	9.77	9.77	8.53	8.53	8.53	8.53	8.53	8.53	8.53	8.53	8.53	8.53	5.37	
		2	13.31	13.31	13.31	13.31	11.06	11.06	11.06	11.06	11.06	11.06	11.06	11.06	11.06	11.06	5.09	
80	100	1	40.02	40.02	38.48	38.48	38.88	38.88	38.88	38.88	37.78	37.78	37.78	37.78	37.69	37.69	37.69	
		2	32.56	32.56	33.50	33.50	32.81	32.81	32.81	32.81	30.92	30.92	30.92	30.92	31.68	31.68	31.68	
	200	1	85.73	46.08	40.57	38.70	37.81	37.81	37.81	37.81	38.00	38.00	38.00	38.00	39.01	39.01	39.01	
		2	47.25	42.96	42.19	37.04	33.92	33.92	33.92	33.92	34.14	34.14	34.14	34.14	24.10	24.10	24.10	
	300	1	17.65	17.65	17.49	17.49	15.46	15.46	15.46	15.46	10.34	10.34	10.34	10.34	10.15	10.15	10.15	
		2	28.36	28.36	24.72	24.72	22.58	22.58	22.58	22.58	21.87	21.87	21.87	21.87	17.74	17.74	17.74	

ตาราง ค.1 (ต่อ) ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมและอัตราการไหลต่าง ๆ

มุม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาที)														
			15.50	16.00	16.50	17.00	17.50	18.00	18.50	19.00	19.50	20.00	20.50	21.00	21.50	22.00	22.50
30	100	1	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	5.34	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73
		2	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.74	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40
	200	1	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56
		2	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76	2.76	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53
	300	1	5.27	5.27	5.27	5.27	5.27	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.47	2.47
		2	5.47	5.47	5.47	5.47	5.47	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	4.41	3.54	3.54
60	100	1	25.16	20.89	20.89	20.89	20.89	19.65	19.65	19.65	19.65	19.23	19.23	19.23	19.23	19.23	19.23
		2	22.35	19.84	19.84	19.84	19.84	19.37	19.37	19.37	19.37	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43
	200	1	32.88	19.64	19.64	19.64	19.64	13.98	13.98	13.98	13.98	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71
		2	41.27	35.87	35.87	35.87	35.87	30.81	30.81	30.81	30.81	24.20	24.20	24.20	24.20	24.20	24.20
	300	1	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	5.37	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87
		2	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56
80	100	1	37.69	37.37	37.37	37.37	37.37	36.76	36.76	36.76	36.76	35.14	35.14	35.14	35.14	35.14	35.14
		2	31.68	23.59	23.59	23.59	23.59	24.08	24.08	24.08	24.08	23.79	23.79	23.79	23.79	23.79	23.79
	200	1	39.01	33.61	33.61	33.61	33.61	26.61	26.61	26.61	26.61	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96	27.96
		2	24.10	34.72	34.72	34.72	34.72	27.17	27.17	27.17	27.17	25.76	25.76	25.76	25.76	25.76	25.76
	300	1	10.15	7.45	7.45	7.45	7.45	2.97	2.97	2.97	2.97	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79
		2	17.74	10.87	10.87	10.87	10.87	7.01	7.01	7.01	7.01	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40

ตาราง ค.1 (ต่อ) ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่หมุมและอัตราการไหลต่าง ๆ

หมุม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาที)															
			23.00	23.50	24.00	24.50	25.00	25.50	26.00	26.50	27.00	27.50	28.00	28.50	29.00	29.50	30.00	
30	100	1	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	4.73	0.00	
		2	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	7.40	1.83	
	200	1	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.19
		2	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.53	2.11
	300	1	2.47	2.47	2.47	2.47	2.47	2.47	1.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	3.54	3.54	3.54	3.54	3.54	3.54	1.89	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	100	1	19.23	19.23	19.23	19.23	14.03	14.03	14.03	14.03	14.03	14.03	14.03	14.03	14.03	14.03	14.03	13.19
		2	17.43	17.43	17.43	17.43	16.93	16.93	16.93	16.93	16.93	16.93	16.93	16.93	16.93	16.93	16.93	14.95
	200	1	13.71	13.71	13.71	13.71	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	6.67	4.27
		2	24.20	24.20	24.20	24.20	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15	16.15	11.88
	300	1	2.87	2.87	2.87	2.87	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46	0.00
		2	2.56	2.56	2.56	2.56	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.00
80	100	1	35.14	35.14	35.14	35.14	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	32.66	23.43
		2	23.79	23.79	23.79	23.79	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	13.71
	200	1	27.96	27.96	27.96	27.96	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	16.23	12.71
		2	25.76	25.76	25.76	25.76	18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	18.01	16.48
	300	1	1.79	1.79	1.79	1.79	0.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	6.40	6.40	6.40	6.40	0.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง ค.1 (ต่อ) ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุ่มและอัตราการไหลต่าง ๆ

มุ่ม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาทีก)															
			30.50	31.00	31.50	32.00	32.50	33.00	33.50	34.00	34.50	35.00	35.50	36.00	36.50	37.00	37.50	
30	100	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	200	1	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	3.19	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	
		2	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	2.11	1.61	1.61	1.61	1.61	1.61	
300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
60	100	1	13.19	13.19	13.19	13.19	13.19	13.19	13.19	13.19	13.19	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	
		2	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	14.95	10.41	10.41	10.41	10.41	10.41	10.41	
	200	1	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	4.27	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	
		2	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	11.88	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84
	300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	80	100	1	23.43	23.43	23.43	23.43	23.43	23.43	23.43	23.43	23.43	22.49	22.49	22.49	22.49	22.49	22.49
			2	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	13.71	12.28	12.28	12.28	12.28	12.28	12.28
200		1	12.71	12.71	12.71	12.71	12.71	12.71	12.71	12.71	12.71	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20
		2	16.48	16.48	16.48	16.48	16.48	16.48	16.48	16.48	16.48	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45
300		1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง ค.1 (ต่อ) ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุ่มและอัตราการไหลต่าง ๆ

มุ่ม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาที)															
			38.00	38.50	39.00	39.50	40.00	40.50	41.00	41.50	42.00	42.50	43.00	43.50	44.00	44.50	45.00	
30	100	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	200	1	2.34	2.34	2.34	2.34	1.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2	1.61	1.61	1.61	1.61	1.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
60	100	1	8.85	8.85	8.85	8.85	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	
		2	10.41	10.41	10.41	10.41	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	
	200	1	0.85	0.85	0.85	0.85	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2	4.84	4.84	4.84	4.84	0.72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	100	1	22.49	22.49	22.49	22.49	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	
		2	12.28	12.28	12.28	12.28	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	
	200	1	5.20	5.20	5.20	5.20	0.78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		2	4.45	4.45	4.45	4.45	3.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง ค.1 (ต่อ) ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่หมุมและอัตราการไหลต่าง ๆ

			ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาที)														
มุม (องศา)	อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่															
			45.50	46.00	46.50	47.00	47.50	48.00	48.50	49.00	49.50	50.00	50.50	51.00	51.50	52.00	52.50
30	100	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	100	1	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	6.83	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45
		2	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	10.03	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32
	200	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	100	1	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	16.35	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36
		2	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	9.17	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76
	200	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง ค.1 (ต่อ) ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มุมและอัตราการใช้ต่าง ๆ

มุม (องศา)	อัตราการใช้ (ลิตรต่อชั่วโมง)	ครั้งที่	ร้อยละพื้นที่คราบแป้งสุกที่เหลืออยู่บนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่เวลาการทำสะอาดต่าง ๆ (นาที)													
			53.00	53.50	54.00	54.50	55.00	55.50	56.00	56.50	57.00	57.50	58.00	58.50	59.00	59.50
30	100	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	200	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	100	1	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	0.84
		2	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	5.32	1.81
	200	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	100	1	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	8.36	1.73
		2	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	3.76	0.00
	200	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	