

อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีต่อการเกาะติดของน้ำมัน

INFLUENCE OF CHARACTERISTICS OF FOOD CONTACT SURFACE ON  
OIL ADHESION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมอาหาร  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีต่อการเกาะติดของน้ำมัน

INFLUENCE OF CHARACTERISTICS OF FOOD CONTACT SURFACE ON  
OIL ADHESION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INFLUENCE OF CHARACTERISTICS OF FOOD CONTACT SURFACE ON  
OIL ADHESION



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 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2559

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีต่อการเกาะติดของน้ำมัน

Influence of characteristics of food contact surface on oil adhesion

ผู้จัดทำ

1. นายพัสกร ภู้อยอดยิ่ง รหัสประจำตัว 56010845
2. นางสาวพิมพ์มาดา นิภัทรวรกานต์ รหัสประจำตัว 56010870
3. นางสาวมนัสรา วรเวทย์สกุล รหัสประจำตัว 56010969



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ. ดร. นวภัทรา หนูนาค)

หัวข้อโครงการ	อิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีต่อการเกาะติดของน้ำมัน	
นักศึกษา	นายพัสกร	ภูยอดยิ่ง
	นางสาวพิมพ์มาดา	นิภัทรวรรณานต์
	นางสาวมนัสรา	วรเวทย์สกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. นวภัทรา หนูนาค	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2559	

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอผลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีต่อการเกาะติดของน้ำมัน โดยแบ่งประเภทของพื้นผิวเป็นพื้นผิวชอบน้ำ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ย 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร และพื้นผิวไม่ชอบน้ำ เช่น เทฟลอนที่มีความหยาบผิวแตกต่างกัน น้ำมันที่ใช้ทดลองเป็นน้ำมันปาล์มใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและน้ำมันที่ผ่านการทอดปาต่องโก๋ ที่อุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 28 ชั่วโมง โดยปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวใช้วิธีการชั่งน้ำหนัก การวัดมุมสัมผัส และการวิเคราะห์ภาพถ่ายทางความร้อน จากการทดลอง พบว่า เทคนิคการวัดทั้ง 3 วิธี สามารถวัดปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทั้ง 2 ประเภทได้ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อเปรียบเทียบประเภทของพื้นผิวพบว่า มีการเกาะติดของน้ำมันใหม่และน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วบนพื้นผิวที่ชอบน้ำมากกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ โดยพื้นผิวที่มีลักษณะความหยาบผิวสูงจะส่งผลให้มีการเกาะติดสูงด้วย ซึ่งการเกาะติดของน้ำมันที่มากที่สุดเกิดขึ้นบนพื้นผิวชอบน้ำที่มีค่าความหยาบผิวสูงที่สุด นั่นคือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีความขรุขระเฉลี่ย 3.2 ไมโครเมตร มีปริมาณการเกาะติด เท่ากับ  $0.15 \pm 0.01$  กรัม มีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ  $13.81 \pm 1.86$  องศา และมีค่าอุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีการเกาะติดของน้ำมันเท่ากับ  $53.44 \pm 1.27$  และเมื่อเปรียบเทียบพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีความขรุขระเฉลี่ย 0.4 ไมโครเมตร กับพื้นผิวเทฟลอนที่มีความหยาบผิวน้อยที่สุด พบว่า พื้นผิวเทฟลอนมีปริมาณการเกาะติดน้อยกว่า 56.71% และมีค่ามุมสัมผัสมากกว่า 74.29%

<b>Project Title</b>	Influence of characteristics of food contact surface on oil adhesion
<b>Students</b>	Mr.Phatsakorn Pooyodying Ms.Pimmada Nipatwarakarn Ms.Manutsara Voravetsakul
<b>Project Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr.Navaphattra Nunak
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering
<b>Program</b>	Food Engineering
<b>Academic Year</b>	2016

### ABSTRACT

This project proposes the effect of surface characteristics to the oil adhesion. Hydrophilic surface, e.g. stainless steel AISI 304 with the average roughness of 0.4, 0.8 and 3.2  $\mu\text{m}$  and hydrophobic surface, e.g. Teflon with the different roughness were used to study the adhesion of new palm oil and fried oil at 170–190°C for approximately 28 hours. Three measurement techniques, i.e. weighing, contact angle, and thermal image analysis were used for evaluating the amount of oil deposited on the surface. It was found that all three techniques could detect the deposit of oil on the surface, i.e. the amount of oil on a hydrophilic surface were found more than that of on hydrophobic surface and increased with increasing surface roughness. Therefore, the maximum oil adhesion was found on AISI 304 with an average roughness of 3.2  $\mu\text{m}$ , i.e. 0.15±0.01 grams, 13.81±1.86 degree of contact (contact angle), and temperature on adhesion surface 53.44±1.27. Comparing between the best condition of stainless steel and Teflon, the amount of oil adhesion on the Teflon was less than AISI 304 56.71% and the contact angle was more than AISI 304 74.29%.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก รศ. ดร.นวกัทธา หนูนาอ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหา รวมถึงอุปสรรคต่างๆ ในระหว่างการทำโครงการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี นอกจากนี้ ขอกราบ ขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิศวกรรมอาหารทุกคน ที่ได้ให้ความสะดวกในการยืมอุปกรณ์และ ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณนางสาวเมธินี สงไทย ที่ให้คำปรึกษาการใช้กล้องถ่ายภาพความร้อนและ ช่วยเหลือในการถ่ายภาพความร้อน

ขอขอบคุณ ดร.ภาณุพล โชนกระโทก ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาคิวิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ รวมถึงอุปกรณ์ และเครื่องมือ ต่าง ๆ ในการทำวิจัย จนคณะผู้วิจัยสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณ คุณวรปัญญา สุธานุภาพวุฒิที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสำหรับ โครงการชิ้นนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ให้ การสนับสนุนตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือจน โครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ

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	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 พื้นผิวสัมผัสอาหาร	4
2.1.1 ค่าความขรุขระ	5
2.1.2 สมบัติความชอบน้ำไม่ชอบน้ำของพื้นผิว	5
2.2 คุณสมบัติของน้ำมันที่ส่งผลต่อการเกาะติด	6
2.2.1 แรงตึงผิว	7
2.2.2 ความหนืด	7
2.2.3 งานยึดติด	8
2.3 ค่าคุณสมบัติที่บ่งบอกความสามารถในการเกาะติด	8
2.3.1 ความสามารถในการเปียก	8
2.3.2 ค่ามุมสัมผัส	9
2.4 ภาพถ่ายความร้อนในย่านอินฟราเรด	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีผลต่อการเกาะติด	12
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน	12
2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจสอบการเกาะติด	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง	14
3.1 วัสดุทดลอง	14
3.1.1 ตัวอย่างน้ำมัน	14
3.1.2 ตัวอย่างพื้นผิวสัมผัสอาหาร	15
3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลอง	16
3.3 การทดลอง	19
3.3.1 การทดลองเบื้องต้น	19
3.3.1.1 การเกาะติดของน้ำมัน	19
3.3.1.2 การเปรียบเทียบเครื่องวัดมุมสัมผัส	20
3.3.2 การทดลองการเกาะติดของน้ำมัน	21
3.3.3 การตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมัน	22
3.3.3.1 การชั่งน้ำหนัก	22
3.3.3.2 การวัดมุมสัมผัส	23
3.3.3.3 การประมวลผลภาพถ่ายความร้อน	24
3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	26
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	27
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	35
5.1 สรุปผลการวิจัย	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก	39

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก	17
3.2 ส่วนประกอบของชุดทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส	18
3.3 ส่วนประกอบของชุดทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยการประมวลผล ภาพถ่ายทางความร้อน	18
3.4 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ	20
3.5 ตัวอย่างน้ำมันและตัวอย่างพื้นผิวสัมผัสอาหารในการทดลอง	26
4.1 ปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบ	28
4.2 ค่ามุมสัมผัสของน้ำมันที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งานบนพื้นผิวที่ไม่มีการเกาะติด	29
4.3 อุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีการเกาะติดของน้ำมันที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งาน	32

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 พื้นผิวสัมผัสอาหาร	4
2.2 ลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเฉลี่ย (ก) 3.2 และ (ข) 0.5 ไมโครเมตร	5
2.3 มุมสัมผัสของน้ำบน (ก) พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำและ (ข) พื้นผิวที่ชอบน้ำ	6
2.4 ทิศทางของแรงที่กระทำต่อโมเลกุลของหยดน้ำ	7
2.5 มุมสัมผัสและ Young's equation	9
2.6 แสดงการวัดมุมสัมผัสโดยใช้วิธีการวิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวจากเส้นสัมผัส	10
2.7 แสดงการวัดมุมสัมผัสโดยใช้วิธีการคำนวณแบบครึ่งมุม	11
3.1 ตัวอย่าง (ก) น้ำมันปาล์มโอเลอินที่ไม่ผ่านการใช้งาน และ (ข) น้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการใช้งาน	14
3.2 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304	15
3.3 แผ่นเทฟลอน	15
3.4 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร (ง) เทฟลอนพื้นผิวเรียบ และ (จ) เทฟลอนพื้นผิวหยาบ	16
3.5 ชุดอุปกรณ์ทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก	17
3.6 ชุดอุปกรณ์ทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส	17
3.7 ชุดอุปกรณ์ทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยการประมวลผลภาพถ่ายทางความร้อน	18
3.8 ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวทดสอบที่มีการเกาะติดของน้ำมันหลังอบด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่เวลา (ก) 10 นาที (ข) 20 นาที และ (ค) 30 นาที	19
3.9 เครื่องวัดมุมสัมผัสรุ่น OCA 20 (DATAPHYSICS) ของคณะวิทยาศาสตร์	21
3.10 วิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวของเครื่องวัดมุมสัมผัสคณะวิทยาศาสตร์	21
3.11 การจุ่มพื้นผิวทดสอบลงในน้ำมัน (ก) เต็มพื้นผิว และ (ข) ครึ่งพื้นผิว	22
3.12 การตรวจสอบการเกาะติดโดยการชั่งน้ำหนัก	22
3.13 พื้นผิวทดสอบบริเวณที่มีการเกาะติดของน้ำมันและไม่มีการเกาะติดของน้ำมัน	23
3.14 เครื่องมือวัดมุมสัมผัสจากการทดลอง	23
3.15 การประมวลผลภาพถ่ายด้วยโปรแกรม ImageJ	24
3.16 การตรวจสอบการเกาะติดโดยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนและการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนด้วยโปรแกรม SmartView 3.5	25
4.1 ปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบ	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 การวัดมุมสัมผัสด้วยการหยดน้ำมันใหม่และหยดน้ำมันเก่าบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 และ (ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทฟลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ) พื้นผิวหยาบ	30
4.3 ภาพแสดงค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีการเกาะติดของน้ำมันที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 และ (ค) 3.2 ไมโครเมตร	31
4.4 ภาพถ่ายความร้อนที่มีการเกาะติดของคราบน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทฟลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ) พื้นผิวหยาบ	32
4.5 ภาพถ่ายความร้อนที่มีการเกาะติดของคราบน้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทฟลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ) พื้นผิวหยาบ	33

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 หลักการ เหตุผล และที่มาของปัญหา

การเลือกชนิดของวัสดุและการเตรียมพื้นผิวสัมผัสอาหารของเครื่องทอดให้ถูกต้องตามหลักสุขลักษณะเป็นสิ่งที่สำคัญ โดยลักษณะของพื้นผิวจะส่งผลต่อการเกาะติดของน้ำมันและการทำความสะอาดที่บริเวณพื้นผิวของเครื่องทอด ซึ่งน้ำมันที่เกาะอยู่บนพื้นผิวจะเร่งการเสื่อมสภาพของน้ำมันใหม่ให้เร็วขึ้น (กระทรวงสาธารณสุข, 2549) รวมถึงส่งผลต่อคุณภาพของอาหาร เช่น สี กลิ่น หิน และการดูดซับน้ำมันของอาหาร เป็นต้น (Rossi et al., 2009) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง น้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะเกาะติดบนพื้นผิวสัมผัสอาหารมากกว่าน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งาน (Kalogianni, 2011) และหากปล่อยทิ้งไว้จะทำให้เกิดปัญหาด้านสุขลักษณะของเครื่องจักรแปรรูปอาหาร ยกต่อการทำความสะอาดและมีค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวกสูงขึ้น (Michalski et al., 1997)

พื้นผิวสัมผัสอาหารในอุตสาหกรรมการทอดที่นิยมใช้ คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ซึ่งมีความต้านทานการกัดกร่อนจากตัวผลิตภัณฑ์และสารทำความสะอาด และเทพลอนซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านทานการเกาะติดของอาหารได้ดี โดยคุณลักษณะของพื้นผิวสัมผัสที่ส่งผลให้เกิดการเกาะติดของอาหาร คือ ความขรุขระเฉลี่ยของพื้นผิวและความขอบน้ำของพื้นผิว (Michalski et al., 1998) ในด้านลักษณะความขรุขระของพื้นผิวจะใช้ค่าความขรุขระเฉลี่ย ( $R_a$ ) สำหรับการอธิบายลักษณะพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่สัมผัสอาหาร โดยมีความแตกต่างกันตามกระบวนการขึ้นรูปและการเตรียมพื้นผิว โดยองค์กร European Hygienic Engineering & Design Group (EHEDG) กำหนดว่าพื้นผิวสัมผัสอาหารในอุตสาหกรรม ควรมีค่าความขรุขระเฉลี่ยที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.8 ไมโครเมตร หรือน้อยกว่าและอาจมีค่าความขรุขระเฉลี่ยได้มากถึง 3.2 ไมโครเมตร หากสามารถพิสูจน์ความสามารถในการทำความสะดวกในกระบวนการผลิตได้ โดยพื้นผิวที่มีความขรุขระเฉลี่ยแตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการเกาะติดที่แตกต่างกันด้วย (Vanhaecke et al., 1989; Jullien et al., 2002; Foschino, 2003; Dürr, 2007) นอกจากนี้คณะวิจัย Michalski et al. (1998) ได้ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวสัมผัสอาหาร พบว่า ค่าความขรุขระเฉลี่ยที่น้อยจะทำให้ไขมันเกาะติดบนพื้นผิวได้ยากและง่ายต่อการทำความสะอาด ในด้านคุณสมบัติความขอบน้ำของพื้นผิว พื้นผิวที่ไม่ขอบน้ำจะมีแรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลวมาก ทำให้มีความสามารถในการเกาะติดน้อยกว่า นอกจากนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกาะติดของน้ำมันยังรวมไปถึงคุณสมบัติของอาหาร เช่น ความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงตึงผิว และสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตอาหาร เช่น อุณหภูมิ ส่วนผสมของอาหาร เป็นต้น น้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอดจะเกิดการเสื่อมสภาพทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันเปลี่ยนไป เช่น การเพิ่มขึ้นของความหนืดที่จะเป็นอุปสรรคต่อการไหลส่งผลให้มวลของน้ำมันที่ตกค้างมากขึ้น รวมถึงแรงตึงผิวของน้ำมันจะลดลงทำให้เกิดการเกาะติดกับพื้นผิวสัมผัสอาหารมากขึ้น

การตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหารสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การสังเกตด้วยตาเปล่า การชั่งน้ำหนัก และการวัดมุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิว เป็นต้น โดยวิธีการสังเกตด้วยตาเปล่าเป็นวิธีที่ง่ายแต่ไม่สามารถให้ผลที่น่าเชื่อถือ เนื่องจากมาตรฐานของผู้สังเกตแต่ละคนมีความแตกต่างกัน ส่วนวิธีการชั่งน้ำหนักไม่นิยมใช้เนื่องจากทำได้ยากที่บริเวณการใช้งานจริง Michalski et al. (1998) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการประมาณค่ามวลของสิ่งตกค้างบนพื้นผิวบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร โดยพิจารณาค่าคุณสมบัติของพื้นผิว เช่น ค่าพลังงานพื้นผิว ความชอบน้ำ และความขรุขระ สำหรับวิธีการวัดมุมสัมผัสของเหลวกับพื้นผิวที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยแตกต่างกัน Kubiak et al. (2011) พบว่า พื้นผิวที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยที่มากจะทำให้มุมสัมผัสของเหลวน้อยลง ทำให้สามารถใช้วิธีการวัดมุมสัมผัสในการตรวจสอบความขรุขระของพื้นผิวได้ แต่การวัดมุมสัมผัสจำเป็นต้องมีการควบคุมตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดและมีการควบคุมสภาพแวดล้อมที่แน่นอน ทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วิธีการวัดปริมาณการสะสมของสารอินทรีย์บนพื้นผิว โดย Ndukaife et al. (2015) ได้นำเสนอวิธีอย่างง่ายโดยใช้กล้องอินฟราเรดวัดอุณหภูมิและค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวัดการสะสมของสารอินทรีย์บนพื้นผิวได้อย่างง่ายและรวดเร็วโดยไม่ต้องสัมผัสกับพื้นผิวโดยตรง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะของพื้นผิวที่มีผลต่อการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 มีค่าความขรุขระเฉลี่ยแตกต่างกันและพื้นผิวเทพลอนที่มีพื้นผิวแตกต่างกัน และน้ำมันที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งาน รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร โดยวิธีการชั่งน้ำหนัก การวัดมุมสัมผัสด้วยการประมวลผลภาพและการวัดอุณหภูมิด้วยภาพถ่ายทางความร้อน เพื่อใช้ในการเลือกพื้นผิวในการใช้งานให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ และสามารถตรวจวัดการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัส

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาอิทธิพลของลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีผลต่อการเกาะติดของน้ำมัน
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหารโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการประมวลผลภาพและการวัดอุณหภูมิโดยภาพถ่ายทางความร้อน

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) พื้นผิวขอบนน้ำที่ใช้ทดสอบ คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระเฉลี่ย 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร จากการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีขัดทางกล และพื้นผิวที่ไม่ขอบนน้ำที่ใช้ทดสอบ คือ Polytetrafluoroethylene (PTFE, Teflon) พื้นผิวเรียบและพื้นผิวหยาบ
- 2) น้ำมันที่ใช้ทดสอบ น้ำมันปาล์มโอเลอินที่ไม่ผ่านการใช้งานและน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการใช้งานโดยวิธีการทอด
- 3) การตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร โดยวิธีการชั่งน้ำหนัก การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการประมวลผลภาพและการวัดอุณหภูมิด้วยภาพถ่ายทางความร้อน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

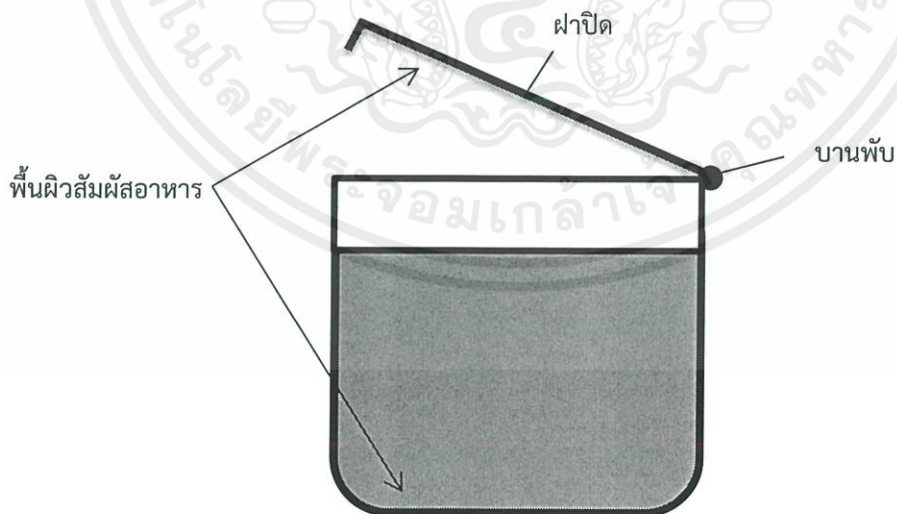
- 1) ได้ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีผลต่อการเกาะติดของน้ำมัน
- 2) ได้การตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหารโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการประมวลผลภาพและการวัดอุณหภูมิด้วยภาพถ่ายทางความร้อน

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 พื้นผิวสัมผัสอาหาร

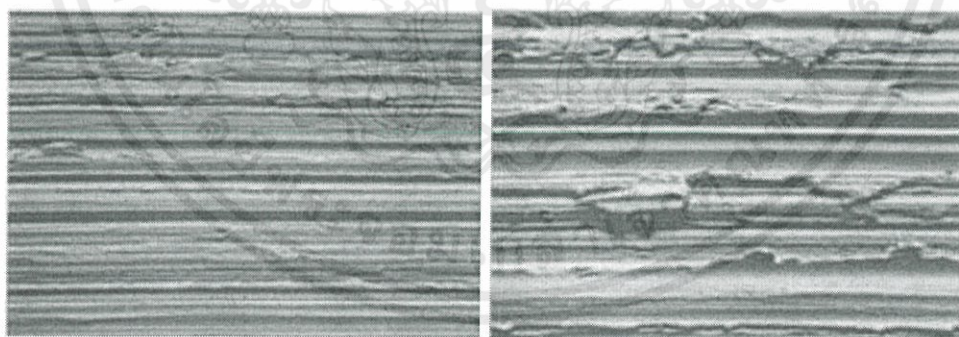
พื้นผิวสัมผัสอาหาร คือ พื้นผิวที่สัมผัสกับอาหารโดยตรงหรือมีโอกาสสัมผัสกับอาหาร ตัวอย่างพื้นผิวสัมผัสอาหาร เช่น เครื่องใช้ในครัว อุปกรณ์และเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิต เสื้อผ้าและถุงมือของผู้ที่ปฏิบัติงาน รวมถึงบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ การเลือกใช้วัสดุจึงเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากการปนเปื้อนของอาหารสามารถเกิดได้หลายทาง ทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น การระเหย การกระเด็น หรือการควบแน่นของอาหาร (รูปที่ 2.1) องค์กร The European Hygienic Engineering & Design Group (EHEDG) จัดเตรียมแนวปฏิบัติที่ดีทางด้านสุขลักษณะของเครื่องจักรแปรรูปอาหาร โดยพื้นผิวสัมผัสอาหารจะต้องทำจากวัสดุที่สามารถทำความสะอาดได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดอันตรายจากการเป็นพิษ มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของอาหาร สารฆ่าเชื้อหรือสารทำความสะอาดในสภาวะการใช้งานได้ดี ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารภายใต้อุณหภูมิและความดันของการใช้งาน เป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำเพื่อลดการเกาะติดของอาหาร นอกจากนี้พื้นผิวจะต้องเรียบ ไม่มีรอยแตกหรือรอยแยกที่อาจเป็นจุดสะสมของแบคทีเรีย โดยค่าความขรุขระเฉลี่ยและความชอบน้ำของพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเกาะติดของอาหารที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร (Michalski et al., 1998)



รูปที่ 2.1 พื้นผิวสัมผัสอาหาร

### 2.1.1 ค่าความขรุขระ

ค่าความขรุขระของพื้นผิวสัมผัสอาหารขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมพื้นผิวโดยพื้นผิวที่มีความขรุขระมากจะเป็นที่ดักจับอาหารให้สะสมได้ง่ายและอาหารที่ตกค้างเหล่านี้จะเป็นแหล่งในการสะสมและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้พื้นผิวที่มีความขรุขระจะทำความสะอาดได้ยาก ซึ่งไม่มีการทำความสะอาดหรือกำจัดออกจะเป็นต้นเหตุของการปนเปื้อนของกระบวนการผลิตในรอบการผลิตต่อไป (Partington, 2006) องค์กร EHEDG ใช้ค่าความขรุขระเฉลี่ย สำหรับการอธิบายลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหาร โดยพื้นผิวที่สัมผัสผลิตภัณฑ์ควรมีค่าความขรุขระเฉลี่ยที่ยอมรับได้และปราศจากร่องรอยหรือจุดที่ไม่สมบูรณ์ เช่น หลุมซอกและรอยแยก พื้นผิวขนาดใหญ่ที่สัมผัสผลิตภัณฑ์ควรมีค่าความขรุขระเฉลี่ย 0.8 ไมโครเมตร หรือน้อยกว่า แสดงดังรูปที่ 2.2 (ก) และ 2.2 (ข) โดยความสามารถในการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น แรงทางกลที่เกิดจากการไหล เวลา การเข้าถึงได้ของสารทำความสะอาด ความเข้มข้นของสารเคมี อุณหภูมิ และเทคโนโลยีการเตรียมพื้นผิวสำเร็จ เป็นต้น ถ้าพื้นผิวที่มีความเรียบหรือค่าความขรุขระน้อยจะทำความสะอาดได้ดีกว่า และค่าความขรุขระอาจมีค่ามากถึง 3.2 ไมโครเมตร ได้หากสามารถพิสูจน์ความสามารถในการทำความสะอาดในกระบวนการผลิตได้ โดยพื้นผิวที่มีความขรุขระแตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการเกาะติดของจุลินทรีย์ (Biological fouling) ที่แตกต่างกันด้วย (Vanhaecke et al., 1989, Jullien et al., 2002, Foschino, 2003, Dürr, 2007)



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.2 ลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระเฉลี่ย (ก) 3.2 และ (ข) 0.5 ไมโครเมตร

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Hones C. and Harrison A. (2006)

### 2.1.2 สมบัติความชอบน้ำไม่ชอบน้ำของพื้นผิว

ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำเป็นสมบัติที่เกิดขึ้นจากสมบัติทางเคมีของพื้นผิวและน้ำ เช่น แรง

ดึงผิว แรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่นภายในโมเลกุลของสาร รวมถึงสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวเช่นค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความขรุขระเฉลี่ย พื้นผิวที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยมากจะมีมุมสัมผัสมากกว่าเนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสจริงของพื้นผิวและน้ำมาก ทำให้น้ำมีลักษณะแพร่กระจายออกไปมากกว่าพื้นผิวเรียบ พื้นผิวที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (รูปที่ 2.3 (ก)) คือ พื้นผิวที่มีมุมสัมผัสกับน้ำมากกว่า 90 องศา โดยพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำจะมีแรงตึงผิวระหว่างของแข็งและของเหลวมาก ป้องกันการกระจายตัวของหยดน้ำทำให้เกิดหยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิวในลักษณะกลมและกลิ้งไหลได้ง่าย ทำให้มีความสามารถในการเปียกน้อย การเกาะติดเกิดยาก ยกตัวอย่างเช่น วัสดุชนิดโพลีเมอร์ (เทฟลอนและซิลิโคน) พื้นผิวที่มีสมบัติชอบน้ำ (รูปที่ 2.3 (ข)) เป็นพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสกับน้ำน้อยกว่า 90 องศา มีความสามารถในการเปียกมาก หยดน้ำที่เกาะบนพื้นผิวชนิดนี้จะกระจายตัวออกเป็นวงมีพื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวและของเหลวมาก โดยพื้นผิวที่ชอบน้ำ ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิมและเซรามิก



รูปที่ 2.3 มุมสัมผัสของน้ำบน (ก) พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำและ (ข) พื้นผิวที่ชอบน้ำ  
ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Kubiak et al. (2011)

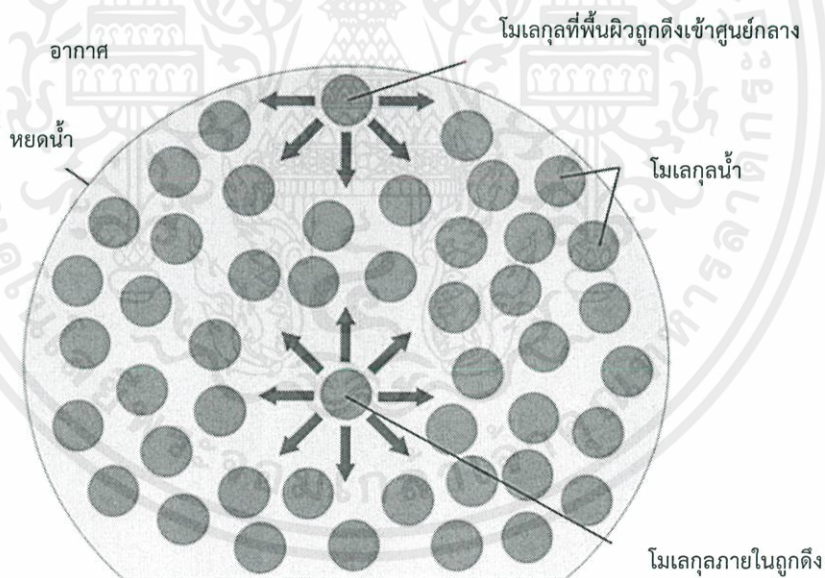
## 2.2 คุณสมบัติของน้ำมันที่ส่งผลต่อการเกาะติด

น้ำมันเป็นตัวกลางที่ใช้ในการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมการทอดมักใช้น้ำมันที่มีอุณหภูมิที่จุดเกิดควันสูงเนื่องจากมีไขมันชนิดอิ่มตัวสามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่า โดยการเสื่อมสภาพของน้ำมันเกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น ปริมาณน้ำในอาหารที่ทอด ออกซิเจน แสงแดด ความร้อน ซึ่งในกระบวนการทอดนั้นมีปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพหลายตัวยังมีการใช้น้ำมันซ้ำโดยไม่เปลี่ยนจะยิ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้น้ำมันเสื่อมสภาพได้เร็วขึ้นเช่น ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันที่เกิดจากการให้ความร้อนในขณะทอดทำให้โมเลกุลของน้ำมันกลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้ความหนืดของน้ำมันมากขึ้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากออกซิเจนในอากาศและความร้อนจากการทอดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้น้ำมันเกิดกลิ่นหืนและแรงตึงผิวลดลงเกิดสารอนุมูลอิสระที่จะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาสุกโชกทำให้เกิดการเสื่อมสภาพต่อไป ซึ่งคุณสมบัติของน้ำมันที่เปลี่ยนไปทั้งความหนืดและแรงตึงผิวจะส่งผลทำให้เกิดการเกาะติดของน้ำมันมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 แรงตึงผิว (Surface tension, $\gamma$ )

แรงตึงผิว คือแรงที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวของเหลวสัมผัสกับของเหลวชนิดอื่นหรือกับผิวของแข็ง โดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับแรงยึดติด (Adhesion forces) และแรงเชื่อมแน่น (Cohesion forces) ทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายแผ่นบางที่สามารถต้านแรงได้เล็กน้อย แรงตึงผิวเป็นสมบัติหนึ่งของของเหลว ความตึงผิวจะทำให้ผิวหน้าของน้ำเป็นเสมือนผิวหนึ่งบางคลุมน้ำข้างใต้ไว้ แสดงดังรูปที่ 2.4 แรงตึงผิวจะเป็นแรงที่กระทำต่อโมเลกุลของเหลวในแนวขนานไปกับพื้นผิวของเหลวมีค่าเฉพาะที่เปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดและอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแรงตึงผิวจะลดลงเนื่องจากการสั่นของโมเลกุลทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในระหว่างโมเลกุลของเหลวน้อยลง แรงตึงผิวจึงมีค่าลดลง โดยของเหลวที่มีแรงยึดติดมากกว่าแรงเชื่อมแน่นจะส่งผลให้มีความสามารถในการเปียกมาก ส่วนแรงยึดติดที่น้อยกว่าแรงเชื่อมแน่น จะส่งผลให้มีความสามารถในการเปียกน้อย (Gould, 1964) โดยแรงตึงผิวของน้ำมันจะลดลงเมื่อผ่านการทอดซ้ำ (Kalogianni et al., 2011) ส่งผลให้น้ำมันเกิดการเกาะติดกับพื้นผิวสัมผัสมากขึ้น



รูปที่ 2.4 ทิศทางของแรงที่กระทำต่อโมเลกุลของหยดน้ำ

### 2.2.2 ความหนืด (Viscosity)

ค่าบ่งชี้สมบัติความต้านทานการไหลในตัวของไหลโดยความสามารถในการเปลี่ยนรูปของเหลวซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากการกระทำของความเค้นเฉือนหรือความเค้นภายนอก ความหนืดนี้อธิบายถึงความสามารถในการต้านทานการไหลภายในตัวของไหลเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิตั้งขึ้นพลังงานจลน์ของของเหลวจะสูงขึ้นทำให้ความหนืดลดลง และอาจจะถูกพิจารณาให้เป็นตัวชี้วัดความเสียดทานของไหลได้ ยิ่งของไหลมีความหนืดต่ำมากเท่าไร มันก็จะยิ่งมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปได้มากเท่านั้น โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการทอดซ้ำๆ เนื่องจากการรวมตัวกันของโมเลกุลน้ำมัน ทำให้ได้โมเลกุลที่มีน้ำหนักมากขึ้นส่งผลต่อการไหลและการเกาะติดของน้ำมันที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวสัมผัส (Debnath et al., 2012, Kalogianni et al., 2011)

### 2.2.3 งานยึดติด

งานยึดติด (Work of adhesion) คือ งานที่ใช้ในการแยกของเหลวออกจากพื้นผิวที่เป็นของแข็ง สามารถคำนวณได้จากค่าแรงตึงผิว ค่ามุมสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลวซึ่งเป็นสมบัติของทั้งตัวพื้นผิวและของเหลว ดังสมการของ Dupre แสดงดังสมการที่ (1) ใช้เพื่ออธิบายการแยกการยึดเกาะระหว่าง 2 พื้นผิว

$$W_A = \gamma_l(1 + \cos \theta) \quad (1)$$

ค่างานยึดติดที่มาก บ่งบอกถึงของเหลวสามารถเกาะติดบนพื้นผิวได้ดี มีความสามารถในการเปียกมาก ต้องใช้งานมากในการแยกสองสถานะออกจากกันหรือสามารถทำความสะอาดได้ยากนั่นเอง ส่วนงานยึดติดที่น้อย บ่งบอกถึงของเหลวสามารถถูกแยกออกจากพื้นผิวได้ง่าย มีความสามารถในการเปียกน้อย

## 2.3 ค่าคุณสมบัติที่บ่งบอกความสามารถในการเกาะติด

การบอกความสามารถในการเกาะติดสามารถดูได้จาก ค่าความสามารถในการเปียกและค่ามุมสัมผัสซึ่งทั้งสองค่าเกิดจากคุณสมบัติของของเหลวและพื้นผิวของแข็ง เช่น ค่าแรงตึงผิว ค่าความหนืด ความชอบน้ำไม่ชอบน้ำ ความขรุขระ เป็นต้น

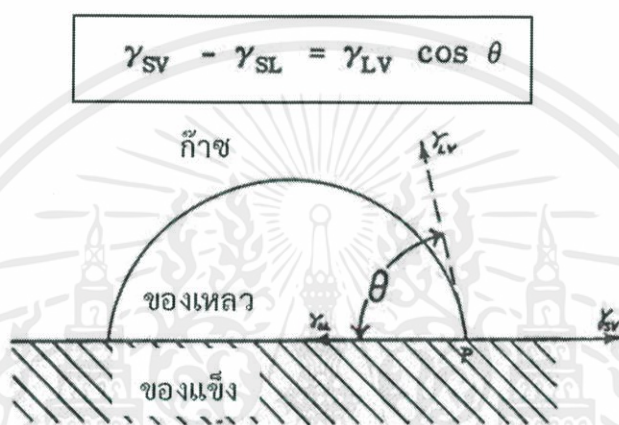
### 2.3.1 ความสามารถในการเปียก (Wettability)

ความสามารถของของเหลวในการรักษาหน้าสัมผัสกับพื้นผิวของแข็งซึ่งเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ ระหว่างแรงของโมเลกุลภายในของเหลวและแรงที่ผิวโมเลกุลของเหลวโดยลักษณะการเกาะติดของของเหลวบนพื้นผิวสัมผัสอาหารสามารถอธิบายด้วยสภาวะการเปียกสำหรับกรณีถ้าของเหลวเป็นน้ำ พื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophobic พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวด (Super hydrophobic) จะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า 150 องศา ทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมากๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูกเรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 มุมสัมผัส (Contact angle)

มุมที่ของเหลวทำกับพื้นผิวของแข็ง (รูปที่ 2.5) มุมนี้สามารถวัดได้จากแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวกับของแข็ง ( $\gamma_{SL}$ ) และของเหลวกับก๊าซ ( $\gamma_{LV}$ ) ซึ่งมุมนี้จะถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทั้งของแข็งและของเหลว โดยมุมสัมผัสเป็นหนึ่งในวิธีการวัดความสามารถในการเปียกของพื้นผิวมุมสัมผัสที่มีขนาดเล็ก (น้อยกว่า 90 องศา) หมายถึงพื้นผิวมีความสามารถในการเปียกมาก ส่วนมุมสัมผัสที่มีขนาดใหญ่ (90-180 องศา) หมายถึงพื้นผิวมีความสามารถในการเปียกน้อย (Gould, 1964)



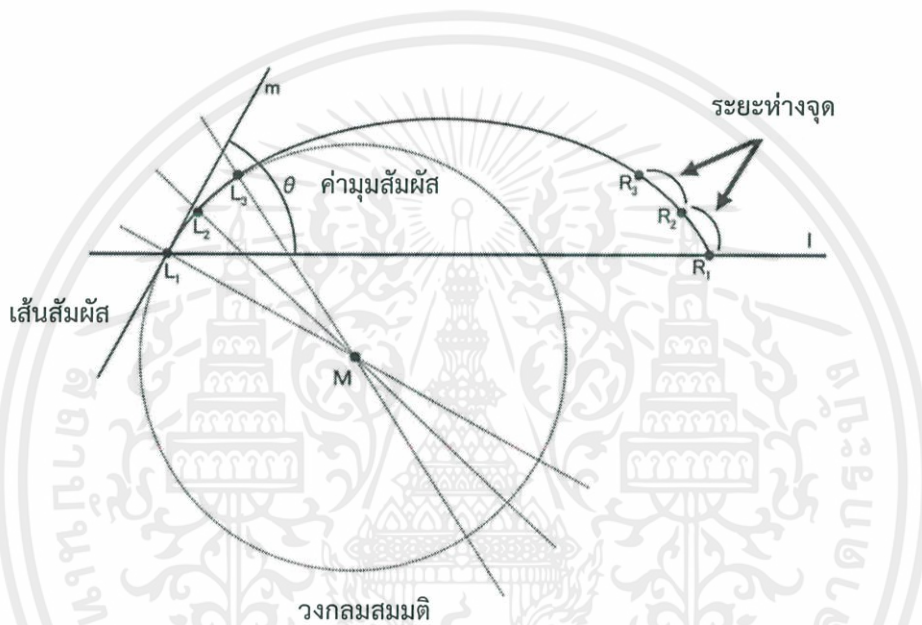
รูปที่ 2.5 มุมสัมผัสและ Young's equation

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Zisman (1964)

วิธีการวัดมุมสัมผัส การทดสอบมุมสัมผัสจะใช้วิธีที่เรียกว่า Sessile Drop หยดของเหลวจะถูกหยดออกจากหลอดฉีดยาขนาดเล็กลงบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการทดสอบโดยการนำเอาพื้นผิวขึ้นไปสัมผัสกับหยดที่แขวนอยู่ที่ปลายเข็มฉีดยา เพื่อให้ได้ของเหลวเพียงหยดเดียวที่สัมผัสกับผิววัสดุ จากนั้นแสงจะถูกส่องผ่านด้านหน้าของเหลวและภาพของหยดของเหลวจะตกลงบนฉากรับภาพซึ่งอยู่ด้านหลังหยดของเหลว มุมสัมผัสจะถูกวัดโดยใช้ฉากวัดมุม (Protractor) ที่ติดอยู่กับฉากรับภาพ โดย Ashokkumar et al. (2012) ได้ทำการวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการหยดน้ำมันพืชลงบนพื้นผิวชนิดต่างๆ แล้ววัดมุมหยดน้ำมันด้วยกล้อง CCD จากนั้นนำรูปหยดน้ำมันไปประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ พบว่าชนิดพื้นผิวที่แตกต่างกันมีผลต่อค่ามุมสัมผัสซึ่งแสดงถึงการเกาะติดของสิ่งตกค้างที่แตกต่างกัน โดยค่ามุมสัมผัสมีสองประเภท คือ มุมสัมผัสแบบหยุดนิ่งและมุมสัมผัสแบบเคลื่อนที่ การวัดมุมสัมผัสแบบหยุดนิ่งที่นิยมใช้มีสองวิธี คือ การวิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวจากเส้นสัมผัส (Tangent method) และ การคำนวณจากครึ่งมุม (A half-angle method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

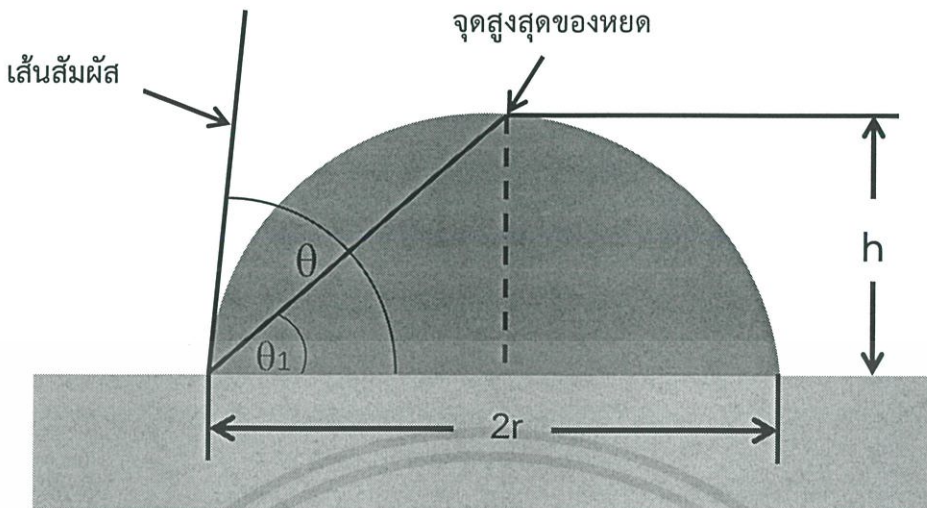
การวิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวจากเส้นสัมผัส (รูปที่ 2.6) โดยรูปทรงของหยดของเหลว จะถูกใช้เป็นส่วนหนึ่งของเส้นขอบวงกลมสมมติ โดยศูนย์กลางของวงกลมสมมติจะถูกใช้เพื่อวัดค่ามุมสัมผัส โดยดูจากจุดที่ทั้งสามเพสมาบรรจบกันและลากเส้นตั้งฉากกับจุดศูนย์กลางของวงกลมสมมติ จากนั้นวัดมุมสัมผัสจากระนาบผิวของแข็งจนถึงแนวเส้นตั้งฉากนั้น ข้อดีของวิธีนี้ คือ สามารถวัดมุมสัมผัสได้ทั้ง 2 ข้าง และเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพเมื่อมุมทั้งสองข้างของหยดมีความแตกต่างกัน แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ภาพของหยดของเหลวต้องมีความคมชัด เห็นเส้นขอบของเหลวชัดเจน และต้องไม่มีแสงสะท้อนที่ผิวของหยดของเหลว



รูปที่ 2.6 แสดงการวัดมุมสัมผัสโดยใช้วิธีการวิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวจากเส้นสัมผัส

การคำนวณจากครึ่งมุม (รูปที่ 2.7) เป็นวิธีวัดค่ามุมสัมผัสแบบง่าย โดยคำนวณจากสมการ (2) ซึ่งค่ามุมสัมผัสจะเริ่มวัดจากจุดที่เป็นขอบสุดของของเหลวที่อยู่ติดกับของแข็งแสดงดังรูปที่ 2.4 โดยวิธีนี้สามารถใช้วัดได้โดยใช้หยดของเหลวขนาดเล็ก ปริมาตร 5 ไมโครลิตร ซึ่งสามารถลดผลกระทบที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็วที่สุด สามารถคำนวณได้จากสมการอย่างง่าย แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง

$$\theta = 2\arctan \frac{h}{r} \quad (2)$$



รูปที่ 2.7 แสดงการวัดมุมสัมผัสโดยใช้วิธีการคำนวณแบบครึ่งมุม

## 2.4 ภาพถ่ายความร้อนในย่านอินฟราเรด

กล้องถ่ายภาพความร้อน หรือ Thermal image camera เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิบริเวณพื้นผิวของวัตถุ โดยเป็นการวัดที่ไม่มีการสัมผัสหรือทำลายวัตถุ ซึ่งกล้องประเภทนี้อาศัยค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุในการวัดค่าอุณหภูมิ ผลลัพธ์ที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนอยู่ในรูปแบบของภาพความร้อนซึ่งได้มาจากการแผ่รังสีความร้อนในย่านรังสีอินฟราเรดของวัตถุผ่านเลนส์ไปยังตัวตรวจจับ จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะทำการแปลงข้อมูลที่รับมาจากตัวตรวจจับโดยอาศัยกฎการแผ่รังสีความร้อนของ Stefan-Boltzmann และแสดงผลบนจอภาพ โดยสามารถประเมินการกระจายของอุณหภูมิบนพื้นผิวเป้าหมายใน 2 มิติ ได้โดยไม่ทำลายวัตถุ ซึ่งภาพถ่ายความร้อนใช้บอกความแตกต่างของอุณหภูมิในพื้นที่ที่กล้องถ่ายภาพความร้อนบันทึกไว้ โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันนั้นถูกแสดงในรูปของเฉดสีที่แตกต่างกันไป โดยสีในโทนร้อนแสดงถึงบริเวณหรือวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง และสีในโทนเย็นแสดงถึงบริเวณหรือวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการรับข้อมูลของกล้องถ่ายภาพความร้อนเป็นอย่างมาก (นวกัทร และทวีพล, 2013)

การวัดอุณหภูมิของภาพถ่ายความร้อน มี 2 ประเภท คือ ภาพความร้อนเชิงคุณภาพ (Qualitative thermography) เป็นการเปรียบเทียบโดยใช้เฉดสีของภาพ ซึ่งแตกต่างกันตามอุณหภูมิที่สามารถวัดได้ โดยสีในโทนร้อนแสดงในวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงและสีในโทนเย็นแสดงในวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำโดยไม่แสดงอุณหภูมิเป็นตัวเลข ภาพความร้อนเชิงปริมาณ (Quantitative thermography) เป็น

การการวัดอุณหภูมิโดยแสดงผลเป็นตัวเลขอุณหภูมิ ซึ่งภาพความร้อนเชิงปริมาณนี้เกิดจากการที่เจดสีของภาพไม่สามารถบอกอุณหภูมิความร้อนได้อย่างชัดเจน จึงต้องการตัวเลขของอุณหภูมิซึ่งเป็นค่าที่แน่นอนกว่าในการประเมิน โดยการเลือกใช้การประมวลผลแบบใดขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของงานนั้นๆ

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะพื้นผิวสัมผัสอาหารที่มีผลต่อการเกาะติด

Michalski et al. (1998) ศึกษาการสะสมของอาหารที่มีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ น้ำมันทานตะวัน น้ำมันมะกอก น้ำมันถั่วเหลือง บนพื้นผิวเรียบ เช่น เทฟลอน (PTFE), Low density polyethylene (LDPE), Polyethylene terephthalate (PET) และพื้นผิวขรุขระด้วย เช่น แก้ว และเหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น จากนั้นทดสอบการตกค้างของอาหารบนพื้นผิวแต่ละชนิด พบว่าพบว่าพื้นผิวเรียบมีมวลของสิ่งตกค้างเหลือน้อยกว่าพื้นผิวหยาบ และพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำมีการเกาะติดของอาหารน้อยกว่าพื้นผิวชอบน้ำ จากนั้นจึงสร้างสมการทำนายมวลที่เหลืออยู่บนพื้นผิวสัมผัสอาหารโดยการเพิ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของอาหารและพื้นผิวทำให้สมการทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น

Ashokkumar et al. (2012) ได้ทำการเปรียบเทียบสิ่งตกค้างบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความขรุขระเฉลี่ยแตกต่างกัน ซิลิโคนและเทฟลอน โดยนำน้ำมันมะกอกมาหยดลงบนพื้นผิวสัมผัสที่มีการเคลือบผิวที่แตกต่างกัน เพื่อทำการวัดมุมสัมผัส พบว่า พื้นผิวที่มีลักษณะแตกต่างกันจะมีค่ามุมสัมผัสที่ต่างกัน ซึ่งแสดงถึงการเกาะติดของสิ่งตกค้างที่ต่างกัน

### 2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน

Kalogianni et al. (2011) ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันปาล์มที่ผ่านการทอดซ้ำๆ ด้วยการทอดมันฝรั่งซ้ำที่ 170 องศาเซลเซียส ซ้ำ 1-40 รอบ จากนั้นวัดค่าความหนืดและแรงตึงผิว พบว่าน้ำมันที่ผ่านกระบวนการทอดซ้ำจะมีค่าความหนืดมากขึ้นและมีค่าแรงตึงผิวลดลงตามระยะเวลาการใช้งาน

Debnath et al. (2012) ได้ศึกษาการทอดขนมปურიที่มีส่วนผสมหลังเป็นแป้งด้วยน้ำมันรำข้าว ซ้ำ 7 รอบ รอบละ 15 นาที ที่อุณหภูมิ  $173 \pm 3$  องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปวัดค่าความหนืด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ค่าสารโพลาร์ (Total Polar Material, TPM) และค่าเปอร์ออกไซด์ (peroxide value , P.V.) พบว่าน้ำมันที่ผ่านการทอดซ้ำหลายครั้งจะมีค่าความหนืด ค่าสารโพลาร์

และค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมตัวกันของโมเลกุลน้ำมัน ทำให้ได้โมเลกุลที่มีน้ำหนักมากขึ้น แต่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ลดลง

### 2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจสอบการเกาะติด

Ndukaife et al. (2015) ใช้เทคนิคภาพถ่ายความร้อนย่านอินฟราเรดในการหาลักษณะการเกิดการสะสมของสารอนินทรีย์โดยการใช้น้ำผสมกับอะลูมิเนียมออกไซด์และน้ำผสมกับอะลูมิเนียมเป็นตัวอย่างของการสะสมบนพื้นผิวอัลตราฟิลเตรชันพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีความสัมพันธ์กับความขรุขระของพื้นผิวและองค์ประกอบของสารอนินทรีย์รีรี

Kubiak et al. (2011) ศึกษาลักษณะพื้นผิวที่มีผลต่อมุมสัมผัส โดยการหยดน้ำลงบนพื้นผิวประเภทโลหะผสม เซรามิกและโพลีเมอร์ จากนั้นนำไปวัดมุมสัมผัสด้วย PG-X goniometer พบว่าค่าความขรุขระเฉลี่ยของพื้นผิวที่มากขึ้น จะทำให้ค่ามุมสัมผัสของน้ำลดลง แสดงถึงความขรุขระของพื้นผิวมีต่อความสามารถในการเกาะติด



## บทที่ 3

# วัสดุ อุปกรณ์ และการทดลอง

### 3.1 วัสดุทดลอง

#### 3.1.1 ตัวอย่างน้ำมัน

น้ำมันปาล์มโอเลอินจากเนื้อปาล์มผ่านกรรมวิธีที่ไม่ผ่านการใช้งาน (รูปที่ 3.1 (ก)) ซื้อมาจากร้านที่อปซุบเปอร์มาร์เก็ต และน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการใช้งานโดยการทอดปาท่องโก๋ (รูปที่ 3.1 (ข)) ได้มาจากร้านขายปาท่องโก๋ ตลาดนัดสุวรรณภูมิ โดยมีการใช้งานที่อุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ ปริมาณ 1.6 ลิตร ปิดฝาให้สนิท เก็บให้พ้นจากแสงแดดที่อุณหภูมิห้อง ( $27\pm 3$  องศาเซลเซียส) ตลอดระยะเวลาการทดลอง



(ก)



(ข)

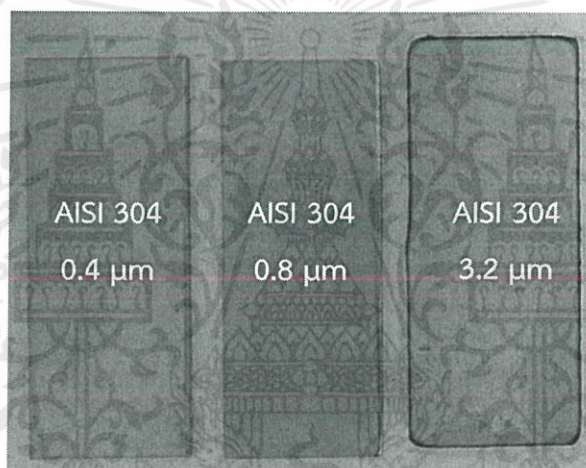
รูปที่ 3.1 ตัวอย่าง (ก) น้ำมันปาล์มโอเลอินที่ไม่ผ่านการใช้งาน และ (ข) น้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการใช้งาน

ตัวอย่างน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ผ่านการใช้งาน มีลักษณะทางกายภาพที่ขุ่นเหนียว สีเข้ม มีกลิ่นหืน และมีค่าความหนืดเป็น 74.96 cP ส่วนน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานมีค่าความหนืดเป็น 51.47 cP ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Brook field) รุ่น LVDV-II+P โดยเครื่องมีย่านการวัดที่ 15-20000 cP และมีความแม่นยำอยู่ที่  $\pm 0.1$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเครื่องที่ใช้ในการวัดไม่เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากค่าความหนืดของน้ำมันที่วัดมีค่าความหนืดต่ำเมื่อเทียบกับย่านการใช้งานของอุปกรณ์การวัดแต่สามารถใช้เพื่อเปรียบเทียบความหนืดของน้ำมันก่อนใช้งานและหลังใช้งานได้

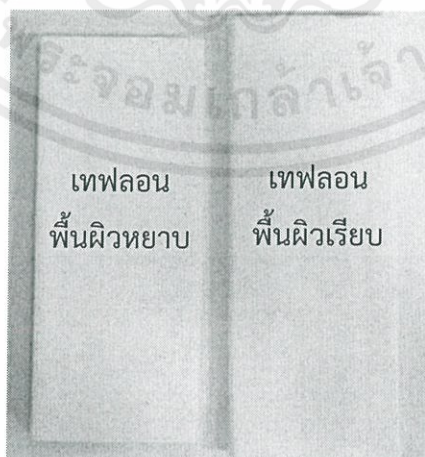
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ตัวอย่างพื้นผิวสัมผัสอาหาร

ใช้พื้นผิวสัมผัสอาหารเป็นตัวอย่างทดสอบ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ พื้นผิวที่ชอบน้ำ ได้แก่ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร ขนาด 5x10 เซนติเมตร ความหนา 0.4 เซนติเมตร จำนวนอย่างละ 3 แผ่น ซึ่งมีการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีการขัดเงาทางกลและลักษณะในการขัดเป็นการขัดตามแนวขวางแบบเดียวกันทั้งหมด ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์มาจาก บริษัท พัฒนากล จำกัด(มหาชน) แสดงดังรูปที่ 3.2 และพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ ได้แก่ แผ่นเทฟลอน ขนาด 5x10 เซนติเมตร ความหนา 0.4 เซนติเมตร ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวเรียบและหยาบ จำนวนอย่างละ 3 แผ่น โดยเทฟลอนพื้นผิวเรียบมีการขึ้นรูปด้วยวิธีการรีดและเทฟลอนพื้นผิวหยาบขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด ซึ่งสั่งซื้อมาจากบริษัท แพนแทสติก ไทรอ้ม จำกัด แสดงดังรูปที่ 3.3

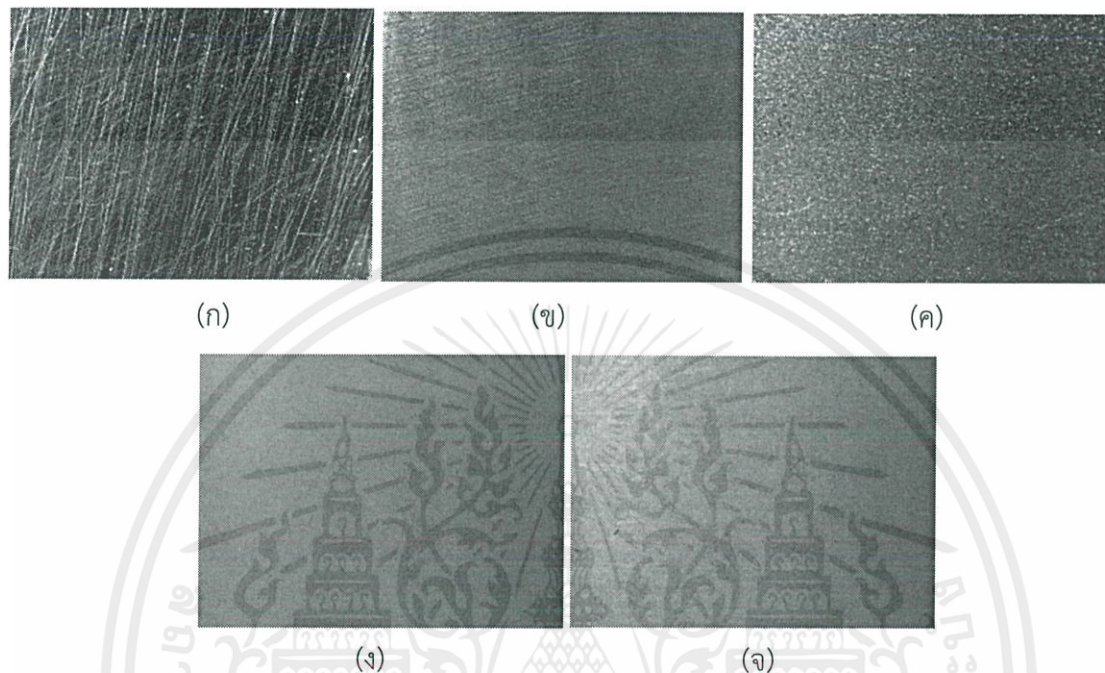


รูปที่ 3.2 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304



รูปที่ 3.3 แผ่นเทฟลอน

สามารถเปรียบเทียบลักษณะความแตกต่างของพื้นผิวทดสอบได้จากภาพถ่ายความละเอียด 2592x1944 พิกเซล จากกล้อง CCD Camera (รุ่น basler acA2500-14gc) โดยการส่องบนและบันทึกภาพ ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้มีพื้นที่ 2 ตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.4



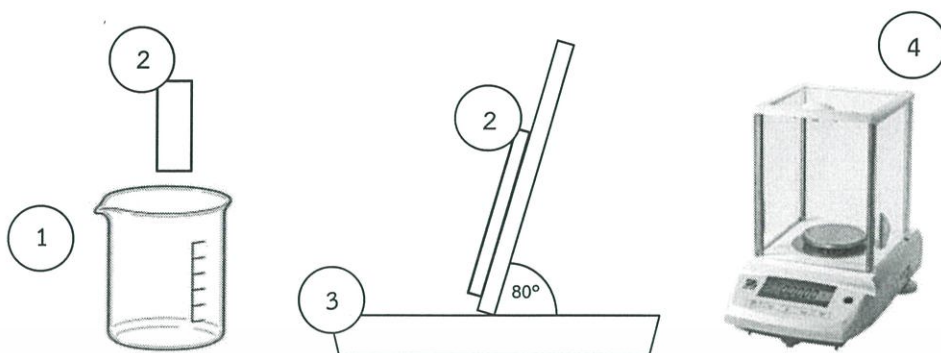
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร (ง) เทฟลอนพื้นผิวเรียบ และ (จ) เทฟลอนพื้นผิวหยาบ

จากตัวอย่างภาพถ่ายของพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย 3.2 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นผิวที่หยาบมากที่สุด ส่วนที่ความขรุขระเฉลี่ย 0.8 และ 0.4 ไมโครเมตร มีลักษณะพื้นผิวที่เป็นรอยขีดอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีความหยาบน้อยกว่าแผ่นความขรุขระเฉลี่ย 3.2 ไมโครเมตร และตัวอย่างภาพถ่ายของเทฟลอนพื้นผิวเรียบ พื้นผิวมีความสม่ำเสมอ และมีความหยาบน้อยกว่าเทฟลอนพื้นผิวหยาบ ซึ่งสังเกตได้จากรอยขีดตามแนวขวางบนพื้นผิว

### 3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลอง

ชุดอุปกรณ์ทดลองสำหรับการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวและชุดทดลองสำหรับการตรวจสอบการเกาะติดโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก วิธีการวัดมุมสัมผัส และวิธีการวัดอุณหภูมิจากการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.5 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

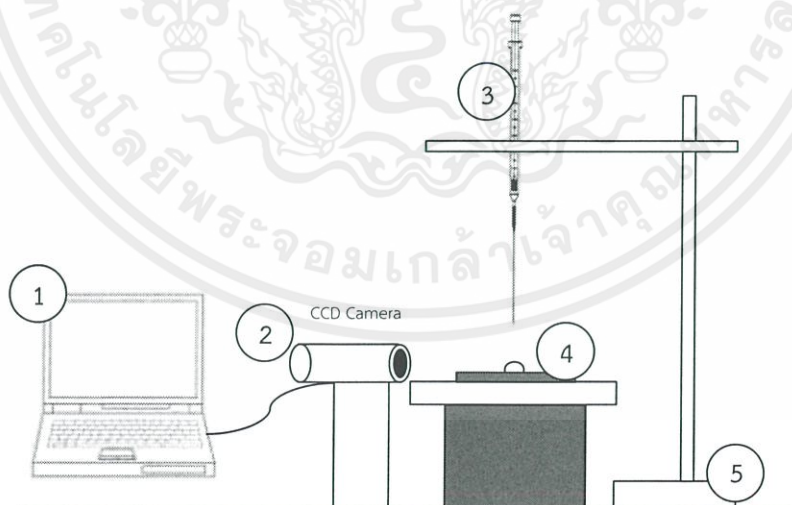
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของชุดทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก

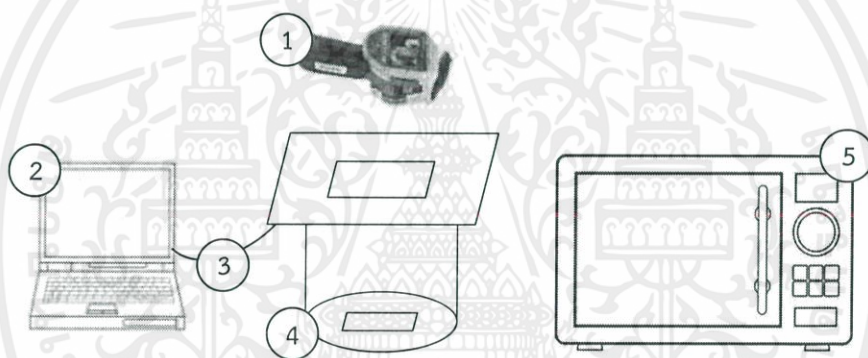
หมายเลข	ส่วนประกอบชุดทดลอง
1	บีกเกอร์ใส่ตัวอย่างทดลองขนาด 50 มิลลิลิตร
2	พื้นผิวทดสอบ
3	ฐานรองหยด ทำมุมเอียง 80 องศา กับพื้นราบ
4	เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง (รุ่น PIONEER PA214 พิกัดน้ำหนัก 210 กรัม)



รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์ทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบของชุดทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส

หมายเลข	ส่วนประกอบชุดทดลอง
1	คอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลภาพมุมสัมผัส (โปรแกรม ImageJ 1.41o)
2	กล้อง CCD (รุ่น basler acA2500-14gc)
3	เข็มหยดตัวอย่างทดลอง ขนาด 1 มิลลิเมตร และปลายเข็มรุ่น 20 gauge, Large Hub RN NDL
4	พื้นผิวทดสอบ
5	ฐานตั้งเข็มหยดตัวอย่าง



รูปที่ 3.7 ชุดอุปกรณ์ทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยการประมวลผลภาพถ่ายทางความร้อน

ตารางที่ 3.3 ส่วนประกอบของชุดทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันโดยการประมวลผลภาพถ่ายทางความร้อน

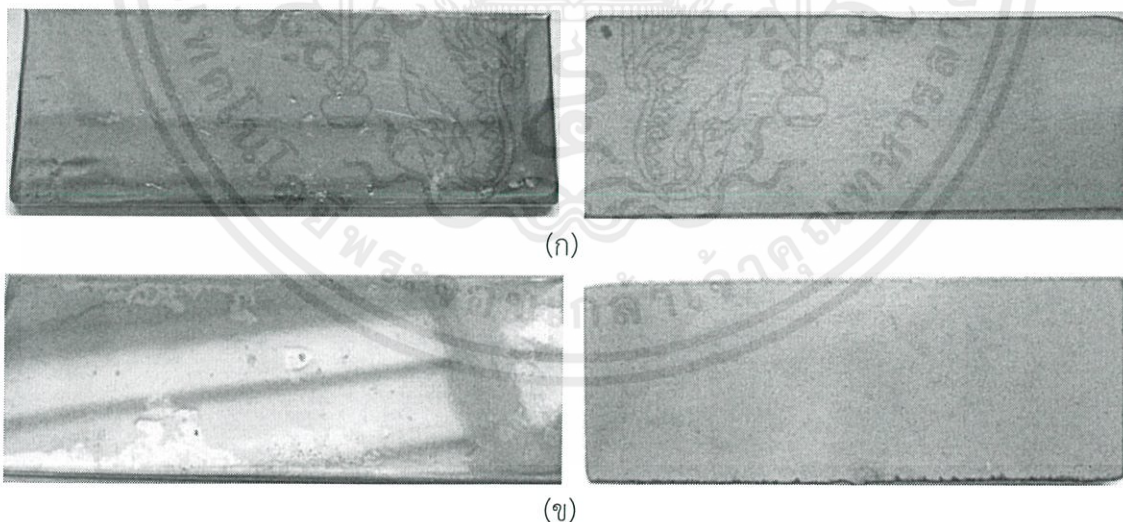
หมายเลข	ส่วนประกอบชุดทดลอง
1	กล้องถ่ายภาพทางความร้อน (รุ่น TI400)
2	คอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลค่าอุณหภูมิ (โปรแกรม SmartView 3.5)
3	เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
4	ถังเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร สูง 22 เซนติเมตร
5	ตู้อบไฟฟ้า (รุ่น ZOT103KX 220-240V 50-60Hz)

### 3.3 การทดลอง

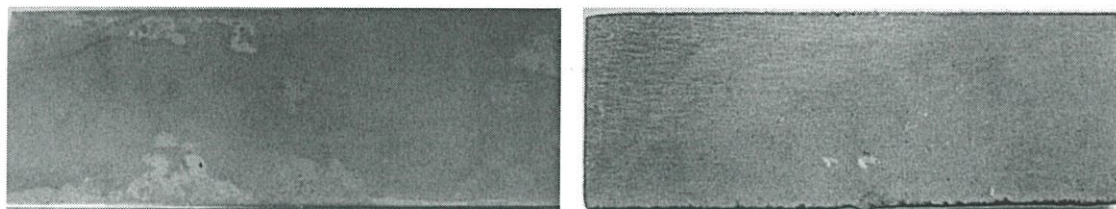
#### 3.3.1 การทดลองเบื้องต้น

##### 3.3.1.1 การเกาะติดของน้ำมัน

ทดลองการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวโดยใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีความขรุขระเฉลี่ย 0.4 และ 3.2 ไมโครเมตรและน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานเป็นตัวอย่างในการทดสอบเบื้องต้น โดยการนำพื้นผิวทดสอบจุ่มลงในน้ำมันที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส จุ่มลงด้วยอัตราเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และขึ้นด้วยอัตราเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นนำพื้นผิวทดสอบที่จุ่มมาปาดเช็ดด้านข้างและด้านหลัง และจัดวางพื้นผิวในแนวตั้ง เอียงทำมุม 80 องศากับพื้นราบ (รูปที่ 3.5) ปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 10 นาที และนำมาวางในแนวราบเป็นเวลา 5 นาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ทำการทดลองโดยปรับเวลาในการอบที่ 10 20 และ 30 นาที หลังจากการอบตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันเพื่อหาการเกาะติดของน้ำมันที่เหมาะสมโดยการทดลองเบื้องต้น (Preliminary Test) ที่มีการเตรียมตัวอย่าง 3 ซ้ำ พบว่าการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.8 (ก) เวลาในการอบ 10 นาที (ข) เวลาในการอบ 20 นาที และ (ค) เวลาในการอบ 30 นาที จากการสังเกตด้วยตาพบว่า ที่เวลา 20 นาที เป็นเงื่อนไขที่พบการเกาะติดของน้ำมันเป็นฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวและไม่เกิดการไหม้



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวทดสอบที่มีการเกาะติดของน้ำมันหลังอบด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่เวลา (ก) 10 นาที (ข) 20 นาที และ (ค) 30 นาที



(ค)

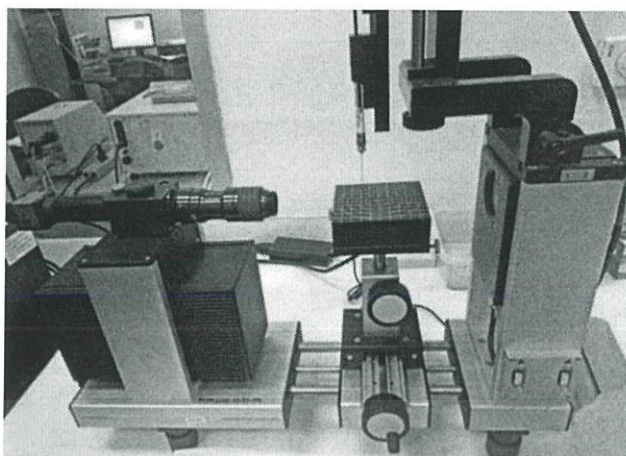
รูปที่ 3.8 (ต่อ) ตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวทดสอบที่มีการเกาะติดของน้ำมันหลังอบด้วยอุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ที่เวลา (ก) 10 นาที (ข) 20 นาที และ (ค) 30 นาที

### 3.3.1.2 การเปรียบเทียบเครื่องวัดมุมสัมผัส

ทำการเปรียบเทียบข้อมูลค่ามุมสัมผัสของเครื่องวัดมุมสัมผัสที่ใช้ในการทดลองกับเครื่องมือวัดมุมสัมผัส รุ่น OCA 20 (DATAPHYSICS) ของคณะวิทยาศาสตร์ (รูปที่ 3.9) โดยการหยดน้ำลงบนพื้นผิวทดสอบและใช้วิธีการวิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวจากเส้นสัมผัส (Tangent method) ในการวิเคราะห์มุมสัมผัส แสดงดังรูปที่ 3.10 จำนวนพื้นผิวทดสอบละ 3 แผ่น แผ่นละ 3 หยด จากผลการทดลอง พบว่า ค่ามุมสัมผัสของเครื่องวัดมุมสัมผัสจากการทดลองกับเครื่องมือวัดมุมสัมผัสของคณะวิทยาศาสตร์ ดังตารางที่ 3.4 มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าที่อ้างอิงจาก Intech Services (2016) จึงสามารถสรุปผลได้ว่าเครื่องวัดที่ใช้ในการทดลองมีความน่าเชื่อถือเพียงพอ

ตารางที่ 3.4 เปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ

พื้นผิวทดสอบ		มุมสัมผัสของน้ำ	
		เครื่องมือวัดจากการทดลอง	เครื่องมือจากคณะวิทยาศาสตร์
เหล็กกล้าไร้	0.4 ไมโครเมตร	76.03 ± 2.93	78.84 ± 6.96
สนิมเกรด	0.8 ไมโครเมตร	64.18 ± 8.03	70.80 ± 9.78
304	3.2 ไมโครเมตร	77.89 ± 5.40	74.90 ± 5.86
เทฟลอน	พื้นผิวเรียบ	109.44 ± 6.47	105.78 ± 5.23
	พื้นผิวหยาบ	132.59 ± 4.60	124.84 ± 7.82



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดมุมสัมผัสสรุ่น OCA 20 (DATAPHYSICS) ของคณะวิทยาศาสตร์

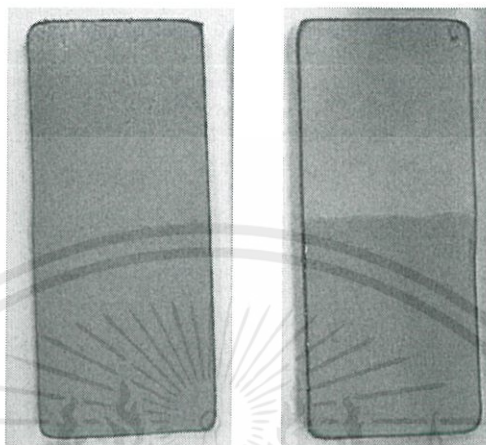


รูปที่ 3.10 วิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวของเครื่องวัดมุมสัมผัสคณะวิทยาศาสตร์

### 3.3.2 การทดลองการเกาะติดของน้ำมัน

นำพื้นผิวทดสอบจุ่มลงในน้ำมันทดสอบที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ โดยจุ่มพื้นผิวทดสอบด้วยมอเตอร์ที่มีความเร็วรอบที่อัตราเร็ว 5 มิลลิเมตรต่อวินาที และนำขึ้นด้วยอัตราเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที จากนั้นนำพื้นผิวทดสอบที่จุ่มมาปาดเช็ดด้านข้างและด้านหลัง จัดวางพื้นผิวในแนวตั้งเอียงทำมุม 80 องศา กับพื้นราบ ปลดทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที และนำมาวางในแนวราบเป็นเวลา 5 นาที โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก โดยจุ่มพื้นผิวทดสอบทั้งพื้นผิว (รูปที่ 3.11 (ก)) เนื่องจากการเกาะติดของน้ำมันครั้งแผ่นจะมีมวลน้อยเกินไปทำให้เครื่องชั่งน้ำหนักเห็นค่าความแตกต่างของน้ำหนักน้อย และการทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันด้วยการวัดมุมสัมผัสและการวัดอุณหภูมิด้วยภาพถ่ายทางความร้อน

โดยจุ่มพื้นผิวทดสอบเพียงครึ่งหนึ่ง (รูปที่ 3.11 (ข)) และนำพื้นผิวทดสอบที่จุ่มครึ่งพื้นผิวไปอบด้วย ตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เนื่องจากต้องการเปรียบเทียบค่ามุม สัมผัสและค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทดสอบที่มีการเกาะติดและไม่มีการเกาะติดของน้ำมัน



(ก)

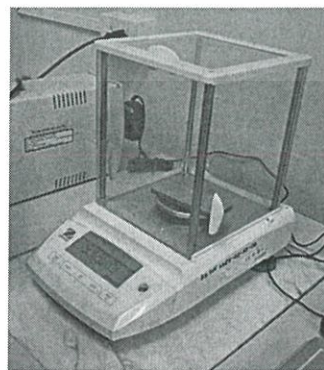
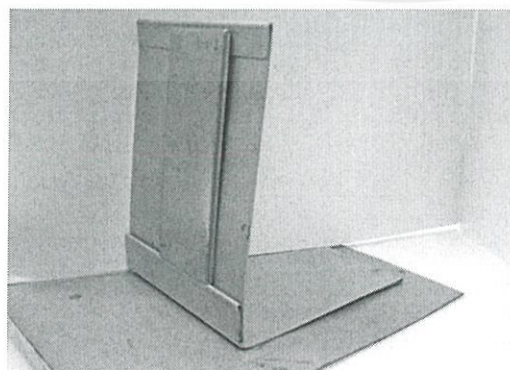
(ข)

รูปที่ 3.11 การจุ่มพื้นผิวทดสอบลงในน้ำมัน (ก) เต็มพื้นผิว และ (ข) ครึ่งพื้นผิว

### 3.3.3 การตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมัน

#### 3.3.3.1 การชั่งน้ำหนัก

นำตัวอย่างพื้นผิวทดสอบที่ไม่ผ่านการจุ่มน้ำมันทั้งพื้นผิวและที่ผ่านการจุ่มน้ำมันทั้งพื้นผิว มาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (รุ่น PIONEER PA214 พิกัดน้ำหนัก 210 กรัม) แสดงดังรูปที่ 3.12 และทำการจดบันทึกค่า โดยทำการชั่งน้ำหนักซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อพิจารณาผลต่างระหว่างน้ำหนักแผ่นก่อนและหลังการทดลองการเกาะติดของน้ำมัน โดยใช้ตัวอย่างพื้นผิวอย่างละ 3 แผ่น จำนวน 3 ซ้ำ เพื่อตรวจสอบปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบ

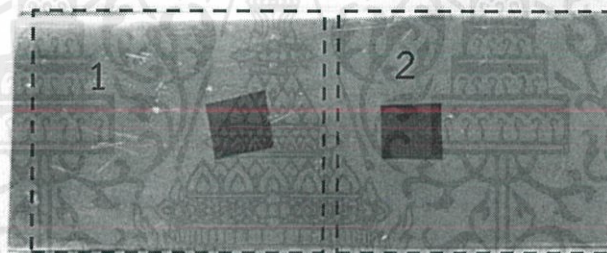


รูปที่ 3.12 การตรวจสอบการเกาะติดโดยการชั่งน้ำหนัก

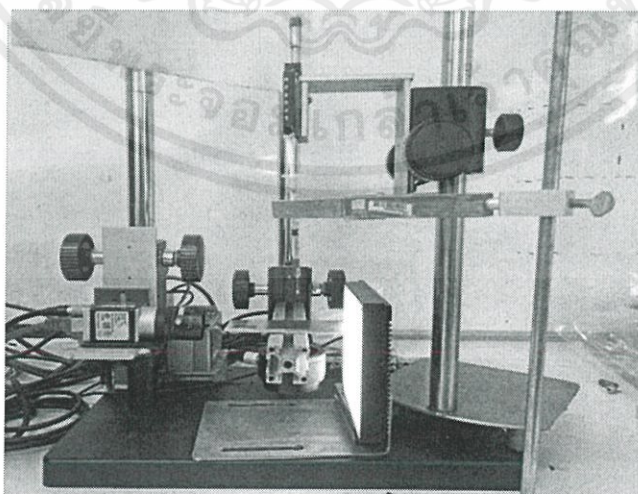
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3.2 การวัดมุมสัมผัส

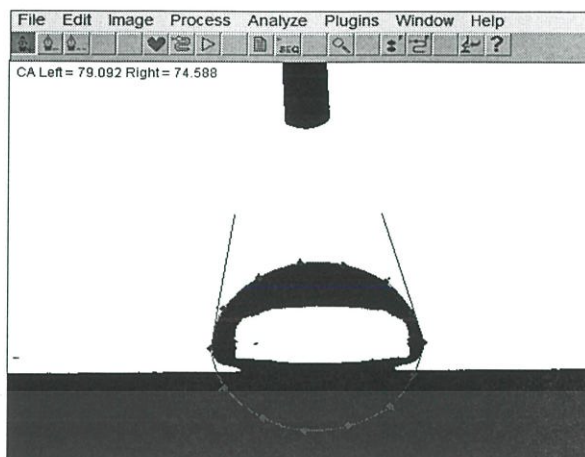
นำพื้นผิวทดสอบที่ผ่านการจุ่มน้ำมันครึ่งพื้นผิวและผ่านการอบ มาตรวจสอบการเกาะติดด้วยวิธีการวัดมุมสัมผัสโดยการหยดน้ำมันที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งาน ในชุดทดลองตรวจสอบการเกาะติด โดยการวัดค่ามุมสัมผัส แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยการนำพื้นผิวทดสอบมาหยดน้ำมันโดยให้เข็มห่างจากพื้นผิวทดสอบ 5 เซนติเมตร แล้วหยดน้ำมันออกมาปริมาณ 5 ไมโครลิตร ยกพื้นผิวทดสอบขึ้นไปแตะกับหยดน้ำมัน ทั้งบริเวณที่มีการเกาะติดของน้ำมัน (รูปที่ 3.13 ส่วนที่ 1) และบริเวณที่ไม่มีการเกาะติดของน้ำมัน (รูปที่ 3.13 ส่วนที่ 2) จากนั้นรอให้ขอบด้านข้างของน้ำมันไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยใช้เวลาประมาณ 3 นาที และบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD นำรูปภาพที่ได้ มาประมวลผลด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพ ImageJ 1.41o (รูปที่ 3.15) และทำการวัดมุมสัมผัสโดยวิธีการวิเคราะห์รูปทรงหยดของเหลวจากเส้นสัมผัส ทั้งสองข้างของหยดน้ำมัน ทำการหยดน้ำมันลงบนพื้นผิวทดสอบอย่างละ 3 แผ่น จำนวนแผ่นละ 3 หยด เพื่อตรวจสอบความสามารถในการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบ



รูปที่ 3.13 พื้นผิวทดสอบบริเวณที่มีการเกาะติดของน้ำมันและไม่มีการเกาะติดของน้ำมัน



รูปที่ 3.14 เครื่องมือวัดมุมสัมผัสจากการทดลอง



รูปที่ 3.15 การประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม ImageJ

### 3.3.3.3 การประมวลผลภาพถ่ายความร้อน

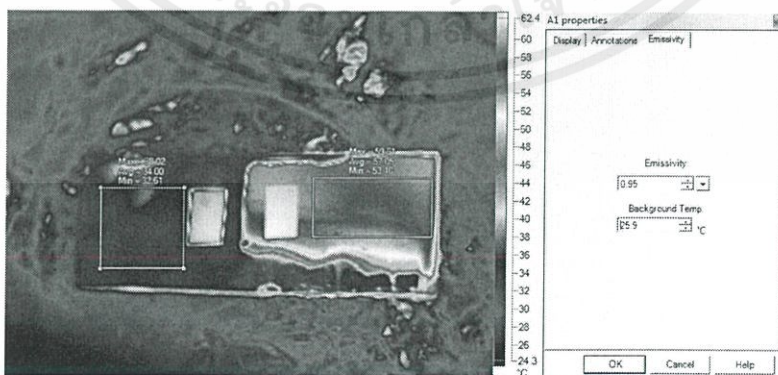
#### 1) การหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

1.1) หาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเทปพันสายไฟ โดยทราบอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวทดสอบจากเทอร์โมคัปเปิล หลังจากนั้นปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเทปพันสายไฟจนกระทั่งอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณเทปพันสายไฟมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวทดสอบ จุดประสงค์ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเทปพันสายไฟ เพื่อต้องการให้กล้องถ่ายภาพความร้อนอ่านค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวบริเวณเทปพันสายไฟได้ถูกต้อง ซึ่งสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของเทปพันสายไฟมีค่าเท่ากับ 0.95

1.2) หาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของน้ำมันทดสอบ โดยปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของกล้องให้เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเทปพันสายไฟ หลังจากนั้นปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวทดสอบบริเวณที่มีการเกาะติดของน้ำมัน จนกระทั่งอุณหภูมิเฉลี่ยใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณเทปพันสายไฟ (รูปที่ 3.15) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ปรับค่าแล้ว คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของน้ำมันที่เกาะติดบนพื้นผิว โดยค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของทั้งน้ำมันที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งานมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.95 จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวทดสอบโดยทำวิธีเดียวกัน แต่เปลี่ยนเป็นปรับค่าบนพื้นผิวทดสอบบริเวณที่ไม่มีการเกาะติดของน้ำมัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร มีค่า 0.18 0.25 และ 0.4 ตามลำดับ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของเทปลอนพื้นผิวเรียบมีและพื้นผิวหยาบมีค่า 0.95

## 2) การตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมัน

นำพื้นผิวทดสอบที่ผ่านการจุ่มน้ำมันครึ่งพื้นผิวและผ่านการอบ มาวัดค่าอุณหภูมิในชุดทดลอง (รูปที่ 3.7) โดยติดเทปพันสายไฟที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 0.95 ในบริเวณที่ไม่มีการเกาะติดและมีการเกาะติดของน้ำมัน นำพื้นผิวทดสอบมาให้ความร้อนด้วยตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ จากนั้นนำพื้นผิวทดสอบจัดวางในกล่องควบคุมสภาพแวดล้อมที่มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ไว้ข้างในกล่องควบคุมสภาพแวดล้อม เพื่อบันทึกค่าของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมและติดตั้งกล้องถ่ายภาพทางความร้อนไว้บนกล่องควบคุมสภาพแวดล้อม จากนั้นบันทึกภาพครึ่งพื้นผิวทดสอบโดยใช้ระยะเวลาประมาณ 10 วินาที ในการจัดวางพื้นผิวทดสอบและบันทึกภาพ นำภาพถ่ายความร้อนที่ได้นำไปวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิตามพื้นผิวด้วยโปรแกรม SmartView 3.5 (รูปที่ 3.15) โดยปรับค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมตามที่วัดค่าได้จากเทอร์โมคัปเปิลและปรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเป็น 0.95 จากนั้นวัดค่าอุณหภูมิโดยใช้เป็นพื้นที่เฉลี่ยบนพื้นผิวที่มีการเกาะติด เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเกาะติดของน้ำมันกับค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.16 การตรวจสอบการเกาะติดโดยการประมวลผลภาพถ่ายความร้อนและการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนด้วยโปรแกรม SmartView 3.5

### 3.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลกระทบท่อตัวแปรตอบสนองทุกกรณี ทำการทดลอง 2 ปัจจัย 3 ซ้ำ แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างน้ำมันและตัวอย่างพื้นผิวสัมผัสอาหารในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย
ประเภทของพื้นผิวสัมผัสอาหาร	เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ค่าความขรุขระเฉลี่ย 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร เทฟลอนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวหยาบ
น้ำมัน	น้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการใช้งาน

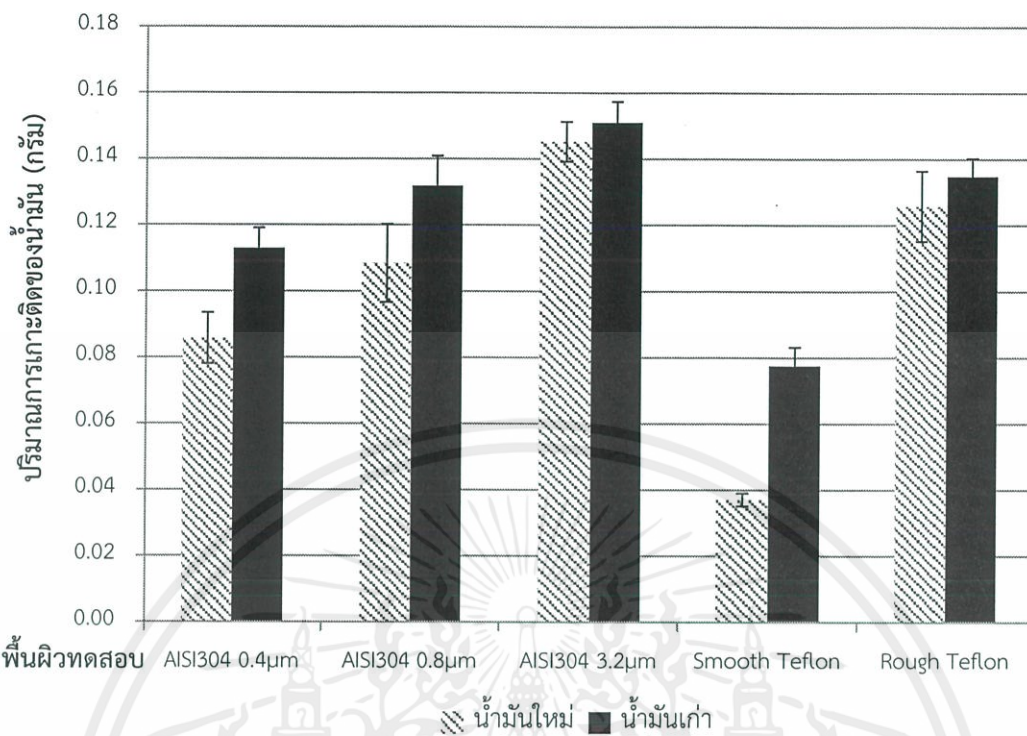
การทดลองนี้จัดสิ่งทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) และดำเนินการแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design ; CRD) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) แบ่งการวิเคราะห์เป็นสองส่วน คือ การทดสอบที (T-test) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) หากพบว่ามี ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ จะทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's Multiple Comparison ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $p < 0.05$ ) โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2010

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยและประเภทแตกต่างกัน ดังนี้ เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระเฉลี่ย 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร และ เทฟลอนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวหยาบ เมื่อทำการบันทึกข้อมูลน้ำหนักของน้ำมันที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวหลังจากที่ผ่านการจุ่มแล้ววางเอียงทำมุม 80 องศา เป็นเวลา 10 นาที และวางนอนในแนวราบเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งได้ผลการทดลองและการวิเคราะห์น้ำหนักของน้ำมันที่เกาะติดบริเวณพื้นผิวทดสอบกับค่าความขรุขระเฉลี่ยและประเภทของพื้นผิวแตกต่างกัน ดังนี้ พื้นผิวที่มีค่าความหยาบผิวมากจะมีการเกาะติดของน้ำมันที่มาก แสดงดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากพื้นผิวที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยมาก ส่งผลให้น้ำมันมีพื้นที่ในการเกาะติดมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการเปียกมากกว่า (Kubiak et al., 2011; Aydar and Yüksel, 2012) และพื้นผิวที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยมากจะมีหลุมขนาดเล็กทำให้น้ำมันตกค้างอยู่บนพื้นผิวมากกว่าพื้นผิวเรียบ (Bikerman, 1965) โดยเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีความขรุขระเฉลี่ย 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร มีการเกาะติดของน้ำมัน  $0.08 \pm 0.01$   $0.12 \pm 0.01$  และ  $0.15 \pm 0.01$  กรัม ตามลำดับ และความหยาบที่มากของพื้นผิวเทฟลอน ส่งผลให้พื้นผิวเทฟลอนที่มีความหยาบมาก มีการเกาะติดของน้ำมันมากกว่าพื้นผิวที่เรียบ โดยเทฟลอนพื้นผิวหยาบและพื้นผิวเรียบมีการเกาะติด  $0.04 \pm 0.00$  และ  $0.13 \pm 0.01$  กรัม ซึ่งพื้นผิวชนิดเดียวกันเมื่อมีความขรุขระเฉลี่ยหรือความหยาบเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การเกาะติดของน้ำมันเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับการเปรียบเทียบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำพบว่า ในพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความขรุขระเฉลี่ย 0.4 ไมโครเมตร และพื้นผิวเทฟลอนเรียบ มีปริมาณการเกาะติดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนพื้นผิวอื่นๆ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำมีปริมาณการเกาะติดที่น้อยกว่า (รูปที่ 4.1) เนื่องจากพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำมีค่างานการเกาะติดที่ต่ำ ทำให้การแยกน้ำมันออกจากพื้นผิวทำได้ง่าย เพราะน้ำมันไม่เกาะติดกับพื้นผิว (Michalski et al., 1998) นอกจากนี้ การเกาะติดของน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานจะมีการเกาะติดมากกว่าน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 เนื่องจากน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีค่าแรงตึงผิวต่ำลงและมีค่าความหนืดมากขึ้น (Kalogianni et al., 2011; Debnath et al., 2012)



รูปที่ 4.1 ปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบ

พื้นผิวทดสอบ	พื้นผิวทดสอบ	ปริมาณการเกาะติด (กรัม)	
		น้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งาน	น้ำมันที่ผ่านการใช้งาน
เหล็กกล้าไร้สนิม	0.4 ไมโครเมตร	0.08±0.01 <sup>Aa</sup>	0.11±0.01 <sup>Ba</sup>
เกรด 304	0.8 ไมโครเมตร	0.12±0.01 <sup>Ab</sup>	0.13±0.01 <sup>Ab</sup>
	3.2 ไมโครเมตร	0.14±0.01 <sup>Ac</sup>	0.15±0.01 <sup>Ac</sup>
	พื้นผิวเรียบ	0.04±0.00 <sup>Aa</sup>	0.08±0.01 <sup>Ba</sup>
เทฟลอน	พื้นผิวหยาบ	0.13±0.01 <sup>Ab</sup>	0.13±0.01 <sup>Ab</sup>

\* ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ตามหลังที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (A และ B) และตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังที่แตกต่างกันในแนวนอน (a b และ c) แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

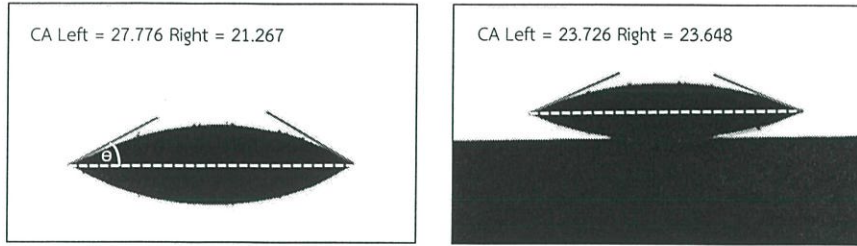
การทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวโดยวิธีการวัดมุมสัมผัส จากค่ามุมสัมผัสของน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบที่ไม่มีการเกาะติดของน้ำมัน พบว่า พื้นผิวที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยมากจะมีการเกาะติดของน้ำมันมากกว่าและมีค่ามุมสัมผัสที่น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากค่าความขรุขระเฉลี่ยมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติการเปียกของพื้นผิว พื้นผิวที่มีความขรุขระเฉลี่ยมาก จะมีรอยหรือร่องหลุมบนพื้นผิว ทำให้มีพื้นผิวสัมผัสจริงที่มากกว่า จึงมีความสามารถในการเปียกได้ดีกว่า (Kubiak et al., 2011; Aydar and Yüksel, 2012) ส่งผลให้น้ำมันมีความสามารถในการเกาะติดที่มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบมุมสัมผัสของพื้นผิวทั้ง 2 ประเภท พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำจะมีค่ามุมสัมผัสมากกว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำ เนื่องจากพื้นผิวมีค่าแรงตึงผิวสูง (Michalski et al., 1997) สำหรับน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานจะมีค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวสูงกว่าน้ำมันที่ผ่านการใช้งานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2 เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีค่าแรงตึงผิวต่ำลง (Kalogianni et al., 2011; Debnath et al., 2012) มุมสัมผัสที่ได้จึงต่ำลง ยกเว้น พื้นผิวเหล็กไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย 3.2 ไมโครเมตร มีค่าของมุมสัมผัสของน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการใช้งาน เท่ากับ  $13.81 \pm 1.86$  และ  $13.97 \pm 2.11$  เนื่องจากเป็นพื้นผิวที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยมากที่สุด ทำให้น้ำมันทั้ง 2 ชนิด ซึมลงไปตามรอยและร่องหลุมบนพื้นผิว ค่ามุมสัมผัสที่ได้จึงไม่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ค่ามุมสัมผัสของน้ำมันที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งานบนพื้นผิวที่ไม่มีการเกาะติด

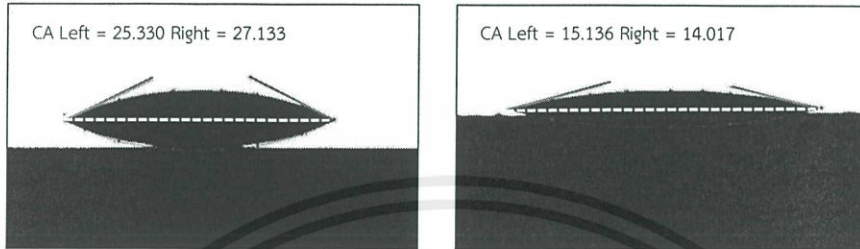
พื้นผิวทดสอบ	มุมสัมผัส (องศา)	น้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งาน	
		น้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งาน	น้ำมันที่ผ่านการใช้งาน
เหล็กกล้าไร้สนิม	0.4 ไมโครเมตร	$30.81 \pm 2.38^{Aa}$	$24.04 \pm 3.21^{Ba}$
เกรด 304	0.8 ไมโครเมตร	$27.52 \pm 3.18^{Ab}$	$14.29 \pm 2.63^{Bb}$
	3.2 ไมโครเมตร	$13.81 \pm 1.86^{Ac}$	$13.97 \pm 2.11^{Ab}$
เทฟลอน	พื้นผิวเรียบ	$53.70 \pm 1.89^{Aa}$	$51.82 \pm 4.65^{Ba}$
	พื้นผิวหยาบ	$51.59 \pm 6.54^{Ab}$	$43.30 \pm 4.65^{Ba}$

\* ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ตามหลังที่แตกต่างกันในแนวนอน (A และ B) และตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a b และ c) แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



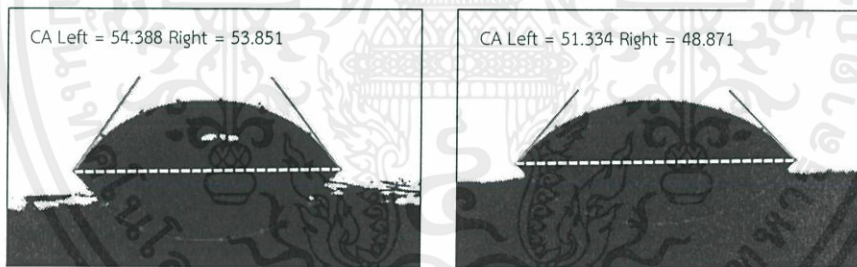
(ก)



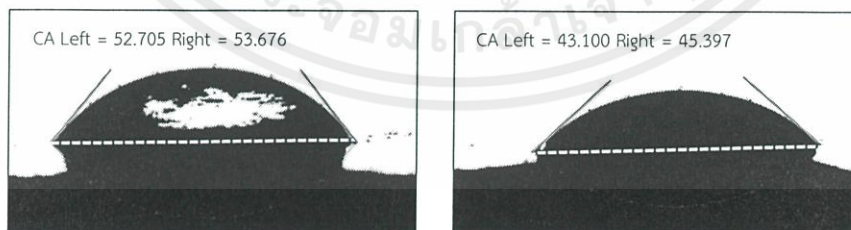
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

หยดน้ำมันใหม่

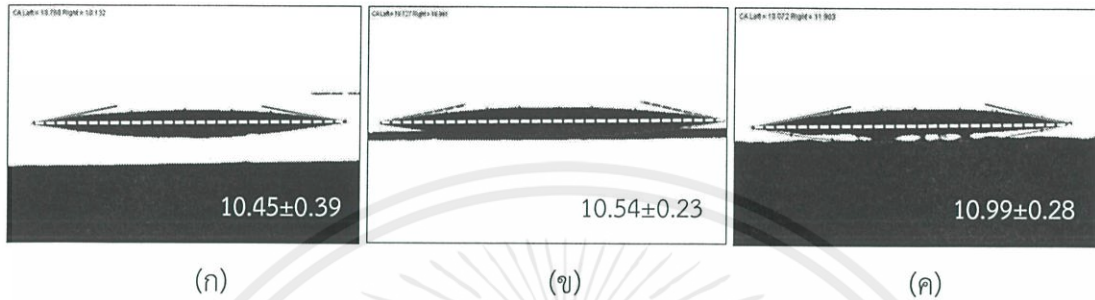
หยดน้ำมันเก่า

รูปที่ 4.2 การวัดมุมสัมผัสด้วยการหยดน้ำมันใหม่และหยดน้ำมันเก่าบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 และ(ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทพลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ)

พื้นผิวหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อพิจารณาค่ามุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมันบนพื้นผิวทดสอบที่มีการเกาะติดของน้ำมัน ค่ามุมสัมพัทธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากน้ำมันที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิวทดสอบเป็นน้ำมันที่มีค่าความหนืดกับแรงตึงผิวเท่ากัน และการเกาะติดของน้ำมันทำให้ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวไม่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่ามุมสัมพัทธ์ที่วัดได้จากการทดลองไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.3 ภาพแสดงค่ามุมสัมพัทธ์ของน้ำมันบนพื้นผิวแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีการเกาะติดของน้ำมันที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 และ(ค) 3.2 ไมโครเมตร

จากการประมวลผลภาพถ่ายความร้อน เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทดสอบที่มีการเกาะติดของน้ำมัน ดังตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าความขรุขระเฉลี่ยพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นของพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิม จะมีการเกาะติดของน้ำมันมากขึ้น ทำให้มีค่าอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากบนพื้นผิวมีมวลของน้ำมันที่เกาะติดอยู่มาก ทำให้มีการสะสมของพลังงานสูง เมื่อเกิดการสูญเสียความร้อนพื้นผิวที่มีมวลของน้ำมันที่เกาะติดมากกว่า จะยังคงมีพลังงานสะสมอยู่มาก ทำให้อุณหภูมิมีแนวโน้มสูงกว่า แต่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีค่าแตกต่างกันน้อยค่าอุณหภูมิที่ได้จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนพื้นผิวที่เคลือบค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากพื้นผิวเรียบและพื้นผิวหยาบมีการเกาะติดของน้ำมันที่น้อยและมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่เท่ากัน คือ 0.95 ส่วนที่ค่าความขรุขระเฉลี่ยหรือที่ความหยาบเดียวกัน แต่คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันแตกต่างกัน พบว่า การเกาะติดของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานจะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิให้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ประเภทของพื้นผิว พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ มีค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำ ถึงแม้ว่าจะมีการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวที่น้อยกว่า เนื่องจากพื้นผิวเป็นวัสดุที่มีค่าความจุความร้อนสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนออกได้ช้ากว่า สำหรับน้ำมันที่ผ่านการใช้งานจะมีความสามารถในการเกาะติดที่มากขึ้น บนพื้นผิวจึงมีมวลของน้ำมันมาก ทำให้บริเวณที่มีค่าอุณหภูมิสูงขึ้น ยกเว้นพื้นผิวที่เคลือบ เนื่องจากพื้นผิวที่เคลือบมีการเกาะติดของน้ำมันที่น้อย ทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าไม่แตกต่างกัน

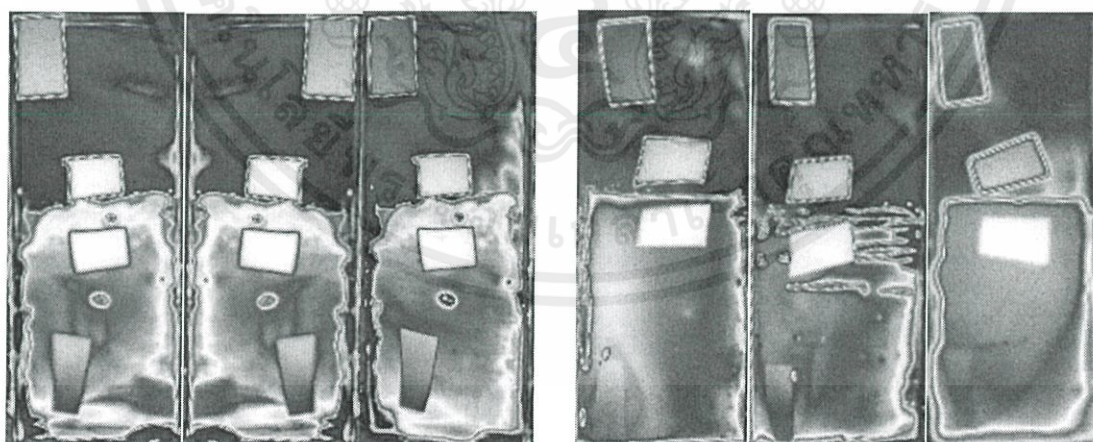
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีการเกาะติดของน้ำมันที่ไม่ผ่านและผ่านการใช้งาน

พื้นผิวทดสอบ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
	น้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งาน	น้ำมันที่ผ่านการใช้งาน
เหล็กกล้า 0.4 ไมโครเมตร	50.21 ± 1.25 <sup>Aa</sup>	54.22 ± 2.27 <sup>Ba</sup>
ไร้สนิม 0.8 ไมโครเมตร	52.25 ± 1.87 <sup>Aa</sup>	58.10 ± 1.72 <sup>Bab</sup>
เกรด 304 3.2 ไมโครเมตร	53.44 ± 1.27 <sup>Aa</sup>	61.89 ± 0.17 <sup>Bb</sup>
เทฟลอน	พื้นผิวเรียบ	62.83 ± 0.18 <sup>Aa</sup>
	พื้นผิวหยาบ	62.77 ± 0.22 <sup>Aa</sup>
		61.43 ± 0.91 <sup>Ab</sup>

\* ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ตามหลังที่แตกต่างกันในแนวนอน (A และ B) และตัวอักษรภาษาอังกฤษตามหลังที่แตกต่างกันในแนวตั้ง (a และ b) แสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ )

จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมบริเวณที่มีการเกาะติดของน้ำมันจะมีโทนสีที่ร้อนกว่า เนื่องจากมีการสะสมของน้ำมันมากส่งผลให้มีอุณหภูมิสูงกว่า ส่วนบริเวณที่ไม่มีการเกาะติดของน้ำมันจะเป็นอุณหภูมิของพื้นผิวสัมผัสอาหาร จึงมีการสะสมของพลังงานที่น้อยกว่า ทำให้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นเป็นสีโทนเย็น ส่วนบนพื้นผิวเทฟลอนเป็นพื้นผิวที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่ความร้อนสูงและมีการเกาะติดของน้ำมันที่น้อยมาก ทำให้ภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพทางความร้อนเป็นสีโทนร้อนทั้งบริเวณที่มีการเกาะติดและบริเวณที่ไม่มีการเกาะติด

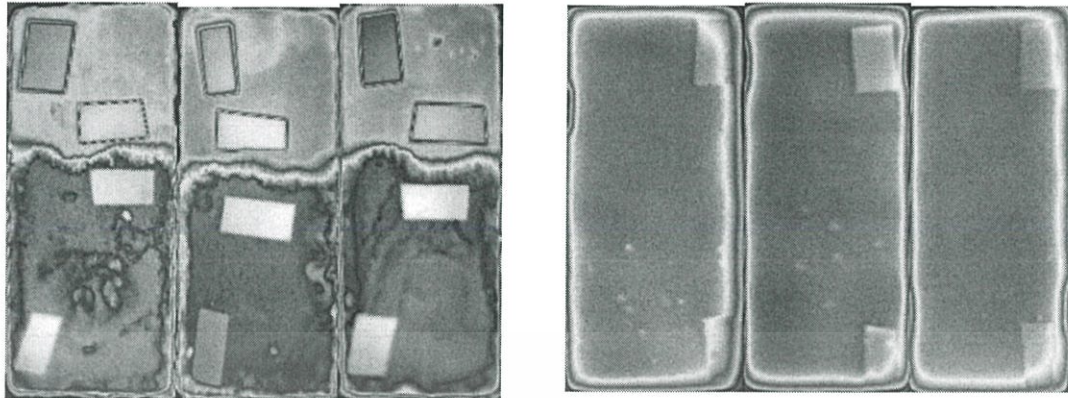


(ก)

(ข)

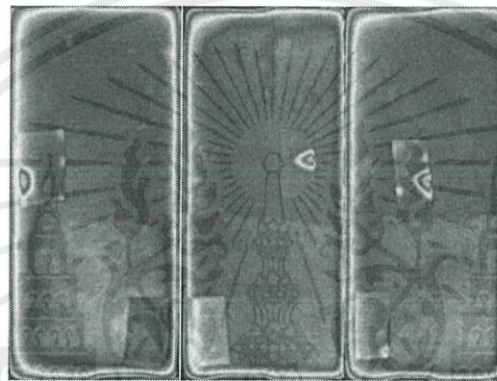
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายความร้อนที่มีการเกาะติดของคราบน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทฟลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ) พื้นผิวหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



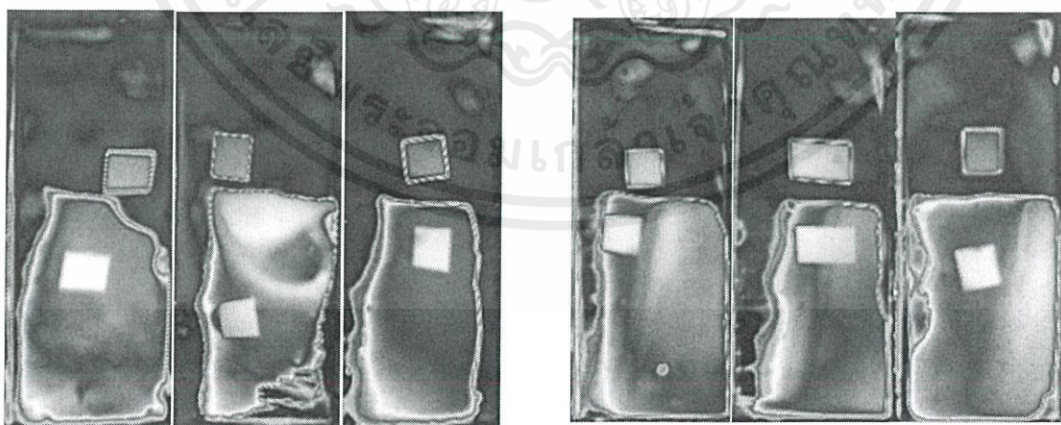
(ค)

(ง)



(จ)

รูปที่ 4.4 (ต่อ) ภาพถ่ายความร้อนที่มีการเกาะติดของคราบน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทฟลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ) พื้นผิวหยาบ

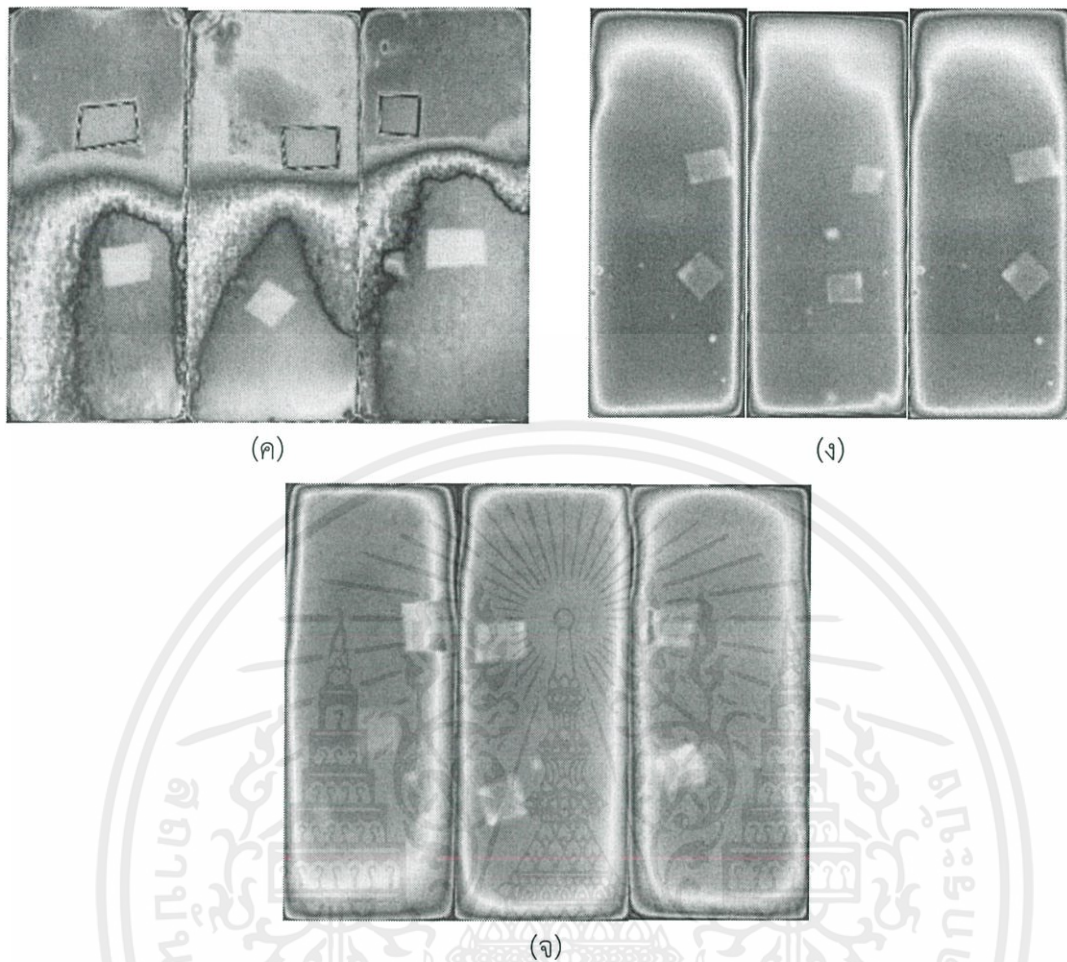


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายความร้อนที่มีการเกาะติดของคราบน้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทฟลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ) พื้นผิวหยาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (ต่อ) ภาพถ่ายความร้อนที่มีการเกาะติดของคราบน้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิว เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่ความขรุขระเฉลี่ย (ก) 0.4 (ข) 0.8 (ค) 3.2 ไมโครเมตร และเทฟลอน (ง) พื้นผิวเรียบ (จ) พื้นผิวหยาบ

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

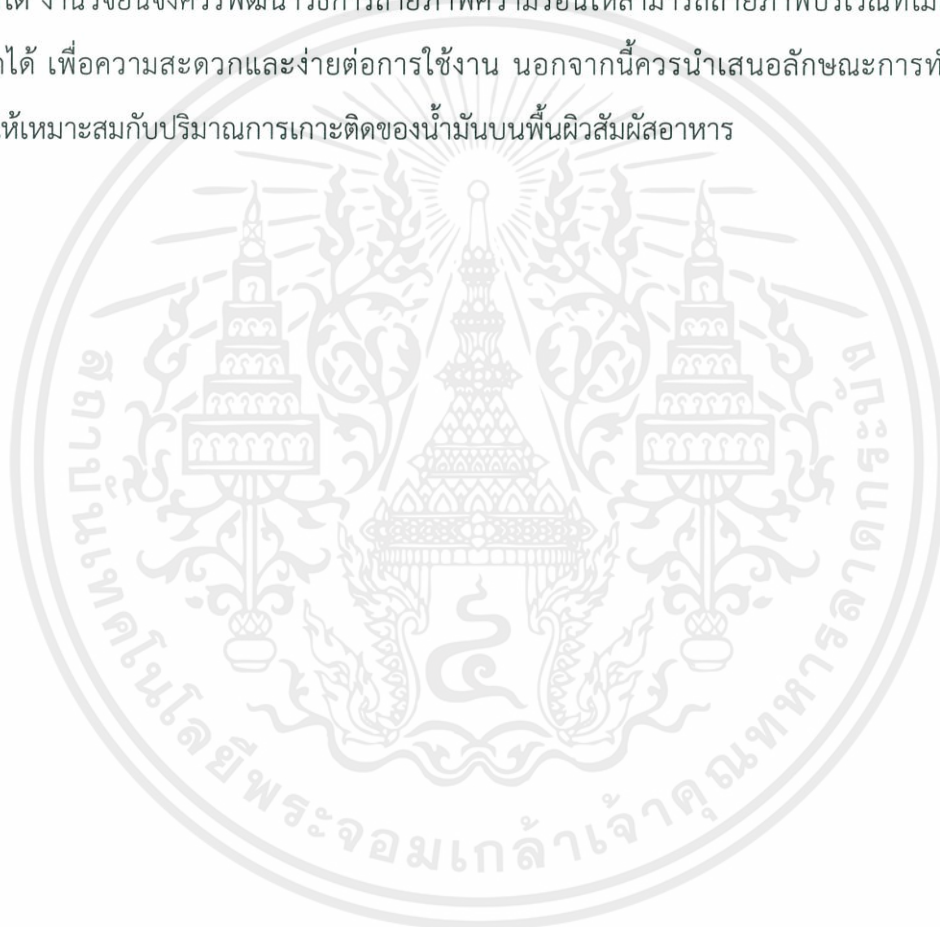
โครงการวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะของพื้นผิวสัมผัสอาหารที่ส่งผลต่อการเกาะติดของน้ำมัน และศึกษาวิธีการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหารโดยวิธีการชั่งน้ำหนัก การวัดมุมสัมผัสด้วยวิธีการประมวลผลภาพและการวัดอุณหภูมิโดยภาพถ่ายความร้อน โดยศึกษาการเกาะติดของน้ำมันปาล์มโอเลอินที่ไม่ผ่านการใช้งาน และผ่านการใช้งานด้วยการทอดปาท่องโก๋ อุณหภูมิ 170-190 องศาเซลเซียส เวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ และใช้พื้นผิวทดสอบเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีค่าความขรุขระเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 0.8 และ 3.2 ไมโครเมตร ขนาด 5x10 เซนติเมตร ความหนา 0.4 เซนติเมตร ซึ่งมีการเตรียมพื้นผิวโดยใช้วิธีการขัดเงาทางกลและลักษณะในการขัดเป็นการขัดตามแนวขวางแบบเดียวกันทั้งหมดและแผ่นเพลลอน ขนาด 5x10 เซนติเมตร ความหนา 0.4 เซนติเมตร ที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบและหยาบ จำนวนอย่างละ 3 แผ่น ทำการทดลองโดยการนำพื้นผิวทดสอบจุ่มลงในน้ำมันทดสอบ จากนั้นนำพื้นผิวทดสอบที่จุ่มมาปาดเช็ดด้านข้างและด้านหลัง จัดวางพื้นผิวในแนวตั้งเอียงทำมุม 80 องศา กับพื้นราบ ปลดทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที และนำมาวางในแนวราบเป็นเวลา 5 นาที โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก โดยจุ่มพื้นผิวทดสอบทั้งพื้นผิว และการทดลองการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันด้วยการวัดมุมสัมผัสและการวัดอุณหภูมิด้วยภาพถ่ายทางความร้อน โดยจุ่มพื้นผิวทดสอบเพียงครั้งหนึ่ง และนำพื้นผิวทดสอบที่จุ่มครั้งพื้นผิวไปอบด้วยตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากการทดลองพบว่า ลักษณะพื้นผิวทดสอบมีผลต่อการเกาะติดของน้ำมัน โดยการเกาะติดของน้ำมันมีแนวโน้มตามความขรุขระ นั่นคือ เมื่อค่าความขรุขระของพื้นผิวมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเกาะติดของน้ำมันมากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kubiak et al. (2011) และ Aydar and Yüksel (2012) รวมไปถึงประเภทของพื้นผิว พื้นผิวที่ชอบน้ำมีค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่า แสดงถึงการเกาะติดของน้ำมันที่มากกว่าพื้นผิวไม่ชอบน้ำ ส่วนในด้านของคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันก็มีผลต่อการเกาะติด นั่นคือ น้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีการเกาะติดมากกว่าน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนทุกพื้นผิวทดสอบ ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Kalogianni et al. (2011) และ Debnath et al. (2012) นอกจากนี้ในการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร บริเวณพื้นผิวที่มีการเกาะติดของน้ำมันที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผ่านการใช้งานจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่ไม่มีการเกาะติดของน้ำมัน ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคภาพถ่ายความร้อนในการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคภาพถ่ายความร้อนในการตรวจสอบการเกาะติดของน้ำมัน ซึ่งเป็นการถ่ายภาพบริเวณที่มีการเกาะติดของน้ำมัน โดยในอุตสาหกรรมอาหาร การถ่ายภาพความร้อนการเกาะติดของน้ำมันทำได้ยาก เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่มักทำในกระบวนการปิดซึ่งไม่สามารถเห็นการเกาะติดได้ งานวิจัยนี้จึงควรพัฒนาวิธีการถ่ายภาพความร้อนให้สามารถถ่ายภาพบริเวณที่ไม่เกิดการเกาะติดได้ เพื่อความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ควรนำเสนอลักษณะการทำความสะอาดให้เหมาะสมกับปริมาณการเกาะติดของน้ำมันบนพื้นผิวสัมผัสอาหาร



## บรรณานุกรม

- กระทรวงสาธารณสุข. ศูนย์ปฏิบัติการความปลอดภัยด้านอาหาร. 2549, ภัยน้ำมันทอดซ้ำ.
- นวกัทราน หนูนาค และ ทวีพล ชี้อัสตย์. 2556. การวัดและเครื่องมือวัด Measurement & Instrumentation การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. ครั้งที่พิมพ์ 2. กรุงเทพฯ : มีนเซอร์วิส ซัพพลาย.
- Ashokkumar S. , Nissen J. Adler and Møller Per 2012. “Factors affecting the wettability of different surface materials with vegetable oil at high temperatures and its relation to cleanability ”. *Applied Surface Science*. 86-94.
- Aydar and Yüksel A. 2012. “Determination of Contact Angle of Olive oil and Canola Oil on a PTFE surface at Elevated Temperatures”. *Journal of Food science*.
- Bikerman J.J. 1965. “Drainage of liquid from surfaces of different rugosities”. *Journal of colloid science* 11. 299-307.
- Debnath S., Rastogi, K. Navin, Krishna A. G. Gopala, and Lokesh, B. R. 2012. ”Effect of frying cycles on physical, chemical and heat transfer quality of rice bran oil during deep-fat frying of poori: An Indian traditional fried food.” *Food and Bioproducts Processing*. 249-256.
- Dürr H. 2007. “Influence of surface roughness and wettability of stainless steel on soil adhesion, cleanability and microbial in-activation”. *Food and Bioproducts Processing*. 85 : 49-56.
- Foschino, F. Picozzi, C. Civardi, A. Bandini, M. Faroldi, P. 2003. “Comparison of surface sampling methods and cleanability assessment of stainless steel surfaces subjected or not to shot peening”. *Journal of food Engineering*. 375–381.
- Hones C. and Harrison A., 2006. “Importance of surface finish in the design of Stainless Steel” *Stainless Steel industry*.
- Jullien, C. Benezech, T. Carpentier, B. Lebret, V. Faille., C. 2002. “Identification of surface characteristics relevant to the hygienic status of stainless steel for the food industry”. *Journal of food engineering*. 56 : 77–87.

- Kalogianni E.P. , Karapantsios T.D. and Miller R. 2011. “Effect of repeated frying on the viscosity, density and dynamic interfacial tension of palm and olive oil”. *Journal of Food Engineering*. 169-179.
- Kubiak K.J., Wilson M.C.T., Mathia T.G. and Carval Ph. 2011. “Wettability versus roughness of engineering surfaces”. *Tribology International*. 593-601.
- Michalski M.C. , , S. Desobry, Mousavi M. and J. Hardy 1997. “Food materials adhesion: A review”. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 591-619.
- Michalski M.C. , S. Desobry, Mousavi M. and J. Hardy 1998. “Prediction of mass of residues on food contact surfaces from edible oils and their emulsions”. *Journal of Food Engineering*. 271-291.
- Ndukaife, Justus K.O., Ndukaife C. and AgwuNnanna. A.G. 2015. “Membrane fouling characterization by infrared thermography”. *Infrared Physics & Technology*. 68: 186–192.
- Partington, E. 2006. “Stainless Steel in the food and beverage Industry”. *Material and Application*. 7: 1–24.
- Gould R.F. 1964. “Contact Angle, Wettability, and Adhesion” *Advances in Chemistry*.
- Rossi M., Alamprese C., Ratti S., Riva M. 2009 “Suitability of contact angle measurement as an index of overall oil degradation and oil uptake during frying”. *Food Chemistry* 112. 448–453.
- Vanhaecke, E. Remon, J.P. Moors, M. Raes, S. Rudder, D.D. Peteghem, A.V. 1989. Kinetics of *Pseudomonas aeruginosa* Adhesion to 304 and 316-L Stainless Steel: Role of Cell Surface Hydrophobicity. *Applied and Environmental Microbiology*, 56 : 788-795.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากการผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ปริมาณการเกาะติดของน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งาน

พื้นผิวทดสอบ		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ปริมาณการเกาะติดเฉลี่ย (กรัม)
เหล็กกล้าไร้สนิม	0.4 ไมโครเมตร	0.08	0.09	0.08	$0.08 \pm 0.01$
สนิมเกรด 304	0.8 ไมโครเมตร	0.11	0.12	0.09	$0.12 \pm 0.11$
	3.2 ไมโครเมตร	0.14	0.14	0.15	$0.14 \pm 0.01$
เทฟลอน	พื้นผิวเรียบ	0.03	0.04	0.04	$0.04 \pm 0.00$
เทฟลอน	พื้นผิวหยาบ	0.14	0.12	0.12	$0.13 \pm 0.01$

ตารางที่ ก.2 ปริมาณการเกาะติดของน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน

พื้นผิวทดสอบ		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ปริมาณการเกาะติดเฉลี่ย (กรัม)
เหล็กกล้าไร้สนิม	0.4 ไมโครเมตร	0.11	0.11	0.12	$0.11 \pm 0.01$
สนิมเกรด 304	0.8 ไมโครเมตร	0.12	0.13	0.14	$0.13 \pm 0.01$
	3.2 ไมโครเมตร	0.15	0.15	0.14	$0.15 \pm 0.01$
เทฟลอน	พื้นผิวเรียบ	0.07	0.07	0.08	$0.08 \pm 0.01$
เทฟลอน	พื้นผิวหยาบ	0.14	0.13	0.13	$0.13 \pm 0.01$

ตารางที่ ก.3 มุมสัมพัทธ์ของเครื่องมือวัดจากการทดลอง

พื้นผิวทดสอบ		แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
เหล็กกล้าไร้	0.4 ไมโครเมตร	71.97	84.23	80.32	78.84 ± 6.96
สนิมเกรด	0.8 ไมโครเมตร	72.70	77.35	62.36	70.80 ± 9.78
304	3.2 ไมโครเมตร	73.22	76.78	74.70	74.89 ± 5.86
เทฟลอน	พื้นผิวเรียบ	105.92	102.14	109.89	105.78 ± 5.23
เทฟลอน	พื้นผิวหยาบ	127.21	126.35	120.96	124.84 ± 7.82

ตารางที่ ก.4 มุมสัมพัทธ์ของเครื่องวัดคณะวิทยาศาสตร์

พื้นผิวทดสอบ		แผ่นที่ 1	แผ่นที่ 2	แผ่นที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
เหล็กกล้าไร้	0.4 ไมโครเมตร	78.92	74.93	74.25	76.03 ± 2.93
สนิมเกรด	0.8 ไมโครเมตร	61.30	62.45	68.78	64.18 ± 8.03
304	3.2 ไมโครเมตร	78.95	71.60	83.13	77.89 ± 5.34
เทฟลอน	พื้นผิวเรียบ	101.05	114.05	113.23	109.44 ± 6.47
เทฟลอน	พื้นผิวหยาบ	128.40	134.88	134.50	132.59 ± 4.60

ตารางที่ ก.5 มุมสัมผัสน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระ 0.4 ไมโครเมตร

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมผัสน้ำมัน (องศา)
1	29.96	29.14	30.04	29.71 ± 0.50
2	30.50	32.85	26.06	29.80 ± 3.45
3	32.26	32.73	33.72	32.90 ± 0.75
มุมสัมผัสน้ำมัน	30.81 ± 2.38			

ตารางที่ ก.6 มุมสัมผัสน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระ 0.8 ไมโครเมตร

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมผัสน้ำมัน (องศา)
1	23.74	28.13	29.26	27.05 ± 2.91
2	22.93	28.23	28.35	26.50 ± 3.10
3	33.48	28.29	25.26	29.01 ± 4.16
มุมสัมผัสน้ำมัน	27.52 ± 3.19			

ตารางที่ ก.7 มุมสัมผัสน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระ 3.2 ไมโครเมตร

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมผัสน้ำมัน (องศา)
1	16.21	13.77	15.69	15.23 ± 1.28
2	11.80	14.29	10.87	12.32 ± 1.77
3	14.53	15.97	12.02	13.87 ± 1.63
มุมสัมผัสน้ำมัน	13.81 ± 1.86			

ตารางที่ ก.8 มุมสัมพัทธ์น้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนเทฟลอนพื้นผิวเรียบ

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
1	55.58	54.54	49.55	53.22 ± 3.22
2	54.24	52.17	55.35	53.92 ± 1.61
3	54.50	54.45	52.96	53.97 ± 0.88
มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย	53.70 ± 1.89			

ตารางที่ ก.9 มุมสัมพัทธ์น้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งานบนเทฟลอนพื้นผิวหยาบ

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
1	53.52	42.47	39.92	45.30 ± 7.22
2	55.01	53.92	50.84	53.26 ± 2.16
3	52.72	61.06	54.85	56.21 ± 4.33
มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย	51.58 ± 6.54			

ตารางที่ ก.10 มุมสัมพัทธ์น้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระ 0.4 ไมโครเมตร

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
1	19.42	20.30	23.38	21.03 ± 2.08
2	23.83	23.54	23.79	23.72 ± 0.15
3	24.70	29.78	27.63	27.37 ± 2.55
มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย	24.04 ± 3.2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 มุมสัมพัทธ์น้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระ 0.8 ไมโครเมตร

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
1	12.41	18.71	11.76	14.30 ± 3.84
2	13.69	13.23	12.32	13.08 ± 0.70
3	12.68	15.41	18.37	15.49 ± 2.85
มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย	14.29 ± 2.63			

ตารางที่ ก.12 มุมสัมพัทธ์น้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนพื้นผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความขรุขระ 3.2 ไมโครเมตร

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
1	11.17	17.65	12.43	13.75 ± 3.43
2	14.71	12.50	13.64	13.62 ± 1.11
3	13.41	13.34	16.87	14.54 ± 2.02
มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย	13.67 ± 2.11			

ตารางที่ ก.13 มุมสัมพัทธ์น้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนเทฟลอนพื้นผิวเรียบ

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
1	40.41	51.26	54.56	48.74 ± 7.40
2	55.82	51.15	55.77	54.21 ± 2.65
3	51.37	52.48	53.66	52.30 ± 1.14
มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย	51.82 ± 4.65			

ตารางที่ ก.14 มุมสัมพัทธ์น้ำมันที่ผ่านการใช้งานบนเทพลอนพื้นผิวหยาบ

แผ่นที่	หยดที่ 1	หยดที่ 2	หยดที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)
1	41.28	42.52	47.20	43.67 ± 3.12
2	48.31	43.39	33.38	41.69 ± 7.61
3	48.22	41.17	44.25	44.55 ± 3.53
มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย	43.30 ± 4.65			

ตารางที่ ก.15 อุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีการเกาะติดของน้ำมันที่ไม่ผ่านการใช้งาน

พื้นผิวทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)	
เหล็กกล้าไร้	0.4 ไมโครเมตร	49.02	51.52	50.09	50.21 ± 1.25
สนิมเกรด	0.8 ไมโครเมตร	53.26	53.40	50.09	52.25 ± 1.87
304	3.2 ไมโครเมตร	52.99	54.87	52.45	53.44 ± 1.27
เทพลอน	พื้นผิวเรียบ	62.62	62.94	62.83	62.83 ± 0.18
เทพลอน	พื้นผิวหยาบ	62.52	62.87	62.92	62.77 ± 0.22

ตารางที่ ก.16 อุณหภูมิบนพื้นผิวที่มีการเกาะติดของน้ำมันที่ผ่านการใช้งาน

พื้นผิวทดสอบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	มุมสัมพัทธ์เฉลี่ย (องศา)	
เหล็กกล้าไร้	0.4 ไมโครเมตร	54.08	56.56	52.02	54.22 ± 2.27
สนิมเกรด	0.8 ไมโครเมตร	60.09	57.13	57.09	58.10 ± 1.72
304	3.2 ไมโครเมตร	62.00	61.69	61.97	61.89 ± 0.17
เทพลอน	พื้นผิวเรียบ	58.92	59.29	59.64	59.28 ± 0.36
เทพลอน	พื้นผิวหยาบ	60.39	61.85	62.05	61.43 ± 0.91

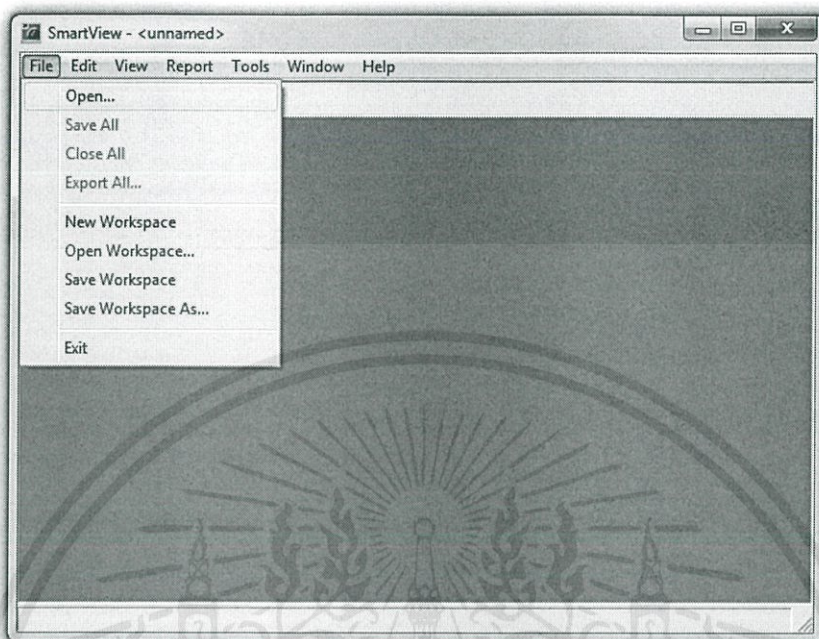
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

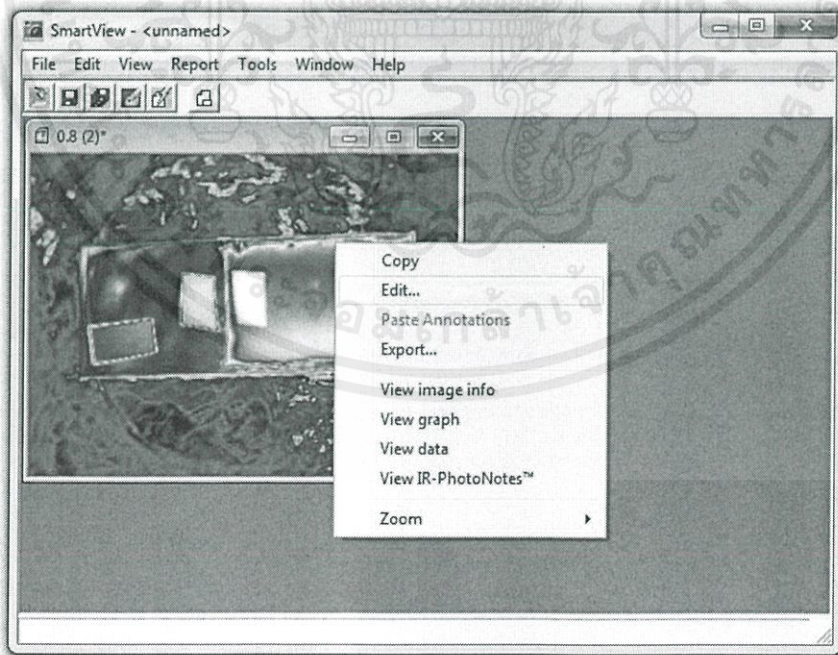
## 1. การใช้โปรแกรม Smart view

### 1.1 คลิกที่ File >>> Open เพื่อเปิดรูปภาพ



รูปที่ 1 การใช้โปรแกรม SmartView 3.11 (1)

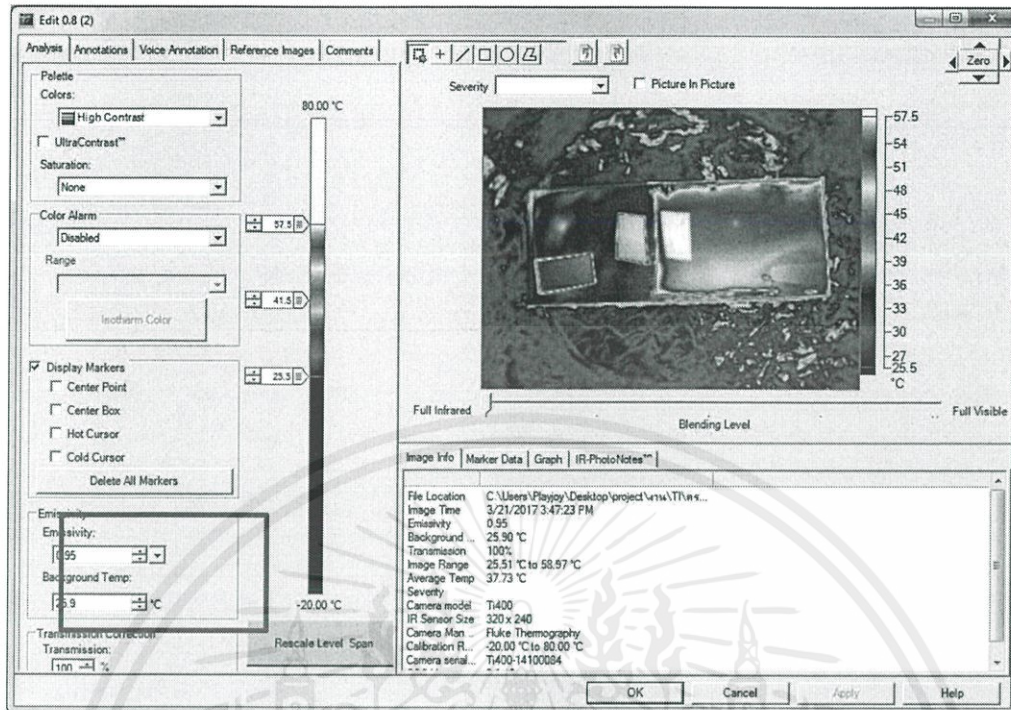
### 1.2 คลิกขวาที่รูปภาพ เลือก Edit เพื่อทำการปรับค่า



รูปที่ 2 การใช้โปรแกรม SmartView 3.11 (2)

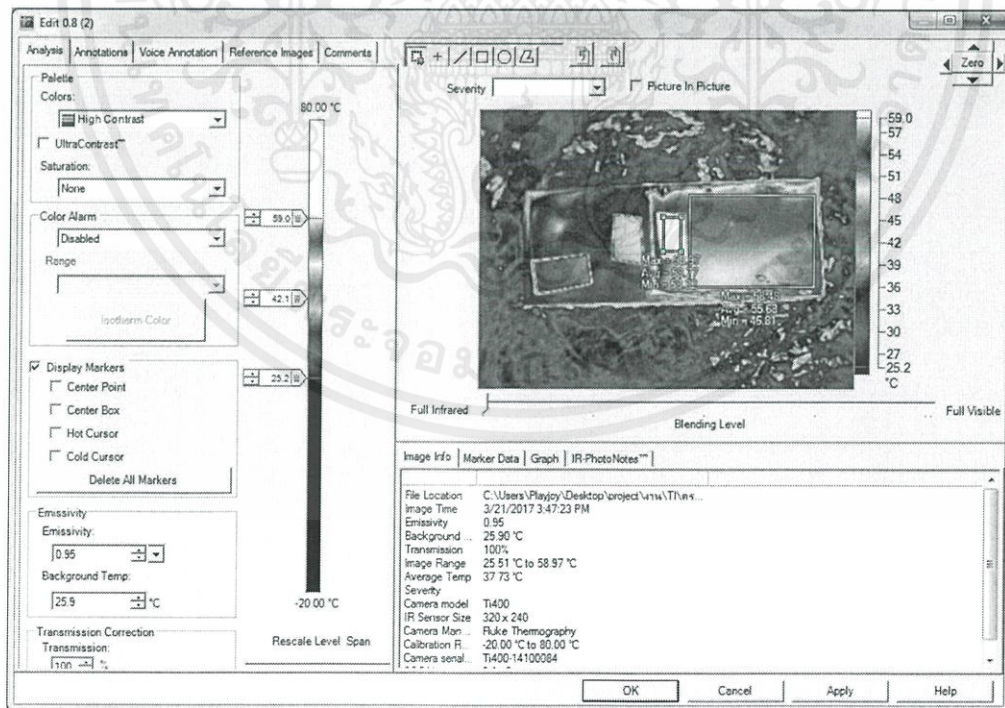
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ได้หน้าต่างดังรูป ปรับค่าสัมประสิทธิ์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 3 การใช้โปรแกรม SmartView 3.11 (3)

### 1.4 ครอบบริเวณที่มีการเกาะติดของน้ำมัน

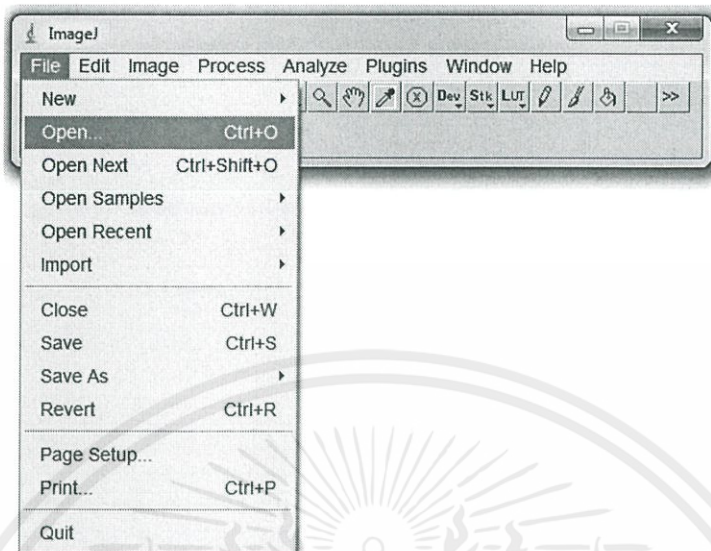


รูปที่ 4 การใช้โปรแกรม SmartView 3.11 (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

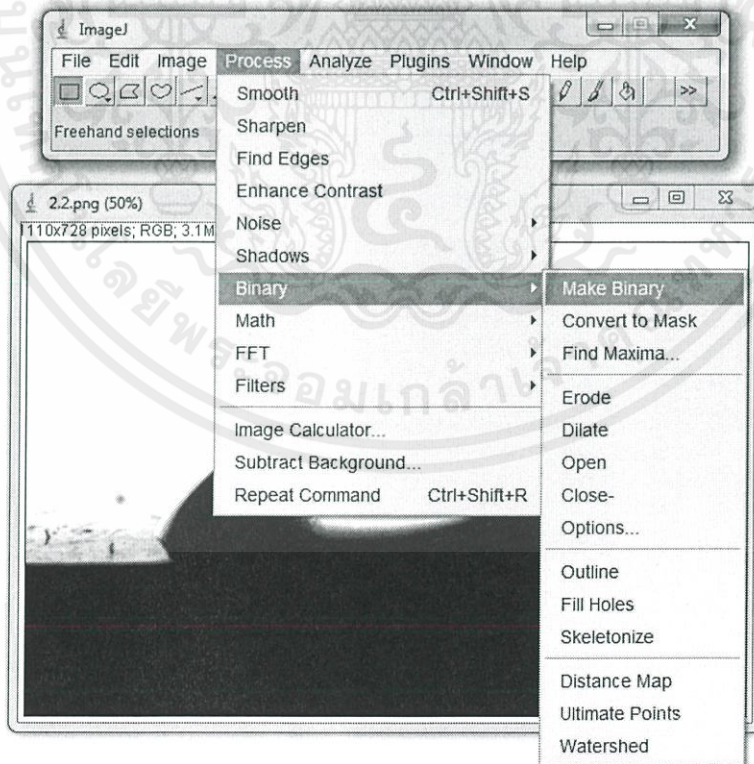
## 2. การใช้โปรแกรม ImageJ

### 2.1 คลิกที่ File >>> Open เพื่อเปิดรูปภาพ



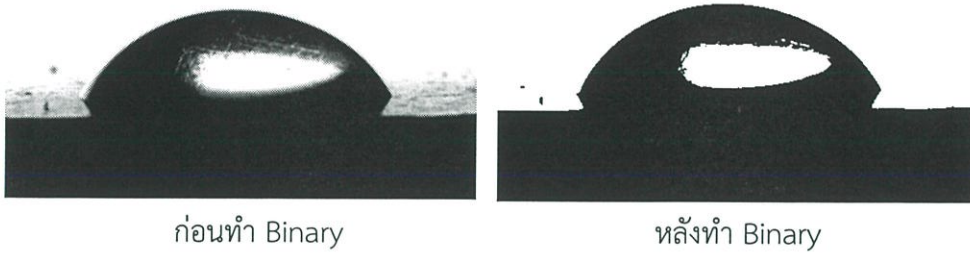
รูปที่ 5 การใช้โปรแกรม ImageJ 1.41o (1)

### 2.2 คลิกที่ Process >>> Binary >>> Make Binary เพื่อปรับรูปภาพให้เป็นขาวดำ



รูปที่ 6 การใช้โปรแกรม ImageJ 1.41o (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

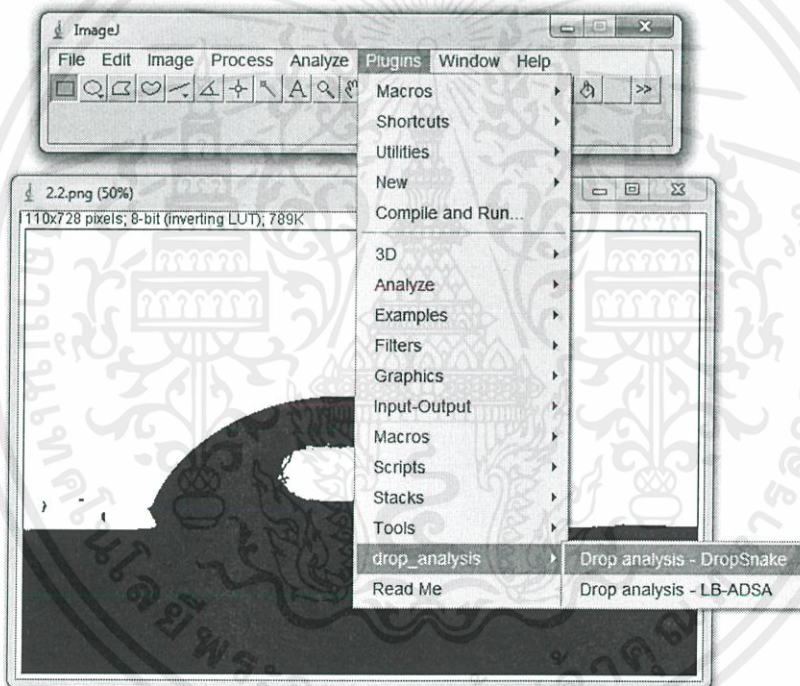


ก่อนทำ Binary

หลังทำ Binary

รูปที่ 7 การใช้โปรแกรม ImageJ 1.41o (3)

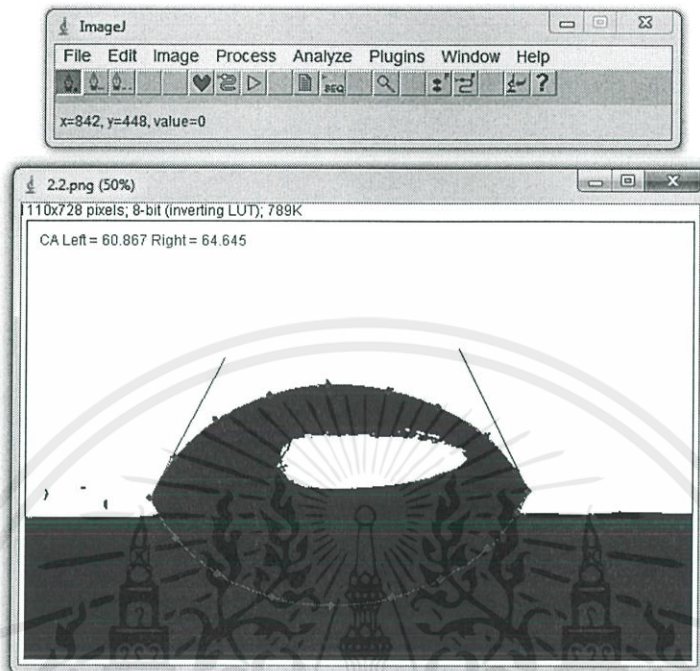
2.3 คลิกที่ Plugins >>> drop\_analysis >>> Drop analysis - DropSnake เพื่อวัดค่ามุมสัมผัส



รูปที่ 8 การใช้โปรแกรม ImageJ 1.41o (4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ลากเส้นครอบรูปหยดน้ำมัน จะได้ค่ามุมสัมผัสทั้งสองข้างของหยดน้ำมันแสดงอยู่ที่มุมซ้ายบนของรูปภาพ



รูปที่ 9 การใช้โปรแกรม ImageJ 1.41o (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้