

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการกัดกร่อนอลูมิเนียมและการเกิดสนิมในตลับลูกปืน
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CORROSION IN ALUMINIUM
AND RUST IN BALL BEARING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2547/6

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CORROSION IN ALUMINIUM
AND RUST IN BALL BEARING**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE BACHELOR OF ENGINEERING IN
MECHANICAL ENGINEERING**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการกัดกร่อนอลูมิเนียมและการเกิดสนิมในคลัตช์ลูกปืน

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CORROSION IN ALUMINIUM AND RUST
IN BALL BEARING

ผู้จัดทำ

1. นาย พฤติพงษ์ กิมประพันธ์ รหัสประจำตัว 43010707

2. นาย ภาษิต ละสัน รหัสประจำตัว 43010731



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการกัดกร่อนอลูมิเนียมและการเกิดสนิมในตลับลูกปืน

นาย พฤติพงษ์ กิมประพันธ์ 43010707

นาย ภายศ ละสัน 43010731

รศ.ดร. มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอ การทดสอบการกัดกร่อน และ การทดสอบการเกิดสนิม ในส่วนแรก การทดสอบการกัดกร่อน เป็นการสร้างและพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิหลังจากนั้นจึงทำการทดลองโดยใช้ แผ่นอลูมิเนียมเป็น แผ่นทดสอบ ทดสอบกับ น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลืองและ น้ำมันขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 40,80 และ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 สัปดาห์ในแต่ละอุณหภูมิทดสอบ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยการนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อวัดเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปและการสำรวจพื้นผิวของ แผ่นทดสอบ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ในส่วนของ การทดสอบการเกิดสนิม เป็นการสร้างชุดทดลองแล้วทำการทดสอบเช่นเดียวกัน โดยการทดสอบจะนำ ตลับลูกปืนมารับภาระในขณะหมุนที่ 4, 7 และ 10 กิโลกรัมที่ 1450 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทดสอบใน น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันขึ้นรูป ทีละชนิดโดยมอเตอร์ที่ใช้ขับจะต่อกับเพลลาที่ยึดอยู่กับเบร็ง จากนั้นนำไปแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แล้วนำไปรักษาอุณหภูมิที่ 53 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ตลับลูกปืนที่ได้จะนำไปสำรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์พิจารณาครอยสนิมที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบการเกิดสนิม มาเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดสอบการกัดกร่อนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ ในการนำน้ำมันที่ได้จากพืชมาใช้แทนน้ำมันสังเคราะห์เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CORROSION IN ALUMINIUM AND RUST IN BALL BEARING

Pruttipong Kimprapan 43010707

Phasit Lason 43010731

Assoc.Prof.Dr. Mongkol Mongkolwongrojn Advisor

ABSTRACT

This project represent corrosion test and rust test. First of all, the design and development of temperature controlled oven for use as the corrosion tester apparatus. The test specimen in this project using aluminium sheet 1/8" thickness dip in vegetable oil at 40,80 and 120 °c . The tests were compared with various conditions at the same temperature. Finally the weight reduction was measured and check with microscope. The design and development of rust tester for ball bearings lubricated with palm oil, coconut oil, soybean oil and form oil. The experiments operated in 60 minutes,1450 rpm speed of motor and added load 4,7and10 kg in each test. After that the ball bearings is dipped in water for 24 hours then keeping the specimens in the oven at 53 °c for 72 hours. Next step the use of microscope is to check rust of ball bearing and compare of each bearing.

The results from corrosion test and rust test show the potentiality to study the possible to use vegetable oil instead of synthetic oil for environmental friendly.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ไม่อาจสำเร็จได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆท่าน บุคคลแรกที่ทางผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณ คือ รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน และต้องขอขอบคุณบิดามารดา พี่ๆน้องๆ และเพื่อนๆทุกคน ตลอดจนบุคคลที่เกี่ยวข้อง

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ บริษัท คำสูง (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท คาสตรอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ น้ำมันปาล์มและน้ำมันขึ้นรูปที่ใช้ในการทดสอบตามลำดับ

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



นาย พฤติพงษ์ กิมประพันธ์
นาย ภาสิต ละสน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	3
2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน	4
2.2 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์	5
2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่น	6
2.4 สารเคมีเพิ่มคุณภาพ	12
2.5 การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศ	15
2.6 องค์ประกอบของน้ำมันพืช	15
2.7 ประเภทของกรดไขมัน	16
2.8 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช	17
2.9 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช	18
2.10 คุณสมบัติของน้ำมันพืช	20
2.11 การกักกรองที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า	25
2.12 การกักกรองแบบกลลวานิก	26
2.13 การกักกรองในที่อับ	27
2.14 การกักกรองแบบรูเข็ม	27
2.15 การสูญเสียส่วนผสมบางตัว	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
2.16 การกัดกร่อนตามขอบเกรน	29
2.17 การกัดกร่อน-สึกกร่อน	29
2.18 การกัดกร่อน-ความล้า	30
2.19 การกัดกร่อนแบบอนุครูด	30
2.20 การกัดกร่อนแบบรูพูน	31
2.21 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น	32
2.22 การกัดกร่อนแบบได้ชั้นเคลือบ	33
2.23 Graphitic Corrosion หรือ Graphitization	34
บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกรทดลอง	37
3.1 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทดสอบการกัดกร่อน	37
3.1.1 ผู้ควบคุมอุณหภูมิ	37
3.1.2 อุปกรณ์ให้ความร้อน	41
3.1.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	41
3.1.4 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ	42
3.1.5 อุปกรณ์ตัดต่อกระแสในวงจรไฟฟ้า	42
3.1.6 วัสดุที่ใช้ทดสอบ	42
3.1.7 วัสดุที่ใช้เป็นฉนวน	43
3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด(Electronic Balance)	43
3.1.9 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด	43
3.1.10 อุปกรณ์ให้ความร้อน	44
3.1.11 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ	44
3.1.12 ลักษณะของเกจควบคุมอุณหภูมิ	45
3.1.13 วัสดุที่ใช้เป็นฉนวน	45
3.1.14 วัสดุที่ใช้ทดสอบ	46
3.1.15 ลักษณะของตู้และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ	46
3.2 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทดสอบการเกิดสนิม	47
3.2.1 เครื่องทดสอบสนิม	47
3.2.2 อุปกรณ์ส่งกำลัง	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
3.2.3 เพลาส่งกำลัง	48
3.2.4 อุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า	48
3.2.5 ชุดปรับภาระตลับลูกปืน	48
3.2.6 วัสดุที่ใช้ทดสอบ	49
3.2.7 อุปกรณ์วัดค่า pH	49
3.2.8 ก่อจตุรธรรม	49
3.2.9 น้ำมันพืชทดสอบ	49
3.2.10 เครื่องทดสอบสนิม	50
3.2.11 อุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า	50
3.2.12 ชุดปรับภาระตลับลูกปืน	51
3.2.13 วัสดุที่ใช้ทดสอบ	51
3.2.14 การวัดค่า pH ในน้ำมันทดสอบ	52
3.2.15 การตรวจสอบด้วยก่อก่อจตุรธรรม	52
บทที่ 4 วิธีการทดลอง	53
4.1 ขั้นตอนการทดลองการกัดกร่อนของแผ่นอลูมิเนียม	53
4.1.1 ขั้นตอนการตรวจสอบผลการทดลอง	54
4.2 ขั้นตอนการทดลองการเกิดสนิมในตลับลูกปืน	55
4.3 ขั้นตอนการตรวจสอบค่า pH ของน้ำมันชนิดต่างๆ	58
บทที่ 5 ผลการทดลอง	60
5.1 ผลการทดลองของการทดสอบการกัดกร่อนของแผ่นอลูมิเนียม	60
5.1.1 ผลการซึมน้ำหนักด้วยเครื่องซึงคิจิตอล	66
5.1.2 ผลการตรวจสอบพื้นผิวการกัดกร่อนด้วยก่อก่อจตุรธรรม	72
5.2 ผลการทดลองของการทดสอบการเกิดสนิมในตลับลูกปืน	75
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	81
6.1 บทสรุป	81
6.1.1 บทสรุปของการทดลองการกัดกร่อนของแผ่นอลูมิเนียม	81
6.1.2 บทสรุปของการทดลองการเกิดสนิมในตลับลูกปืน	81
6.2 ข้อเสนอแนะ	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก กราฟแสดง Calibration Curve ของ Thermocouple	84
ภาคผนวก ข รูปแสดงการนำเสนอโรงการ	85
บรรณานุกรม	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้าที่
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	
ตารางที่ 2.1 แสดงหน่วยวัดความหนืดของระบบต่าง ๆ	7
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม[17]	7
ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม	8
ตารางที่ 2.4 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์	9
ตารางที่ 2.5 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม	10
ตารางที่ 2.6 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช	15
ตารางที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ	17
ตารางที่ 2.8 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช [14, 17]	17
ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณของสารโทโคฟีรอลในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ	19
ตารางที่ 2.10 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช	21
ตารางที่ 2.11 แสดงจุดหลอมเหลวของน้ำมันพืช	21
ตารางที่ 2.12 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช	22
ตารางที่ 2.13 แสดงค่าซาпонิฟิเคชันของน้ำมันพืช	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้าที่
บทที่ 2 ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง	
รูปที่ 2.1 การกลั่นน้ำมันดิบ	3
รูปที่ 2.2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น	4
รูปที่ 2.3 หลักการของความหนืด	6
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น	9
รูปที่ 2.5 การหาค่าดัชนีความหนืด	11
รูปที่ 2.6 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม	20
รูปที่ 2.7 การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ	23
รูปที่ 2.8 การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ	24
รูปที่ 2.9 การสร้างชั้นของสบู่ของกรดไขมันบนผิวโลหะ	24
บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	
รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของคูควมคุมอุณหภูมิ	37
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิ	39
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของวัสดุทดสอบ(Specimen) ในกระบวนการทดสอบการกัดกร่อน	42
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของเครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด	43
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของ Infrarate Heater ที่ติดตั้งที่ด้านขวาของผู้	44
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของ Thermocouple	44
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของ Thermo Controller	45
รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของ Ceramic Fiber	45
รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของวัสดุทดสอบขณะทดสอบในน้ำมัน	46
รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของตู้และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ	46
รูปที่ 3.11 แสดงการออกแบบเครื่องทดสอบสนิม	47
รูปที่ 3.12 โครงสร้างของเครื่องทดสอบสนิม	48
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบสนิม	50
รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะอุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า	50
รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของดาซึ่งสปริงซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุดปรับภาระดัดลูกปืน	51
รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของดัดลูกปืนที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะอุปกรณ์วัดค่า pH	52
รูปที่ 3.18 แสดงการสำรวจลักษณะพื้นผิวของวัสดุทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์	52
บทที่ 4 วิธีการทดลอง	
รูปที่ 4.1 แสดงชุดทดลอง Corrosion Test	54
รูปที่ 4.2 แสดงเครื่องชั่งดิจิตอล	54
รูปที่ 4.3 แสดงกล้องจุลทรรศน์	55
รูปที่ 4.4 แสดงชุดทดลอง Rust Test ขณะทำการทดลอง	56
รูปที่ 4.5 แสดงตลับลูกปืนแช่น้ำ 1 วัน	56
รูปที่ 4.6 การนำตลับลูกปืนไปรักษาอุณหภูมิ 53 °C	56
รูปที่ 4.7 แสดงกล้องจุลทรรศน์	57
รูปที่ 4.8 แสดงค่า pH ของน้ำมันขึ้นรูปคือ 5.65	58
รูปที่ 4.9 แสดงค่า pH ของน้ำมันปาล์มรูปคือ 7.24	58
รูปที่ 4.10 แสดงค่า pH ของน้ำมันมะพร้าวคือ 8.10	59
รูปที่ 4.11 แสดงค่า pH ของน้ำมันถั่วเหลืองคือ 6.99	59
บทที่ 5 ผลการทดลอง	
รูปที่ 5.1 แสดงแผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนที่อุณหภูมิ 40 °C	60
รูปที่ 5.2 แสดงแผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนที่อุณหภูมิ 80 °C	61
รูปที่ 5.3 แสดงแผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนที่อุณหภูมิ 120 °C	61
รูปที่ 5.4 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C	62
รูปที่ 5.5 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C	62
รูปที่ 5.6 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C	63
รูปที่ 5.7 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C	63
รูปที่ 5.8 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันขึ้นรูปผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5.9 แผ่นอุณหภูมิเหนียวที่เกิดการกักคร่อนในน้ำมันมะพร้าวผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	64
รูปที่ 5.10 แผ่นอุณหภูมิเหนียวที่เกิดการกักคร่อนในน้ำมันปาล์มผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	65
รูปที่ 5.11 แผ่นอุณหภูมิเหนียวที่เกิดการกักคร่อนในน้ำมันถั่วเหลืองผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	65
รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 40 ° C	66
รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 80 ° C	67
รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 120 ° C	67
รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	68
รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	69
รูปที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	69
รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	70
รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันขึ้นรูปผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	70
รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันมะพร้าวผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C	71

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักกรองของน้ำมันปาล์มผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C	71
รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักกรองของน้ำมันถั่วเหลืองผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C	72
รูปที่ 5.23 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	73
รูปที่ 5.24 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	73
รูปที่ 5.25 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	73
รูปที่ 5.26 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 5.27 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันขึ้นรูปผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 5.28 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันมะพร้าวผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	74
รูปที่ 5.29 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันปาล์มผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	75
รูปที่ 5.30 แสดงพื้นผิวการกักกรองของน้ำมันถั่วเหลืองผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส	75
รูปที่ 5.31 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันปาล์ม	76
รูปที่ 5.32 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันปาล์ม	76
รูปที่ 5.33 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันถั่วเหลือง	77
รูปที่ 5.34 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันถั่วเหลือง	77
รูปที่ 5.35 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันขึ้นรูป	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 5.36 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันจีนรูป	78
รูปที่ 5.37 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันมะพร้าว	79
รูปที่ 5.38 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันมะพร้าว	79
ภาคผนวก ก กราฟแสดง Calibration Curve ของ Thermocouple	84
ภาคผนวก ข รูปแสดงการนำเสนอ โรงการ	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันนี้มีน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่มากมายหลายชนิดซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำมันแร่ (Mineral Oil) ซึ่งได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (Crude Oil) และน้ำมันสังเคราะห์ที่ได้มาจากกระบวนการทางเคมี ซึ่งมีผลต่อสิ่งแวดล้อมหลังการใช้งานแล้ว ทั้งในด้านการเก็บรักษา การทำลายทิ้งอีกทั้งยังทำให้ต้นทุนของสินค้านั้นมีราคาสูง

เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปนั้นต้องสั่งเข้ามาจากต่างประเทศ เนื่องจากไม่มีโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่นในประเทศ มีเพียงแต่ส่งน้ำมันพื้นฐานและสารเคมีเพิ่มคุณภาพเข้ามาจากต่างประเทศ แล้วมาผสมกันเพื่อให้เกิดความหนืด และมีคุณภาพพิเศษที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ ได้

เนื่องด้วยน้ำมันพืชเป็นน้ำมันที่สามารถนำมาย่อยสลายได้ง่าย ซึ่งลดการทำลายสิ่งแวดล้อมได้ ทั้งในระยะสั้นและระยะยาว อีกทั้งยังลดปัญหาด้านการจัดเก็บและการทำลายลงไปได้มาก นอกจากนี้ น้ำมันพืชยังสามารถหาได้ง่ายในประเทศไทย ทำให้สามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นผลให้ลดการขาดดุลจากต่างประเทศได้

จากสาเหตุข้างต้นเป็นผลให้จัดทำปริญญาโท เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติการกัดกร่อนและการเกิดสนิมของน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง เปรียบเทียบกับน้ำมันจันรูป เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาน้ำมันพืชเหล่านี้ให้สามารถเข้ามามีบทบาทในการหล่อลื่นทางอุตสาหกรรมมากขึ้นและเป็นทางเลือกใหม่อีกทางหนึ่งในการใช้เลือกใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันหล่อลื่น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันจันรูป ด้านการเกิดการกัดกร่อนและการเกิดสนิม

1.2.2 เพื่อเป็นการศึกษารูปแบบการกัดกร่อนและการเกิดสนิมที่มีผลมาจากการใช้น้ำมันพืชเป็นน้ำมันทดสอบ

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์คุณสมบัติด้านการกัดกร่อนและการเกิดสนิม ของน้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันจันรูป ที่ได้จากการทดสอบ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษากระบวนการเกิดตลอดจนปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนและการเกิดสนิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.2 ศึกษากระบวนการทดสอบการกักคร่อน และการเกิดสนิมเนื่องจากร้ำมันทดสอบตามมาตรฐาน ASTM
- 1.3.3 จัดทำชุดทดสอบกระบวนการกักคร่อน และ ชุดทดสอบกระบวนการเกิดสนิม
- 1.3.4 ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบที่ได้จากกระบวนการกักคร่อนและการเกิดสนิม
- 1.3.5 เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการทดสอบที่ได้จากกระบวนการกักคร่อนและการเกิดสนิม

1.4 วิธีการดำเนินงาน

- 1.4.1 ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออิทธิพลของการเกิดสนิมและการเกิดการกักคร่อน
- 1.4.2 ทำการศึกษาวิธีการและมาตรฐานในการทดสอบ การเกิดสนิมและการกักคร่อน ตลอดจนวิธีการในการวัดผลอย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.4.3 ออกแบบพัฒนาเครื่องมือและชุดทดสอบกระบวนการกักคร่อนและการเกิดสนิม
- 1.4.4 ทำการจัดทำอุปกรณ์และเครื่องมือตลอดจนวัสดุทดสอบที่ใช้ในกระบวนการทดสอบ
- 1.4.5 บันทึกผลที่ได้จากการทดสอบ ทั้งกระบวนการเกิดสนิมและกระบวนการกักคร่อน เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันทดสอบที่ผ่านกระบวนการกักคร่อนและการเกิดสนิม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้น้ำมันพืชแทนน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ในการใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรม
- 1.5.2 เพื่อเป็นการลดปัญหาด้านการนำเข้าน้ำมันหล่อลื่นจากต่างประเทศอันเป็นเหตุให้ประเทศไทยเสียดุลการค้า
- 1.5.3 เพื่อเป็นการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม อันเป็นผลมาจากการใช้น้ำมันหล่อลื่นซึ่งย่อยสลายได้ยากกว่าน้ำมันพืช
- 1.5.4 เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้าลักษณะรูปแบบการกักคร่อนและการเกิดสนิมโดยใช้น้ำมันพืชเป็นน้ำมันทดสอบ แก่บุคคลทั่วไปที่สนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

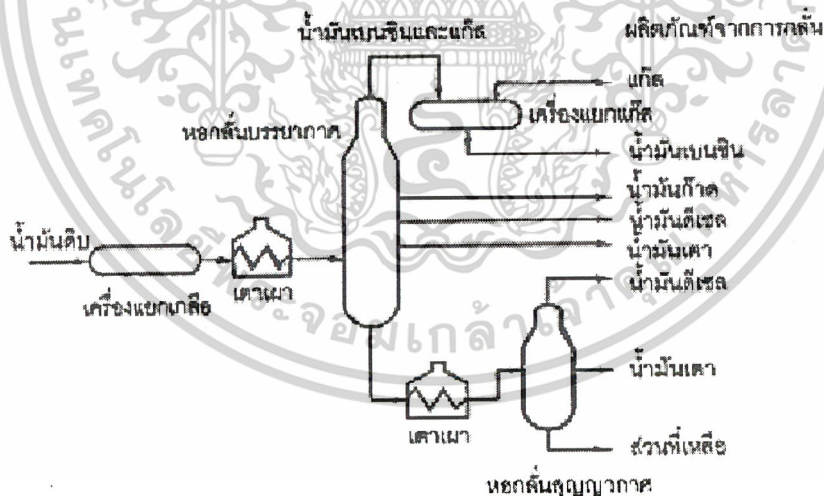
ทฤษฎีที่ใช้ในการทดลอง

น้ำมันหล่อลื่น

สารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมายซึ่งถ้าแบ่งตามสถานะจะแบ่งออกได้เป็นสี่ชนิด คือ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง(Semi-Solid) และ ของแข็ง ในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กันเป็นสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวจะใช้กันมากที่สุด และรองลงมาคือ สารกึ่งแข็ง ได้แก่ จารบี

การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะสามารถแยกผิวของวัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรับแรงที่กระทำได้มากของเหลวที่นำมาทำเป็นสารหล่อลื่นมีทั้ง น้ำ สารละลายกับน้ำ (Aqueous Solution) น้ำมันแร่(Mineral Oil) น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ และน้ำมันสังเคราะห์(Synthetic Oil) ในบรรดาสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนี้น้ำจะมีการใช้งานที่ค่อนข้างจำกัด

ในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานซึ่งเป็นขั้นตอนการกลั่นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในโรงกลั่นและทำให้บริสุทธิ์ ขั้นตอนที่สองคือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป ซึ่งเป็นขั้นตอนการผสมน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานด้วยกันเองเพื่อให้ได้ความหนืดตามที่ต้องการกับการเติมสารเคมีเพิ่มคุณภาพ เพื่อให้มีความเหมาะสมในการใช้งาน



รูปที่ 2.1 การกลั่นน้ำมันดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน(Lube Base Stock)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเป็นส่วนที่เราแยกจากหอกลั่นน้ำมันดิบ แล้วกลั่นต่อในหอกลั่นสุญญากาศ หลังจากนั้นทำให้น้ำมันหล่อลื่นบริสุทธิ์และมีคุณภาพดีขึ้นด้วยการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยผ่านกระบวนการต่างๆ ดังนี้

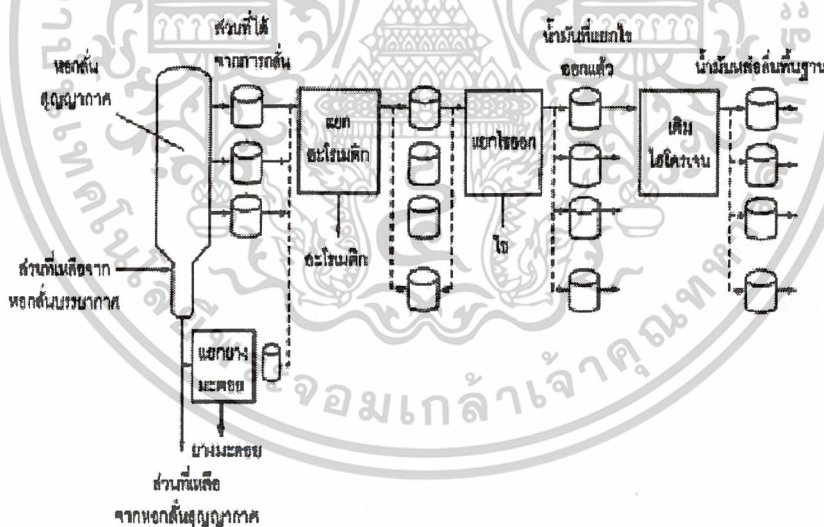
2.1.1 การกลั่น (Distillation) ในโรงกลั่นน้ำมันเชื้อเพลิงจะแยกเชื้อเพลิงต่างๆออกด้วยหอกลั่นบรรยากาศสำหรับในโรงกลั่นน้ำมันหล่อลื่น เราเอาส่วนที่เหลือ ไปผ่านหอกลั่นสุญญากาศเพื่อให้สามารถกลั่นน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเป็นส่วนที่หนักกว่าได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก

2.1.2 การสกัดด้วยตัวทำละลาย(Solvent Extraction) โดยมากใช้ฟีนอลเป็นตัวทำละลายในการสกัดสารจำพวกอะโรมาติก เพื่อทำให้น้ำมันมีดัชนีความหนืดสูงขึ้น สีสันสดใสและไม่รวมตัวกับออกซิเจนได้ง่าย

2.1.3 ไฮโดรไฟนิง (Hydrofining) คือกรรมวิธีเติมไฮโดรเจนเพื่อแปลงรูปโมเลกุลของสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน กรด และไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ทำให้น้ำมันมีสีสวยขึ้น สีคงตัวได้นาน เขม่าลดลงและอายุการใช้งานยาวนาน

2.1.4 การแยกไขออก (Dewaxing) เพื่อให้มีจุดไหลเทต่ำสามารถใช้งานที่มีอุณหภูมิต่ำ

2.1.5 การแยกแอสฟัลท์ (Asphalt Separation) คือการแยกสารจำพวกยางมะตอยออกจากน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 2.2 ขบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์(Synthetic Oil)

น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ได้จากกระบวนการทางเคมี ซึ่งการรวมตัวของสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำให้น้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่น

โดยสารประกอบเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตน้ำมันสังเคราะห์มักจะได้อาจจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเนื่องจากน้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สร้างขึ้นจากกระบวนการทางเคมีจึงสามารถควบคุมให้มีโครงสร้างโมเลกุลตามที่ต้องการได้

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่สามารถแบ่งได้ 5 กลุ่มคือ

2.2.1 ไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์(Synthesized hydrocarbons) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ได้มาจากน้ำมันดิบที่ใช้กันมากมีอยู่สามชนิด คือ โอลิฟินโอลิโกเมอร์(Olefin Oligomers), อัลคิลเตตระไฮโดรอะโรมาติก(Alkylated Aromatics) และโพลิบิวทีนส์(Polybutenes)ข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ มีความมั่นคงมีการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่มีไข และมีการระเหยต่ำ

2.2.2 เอสเทอร์อินทรีย์ (Organic Esters) เป็นสารหล่อลื่นที่ได้มีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารหล่อลื่นของเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยาน และใช้ในระบบไฮดรอลิกเป็นต้น เอสเทอร์อินทรีย์ที่ใช้กันอยู่มีสองชนิด ชนิดแรกคือ ไดเบสิกเอซิกเอสเทอร์ (Dibasic Acid Esters) บางครั้งเรียกว่าไดเอสเทอร์ (Diesters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างไดเบสิกเอซิด(Dibasic Acid) กับโมโนไฮดริคแอลกอฮอล์ (Monohydric Alcohol) อีกชนิดหนึ่งก็คือโพลีโอลเอสเทอร์(Polyol Esters) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโพลีไฮดริคแอลกอฮอล์(Polyhydric Alcohol) กับ โมโนเบสิกเอซิก(Monobasic Acid) ข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับน้ำมันแร่คือมีความคงตัวที่อุณหภูมิสูง และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2.2.3 โพลีไกลคอลส์ (Polyglycols) เป็นสารหล่อลื่นที่มีจุดเดือดสูงและจุดไหลเทต่ำเหมาะสำหรับสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.2.4 ฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate Esters) เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติทนไฟ

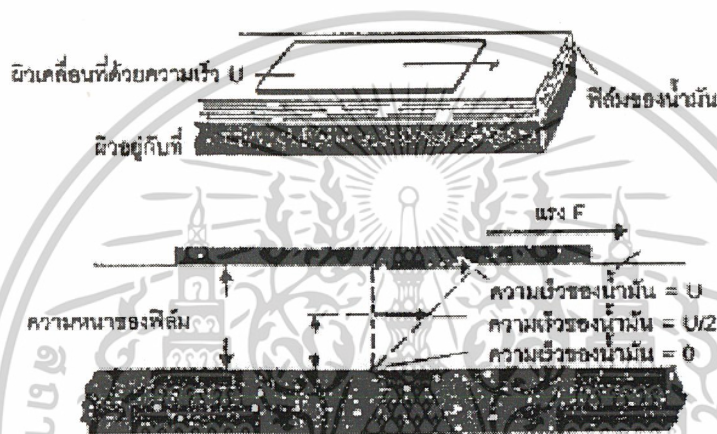
2.2.5 น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นได้แก่ซิลิโคนซึ่งเป็นสารหล่อลื่นที่มีดัชนีความหนืดสูงมาก และมีจุดไหลเทต่ำ

ข้อได้เปรียบที่สำคัญของน้ำมันสังเคราะห์เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่คือสามารถนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าน้ำมันแร่คือใช้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าและสูงกว่าน้ำมันแร่นอกจากนั้น น้ำมันสังเคราะห์บางประเภท ยังให้คุณสมบัติเฉพาะ เช่นผสมเข้ากับน้ำได้และไม่ติดไฟ เป็นต้น

2.3 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านโรงกลั่นก็มีคุณสมบัติบางอย่างอยู่ในตัวแล้ว คุณสมบัติที่สำคัญนี้ได้แก่

2.3.1 ความหนืด (Viscosity) ความหนืดคือความต้านทานการไหลของน้ำมันความหนืดหรือความข้นใสเป็นคุณสมบัติสำคัญของน้ำมันมีการแปรผันกลับกับอุณหภูมิของน้ำมัน ถ้าอุณหภูมิค่าน้ำมันจะขึ้นให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่หนาและถ้าอุณหภูมิสูงน้ำมันจะใสให้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บางหน่วยวัดความหนืดมีหลายระบบ และอุณหภูมิที่วัดก็แตกต่างกัน



รูปที่ 2.3 หลักการของความหนืด

หลักการของความหนืดที่แสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วยแผ่นวัตถุถูกดึงไปบนฟิล์มของน้ำมันด้วยความเร็ว สม่่าเสมอฟิล์มของน้ำมันติดอยู่ที่ผิววัตถุที่เคลื่อนที่และที่อยู่กับที่ซึ่งเมื่อพิจารณาให้น้ำมันประกอบขึ้นด้วยชั้นน้ำมันหลาย ๆ ชั้น ชั้นที่ติดอยู่กับผิวที่เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเดียวกับผิวที่เคลื่อนที่ U ส่วนชั้นน้ำมันที่ติดอยู่กับผิวที่อยู่กับที่ก็จะมีความเร็วเป็นศูนย์ชั้นน้ำมันที่อยู่ระหว่างชั้นบนสุดและชั้นล่างสุดก็จะถูกดึงไปด้วยชั้นน้ำมันที่อยู่ชั้นบนถัดไปให้มีความเร็วส่วนหนึ่งของความเร็ว U ซึ่งความความเร็วของแต่ละชั้นของน้ำในดังกล่าวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะจากผิววัตถุที่อยู่กับที่ แรง (F) ที่ต้องใช้ในการดึงให้ผิววัตถุอันบนเคลื่อนที่ไปนี้ก็คือ แรงที่เอาชนะความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นน้ำมัน และเนื่องจากแรงนี้เป็นผลมาจากความหนืด โดยแรงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนืดดังนั้นความหนืดก็สามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องใช้เพื่อเอาชนะความเสียดทานของน้ำมัน ความหนืดที่ทำได้ในที่นี้เรียกว่า ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity) หรือความหนืดเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในระบบหน่วยเอสไอแล้วความหนืดจะมีหน่วยเป็นปาสกาล.วินาที (Pa.s) หรือ (N.s/m²) การเปลี่ยนหน่วยระหว่างระบบทั้งสามคือ

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa.s} &= 1000 \text{ cP} \\ 1 \text{ reyn} &= 6.89 \times 10^6 \text{ cP} \\ 1 \text{ reyn} &= 6890 \text{ Pa.s} \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.1 แสดงหน่วยวัดความหนืดของระบบต่างๆ

ประเทศหรือระบบ	หน่วยความหนืด	อุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้ในการวัด
1. ระบบสากล (เมตริก)	Centistoke (cSt)	40°C และ 100°C
2. สหรัฐอเมริกา	Saybolt Universal Second 9SUS หรือ SSU)	100°F และ 210°F
3. สหราชอาณาจักร	Redwood No. 1 (RWI)	70°F, 100°F, 140°F และ 200°F
4. เยอรมัน	Engler (°E)	20°C, 50°C และ 100°C

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้นว่าในน้ำมันหล่อลื่นจะประกอบด้วย น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) และสารเพิ่มคุณภาพ (Additives) ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ใช้กันส่วนใหญ่มักได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียมอันได้แก่ พาราฟินิก (Paraffinic) และแนฟทีนิก (Naphthenic) เป็นต้น น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทนี้เป็นผลผลิตที่ได้มาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบซึ่งตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติค่าความหนืดและค่าดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้มาจากปิโตรเลียม

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม[17]

Molecular weight	Viscosity, mPa.s		Viscosity index
	40°C	100°C	
Paraffinic petroleum based oil			
450	48.0	5.9	96
576	144.3	12.2	99
700	523	27.4	91
Naphthenic petroleum based oil			
349	49.9	5.1	23
382	131.4	8.3	8
400	485	15.5	-42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

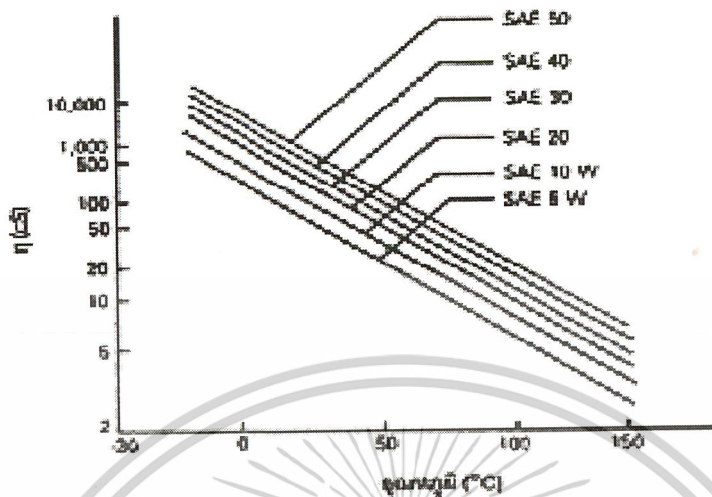
ในการที่จะเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานประเภทใดนั้นควรที่จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานนั้น ๆ ด้วย เช่นความหนืดความหนาแน่นจุดไหลเทรวมทั้งความสามารถในการต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศได้ดีอีกด้วยและทางด้านราคาเป็นต้น ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียม

คุณสมบัติ	Paraffinic	Naphthenic
ความหนาแน่น	ต่ำ	สูง
จุดไหลเท	สูง	ต่ำ
การต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน	ไม่ดี	ไม่ดี
ดัชนีความหนืด	สูง	ต่ำ

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีมากมายหลายประเภท หลายชนิด ซึ่งจะมีชื่อเรียกต่าง ๆ แล้วแต่ผู้ผลิตจะกำหนดขึ้น ในการเลือกว่าจะใช้น้ำมันหล่อลื่นประเภทใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าผู้ที่จะนำไปใช้กับงานประเภทใด หากต้องการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมควรเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่ไม่จำเป็นต้องมีค่าดัชนีความหนืดสูงมากนัก และถ้าหากต้องการนำมาใช้กับเครื่องยนต์ จำเป็นที่จะต้องเลือกใช้น้ำมันหล่อลื่นที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง ซึ่งก็คือค่าความหนืดจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิมากนัก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีค่าดัชนีความหนืดสูงนั่นเอง นอกจากจะมีค่าดัชนีความหนืดสูงแล้ว ยังจะต้องมีคุณสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่นจะต้องไม่เกิดการกัดกร่อนต่อชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบการหล่อลื่น รวมทั้งจะมีอายุการใช้ที่ยาวนาน เป็นต้น ดังนั้นทางสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ (Society of Automotive Engineers) หรือที่เรียกกันว่า SAE จึงได้กำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ และในอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และ ตารางที่ 2.5 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น

ตารางที่ 2.4 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์

SAE viscosity no.	Viscosity in cSt ($\mu\text{m}^2/\text{s}$)			
	0 °F (-18 °C)		210 °F (100 °C)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Crankcase oils		869		
5W	—	—	—	—
10W	1,303	2,606	—	—
20W	2,606	10,423	—	—
20W			5.73	9.62
30W			9.62	12.93
40W			12.93	16.77
50W			16.77	22.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 แสดงการแบ่งค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม

Grade designation (ISO VG)	Midpoint viscosity [$\mu\text{m}^2/\text{s}(\text{cSt})$ at 40°C]	Viscosity limits [$\mu\text{m}^2/\text{s}(\text{cSt})$ at 40°C]	
		Minimum	Maximum
2	2.2	1.98	2.42
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.48
10	10	9.0	11
15	15	13.5	16.5
22	22	19.8	24.2
32	32	28.8	35.2
46	46	41.4	50.6
68	68	61.2	74.8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

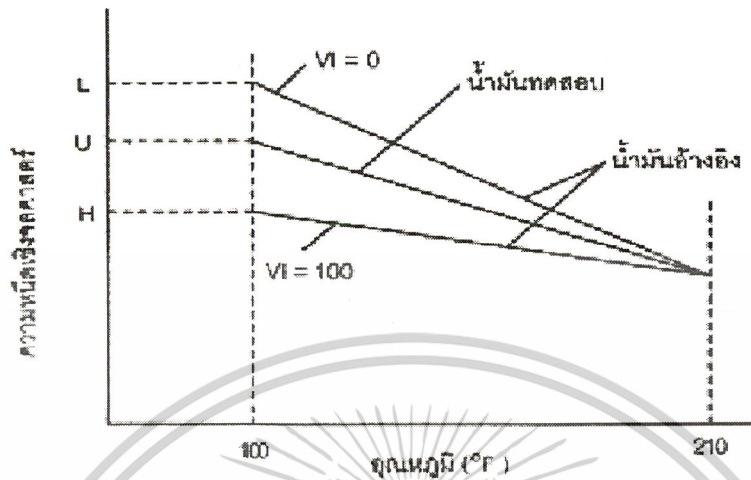
2.3.2 ดัชนีความหนืด (Viscosity Index) ดัชนีความหนืดคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน น้ำมันที่มีดัชนีความหนืดสูงจะเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อย เมื่ออุณหภูมิการใช้งานเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันที่มีดัชนีความหนืดต่ำ ในขณะที่อุณหภูมิตัวน้ำมันมักมีความหนืดสูงทำให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเคลื่อนไหวยาก แต่พอใช้งานสักพักหนึ่งอุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดกลับลดต่ำลงมาก ทำให้เครื่องจักรสึกหรอ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดดัชนีความหนืดขึ้นมาเพื่อใช้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ โดยใช้การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นที่หาดัชนีความหนืดกับน้ำมันหล่อลื่นที่เลือกสองชนิด เช่น น้ำมันหล่อลื่น Gulf Coast ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิมาก ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 0 และน้ำมันหล่อลื่น Pennsylvanian ซึ่งความหนืดเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิน้อย ให้มีดัชนีความหนืดเท่ากับ 100 หากหาดัชนีความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกระทำได้โดยการหาความหนืดเชิงจลศาสตร์ของน้ำมันหล่อลื่นตามสมการ

$$VI = \frac{L - U}{L - H} \times 100$$

VI = ดัชนีความหนืด (Viscosity Index)

ค่า L, U และ H ให้ดูตามรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การหาค่าดัชนีความหนืด

2.3.3 การรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) น้ำมันปิโตรเลียมสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ทำให้เกิดเป็นสารประเภทกรดเหนียวคล้ายแอสฟัลต์ซึ่งไม่ช่วยในการหล่อลื่น น้ำมันหล่อลื่นที่ดีต้องรวมตัวกับออกซิเจนได้ยากหรือรวมตัวกันได้ช้า โดยทั่วไปแล้วภายใต้อุณหภูมิใช้งานสูง ๆ อัตราการรวมตัวกับออกซิเจนจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการวัดค่า Neutralization, Pentane Insoluble, Toluene Insoluble

2.3.4 จุดวาบไฟ (Flash Point) จุดวาบไฟคืออุณหภูมิของน้ำมันได้รับความร้อนจนเป็นไอ แล้วจุดวาบเมื่อถูกเปลวไฟแต่เปลวไฟจะเกิดเพียงไม่นาน ในแง่ของน้ำมันหล่อลื่นถ้าน้ำมันมีจุดวาบไฟต่ำจะทำให้มีการสูญเสียเนื่องจากการระเหยมากจึงต้องมีการเติมเพิ่มบ่อยและยังมีความสำคัญเกี่ยวกับความปลอดภัยอีกด้วย

2.3.5 จุดไหลเท (Pour Point) จุดไหลเท คืออุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันยังสามารถไหลได้ ไซ (Wax) ที่มีอยู่ในเนื้อน้ำมันจะแข็งตัว (Crystallize) เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดไหลเทของน้ำมันนั้น ทำให้น้ำมันไหลได้ยาก ในการใช้น้ำมันในที่อุณหภูมิต่ำมาก เช่น ห้องเย็นหรือโรงน้ำแข็ง หรือในฤดูหนาวต้องใช้น้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำกว่าอุณหภูมิใช้งาน

2.3.6 ตัวเลขความเป็นกลาง (Neutralization Number) น้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่เล็กน้อย ซึ่งสภาพความเป็นกรดนี้จะวัดเป็นปริมาณของเบสมาตรฐานนี้ต้องใช้ในการทำให้น้ำมันมีสภาพเป็นกลาง สภาพความเป็นกรดของน้ำมันหล่อลื่นโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเกิดปฏิกิริยารวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation) ซึ่งทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้น สภาพความเป็นกรดนี้อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนที่เป็นโลหะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 สารเคมีเพิ่มคุณภาพ (Additives)

ในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานล้วน ๆ มักจะมีคุณสมบัติไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพลงไปในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

Ranny [14] ได้แบ่งชนิดของสารเพิ่มคุณภาพให้กับน้ำมันเครื่องไว้ดังนี้

- ก) สารเพิ่มดัชนีความหนืด
- ข) สารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน
- ค) สารช่วยกระจายเขม่าตะกอน
- ง) สารต้านทานการสึกหรอ
- จ) สารป้องกันการเกิดสนิม
- ฉ) สารช่วยชะล้างทำความสะอาด
- ช) สารลดจุดไหลเท

2.4.1 สารเพิ่มดัชนีความหนืด

สารเพิ่มดัชนีความหนืด เป็นสารที่ใช้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้ น้ำมันหล่อลื่นสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่าง ๆ กัน สารเพิ่มดัชนีความหนืดที่ใช้กัน ได้แก่

1. Polyisobutylene
2. Polymethacrylate
3. Styrene based polyester
4. Styrene based copolymer

2.4.2 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation)

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเป็นสารที่ใช้หน่วงหรือต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำมัน โดยเฉพาะที่ อุณหภูมิสูง ๆ สารที่ใช้ได้แก่

1. Zinc Dithiophosphate
2. Phenate Sulfide
3. Phospho Sulfide
4. Aromatic Amine
5. Sulfurized Esters
6. Hindered Phenol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 สารช่วยกระจายเขม่าตะกอน (Dispersants)

สารช่วยกระจายเขม่าตะกอนนี้ สารชนิดจะทำหน้าที่คอยจับสิ่งสกปรก หรือสิ่งแปลกปลอมที่ปน อยู่ในน้ำมันให้รวมตัวกันอยู่ที่ก้นอ่างน้ำมัน ในรูปของตะกอนน้ำมันหรือวานิชสารที่ใช้กันโดยทั่วไปได้แก่

1. Polyisobutenyl Succinimide
2. Polyisobutenyl Succinic seter

2.4.4 สารต้านทานการสึกหรอ

สารต้านทานการสึกหรอ เป็นสารที่ช่วยลดการสึกหรอ ที่เกิดจากการกัดกร่อน สารที่ใช้กันส่วนมากได้แก่

1. Zinc Dithiophosphate
2. Dithiocarbamate
3. Alkaline Detergent

2.4.5 สารป้องกันการเกิดสนิม

สารป้องกันการเกิดสนิม ที่ใช้กันได้แก่

1. Alkaline detergent
2. Alkenylsuccinic acid
3. Alkelate phenoxy alkalene oxide

2.4.6 สารช่วยชะล้างทำความสะอาด (Detergents)

สารช่วยชะล้างทำความสะอาด จะทำหน้าที่ป้องกันการรวมตัวของคราบตะกอนที่เกิดขึ้น สารที่ใช้ได้แก่

1. Sulfonate
2. Phenate
3. Phosphonate
4. Salicylate

2.4.7 สารลดจุดไหลเท (Pour Point Depressants)

สารลดจุดไหลเทเป็นสารที่ใช้ควบคุมการเกิดเป็นขี้ผึ้ง (Wax) ในน้ำมันโดยเฉพาะในที่อุณหภูมิต่ำๆ ทำให้น้ำมันหล่อลื่นไม่แข็งตัว สารพวกนี้ได้แก่

1. Polymethacrylate
2. Styrene based Polyester
3. CrossLinked Alkyl Phenols
4. Alkyl Naphthlene

2.4.8 สารต้านทานการเกิดฟอง (Anti-Foaming Agents)

สารต้านทานการเกิดฟองนี้ มีหน้าที่ขจัดขวงหรือลดการเกิดฟองซึ่งที่เกิดจากน้ำมันและจากสารเพิ่มคุณภาพตัวอื่น โดยจะทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของสารหล่อลื่น สารพวกนี้ได้แก่

1. Silicone
2. Polycrylates

น้ำมันพืช

น้ำมันพืชถูกนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นตั้งแต่สมัยอียิปต์โบราณ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำมาประยุกต์ใช้และเป็นที่ทราบกันดีว่า น้ำมันพืชไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม กรณีที่การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมกำลังเป็นที่น่าสนใจ และเริ่มมีการนำน้ำมันพืชมาเป็นสารหล่อลื่นป้องกันการสึกหรอ แต่คุณสมบัติเหล่านี้ยังคงสภาพที่ไม่แน่นอนดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้จึงต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สาร Zinc Dialkyldithiophosphates (ZDTP) ซึ่งจะเพิ่มคุณสมบัติต่อต้านการเกิดปฏิกิริยาที่บ่อออกซิเจนในอากาศให้น้ำมันพืช

ถั่วเหลืองเป็นพืชน้ำมันที่สำคัญของโลก เนื่องจากเมล็ดถั่วเหลืองและผลิตภัณฑ์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายทางทั้งการบริโภคเมล็ดและน้ำมัน การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร การใช้เมล็ดและกากถั่วเหลืองเป็นอาหารสัตว์ นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองยังสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีก เช่น สี ทาบ้าน ภาชนะป้องกันพลาสติก และกาว เป็นผลให้ความต้องการใช้ถั่วเหลืองในการบริโภค และอุตสาหกรรมต่าง ๆ ขยายตัวมาโดยตลอด โดยผลผลิตถั่วเหลืองเฉลี่ย 5 ปีย้อนหลัง (ปี 2539/40 – 2543/44) มีประมาณ 157.02 ล้านตัน หรือคิดเป็น ร้อยละ 55.95 ของปริมาณการผลิตน้ำมันพืชที่สำคัญของโลก นับเป็นปริมาณผลผลิตสูงสุดเมื่อเทียบกับปริมาณผลผลิตพืชน้ำมันที่สำคัญชนิดอื่น ๆ เช่น ฝ้ายเรพซิด และถั่วลิสง

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ซึ่งเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น จัดอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีในภาคใต้ของประเทศ บริเวณพื้นที่ที่ปลูกมากที่สุด คือจังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูลและตรัง โดยจังหวัดกระบี่ปลูกมากที่สุดจำนวน 537,637 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39.40 และรองลงมาได้แก่จังหวัดสุราษฎร์ธานี 405,213 ไร่ และจังหวัดชุมพร 216,798 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 29.70 และ 15.89 ของพื้นที่ปลูกทั่วประเทศตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากผลตอบแทนการปลูกปาล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีกว่าการปลูกพืชชนิดอื่น เช่น ยางพาราและการทำนาข้าว จึงเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรขยายพื้นที่ปลูกปาล์ม ภายในเพิ่มขึ้นมากทั้งนี้เพราะราคาน้ำมันปาล์มในตลาดโลกมีแนวโน้มสูงขึ้น ทำให้ความแตกต่างของราคา ภายในและภายนอกประเทศไม่จูงใจให้มีการลักลอบเข้ามาบริโภคภายในปี 2539 ส่วนแบ่งของน้ำมันปาล์มต่อ การบริโภครวมของโลกเท่ากับร้อยละ 15.42 เพิ่มขึ้นเป็น ร้อยละ 17.81

2.5 การผลิตน้ำมันพืชภายในประเทศ

ในระยะเวลาที่ผ่านมาผลผลิตน้ำมันพืชในประเทศไทยมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด ทั้งนี้ เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ ทำให้ผลผลิตที่ได้มีน้อย ต่อมาได้มีการนำเอาเครื่องจักรมาช่วย ในการผลิตทำให้สามารถผลิตน้ำมันพืชได้มากขึ้น สำหรับผลผลิตของน้ำมันพืชจากตารางที่ 3 จะพบว่าในปี พ.ศ. 2524 มีทั้งสิ้น 100,000 เมตริกตัน ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดได้แก่ น้ำมันปาล์ม รองลงมาได้แก่ น้ำมัน ละหุ่ง น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันรำข้าว

ตารางที่ 2.6 แสดงผลผลิตของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	ผลผลิต		
	2542	2543	2544
น้ำมันมะพร้าว	14,965	19,000	14,000
น้ำมันถั่วลิสง	3,028	14,000	12,000
น้ำมันรำข้าว	10,288	16,500	14,000
น้ำมันถั่วเหลือง	6,104	13,200	11,000
น้ำมันเมล็ดนุ่น	1,979	6,200	5,000
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	5,455	3,000	2,500
น้ำมันปาล์ม	12,000	16,000	20,000
น้ำมันละหุ่ง	2,704	13,000	17,000
อื่น ๆ	4,000	5,500	5,000
รวม/เฉลี่ย	60,523	106,400	100,000

2.6 องค์ประกอบของน้ำมันพืช

น้ำมันพืชเป็นสารอินทรีย์จำพวกหนึ่ง ซึ่งเป็นส่วนประกอบของกลีเซอรอล (glycerol) กับกรดไขมัน (fatty acid) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.7 ประเภทของกรดไขมัน

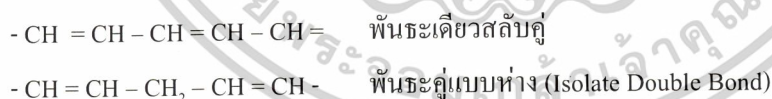
กรดไขมันเป็นสารซึ่งประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ต่ออยู่กับโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Chain) ในโมเลกุลของกรดไขมันอาจมีการจับกันระหว่างธาตุของคาร์บอนทั้ง 1 บอนด์ และ 2 บอนด์ โดยพวกที่มี 1 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันอิ่มตัว (Saturated) พวกที่มี 2 บอนด์ จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated)

2.7.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acids)

กรดไขมันอิ่มตัวเป็นกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ (Double Bond) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งคาร์บอนแต่ละตัวบนสายโซ่จะต่ออยู่กับไฮโดรเจนอย่างน้อย 2 ตัว หากในน้ำมันพืชมีกรดไขมันอิ่มตัวอยู่มาก จะทำให้น้ำมันพืชนั้นเป็นไขมันตัวอย่างของกรดไขมันอิ่มตัวนี้ได้แก่กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดปาล์มมิก (Palmitic Acid) กรดลอริก (Lauric) และกรดไมริสติก (Myristic) เป็นต้น โครงสร้างของกรดไขมันเหล่านี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

2.7.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid)

กรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่โซ่ไฮโดรคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะคู่ตั้งแต่ 1 คู่พันธะขึ้นไป ซึ่งตำแหน่งของพันธะคู่ของกรดไขมันแต่ละชนิดก็จะแตกต่างกันออกไปโดยถ้ามีพันธะเดี่ยวคั่นอยู่ระหว่างพันธะคู่จะเรียกพันธะแบบนี้ว่า พันธะเดี่ยวสลับคู่ (Conjugate Double Bond) ดังแสดงเป็นตัวอย่างดังนี้



ตารางที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ

ชื่อของกรดไขมัน	จำนวนคาร์บอน	สูตรโครงสร้าง
กรดลอริก (Lauric)	C 12	CH ₃ -(CH ₂) ₁₀ -COOH
กรดไมริสติก (Myristic)	C 14	CH ₃ -(CH ₂) ₁₂ -COOH
กรดปาล์มมิติก (Palmitic)	C 16	CH ₃ -(CH ₂) ₁₄ -COOH
กรดสเตียริก (Stearic)	C 18	CH ₃ -(CH ₂) ₁₆ -COOH
กรดโอเลอิก (Oleic)	C 18 : 1	CH ₃ -(CH ₂) ₇ -CH = CH-(CH ₂) ₇ -COOH
กรดโนลีนิก (Linoleic)	C 18 : 2	CH ₃ -(CH ₂) ₄ -CH = CH-(CH ₂) ₇ -CH=COOH
กรดโนลีนิก (Linolenic)	C 18 : 3	CH ₃ -CH ₂ -CH = CH-CH ₂ -CH=CH-(CH ₂) ₇ -COOH

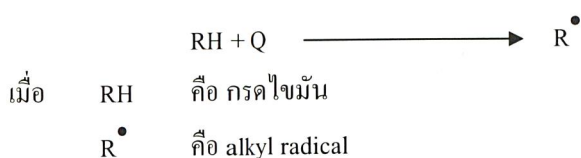
ตารางที่ 2.8 ชนิดของกรดไขมันในน้ำมันพืช [14, 17]

No. of carbon atoms	Name of acid	Coconut oil	Palm kernel oil	Palm oil	Cottonseed oil	Rapeseed oil	Tallow (beef)	Tallow (mutton)	Lard	Soybean oil
Saturated Acids										
12	Lauric	44-51	47-52	...	...	...	...	...	...	...
14	Myristic	13-19	14-18	0.5-3	1	1	3-6	4-10	1-2	1
16	Palmitic	8-11	7-9	32-45	26-31	1-5	25-37	24-38	22-31	10
18	Stearic	1-3	1-3	4-7	3-5	1-3	14-29	15-30	16-24	2
Total (typical)		92	91	40-50	28-35	3-8	50-55	52-57	35-40	13
Unsaturated Acids										
Monounsaturated										
18	Oleic	5-8	11-19	38-53	19-26	14-38	26-50	38-48	38-44	29
Diunsaturated										
18	Linoleic	1.0-2.5	0.5-2	6-12	37-50	10-22	1-3	...	4-9	51
22	Erucic	...	...	...	...	40-64	...	...	...	...
Triunsaturated										
18	Linolenic	...	...	...	...	8-12	...	...	1-2	7
Total (typical)		8	19	50-60	60-70	92-97	44-52	40-50	60-65	87

2.8 กลไกของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันพืช (Oxidation Mechanisms)

น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิไดเซชันได้ง่าย ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาอาจเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain Reaction) ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) ขั้นเริ่มต้น (Initiation) เป็นขั้นตอนที่มีการเกิดอนุมูลอิสระ หรือที่เรียกว่า Radical Chain Reaction



RO_2^\bullet คือ alkylperoxy radical

2) ขั้นแพร่กระจาย (Propagation) เป็นขั้นตอนที่อนุมูลอิสระ หรือ Free Radical จับกับโมเลกุลออกซิเจน จนเกิดเป็น เปอร์ออกซิอิสระ (Proxy Radical) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของกรดไขมัน (RH) เพื่อเกิดเป็น เปอร์ออกไซด์ และอนุมูลอิสระตัวใหม่ (R^\bullet) ซึ่งสามารถจับโมเลกุลของออกซิเจน (O_2) ในอากาศได้อีก ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อย ๆ จนกว่า ออกซิเจน หรือ RH จะหมดไป ส่วนสารเปอร์ออกไซด์ที่ได้จะเป็นสารที่ไม่เสถียรซึ่งจะสลายตัวได้ง่าย สารเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะเป็นตัวทำให้เกิดตะกอน (Sludge) หรือ ยางเหนียว (Gum) ในน้ำมันพืช



3) ขั้นสิ้นสุด (Terminal) ของปฏิกิริยา เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระ หรือ Free Radical เข้าทำปฏิกิริยากันเอง ได้สารที่ไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา (Nonradical Products) ซึ่งเกิดจาก

ก. อนุมูลอิสระของ Peroxy Radicals (RO_2^\bullet) เข้าทำปฏิกิริยากันเองดังนี้



ข. เกิดการ cross terminal ของ alkyl radical (R^\bullet) กับ peroxy radicals (RO_2^\bullet) ดังนี้



ค. เกิดการทำปฏิกิริยากันเอง ของ alkyl radical (R^\bullet) ด้วยกันเองดังนี้



2.9 สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันพืช

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า น้ำมันพืชเป็นสารประกอบอินทรีย์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าในน้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่ในโมเลกุลมาก จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการพยายามหาสารที่จะมาช่วยยับยั้งหรือ หน่วงให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ช้าลง หรือไม่เกิดขึ้นเลย

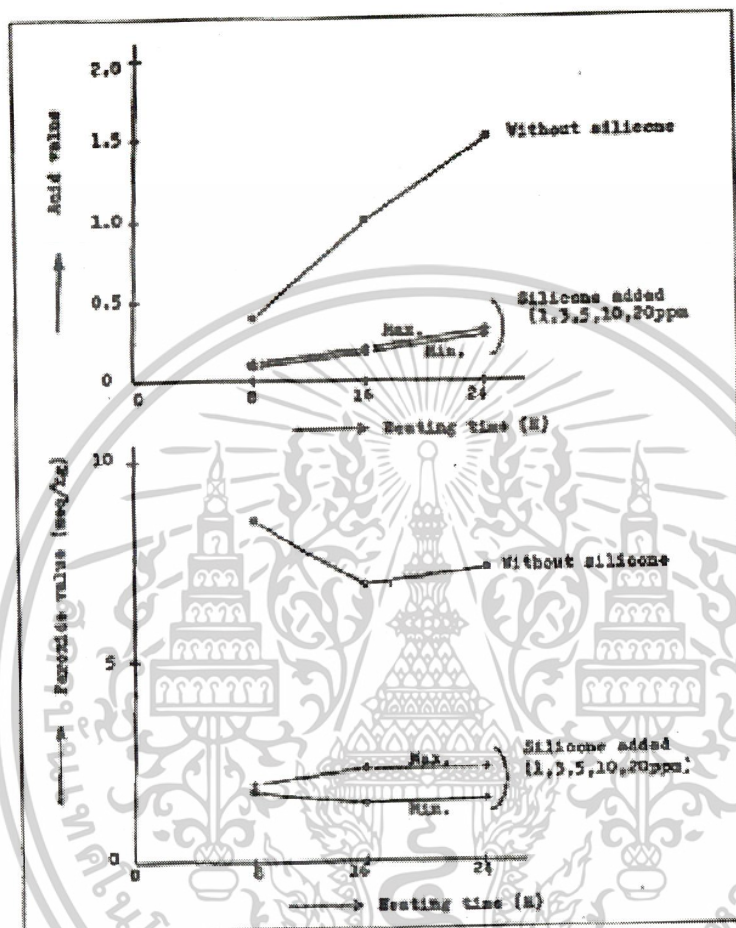
โดยปกติในน้ำมันพืชจะมีสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันอยู่ในโมเลกุลของน้ำมันพืชด้วย เช่น สารโทโคฟีรอล (Tocopherol) และอื่น ๆ เป็นต้น ซึ่งในน้ำมันพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณของสารมากน้อยไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 2.9 แสดงปริมาณของสารโทโคฟีรอลในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ

	Tocopherols (mg/kg)						
	α -T	β -T	γ -T	δ -T	Total	α -T ₃	γ -T ₃
Anchovy					60		
Capelin					45		
Cocoa butter	11		170	17		2	
Coconut				4		20	
Corn	134	18	412	39			
Cottonseed	573	40	317	10			
Ground nut	169	5	144	13			
Lard	7					2	
Menhaden					30		
Olive	93		7				
Palm	279		61			274	398
Rape	70	16	178	7			
Safflower	477		44	10			
Sesame	12	6	244	32			
Soybean	116	34	737	275			
Sunflower	608	17	11				

สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่มีอยู่ในน้ำมันพืชนั้นอาจถูกทำลายหรือสูญเสียไปในระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงได้มีการเติมสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันเพิ่มเข้าไปในน้ำมันพืชด้วย สารที่เติมเข้าไปจะไปยับยั้ง หรือเข้าไปหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) ซึ่งอาจเป็นขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation) หรือในขั้นตอนการแพร่กระจาย (Propagation) ก็ได้ ขึ้นอยู่ประเภทและชนิดของสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันนั้น ดังนั้นในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป รูปที่ 3.1 แสดงผลของการใช้น้ำมันซิลิโคน (Silicone) เป็นสารต้านทานการเกิดออกซิเดชันใส่ลงในน้ำมันปาล์ม [5] จากรูปจะเห็นว่าปริมาณของกรด และค่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ได้ใส่น้ำมันซิลิโคนและจากการวิจัยของ Freeman [4] พบว่าการผสมน้ำมันซิลิโคนลงไปในน้ำมันพืชยังสามารถป้องกันการเกิดฟองได้ด้วยซึ่งโดยปกติจะใช้ในปริมาณน้อย โดยประมาณ 1 – 2 ppm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงผลของการใส่สารต้านทานการเกิดออกซิเดชันในน้ำมันปาล์ม

2.10 คุณสมบัติของน้ำมันพืช

2.10.1 ค่าไอโอดีน (Iodine Number)

ค่าไอโอดีน คือจำนวนกรัมของไอโอดีนซึ่งถูกดูดซับไว้ด้วยไขมัน 100 กรัม ซึ่งค่าไอโอดีนนี้ยังสามารถแสดงถึงความอิ่มตัวมากน้อยของกรดไขมันในน้ำมันพืช และการแห้งตัว (Drying) ได้มากหรือน้อยของน้ำมันพืชแต่ละชนิดอีกด้วย ยกตัวอย่างเช่นถ้าน้ำมันพืชใดมีค่าไอโอดีนสูง (ประมาณ 160 – 230) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทแห้งเร็ว (Dry Oil) และถ้ามีค่าไอโอดีนปานกลาง (ประมาณ 125 – 150) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทกึ่งแห้งเร็ว (Semi -Drying Oil) แต่ถ้ามีค่าไอโอดีนต่ำ (น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า 120) ก็แสดงว่าน้ำมันพืชชนิดนั้นเป็นน้ำมันพืชประเภทไม่แห้งเร็ว (Non-Drying Oil) ซึ่งค่าไอโอดีนได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าไอโอดีนของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	ค่าไอโอดีน
น้ำมันมะพร้าว	7.5-10
น้ำมันถั่วเหลือง	120-141

2.10.2 จุดหลอมเหลว (Melting point)

คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งได้แก่จุดหลอมเหลวซึ่งจากตารางที่ 3.6 จะเห็นว่าน้ำมันปาล์มมีจุดหลอมเหลวสูง จึงทำให้น้ำมันปาล์มปรากฏเป็นไข ที่อุณหภูมิ 35°C ส่วนน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันถั่วเหลือง จะมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 25°C และ -16°C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าน้ำมันปาล์ม

ตารางที่ 2.11 แสดงจุดหลอมเหลวของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	จุดหลอมเหลว, $^{\circ}\text{C}$
น้ำมันปาล์ม	35°C
น้ำมันถั่วเหลือง	16°C

2.10.3 ค่าความหนืด (Viscosity)

ค่าความหนืดเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงความสามารถในการต้านทานการไหลหากน้ำมันพืชมีค่าความหนืดต่ำก็จะไหลได้ง่ายและใช้ชั้นฟิล์มน้ำมันที่บาง ส่วนในน้ำมันพืชที่มีค่าความหนืดสูงก็จะให้ชั้นฟิล์มที่หนากว่า ค่าความหนืดของน้ำมันพืชในแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 2.12 แสดงความหนืดของน้ำมันพืช

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืด, mPa.s		
	น้ำมันมะพร้าว	น้ำมันถั่วเหลือง	น้ำมันปาล์ม
25	51.7	52.3	73.3
40	31.7	33.4	34.6
60	18.5	20	22.6
80	11.1	12.9	8.93
100	9.5	9.09	4.66

2.10.4 ค่าซาปอนิฟิเคชัน (Saponification Number)

ค่าซาปอนิฟิเคชัน คือจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ใช้ในการทำให้น้ำมันหรือไขมันหนัก 1 กรัม กลายเป็นสบู่ ค่าซาปอนิฟิเคชันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนพันธะคู่ (Double Bond) ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวว่ามีอยู่มากหรือน้อย เช่น ถ้าค่าซาปอนิฟิเคชันมีค่าสูงก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่น้อย ในทางกลับกันถ้าค่าซาปอนิฟิเคชันมีค่าต่ำก็แสดงว่าจะมีพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวอยู่มาก ซึ่งค่าซาปอนิฟิเคชันของน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 2.13 แสดงค่าซาปอนิฟิเคชันของน้ำมันพืช

ชนิดของน้ำมันพืช	ค่าปอนิฟิเคชัน
น้ำมันมะพร้าว	246-265
น้ำมันปาล์ม	190-195
น้ำมันถั่วเหลือง	190-197

2.10.5 การดูดซับของน้ำมันพืชกับโลหะ (Absorption)

จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าในน้ำมันพืชจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของกรดไขมัน (Fatty Acid) ซึ่งจะประกอบไปด้วยหมู่ที่มีขั้ว (Polar Group) ซึ่งก็คือส่วนของ $-COOH$ และหมู่ที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar Group) คือส่วนของ $-CH_2$ ซึ่งการมีขั้วของกรดไขมันในน้ำมันพืชนี้จะมีความสำคัญอย่างมากต่อการยึดเกาะของกรดไขมันกับผิวของโลหะ กลไกการยึดเกาะของกรดไขมันนี้เราเรียกว่า การดูดซับ (Absorption) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

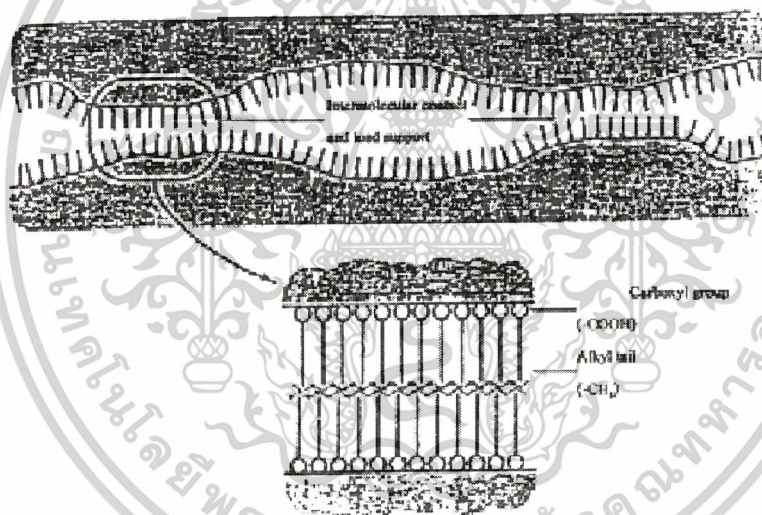
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.5.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Absorption หรือ Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการที่หมู่ที่มีขั้ว (-COOH) หันขั้วเข้าหาผิวโลหะอันเนื่องจากแรงดึงดูดทางฟิสิกส์ หรือที่เรียกกันว่าแรงวานเดอร์วาลส์ (Vander Walls) ในขณะที่เดียวกันก็จะเอาส่วนที่ไม่มีขั้ว (-CH₂) หันเข้าหาส่วนที่ไม่มีขั้วของโมเลกุลพวกเดียวกันทำให้เกิดการเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบของโมเลกุลของกรดไขมันตลอดพื้นผิวโลหะ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ซึ่งความสามารถในการดูดซับทางกายภาพนี้จะขึ้นอยู่กับขั้ว (Polar) โมเลกุลของกรดไขมันชนิดนั้น ๆ ด้วย

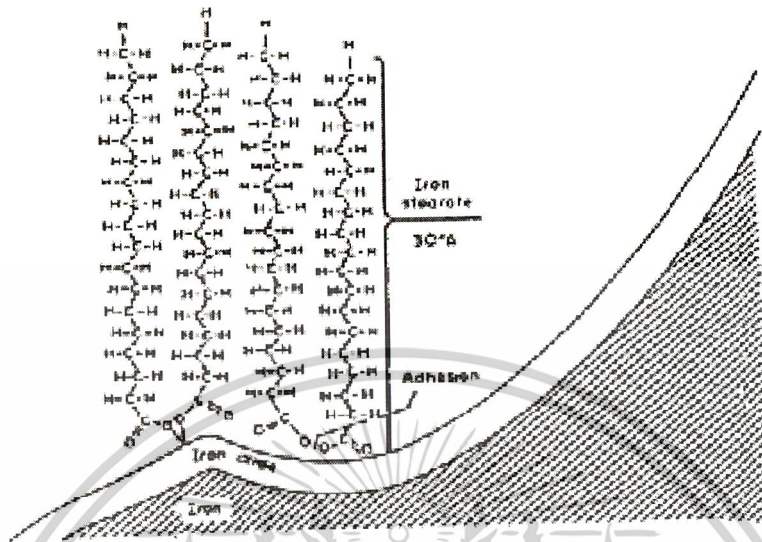
2.10.5.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Absorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะนี้ เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของกรดไขมันกับโลหะ ซึ่งจะได้สารประกอบของโลหะ หรือที่เรียกว่าออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดปฏิกิริยากันของกรด สเตียริก (Stearic Acid) กับโลหะที่เป็นเหล็ก จะก่อให้เกิดสารประกอบของโลหะที่เรียกว่าเหล็กสเตียเรท (Iron Stearate) และสบู่ของโลหะ หรือเหล็กออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นว่าการดูดซับทางเคมีนี้จะทำให้เกิดการสร้างชั้นของสบู่โลหะซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบาง ๆ (Surface Layer) ล้อมรอบผิวโลหะนั้นไว้



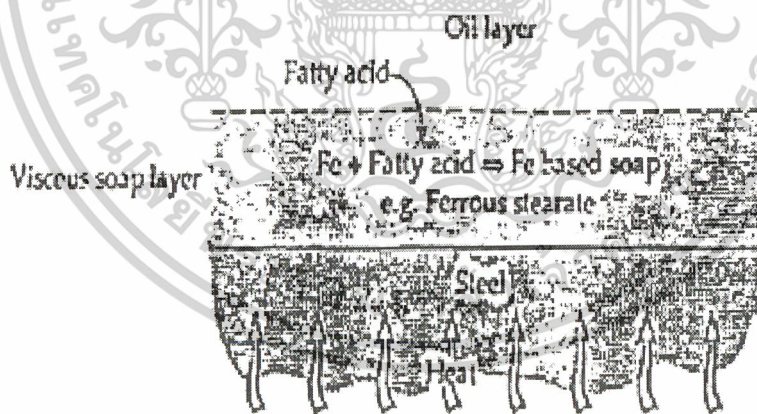
รูปที่ 2.10 การดูดซับทางกายภาพของกรดไขมันบนผิวโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การดูดซับทางเคมีของกรดไขมันบนผิวโลหะ

การดูดซับทางเคมีนี้อาจจะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 3.4 ได้แสดงให้เห็นว่า การดูดซับทางเคมีนี้จะมีการสร้างชั้นสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะ ซึ่งจะก่อตัวเป็นชั้นบาง ๆ ตลอดรอบพื้นที่ผิวของโลหะ



รูปที่ 2.12 การสร้างชั้นของสปูของกรดไขมันบนผิวโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดกร่อน

การกัดกร่อน หรือ corrosion คือ การเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะ เปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อน เป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย ในแต่ละปีโลกมีค่าใช้จ่าย จากปัญหาการกัดกร่อนมากมาย ทั้งที่เป็นการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรื้อใหม่ทดแทน ส่วนที่ชำรุดเสียหายจนไม่อาจใช้การได้อีกต่อไป บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินไปเกินควร เช่น การออกแบบเพื่อใช้โลหะหนาเกินความจำเป็นนอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน การกัดกร่อน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ของโลหะซึ่งเป็นปฏิกิริยาให้อิเลคตรอน โดยที่โลหะประกอบด้วยอะตอมโลหะเกาะเกี่ยวกันตลอดเนื้อโลหะด้วยพันธะโลหะซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ ที่มีคู่อิเลคตรอนที่พันธะเป็นชนิดไม่ประจำ โลหะจึงมีอิเลคตรอนที่เคลื่อนย้ายได้ ที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมดเข้าด้วยกัน โลหะจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อน อิเลคตรอนที่พันธะจะหลุดออกทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็น ไอออนโลหะประจุบวก เมื่อมีการให้และรับอิเลคตรอนครบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า เซลล์การกัดกร่อน โลหะที่ให้อิเลคตรอนเป็นขั้วแอโนด (anode) อิเลคตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเลคตรอนเป็นขั้วคาโทด (cathode) และความชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) ให้อิออนเดินทางให้ครบเซลล์ ดังนั้นการกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป อาจกล่าวได้ว่าโลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนเร็ว-ช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึง มาจากทั้ง โลหะและสิ่งแวดล้อม

2.11 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวน้ำ (General or Uniform Corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้เห็นอยู่ทั่วไป โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวของโลหะนั้น โดยปกติจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่าง สม่ำเสมอบนผิวหรือเป็นบริเวณกว้าง มีผลให้โลหะบางเรื่อยๆ หรือมีน้ำหนักรายไป คือ เบาลงเรื่อยๆ การกัดกร่อนประเภทนี้ในแง่ของเทคนิคไม่ค่อยเป็นปัญหาและไม่ก่อให้เกิด อันตรายรุนแรงเท่าใดนัก เนื่องจากสามารถหาอัตราการกัดกร่อนและออกแบบเพื่อพร้อมทั้งทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้ และเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงเวลาอันควร

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถป้องกันหรือลดปริมาณการกัดกร่อนได้โดย

- (1) เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมและอาจทำการเคลือบผิวด้วย
- (2) ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน
- (3) ใช้การป้องกันแบบคาโทดิก (cathodic protection)

การกัดกร่อนในรูปแบบอื่นส่วนมาก เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายในและยากต่อการประเมินสภาพการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังเกิดขึ้นในพื้นที่เฉพาะของชิ้นส่วนหรือโครงสร้าง ซึ่งจะเป็ผลให้เกิด ความเสียหายที่ไม่คาดคิดหรือความเสียหายก่อนกำหนดของเครื่องมือหรือเครื่องจักร

2.12 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัว ดังนั้นถ้าหากมีโลหะ 2 ชนิด สัมผัสกันอยู่และมี สารละลายอิเล็กโตรไลต์และส่วนโลหะเชื่อมต่อกันที่นำไฟฟ้า หรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมี เมื่อเวลาผ่านไป โลหะที่ศักย์ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน(อโนด) ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่กัดกร่อน(คาโทด) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสอง ยิ่งมากเท่าไรความรุนแรงก็มากขึ้นเท่านั้น ความต่างศักย์จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง ทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะ ที่มีค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อย และจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานมากกว่า โดยปกติโลหะที่มีค่าความต่างศักย์มากจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่เกิดเลย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะ จึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า Galvanic Corrosion หรือ Two-metal Corrosion ปริมาณกระแสและการกัดกร่อนขึ้นกับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสอง วิศวกรรมการออกแบบจะต้องทราบถึงความเป็นไปได้ของการกัดกร่อนแบบ galvanic ตั้งแต่การระบุรายละเอียดของวัสดุที่จะนำไปใช้ในเครื่องจักร บางครั้งเพื่อเป็นการประหยัดอาจ ใช้วัสดุต่างชนิดกันมาเชื่อมกัน โดยเฉพาะ โลหะที่มีค่าความต่างศักย์กันมากควรระมัดระวังให้เกิดความต่างศักย์ที่เกิดจาก galvanic Cell สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา เนื่องจากผลผลิตจากการกัดกร่อน ที่สะสมอยู่ที่ขั้วคาโทดหรืออโนดจะทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

การป้องกัน

วิธีการลดหรือป้องกันการกัดกร่อนแบบ galvanic มีหลายวิธีดังนี้

1. เลือกใช้วัสดุที่มีค่า galvanic Series ใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นได้
2. หลีกเลี่ยงอัตราส่วนของพื้นที่คาโทด/อโนด ปรับให้พื้นที่ทั้งสองใกล้เคียงกัน
3. ใช้ฉนวนกัน ในบริเวณที่ใช้โลหะต่างชนิดกันมาสัมผัสกัน
4. ใช้สารเคลือบผิวอย่างระมัด คดูแลการเคลือบผิวให้อยู่ในสภาพดี
5. เติมสารยับยั้ง เพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อน
6. ออกแบบที่ที่สามารถเปลี่ยนชิ้นงานที่เป็นอโนดได้ง่าย
7. ติดตั้งวัสดุที่สามที่มีค่าความต่างศักย์น้อยกว่าโลหะทั้งสอง เพื่อให้เกิด

2.13 การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนในที่อับคือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุม หรือพื้นที่ที่เป็นซอก บริเวณแคบๆ ที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานาน โดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจน ใน น้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ทำให้เกิดการครบเซลล์การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น โดย บริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วแอโนดคือเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ การสัมผัสระหว่างผิวโลหะและผิวที่ไม่ใช่โลหะ สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่อับได้เช่นกัน ปะเก็นรอยต่อระหว่างยางกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จุ่มอยู่ในน้ำ ทะเล เนื่องจากสารละลายที่ขังอยู่มีปริมาณจำกัดและหยุดนิ่ง ออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคาโรติกจึงลด จำนวนลดลงเรื่อยๆ จนหมด แต่ปฏิกิริยาแอโนดิกยังคงดำเนินอยู่ จึงทำให้ความเข้มข้นของประจุบวกสูง ดังนั้น เพื่อรักษาสมดุลของประจุไว้ ถ้ามีสารเจือปน โดยเฉพาะคลอรีน ประจุลบของคลอรีนจะเคลื่อนที่เข้ามาในรอย แฉก และทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เป็นโลหะ ไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก กรดนี้จะกัดผิวของโลหะ ออกมาทีละน้อย ส่งผลให้รอยแตกและรอยร้าวขยายตัวไปเรื่อยๆ

การป้องกัน

1. ใช้การเชื่อมแบบ butt joint แทนการย้ำหมุดหรือการยึดด้วยสลักเกลียว
2. ปิดบริเวณที่เป็นที่อับโดยการเชื่อมหรือการบัดกรี
3. ออกแบบถึงความดันให้สามารถระบายน้ำได้ดี พยายามหลีกเลี่ยงรูปร่างที่เป็นมุม
4. ตรวจสอบเครื่องมือและสารแปลกปลอมอยู่เสมอ
5. กำจัดของแข็งที่ลอยอยู่ก่อนเข้ากระบวนการผลิต
6. กำจัดวัสดุเป็ยที่ตกค้างอยู่ในระหว่างการหยุดซ่อมประจำปี
7. จัดสภาวะสิ่งแวดล้อมให้มีความสม่ำเสมอ
8. ใช้ปะเก็นที่เป็นของแข็งและไม่มีการดูดซึม
9. ใช้การเชื่อมแทนการม้วนเป็นท่อ

2.14 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสนิมขุมหรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะกับโลหะที่ได้ พัฒนาให้มีฟิล์ม ป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิด การกัดกร่อนเฉพาะ ที่กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยากเนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปก คลุมเอาไว้ การกัดกร่อน แบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปสนิมขุมมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วง ของโลก การเกิดการกัดกร่อน ในแนวอื่นก็เกิดได้แต่น้อย

pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ

pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมดที่น้อย ลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและ ตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของ pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลง ภายใต้อสภาพเฉพาะสภาวะใดสภาวะหนึ่ง การเกิด pitting ยังยากที่จะทำนายได้จากการทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึงปรากฏสภาพของการกัดกร่อน การเกิด pitting เป็นการเกิดเฉพาะที่และ เป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน การป้องกันโดยทั่วไปวิธีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในที่อับก็สามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบ pitting ได้เช่นกัน วัสดุที่มีการกัดกร่อนหรือมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบ pitting ไม่ควรนำมาใช้ในการสร้างโรงงานหรือเครื่องมือ วัสดุแต่ละชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ต่างกัน เช่นการเติมโมลิบดีนัมลงไปในการเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในปริมาณ 2 % ซึ่งทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ pitting โดยจะทำให้เกิดผิว passive ที่มีความเสถียรมากกว่า คือมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมาก วัสดุ 2 ชนิดนี้ประพัตต์ตัวต่างกันคือชนิดหนึ่ง ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้น้ำทะเลแต่อีกชนิดหนึ่งสามารถใช้ได้ในบางกรณี

2.15 การสูญเสียส่วนผลมบางตัว (Selective leaching).

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนซึ่งเกิด โดยการละลายของธาตุบางตัวจากโลหะอัลลอยด์ เป็นผลจากการกระทำซึ่งสิ่งแวดล้อมได้โลหะที่ร่วงไว้ที่สุุดออกจากอัลลอยด์เหลือไว้แต่โครงสร้างพอรุนซึ่งเต็มไปด้วยโลหะที่เสถียรที่สุด วัสดุที่เหลือจึงสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพไปมาก การกัดกร่อนแบบนี้ก็มีชื่อตามธาตุที่ละลายออกมา เช่น ถ้าสังกะสีละลายออกมาเรียกว่า dezincification โลหะผสมประกอบด้วยโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จากที่กล่าวมาว่าโลหะจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว ดังนั้นโลหะที่เป็นส่วนผสมที่มีศักย์ต่ำกว่าจะถูกกัดกร่อนไป ตัวอย่างที่พบมากคือทองเหลือง(ประกอบด้วยทองแดงและสังกะสี) สูญเสียสังกะสีไปทำให้ทองเหลืองที่เหลืออยู่เป็นทองแดง ส่วนมากและพอรุน ความแข็งแรงต่ำลง การสูญเสียสังกะสีอาจสังเกตได้จากที่เดิมที่เคยมีสีเหลือง เมื่อสูญเสียสังกะสีไปจะทำให้มีสีแดงขึ้น ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีผสมอยู่มากจะเกิดการสูญเสียสังกะสีได้ง่าย

กลไกการสูญเสียสังกะสีแบ่งเป็นขั้นตอนคือ

1.ทองเหลือง(ทองแดงและสังกะสี)ถูกกัดกร่อนหรือละลายลงไปในสารละลาย

2. สังกะสียังคงอยู่ในสารละลาย
3. ทองแดงกลับไปเป็นโลหะอีกครั้งโดยติดกับชิ้นงานเดิม

การป้องกัน

1. ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม เช่น กำจัดออกซิเจนจากสารละลาย
2. ใช้การป้องกันแบบคาโทด

2.16 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

โดยปกติขอบเกรนมักจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรนอยู่แล้ว โดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วแอโนด (สูญเสียเนื้อโลหะ) ภายในเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วคาโทด หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่ หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่ง บริเวณพื้นที่ที่แสดงตัว เป็นแอโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนก็จะเกิดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบ Uniform attack กัดเจาะทั่วทั้งก้อน บริเวณที่เป็นแอโนด คาโทด จะเปลี่ยนตลอดเวลา แต่ถ้าบริเวณขอบเกรนแสดงตัวเป็นแอโนดตลอดเวลา การกัดกร่อนก็จะเกิดเฉพาะบริเวณขอบเกรนตลอดเวลา เป็นการกัดกร่อนที่เรียกว่าการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้ หากนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสม โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกทนการกัดกร่อนได้ดี แต่ถ้าเหล็กประเภทนี้ได้รับอุณหภูมิในช่วง 500-800 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน โครเมียมที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กและคอยป้องกันการกัดกร่อนให้เหล็กก็จะมารวมตัวกับคาร์บอน ทำให้บริเวณใกล้ๆ หรือชิดกับขอบเกรนมีโครเมียมต่ำกว่าร้อยละ 12 ซึ่งถือว่าบริเวณนี้ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมอีกต่อไป ดังนั้นบริเวณที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น

ซึ่งการควบคุมหรือลดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก สามารถทำได้ 3 วิธีคือ

1. การทำ heat treatment ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งปกติจะเรียกว่า quench annealing หรือ solution quenching
2. การเติมธาตุบางตัวที่สามารถรวมตัวเป็นคาร์ไบด์ได้ดี (stabilizer)
3. การลดปริมาณคาร์บอนให้ต่ำกว่า 0.03 เปอร์เซ็นต์

2.17 การกัดกร่อน-สึกกร่อน (Erosion Corrosion)

เมื่อมีการเสียดสีและการสึกกร่อนต่อโลหะในสิ่งแวดลอมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ด้วยนั้น จะมีผลรวมของการกระทำต่อโลหะ อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เชิงกล และเชิงเคมีซึ่งส่งผลให้เกิดการการทำลายและการเสื่อมสภาพของโลหะอย่างรวดเร็ว การกัดกร่อนประเภทนี้เริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหล ไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง หากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น หากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวได้ การไหลของของไหล อาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็ว การกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่ถ้าฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้า ก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรง และรวดเร็ว

2.18 การกัดกร่อน-ความล้า (Fatigue Corrosion)

ความล้าหรือ fatigue เป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำๆ กัน หรือซ้ำแล้วซ้ำเล่า แรงที่กระทำเป็นได้ทั้ง tensile และ compressive stress จนที่สุดแล้วโลหะนั้นก็แตกหักเสียหาย (fracture) โดยปกติแล้ว การกัดกร่อนแบบนี้เกิดเมื่อขนาดแรงเค้นต่ำกว่าค่า yield point และเกิดเมื่อถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่ง และในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงถูกกระทำทั้งทางกล และทางเคมี โดยมีผลไปลดความต้านทานของโลหะจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย

2.19 การกัดกร่อนแบบฉุดครูด (Fretting Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดในสภาวะบรรยากาศปกติ บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ เมื่อโลหะนั้นกำลังถูกแรงกระทำ

ปัจจัยพื้นฐานของการเกิด Fretting Corrosion

1. โลหะที่หันหน้าเข้าหากันนั้น กำลังถูกแรงกระทำ
2. มีการสัมผัสบนบริเวณผิวหน้าสัมผัส ผิวด้านหนึ่งตีกระทบหรืออยู่อกผิวหน้าหนึ่ง
3. ระหว่างผิวหน้าโลหะทั้งสองมีการสั่นไถล (เช่นผิวสัมผัสระหว่าง bearing กับเพลลา)

ผลที่เกิดจาก Fretting Corrosion

1. สูญเสียเนื้อโลหะบริเวณพื้นผิวสัมผัสเป็นโลหะออกไซด์ เกิดกับเหล็ก เหล็กกล้า (ferric oxide)
2. ทำให้ size tolerance เสีย จากที่เคยเข้ากันได้ดีก็จะหลวม
3. fretting corrosion ทำให้เกิดการหลวมแล้วก็จะเกิด excessive strain

นำไปสู่การเกิดร่องซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของรอยร้าว และเป็น fatigue fracture ในที่สุด

กลไกการเกิด Fretting Corrosion 2 แนวคิด

1. เนื้อโลหะเป็น particle เล็กๆ ของผิวโลหะที่สัมผัสกัน
2. เกิดเป็น oxide แล้วหลุดออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นลดความเสียหายจาก fretting corrosion ความชื้นเป็นสารหล่อลื่นเพราะว่า hydrate rust (สนิม+น้ำ) ก่อให้เกิดความเสียหายจากการเสียดสีน้อยกว่าออกไซด์ที่มีสภาพแห้ง และบริเวณที่ขาดออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจนจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบรูรูคุดน้อยลง fretting จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีน้ำหนักหรือความเค้นมากระทำมากขึ้นและถ้าอากาศดึงเอา particles ของโลหะเข้ามาพร้อมด้วยแสดงว่ามี tension , shear stress ร่วมด้วย fretting corrosion บางที่เรียกว่า frictionoxidation, wear oxidation , false brinelling

การป้องกัน

1. หล่อลื่นด้วยน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ คุณสมบัติการเกาะยึดสูง
2. เพิ่ม load เพื่อลด slip ระหว่างผิวหน้าสัมผัส
3. ใช้ปะเก็นเพื่ออุดซบการสั่นสะเทือน ป้องกันออกซิเจน
4. เพิ่มความแข็งแรงผิวหน้าสัมผัส
5. ใช้ coating หรือ surface treatment เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผิวโลหะที่สัมผัสกัน
6. เพิ่มความแข็งแรงด้วยการยิงทราย (shot peening)

2.20 การกัดกร่อนแบบรูพรุน (Cavitation Corrosion)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนเฉพาะที่ซึ่งเกิดจากผลรวมของความเสียหายบนผิวโลหะเป็นแห่งๆ อันเนื่องมาจากฟองอากาศที่มาจับตัวกันแล้วขุ่นแล้วหรือเนื่องมาจากการกัดเซาะทางเคมีต่อพื้นที่ที่ถูกทำลาย การกัดกร่อนแบบนี้อาจพบได้ในสภาพไหลปั่นป่วน (Turbulent flow) ของของเหลว เช่น ใต้อุปกรณ์ปั๊มและในปั๊มน้ำ การเกิดและการแตกของฟองก๊าซแล้วเข้าแล้วอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันในบางบริเวณซึ่งลดต่ำกว่าหรือ เพิ่มสูงกว่าความดันไอของของเหลว การสั่นตัวอย่างรวดเร็วของการเกิดและการแตกของฟองอากาศนี้ทำให้เกิด shock ที่ทรงพลังซึ่งสามารถทำลายผิวโลหะหรือวัสดุได้เป็นจุดๆ ถ้ามีผิวออกไซด์บางบนโลหะ shock wave จะไปฉีกเอา protective film ออก ทำให้โลหะเปลือยและอ่อนไหวต่อการกัดกร่อน โดยโลหะเปลือยจะสัมผัสกับอิเล็กโตรไลต์ในบางจุด พื้นผิวตรงนั้นอาจปรากฏให้เห็นลักษณะรูพรุนๆ คล้ายฟองน้ำ ลักษณะการเสียหายจะคล้ายกับ pitting

กลไกการเกิด cavitation

1. การเกิดฟองบน protective film
2. ฟองอากาศแตกสลายและทำลาย protective film
3. เนื้อโลหะใต้ protective film ถูกทำลายเกิดการกัดกร่อนต่อมาเกิด protective film ขึ้นใหม่
4. ต่อมาฟองอากาศฟองใหม่มาสัมผัสตำแหน่งเดิมอีก
5. ฟองอากาศใหม่แตกสลายทำลาย protective film อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เนื้อโลหะบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายกัดกร่อนต่อไปอีก ต่อมาเกิด protective film ขึ้นใหม่อีก
7. กระบวนการกัดกร่อนเกิดซ้ำซาก จนรอยกัดกร่อนเป็นรูลึก

Cavitation ที่เกิดส่วนใหญ่ มีสาเหตุร่วมกันกับการกัดกร่อนและแรงกระทำทางกล ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสูงขึ้น

การป้องกัน

1. ปรับปรุงการออกแบบ เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของ hydrodynamic pressure น้อยที่สุด
2. เลือกใช้โลหะที่แข็งแรงกว่า มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่า
3. ชิ้นส่วนบริเวณที่มีโอกาสเกิด cavitation มาก ให้แต่งผิวให้เรียบมากที่สุดเป็นกรณีพิเศษ
4. หุ้มด้วยวัสดุที่ยึดหยุ่นได้ เช่น ยาง

2.21 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อน และมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตัก้าง หรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อน หรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่อออกซิเจนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้อง จะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่านเกรนก็ได้

ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

1. ความเค้น ต้องเป็นความเค้นดึงซึ่งอาจเป็นความเค้นตัก้างในเนื้อวัสดุ ความเค้นมาจากภายนอก ความเค้นเนื่องจากความร้อนหรืออาจเกิดจากการเชื่อมก็ได้
2. สภาวะแวดล้อม

การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้โลหะเกิดความเสียหายเนื่องจาก cracking ที่เกิดขึ้นโดยการกระทำร่วมกันของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อกรกัดกร่อนกับ tensile stress คำว่า tensile stress มุ่งหมายเอาความเค้นที่กระทำกับโลหะ (applied stress) และความเค้นภายใน (internal residual stress) ในบางกรณีความเค้นอาจเกิดจากการสะสมตัวของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากการกัดกร่อน ตัวอย่าง เช่น นีตและสกรู เมื่อถูกวางไว้ในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนจะถูกสะสมตัวอยู่ระหว่างนีตและสกรู อย่างไรก็ตามปริมาณของ

ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากกว่าปริมาณดั้งเดิมของโลหะ มันจึงทำให้เกิด tensile stress ขึ้นบนสกรูซึ่งก็จะเสียหายด้วยกระบวนการ cracking

การกัดกร่อนแบบนี้ปกติมีลักษณะพิเศษคือ

1. ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะในโลหะผสมเท่านั้น ในโลหะบริสุทธิ์ไม่เกิด
2. ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะให้เกิดการแตกหักนั้นมีลักษณะเฉพาะตัว สำหรับโลหะผสมแต่ละชนิด
3. การอบชุบด้วยความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปมีผลกับการแตกหัก
4. การป้องกันแบบคาโรติกเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับ stress corrosion cracking ได้แก่

- อุณหภูมิ
- องค์ประกอบสารละลาย
- องค์ประกอบของโลหะ
- ขนาดของแรงเค้น
- โครงสร้างของโลหะ

การแตกหักเสียหาย (cracking) พบว่ามีทั้งแบบ แตกไปตามขอบเกรน (intergranular cracking) และแบบผ่ากลางเกรน (transgranular cracking)

การป้องกัน

1. ลดความเค้นในเนื้อโลหะลง หรือลดความเค้นที่กระทำกับผิวโลหะ
2. ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม
3. เลือกโลหะที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน
4. ใช้การป้องกันแบบคาโรติก
5. ใช้สารยับยั้ง

2.22 การกัดกร่อนแบบใต้ชั้นเคลือบ (Filiform Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายใต้ชั้นเคลือบ เช่น การทาสีพลาสติกบนผิวเหล็กกล้า หรือ การเคลือบแลกเกอร์บนผิวแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก จัดเป็นการกัดกร่อนแบบ Crevice ประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นแบบ Under film corrosion พบได้กับโลหะที่มีการทาเคลือบผิวเพื่อป้องกัน การกัดกร่อนทั่วผิวหน้า เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน แมกนีเซียม และอลูมิเนียม ที่เคลือบผิวด้วยดีบุก เงิน ทอง ฟอสเฟต สีนํ้ามันและแลกเกอร์ การกัดกร่อนแบบนี้มีผลให้สภาพผิวของชิ้นงานเสียไปเท่านั้น แต่ไม่ได้ทำความเสียหายแก่โครงสร้างของชิ้นงาน ดังนั้นงานที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวที่ดี เช่นกระป๋องอาหาร รถยนต์ จึงต้องระวังปัญหาจาก filiform corrosion ภายใต้วีผิวเคลือบจะเกิดการกัดกร่อนลุกลามเป็นบริเวณ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการกัดกร่อนภายใต้บริเวณจำกัดคือ ภายใต้วีผิวเคลือบ ทำให้สนิมและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น วนเวียนอยู่ภายใต้วีผิวเคลือบแล้วส่งผลต่อเนื่องให้เกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้น การกัดกร่อนแบบริเริ่มจากบริเวณหนึ่งซึ่งเรียกว่าส่วนหัว(active head)แล้วไปปรากฏสนิมเช่น สีนํ้าตาลแดงของสนิมเหล็กใน ส่วนหาง (inactive tail) ดังนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนดำเนินไปในบริเวณส่วนหัว สำหรับเหล็กจะเกิดเป็นอ็อกไซด์เหล็ก Fe_2O_3 ที่จะให้ผลทดสอบสีน้ำเงินเขียวกับสารละลายไซยาไนด์ที่ใช้ทดสอบเฉพาะบริเวณหัวและจะเห็นคราบสนิมเหล็กที่บริเวณหาง การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 65-90% ทั้งนี้ชนิดของการเคลือบผิวสีน้ำมัน แล็กเกอร์ และโลหะชนิดที่ยินยอมให้นํ้าซึมผ่านได้น้อยจะช่วยลดการเกิด Filiform Corrosion นอกจากนี้การขัดผิวโลหะก่อนการเคลือบก็มีผลเพราะพบว่า ทิศทางการขยายตัวของการกัดกร่อนจะไปตามรอยขีดหรือรอยขีดผิวก่อนเคลือบ การกัดกร่อนแบบนี้เริ่มจากจุดหนึ่งบนผิวโลหะด้วยการซึมผ่านแบบออสโมซิส เพราะบริเวณนั้นมีอ็อกไซด์เหล็ก (Fe_2O_3) เกิดขึ้นมาก่อนและมีความเข้มข้นสูง นํ้าจากภายนอกจึงผ่านเข้ามาได้ในบริเวณ active head แต่ในส่วนของ active tail จะปรากฏสนิมเหล็กจะมีการซึมออกของนํ้าออกไป ขณะนี้ออกซิเจนซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้ทั่วผิว ในส่วนหางจะเกิดสภาพกรด จากการเกิดปฏิกิริยาของสนิมกับนํ้า ทำให้การกัดกร่อนเกิดการลุกลามได้ต่อไป

การป้องกัน

1. เก็บชิ้นงานที่เคลือบผิวเสร็จแล้วในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ
2. เลือกวัสดุเคลือบผิวที่เหนียวเพราะจะช่วยให้ฟิล์มไม่แตกและการลุกลามไม่รุนแรง
3. เลือกใช้วัสดุเคลือบที่ยินยอมให้นํ้าซึมผ่านได้น้อย

2.23 Graphitic Corrosion หรือ Graphitization

เป็นปัญหาของความเสียหายแบบการสูญเสียส่วนผสมบางตัว (selective leaching) อีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดกับเหล็กหล่อเทาเมื่อถูกใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนพอสมควร (โดยสารละลายจะต้องไม่รุนแรงเกินไป) การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นโดยเนื้อเหล็กหล่อเทาที่ผิวชั้นนอก ถูกกัดกร่อนเหลือกราฟไฟต์ปรากฏให้เห็น จึงเข้าใจผิดเรียกว่า graphitization และบางคนก็เรียกผิดๆ ว่า graphitic corrosion สาเหตุก็เพราะว่าในเหล็กหล่อเทา กราไฟต์จะมีขั้วเป็นแคโทดเมื่อเทียบกับเนื้อเหล็กที่มีขั้วเป็นแอโนด การเกิด selective leaching โดยเนื้อเหล็กส่วนที่เป็นเนื้อโลหะหลัก (matrix) เป็นขั้วแอโนด (anode) ถูกละลายออกไป ส่วนที่เป็นร่างแหกราฟไฟต์ซึ่งคือคาร์บอน จะแสดงตัวเป็นแคโทด (cathode) เหล็กจะถูกละลายออกไปเหลือมวลสารที่เป็นรูปของ complex iron oxide โดยผลจะทำให้เหล็กหล่อเทาสูญเสียความแข็งแรงไปมากและสูญเสียคุณสมบัติของโลหะไปด้วย แต่มีติภายนอกจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นถ้าไม่ตรวจสอบพบสภาพความบกพร่องก่อน จะเป็นสภาพที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อให้เกิดอันตรายมาก และขั้นตอนการเกิดจะช้าถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน (corrosive) มาก ผิวทั้งหมดจะถูกชะละลายออกมา กลายเป็นการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า (uniform attack) ส่วนเหล็กหล่อกราไฟต์กลม (nodular iron) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable iron) จะไม่เกิด graphitization เพราะว่ามีรูปร่างของกราไฟต์ที่จะช่วยพยุงเนื้อเหล็กหล่อส่วนที่เหลือให้คงรูปร่างไว้ได้

Nominal Chemical Composition* of Wrought Alloys									
Alloy	Per Cent of Alloying Elements - Aluminum and Normal Impurities Constitute Remainder								
	Copper	Silicon	Manganese	Magnesium	Zinc	Titanium	Chromium	Lead	Bismuth
1060	0.12	99.60% minimum aluminum							
1100		99.00% minimum aluminum							
1230**		99.30% minimum aluminum							
1350		99.50% minimum aluminum							
2011	5.5							0.40	0.40
2014	4.4	0.8	0.8	0.50					
2017	4.0	0.50	0.7	0.6					
2024	4.4		0.6	1.5					
3003	0.12		1.2						
3004			1.2	1.0					
3105			0.6	0.50					
4032	0.9	12.2		1.0					Ni 0.9
4043		5.2							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5005				0.8					
5050				1.4					
5052				2.5			0.25		
5083			0.7	4.4			0.15		
5086			0.45	4.0			0.15		
5154				3.5			0.25		
5356			0.12	5.0		0.13	0.12		
5454			0.8	2.7			0.12		
5456			0.8	5.1			0.12		
5457			0.3	1.0					
5554			0.8	2.7			0.12	0.12	
5556			0.8	5.1			0.12	0.12	
5657				0.8					
6013	0.8	0.8	0.5	1.0					
6020	0.6	.65		0.9					Sn 1.2
6061	0.28	0.6		1.0			0.20		
6063		0.40		0.7					
6101		0.5		0.6					
6262	0.28	0.6		1.0			0.09	0.55	0.55
7075	1.6			2.5	5.6		0.23		
*Source: Aluminum Association Inc. **Cladding on 2024									

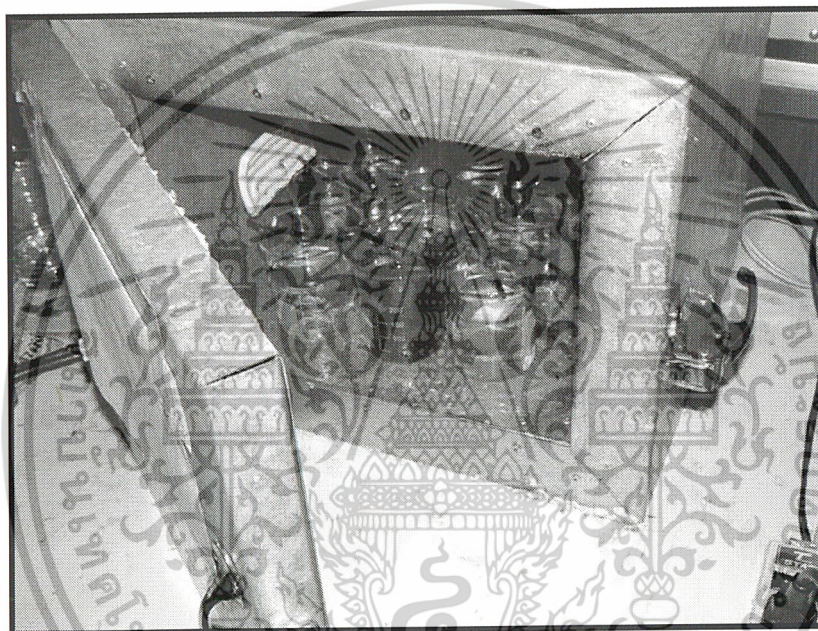
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทดสอบการกักความร้อน

3.1.1 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ(Temperature Controlled Oven)



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของตู้ควบคุมอุณหภูมิ

การออกแบบและพัฒนาตู้ควบคุมอุณหภูมิ จะกำหนดให้ตู้สามารถทำความร้อนได้ระหว่าง 0-200 องศาเซลเซียส โดยจะมีตัว Thermo couple เป็นตัวรับสัญญาณอุณหภูมิ พร้อมกับชุด Temperature Controller ซึ่งจะเป็นตัวรับสัญญาณไฟฟ้า จาก Thermo couple และทำหน้าที่ในการควบคุมอุณหภูมิที่ตั้งไว้ให้คงที่ ตลอดจนทำหน้าที่ตัดต่อควบคุมไฟฟ้าที่ไหลเข้า Heater สำหรับในส่วนของตู้ควบคุมอุณหภูมิจะทำด้วยแผ่นสังกะสีหนา 1 mm. และหุ้มผนังด้านในด้วย เซรามิกไฟเบอร์หนา 2.5 cm. โดยจะใช้ควบคุมและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตามที่เรที่ตั้งไว้ในกระบวนการทดสอบการกักความร้อนของ Specimens ในน้ำมันชนิดต่างๆ ซึ่งได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันมะพร้าว แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับน้ำมันขึ้นรูป (Form Oil) ที่อุณหภูมิต่างๆสำหรับน้ำมันทุกชนิด เพื่อศึกษาถึงปริมาณของ Aluminium ที่ถูกกัดกร่อนเทียบกับอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์ดังนี้

1. Thermocouple
2. Thermo Controller
3. Magnetic Contactor
4. Ceramic Fiber
5. Infrarate Heater
6. สายไฟทนความร้อน
7. สังกะสีแผ่นหนา 1 มม.
8. Terminal Connector

1) หลักการทำงานของวงจรไฟฟ้า

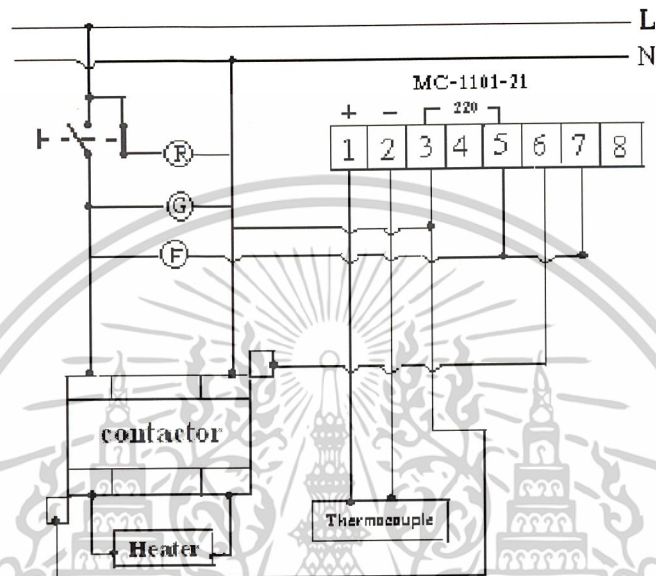
- 1.1) การทำงานเริ่มต้นโดย สาย Line มีกระแสไหลผ่านจะครบวงจรที่หลอดไฟสีแดงจึงแสดงไฟสีแดง เมื่อเสียบปลั๊ก ส่วนไฟเขียวเป็น Normally open ไฟจึงยังไม่ติด (ตำแหน่งสวิตช์อยู่ที่ off)
- 1.2) สับสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง ON ไฟสีเขียวกลายเป็น Normally close จึงทำให้ไฟติด ส่วนไฟสีแดงเป็น Normally open ไฟจึงดับ
- 1.3) ต่อสายไฟที่ต่อจากไฟสีเขียว เข้า contactor แยกเข้าฟิวส์ ออกจากฟิวส์ไปเข้า channel 5,7 ส่วนสายไฟที่ต่อจากไฟสีแดงเข้า contactor อีกขั้วหนึ่ง จะแยกเข้า channel 3 ของ Thermo controller
- 1.4) Channel 6 ของ Thermo controller รุ่น MC-1101-21 จะต่อเข้าที่คอยล์ด้านหนึ่งของ contactor
- 1.5) Channel 3 ของ Thermo controller รุ่น MC-1101-21 จะต่อเข้าที่คอยล์อีกด้านหนึ่งของ contactor ต่อจากหมายเลข 6
- 1.6) ส่วน channel 1,2 จะต่อเข้ากับ Thermo couple เพื่อทำหน้าที่ตรวจเช็คค่าอุณหภูมิ
- 1.7) ต่อไฟอนุกรมเข้ากับ Heater ทั้ง 2 อัน แล้วต่อเข้ากับอีกขั้วหนึ่งของ contactor แล้วนำไปติดตั้งไว้ในตู้ รวมทั้ง Thermo couple ด้วย

2) ขั้นตอนการตัดต่อของระบบควบคุม

- 2.1) เมื่อความร้อนยังไม่ถึงค่าที่ตั้งไว้ Thermo couple จะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุด Thermo controller เพื่อสั่งให้ contactor เปลี่ยนจาก Normally open เป็น Normally close ให้ครบวงจร เพื่อให้ Heater ทำความร้อนและไฟที่หน้าปัดของ Thermo controller จะขึ้นสีเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) เมื่ออุณหภูมิความร้อนถึงค่าที่ได้ตั้งไว้แล้ว Thermo couple จะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังชุด Thermo controller เพื่อสั่งให้ contactor เปลี่ยนจาก Normally close เป็น Normally open เพื่อให้ Heater หยุดทำงาน ไฟที่หน้าปัดของ Thermo controller จะขึ้นสีแดง



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิ

3) การคำนวณหาขนาดของ Heater

ในการหาขนาดของ Heater จะต้องคำนวณหา Heat Loss และความจุความร้อนของบีกเกอร์ และความจุความร้อนของแผ่นอุณหภูมินิยม (Specimens) ซึ่งมีวิธีคำนวณดังต่อไปนี้

3.1) Heat Loss

อากาศร้อนภายในตู้ กำหนดเป็น $T_{\infty,1} = 200^{\circ}C$ และ $h_1 = 20 w/m^2 \cdot k$

อากาศด้านนอก กำหนดเป็น $T_{\infty,5} = 25^{\circ}C$ และ $h_5 = 25 w/m^2 \cdot k$

สมมุติฐานเบื้องต้น

- เป็นการนำความร้อนใน 1 มิติ ภายใต้สภาวะคงตัว
- สภาพนำความร้อนคงที่
- ที่อุณหภูมิห้องเราจะพบว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ $25 w/m^2 \cdot k$ และภายในตู้เท่ากับ $20 w/m^2 \cdot k$

จากตารางการนำความร้อนพบว่าสังกะสีและอากาศมีสภาพนำความร้อนเป็น 108.08 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.0388 $w/m.k$ ตามลำดับ และ Ceramic fiber มีสภาพนำความร้อนเป็น 0.056 $w/m.k$
 ดังนั้นจะได้

$$\frac{1}{h_1 A} = \frac{1}{20A}$$

$$\frac{L_1}{k_1 A} = \frac{1 \times 10^{-3}}{108.08A}$$

$$\frac{L_2}{k_2 A} = \frac{25 \times 10^{-3}}{0.056A}$$

$$\frac{L_3}{k_3 A} = \frac{1 \times 10^{-3}}{108.08A}$$

$$\frac{L_4}{k_4 A} = \frac{25 \times 10^{-3}}{0.0388A}$$

$$\frac{1}{h_5 A} = \frac{1}{25A}$$

ดังนั้น $R_{tot} = \frac{1}{20A} + \frac{1 \times 10^{-3}}{108.08A} + \frac{25 \times 10^{-3}}{0.056A} + \frac{1 \times 10^{-3}}{108.08A} + \frac{25 \times 10^{-3}}{0.0388A} + \frac{1}{25A}$

จะได้ $R_{tot} = \frac{1.187}{A}$

จาก $Q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} = \frac{200 - 25}{\left(\frac{1.187}{A}\right)}$

$$\frac{Q_x}{A} = 147.43 \text{ W/m}^2$$

เนื่องจากเราออกแบบไว้ว่าจะใส่บีกเกอร์ 6 อัน ขนาด 150 cc ไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ

จากสูตร $Q = mc_p \Delta T \times$ จำนวนบีกเกอร์

จากตารางค่า c_p เท่ากับ 2.471

$$\text{แทนค่า } Q = \left(\frac{150}{1000}\right) \times 2.471 \times (200 - 25) \times 6$$

$$Q = 389.18 \text{ kW}$$

3.2) ความจุความร้อนของบีกเกอร์

ใช้เวลาทำความร้อนให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด ประมาณ 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = \frac{389.18 \times 10^3}{3600} = 108.105 \text{ W}$$

3.3) ความจุความร้อนของแผ่นอลูมิเนียม (Specimens)

$$Q = mc_p \Delta T \times \text{จำนวนแผ่นอลูมิเนียม}$$

จากตารางค่า c_p เท่ากับ 0.98 kJ/kg.K

ขนาดของแผ่น Specimen ตามมาตรฐาน ASTM คือ $2 \text{ นิ้ว} \times 1 \text{ นิ้ว} \times \frac{1}{8} \text{ นิ้ว}$

ดังนั้นคำนวณหาน้ำหนักได้เท่ากับ 0.0105 kg

$$\text{แทนค่า } Q = \frac{0.0105 \times 0.98 \times (200 - 25) \times 6}{3600}$$

$$Q = 3.1 \text{ W.}$$

ดังนั้นเราจะได้ผลรวมทั้งหมดคือ

$$\therefore Q_{tot} = 108.105 + 147.43 + 3.1 = 258.635 \text{ W.}$$

ในทางปฏิบัติจะใช้ Heater ขนาด 325 W จำนวน 2 ตัว

3.1.2 อุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสำหรับให้ความร้อนภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิวัดอุณหภูมิจะเป็นแบบ Infrared Heater ซึ่งสามารถกระจายความร้อนให้แก่ของเหลวได้ดีที่สุด โดยจะติดตั้งไว้ที่ด้านข้างของตู้ควบคุม อุณหภูมิข้างละ 1 ตัว ขนาด ตัวละ 325 W ใช้กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า 220 V

3.1.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสำหรับวัดอุณหภูมิจะประกอบไปด้วยโลหะ 2 ชนิดนำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน ซึ่งจะเป็นจุดที่นำไปใช้วัดอุณหภูมิ (Hot Junction) และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นจุดที่ใช้สำหรับการอ้างอิง (Cold Junction) เมื่อจุดเชื่อมนี้ได้รับความร้อนก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของความร้อนขึ้นซึ่งขนาดและขั้วของแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิแตกต่างที่ปลายทั้งสอง และขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาต่อเชื่อมถึงกันด้วย

3.1.4 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Thermo Controller)

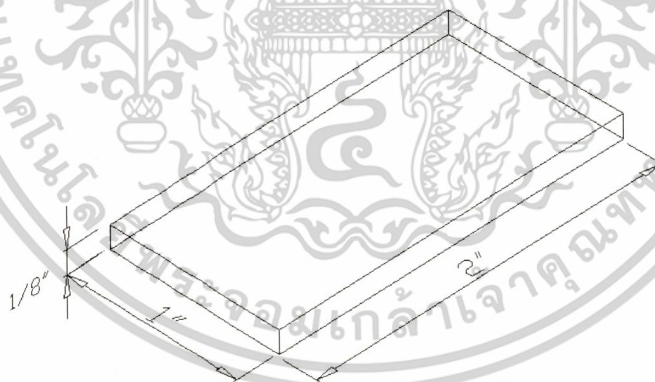
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสำหรับควบคุมอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบ analoge ยี่ห้อ NATTO รุ่น MC- 1101-21 ใช้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 - 400 °C ทำหน้าที่ในการตัดต่อกระแสไฟฟ้าที่ต่อกับ Heater โดยมี channel ทั้งหมด 8 channel โดยต่อวงจรเข้ากับ Magnetic Contactor และ Thermo Couple

3.1.5 อุปกรณ์ตัดต่อกระแสในวงจรไฟฟ้า (Magnetic Contactor)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดต่อวงจรไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กที่หน้าสัมผัสชั่วคราวโดยอาศัยการใช้กระแสไฟฟ้า ซึ่งจะต่อเข้ากับ Heater และ Thermo Controller โดยหน้าสัมผัสจะมีอายุการใช้งานประมาณ 300,000 ครั้ง

3.1.6 วัสดุที่ใช้ทดสอบ (Specimens)

วัสดุทดสอบที่ใช้ในการทดสอบในกระบวนการกัดกร่อนเป็นวัสดุที่ทำจาก Aluminium ขนาด 2 นิ้ว \times 1 นิ้ว \times $\frac{1}{8}$ นิ้ว ตามมาตรฐาน ASTM ซึ่งในการทดสอบ กำหนดให้ Specimens แต่ละชิ้นต้องมีน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 7.015 กรัม



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของวัสดุทดสอบ(Specimen) ในกระบวนการทดสอบการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 วัสดุที่ใช้เป็นฉนวน (Ceramic Fiber)

ฉนวนความร้อนที่ใช้ในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนในตู้ควบคุมอุณหภูมิเป็นฉนวนประเภท Ceramic Fiber ที่มีสภาพนำความร้อนเป็น 0.056 w/m.k และมีความหนาประมาณ 2.5 cm สามารถทนความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิ $0 - 1,200^\circ\text{C}$

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด (Electronic Balance)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลในการทดสอบกระบวนการกักกร่อน จะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียดซึ่งมีความสามารถในการแสดงผลการชั่งน้ำหนักซึ่งความละเอียดในหน่วย 0.0001 กรัม โดยเครื่องชั่งที่ใช้ในการวัดผลการทดสอบ จะใช้ เครื่องชั่งยี่ห้อ Yamato รุ่น HB 120 ใช้กับแหล่งจ่ายไฟความต่างศักย์ 220 V

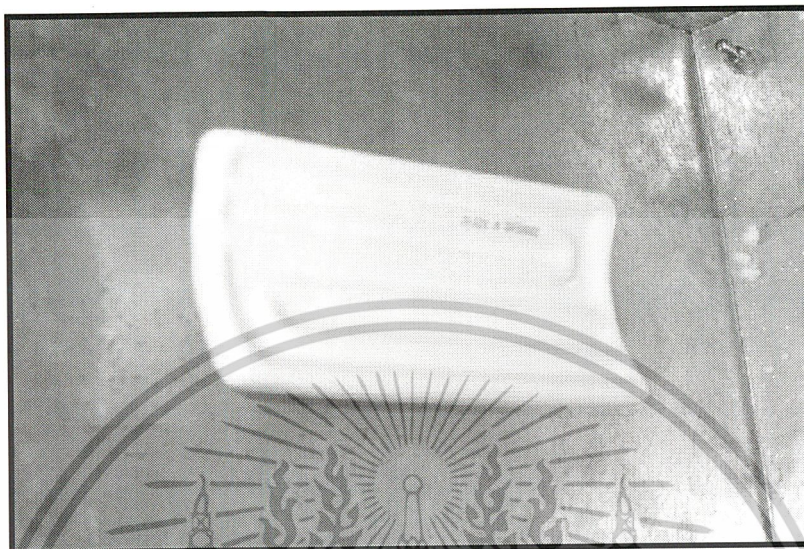
3.1.9 เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของเครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด

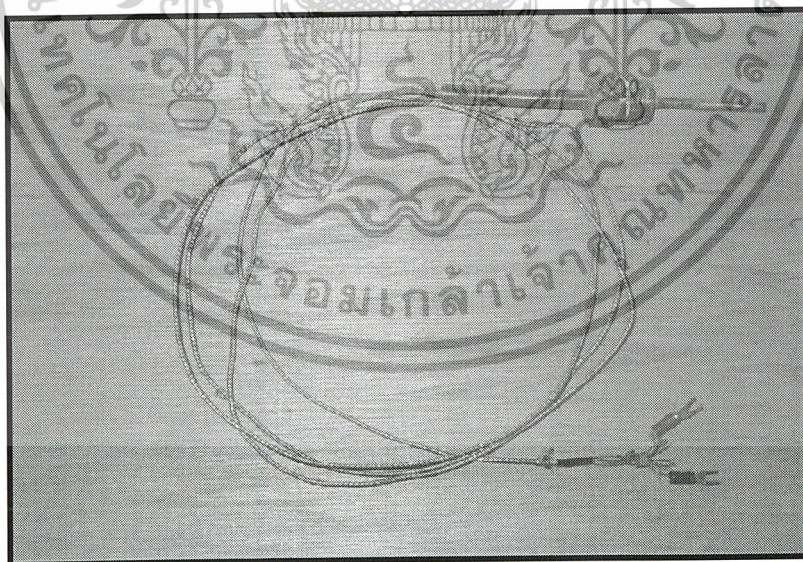
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.10 อุปกรณ์ให้ความร้อน



รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของ Infrarate Heater ที่ติดตั้งที่ด้านขวาของตู้

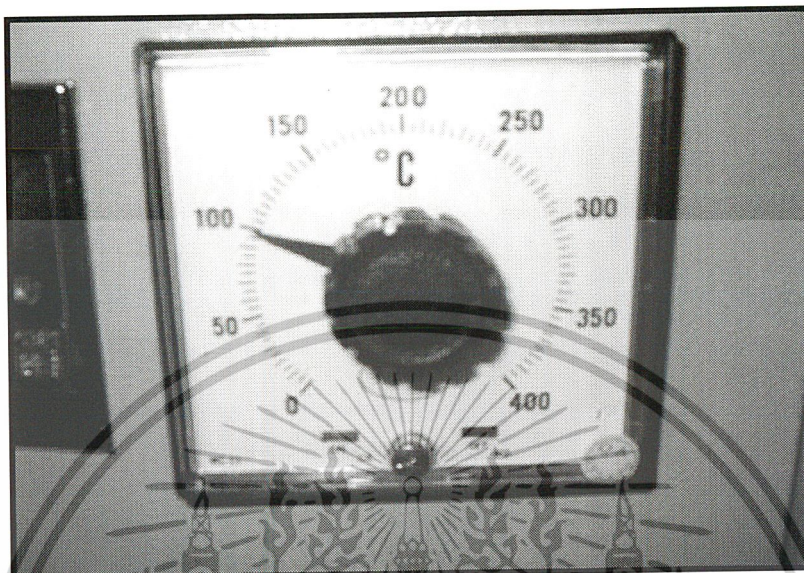
3.1.11 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของ Thermocouple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.12 ลักษณะของเกอควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของ Thermo Controller

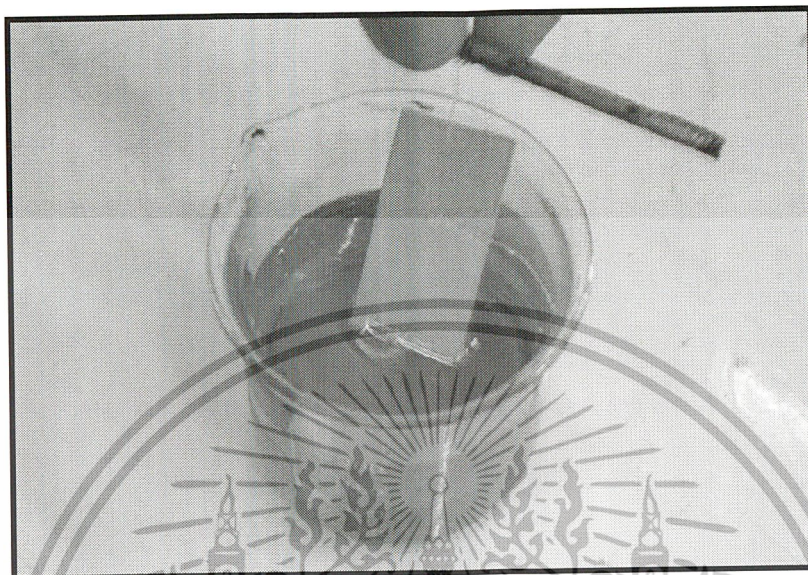
3.1.13 วัสดุที่ใช้เป็นฉนวน



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของ Ceramic Fiber

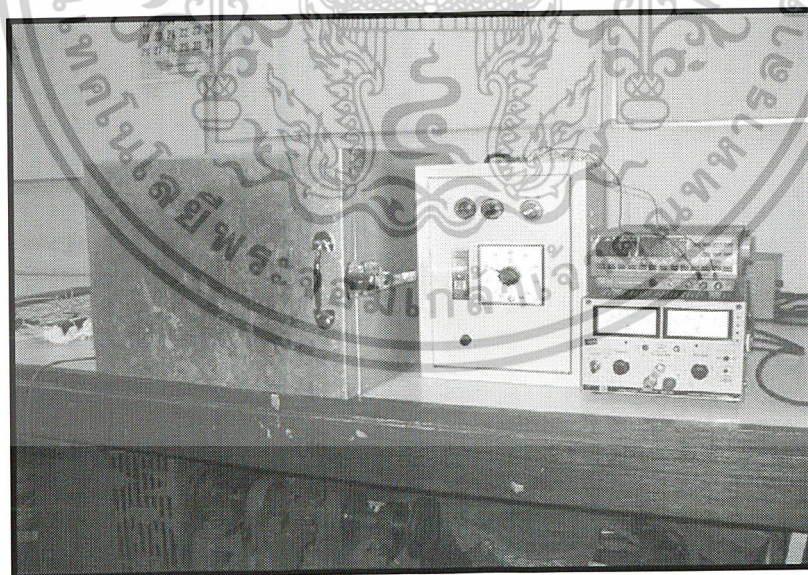
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.14 วัสดุที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของวัสดุทดสอบขณะทดสอบในน้ำมัน

3.1.15 ลักษณะของตู้และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

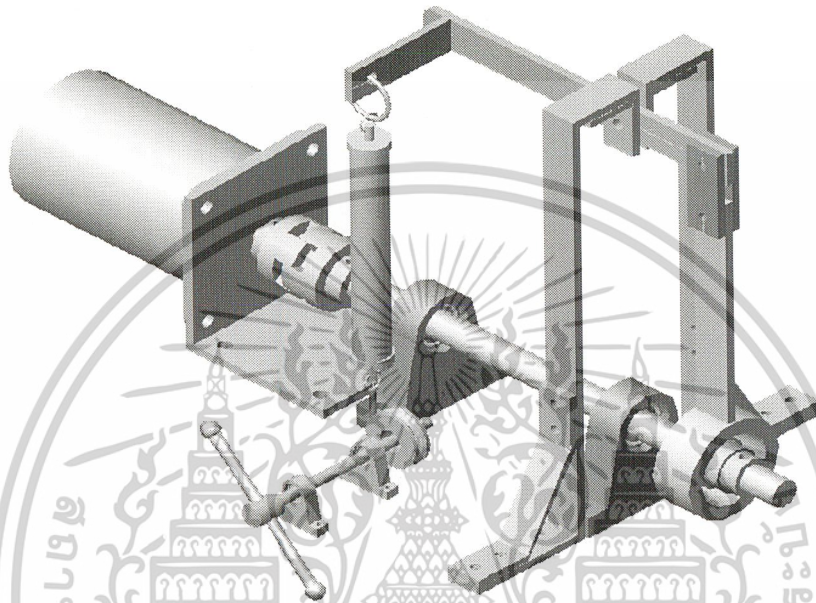


รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของตู้และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทดสอบการเกิดสนิม

3.2.1 เครื่องทดสอบสนิม (Rust Test Machine)

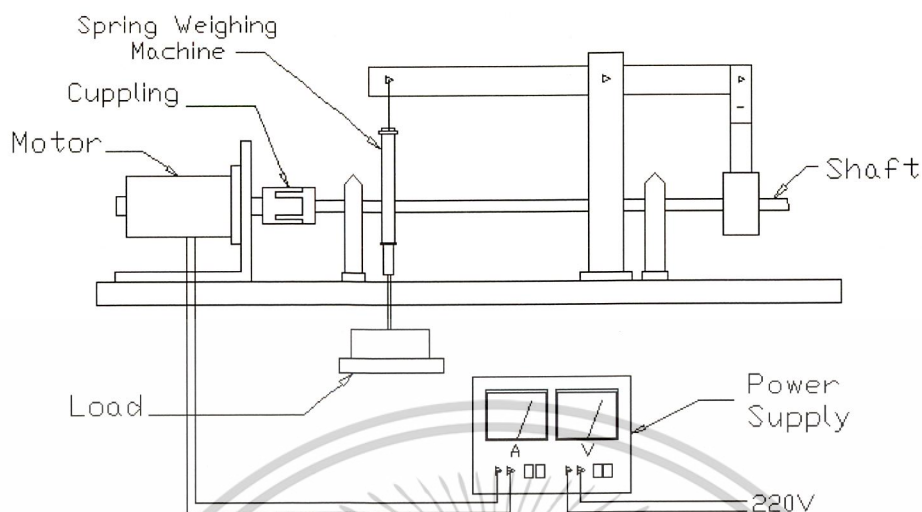


รูปที่ 3.11 แสดงการออกแบบเครื่องทดสอบสนิม

การออกแบบและพัฒนาเครื่องทดสอบสนิม จะออกแบบให้เครื่องทดสอบสนิมสามารถปรับภาระที่ให้แก่ตลับลูกปืนตามแนวรัศมีได้ในขณะที่ทำการหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ที่ 1450 รอบต่อนาที ตามมาตรฐาน ASTM ภายในน้ำมันชนิดต่างๆ ซึ่งภาระที่ปรับค่าได้จะอยู่ในช่วง 0 – 15 kg ในการทดสอบจะทำการทดสอบโดยใช้ Ball Bearing 6005 single row ขนาดรูสวม 25 mm. เป็นวัสดุทดสอบ

โครงสร้างของเครื่องทดสอบสนิมประกอบไปด้วยอุปกรณ์ส่งกำลัง , เฟลาส่งกำลัง , อุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า , ชุดปรับภาระสำหรับตลับลูกปืน , ชุดประกอบตลับลูกปืน และ อ่างสำหรับใส่น้ำมัน ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของเครื่องทดสอบสมิม

3.2.2 อุปกรณ์ส่งกำลัง (Motor)

อุปกรณ์ที่ใช้ส่งกำลังจะใช้มอเตอร์ กระแสตรง DC ขนาด 120 W ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพลลา 15 mm

3.2.3 เพลลาส่งกำลัง (Shaft)

เพลลาส่งถ่ายกำลังจากมอเตอร์ จะใช้เพลลาทำจากเหล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 12 mm ยาว 50 cm

3.2.4 อุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า (Power Supply)

อุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ สามารถแปลงกระแสไฟฟ้าจาก AC Volt เป็น DC Volt และสามารถ ปรับกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 0 – 10 A. และ ปรับความต่างศักย์ ได้ 0 – 25 V. ซึ่งในการทดสอบ ที่ความเร็วรอบ 1,450 รอบต่อนาที จะปรับกระแสไฟฟ้า ที่ 4.5 A. และ ความต่างศักย์ ที่ 21 V.

3.2.5 ชุดปรับภาระตลับลูกปืน (Load Varier)

อุปกรณ์ปรับภาระสำหรับตลับลูกปืนสามารถปรับภาระได้ระหว่าง 0 – 15 kg โดยใช้ลูกตุ้มถ่วงน้ำหนัก และตาชั่งสปริงขนาด 15 kg ในการทดสอบจะทำการปรับภาระที่ 4,7,10 kg โดยให้ตลับลูกปืนรับภาระในแนวตั้ง

3.2.6 วัสดุที่ใช้ทดสอบ (Specimens)

วัสดุทดสอบที่ใช้ในการทดสอบในกระบวนการทดสอบการเกิดสนิมจะใช้ Ball Bearing 6005 Single Row ขนาดเพลาสวม 25 mm. ยี่ห้อ SKF (made in Franch) เป็นวัสดุทดสอบ โดยมีค่า Basic Load Dynamic เท่ากับ 11,200 N ค่า Basic Load Rating Static เท่ากับ 6,550 และ ค่า Speed Rating Oil เท่ากับ 18,000 r/min

3.2.7 อุปกรณ์วัดค่า pH (Multi Parameter Analysis)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า pH ของน้ำมันที่ใช้ทดสอบ จะใช้เครื่อง Multi Parameter Analysis ยี่ห้อ Consort รุ่น C 830 ซึ่งนอกจากจะสามารถวัดค่า pH ในของเหลวต่างๆได้แล้วยังสามารถวัดค่าต่างๆในของเหลวได้อีกในหน่วยของ μS , mS ,CAL โดยจะประกอบไปด้วย ส่วนแรกเป็นกระเปาะ ซึ่งภายในจะมีขั้วไฟฟ้า บวก ลบ อยู่ทำหน้าที่ในการสัมผัสกับของเหลว ส่วนที่สองจะเป็นส่วนในการประมวลผลและแสดงผลในรูปแบบของตัวเลขในระบบดิจิทัล

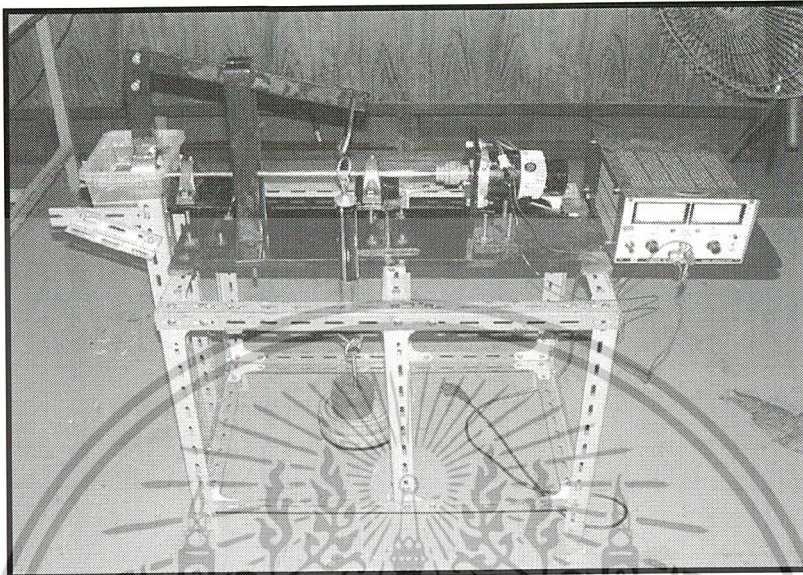
3.2.8 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสำรวจพื้นผิวของวัสดุทดสอบ ที่ผ่านกระบวนการทดสอบ การกัดกร่อนและการเกิดสนิม จะใช้กล้องจุลทรรศน์ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายได้ ตั้งแต่ 5x – 100x โดยกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้งานจะติดตั้งกล้องบันทึกภาพในระบบดิจิทัล โดยจะต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงภาพที่ได้จากการสำรวจทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

3.2.9 น้ำมันพืชทดสอบ (Testing Oil)

น้ำมันทดสอบที่นำมาทดสอบในกระบวนการทดสอบการกัดกร่อนและการเกิดสนิมเป็นน้ำมันพืชชนิดที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (Refining Process) แล้ว แต่ยังไม่ผ่านกระบวนการเติมสาร Antioxidant น้ำมันพืชที่จะนำมาทดสอบนี้ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง (Soybean Oil) , น้ำมันปาล์ม (Palm Oil) , น้ำมันมะพร้าว (Coconut Oil) และ น้ำมันขี้ผึ้ง (Form Oil) โดยในการทดสอบในกระบวนการกัดกร่อนจะแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 2 ชุด ทดสอบ โดยชุดแรกจะใช้น้ำมันทั้ง 4 ชนิด โดยไม่เติมสารใดๆเช่นเดียวกับกระบวนการเกิดสนิม และ ในชุดที่ 2 จะทำการเติมน้ำลงไปผสมกับน้ำมันทั้ง 4 ชนิด ในอัตราส่วน 1 : 1

3.2.10 เครื่องทดสอบสปีด



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของเครื่องทดสอบสปีด

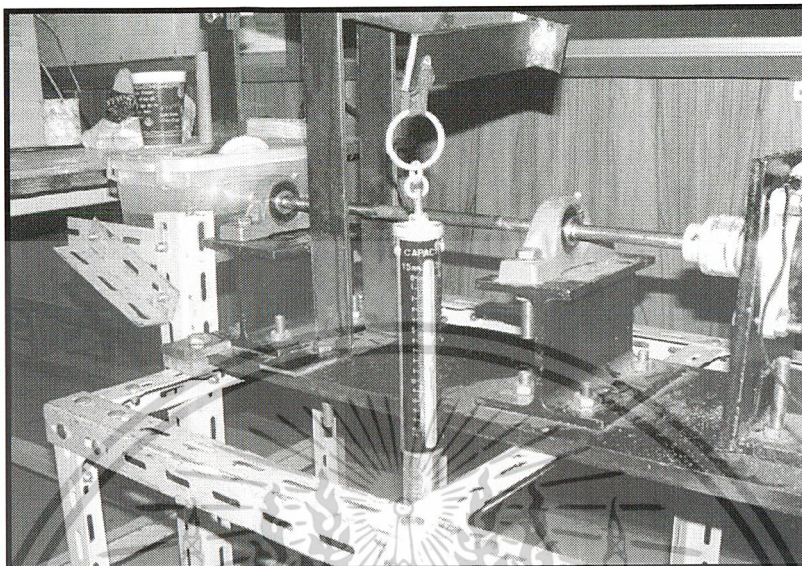
3.2.11 อุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 แสดงลักษณะอุปกรณ์ปรับแรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้า

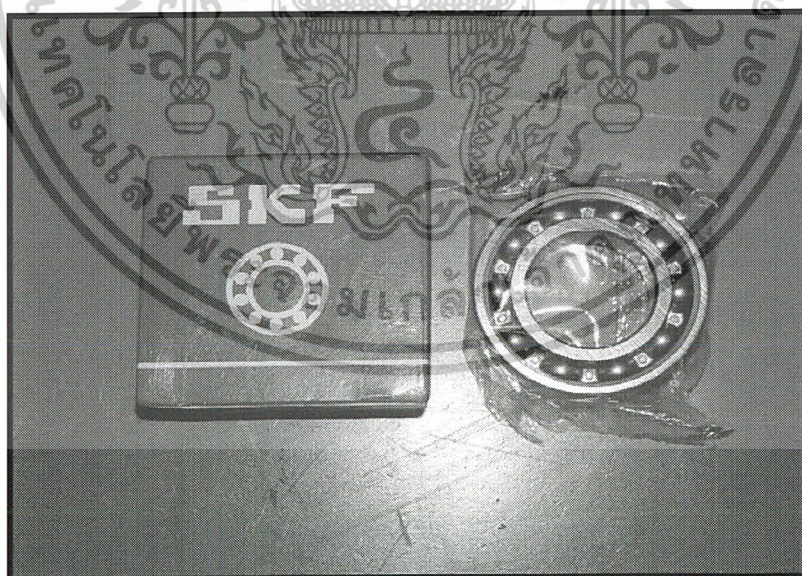
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.12 ชุดปรับภาระตลับลูกปืน



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของตาชั่งสปริงซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของชุดปรับภาระตลับลูกปืน

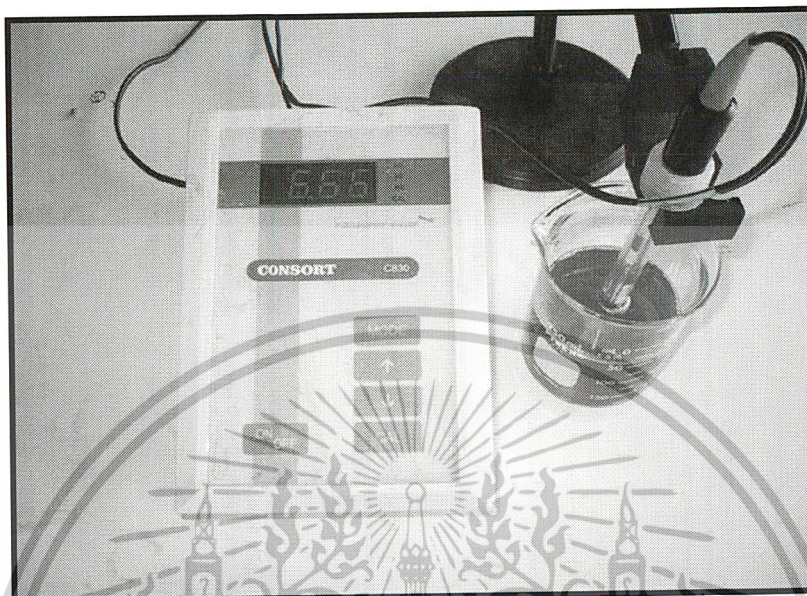
3.2.13 วัสดุที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของตลับลูกปืนที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ

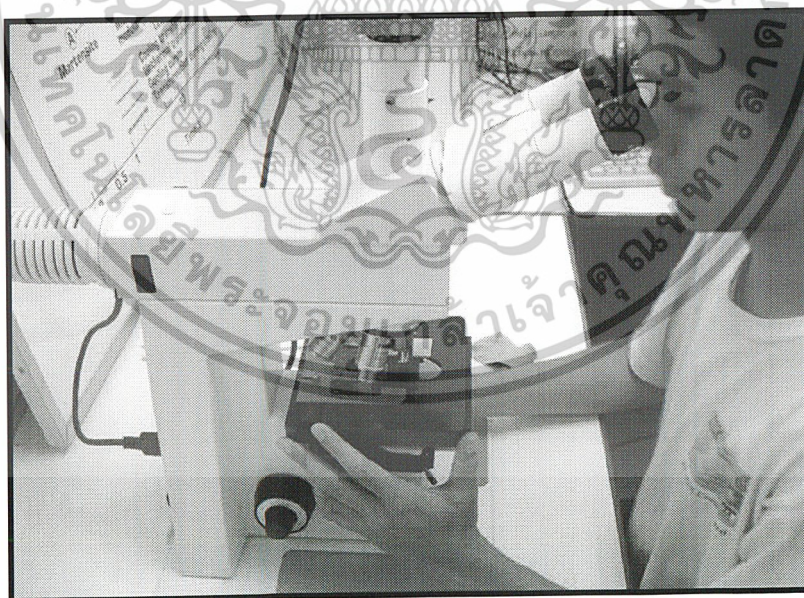
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.14 การวัดค่า pH ในน้ำมันทดสอบ



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะอุปกรณ์วัดค่า pH

3.2.15 กล้องจุลทรรศน์



รูปที่ 3.18 แสดงการสำรวจลักษณะพื้นผิวของวัสดุทดสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการทดลองการกักกรองของแผ่นอลูมิเนียม และการทดลองการเกิดสนิมในคลับดูกปีน

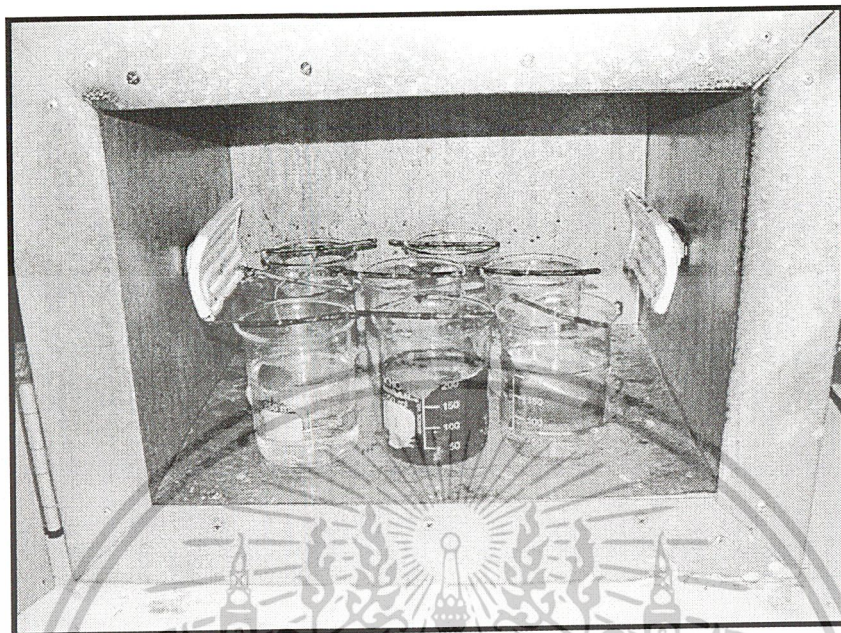
4.1 ขั้นตอนการทดลองการกักกรองของแผ่นอลูมิเนียม

การทดลองการกักกรองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการหาชนิดของน้ำมันพืชที่เหมาะสมมาใช้แทนน้ำมันสังเคราะห์ และปริมาณการกักกรองของน้ำมันแต่ละชนิด สำหรับขั้นตอนแรกเป็นการสร้างชุดทดลอง (ตู้ควบคุมอุณหภูมิ) เพื่อสำหรับการทดลอง หลังจากนั้นจะนำชุดทดลองที่ประกอบด้วยน้ำมันและแผ่นอลูมิเนียมที่จุ่มอยู่ในน้ำมันที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์มารักษาอุณหภูมิในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 40,80,120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 สัปดาห์ โดยทุกๆสัปดาห์จะนำแผ่นอลูมิเนียมมาชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป โดยชุดทดลองจะแบ่งออกเป็น 8 ชุดด้วยกันคือ

1. น้ำมันจี่นรูป 200 CC.
2. น้ำมันมะพร้าว 200 CC.
3. น้ำมันถั่วเหลือง 200 CC.
4. น้ำมันปาล์ม 200 CC.
5. น้ำมันจี่นรูป 100 CC.+น้ำ 100 CC.
6. น้ำมันมะพร้าว 100 CC.+น้ำ 100 CC.
7. น้ำมันถั่วเหลือง 100 CC.+น้ำ 100 CC.
8. น้ำมันปาล์ม 100 CC.+น้ำ 100 CC.

หลังจากนั้นจะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ กำลังขยาย 5X เพื่อสำรวจพื้นผิวบริเวณที่ถูกกักกรองของน้ำมันแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงชุดทดลอง Corrosion Test

4.1.1 ขั้นตอนการตรวจสอบผลการทดลอง

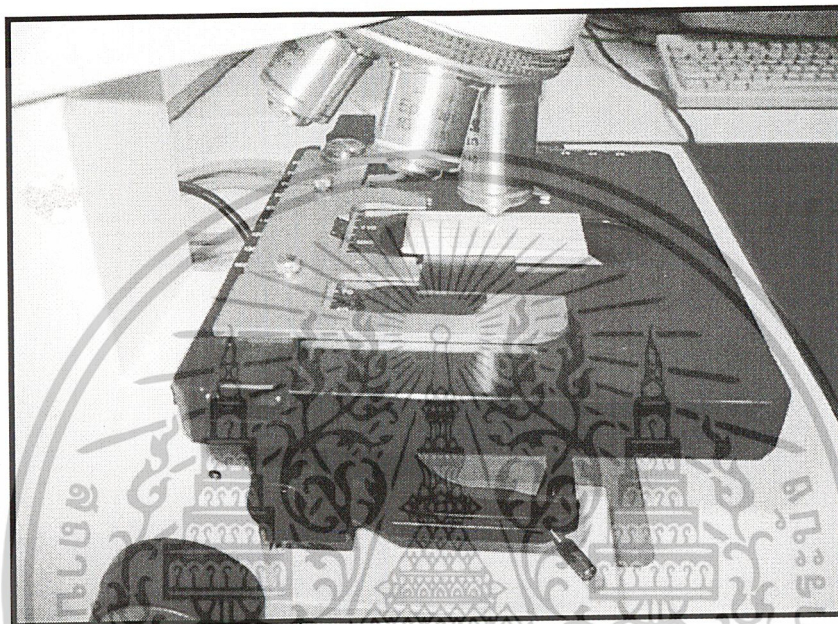
1. การตรวจสอบผลการทดลองด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล

หลังจากที่นำชุดทดลองไปรักษาอุณหภูมิที่ 40,80,120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ทุกๆสัปดาห์จะต้องนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลเพื่อหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป โดยก่อนที่จะทำการชั่งจะต้องนำไปทำความสะอาดเพื่อขจัดน้ำมันที่ยังตกค้างอยู่ แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ก่อนที่จะนำไปชั่ง โดยการชั่งของแต่ละชุดการทดลองจะต้องชั่ง 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยเพราะค่าของ น้ำหนักมีความละเอียดมาก อาจมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตรวจสอบผลการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์

หลังจากที่นำชุดทดลองทั้ง 8 ไปรักษาอุณหภูมิที่ 40,80,120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 สัปดาห์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำไปสำรวจพื้นผิวรอยกัดกร่อนของน้ำมันแต่ละชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5X เพื่อหาชนิดของน้ำมันที่เกิดการกัดกร่อนน้อยที่สุด



รูปที่ 4.3 แสดงกล้องจุลทรรศน์

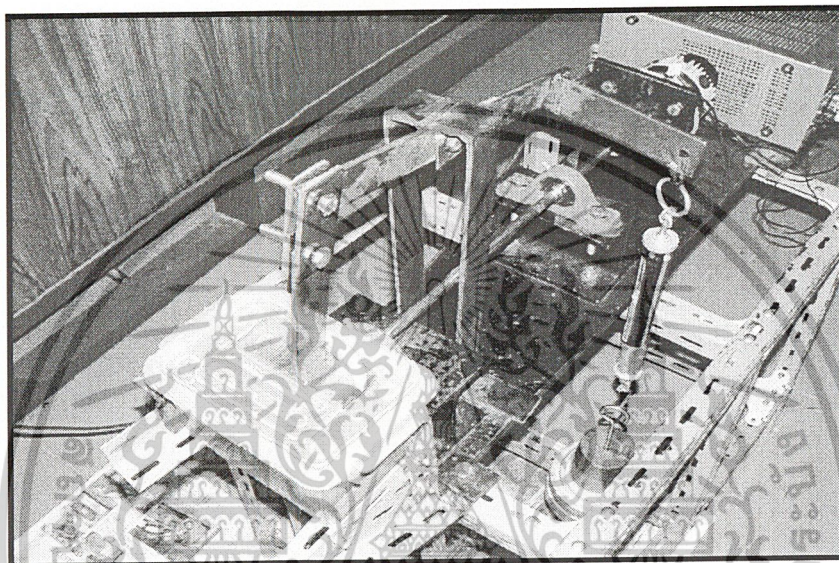
หลังจากที่เราได้ทราบผลการทดลองที่ได้จากการชั่งน้ำหนักเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปและผลการศึกษาพื้นผิวของการกัดกร่อนจากกล้องจุลทรรศน์ จะนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับ เพื่อสรุปหาชนิดของน้ำมันพืชที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้น้ำมันสังเคราะห์ต่อไป

4.2 ขั้นตอนการทดลองการเกิดสนิมในตลับลูกปืน

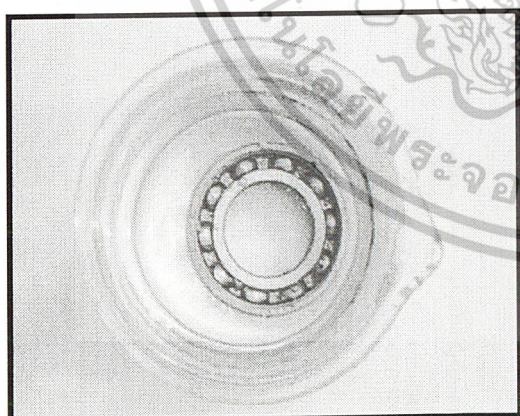
การทดลองการเกิดสนิมในตลับลูกปืน แบ่งลักษณะการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างชุดทดลอง Rust Test เพื่อใช้ในการทดลอง ส่วนขั้นตอนที่สอง เป็นการทดลองการเกิดสนิมและการวัดผลการเกิดสนิม สำหรับวิธีและลำดับขั้นตอนในการทดสอบ จะนำ ตลับลูกปืนแบบ Ball Bearing ชนิด Single Row มารับภาระในขณะหมุนที่ 4,7,10 กิโลกรัม ที่ความเร็วรอบ 1450 รอบต่อนาที โดยมอเตอร์จะต่ออยู่กับเพลาของชุดทดสอบซึ่งยึดอยู่กับตลับลูกปืน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขณะที่ทำการทดลองตลับลูกปืนจะถูกหล่อเลี้ยงด้วยน้ำมัน โดยชนิดของน้ำมันได้แก่ น้ำมันขึ้นรูป น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันมะพร้าว โดยที่ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองที่ละชนิด หลังจากนั้นจะนำตลับลูกปืนไปแช่น้ำ 1 วัน แล้วนำไปรักษาอุณหภูมิที่ 53 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 วัน ซึ่งลำดับขั้นตอนการทดสอบทั้งหมดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 1743



รูปที่ 4.4 แสดงชุดทดลอง Rust Test ขณะทำการทดลอง



รูปที่ 4.5 แสดงตลับลูกปืนแช่น้ำ 1 วัน

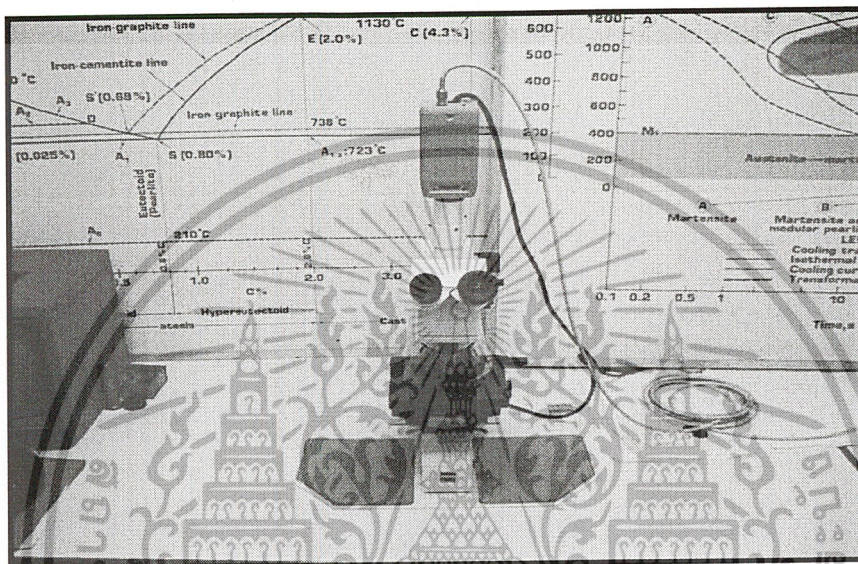


รูปที่ 4.6 การนำตลับลูกปืนไปรักษาอุณหภูมิ 53 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การตรวจสอบผลด้วยกล้องจุลทรรศน์

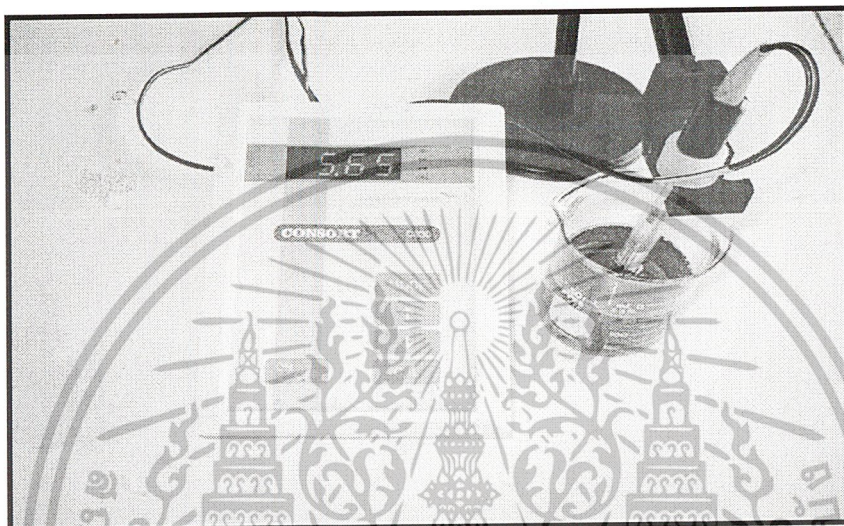
หลังจากที่นำดัดกลับถูกป้อนไปทดสอบตามวิธีการข้างต้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 5X เพื่อหาบริเวณพื้นผิวที่เกิดการกัดกร่อนของน้ำมันแต่ละชนิด และเปรียบเทียบหาน้ำมันพืชที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้แทนน้ำมันสังเคราะห์



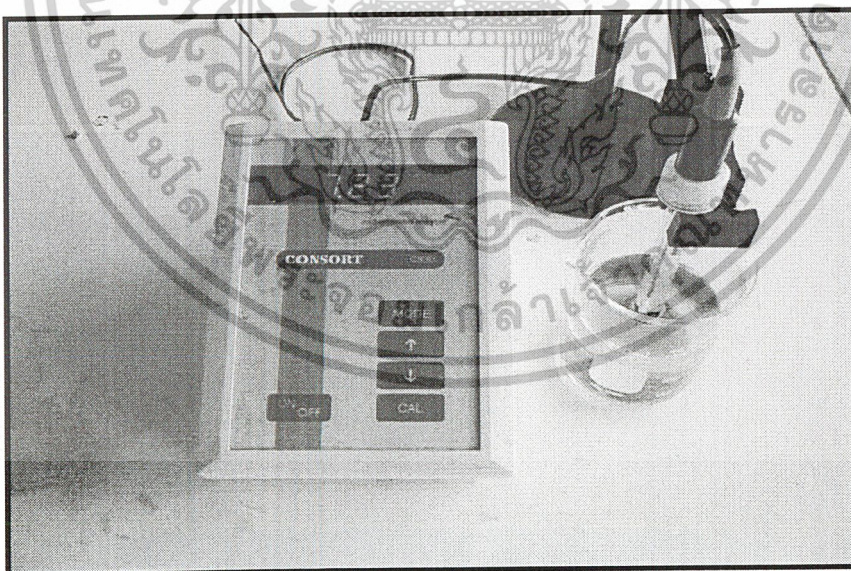
รูปที่ 4.7 แสดงกล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ขั้นตอนการตรวจสอบค่า pH ของน้ำมันชนิดต่างๆ

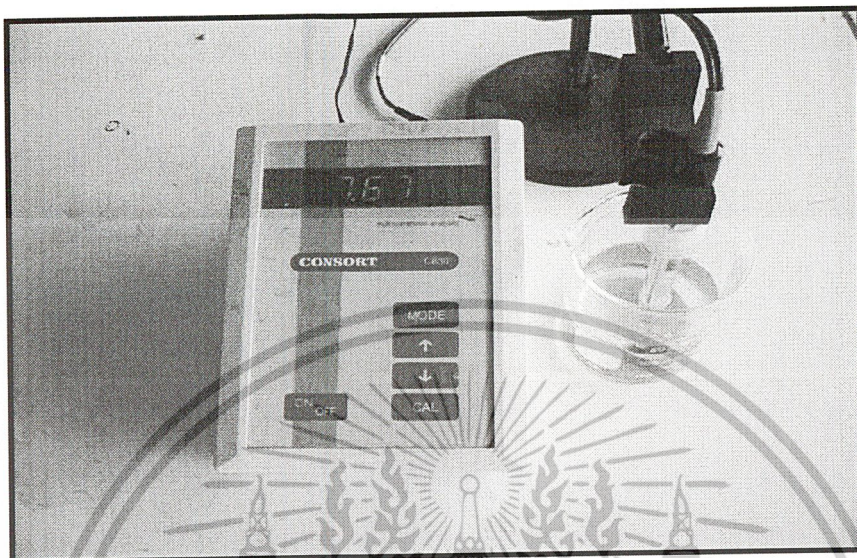


รูปที่ 4.8 แสดงค่า pH ของน้ำมันจันรูปคือ 5.65

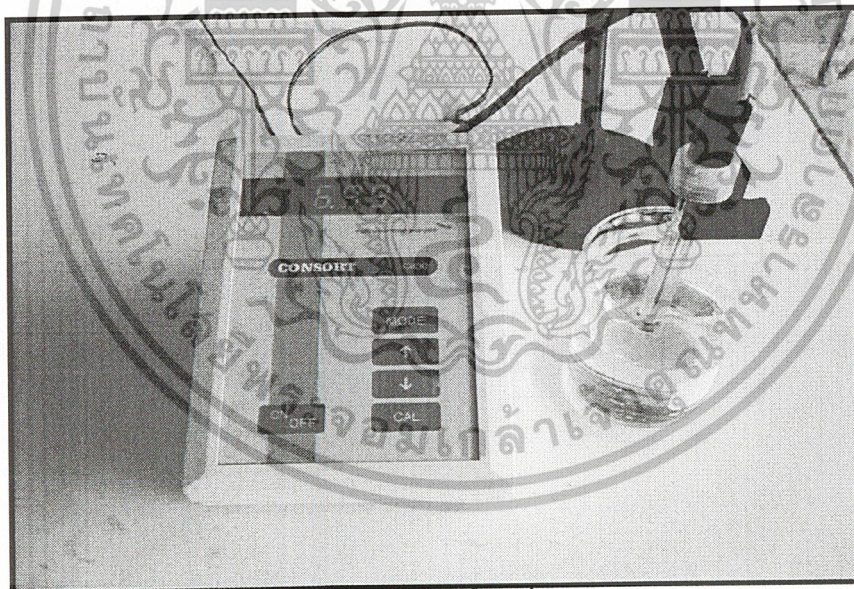


รูปที่ 4.9 แสดงค่า pH ของน้ำมันปาล์มรูปคือ 7.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงค่า pH ของน้ำมันมะพร้าวคือ 8.10



รูปที่ 4.11 แสดงค่า pH ของน้ำมันถั่วเหลืองคือ 6.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

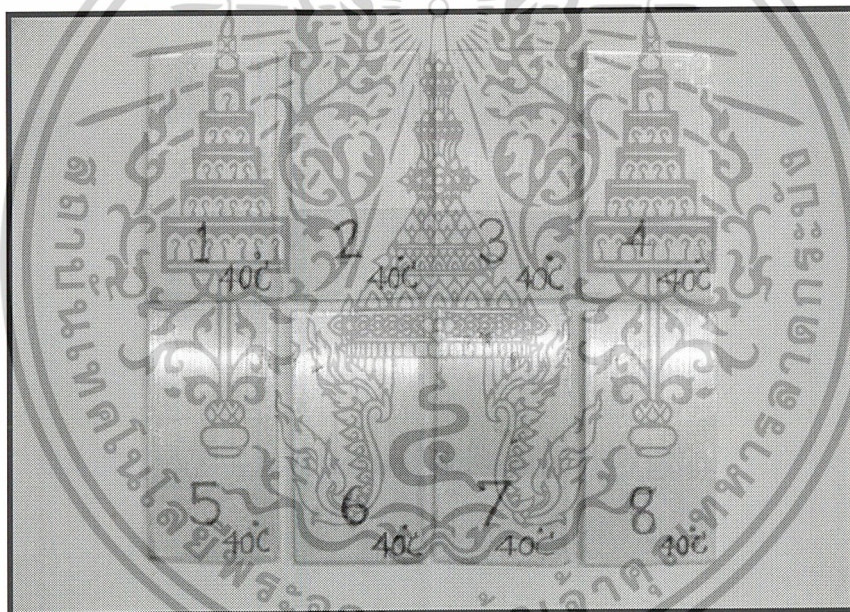
บทที่ 5

ผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมการกักตัวของแผ่นอลูมิเนียมและการเกิดสนิมในตลับลูกปืน มีปัจจัยหรือตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อผลการทดลอง ซึ่งผลการทดลองในแต่ละส่วนสามารถจำแนกได้ดังนี้

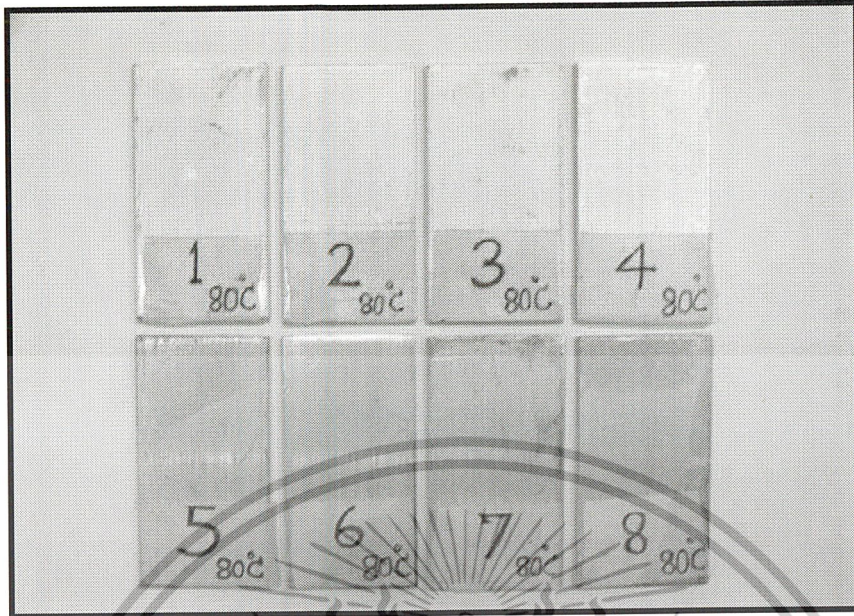
5.1 ผลการทดลองของการทดสอบการกักตัวของแผ่นอลูมิเนียม

หลังจากที่ได้ทำการทดลองการกักตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว พบว่าในแต่ละชนิดน้ำมันมีลักษณะการกักตัวแตกต่างกันออกไป โดยที่ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 แสดงแผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกักตัวที่อุณหภูมิ 40°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



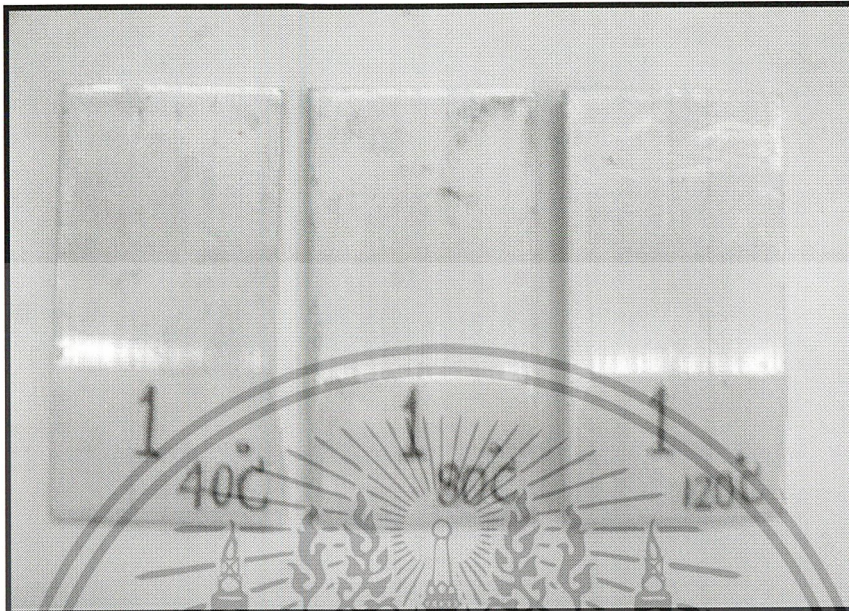
รูปที่ 5.2 แสดงแผ่นอคูมิเนียมที่เกิดการกักความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C



รูปที่ 5.3 แสดงแผ่นอคูมิเนียมที่เกิดการกักความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1-5.3 พบว่าแผ่นอลูมิเนียมจะเกิดการกัดกร่อนที่ 120 องศาเซลเซียสมากที่สุด และที่ 80 องศาเซลเซียสจะเกิดการกัดกร่อนลดลงมา ส่วนที่ 40 องศาเซลเซียสจะเกิดการกัดกร่อนน้อย

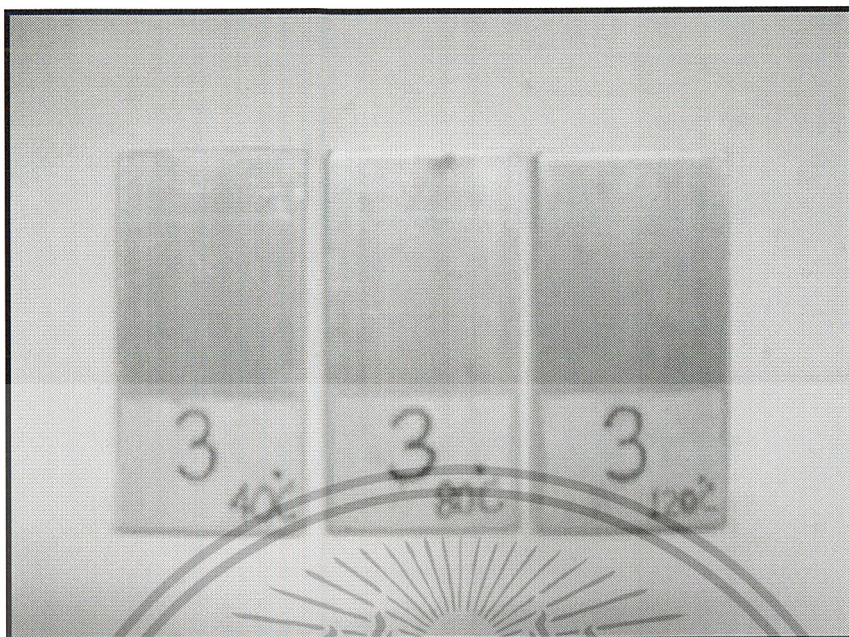


รูปที่ 5.4 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันจันรูปที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C

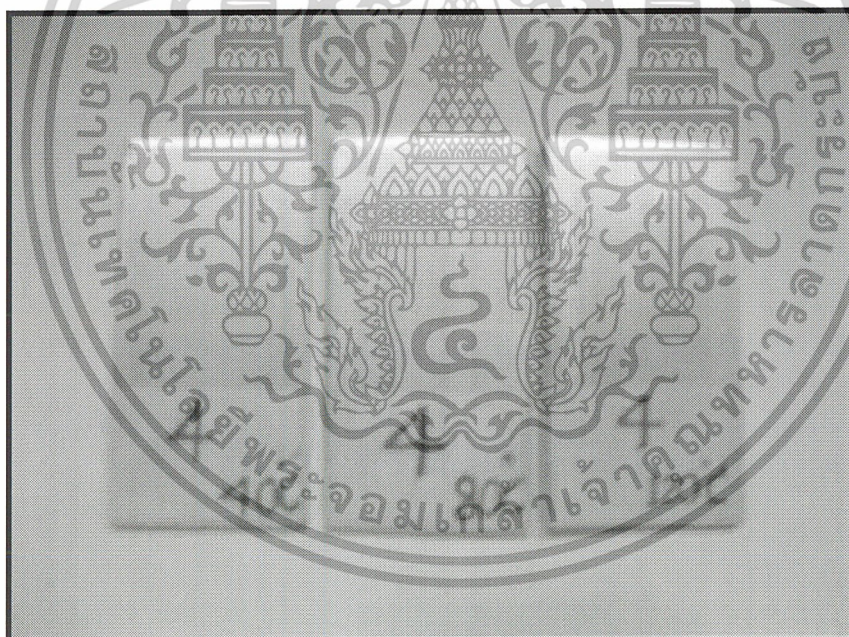


รูปที่ 5.5 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แผ่นอนุมิเนียมที่เกิดการกักคร่อนในน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C



รูปที่ 5.7 แผ่นอนุมิเนียมที่เกิดการกักคร่อนในน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

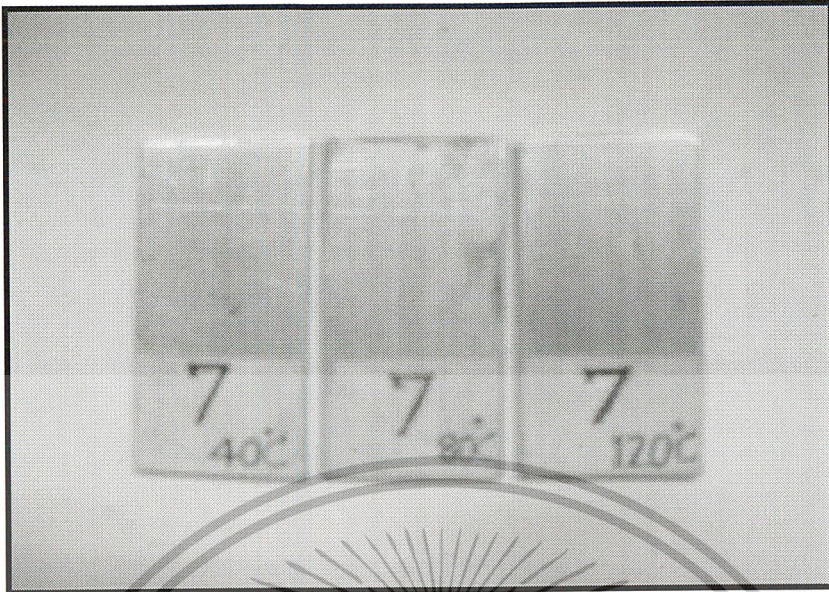


รูปที่ 5.8 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันจันทน์รูปผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C



รูปที่ 5.9 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันมะพร้าวผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันปาล์มผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C



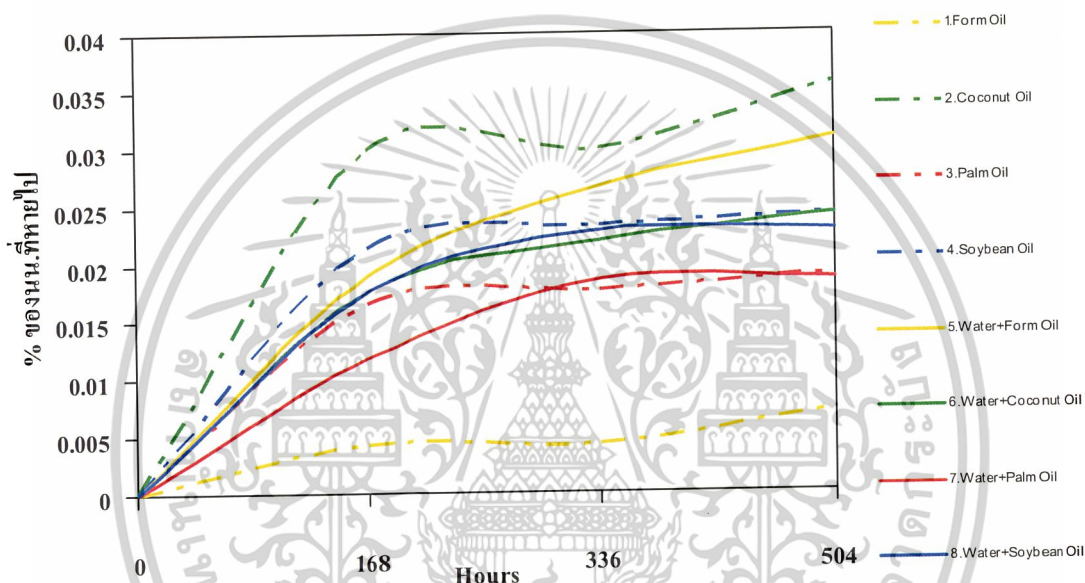
รูปที่ 5.11 แผ่นอลูมิเนียมที่เกิดการกัดกร่อนในน้ำมันถั่วเหลืองผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 ° C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 ผลการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล

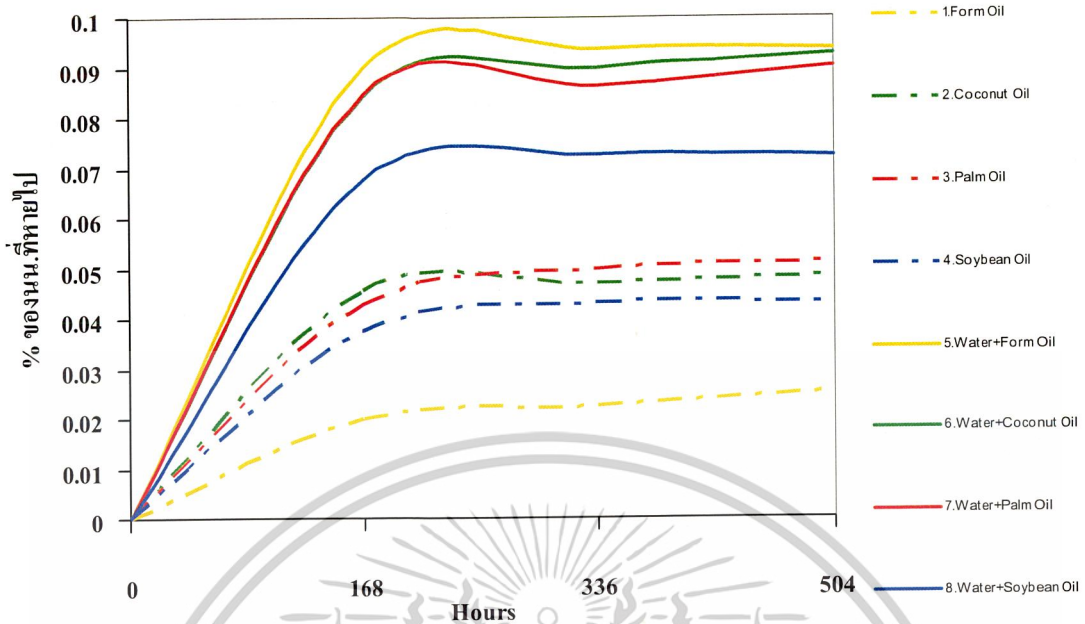
สำหรับการทดลองการกักตัวของแผ่นอลูมิเนียม ตั้งแต่เริ่มต้น ได้มีการสร้างผู้ควบคุมอุณหภูมิเพื่อใช้ในการทดสอบ แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้ในการทดสอบก็เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 1384 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ในแต่ละส่วนก็มีค่าแตกต่างกันออกไป เนื่องมาจากค่าตัวแปรและปัจจัยต่างๆดังนี้

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง
2. ชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง
3. ปริมาณน้ำที่ใส่ลงไปผสมกับน้ำมัน

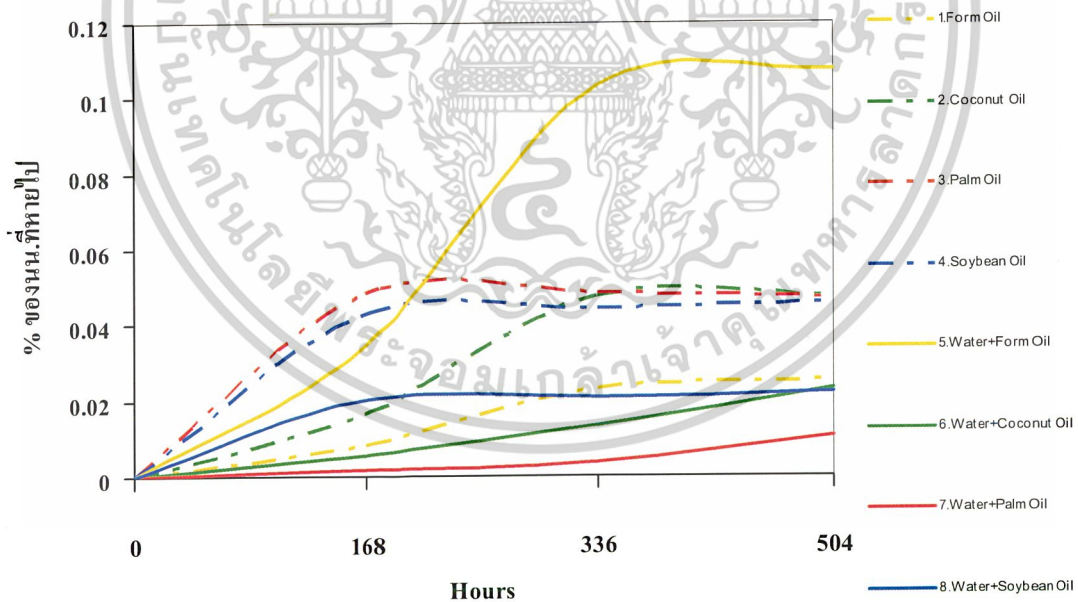


รูปที่ 5.12 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักตัวของน้ำมันชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



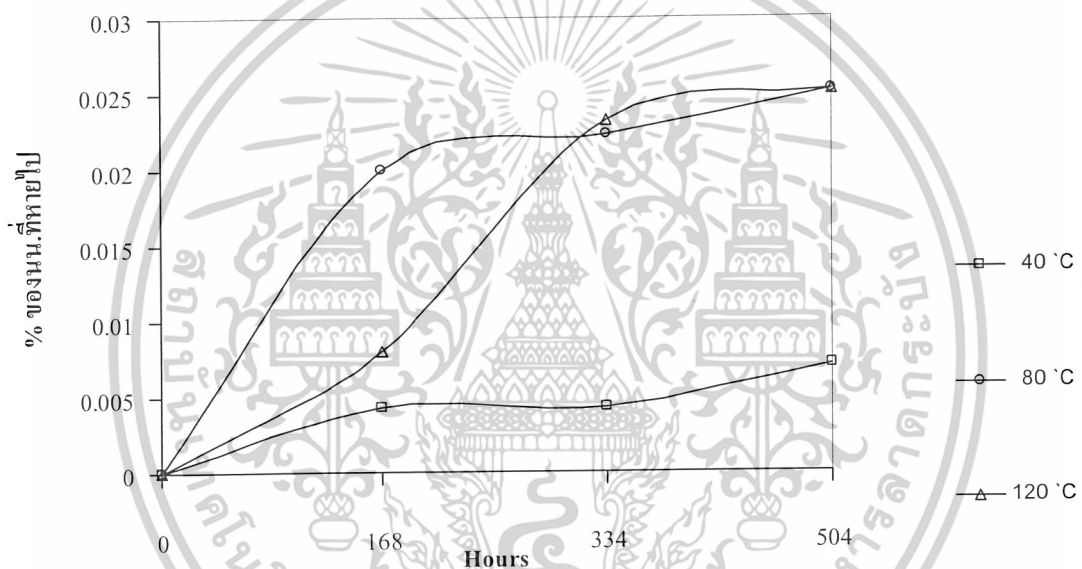
รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักคร่อนของน้ำมันชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 120 °C

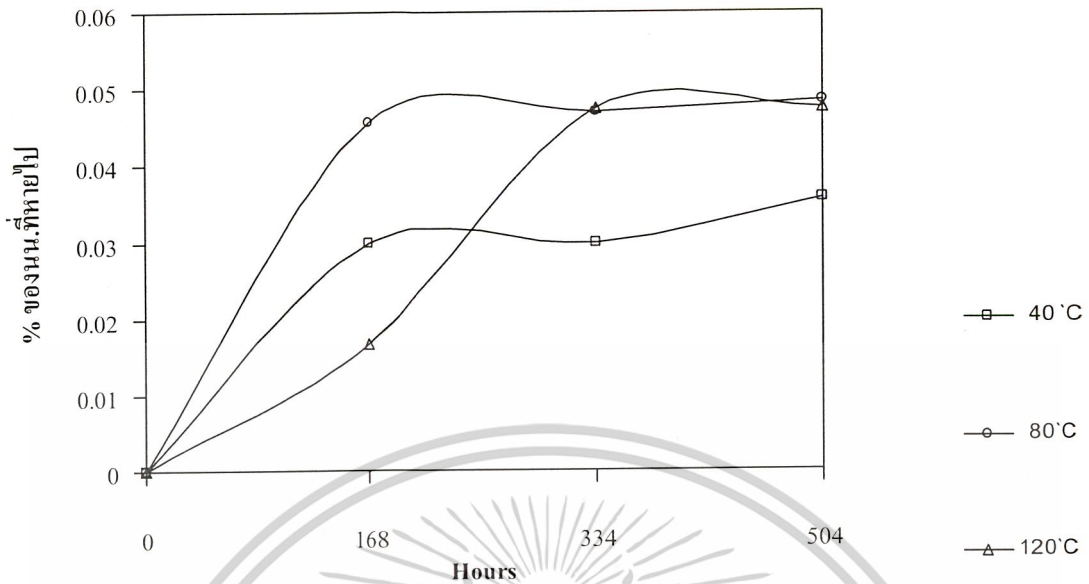
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 5.1-5.3 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกักตัวของแผ่นอลูมิเนียม ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณการกักตัวก็จะมากตามเช่นกัน สำหรับชุดการทดลองที่ผสมน้ำจะมีปริมาณกักตัวสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้ผสมน้ำ เสมือนเป็นตัวเร่งการกักตัว ส่วนชุดการทดลองที่ไม่ผสมน้ำ ชุดทดลองน้ำมันมะพร้าวปริมาณ 200 CC. จะเกิดการกักตัวมากที่สุดในทุกๆอุณหภูมิ ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาถึงชุดการทดลองที่ผสมน้ำพบว่า ชุดทดลองน้ำมันขึ้นรูปผสมน้ำอย่างละ 100 CC. จะเกิดการกักตัวมากที่สุดในทุกๆอุณหภูมิเช่นเดียวกัน .

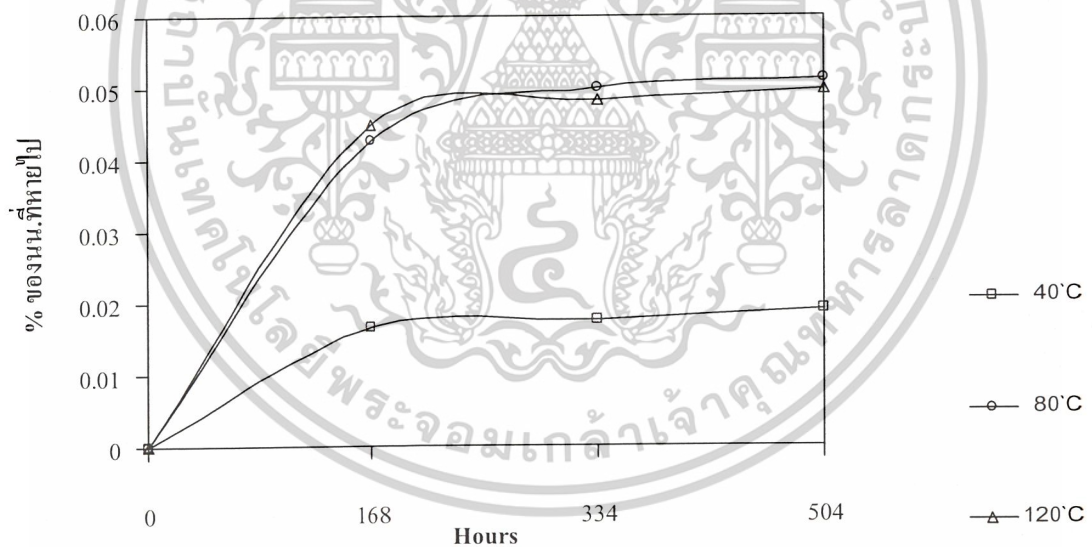


รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักตัวของน้ำมันขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

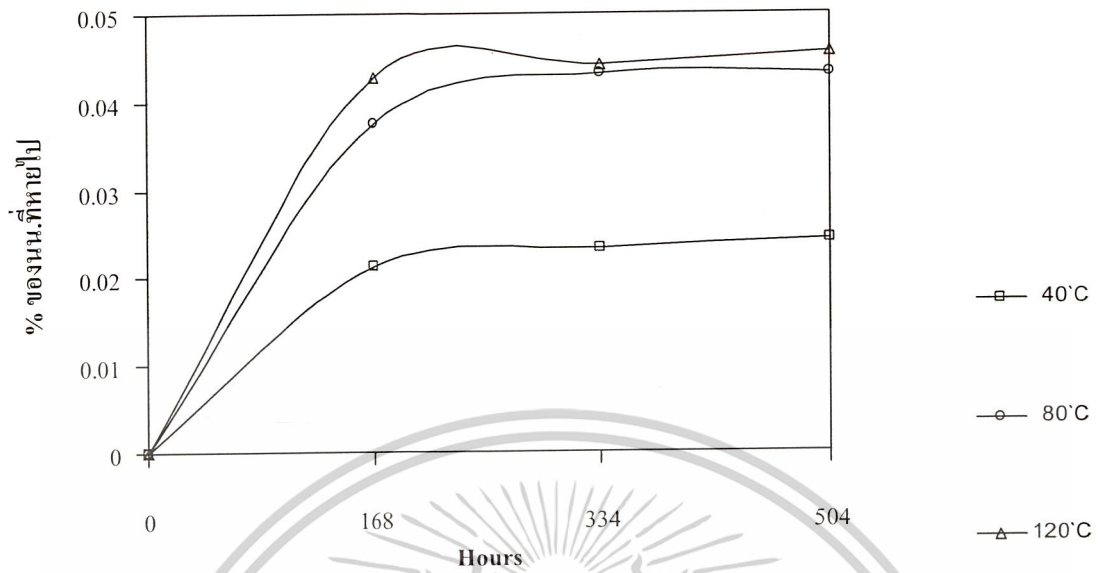


รูปที่ 5.16 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักกร่อนของน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C

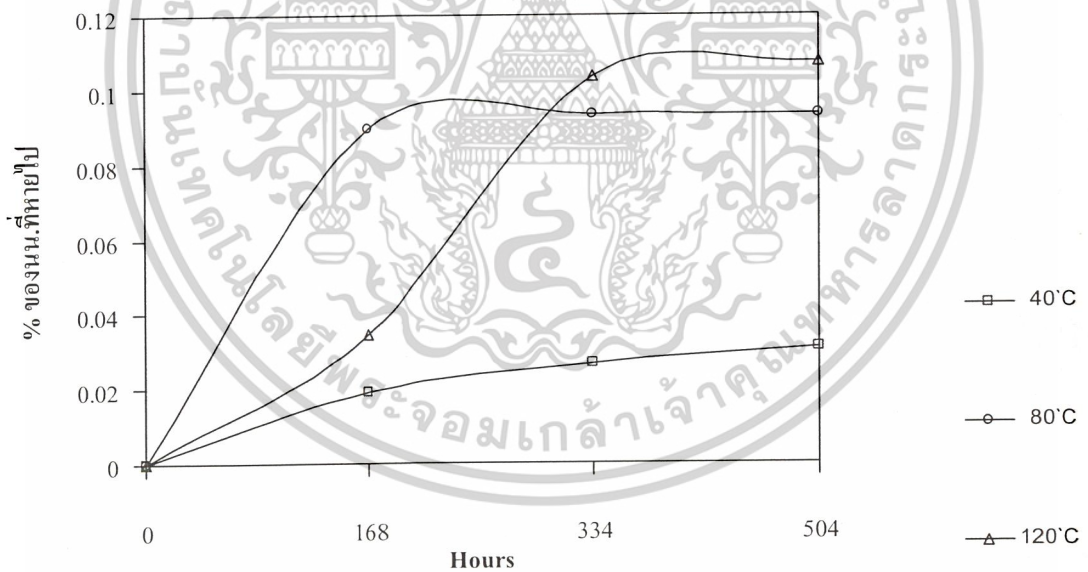


รูปที่ 5.17 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักกร่อนของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

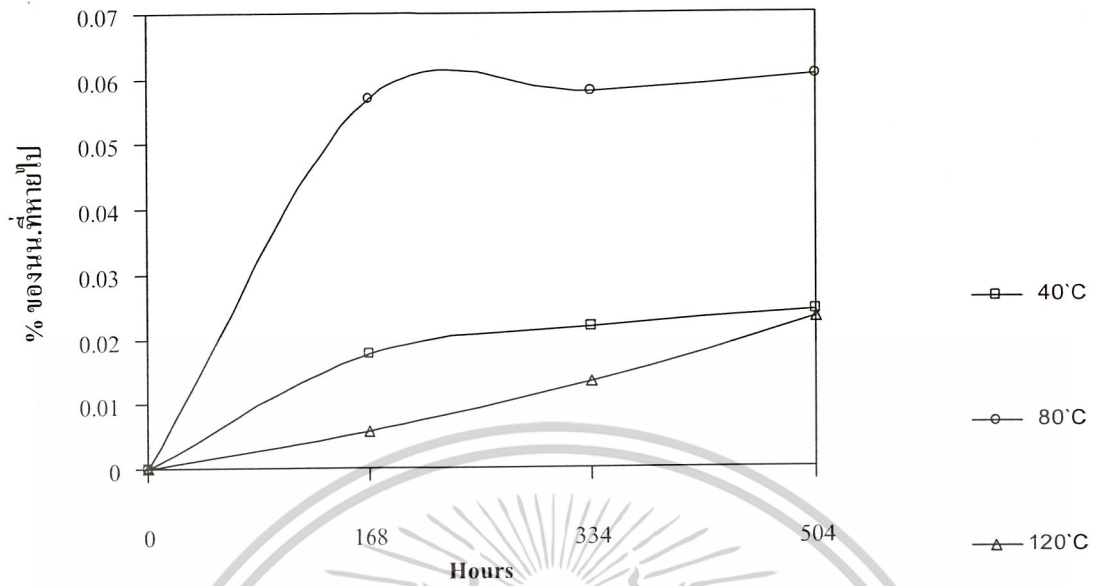


รูปที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักครอนของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C

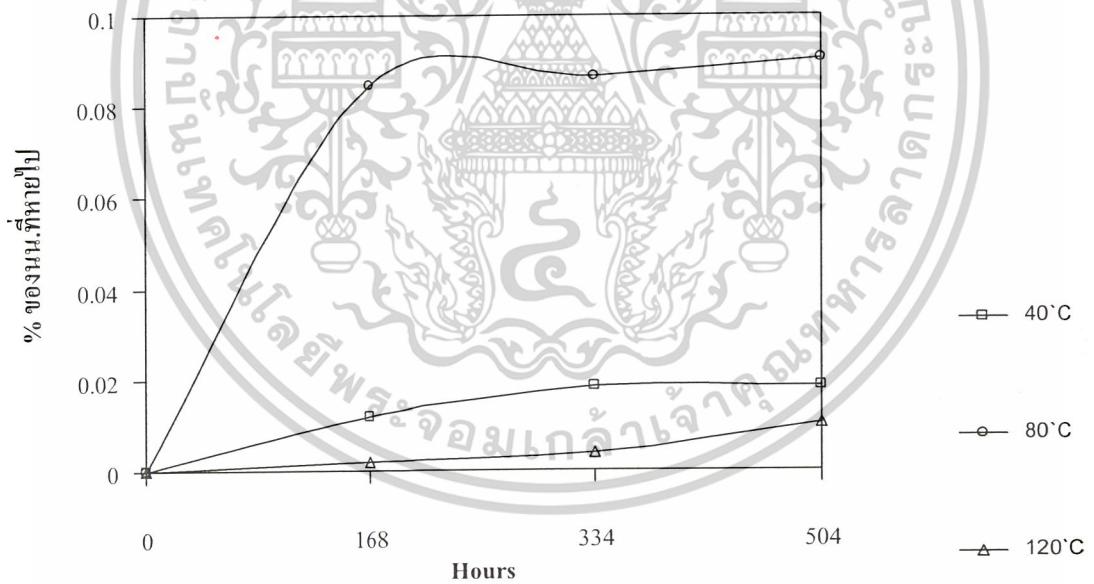


รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักครอนของน้ำมันจันรูปผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

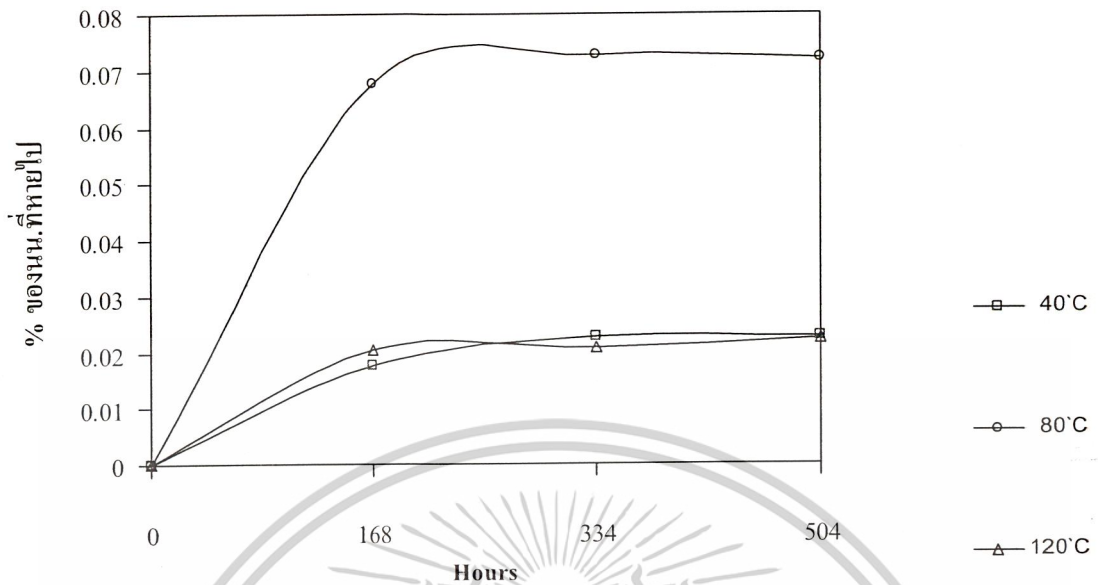


รูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักความร้อนของน้ำมันมะพร้าวผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C



รูปที่ 5.21 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักความร้อนของน้ำมันปาล์มผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

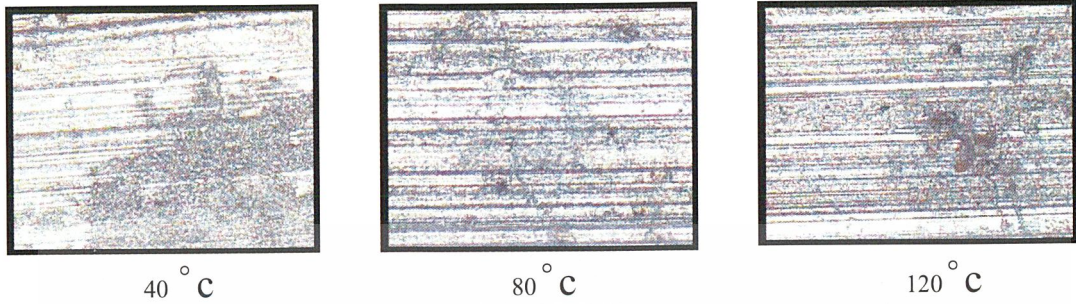


รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบผลการกักกร่อนของน้ำมันถั่วเหลืองผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 °C

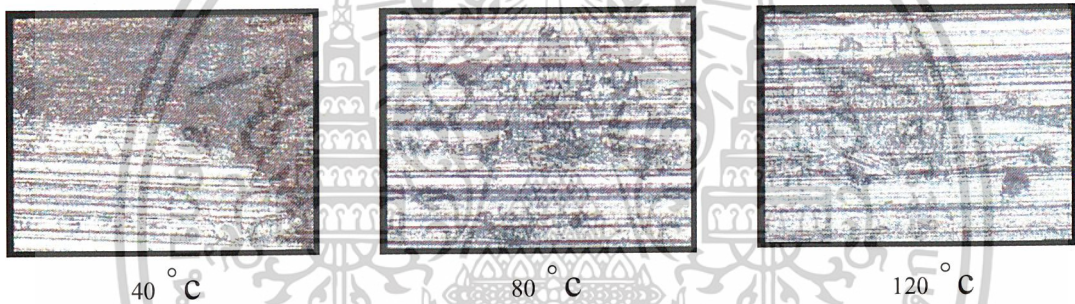
จากรูปที่ 5.4-5.11 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการกักกร่อนของน้ำมันแต่ละชนิดแปรผันที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส พบว่าชุดทดลองที่ไม่ผสมน้ำที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสจะเกิดการกักกร่อนมากที่สุดสำหรับทุกชนิดน้ำมัน แต่สำหรับชุดทดลองที่ผสมน้ำพบว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจะเกิดการกักกร่อนมากที่สุดสำหรับทุกชนิดน้ำมัน ยกเว้นชุดทดลองของน้ำมันขึ้นรูปผสมน้ำที่ 120 องศาเซลเซียสจะเกิดการกักกร่อนมากที่สุด

5.1.2 ผลการตรวจสอบพื้นผิวการกักกร่อนด้วยกล้องจุลทรรศน์

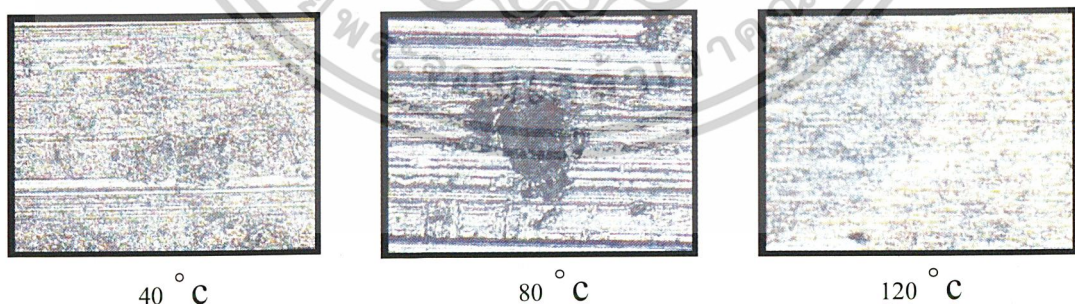
ขั้นตอนการใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูแผ่นอลูมิเนียมด้วยกำลังขยาย 5X เป็นการตรวจสอบบริเวณพื้นผิวที่ถูกกักกร่อน เปรียบเทียบกันระหว่างน้ำมันชนิดต่างๆ เพื่อตรวจสอบหาชนิดของน้ำมันที่เกิดการกักกร่อนน้อยที่สุด ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.23 แสดงพื้นผิวการกักตัวของน้ำมันขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส

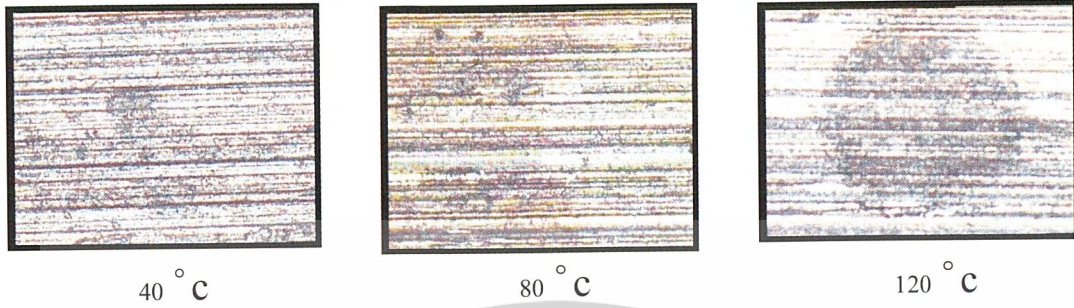


รูปที่ 5.24 แสดงพื้นผิวการกักตัวของน้ำมันมะพร้าวที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส

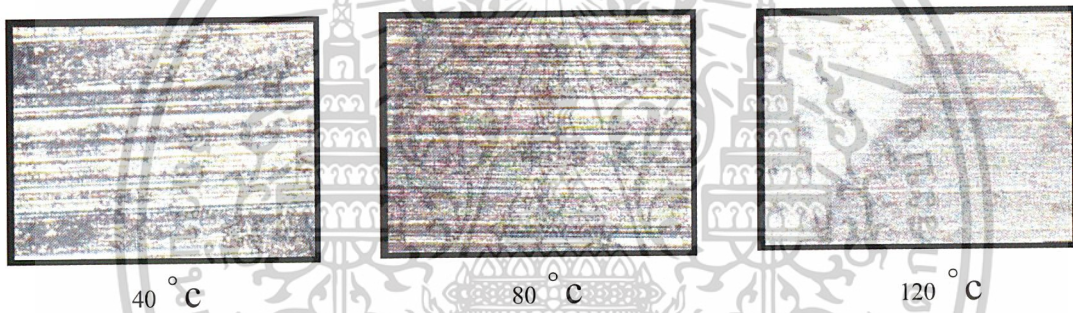


รูปที่ 5.25 แสดงพื้นผิวการกักตัวของน้ำมันปาล์มที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส

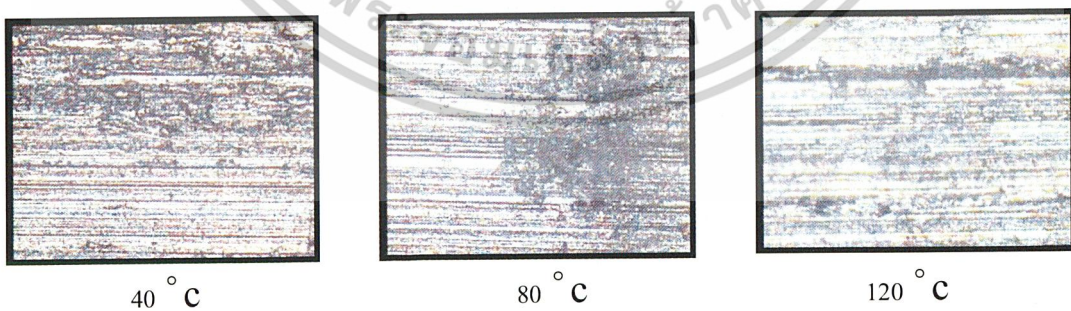
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 แสดงพื้นผิวการกักตัวของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส

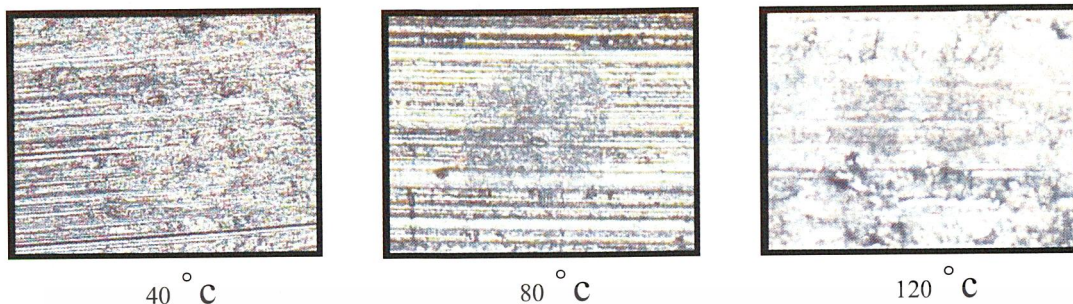


รูปที่ 5.27 แสดงพื้นผิวการกักตัวของน้ำมันขึ้นรูปผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส

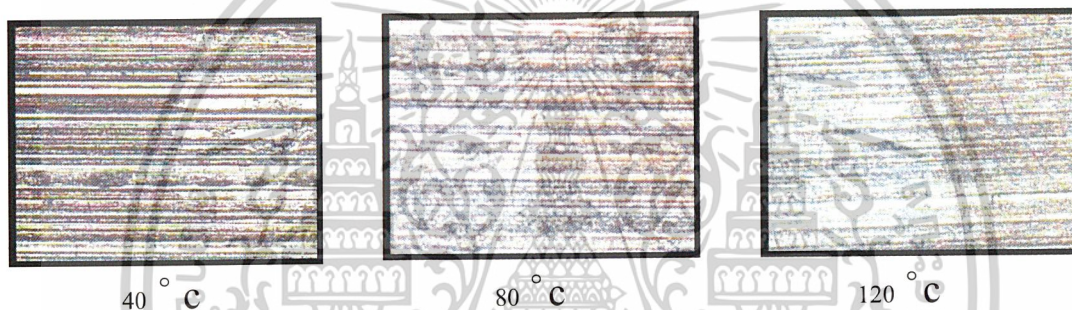


รูปที่ 5.28 แสดงพื้นผิวการกักตัวของน้ำมันมะพร้าวผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.29 แสดงพื้นผิวการกักร้อนของน้ำมันปาล์มผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.30 แสดงพื้นผิวการกักร้อนของน้ำมันถั่วเหลืองผสมน้ำที่อุณหภูมิ 40,80,120 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.12-5.19 พฤติกรรมการกักร้อนบนพื้นผิวอลูมิเนียม พบว่าในบรรดาน้ำมันพืชทั้ง 3 ชนิด น้ำมันมะพร้าวจะเกิดการกักร้อนมากที่สุด ส่วนน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองจะเกิดการกักร้อนใกล้เคียงกัน

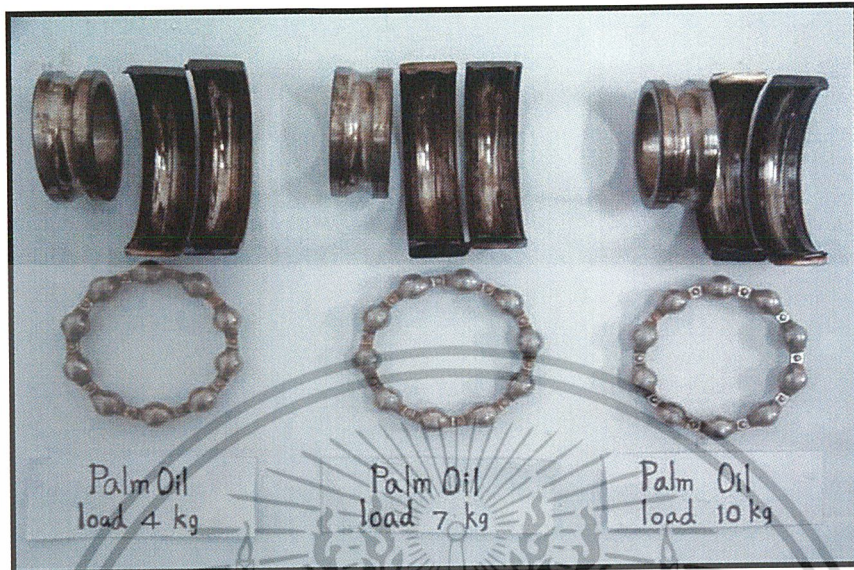
5.2 ผลการทดลองของการทดสอบการเกิดสนิมในดัลบูล์ป็น

จากการทดลองศึกษาพฤติกรรมการเกิดสนิมในดัลบูล์ป็น ตามมาตรฐาน ASTM D 1743 พบว่ามีปัจจัยและตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อผลการทดลองดังนี้

1. ปริมาณภาระที่รับระหว่างการทดลอง
2. ชนิดของน้ำมันที่ใช้ในการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบพฤติกรรมการเกิดสนิมในดัลบูล์ป็น จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 5X มีดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

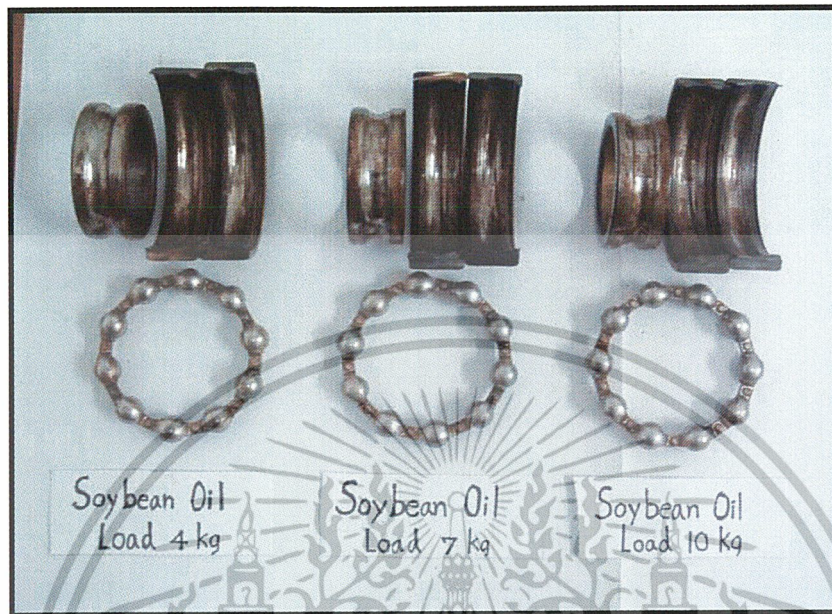


รูปที่ 5.31 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันปาล์ม

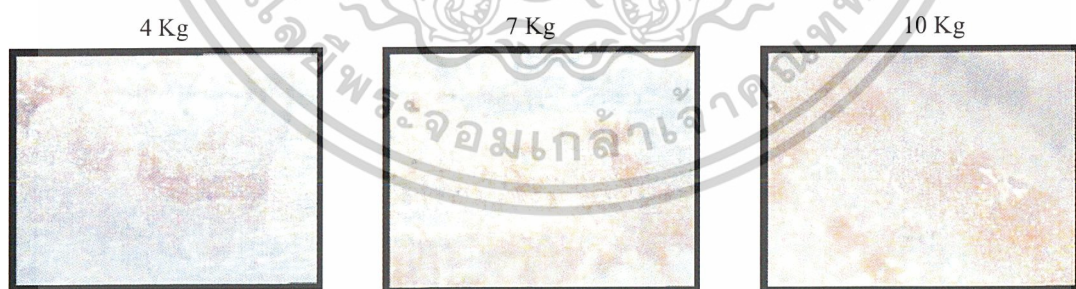


รูปที่ 5.32 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันปาล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

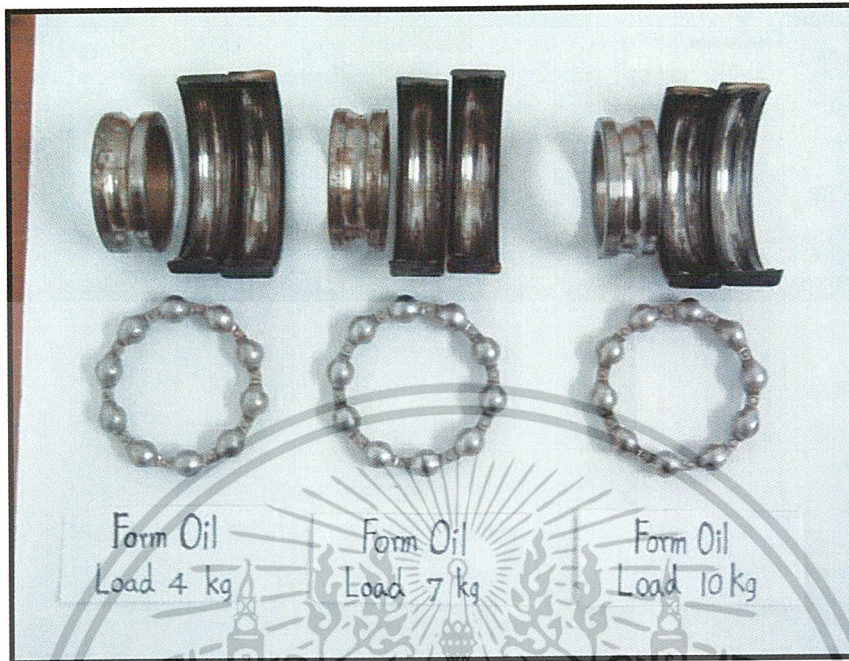


รูปที่ 5.33 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันถั่วเหลือง



รูปที่ 5.34 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันถั่วเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.35 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันขึ้นรูป



4 Kg



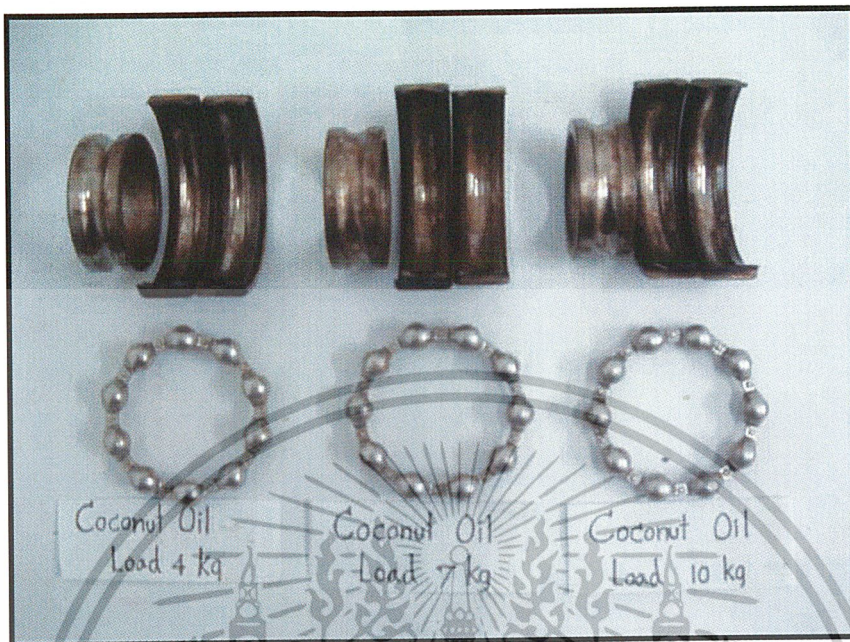
7 Kg



10 Kg

รูปที่ 5.36 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.37 แสดงตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันมะพร้าว



4 Kg



7 Kg



10 Kg

รูปที่ 5.38 แสดงผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ของตลับลูกปืนที่รับภาระ 4,7,10 Kg ในน้ำมันมะพร้าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.20-5.27 ปริมาณการเกิดสนิม ทั้งจากสังเกตด้วยตาเปล่าและส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า ตลับลูกปืนที่มีน้ำมันมะพร้าวหล่อลื่นและรับภาระ 10 กิโลกรัม จะเกิดสนิมมากที่สุด ส่วนที่รับภาระ 4,7 กิโลกรัม ของน้ำมันมะพร้าวก็เกิดสนิมมากกว่าน้ำมันชนิดอื่น เมื่อเปรียบเทียบในระดับการรับภาระเดียวกัน ส่วนผลการเกิดสนิมในตลับลูกปืนของน้ำมันพืชที่เหลืออีก 2 ชนิด คือน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองพบว่า มีปริมาณการเกิดสนิมใกล้เคียงกัน ที่ระดับการรับภาระเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการกัดกร่อนของแผ่นอลูมิเนียมและการเกิดสนิมในตลับลูกปืน ซึ่งลักษณะของงานวิจัยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยที่มียองศ์ประกอบต่างๆที่ทำให้ผลการทดลองที่ได้แตกต่างกันออกไป ทั้งในการทดลองการกัดกร่อนของอลูมิเนียมและการเกิดสนิมในตลับลูกปืน ซึ่งสามารถแยกสรุปได้ดังนี้

6.1.1 บทสรุปของการทดลองการกัดกร่อนของแผ่นอลูมิเนียม

จากการทดลองตลอดระยะเวลา 9 สัปดาห์ สามารถสรุปพฤติกรรมการกัดกร่อนของอลูมิเนียมได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ผสมน้ำกับชุดการทดลองที่ไม่ได้ผสมน้ำ พบว่าน้ำมีผลต่อการเร่งปริมาณการกัดกร่อน เนื่องจากชุดการทดลองทั้งหมดที่ผสมน้ำมีปริมาณการกัดกร่อนสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้ผสมน้ำ ที่ระยะเวลาการทดลองเดียวกัน

2. จากผลการทดลอง พบว่าน้ำมันมะพร้าวมีปริมาณการกัดกร่อนแผ่นอลูมิเนียมสูงกว่าน้ำมันชนิดอื่นเนื่องจากมีฤทธิ์เป็นด่างมากที่สุด ส่วนปริมาณการกัดกร่อนของแผ่นอลูมิเนียมในน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันปาล์มจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้แทนน้ำมันสังเคราะห์ได้มากกว่าน้ำมันมะพร้าว

3. จากผลการทดลอง พบว่า ที่อุณหภูมิสูงปริมาณการกัดกร่อนจะมีมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำสำหรับน้ำมันทุกชนิด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปริมาณการกัดกร่อนจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

6.1.2 บทสรุปของการทดลองการเกิดสนิมในตลับลูกปืน

จากการทดลองตามมาตรฐาน ASTM D1743 สามารถสรุปพฤติกรรมการเกิดสนิมได้ดังต่อไปนี้

1. เมื่อพิจารณาถึงผลการทดลองของน้ำมันทุกชนิด ที่ระดับการรับภาระเดียวกัน พบว่าน้ำมันมะพร้าว มีปริมาณการเกิดสนิมสูงที่สุด ส่วนน้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองมีปริมาณการเกิดสนิมใกล้เคียงกัน ดังนั้น น้ำมันปาล์มและน้ำมันถั่วเหลืองจึงมีความเหมาะสมในการหล่อลื่นตลับลูกปืน ได้ดีกว่าน้ำมันมะพร้าว

2. จากการศึกษาพบว่าปริมาณการเกิดสนิมจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำมัน คือน้ำมันที่มีค่าความเป็นกรดหรือด่างสูง จะมีปริมาณการเกิดสนิมสูงตามด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณการเกิดสนิมจะเพิ่มตามปริมาณการะที่รับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปริมาณการเกิดสนิมจะแปรผันตรงกับปริมาณการะที่รับ

6.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของผลการทดลองการกัดกร่อน บางตัวที่ไม่เป็นไปตามที่ น่าจะเป็น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูงเกินกว่าจุดเดือดของน้ำทำให้น้ำกลายเป็นไอ ผลการทดลองจึงคลาดเคลื่อน ประกอบกับจุดที่วางชุดทดลองในตู้ควบคุมอุณหภูมิได้รับอุณหภูมิไม่เท่ากัน ทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้เช่นกัน ส่วนผลการทดลองในการทดลองการเกิดสนิมในตลับลูกปืน มีผลการทดลองเป็นไปตามที่ได้คาดคะเนไว้ แต่ก็ยังมีจุดที่ต้องปรับปรุงในบางจุดของชุดทดสอบ ดังนั้นปริิญญานิพนธ์นี้ จึงเป็นพื้นฐานในการศึกษาการกัดกร่อนอลูมิเนียมและการเกิดสนิมในตลับลูกปืนต่อไป



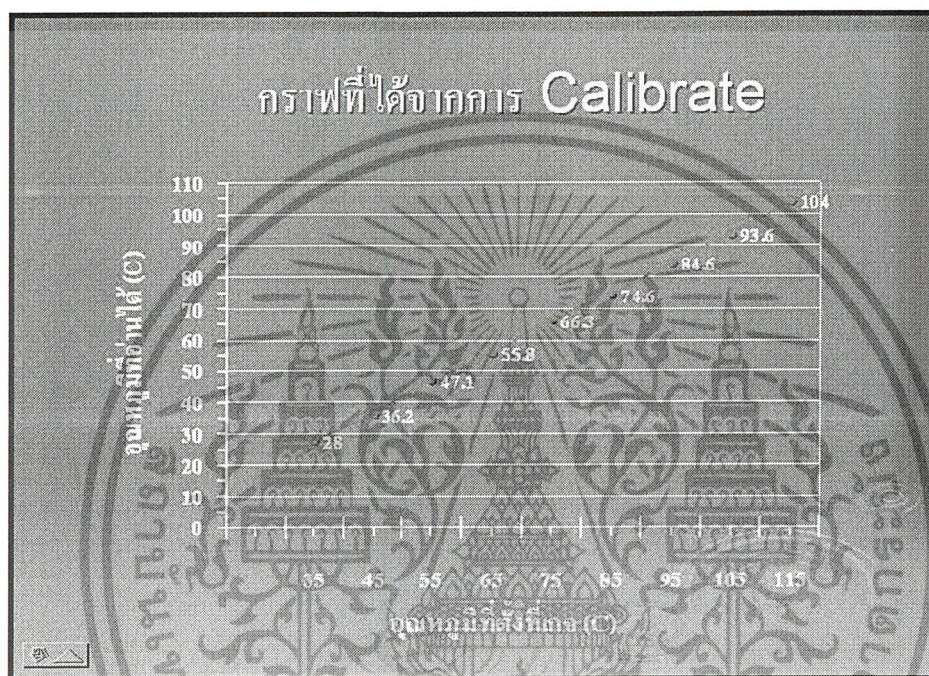
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กราฟแสดงการ Calibrate



รูปที่ 1 แสดงการ Calibration Curve ของ Thermocouple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Chapman Alan J. : Heat Transfer, Macmilan, New York, 1984.
- [2] .Holman, J.P : Heat Transfer ,McGraw-Hill, New York,1989
- [3] การถ่ายเทความร้อน(Heat Transfer): รศ.ดร พงษ์เจต พรหมวงศ์
- [4] ASTM Standards(WWW.ASTM.ORG)
- [5] Ranny,M.W.,1973.Lubricant Additives. Noyes Data Co:London
- [6] Hashimoto H.,Mongkolwongrojn M. 1993 Advanced lubrication theory. KMITL Bangkok



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้