

การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นแบบไดนามิกในกรณีเสื่อมสภาพและ  
ปนเปื้อนของอนุภาคโลหะด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

DEGRADATION AND METAL PARTICLES CONTAMINATION ANALYSIS OF  
THE OIL LUBRICANT USING HALL EFFECT SENSOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-060-031

การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นแบบไดนามิกในกรณีเสื่อมสภาพและ  
ปนเปื้อนของอนุภาคโลหะด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์

DEGRADATION AND METAL PARTICLES CONTAMINATION ANALYSIS OF  
THE OIL LUBRICANT USING HALL EFFECT SENSOR



อิทธิ อินทวัฏกุล  
ITTI INTHAWATKUL

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2562  
KMITL-2019-EN-M-060-031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEGRADATION AND METAL PARTICLES CONTAMINATION ANALYSIS OF  
THE OIL LUBRICANT USING HALL EFFECT SENSOR



ITTI INTHAWATKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2019

KMITL-2019-EN-M-060-031

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

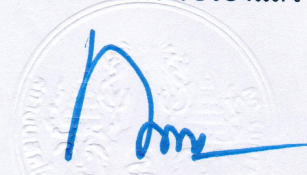
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นแบบไดนามิกในกรณีเสื่อมสภาพและปนเปื้อนของอนุภาคโลหะด้วยฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์  
Thesis Title Degradation and Metal Particles Contamination Analysis of the Oil Lubricant Using Hall Effect Sensor  
นักศึกษา นายอิทธิ อินทวัฒน์กุล  
รหัสประจำตัว 58601081  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตน์นะ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2019-EN-M-060-031

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กิตติ	ศิริเศรษฐ์	
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.ดร.สุพรรณ	กุลพานิชย์	
ผศ.ดร.นรินทร์	ธรรมารักษ์วัฒน์	
รศ.ดร.วิศรุต	ศรีรัตน์นะ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 เวลา 11.00-13.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 1 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คนปด คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้  
วันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันหล่อลื่นแบบไดนามิกในกรณี เสื่อมสภาพและปนเปื้อนของอนุภาคโลหะด้วยฮอลล์ เอฟเฟคเซนเซอร์
นักศึกษา	นายอิทธิ อินทวัฒน์กุล
รหัสประจำตัว	58601081
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะมุ่งเน้นการออกแบบระบบตรวจวัดประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่  
ประยุกต์ร่วมกับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ โดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมา  
จากขดลวดโซลินอยด์ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่นภายใต้  
เงื่อนไขของอุณหภูมิ และฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าดังกล่าว สำหรับการศึกษ  
ของวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับจ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ โดยทดลองกับ  
กลุ่มตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นทั้งหมด 3 เกรด ได้แก่ ISO 32, ISO 46 และ ISO 68 ทั้งนี้น้ำมันแต่ละ  
เกรดจะแบ่งเป็นน้ำมันใหม่และน้ำมันที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ในกรณีของขดลวดโซลินอยด์ที่กระตุ้น  
ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง สรุปได้ว่า ที่ปริมาณกระแส 0.9 A นั้นส่งผลให้เอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซน  
เซอร์สามารถแยกความแตกต่างระหว่างน้ำมันที่มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะ  
กันอย่างชัดเจนที่สุด ตลอดจนความร้อนที่เกิดขึ้นบนขดลวดโซลินอยด์นั้นไม่ส่งผลต่อระบบ และใน  
กรณีของขดลวดโซลินอยด์ที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ สรุปได้ว่า ที่ความถี่ 500 Hz นั้นส่งผลให้  
เอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์สามารถแยกความแตกต่างระหว่างน้ำมันที่มีการปนเปื้อนและไม่ม  
ีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะกันอย่างชัดเจนที่สุด และไม่มีความร้อนเกิดขึ้นบนขดลวดโซลินอยด์  
อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรงนั้น ได้ผล  
สรุปว่าเงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับนั้นสามารถแยกความแตกต่างระหว่างน้ำมันที่มีการปนเปื้อนและ  
ไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะได้ดีกว่าเงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 20 % และยังเกิด  
ความร้อนน้อยกว่า 48 %

<b>Thesis</b>	Degradation and Metal Particles Conntamination Analysis of the Oil Lubricant Using Hall Effect Sensor
<b>Student</b>	Mr. Itti Inthawatkul
<b>Student ID.</b>	58601081
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Witsarut Sriratana

## ABSTRACT

The thesis focus on the development of a system to measure the performance of lubricants applied with the Hall Effect Sensor. Based on the principle of electromagnetic fields produced from solenoid coils which will change according to metal particles contaminated with lubricants under temperature conditions. And the Hall Effect Sensor measure to electromagnetic fields. For the study of this thesis, using direct current and alternating current supply to the solenoid coil. By experimenting with all 3 grades of lubricants, including ISO 32, ISO 46 and ISO 68. In the case of DC, at a current of 0.9 A, the output of the Hall Effect Sensor can distinction between the contaminated lubricant and the non- contaminated one. As well as the heat of the solenoid coil does not affect the system. In the case of AC, at a frequency of 500 Hz the output of the Hall Effect Sensor can distinction between the contaminated lubricant and the non- contaminated one. And there is no heat at the solenoid coil. However, when comparing the results between the AC and DC current. Concluded that the conditions of the alternating current can separate the difference between the contaminated lubricant and the non- contaminated one, better than the conditions of direct current of about 20 %. And heat is less than 48 %

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้นมาจาก ความเมตตากรุณาที่ได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ และ ผศ.สุธรรม สัทธรรมสกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลการทำปริญญาบัตรที่ได้ให้คำปรึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์และดูแลควบคุมการทำงานอย่างใกล้ชิด ผู้จัดทำมีความรู้สึกซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและคำสั่งสอนเพื่อนำมาจัดทำปริญญาบัตรนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ หลักสูตรวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่ในการศึกษาวิจัย และสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำปริญญาบัตร

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ พร้อมกำลังใจที่มีให้กันตลอดการเรียนและการจัดทำปริญญาบัตรที่ผ่านมา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบคุณ บิดาและมารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นแรงบันดาลใจในการศึกษาค้นคว้ามาซึ่งการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณความดีที่พึงมีจากการจัดทำปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแต่ บิดามารดา รวมทั้งคณาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน

อิทธิ อินทวัฒน์กุล

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วิทยาการเซนเซอร์แม่เหล็ก.....	4
2.1.1 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มระดับต่ำ.....	5
2.1.2 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กโลก.....	5
2.1.3 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กในระดับที่เกิด.....	5
จากการไปอัสเกรสแล	
2.2 อุปกรณ์ฮอลล์.....	6
2.2.1 ปรากฎการณ์กัลป์วาโนแมกเนติก.....	6
2.2.2 ปรากฎการณ์ฮอลล์.....	7
2.2.3 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์.....	8
2.2.4 มุมฮอลล์.....	8
2.3 การประยุกต์กฎของแอมแปร์ร่วมกับโซลินอยด์.....	9
2.4 การประยุกต์อุปกรณ์ฮอลล์ร่วมกับโซลินอยด์.....	12
2.4.1 เจ็อนโซตัวแปรที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำ.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	14
2.4.3 ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ฮอลล์.....	14
2.4.4 จุดอิมิตัวของอุปกรณ์ฮอลล์.....	15
2.5 น้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม.....	15
2.5.1 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น.....	16
2.5.1.1 แบ่งตามชนิดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	16
2.5.1.2 แบ่งตามชนิดของความหนืด.....	16
2.5.2 คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่น.....	17
2.5.2.1 จุดไหลเท.....	17
2.5.2.2 ความหนืด.....	17
2.5.2.3 ดัชนีความหนืด.....	17
2.5.2.4 จุดวาบไฟ.....	17
2.5.3 คุณสมบัติความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ.....	18
2.5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการไหล.....	18
2.5.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิ.....	18
2.5.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสื่อมสภาพของน้ำมันและ.....	19
เอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์	
2.5.4 มาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่น.....	19
2.5.4.1 ISO (International Organization for Standardization).....	20
2.5.4.2 SAE (The American Society of Automotive Engineers).....	21
2.5.4.3 AGMA (The American Gear Manufacturers Association).....	22
2.5.4.4 API (American Petroleum Institute).....	23
2.5.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	24
2.5.5.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	24
2.5.5.2 สารเพิ่มคุณภาพถูกใช้หมดไป.....	24
2.5.5.3 สิ่งปนเปื้อนจากภายในเครื่องจักรและระบบ.....	24
2.5.5.4 สารปนเปื้อนจากภายนอกเข้าไปผสมกับน้ำมันหล่อลื่น.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบระบบการวัด และวิธีการดำเนินการ.....	26
3.1 ระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	26
3.1.1 ถังบรรจุน้ำมันที่ติดตั้งชุดควบคุมความร้อน.....	27
3.1.2 อุปกรณ์ฮอลล์.....	30
3.1.3 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล.....	30
3.1.4 ชุดลดโซลินอยด์.....	31
3.1.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล.....	31
3.1.6 วงจรฮอลล์เอฟเฟค.....	32
3.1.7 อนุภาคโลหะอ้างอิง.....	33
3.1.8 ตัวอย่างน้ำมันสำหรับการทดลอง.....	35
3.1.8.1 น้ำมันไฮดรอลิกเบอร์ 32.....	35
3.1.8.2 น้ำมันไฮดรอลิกเบอร์ 46.....	35
3.1.8.3 น้ำมันไฮดรอลิกเบอร์ 68.....	36
3.2 วิธีการดำเนินการระบบตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	36
3.2.1 แผนผังการทำงานของระบบตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	36
3.2.2 แผนผังการดำเนินการทดลอง.....	37
3.2.2.1 แผนการดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง.....	37
3.2.2.2 แผนการดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง.....	39
4.1 ผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง.....	40
4.1.1 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	40
4.1.2 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	46
4.1.3 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	52
4.1.4 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	58
4.1.5 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์.....	64
4.1.6 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์.....	70
4.2 ผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ.....	76

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์.....	76
ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ	
4.2.2 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	79
ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ	
4.2.3 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	83
ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ	
4.2.4 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	86
ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ	
4.2.5 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	90
ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ	
4.2.6 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	93
ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ	
4.3 ผลการทดลองของน้ำมันเครื่องภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ.....	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	99
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	99
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย.....	100
เอกสารอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก. การเขียนโปรแกรม ARDUINO สำหรับการเก็บผลการทดลอง.....	104
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	115

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงระยะการตรวจวัดของเซนเซอร์ประเภทต่างๆ.....	4
2.2 แสดงมาตรฐานของเกรดความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นในมาตรฐาน ISO VG.....	20
2.3 แสดงมาตรฐานของเกรดความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นในมาตรฐาน SAE J300.....	22
2.4 แสดงมาตรฐานของเกรดความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นในมาตรฐาน AGMA.....	22
2.5 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานของความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นมาตรฐานต่างๆ.....	23
4.1 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	40
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A	
4.2 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	41
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A	
4.3 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	42
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A	
4.4 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	43
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A	
4.5 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	44
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A	
4.6 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	45
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A	
4.7 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	46
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A	
4.8 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	47
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A	
4.9 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	48
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A	
4.10 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	49
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A	
4.11 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	50
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	51
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A	
4.13 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	52
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A	
4.14 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	53
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A	
4.15 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	54
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A	
4.16 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	55
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A	
4.17 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	56
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A	
4.18 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	57
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A	
4.19 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	58
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A	
4.20 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	59
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A	
4.21 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	60
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A	
4.22 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	61
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A	
4.23 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	62
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A	
4.24 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	63
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A	
4.25 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	64
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.26 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	65
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A	
4.27 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	66
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A	
4.28 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	67
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A	
4.29 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	68
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A	
4.30 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	69
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A	
4.31 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	70
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A	
4.32 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	71
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A	
4.33 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	72
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A	
4.34 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	73
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A	
4.35 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	74
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A	
4.36 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	75
เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A	
4.37 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	76
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz	
4.38 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	77
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz	
4.39 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	78
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.40 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	80
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz	
4.41 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	81
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz	
4.42 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32.....	82
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz	
4.43 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	83
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz	
4.44 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	85
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz	
4.45 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	86
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz	
4.46 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	87
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz	
4.47 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	88
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz	
4.48 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46.....	89
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz	
4.49 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	91
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz	
4.50 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	92
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz	
4.51 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	93
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz	
4.52 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	94
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz	
4.53 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	95
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz	

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.54 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68.....	96
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz	
4.55 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันเครื่องที่ผ่านการใช้งานจริง.....	98
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 5500 Hz	



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์.....	7
2.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็ก.....	8
2.3 แสดงทิศทางการเกิดมุมฮอลล์.....	9
2.4 แสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กรอบๆเส้นลวดตัวนำ.....	10
2.5 แสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กในเส้นลวดตัวนำ.....	11
2.6 แสดงภาพตัดขวางของโซลินอยด์.....	12
2.7 การเหนี่ยวนำของโซลินอยด์ที่กระทำต่อแกนเฟอร์ไรต์.....	13
2.8 แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	15
2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอนุภาคโลหะและเวลาการเสื่อมสภาพของน้ำมัน.....	15
2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราการไหล.....	18
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอุณหภูมิ.....	18
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์และการเสื่อมสภาพของน้ำมัน.....	19
2.13 แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดของความหนืดสำหรับน้ำมันแต่ละเกรด.....	21
3.1 ระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	27
3.2 แสดงถังบรรจุน้ำมันที่ติดตั้งฮีตเตอร์ เทอร์โมคัปเปิ้ลและควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	27
3.3 แสดงขนาดของเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	28
3.4 แสดงขนาดของถังบรรจุน้ำมัน.....	28
3.5 แสดงขนาดของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ.....	29
3.6 แสดงขนาดของฮีตเตอร์.....	29
3.7 อุปกรณ์ฮอลล์.....	30
3.8 แสดงการใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล.....	30
3.9 แสดงแท่งเฟอร์ไรต์.....	31
3.10 แสดงขนาดของขดลวดโซลินอยด์.....	31
3.11 แสดงขนาดของอุปกรณ์วัดอัตราการไหล.....	32
3.12 แสดงวงจรฮอลล์เอฟเฟค.....	32
3.13 แสดงอนุภาคโลหะจากมุมมองสายตาปกติ.....	33
3.14 แสดงอนุภาคโลหะที่วิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope.....	34
3.15 แสดงตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 32 สำหรับการทดลอง.....	35

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16 แสดงตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 46 สำหรับการทดลอง.....	35
3.17 แสดงตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 68 สำหรับการทดลอง.....	36
3.18 แสดงแผนผังการทำงานของระบบ.....	36
3.19 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง.....	37
3.20 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ.....	38
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอนุภาคโลหะ.....	39
ในปริมาณที่แตกต่างกัน	
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	40
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 1	
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	41
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 2	
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	42
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 3	
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	43
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 4	
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	44
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 5	
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	45
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 6	
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	46
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 1	
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	47
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 2	
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	48
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 3	
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....	49
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 4	



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....64 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 1	
4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....65 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 2	
4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....66 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 3	
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....67 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 4	
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....68 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 5	
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....69 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 6	
4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....70 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 1	
4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....71 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 2	
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....72 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 3	
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....73 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 4	
4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....74 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 5	
4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....75 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 6	
4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....76 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....77 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz	
4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....78 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz	
4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....79 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz	
4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....80 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz	
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....81 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz	
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....83 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz	
4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....84 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz	
4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....85 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz	
4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....87 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....88 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz	
4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....89 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz	
4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....90 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz	
4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....91 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz	
4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....92 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz	
4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....94 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz	
4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....95 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz	
4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....96 สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz	
4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์.....97 สำหรับน้ำมันเครื่องที่ผ่านการใช้งานจริง	

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและที่มาของงานวิจัย

ด้วยอุตสาหกรรมต่างๆมีความประสงค์ที่จะนำเครื่องจักรมาทำงานแทนมนุษย์เกือบทั้งหมด เนื่องจากความมีเสถียรภาพ การลดต้นทุน หรือการแข่งขันกับเวลา เป็นต้น ฉะนั้นการตรวจสอบประสิทธิภาพของเครื่องจักรอยู่เสมอจึงเป็นเรื่องสำคัญ ตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ต้องตรวจสอบนั้นก็คือน้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Oil) มีหน้าที่สำคัญหลายประการ อาทิเช่น การหล่อลื่นเพื่อป้องกันการเสียดทานระหว่างชิ้นส่วนภายในเครื่องจักร ช่วยในเรื่องของการระบายความร้อนในบริเวณที่น้ำมันหล่อลื่นไหลผ่าน หรือการชะล้างสิ่งสกปรกต่างๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้ เป็นต้น ดังนั้นหากไม่มีการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น อาจสร้างความเสียหายต่อเครื่องจักร เป็นเหตุให้อุตสาหกรรมนั้นๆ ต้องเสียผลประโยชน์ไม่ทางใดก็ทางหนึ่ง

โดยปกติน้ำมันหล่อลื่นจะมีอายุการใช้งานขึ้นอยู่กับผู้ผลิตนั้นๆ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ น้ำมันหล่อลื่นอาจเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่กำหนด จึงมีความจำเป็นในการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งมีการตรวจสอบด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การตรวจสอบความหนืดของของเหลวโดยใช้อัลตราโซนิก (Ultrasonic) [1] การตรวจสอบความเสื่อมสภาพของน้ำมันโดยใช้วิธีการดูดซับของอินฟราเรด (IR-Absorption) [2] การทดสอบความหนืดด้วยวิธีการหมุน [3] การทดสอบคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นด้วยอุณหพลศาสตร์กายภาพ [4] การวัดความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีโพโตอะคูสติก [5] การตรวจสอบน้ำมันที่ปนเปื้อนโดยใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก [6] และการวิเคราะห์ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นโดยใช้สนามแม่เหล็ก [7]

วิทยานิพนธ์นี้จึงสร้างทางเลือกสำหรับการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นขณะที่มีการไหลอยู่ในระบบ (Dynamic) ว่าน้ำมันหล่อลื่นในขณะนั้นมีประสิทธิภาพแค่ไหนและเหมาะสมต่อการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันแล้วหรือไม่ โดยประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องอุปกรณ์ฮอลล์เซ็นเซอร์ที่เอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณฟลักซ์ในน้ำมันหล่อลื่น ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นในเงื่อนไขของความหนืดและปริมาณอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่นได้โดยไม่ต้องอ้างอิงวันหมดอายุตามการบ่งชี้ของผู้ผลิต ส่งผลให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นได้ตลอดเวลาขณะที่มีการดำเนินงานปกติและช่วยให้ผู้ใช้งานมีระบบการจัดการเกี่ยวกับการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษากระบวนการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นจากการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ฮอลล์ร่วมกับขดลวดโซลินอยด์
2. ศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของระบบตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นเพื่อรองรับการตรวจสอบน้ำมันหล่อลื่นหลายๆชนิด
3. ศึกษาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการตรวจสอบอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่น
4. ศึกษาความสัมพันธ์ของความหนืดและอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่น
5. ศึกษาความแตกต่างระหว่างไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับที่ทำการจ่ายให้แก่ระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพน้ำมันหล่อลื่น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาระบบการวัดและการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นบนพื้นฐานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ฮอลล์ เพื่อบ่งบอกถึงสมรรถนะของน้ำมันหล่อลื่นในขณะนั้น ซึ่งจะเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันใหม่และน้ำมันที่ใช้แล้ว โดยเปลี่ยนตัวแปรในเรื่องของกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์และเปลี่ยนอัตราการไหล เพื่อหาจุดที่เหมาะสมของระบบการวัดที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำมันที่มีวางจำหน่ายอยู่ทั่วไป

## 1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ฮอลล์และตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสม
2. ศึกษาพฤติกรรมของโซลินอยด์เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าในปริมาณต่างๆ
3. ศึกษาและออกแบบระบบการวัดประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
4. ศึกษาความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
5. ศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลองจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่แปรผันตามอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่น

## 1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับการประเมินการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นในเวลาที่เหมาะสมโดยไม่ต้องอ้างอิงตามการบ่งชี้วันที่หมดอายุจากผู้ผลิต
2. สามารถควบคุมต้นทุนสำหรับการเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นก่อนเวลาที่กำหนด

## 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

สำหรับเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 5 บทตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษาและประโยชน์ที่จะได้รับสำหรับงานวิจัยนี้
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ เช่น ปรากฏการณ์ฮอลล์ การกำเนิดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น
- บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบระบบการวัดสำหรับตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น รวมถึงขั้นตอนการดำเนินงานต่างๆ
- บทที่ 4 กล่าวถึงผลที่ได้จากการทดลองระบบวัดประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ
- บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยกล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วิทยาการเซนเซอร์แม่เหล็ก (MAGNETIC SENSOR TECHNOLOGIES)

เซนเซอร์แม่เหล็กมีช่วยมนุษย์ในเรื่องของการวิเคราะห์และควบคุมฟังก์ชันมานานหลายทศวรรษ คอมพิวเตอร์มีหน่วยความที่ไม่จำกัดกระทั่งใช้เซนเซอร์แม่เหล็กในหน่วยเก็บข้อมูลที่มีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กและใช้ในแถบบันทึกแม่เหล็ก อากาศยานบินด้วยมาตรฐานด้านความปลอดภัยที่สูงขึ้นเพราะความน่าเชื่อถือของเซนเซอร์แม่เหล็ก โรงงานมีกำลังการผลิตที่สูงขึ้นเนื่องจากเสถียรภาพที่แม่นยำและต้นทุนต่ำของเซนเซอร์แม่เหล็ก ฉะนั้นแล้วเซนเซอร์แม่เหล็กจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในทุกอุตสาหกรรมเนื่องจากความน่าเชื่อถือ ความทนทาน และไม่ต้องบำรุงรักษาเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีเซนเซอร์อื่นๆ อย่างไรก็ตามเซนเซอร์แม่เหล็กจะแบ่งประเภทตามความสามารถในการตรวจวัดค่าสนามแม่เหล็กเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ Low-field sensor (nT), เซ Earth's field sensor ( $\mu\text{T}$ ) และ Bias field sensor (mT) [8] (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 แสดงระยะการตรวจวัดของเซนเซอร์ประเภทต่างๆ

Sensor Technology	Detectable Field Range [Tesla]								
	$10^{-12}$	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	$10^0$	$10^2$	$10^4$
<b>Low-Field Sensors</b>									
Squid	█	█	█	█	█	█	█		
Fiber-Optic Optically Pumped		█	█	█	█	█			
Nuclear Precession Search-Coil		█	█	█	█	█	█	█	█
<b>Earth's Field Sensors</b>									
Anisotropic Resistivity		█	█	█	█	█			
Flux Gate		█	█	█	█	█			
<b>Bias Field Sensors</b>									
Magnetotransistor					█	█	█		
Magnetodiode					█	█	█		
Magneto-Optical Sensor					█	█	█	█	█
Giant Magnetoresistive					█	█	█	█	█
Hall-Effect Sensor					█	█	█	█	
<b>Magnetic Field Sources</b>									
Earth's Magnetic Field				█	█				
Permanent Magnet						█	█		
Electric Current				█	█	█			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มระดับต่ำ (LOW - FIELD SENSORS)

เซนเซอร์ในกลุ่ม Low-field sensor ได้แก่ อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลง ฟลักซ์แม่เหล็กในสิ่งแวดล้อมแบบตัวนำยิ่งยวดหรือ SQUID (Superconducting Quantum Interference Device), อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นใยแก้ว เมื่ออยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก (Fiber-optic Magnetometer), อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่เส้นสเปกตรัมของอะตอมจะแยกตัว เมื่ออยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก (Optically Pumped Magnetometer) และ อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่อาศัยกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ที่เปลี่ยนแปลงฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวด ซึ่งจะเหนี่ยวนำกระแสทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวด (Search Coil Magnetometer)

เซนเซอร์ที่มีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในกลุ่ม Low-field sensor มากที่สุดก็คือ Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) [9] ซึ่งอาศัยการหล่อเย็นวัสดุตัวนำยิ่งยวดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในวัสดุดังกล่าวสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าโดยไม่มีความต้านทาน โดยเซนเซอร์สามารถตอบสนองสนามแม่เหล็กได้ในระดับพิโคเทสลา ( $10^{-12}$  T)

### 2.1.2 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มระดับสนามแม่เหล็กโลก (EARTH'S FIELD SENSORS)

เซนเซอร์ที่ตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่อาศัยค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน (Anisotropic resistance) นั่นก็คือกลุ่มของ Magnetoresistive sensor ซึ่งขนาดสนามแม่เหล็กภายนอกจะเบี่ยงเบนกระแสที่เกิดขึ้นในวัสดุเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพต้านทาน โดยเซนเซอร์สามารถตรวจวัดสนามแม่เหล็กในช่วงพิโคเทสลาถึงเซนติเทสลา ( $10^{-12}$  ถึง  $10^{-2}$  T) [10, 11]

### 2.1.3 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กในระดับที่เกิดจากการไบอัสกระแส (BIAS FIELD SENSORS)

การประยุกต์ส่วนใหญ่ในด้านอุตสาหกรรมนั้นจะใช้แม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก [12] โดยความเข้มของ Bias Magnetic Field Sensors นั้นอยู่ในระดับมิลลิเทสลา (mT) ซึ่งอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับสนามแม่เหล็กกลุ่มนี้ก็คือ แมกนีโตทรานซิสเตอร์ (Magnetotransistor), แมกนีโตไดโอด (Magnetodiode), เซนเซอร์แมกนีโต-ออปติคัล (Magneto-Optical Sensor), เซนเซอร์ไจแอนท์แมกนีโตริซิสทีฟ (Giant Magnetoresistive Sensor) และอุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Effect Sensor)

โดยส่วนใหญ่แล้วในอุตสาหกรรมมีการใช้ขนาดของสนามแม่เหล็กที่ไม่สูงมาก ดังนั้นอุปกรณ์ฮอลล์จึงถูกนำมาประยุกต์แทนที่อุปกรณ์โจแฮนแมกนีโตริซิสทีฟ [13] เนื่องจากอุปกรณ์ฮอลล์นั้นมีการประยุกต์ใช้งานและทำงานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย ส่งผลให้อุปกรณ์ฮอลล์เหมาะสมเป็นอย่างยิ่งสำหรับการตรวจวัดสนามแม่เหล็กที่มีระยะอยู่ในช่วงมิลลิเทสลา หรือตรวจวัดขนาดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างโดยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้งานที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่อยู่ในช่วงมิลลิเทสลา อุปกรณ์ฮอลล์จึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในแง่ของประสิทธิภาพโดยรวม

## 2.2 อุปกรณ์ฮอลล์ (Hall Effect Sensor)

### 2.2.1 ปฏิกิริยาการก่อกวนโนแมกเนติก (Galvanomagnetic effect)

ปรากฏการณ์ก่อกวนโนแมกเนติกเป็นปรากฏการณ์ที่ประจุกำลังเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีแรงลอเรนซ์กระทำต่อประจุแสดงดังสมการที่ (2.1)

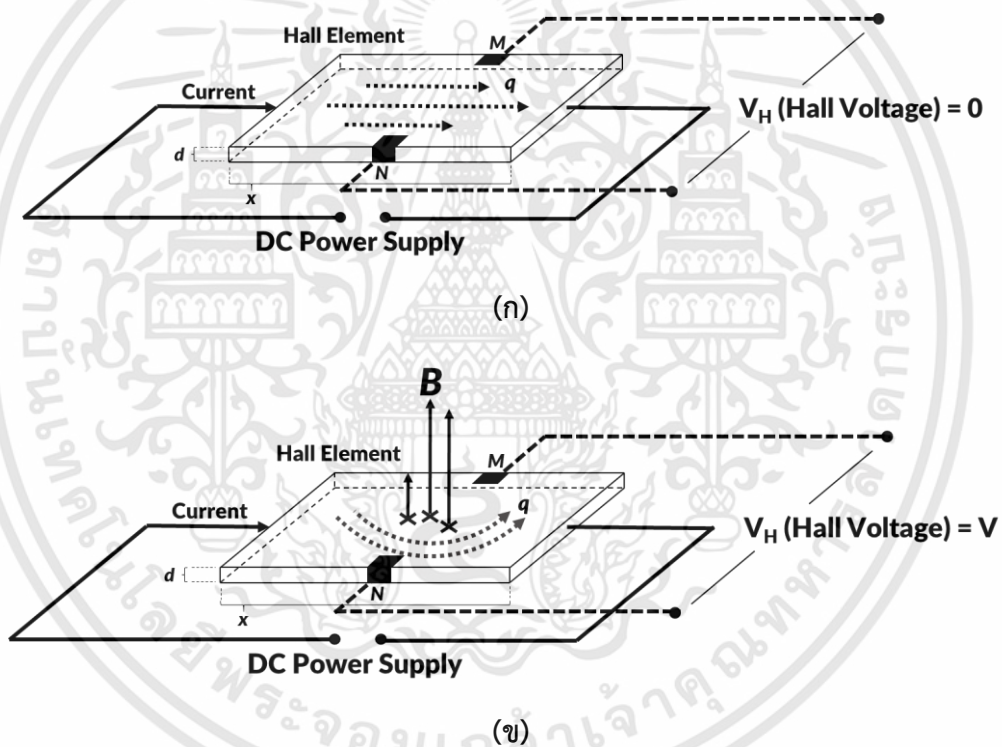
$$F = qE + q[v \times B] \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q$  คือประจุของอนุภาค (สำหรับอิเล็กตรอน  $e = -q$  สำหรับโฮล  $e = q$ )  
 ซึ่ง  $q$  คือขนาดของประจุอิเล็กตรอน)  
 $E$  คือขนาดสนามไฟฟ้า  
 $v$  คือความเร็วของประจุ  
 $B$  คือขนาดของสนามแม่เหล็ก

ในเทอมแรกของฝั่งขวาของสมการนั้นส่วนใหญ่จะใช้อ้างอิงถึงแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และเทอมที่สองจะอ้างอิงถึงแรงลอเรนซ์ ตลอดจนกล่าวถึงทั้งสองเทอมว่าเป็นส่วนของไฟฟ้าและส่วนของแม่เหล็กตามลำดับ เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงแม่เหล็กสำหรับแรงลอเรนซ์เพื่อที่จะเข้าสู่สมการลอยเลื่อนของประจุ ซึ่งจะประมาณค่าที่ประกอบไปด้วยสมมุติฐานว่าประจุพาหะเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมออันเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าหรือแรงขับอื่นๆ และความเร็วของพาหะทั้งหมดจะมีขนาดเท่ากันและเท่ากับค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถแทนที่ความเร็วของประจุแต่ละตัว ( $v$ ) ในสมการที่ (2.1) ด้วยความเร็วลอยเลื่อนเฉลี่ยของประจุทั้งหมด และจะไม่พิจารณาการเคลื่อนที่เชิงความร้อน (thermal motion) ของประจุเพื่อความง่ายต่อการวิเคราะห์ผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อประจุ

## 2.2.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ปรากฏการณ์ฮอลล์จัดเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ที่อยู่ในกลุ่มของปรากฏการณ์กัลป์วาโนแมกเนติก ซึ่งตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์คือ เอ็ดวิน ฮอลล์ (EDWIN HALL) ในปี ค.ศ. 1879 [14] โดยค้นพบว่าเมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสที่ไหลผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก และฟลักซ์แม่เหล็กกระทำในทิศตั้งฉากกับแผ่นตัวนำจะทำประจุเคลื่อนที่เบี่ยงเบนออกจากแนวทิศทางเดิม เป็นผลให้เกิดสนามไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Voltage) แรกเริ่มเดิมทีนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของปรากฏการณ์ฮอลล์นั้นจะใช้วัสดุทองคำที่มีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำยาว (long gold leaf) แต่ในปัจจุบันนี้ การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์จะเลือกใช้วัสดุสารกึ่งตัวซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับปรากฏการณ์นี้มากที่สุด



รูปที่ 2.1 แสดงปรากฏการณ์ฮอลล์

- (ก) แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กมากกระทำ  
 (ข) แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำในทิศตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ

จากรูปที่ 2.1 (ก) แสดงถึงแผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลโดยมีความหนา ( $d$ ) และพาหะประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วลอยเลื่อน ( $v_d$ ) ซึ่งความต่างศักย์ฮอลล์ ( $v_H$ ) เท่ากับศูนย์ และรูปที่ 2.1 (ข) เมื่อวางแผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านจะมีแรงแม่เหล็กมากกระทำในทิศตั้งฉากกับแผ่นตัวนำ แรง

แม่เหล็กจะผลักทั้งพาหะของประจุบวกและประจุลบไปยังบริเวณขอบด้านตรงข้ามกันของแผ่นตัวนำ เป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ฮอลล์ระหว่างพาหะประจุที่ขอบของแผ่นตัวนำ

### 2.2.3 แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)

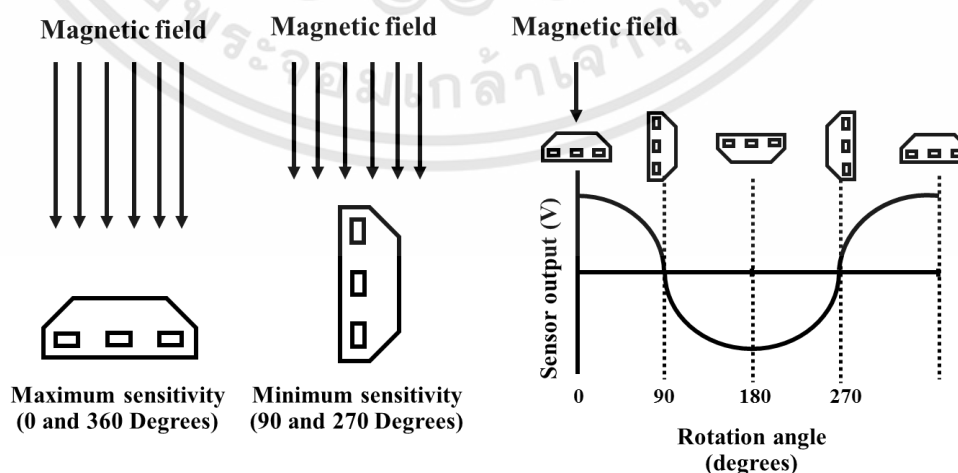
ผลกระทบจากแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อพาหะประจุนั้นส่งผลให้พาหะประจุมีการเคลื่อนที่ เบี่ยงเบนจากแนวเดิม จนเกิดแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ระหว่างขอบของแผ่นตัวนำ หากพิจารณาที่จุดทั้งคือ จุด  $M$  และ จุด  $N$  ที่ขอบของแผ่นตัวนำด้านตรงข้ามกันดังรูปที่ 2.2 (ข) ภายใต้เงื่อนไขของจุดที่ทั้งสองนั้นจะมีระนาบศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากันเมื่อ  $B = 0$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์พิจารณาจากสมการที่ (2.2)

$$V_H = \int_M^N E_H dz \quad (2.2)$$

การรบกวนสนามไฟฟ้าฮอลล์ภายใต้เงื่อนไขของการทดลองดังรูปที่ 2.2 จะเรียกว่าปรากฏการณ์ฮอลล์

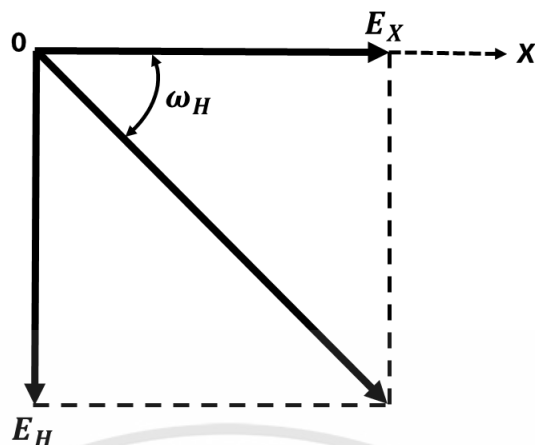
### 2.2.4 มุมฮอลล์ (Hall angle)

เมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ผ่านแผ่นตัวนำในทิศตั้งฉาก จะเกิดสนามไฟฟ้าล้นในแผ่นตัวนำมากกว่าแผ่นตัวนำในทิศที่ไม่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.2 (อ้างอิงถึงสนามไฟฟ้าภายนอกในแนวแกน  $X$ , ( $E_X$ ) และสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำในแนวแกน  $Y$ , ( $E_H$ )) ซึ่งปรากฏการณ์ฮอลล์จะแสดงผ่านการเอียงของสนามไฟฟ้าล้นที่สัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าภายนอก ( $E_X$ ) และสนามไฟฟ้าฮอลล์ ( $E_H$ ) ดังรูปที่ 2.3 โดยมุมที่เกิดจากการเอียงในที่นี้จะเรียกว่า “มุมฮอลล์ ( $\phi_H$ )”



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ฮอลล์ต่อสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงทิศทางการเกิดมุมฮอลล์

โดยมุมฮอลล์สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.3)

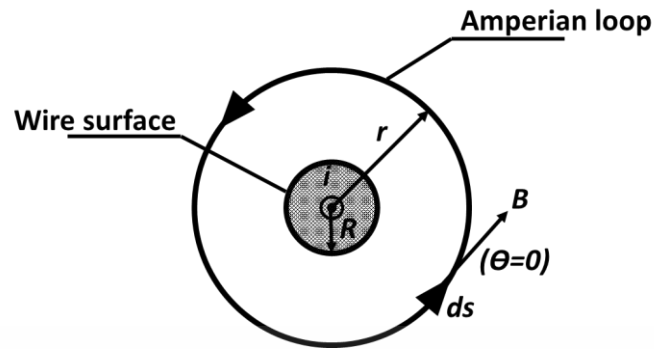
$$\tan^{-1} \phi_H = \frac{|E_H|}{|E_X|} \quad (2.3)$$

### 2.3 การประยุกต์กฎของแอมแปร์ร่วมกับโซลินอยด์

กฎของแอมแปร์กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลวดตัวนำซึ่งอธิบายว่า “อินทิกรัลเชิงเส้นของ  $B$  รอบเส้นปิดใดๆจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าตรงค่าสุทธิที่ถูกปิดล้อมโดยเส้นปิดนั้น” ดังสมการที่ (2.4)

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 I_{enclosed} \quad (2.4)$$

กฎของแอมแปร์นั้นสามารถคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสสม่ำเสมอ โดยที่กระแสนั้นมีการกระจายลักษณะสมมาตรกันบนพื้นที่หน้าตัดลวดตัวนำยาว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กกรอบๆเส้นลวดตัวนำ

สมการที่ (2.5) แสดงถึงสนามแม่เหล็กกรอบๆเส้นลวดตัวนำยาวที่มีรัศมี R และมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอบนพื้นหน้าตัดของลวดตัวนำยาว

$$\int B \cdot ds = \mu_0 i_{enc} \quad (2.5)$$

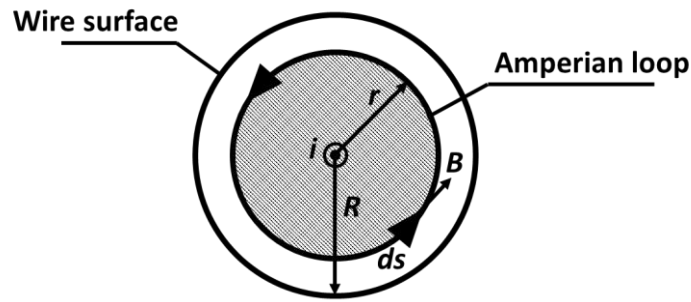
เมื่อขอบเขตคือเส้นรอบวง (Amperian loop) จะได้

$$B \int_0^{2\pi r} ds = \mu_0 i \quad (2.6)$$

โดยจัดรูปสมการอย่างง่ายจะแสดงดังสมการที่ (2.7)

$$B_{OUT} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (2.7)$$

เมื่อก้าวถึงสนามแม่เหล็กภายในเส้นลวดตัวนำรัศมี R และมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอบนพื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำยาวจะแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงพฤติกรรมของสนามแม่เหล็กในเส้นลวดตัวนำ

การหาสนามแม่เหล็กภายในลวดตัวนำสามารถหาได้จากสมการที่ (2.8)

$$\int B \cdot ds = \mu_0 i_{enc} \quad (2.7)$$

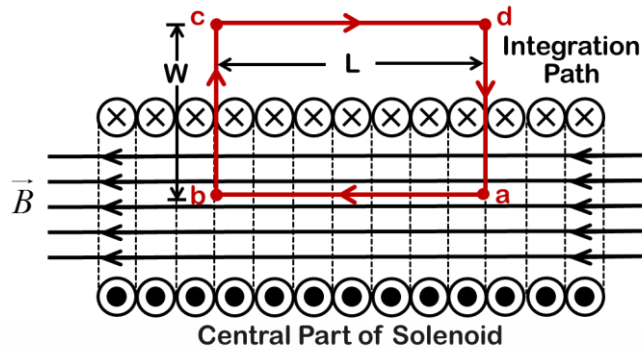
โดยที่ขอบเขตคือเส้นรอบวง (Amperian loop) จะได้

$$B \int_0^{2\pi r} ds = \frac{\mu_0 \pi r^2 i}{\pi R^2} \quad (2.8)$$

เมื่อจัดรูปให้อยู่ในสมการอย่างง่าย จะได้สมการที่ (2.9)

$$B_{in} = \frac{\mu_0 r i}{2\pi R^2} \quad (2.9)$$

โซลินอยด์ (Solenoid) เป็นหนึ่งในหลายวิธีที่ถูกนำมาใช้ประยุกต์ใช้สร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งความเข้มสนามแม่เหล็กของโซลินอยด์นั้นคืออยู่กับปริมาณกระแสและจำนวนรอบต่อหนึ่งหน่วยความยาวโดยที่  $n = N/l$  เมื่อ  $N$  คือจำนวนรอบของลวดตัวนำ และ  $l$  คือความยาวของโซลินอยด์



รูปที่ 2.6 แสดงภาพตัดขวางของโซลินอยด์

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโซลินอยด์นั้นสามารถหาค่าของสนามแม่เหล็กดังกล่าวได้โดยเขียนวงปิดแอมแปร์ที่มีความกว้าง ( $W$ ) และความยาว ( $L$ ) ล้อมกระแสในขดลวดดังรูปที่ 2.6 โดยเมื่อประยุกต์กฎของแอมแปร์กับวงปิดดังกล่าวจะได้สมการที่ (2.10)

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_{top} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{right} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{bottom} \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_{left} \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (2.10)$$

จะได้สมการที่ (2.11)

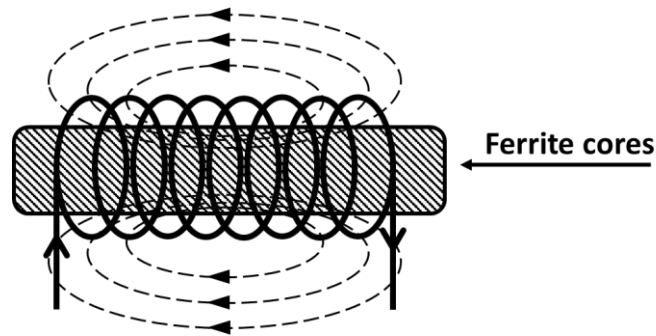
$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0 + 0 + \int B dl \cos(0) + 0 \quad (2.11)$$

จัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังสมการที่ (2.12)

$$B = \mu_0 n I \quad (2.12)$$

#### 2.4 การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ฮอลล์ร่วมกับโซลินอยด์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านโซลินอยด์นั้นจะมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น โดยที่ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เข้มที่สุดจะอยู่ที่บริเวณแกนกลางของโซลินอยด์ ถ้าใส่แกนเหล็กอ่อนเข้าไปในไว้ที่แกนกลางของโซลินอยด์ แกนเหล็กอ่อนดังกล่าวจะถูกเหนี่ยวนำให้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แกนเฟอร์ไรต์เป็นแกนของโซลินอยด์ดังรูปที่ 2.7 เพื่อดึงดูดอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่นสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของน้ำมัน



รูปที่ 2.7 การเหนี่ยวนำของโซลินอยด์ที่กระทำต่อแกนเฟอร์ไรต์

#### 2.4.1 เงื่อนไขตัวแปรที่มีผลต่อการเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำคืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถูกสร้างมาจากเส้นลวดนำไฟฟ้าพันรอบตัวกลางเป็นวง โดยตัวเหนี่ยวนำจะอาศัยหลักการของลวดทองแดงนำมาพันรอบตัวกลางที่เรียกว่าคอยล์ และจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อให้เห็นคุณสมบัติของตัวเหนี่ยวนำ โดยค่าความเหนี่ยวนำของโซลินอยด์ที่จะขึ้นกับตัวแปรดังนี้

1. **พื้นที่หน้าตัดของแกน ( $A$ )** ถ้าหากพื้นที่หน้าตัดของแกนยังมีขนาดใหญ่ค่าความเหนี่ยวนำก็จะมีค่ามากตามไปด้วยเช่น ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำนี้จะแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของแกน
2. **ค่าความซึมซาบของแม่เหล็ก ( $\mu$ )** เป็นคุณสมบัติชนิดหนึ่งของแม่เหล็กที่ยอมให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้ง่ายหรือยาก ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำนี้จะแปรผันตรงกับความซึมซาบของแกน
3. **จำนวนรอบของขดลวด ( $N$ )** เมื่อจำนวนรอบของขดลวดยิ่งซ้อนทับกันเท่าไร ค่าความเหนี่ยวนำก็เสริมกันมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน
4. **ความยาว ( $l$ )** เมื่อความยาวของแกนยิ่งยาว ค่าความเหนี่ยวนำจะยิ่งน้อย ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำนั้นจะแปรผกผันกับความยาวของแกน
5. **ปริมาณกระแส ( $i$ )** เมื่อมีปริมาณกระแสไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์มาก ก็จะส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำนั้นมากขึ้นตามไปด้วย

การหาค่าความเหนี่ยวนำหาได้ดังสมการที่ (2.13)

$$L = \frac{N^2 \mu \pi r^2}{4l} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $L$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเหนี่ยวนำ (H)

$N$  คือ จำนวนรอบในการพันขดลวด (รอบ)

- $r$  คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำ (m)
- $l$  คือ รัศมีของขดลวดเหนี่ยวนำ (m)
- $\mu$  คือ ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของวัสดุ (H/m)

#### 2.4.2 การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

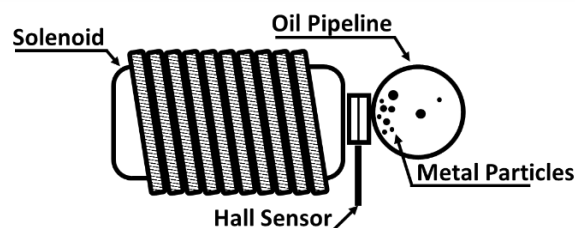
การหาค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของแกนขดลวดเหนี่ยวนำที่แผ่ออกมาอย่างสม่ำเสมอตั้งรูปที่ 2.8 สามารถคำนวณดังสมการที่ 2.14

$$B(z) = \frac{\mu IN}{2l} \bullet \left[ \frac{z + \frac{1}{2}}{\sqrt{r^2 + \left(z + \frac{1}{2}\right)^2}} - \frac{z - \frac{1}{2}}{\sqrt{r^2 + \left(z - \frac{1}{2}\right)^2}} \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ  $B(z)$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (T)  
 $N$  คือ ตำแหน่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (m)

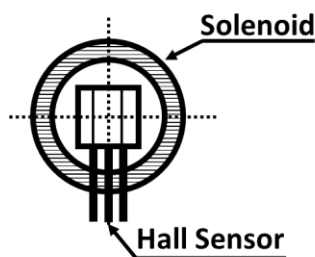
#### 2.4.3 ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ฮอลล์

เมื่อนำอุปกรณ์ฮอลล์มาวางที่ตำแหน่งระหว่างปลายด้านหนึ่งของโซลินอยด์และท่อน้ำมัน ดังรูปที่ 2.8 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวอุปกรณ์ทั้งสามจะติดกันโดยไม่มีช่องว่างซึ่งตำแหน่งนี้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากพอที่จะดึงดูดอนุภาคโลหะ โดยอุปกรณ์ฮอลล์จะให้เอาต์พุตที่เป็นแรงดันไฟฟ้าที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่น โดยเมื่อโซลินอยด์ดูดอนุภาคโลหะจนเต็มพื้นที่หน้าตัดหรือเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ถึงจุดอิ่มตัว (Saturation Point) นั้นแสดงให้เห็นว่าน้ำมันหล่อที่ใช้งานอยู่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะมากเกินไปหรือน้ำมันหล่อลื่นมีประสิทธิภาพต่ำกว่ามาตรฐานต่อการใช้งาน ซึ่งข้อมูลส่วนนี้สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นให้ผู้ใช้ทราบและประเมินอายุการใช้งานเพื่อลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้น



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

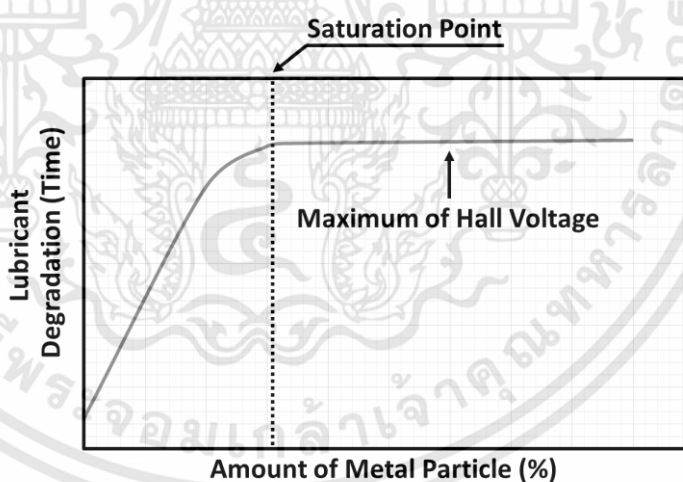
รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น

(ก) ตำแหน่งของอุปกรณ์ฮอลล์จากมุมมองด้านข้าง (Side View)

(ข) ตำแหน่งของอุปกรณ์ฮอลล์จากมุมมองด้านหน้า (Front View)

#### 2.4.4 จุดอิ่มตัวของอุปกรณ์ฮอลล์ (Saturation Point)

เมื่อปริมาณอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่นส่งผลโดยตรงกับเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ โดยจุดอิ่มตัว (Saturation Point) ของเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ เกิดจากอนุภาคโลหะมารวมตัวบริเวณพื้นที่หน้าตัดของโซลินอยด์เนื่องจากแรงดึงดูดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จุดอิ่มตัวแสดงถึงปริมาณอนุภาคโลหะที่มีจำนวนมากเกินไปสำหรับน้ำมันหล่อลื่นดังแสดงรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอนุภาคโลหะและเวลาการเสื่อมสภาพของน้ำมัน

#### 2.5 น้ำมันหล่อลื่นสำหรับอุตสาหกรรม

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricant Oil) มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 2 อย่างคือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน (Base Oil) และสารเพิ่มคุณภาพ (Additives) ในสัดส่วนที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ และเหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ โดยน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียม (Petroleum Base Oils) หรือน้ำมันแร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Mineral Oil) และน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสังเคราะห์ (Synthetic Base Oils) ในส่วนของสารเพิ่มคุณภาพนั้นเป็นสารที่เติมลงไปใมน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านของกายภาพและเคมี ซึ่งมีหน้าที่สำคัญอยู่ 3 ประการ ได้แก่ ปกป้องผิวโลหะจากการสึกหรอ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น และยืดอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นน้ำมันหล่อลื่นจึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของทุกอุตสาหกรรม ซึ่งต้องการเปลี่ยนถ่ายและตรวจสอบประสิทธิภาพตามอายุการใช้งานเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของน้ำมันที่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุตสาหกรรม

### 2.5.1 ประเภทของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่นมีมากมายหลายชนิด สำหรับใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ให้ถูกประเภท โดยทั่วไปจะมีการแบ่งออกเป็น 3 แบบได้แก่

#### 2.5.1.1 แบ่งตามชนิดของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ซึ่งจะบ่งบอกถึงอายุการใช้งาน

เป็นหลัก เรียงลำดับจากน้อยไปมาก แบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

- น้ำมันธรรมดาที่ผลิตจากน้ำมันแร่
- น้ำมันกึ่งสังเคราะห์ (Semi - Synthetic)
- น้ำมันสังเคราะห์ (Fully - Synthetic)

#### 2.5.1.2 แบ่งตามชนิดของความหนืด เนื่องจากความหนืดเป็นปัจจัยสำคัญในการ

ป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนต่างๆภายในเครื่องจักร กล่าวคือ หากน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดน้อยเกินไปจะไม่สามารถคงสภาพฟิล์มบางๆ ที่แทรกแทรกอยู่ระหว่างผิวหน้าของชิ้นส่วนภายในเครื่องจักร หรือถ้ามีความหนืดมากเกินไปนั้น ก็ไม่สามารถถูกบีบไปหล่อลื่นได้อย่างทั่วถึง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- **น้ำมันเกรดเดียว (Monograde)** โดย SAE (Society of Automotive Engineers) หรือ สมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งสหรัฐอเมริกาได้วางมาตรฐานโดยแบ่งตามค่าความข้นใส ได้แก่ SAE 0W, 5W, 10W, 15W และ 20W อักษร W (Winter) สำหรับใช้ในเขตหนาว และ SAE 20, 30, 40 และ 50 สำหรับใช้ในเขตร้อน ตัวเลขยิ่งมากความข้นก็จะยิ่งมากขึ้น
- **น้ำมันเกรดรวม (Multigrade)** เป็นการพัฒนาน้ำมันให้สามารถใช้งานได้ทั้งเขตร้อนและเขตหนาว น้ำมันเกรดรวมจะมีค่าดัชนีความหนืดสูงสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศได้ดีกว่าน้ำมันเกรดเดียว เช่น SAE 5W-40, 10W-30 และ 15W-40 เป็นต้น

## 2.5.2 คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหล่อลื่น

**2.5.2.1 จุดไหลเท (Pour Point)** เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันลดต่ำลง ค่าความหนืดของน้ำมันจะมากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดน้ำมันจะหยุดไหล อุณหภูมิสูงสุดที่น้ำมันเริ่มหยุดไหลเรียกว่า “จุดไหลเท” น้ำมันหล่อลื่นที่ได้มาจากน้ำมันดิบประเภทพาราฟินิกจะมีจุดไหลเทมากกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ได้มาจากน้ำมันดิบประเภทเนฟทาณิก เนื่องจากมีส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลประเภทที่ทำให้เกิดไขสูง

**2.5.2.2 ความหนืด (Viscosity)** ในปัจจัยของการหล่อลื่นนั้น ความหนืดเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญที่สุดที่จะไปพิจารณาเป็นอย่างแรกในการเลือกใช้ น้ำมันหล่อลื่นให้เหมาะกับงาน น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะทำให้ฟิล์มบางจนไม่รับน้ำหนักได้มาก แต่สามารถไปแทรกตัวตามส่วนต่างๆที่ต้องการหล่อลื่นได้อย่างรวดเร็วและระบายความร้อนได้ดี ส่วนน้ำมันที่มีความหนืดสูงจะทำให้ฟิล์มมีความหนาไม่เหมาะสมจึงสามารถรับแรงกดได้ดีกว่า แต่จะต้องเสียพลังงานในการเฉือนฟิล์มน้ำมันมากขึ้นและระบายความร้อนได้ช้า ความหนืดจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของน้ำมัน กล่าวคือ ความหนืดจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง และความหนืดจะน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น วิธีการวัดความหนืดทำโดยการจับเวลาที่น้ำมันปริมาณหนึ่งหน่วยไหลผ่านรูหลอดแก้วของเครื่องวัดความหนืด (Viscometer) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่ถูกควบคุมให้คงที่ ค่าความหนืดที่นิยมใช้กันแพร่หลายมากที่สุดในปัจจุบัน ได้แก่ ความหนืดไคแมติก (Kinematic Viscosity) ที่ใช้หน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt)

**2.5.2.3 ดัชนีความหนืด (Viscosity, VI)** ตัวเลขที่ใช้แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นกับอุณหภูมิโดยการเปรียบเทียบกับน้ำมันมาตรฐาน น้ำมันที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงจะมีค่าความหนืดจะมีค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปน้อยกว่าน้ำมันที่ค่าดัชนีความหนืดต่ำ

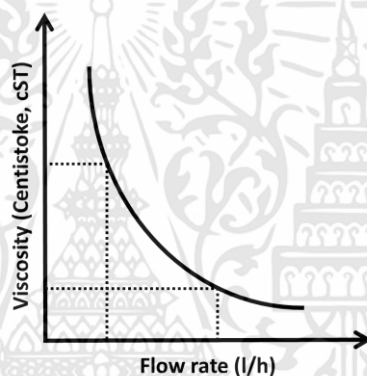
**2.5.2.4 จุดวาบไฟ (Flash Point)** ที่อุณหภูมิต่ำจนน้ำมันจะต้องถูกทำให้ร้อนขึ้นจนไอของน้ำมันระเหยออกมามากเพียงพอที่จะติดไฟ ซึ่งในการประเมินถึงความเหมาะสมของน้ำมันหล่อลื่นในด้านความปลอดภัยสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง

### 2.5.3 คุณสมบัติความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ

เมื่อมีการเคลื่อนที่ของของไหล ภายในของของไหลนั้นจะมีการเคลื่อนที่ชนกันของแต่ละโมเลกุลตลอดเวลาด้วยทิศทางที่ไม่แน่นอน ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนที่ของของไหลเคลื่อนที่ช้าลงตามโครงสร้างของของไหลแต่ละชนิด เรียกว่า ความหนืด (Viscosity,  $\eta$ )

#### 2.5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการไหล

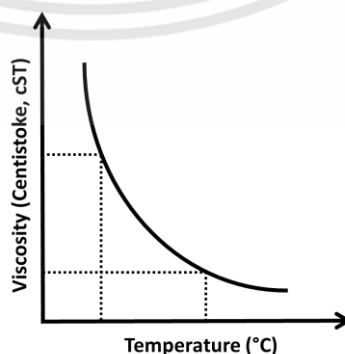
เมื่อก้าวถึงการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและผ่านการใช้งานมาแล้วนั้น น้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานจะมีค่าความหนืดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปน้ำมันหล่อลื่นจะมีค่าความหนืดน้อยลงและอัตราการไหลที่สูงขึ้น เนื่องจากปัจจัยทางด้านอายุการใช้งาน ความร้อน หรือความชื้น โดยพบว่าอัตราการไหลจะแปรผกผันกับความหนืด ดังแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอัตราการไหล

#### 2.5.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิ

เมื่อมีความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานของชิ้นส่วนภายในของเครื่องจักร หรือความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับค่าความหนืด โดยเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้น ค่าความหนืดของน้ำมันนั้นจะมีค่าลดลงดังแสดงดังรูปที่ 2.10

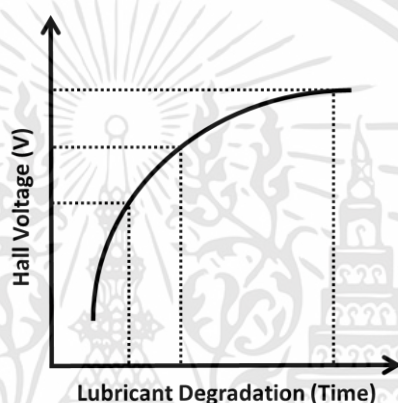


รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดและอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสื่อมสภาพของน้ำมันและเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง ย่อมส่งผลให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพตามวันเวลา โดยมีอนุภาคโลหะปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่นในปริมาณหนึ่ง ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ฮอลล์มาเป็นตัวตรวจวัดปริมาณอนุภาคโลหะนี้ โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์มีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 2.11 จากความสัมพันธ์ดังกล่าวเราจึงสามารถประเมินประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นจากเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ในระดับที่เชื่อถือได้



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์และการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น

จากความสัมพันธ์ของความหนืด ( $\eta$ ), อัตราการไหล ( $Q$ ), ความต่างศักย์ฮอลล์ ( $V$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ) จะพบว่าเมื่อทราบอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไป เราจะเปรียบเทียบมาเป็นค่าความหนืดได้ โดยความหนืดจะแปรผกผันกับอัตราการไหล และอัตราการไหลจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ดังสมการที่ (2.13)

$$VISCOSITY(\eta) \propto \frac{1}{TEMPERATURE(T)} \propto \frac{1}{HALL-VOLTAGE(V)} \propto \frac{1}{FLOWRATE(Q)} \quad (2.13)$$

### 2.5.4 มาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่น

ค่าความหนืดนั้นจะมีมาตรฐานอยู่หลายมาตรฐาน โดยมีสถาบันหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยตรงเป็นผู้กำหนดมาตรฐานของความหนืด อาทิ มาตรฐาน API, มาตรฐาน SAE, มาตรฐาน ISO หรือ มาตรฐาน AGMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

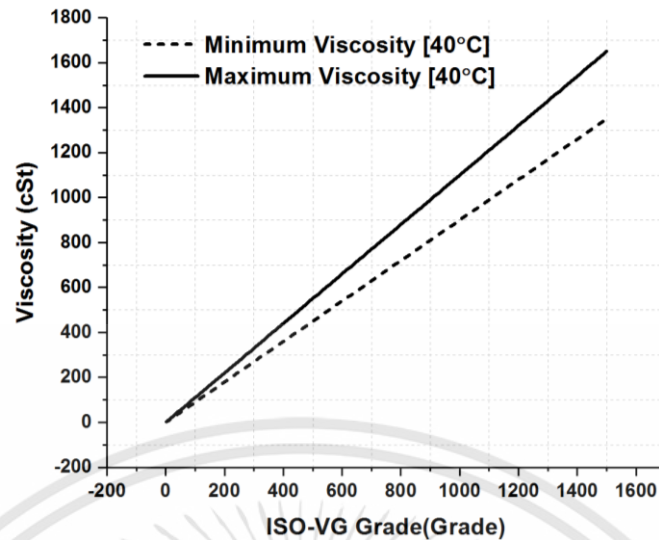
### 2.5.4.1 ISO (International Organization for Standardization)

เป็นมาตรฐานความหนืดสากลที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มาตรฐานนี้จะใช้วิธีการวัดที่อุณหภูมิมาตรฐาน 40°C ซึ่งใช้หน่วยเป็น (Centistroke : cSt) แล้วกำหนดเป็นตัวเลขของความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเรียกว่า (ISO Viscosity Grade : ISO VG) โดยเริ่มจาก ISO VG 2 จนถึง ISO VG 1500 ดังตารางที่ 2.2 โดยแต่ละเกรดนั้นจะมีค่าความหนืดอยู่ในช่วง +10% ของค่าเฉลี่ย (Mid-Point) ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งมีเกรดสำคัญอยู่ 6 เกรดนั้นก็คือ ISO VG 10, 15, 22, 32, 46 และ 68

ตารางที่ 2.2 แสดงมาตรฐานของเกรดความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นในมาตรฐาน ISO VG

ISO Viscosity Class [ 40°C ]	Viscosity		
	Mid-Point [ 40°C ]	Viscosity [ 40°C ]	
		Minimum	Maximum
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.00	11.00
ISO VG 15	15	13.50	16.50
ISO VG 22	22	19.80	24.20
ISO VG 32	32	28.80	35.20
ISO VG 46	46	41.20	50.60
ISO VG 68	68	61.20	74.80
ISO VG 100	100	90.00	110.00
ISO VG 150	150	135.00	165.00
ISO VG 220	220	198.00	242.00
ISO VG 320	320	288.00	352.00
ISO VG 460	460	414.00	506.00
ISO VG 680	680	612.00	748.00
ISO VG 1000	1,000	900.00	1,100.00
ISO VG 1500	1,500	1,350.00	1,650.00

ขอบคุณที่มา : <https://wiki.anton-paar.com/en/iso-viscosity-classification/>



รูปที่ 2.13 แสดงค่าต่ำสุดและสูงสุดของความหนืดสำหรับน้ำมันแต่ละเกรด

#### 2.5.4.2 SAE (The American Society of Automotive Engineers)

เป็นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งสหรัฐอเมริกา โดยมาตรฐาน SAE นี้จะแบ่งน้ำมันหล่อลื่นออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ น้ำมันที่ใช้ในฤดูร้อนและน้ำมันที่ใช้ในฤดูหนาว ซึ่งกลุ่มของน้ำมันที่ใช้ในฤดูหนาวนั้นจะมีอักษร (W) ย่อมาจาก Winter ต่อท้าย โดยความหนืดของน้ำมันในกลุ่มนี้ได้แก่ SAE 5W, 10W, 15W และ 20W เป็นต้น และทำการวัดความหนืด ณ อุณหภูมิที่  $-30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-5^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้เบอร์ของน้ำมันที่มีค่าน้อยจะมีความใสมากเบอร์ที่มีค่ามาก สำหรับน้ำมันในกลุ่มฤดูร้อนจะวัดค่าความหนืด ณ อุณหภูมิที่  $100^{\circ}\text{C}$  อาทิเช่น SAE 20, 30, 40 และ 50 เป็นต้น ดังตารางที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้งานจะต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่นตามฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ผู้ใช้งานต้องมียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น และสิ้นเปลืองทรัพยากรโดยใช้เหตุ เนื่องจากอายุการใช้งานของน้ำมันยังสามารถใช้งานได้ แต่ต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันให้ตรงกับฤดูกาล เป็นเหตุให้ทางผู้ผลิตพัฒนาน้ำมันที่สามารถใช้ได้ทั้งในฤดูร้อนและฤดูหนาว เรียกว่า “น้ำมันเกรดรวม” เช่น SAE 15W-40, 20W-50 และ 5W-40 ซึ่งน้ำมันเกรดรวมจะมีราคาแพงกว่าเกรดเดี่ยวเนื่องด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่สูงกว่า

ตารางที่ 2.3 แสดงมาตรฐานของเกรดความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นในมาตรฐาน SAE J300

SAE Viscosity Grade	High Shear Rate Viscosity [ 150°C ]	Viscosity [ 100°C ]	
		Minimum	Maximum
0 W	-	3.8	-
5 W	-	3.8	-
10 W	-	4.1	-
15 W	-	5.6	-
20 W	-	5.6	-
25 W	-	9.3	-
20	2.6	5.6	<9.3
30	2.9	9.3	<12.5
40	2.9	12.5	<16.3
40	3.7	12.5	<16.3
50	3.7	16.3	<21.9
60	3.7	21.9	<26.1

ขอบคุณที่มา : <https://wiki.anton-paar.com/en/sae-viscosity-grades/>

#### 2.5.4.3 AGMA (The American Gear Manufacturers Association)

มาตรฐาน AGMA ถูกจัดตั้งขึ้นโดยสมาคมผู้ผลิตเกียร์ของสหรัฐอเมริกา โดยมักจะใช้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมเกียร์ ซึ่งกำหนดน้ำมันแต่ละเป็นตัวเลขเพียงหลักเดียวดังตารางที่ 2.4 เพื่อความสะดวกต่อการเรียกใช้

ตารางที่ 2.4 แสดงมาตรฐานของเกรดความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นในมาตรฐาน AGMA

AGMA Lubricant No.	Comparable ISO Viscosity Grade	Viscosity [ 40°C ]	
		Minimum	Maximum
0	32	28.8	35.2
1	46	41.4	50.6
2, 2 EP	68	61.2	74.8
3, 3 EP	100	90	110
4, 4 EP	150	135	165
5, 5 EP	220	198	242

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

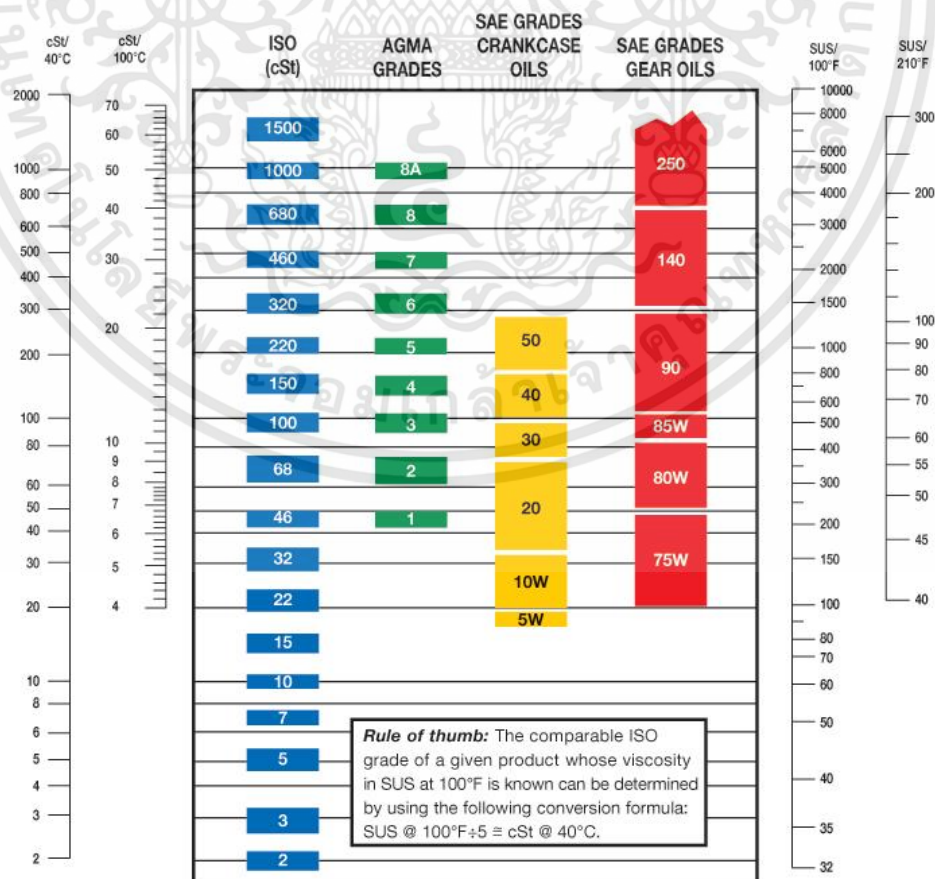
AGMA Lubricant No.	Comparable ISO Viscosity Grade	Viscosity [ 40°C ]	
		Minimum	Maximum
6, 6 EP	320	288	352
7 C, 7 EP	460	414	506
8 C, 8 EP	680	612	748
8A C, 8 EP	1000	900	1100

ขอบคุณที่มา : <https://wiki.anton-paar.com/en/agma-viscosity-classification/>

### 2.5.4.4 API (American Petroleum Institute)

สถาบันปิโตรเลียมแห่งอเมริกาซึ่งจะแบ่งเกรดของน้ำมันหล่อลื่นตามการใช้งาน ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้นั้นก็คือ มาตรฐาน API ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงใช้สัญลักษณ์ “S” (Service Stations - Classifications) นำหน้า อาทิเช่น SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH และ SJ ส่วนมาตรฐาน API ของเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลใช้สัญลักษณ์ “C” (Commercial Classifications) นำหน้า อาทิเช่น CA, CB, CC, CD-II, CF, CF-2 CF-4 และ CG-4

ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานของความหนืดสำหรับน้ำมันหล่อลื่นมาตรฐานต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น

เมื่อน้ำมันหล่อลื่นหลังจากถูกใช้งานมาในช่วงระยะเวลาหนึ่ง น้ำมันจะมีการสูญเสียคุณสมบัติในการหล่อลื่นและหน้าที่อื่นๆไป และเมื่อยังใช้น้ำมันต่อไปเรื่อยๆ น้ำมันก็จะยิ่งเสื่อมสภาพลงไปเรื่อยๆ สาเหตุของการเสื่อมสภาพน้ำมันสรุปได้เป็น 4 ข้อ ได้แก่

#### 2.5.5.1 การเปลี่ยนสภาพของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน

ซึ่งเกิดจากการที่น้ำมันรวมตัวกับออกซิเจนหรือเรียกว่า “ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction)” โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันพื้นฐานประเภทน้ำมันแร่ ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนแล้วจะเกิดเป็นกรดกัดกร่อนขึ้น ส่วนที่เป็นโลหะ เกิดเป็นยางเหนียวและโคลนซึ่งอาจทำให้ระบบหมุนเวียนน้ำมันอุดตันได้ ความหนืดของน้ำมันก็จะเพิ่มสูงขึ้น การรวมตัวกับออกซิเจนจะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยอุณหภูมิ ซึ่งถ้าอุณหภูมิสูงนั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ถ้ามีเศษโลหะปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น เศษโลหะเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย ผลของการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานสูญเสียคุณสมบัติในการหล่อลื่นและป้องกันการกัดกร่อน (ความหนืดเปลี่ยนแปลง และการเกิดกรดกัดกร่อนขึ้นส่วนโลหะ)

#### 2.5.5.2 สารเพิ่มคุณภาพถูกใช้หมดไป

เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพเป็นสารเคมีที่เมื่อทำหน้าที่แล้ว สารเพิ่มคุณภาพก็จะแปรเปลี่ยนสภาพและหมดไปในที่สุด ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่ใส่เข้าไป และอัตราการใช้งาน เมื่อถูกใช้หมดไปน้ำมันก็จะหมดคุณสมบัติในการทำงานของสารเพิ่มคุณภาพนั้นไป

#### 2.5.5.3 สิ่งปนเปื้อนจากภายในเครื่องจักรและระบบ

สิ่งเหล่านี้จะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนแปลงสภาพและเสื่อมสภาพไปในที่สุด เช่น

- น้ำที่เกิดจากการควบแน่นของความชื้นโดยตรงจากอากาศภายในระบบ
- เกิดจากการควบแน่นของความชื้นในอากาศภายในเครื่องจักร
- เกิดจากผลของการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจน

#### สารที่เหลือจากการเผาไหม้

อาจประกอบด้วยเขม่า น้ำมันเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมด สารพวกนี้จะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเปลี่ยนไป

#### เศษชิ้นส่วนโลหะจากการสึกหรอ

เศษเหล่านี้จะทำให้ความหนืดของน้ำมันเพิ่มมากขึ้น และจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันหล่อลื่นด้วย

#### 2.5.5.4 สารปนเปื้อนจากภายนอกเข้าไปผสมกับน้ำมันหล่อลื่น สารที่ปนเปื้อนเหล่านี้จะทำให้ น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ เช่น

##### น้ำจากภายนอกระบบ

อาจเข้าไประหว่างเติมหรือเปลี่ยนถ่ายน้ำมันหล่อลื่น หรือที่เก็บรักษาน้ำมันที่ไม่ดีพอ น้ำนี้ก็ทำให้เกิดผลเสียเช่นเดียวกับน้ำที่เกิดภายในระบบ

##### ฝุ่นผง

มักจะอยู่บริเวณโดยรอบของระบบอาจเข้าไปในระบบได้ถ้าอุปกรณ์ไม่ดีพอ หรือการตรวจสอบระดับการเติมหรือการเปลี่ยนไม่ได้กระทำอย่างระมัดระวัง ก็อาจทำให้การป้องกันการสึกหรอของน้ำมันหล่อลื่นเสียไป นอกจากนี้ยังอาจทำให้ความหนืดเปลี่ยนไป และทำให้เกิดน้ำมันโคลนด้วย



## บทที่ 3

### การออกแบบระบบการวัด และวิธีการดำเนินการ

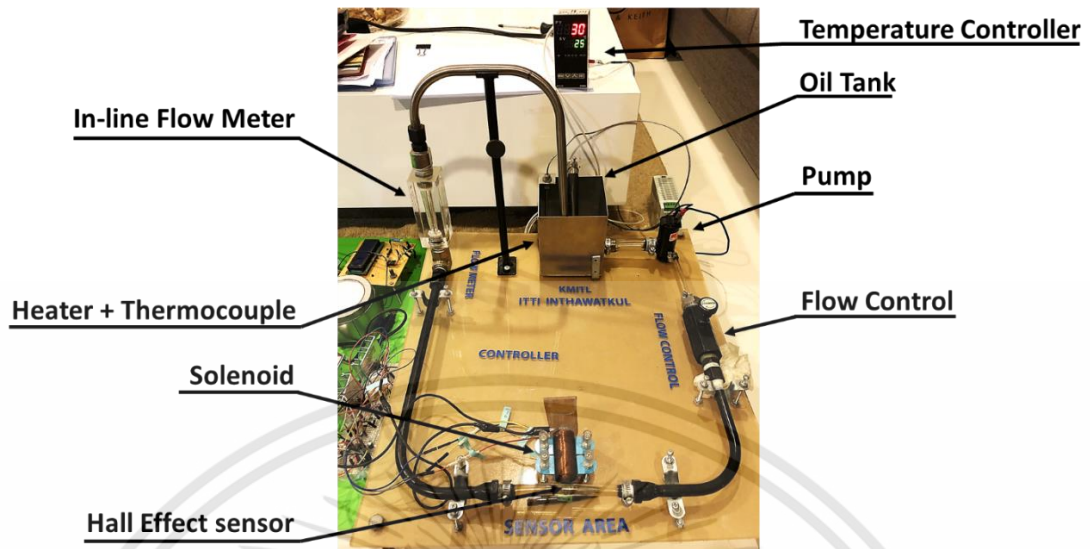
เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในออกแบบระบบการวัดประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งจะแบ่งระบบการวัดนี้ออกเป็น 2 ภาคส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนที่ 1 คือส่วนของระบบการไหลของน้ำมัน ประกอบไปด้วย อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล (Flow Control Valves), อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow Meter), อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Control), อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) และปั๊ม (Pump) ส่วนที่ 2 คือส่วนของระบบการวัดและการวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบไปด้วย อุปกรณ์ฮอลล์, ขดลวดโซลินอยด์, วงจรภาคขยาย (Amplifiers) และส่วนของการเก็บข้อมูล ซึ่งทั้ง 2 ส่วนจะถูกกล่าวอย่างละเอียดเพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้

เราจะกล่าวรายละเอียดของระบบการวัดนี้ในตอนต้น จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการทดลอง โดยการสร้างสนามไฟฟ้าจากขดลวดโซลินอยด์ที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งจะใช้อุปกรณ์ฮอลล์เป็นตัวตรวจวัด

#### 3.1 ระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น

ระบบการตรวจสอบทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นที่นำมาทดลองจะเริ่มต้นจากถังบรรจุน้ำมันที่ติดตั้งฮีตเตอร์ (Heater) และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเพื่อคอยควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น โดยจะมีปั๊มทำหน้าที่สร้างการไหลเวียนของน้ำมันหล่อลื่นภายในระบบ น้ำมันที่ออกมาจากปั๊มจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลเพื่อช่วยให้อัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นในระบบเป็นไปตามที่กำหนด จากนั้นน้ำมันหล่อลื่นจะเข้าสู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ฮอลล์และขดลวดโซลินอยด์สำหรับทำหน้าที่ตรวจวัดคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ไหลผ่านบริเวณดังกล่าว และจะไหลไปสู่อุปกรณ์วัดอัตราการไหล เพื่อตรวจสอบอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นในระบบอีกครั้ง ก่อนที่จะไหลไปยังถังบรรจุน้ำมัน เป็นอันเสร็จสิ้นและดำเนินกระบวนการเดิมนี้ไปจนตลอดการทดลอง

โดยจะอธิบายคุณสมบัติและการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆในระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นในหัวข้อย่อถัดไป



รูปที่ 3.1 ระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น

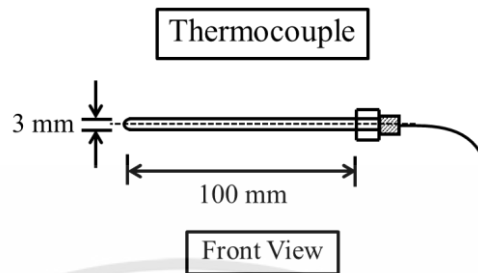
### 3.1.1 ถังบรรจุน้ำมันที่ติดตั้งชุดควบคุมความร้อน



รูปที่ 3.2 แสดงถังบรรจุน้ำมันที่ติดตั้งฮีตเตอร์ เทอร์โมคัปเปิ้ลและควบคุมโดยอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

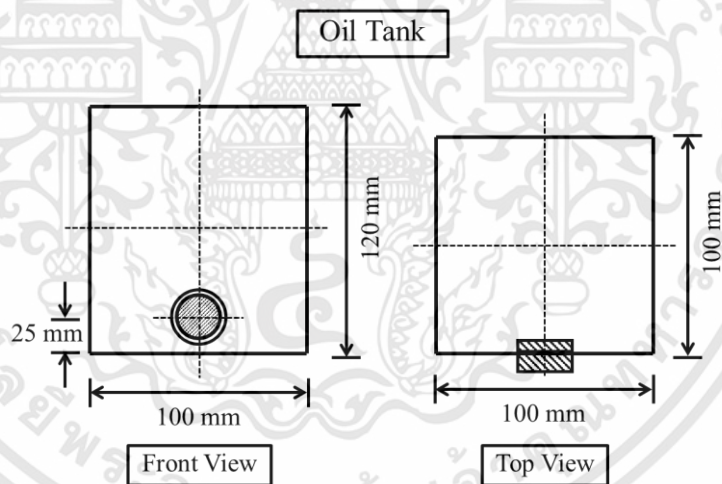
รูปที่ 3.2 แสดงการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น เพื่อจำลองให้เหมือนกับว่าน้ำมันหล่อลื่นกำลังไหลเวียนอยู่ในเครื่องจักร ในที่นี้จะมีเทอร์โมคัปเปิ้ลดังรูปที่ 3.3 ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่บรรจุอยู่ในถังน้ำมันดังรูปที่ 3.4 ซึ่งอุณหภูมิที่วัดได้นั้นจะถูกแปลงไปเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force) แล้วส่งไปยังอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิดัง

รูปที่ 3.5 โดยอุปกรณ์นี้จะต่อกับฮีตเตอร์ดังรูปที่ 3.6 เพื่อสร้างพลังงานความร้อนให้แก่น้ำมันหล่อลื่นตามที่ผู้ใช้งานได้ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการไว้ที่อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ



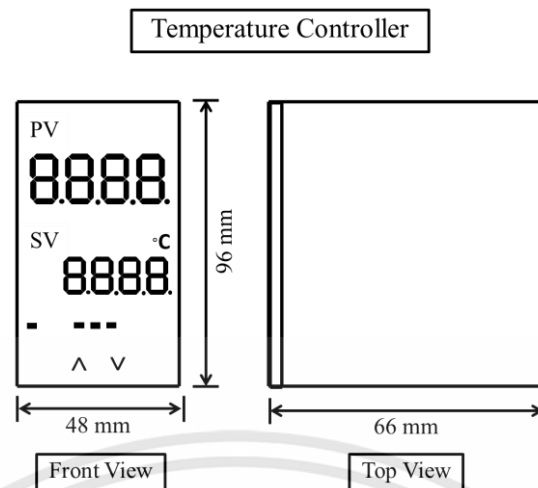
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของเทอร์โมคัปเปิล

โดยรูปที่ 3.3 นั้นแสดงถึงขนาดของถังเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งมีความยาวเฉพาะหัววัดอุณหภูมิเท่ากับ 100 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 mm โดยเทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นเป็นชนิด K ( ช่วงการวัด - 40°C ถึง 1200°C )



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดของถังบรรจุน้ำมัน

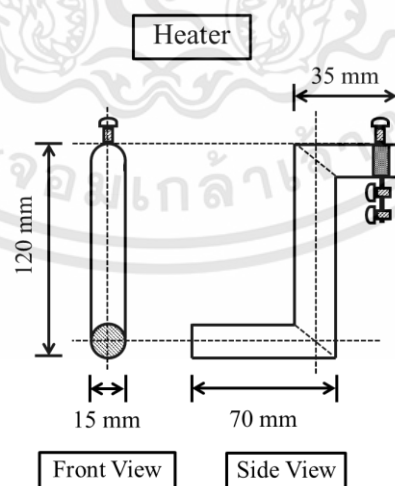
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

เราสามารถกำหนดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นผ่านการตั้งค่าของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ จากรูปที่ 3.5 อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่วัดโดยเทอร์โมคัปเปิ้ลจะแสดงตัวเลขบนหน้าจอของ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิหลักบน และตัวเลขหลักล่างคืออุณหภูมิที่เราต้องการกำหนด เมื่ออุณหภูมิของ น้ำมันหล่อลื่นถึงค่าที่กำหนด อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิก็ตัดการทำงานของฮีตเตอร์ และเมื่ออุณหภูมิของ น้ำมันหล่อลื่นลดลงจากที่กำหนดไว้ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิก็ตั้งการให้ฮีตเตอร์ทำงานจนถึง อุณหภูมิที่กำหนดไว้

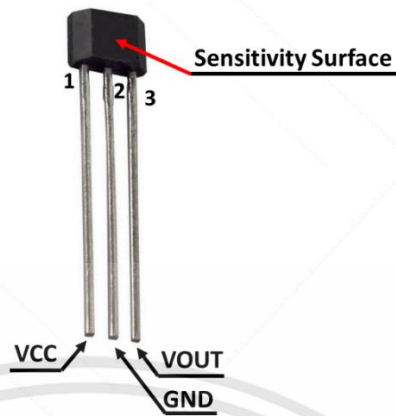
ในการทดลองจะเลือกใช้ฮีตเตอร์ที่มีขนาดดังรูปที่ 3.6 ทำหน้าที่ให้พลังงานความร้อนแก่น้ำมันหล่อลื่นซึ่งมีกำลังวัตต์เท่ากับ 1500 W



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดของฮีตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

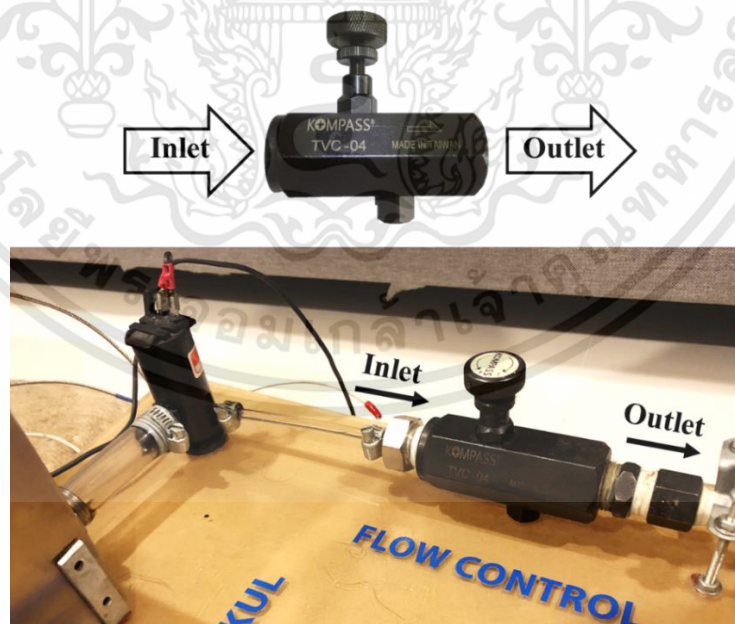
### 3.1.2 อุปกรณ์ฮอลล์



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ฮอลล์

อุปกรณ์ฮอลล์ดังรูปที่ 3.7 เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้าฮอลล์ โดยเอาต์พุตแปรผันตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านพื้นที่หน้าตัดของอุปกรณ์ฮอลล์ (Sensitivity Surface) ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อุปกรณ์ฮอลล์เบอร์ A1302 (Package UA, 3-Pin) มี 3 ขา โดยขาแรกคือขาที่ต่อเข้ากับไฟเลี้ยงขนาด 5 VDC ขาที่ 2 ต่อเข้ากับกราวด์ และขาที่ 3 เป็นขาสัญญาณที่จะนำสัญญาณเอาต์พุตไปใช้งานต่อไป

### 3.1.3 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล



รูปที่ 3.8 แสดงการใช้งานของอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

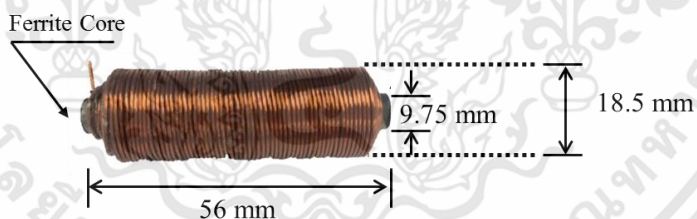
อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลดังรูปที่ 3.8 นั้นจะต่อเข้ากับปั๊มซึ่งทำหน้าที่เพิ่มหรือลดอัตราการไหลของของเหลวในระบบให้เป็นไปตามความต้องการของผู้ใช้งาน โดยอุปกรณ์นี้สามารถดำเนินงานที่ความดันสูงสุดเท่ากับ  $300 \text{ kgf/cm}^2$

### 3.1.4 ขดลวดโซลินอยด์



รูปที่ 3.9 แสดงแท่งเฟอร์ไรต์

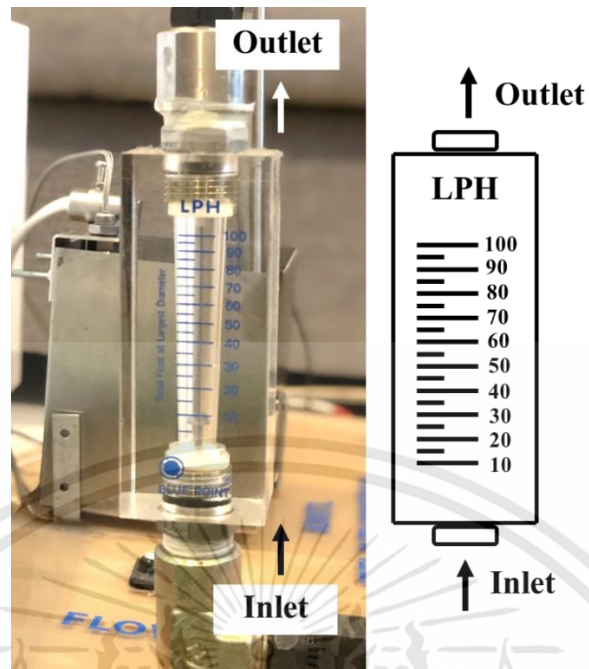
ในงานวิจัยนี้ใช้แท่งเฟอร์ไรต์ทรงกระบอกดังรูปที่ 3.9 มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $9.75 \text{ mm}$  และความยาวของแท่งเฟอร์ไรต์เท่ากับ  $56 \text{ mm}$  ซึ่งแท่งเฟอร์ไรต์นี้มีคุณสมบัติใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูง โดยพันด้วยขดลวดทองแดงเบอร์ SWG 22 จำนวน 712 รอบดังรูปที่ 3.10 ขดลวดโซลินอยด์นี้มีความเหนี่ยวนำเท่ากับ  $22.421 \text{ mH}$  และมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับ  $1.61 \text{ mT}$



รูปที่ 3.10 แสดงขนาดของขดลวดโซลินอยด์

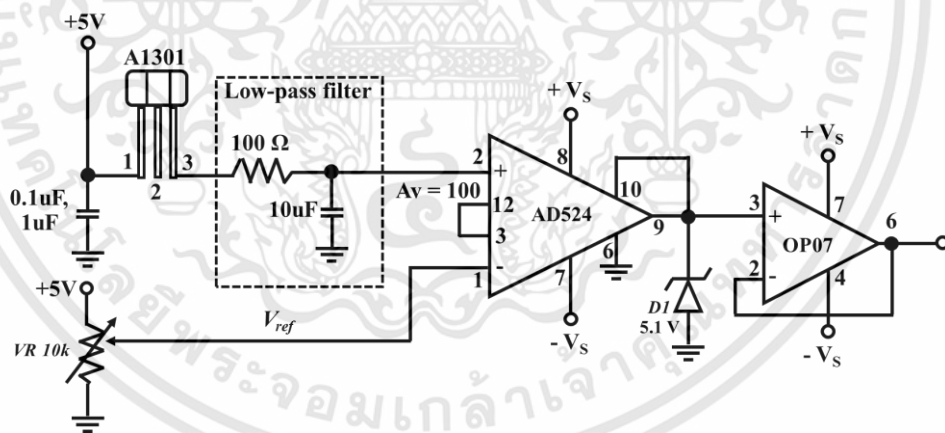
### 3.1.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

ในระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพน้ำมันหล่อลื่นจะติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลดังรูปที่ 3.11 เพื่อทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปในระบบ โดยอุปกรณ์ชนิดนี้ถูกผลิตขึ้นสำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่นโดยเฉพาะ เนื่องจากลูกกลอยที่บรรจุอยู่ในอุปกรณ์วัดอัตราการไหลนี้ถูกผลิตขึ้นตามค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งช่วงการวัดสามารถวัดได้ตั้งแต่  $0 \text{ LPH}$  ถึง  $100 \text{ LPH}$  และความละเอียดสเกลอยู่ที่  $5 \text{ LPH}$



รูปที่ 3.11 แสดงขนาดของอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

### 3.1.6 วงจรฮอลล์เอฟเฟค



รูปที่ 3.12 แสดงวงจรฮอลล์เอฟเฟค

สำหรับอุปกรณ์ฮอลล์ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะให้เอาต์พุตในหน่วยมิลลิโวลต์ ซึ่งทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ จึงต้องใช้วงจรดังรูปที่ 3.12 มาต่อร่วมกับอุปกรณ์ฮอลล์เพื่อทำหน้าที่ขยายสัญญาณและกรองสัญญาณรบกวน ในวงจรนั้นจะมีตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด  $10\text{ k}\Omega$  เพื่อทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้เอาต์พุตของอุปกรณ์ AD524 อยู่ในระดับของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงตลอดการทดลอง ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงมีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

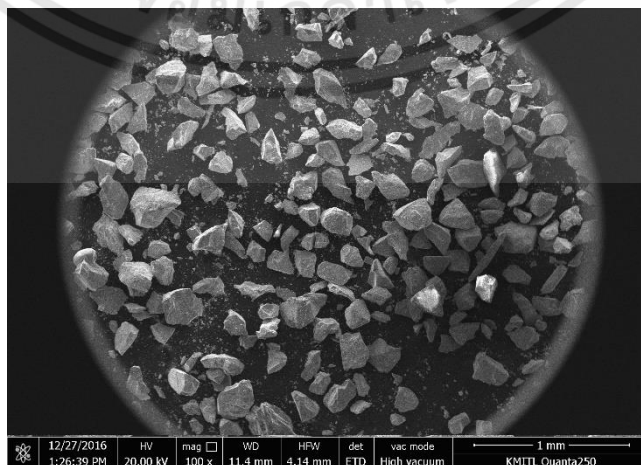
เปลี่ยนแปลงไป ถ้าหากค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่ได้อยู่ในระดับเดียวกันตลอดการทดลอง จะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองที่เปลี่ยนแปลงไป

### 3.1.7 อนุภาคโลหะอ้างอิง

ในงานวิจัยนี้จะใช้โลหะอ้างอิงดังรูปที่ 3.13 สำหรับทดสอบประสิทธิภาพการวัดของระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพน้ำมันหล่อลื่น เพื่อจำลองให้เสมือนการทำงานจริงของเครื่องจักรต่างๆ โดยอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่นเกิดมาจากหลายสาเหตุ อาทิเช่น การเสียดทานของชิ้นส่วนภายในของเครื่องจักรหรือเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้ การปนเปื้อนนั่นจะส่งผลให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพลดลง โดยอนุภาคโลหะที่ใช้ในการทดลองนั้นมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 216  $\mu\text{m}$  วิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ด้วยกำลังขยายที่ 100 เท่าดังรูปที่ 3.14 (ก) กำลังขยายที่ 200 เท่าดังรูปที่ 3.14 (ข) และ 1,000 เท่าดังรูปที่ 3.14 (ค)

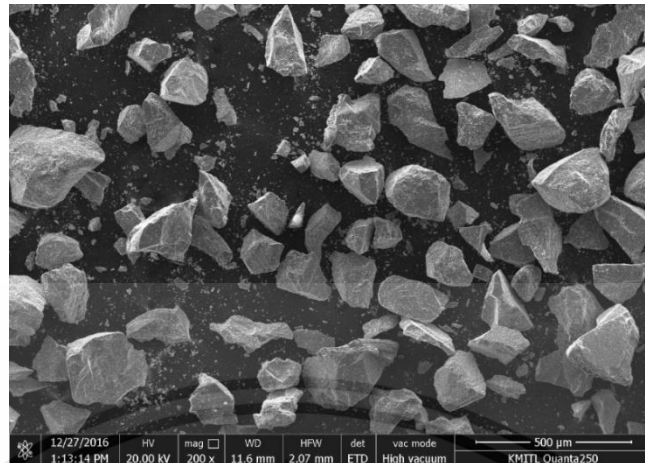


รูปที่ 3.13 แสดงอนุภาคโลหะจากมุมมองสายตาปกติ

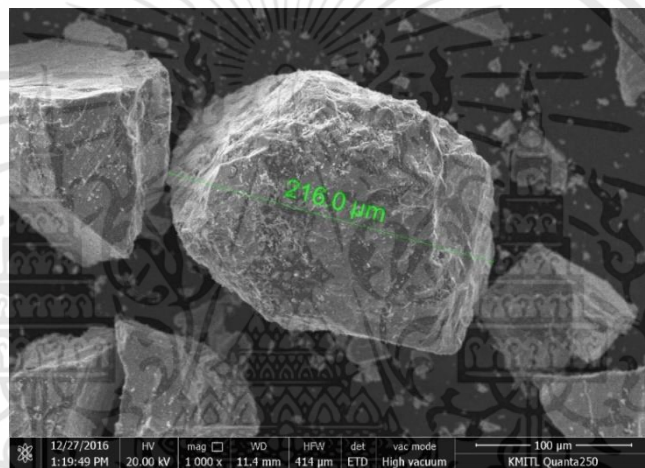


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.14 แสดงขนาดของอนุภาคโลหะที่วิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope

(ก) ขนาดของอนุภาคโลหะที่กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) ขนาดของอนุภาคโลหะที่กำลังขยาย 200 เท่า

(ค) ขนาดของอนุภาคโลหะที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.8 ตัวอย่างน้ำมันสำหรับการทดลอง

#### 3.1.8.1 น้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 32



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 32 สำหรับการทดลอง

(ก) ผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 32

(ข) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 32 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

(ค) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 32 ที่ผ่านการใช้งานจริง

#### 3.1.8.2 น้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 46



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.16 แสดงตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 46 สำหรับการทดลอง

(ก) ผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 46

(ข) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 46 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

(ค) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 46 ที่ผ่านการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.8.3 น้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 68



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 68 สำหรับการทดลอง

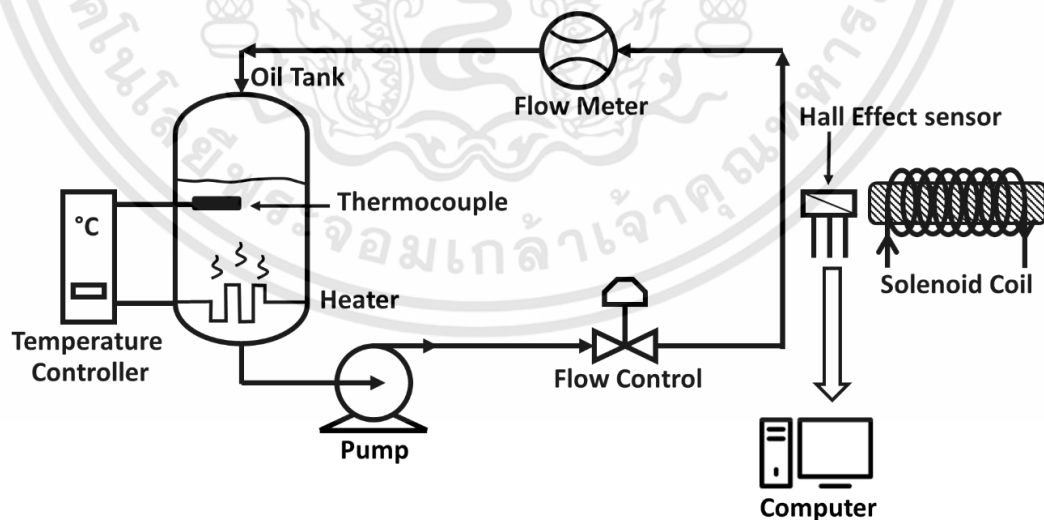
(ก) ผลิตภัณฑ์น้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 68

(ข) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 68 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

(ค) ตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่นไฮดรอลิกเบอร์ 68 ที่ผ่านการใช้งานจริง

## 3.2 วิธีดำเนินการระบบตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น

### 3.2.1 แผนผังการทำงานของระบบตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น



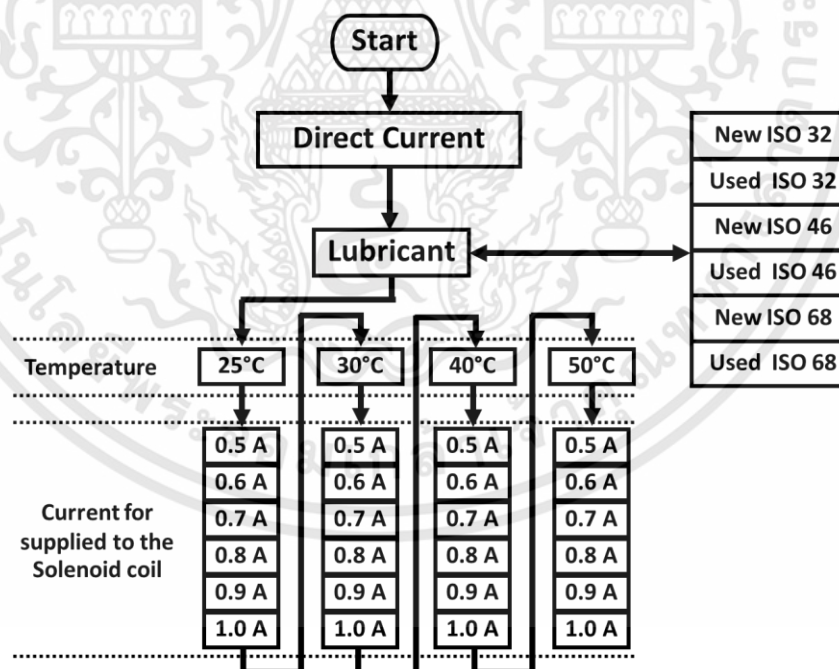
รูปที่ 3.18 แสดงแผนผังการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.18 แสดงถึงการไหลเวียนของน้ำมันในระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่น โดยเริ่มจากถังเก็บน้ำมันที่ติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น และฮีตเตอร์ทำหน้าที่ให้พลังงานความร้อนแก่น้ำมันหล่อลื่น ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสามนี้จะทำงานภายใต้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (PID Controller) จากนั้นปั๊มจะสูบน้ำมันส่งต่อไปยังอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหล และเข้าสู่บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างจากขดลวดโซลินอยด์ โดยมีอุปกรณ์ฮอลล์คั่นกลางระหว่างท่อน้ำมันและขดลวดโซลินอยด์เพื่อวัดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันโลหะ ค่าของการเปลี่ยนแปลงจะถูกขยายโดยวงจรขยายและส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผล เมื่อน้ำมันหล่อลื่นไหลผ่านบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแล้วจะไหลต่อไปยังอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ซึ่งทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของน้ำมันหล่อลื่น จากนั้นน้ำมันจะไหลไปยังถังเก็บน้ำมัน เป็นอันเสร็จสิ้นของการไหลเวียนของน้ำมันหล่อลื่นครบ 1 รอบ และเริ่มทดลองครั้งใหม่โดยเปลี่ยนตัวแปรในเรื่องของอุณหภูมิ ปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ และประเภทของกระแสไฟฟ้า

### 3.2.2 แผนการดำเนินการทดลอง

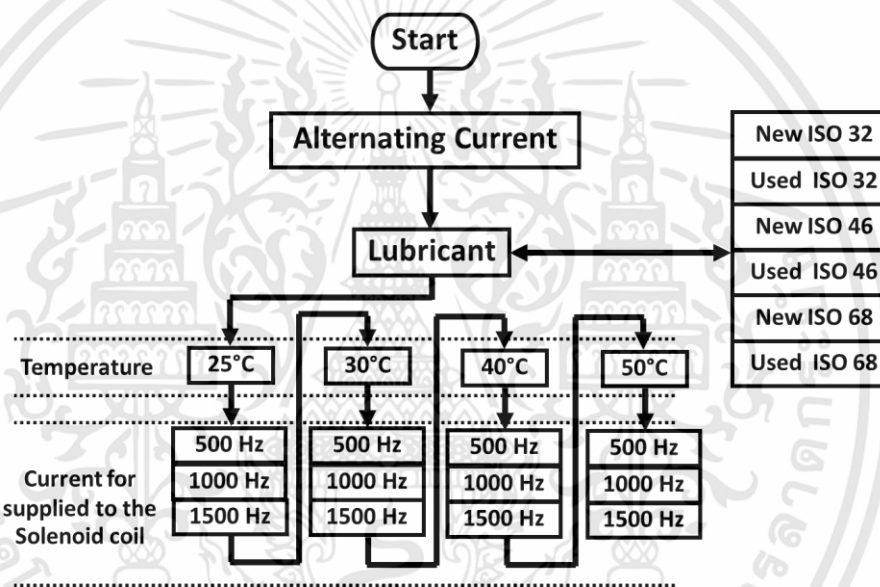
#### 3.2.2.1 แผนการดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.19 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง

ในการทดลองจะเริ่มจากไฟฟ้ากระแสตรง โดยเริ่มต้นจากน้ำมันใหม่เบอร์ 32 จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 25 °C และจ่ายกระแสค่าแรกคือ 0.5 A ให้กับขดลวดโซลินอยด์จนครบ 30 sec แล้วบันทึกผลการทดลอง จากนั้นเพิ่มปริมาณกระแสเป็น 0.6 A จนครบ 30 sec แล้วจึงบันทึกข้อมูล เป็นเช่นนี้จนถึงปริมาณกระแสที่ 1.0 A ดังรูปที่ 3.19 แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 30 °C และจ่ายกระแสตั้งแต่ 0.5 A จนถึง 1.0 A ให้กับขดลวดโซลินอยด์ เป็นเช่นนี้จนถึงอุณหภูมิที่ 50 °C จึงเปลี่ยนเป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วเบอร์ 32 โดยทดลองเหมือนกันกับน้ำมันใหม่เบอร์ 32 จนทดลองน้ำมันหล่อลื่นครบทุกประเภท

### 3.2.2.2 แผนการดำเนินการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ



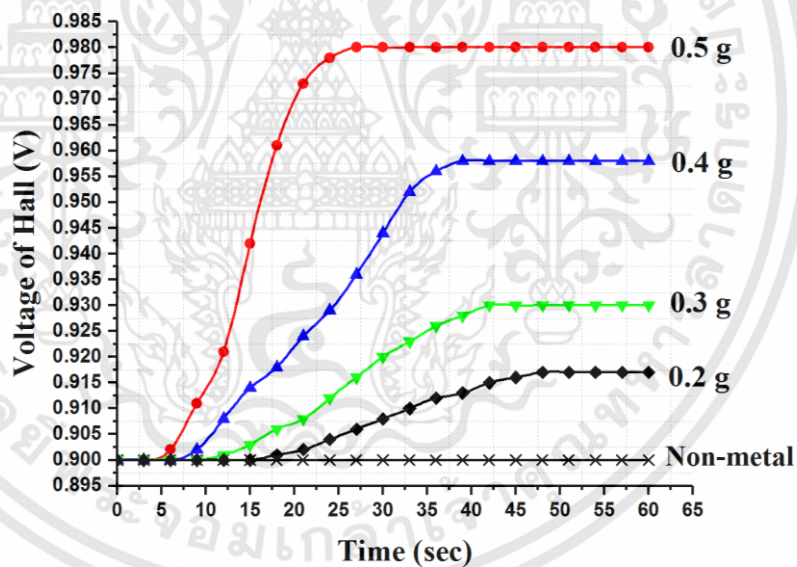
รูปที่ 3.20 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

การทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับนั้นจะเหมือนกับเงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง แต่เปลี่ยนตัวแปรของปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์มาเปลี่ยนความถี่ ดังรูปที่ 3.20

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

เนื้อหาของบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของระบบตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับอุปกรณ์ฮอลล์ โดยทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งในส่วนของไฟฟ้ากระแสตรงจะควบคุมตัวแปรในเรื่องของอุณหภูมิและปริมาณของกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ ผลการทดลองทั้งหมดจะมี 36 ผลการทดลอง และส่วนของไฟฟ้ากระแสสลับจะควบคุมตัวแปรในเรื่องของอุณหภูมิและความถี่ที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ ผลการทดลองทั้งหมดจะมี 6 ผลการทดลอง สำหรับผลการทดลองทั้งสองส่วนนั้นจะทดลองภายใต้การกระตุ้นขดลวดโซลินอยด์ที่มีความเหนี่ยวนำเท่ากับ 22.421 mH และสนามไฟฟ้าเท่ากับ 1.61 mT ตลอดจนจนปริมาณอนุภาคโลหะที่เลือกใช้ในการทดลองจะเลือกใช้ปริมาณที่ 0.5 g เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างน้ำมันที่ไม่มีการปนเปื้อนและมีการปนเปื้อนมากที่สุด ดังรูปที่ 4.1



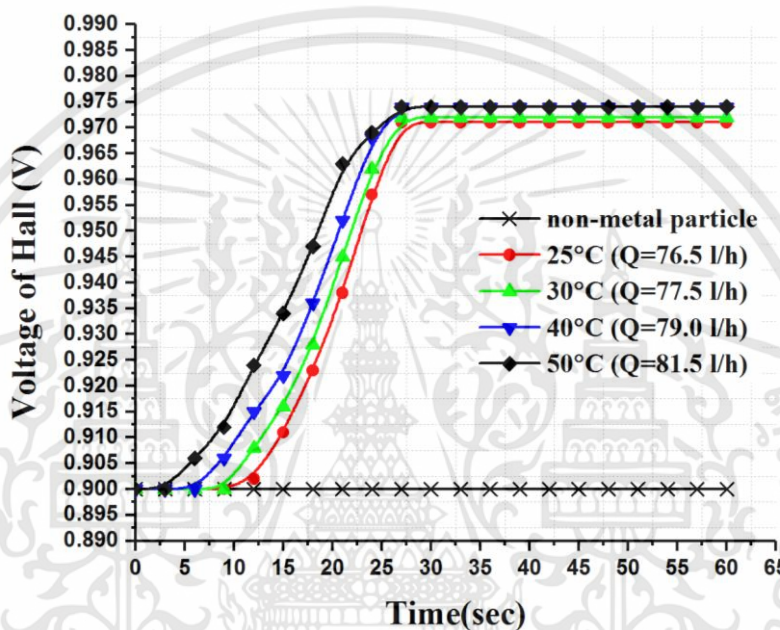
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอนุภาคโลหะในปริมาณที่แตกต่างกัน

### 4.1 ผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรง

โดยเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ตรวจวัดน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะและน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะ

#### 4.1.1 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.5 A  
 Time = 60 sec

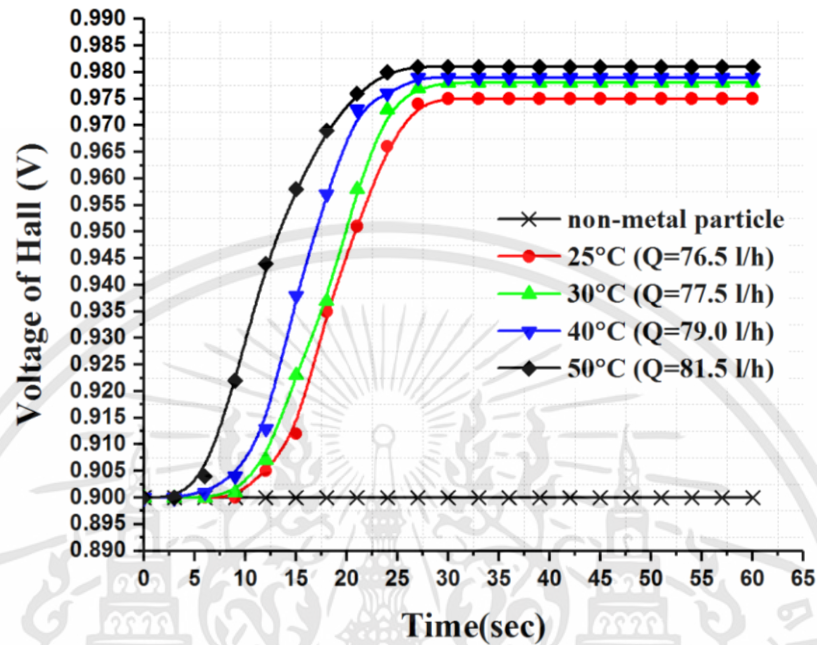


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.071
30°C	77.5	0.072
40°C	79.0	0.074
50°C	81.5	0.074

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.6 A  
 Time = 60 sec



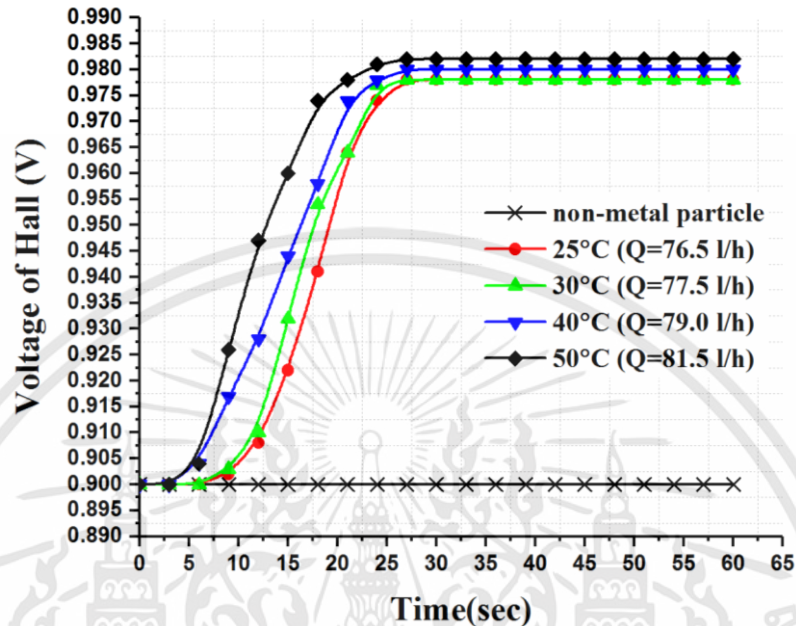
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.075
30°C	77.5	0.078
40°C	79.0	0.079
50°C	81.5	0.081

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.7 A  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A

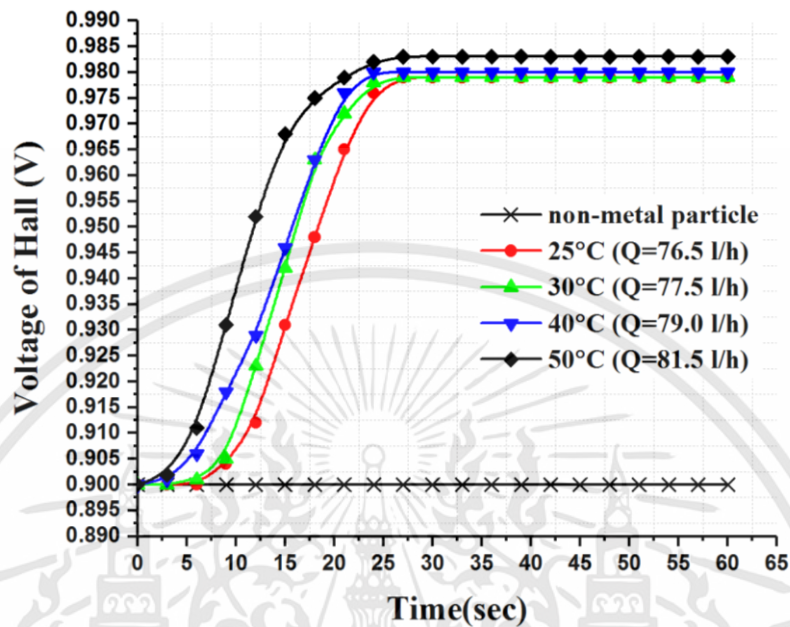
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.078
30°C	77.5	0.078
40°C	79.0	0.080
50°C	81.5	0.082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32

Electric Current for Solenoid = 0.8 A

Time = 60 sec



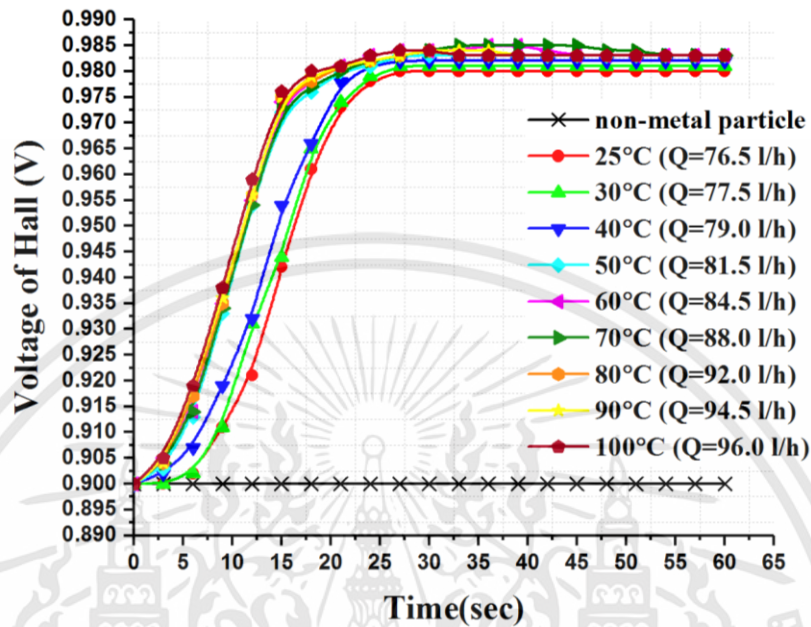
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.079
30°C	77.5	0.079
40°C	79.0	0.080
50°C	81.5	0.083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.9 A  
 Time = 60 sec



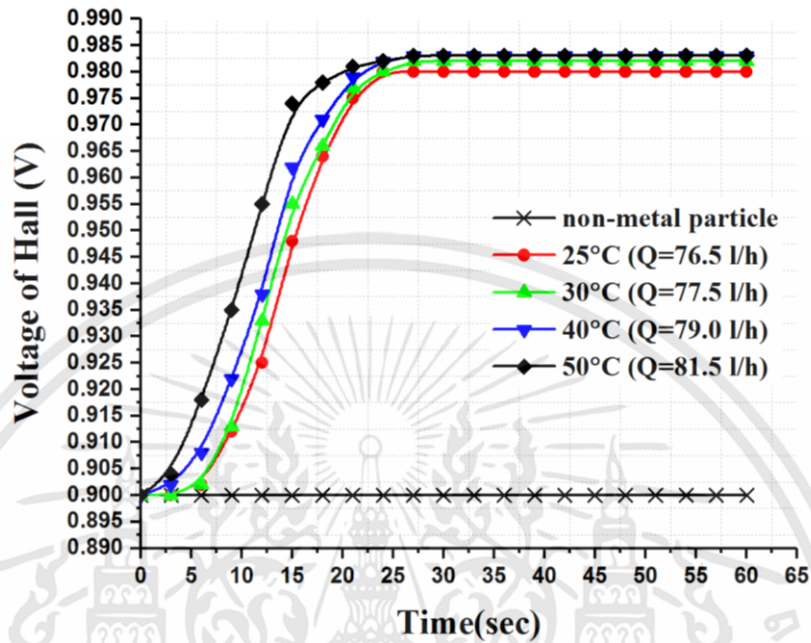
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.080
30°C	77.5	0.081
40°C	79.0	0.082
50°C	81.5	0.083
60°C	84.5	0.083
70°C	88.0	0.083
80°C	92.0	0.083
90°C	94.5	0.083
100°C	96.0	0.083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 1.0 A  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.080
30°C	77.5	0.082
40°C	79.0	0.083
50°C	81.5	0.083

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.7 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ ภายใต้อุณหภูมิของอุณหภูมิและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดก็จะลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.6 ทำให้อนุภาคโลหะเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์ได้เร็ว ดังนั้นเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดโดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ รูปที่ 4.7, รูปที่ 4.6, รูปที่ 4.5, รูปที่ 4.4, รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ

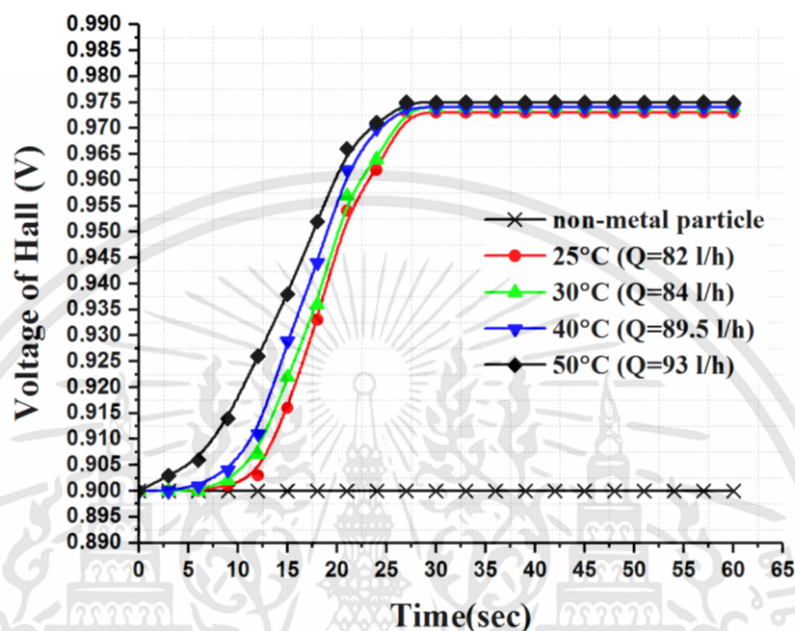
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32

Electric Current for Solenoid = 0.5 A

Time = 60 sec



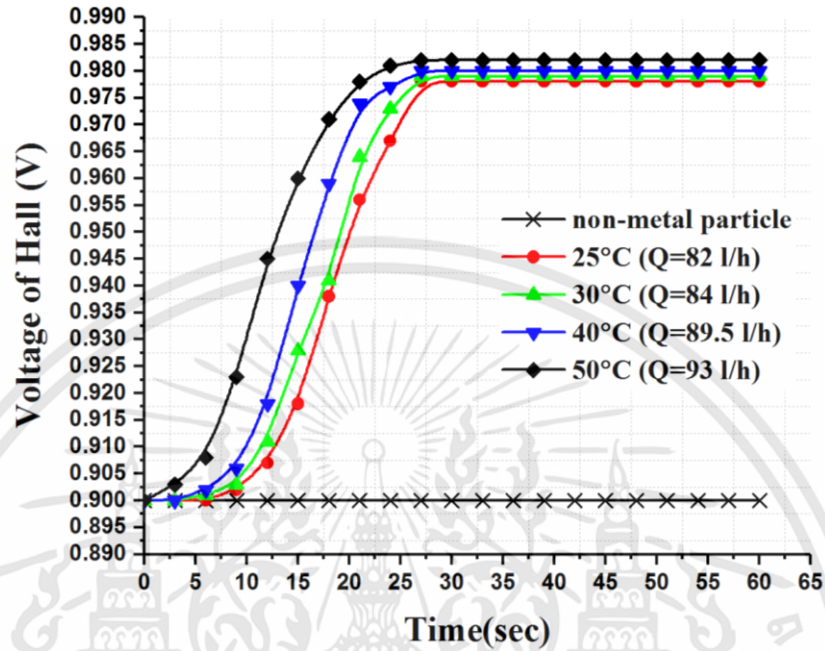
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32

เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.073
30°C	84.0	0.074
40°C	89.5	0.074
50°C	93.0	0.075

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.6 A  
 Time = 60 sec



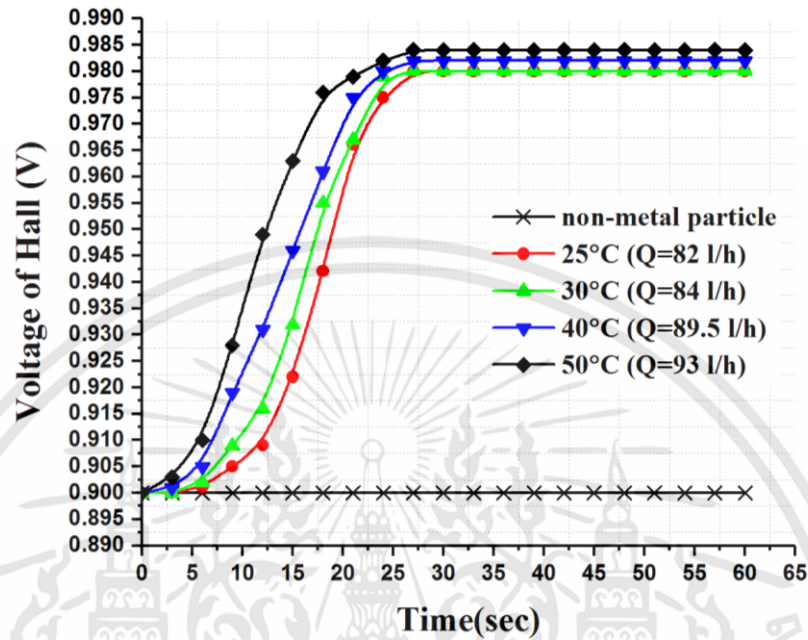
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.078
30°C	84.0	0.079
40°C	89.5	0.080
50°C	93.0	0.082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.7 A  
 Time = 60 sec



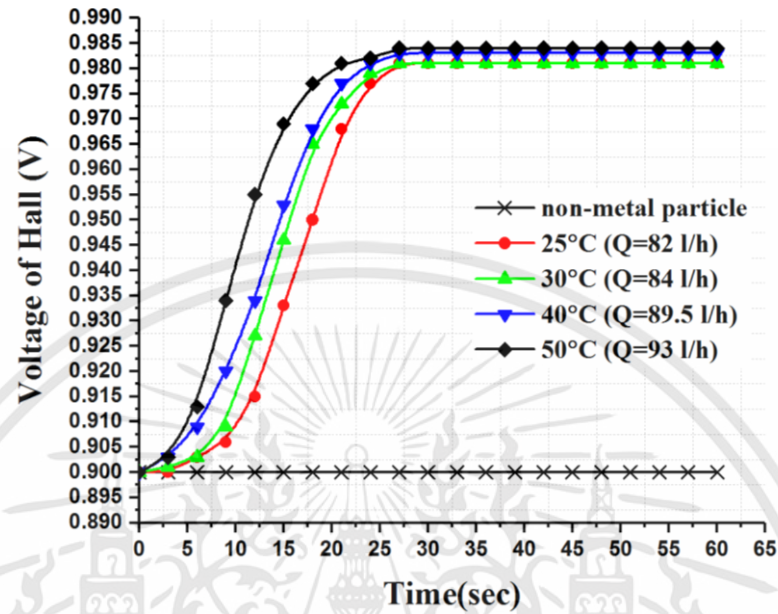
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.080
30°C	84.0	0.080
40°C	89.5	0.082
50°C	93.0	0.084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.8 A  
 Time = 60 sec



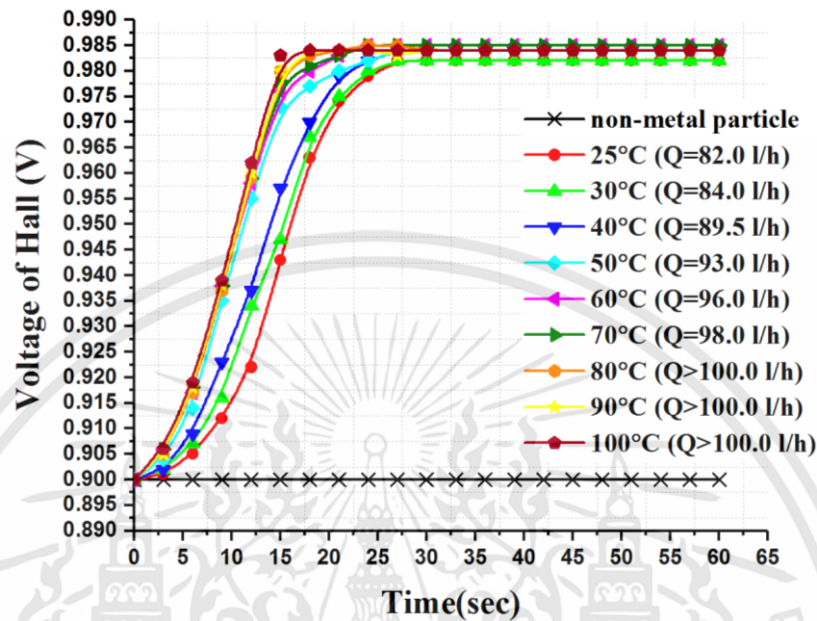
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.081
30°C	84.0	0.081
40°C	89.5	0.083
50°C	93.0	0.084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 0.9 A  
 Time = 30 sec



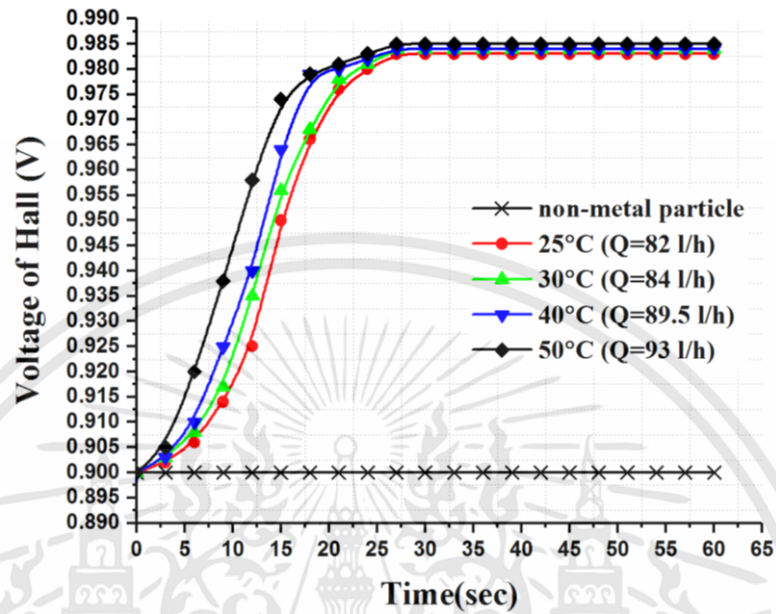
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 5

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.082
30°C	84.0	0.082
40°C	89.5	0.084
50°C	93.0	0.084
60°C	96.0	0.085
70°C	98.0	0.085
80°C	>100.0	0.084
90°C	>100.0	0.084
100°C	>100.0	0.084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
 Electric Current for Solenoid = 1.0 A  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ครั้งที่ 6

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.083
30°C	84.0	0.084
40°C	89.5	0.084
50°C	93.0	0.085

จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.13 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดก็จะลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.7 ถึง 4.12 ดังนั้นเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดโดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ รูปที่ 4.13, รูปที่ 4.12, รูปที่ 4.11, รูปที่ 4.10, รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.8 ตามลำดับ โดยน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีอัตราการไหลที่สูงกว่าน้ำมันใหม่ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า

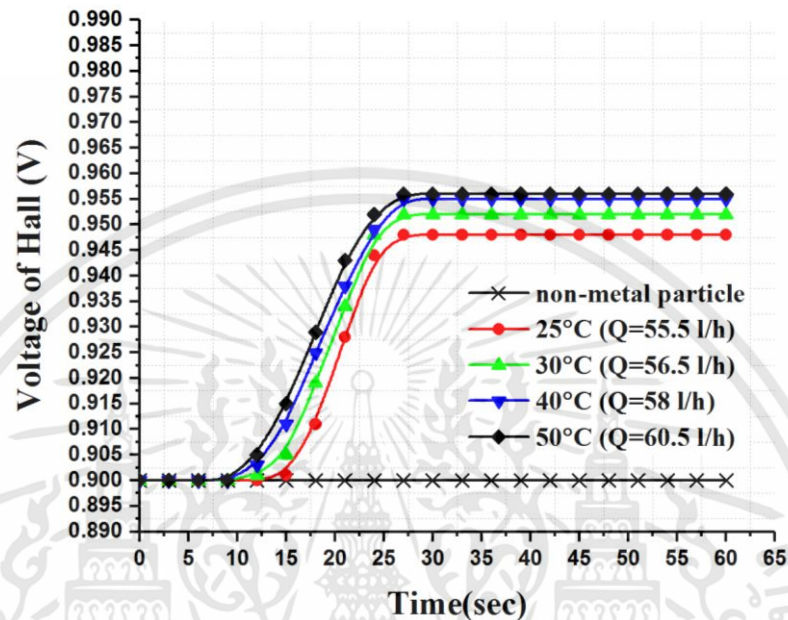
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46

Electric Current for Solenoid = 0.5 A

Time = 60 sec



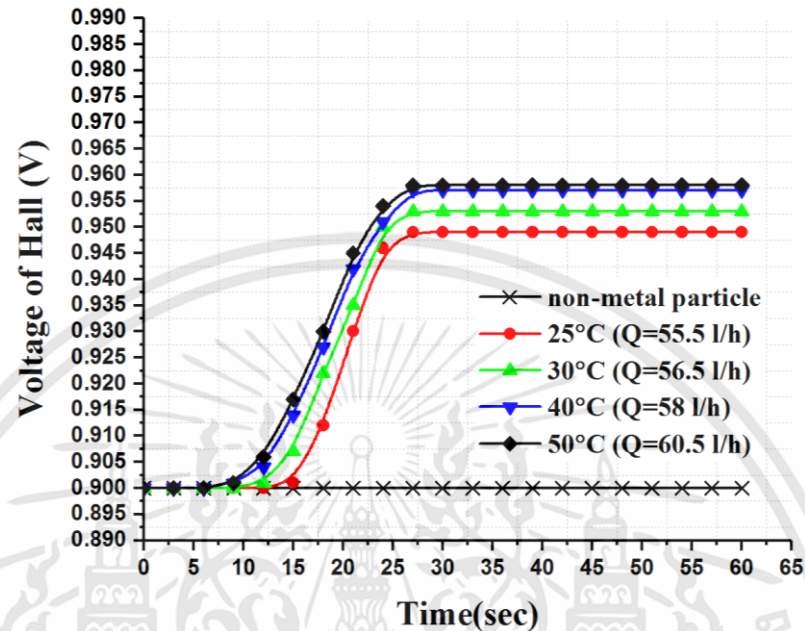
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 1

#### ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46

เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.048
30°C	56.5	0.052
40°C	58.0	0.055
50°C	60.5	0.056

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.6 A  
 Time = 60 sec



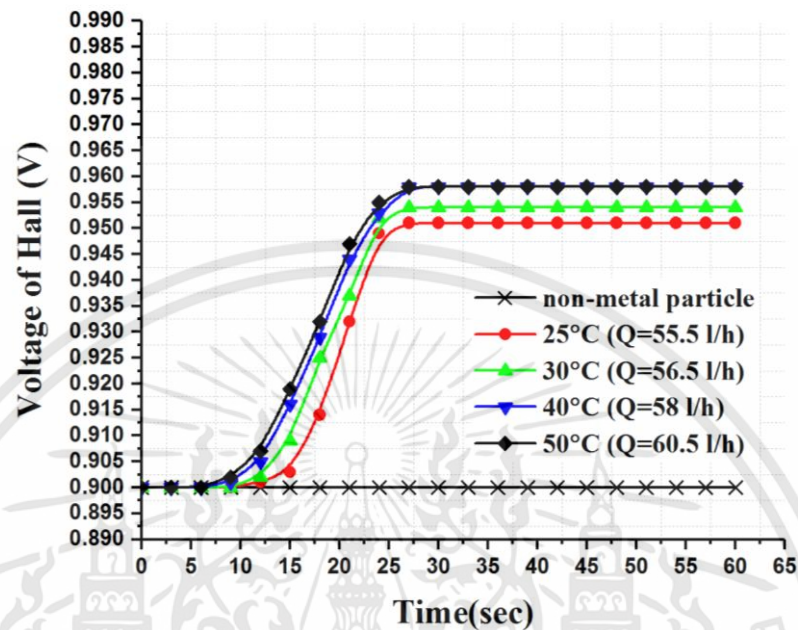
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.049
30°C	56.5	0.053
40°C	58.0	0.057
50°C	60.5	0.058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.7 A  
 Time = 60 sec



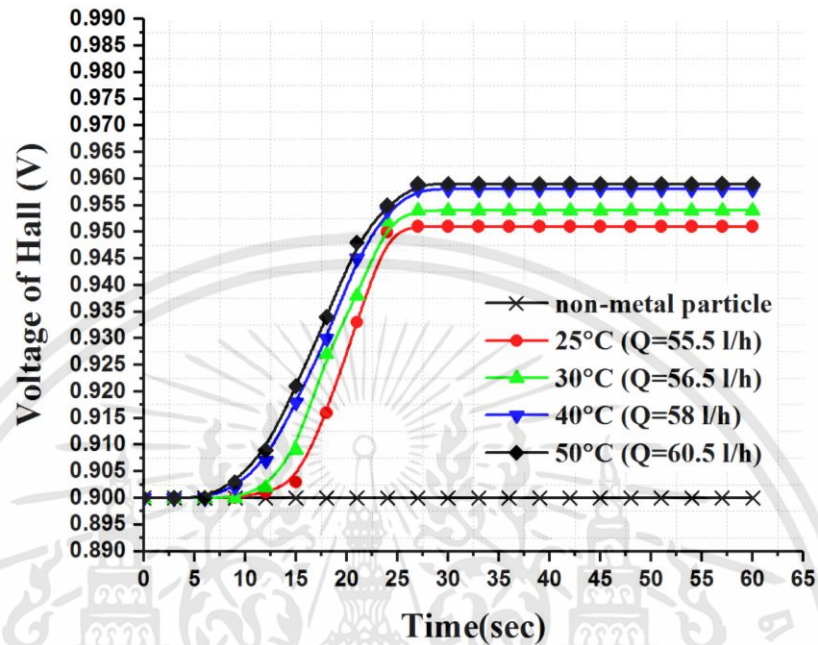
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.051
30°C	56.5	0.054
40°C	58.0	0.058
50°C	60.5	0.058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.8 A  
 Time = 60 sec

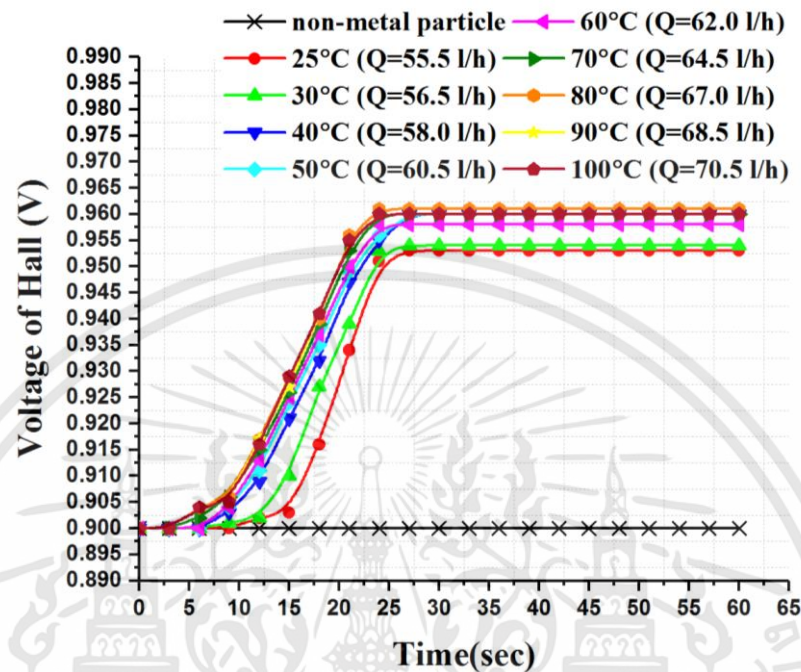


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.051
30°C	56.5	0.054
40°C	58.0	0.058
50°C	60.5	0.059

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.9 A  
 Time = 60 sec



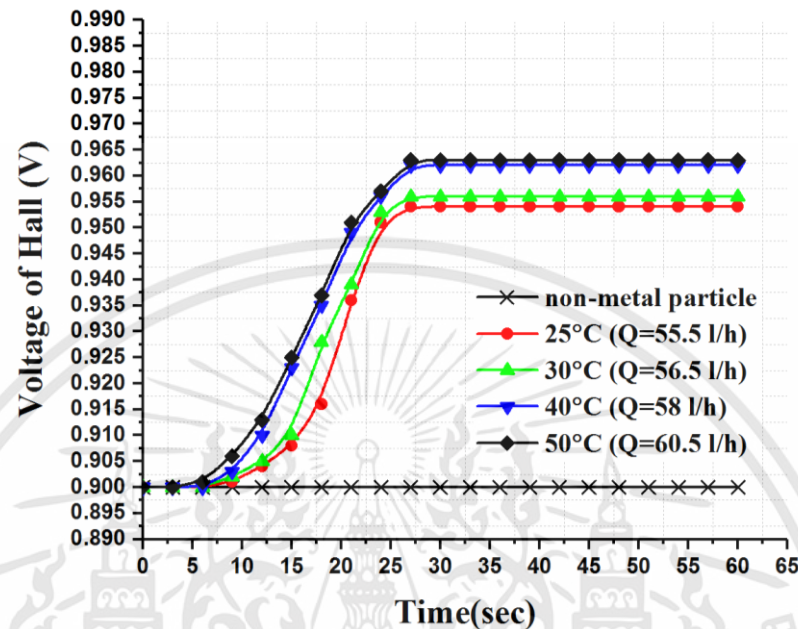
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 5

ตารางที่ 4.17 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.053
30°C	56.5	0.054
40°C	58.0	0.060
50°C	60.5	0.060
60°C	62.0	0.058
70°C	64.5	0.060
80°C	67.0	0.061
90°C	68.5	0.060
100°C	70.5	0.060

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 1.0 A  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 6

ตารางที่ 4.18 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.054
30°C	56.5	0.056
40°C	58.0	0.062
50°C	60.5	0.063

จากรูปที่ 4.14 ถึง 4.19 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดก็จะลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.13 ถึง 4.18 ทำให้อุณหภูมิโลหะเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์ได้เร็ว ดังนั้นเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดโดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ รูปที่ 4.19, รูปที่ 4.18, รูปที่ 4.17, รูปที่ 4.16, รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.14 ตามลำดับ

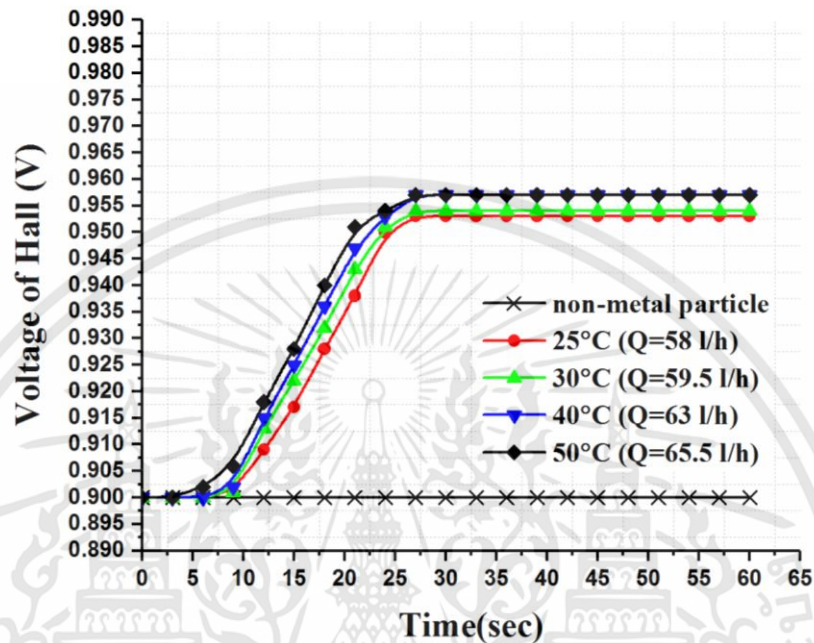
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.4 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46

Electric Current for Solenoid = 0.5 A

Time = 60 sec

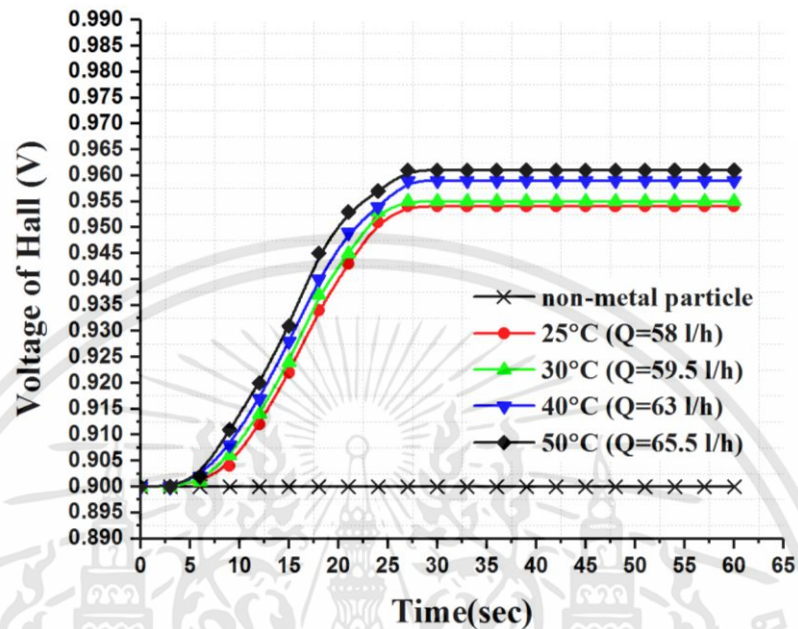


รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.19 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.053
30°C	59.5	0.054
40°C	63.0	0.057
50°C	65.5	0.057

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.6 A  
 Time = 60 sec



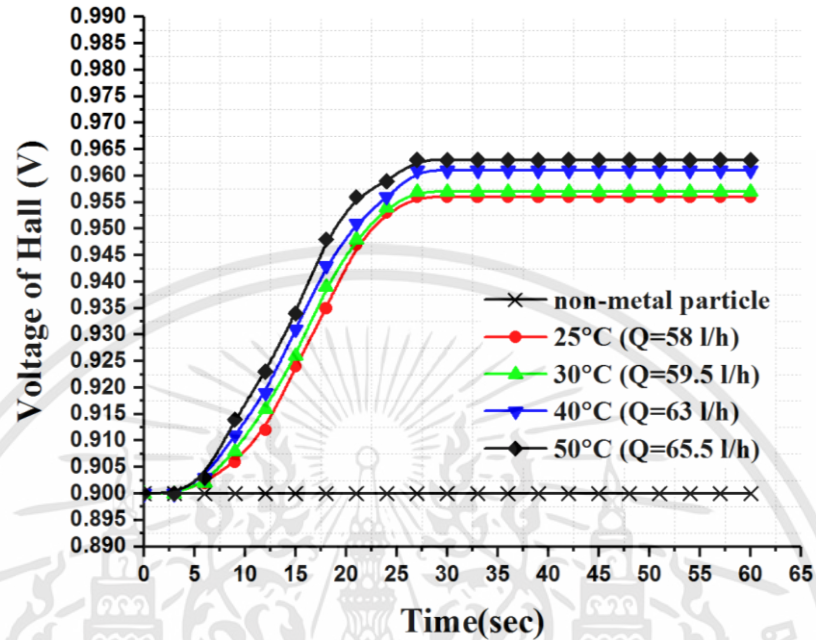
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.20 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.054
30°C	59.5	0.055
40°C	63.0	0.059
50°C	65.5	0.061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.7 A  
 Time = 60 sec



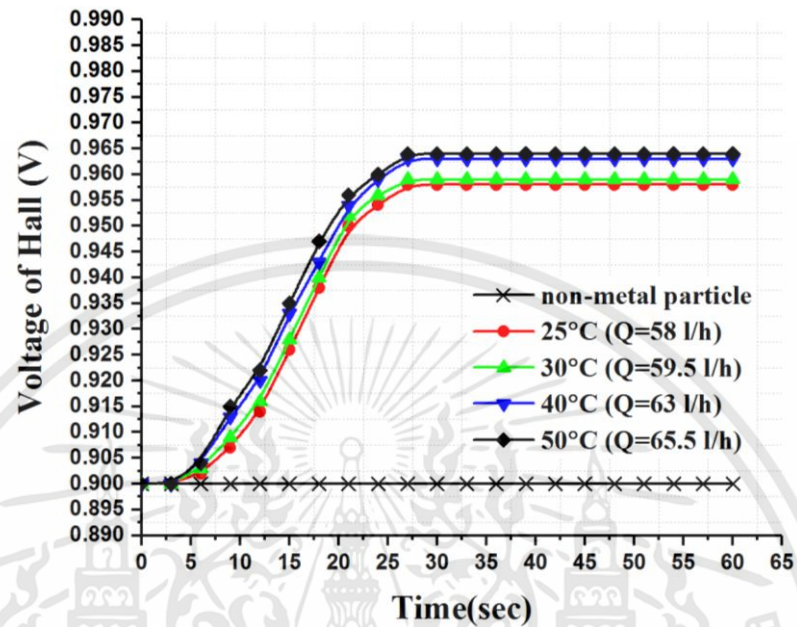
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.21 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.056
30°C	59.5	0.057
40°C	63.0	0.061
50°C	65.5	0.063

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.8 A  
 Time = 60 sec



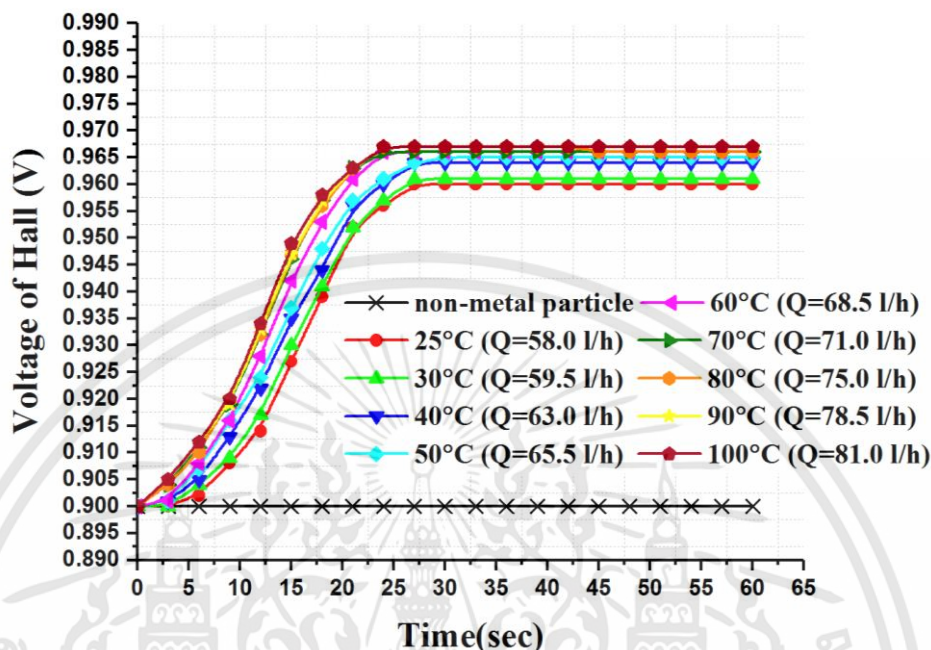
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.22 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.058
30°C	59.5	0.059
40°C	63.0	0.063
50°C	65.5	0.064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 0.9 A  
 Time = 60 sec

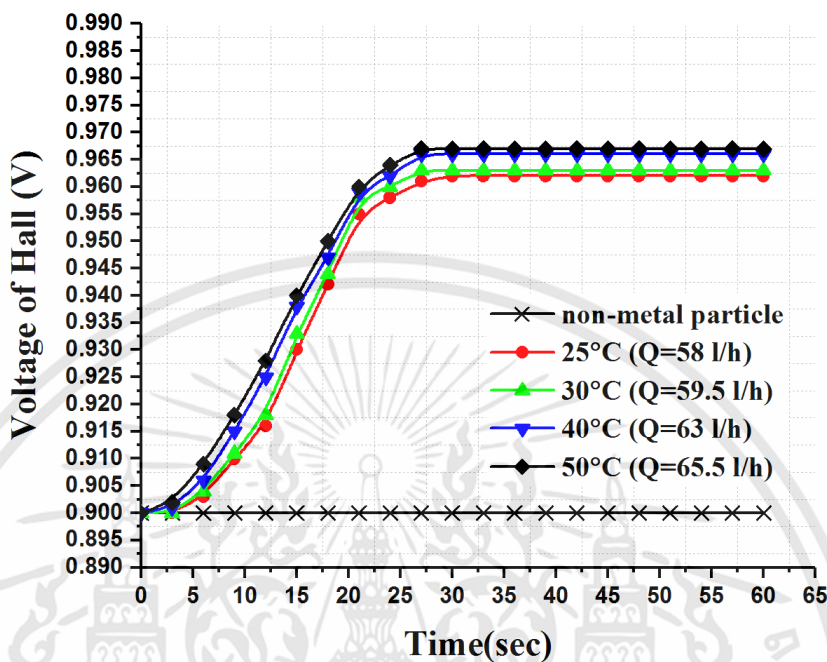


รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 5

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.060
30°C	59.5	0.061
40°C	63.0	0.064
50°C	65.5	0.065
60°C	68.5	0.066
70°C	71.0	0.066
80°C	75.0	0.066
90°C	78.5	0.067
100°C	81.0	0.067

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Electric Current for Solenoid = 1.0 A  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ครั้งที่ 6

ตารางที่ 4.24 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.062
30°C	59.5	0.063
40°C	63.0	0.066
50°C	65.5	0.067

จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.25 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ ภายใต้อุณหภูมิของอุณหภูมิและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความ หนืดก็จะลดลงดังตารางที่ 4.19 ถึง 4.24 ดังนั้นเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไป มากที่สุดโดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ รูปที่ 4.25, รูปที่ 4.24, รูปที่ 4.23, รูปที่ 4.22, รูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ โดยน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีอัตราการไหลที่สูงกว่าน้ำมันใหม่ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า

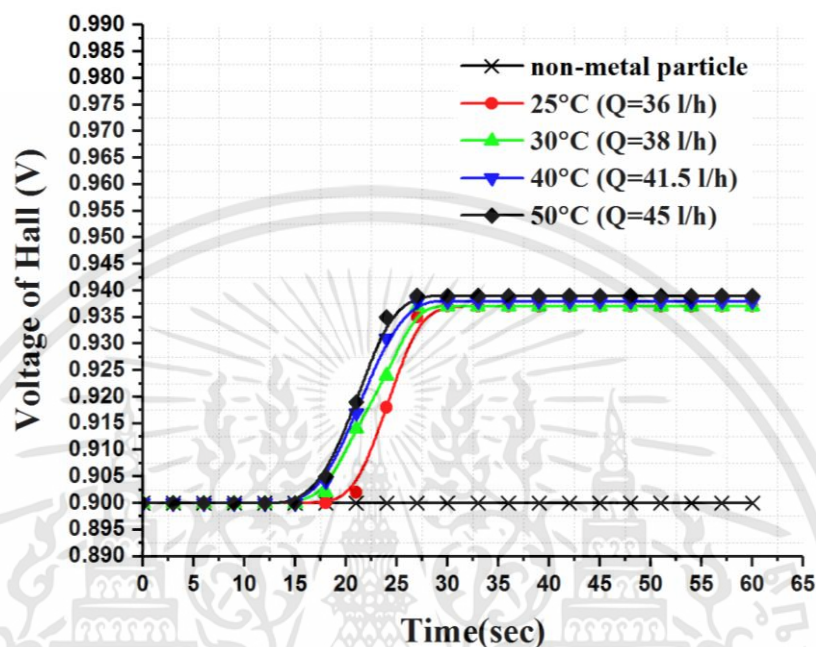
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68

Electric Current for Solenoid = 0.5 A

Time = 60 sec



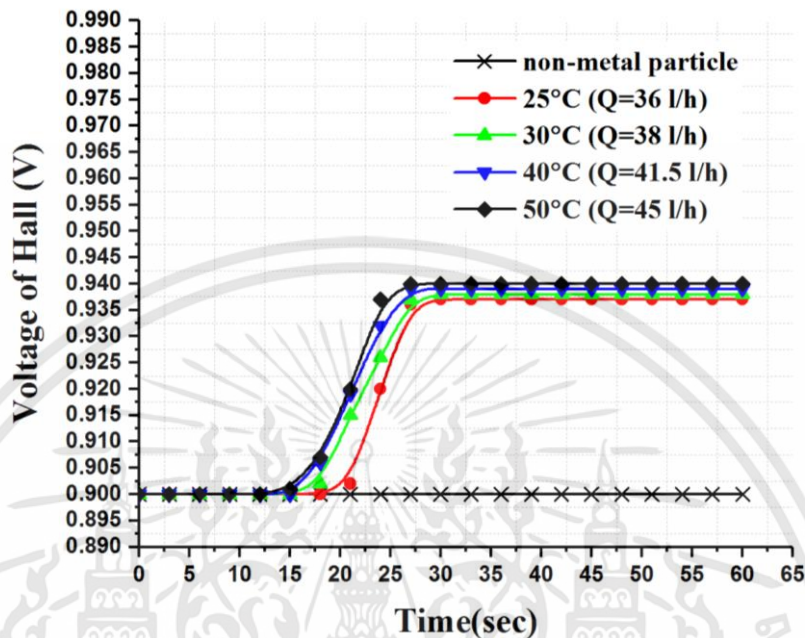
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.25 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68

เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.037
30°C	38.0	0.037
40°C	41.5	0.038
50°C	45.0	0.039

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.6 A  
 Time = 60 sec

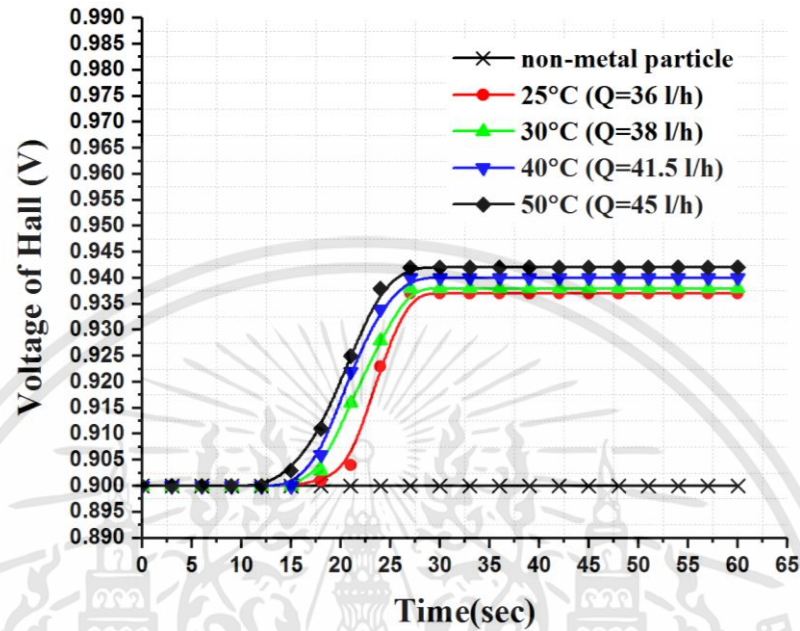


รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.26 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.037
30°C	38.0	0.038
40°C	41.5	0.039
50°C	45.0	0.040

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.7 A  
 Time = 60 sec



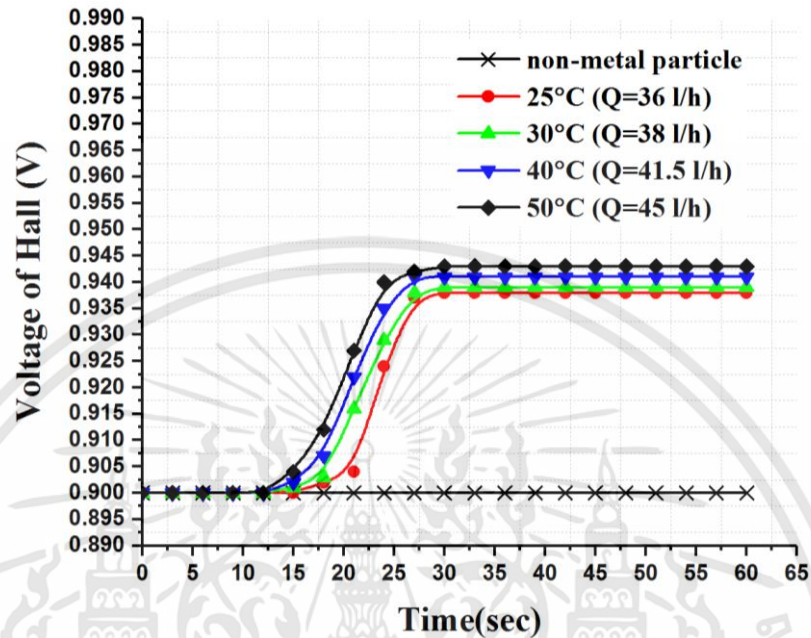
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.27 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.037
30°C	38.0	0.038
40°C	41.5	0.040
50°C	45.0	0.042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.8 A  
 Time = 60 sec



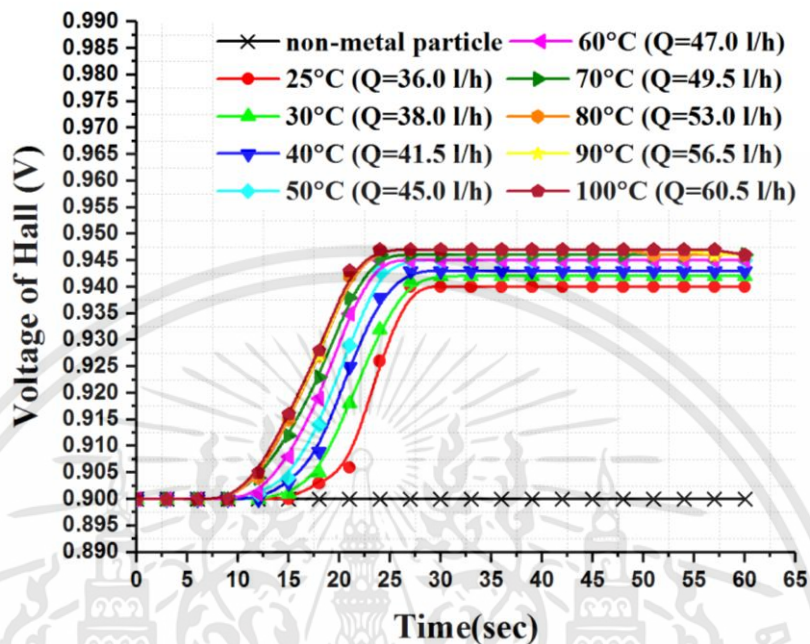
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.28 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.038
30°C	38.0	0.039
40°C	41.5	0.041
50°C	45.0	0.043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.9 A  
 Time = 60 sec



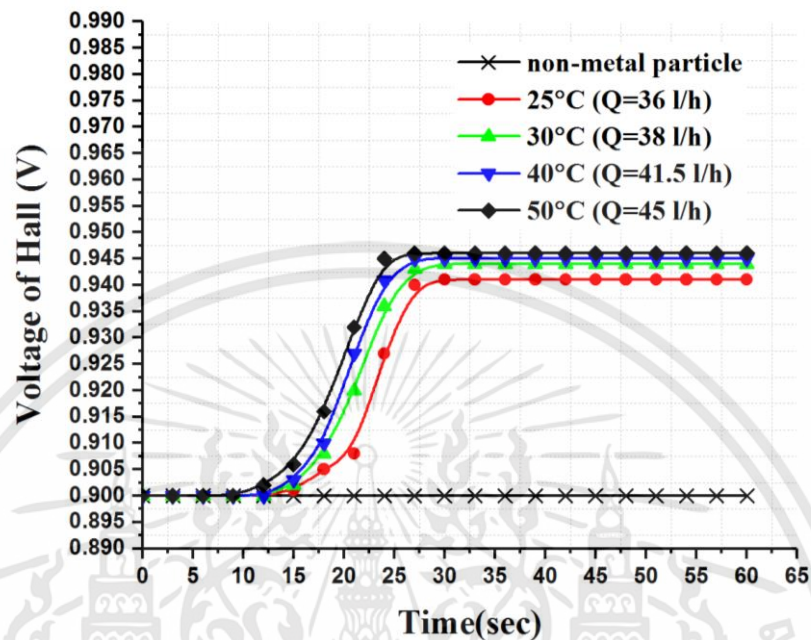
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 5

ตารางที่ 4.29 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.040
30°C	38.0	0.042
40°C	41.5	0.043
50°C	45.0	0.045
60°C	47.0	0.045
70°C	49.5	0.046
80°C	53.0	0.046
90°C	56.5	0.046
100°C	60.5	0.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 1.0 A  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 6

ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.041
30°C	38.0	0.044
40°C	41.5	0.045
50°C	45.0	0.046

จากรูปที่ 4.26 ถึง 4.31 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ ภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดก็จะลดลง ส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.25 ถึง 4.30 ทำให้อุณหภูมิโลหะเคลื่อนที่เข้าสู่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์ได้เร็ว ดังนั้นเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดโดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ รูปที่ 4.31, รูปที่ 4.30, รูปที่ 4.29, รูปที่ 4.28, รูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.26 ตามลำดับ

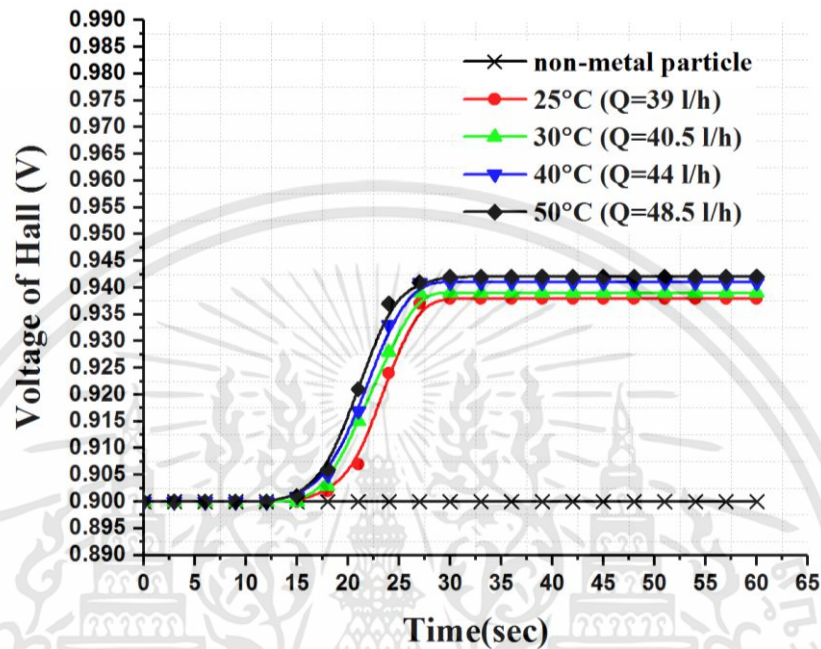
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.6 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68

Electric Current for Solenoid = 0.5 A

Time = 60 sec

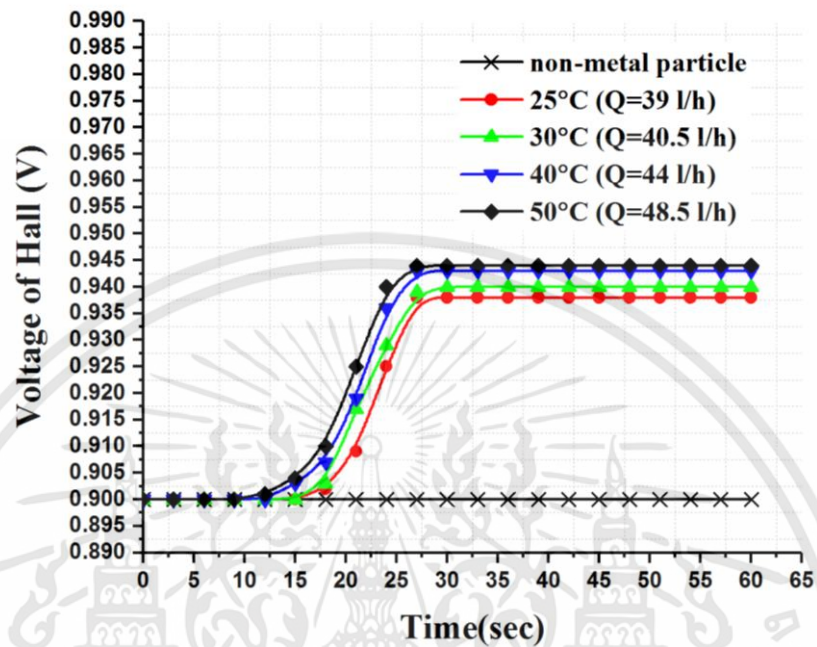


รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.31 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.038
30°C	40.5	0.039
40°C	44.0	0.041
50°C	48.5	0.042

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.6 A  
 Time = 60 sec



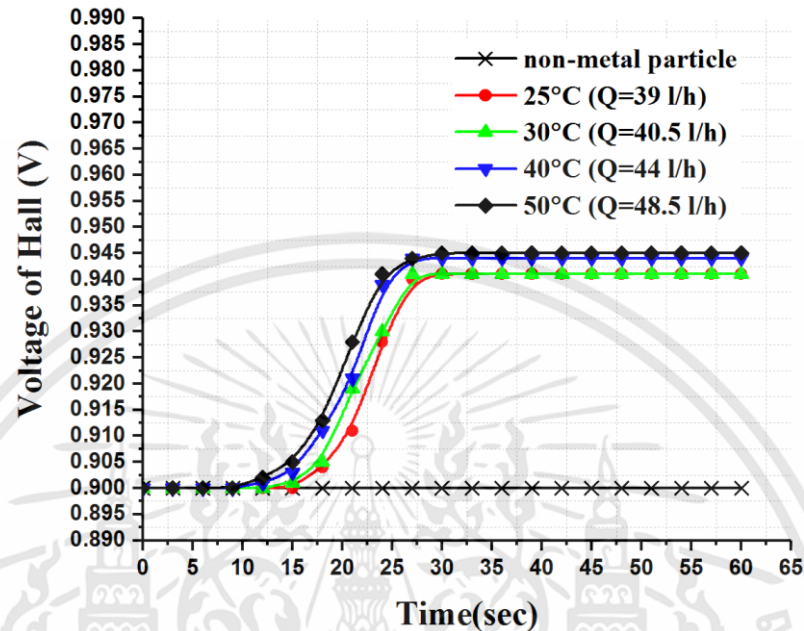
รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.32 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.6 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.038
30°C	40.5	0.040
40°C	44.0	0.043
50°C	48.5	0.044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.7 A  
 Time = 60 sec



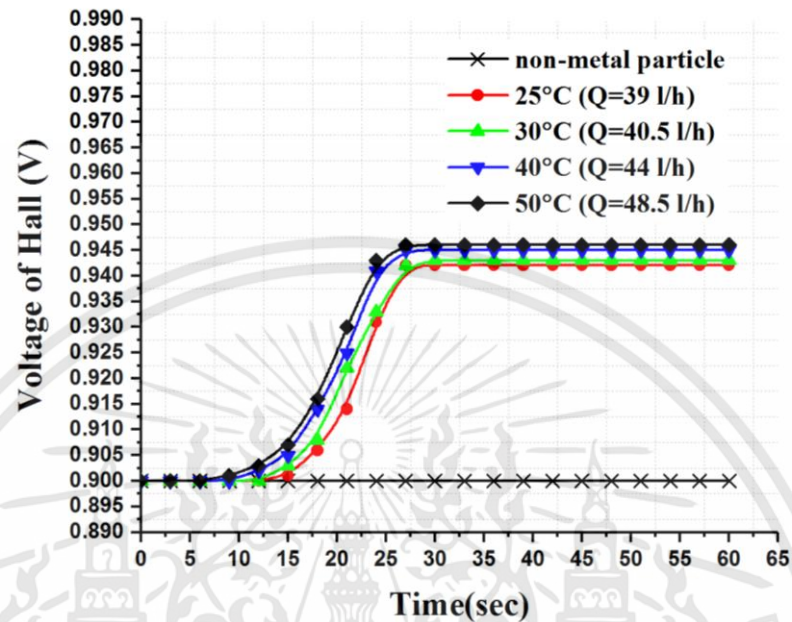
รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.33 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.7 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.041
30°C	40.5	0.041
40°C	44.0	0.044
50°C	48.5	0.045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.8 A  
 Time = 60 sec



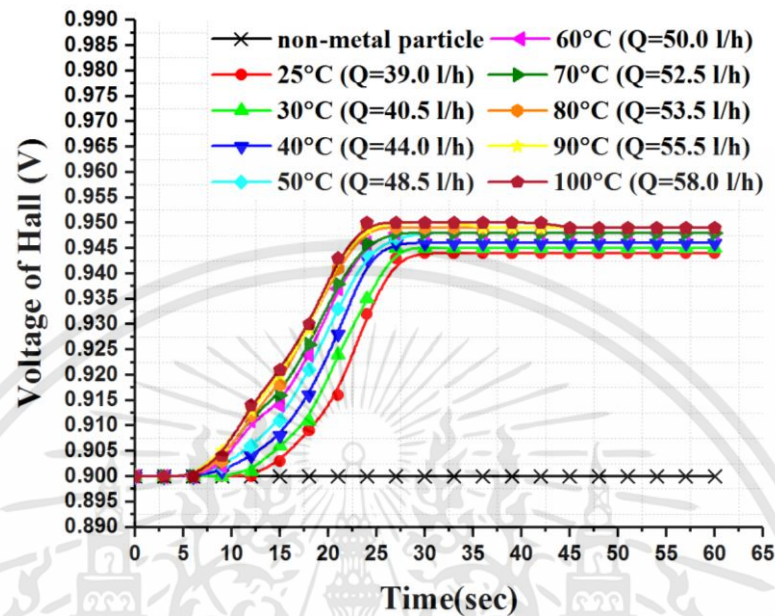
รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.34 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.8 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.042
30°C	40.5	0.043
40°C	44.0	0.045
50°C	48.5	0.046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 0.9 A  
 Time = 60 sec



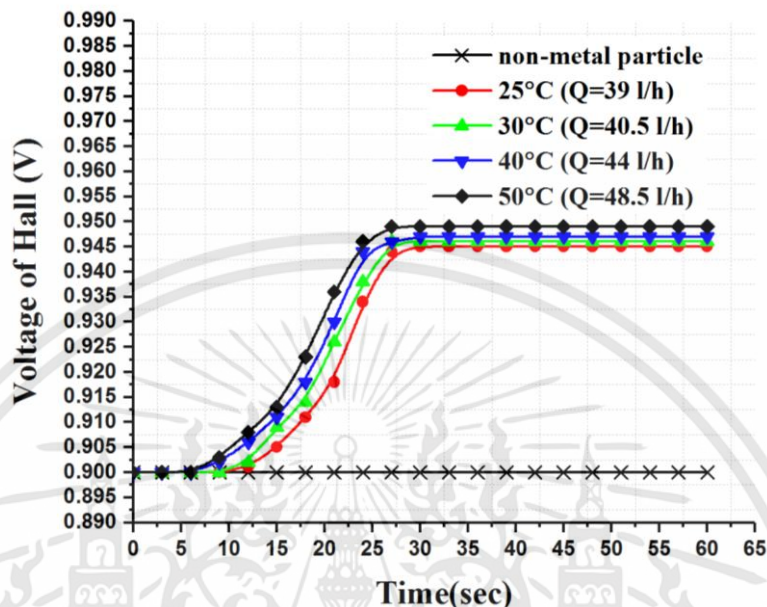
รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 5

ตารางที่ 4.35 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.9 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.044
30°C	40.5	0.045
40°C	44.0	0.046
50°C	48.5	0.048
60°C	50.0	0.048
70°C	52.5	0.048
80°C	53.5	0.049
90°C	55.5	0.049
100°C	58.0	0.049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68  
 Electric Current for Solenoid = 1.0 A  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ครั้งที่ 6

ตารางที่ 4.36 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1.0 A

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.045
30°C	40.5	0.046
40°C	44.0	0.047
50°C	48.5	0.049

จากรูปที่ 4.32 ถึง 4.37 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์ เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดก็จะลดลงดังตารางที่ 4.31 ถึง 4.36 ดังนั้นเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์จะเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดโดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ รูปที่ 4.37, รูปที่ 4.36, รูปที่ 4.35, รูปที่ 4.34, รูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.32 ตามลำดับ โดยน้ำมันที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีอัตราการไหลที่สูงกว่าน้ำมันใหม่ ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า

## 4.2 ผลการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

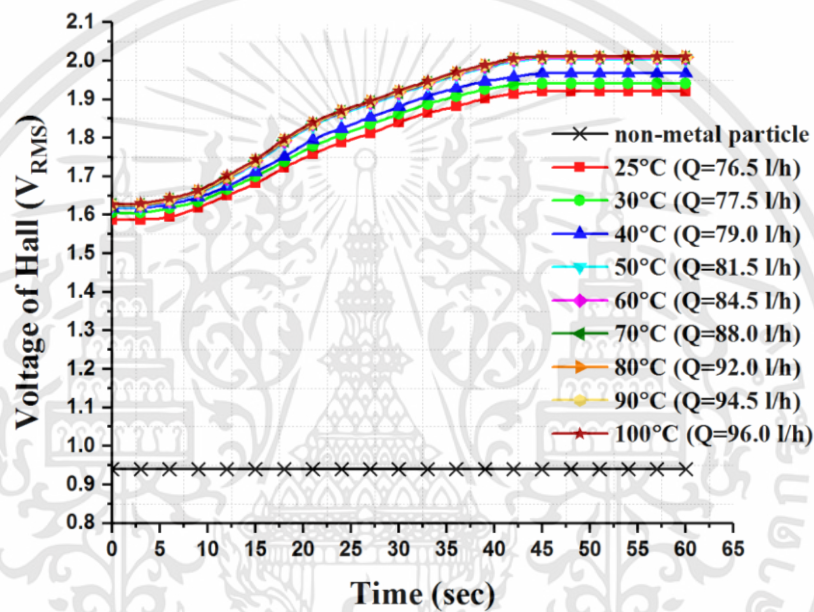
โดยเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ตรวจวัดน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะและน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะ

### 4.2.1 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32

Frequency = 500 Hz

Time = 60 sec



รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 500 Hz

ตารางที่ 4.37 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.981
30°C	77.5	1.002
40°C	79.0	1.028
50°C	81.5	1.064

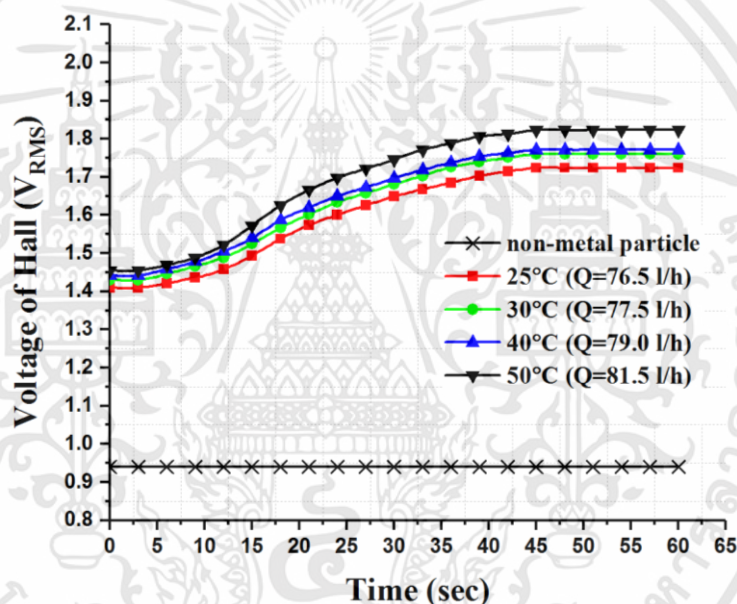
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
60°C	84.5	1.067
70°C	88.0	1.069
80°C	92.0	1.070
90°C	94.5	1.071
100°C	96.0	1.071

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32

Frequency = 1000 Hz

Time = 60 sec



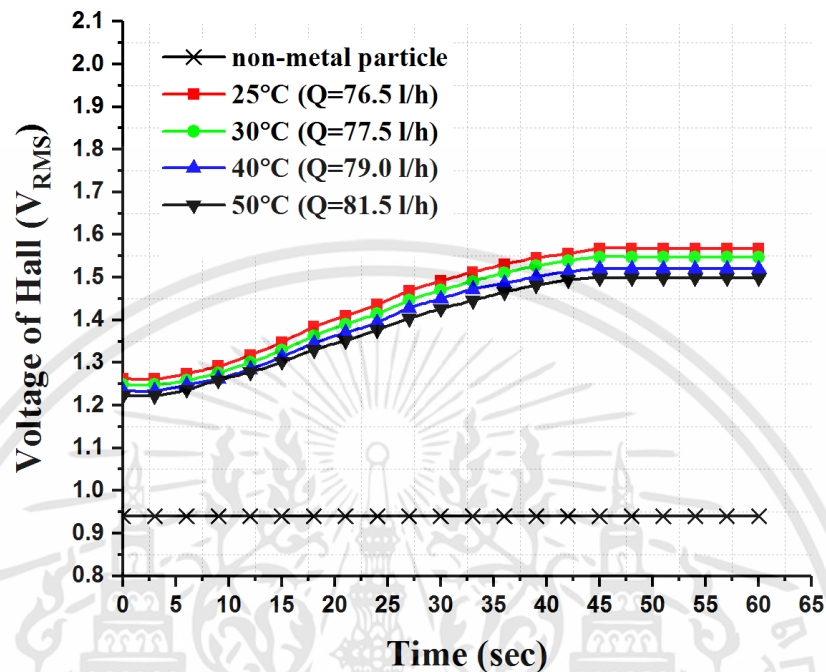
รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz

ตารางที่ 4.38 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.784
30°C	77.5	0.820
40°C	79.0	0.831
50°C	81.5	0.883

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 32  
 Frequency = 1500 Hz  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz

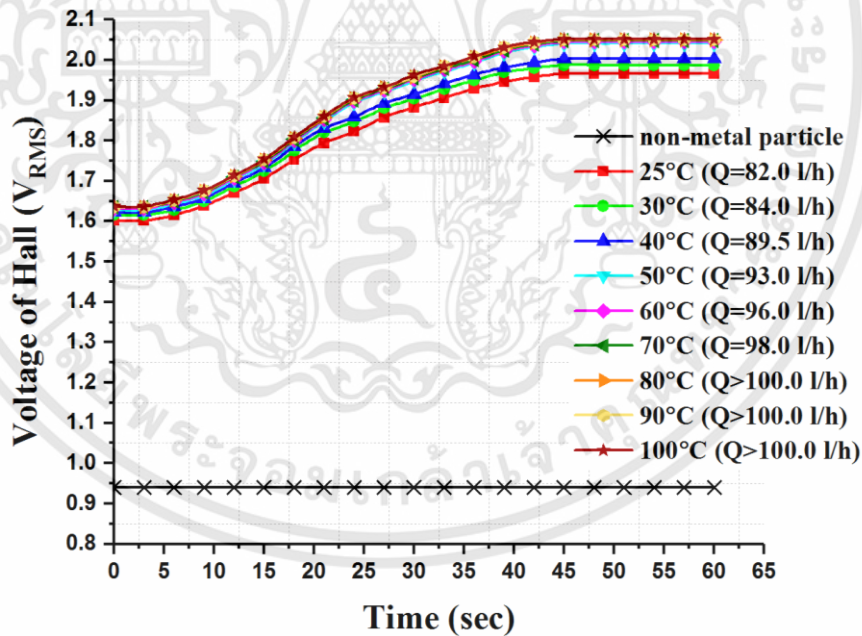
ตารางที่ 4.39 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	76.5	0.559
30°C	77.5	0.580
40°C	79.0	0.608
50°C	81.5	0.628

จากรูปที่ 4.38, รูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและความถี่ที่กระตุ้นให้กับขดลวดโซลินอยด์ของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยที่ความถี่ที่ 500 Hz จะเห็นการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ดังตารางที่ 4.37 มากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.38 และ 1,500 Hz ดังตารางที่ 4.39 เนื่องจากขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่ 500 Hz นั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz จึงทำให้อุณหภูมิของโลหะนั้นมีเวลาเพียงพอที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์ขณะที่ยังอยู่ในสภาวะที่เป็นแม่เหล็ก ก่อนที่จะเปลี่ยนสภาวะเป็นสภาพไร้อำนาจแม่เหล็ก และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อุณหภูมิของโลหะเคลื่อนที่ไปยังขดลวดโซลินอยด์ได้สะดวกกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีอุณหภูมิต่ำ

**4.2.2 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ**

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
 Frequency = 500 Hz  
 Time = 60 sec

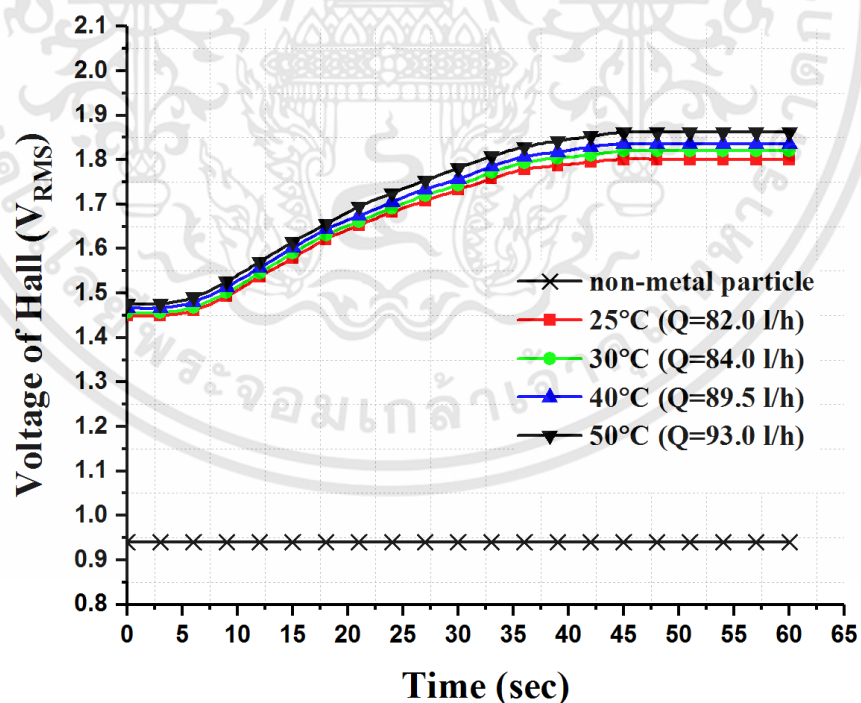


รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz

ตารางที่ 4.40 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32  
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	1.026
30°C	84.0	1.047
40°C	89.5	1.063
50°C	93.0	1.101
60°C	96.0	1.105
70°C	98.0	1.108
80°C	>100.0	1.110
90°C	>100.0	1.111
100°C	>100.0	1.111

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
Frequency = 1000 Hz  
Time = 60 sec



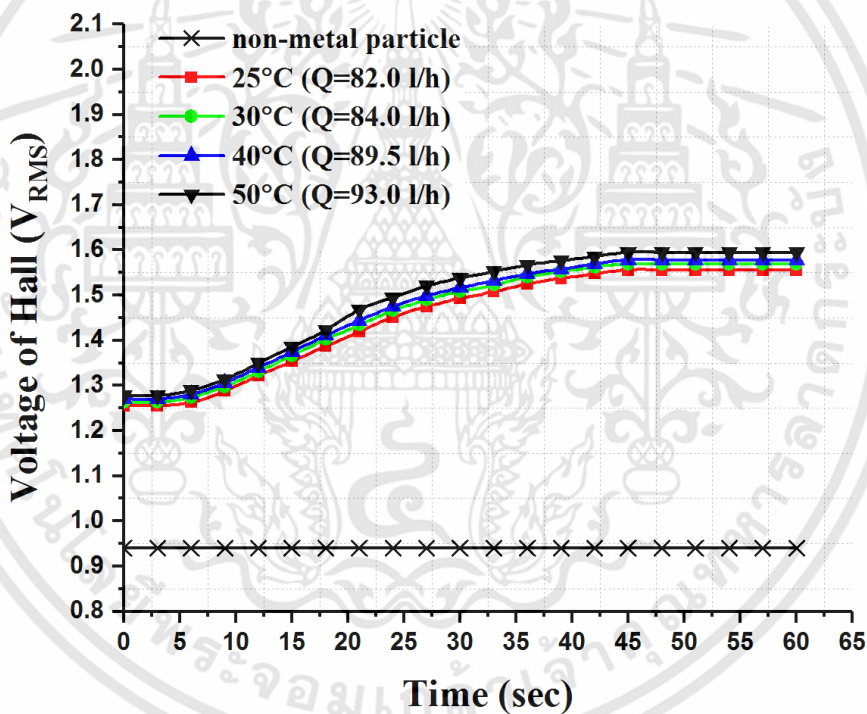
รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์  
สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้า  
กระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.41 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.861
30°C	84.0	0.880
40°C	89.5	0.896
50°C	93.0	0.922

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 32  
 Frequency = 1500 Hz  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.42 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32  
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	82.0	0.616
30°C	84.0	0.629
40°C	89.5	0.638
50°C	93.0	0.655

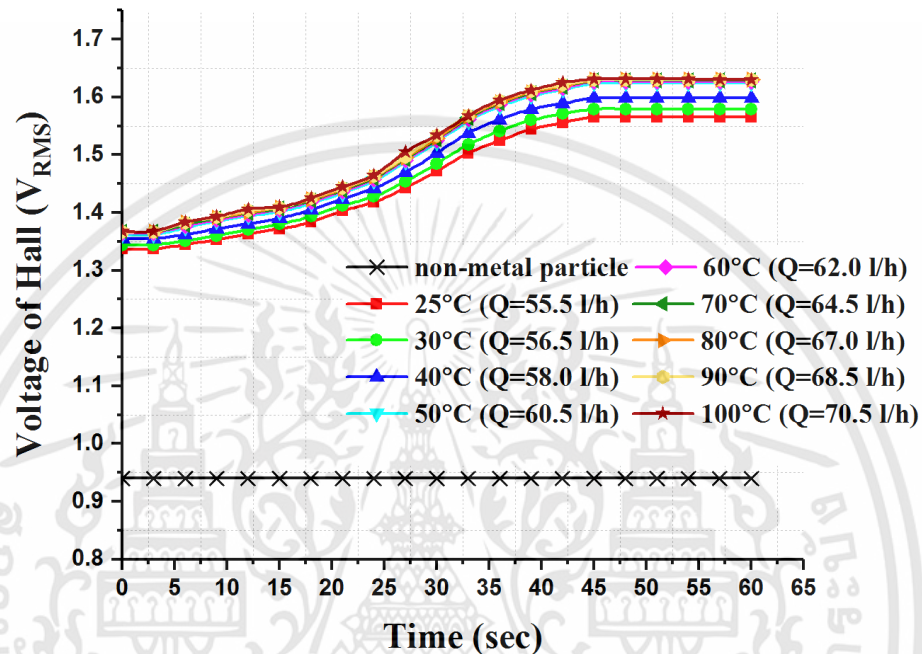
จากรูปที่ 4.41, รูปที่ 4.42 และรูปที่ 4.43 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและความถี่ที่กระตุ้นให้กับขดลวดโซลินอยด์ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน โดยที่ความถี่ที่ 500 Hz จะเห็นการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์มากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz เนื่องจากขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่ 500 Hz นั้นจะค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อุณหภูมิของโลหะเคลื่อนที่ไปยังขดลวดโซลินอยด์ได้สะดวกกว่าดังตารางที่ 4.40 ตารางที่ 4.41 และตารางที่ 4.42 ทั้งนี้ น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานจะมีการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เนื่องจากน้ำมันผ่านสภาวะที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้ประสิทธิภาพของน้ำมันในด้านของความหนืดนั้นลดลง

#### 4.2.3 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46

Frequency = 500 Hz

Time = 60 sec



รูปที่ 4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz

ตารางที่ 4.43 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz

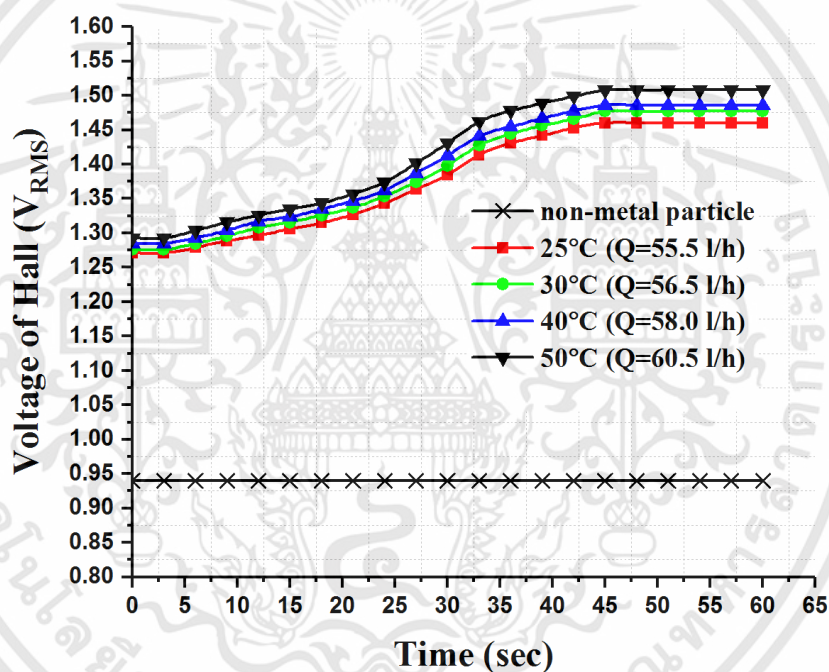
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.625
30°C	56.5	0.639
40°C	58.0	0.658
50°C	60.5	0.684

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
60°C	62.0	0.687
70°C	64.5	0.689
80°C	67.0	0.690
90°C	68.5	0.690
100°C	70.5	0.690

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46

Frequency = 1000 Hz

Time = 60 sec



รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 1000 Hz

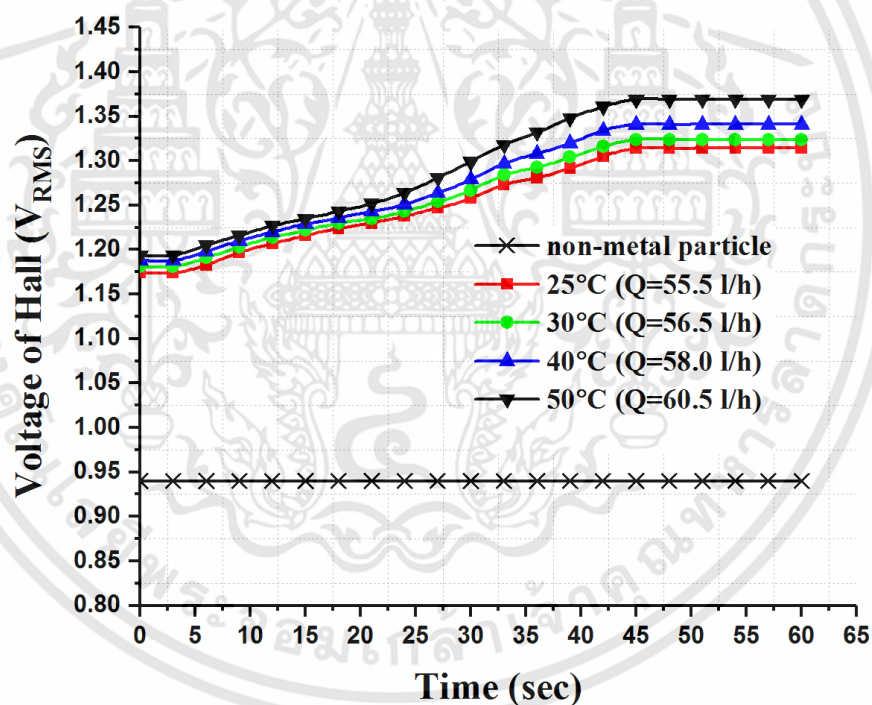
ตารางที่ 4.44 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.520
30°C	56.5	0.537
40°C	58.0	0.546
50°C	60.5	0.568

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 46

Frequency = 1500 Hz

Time = 60 sec



รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 1500 Hz

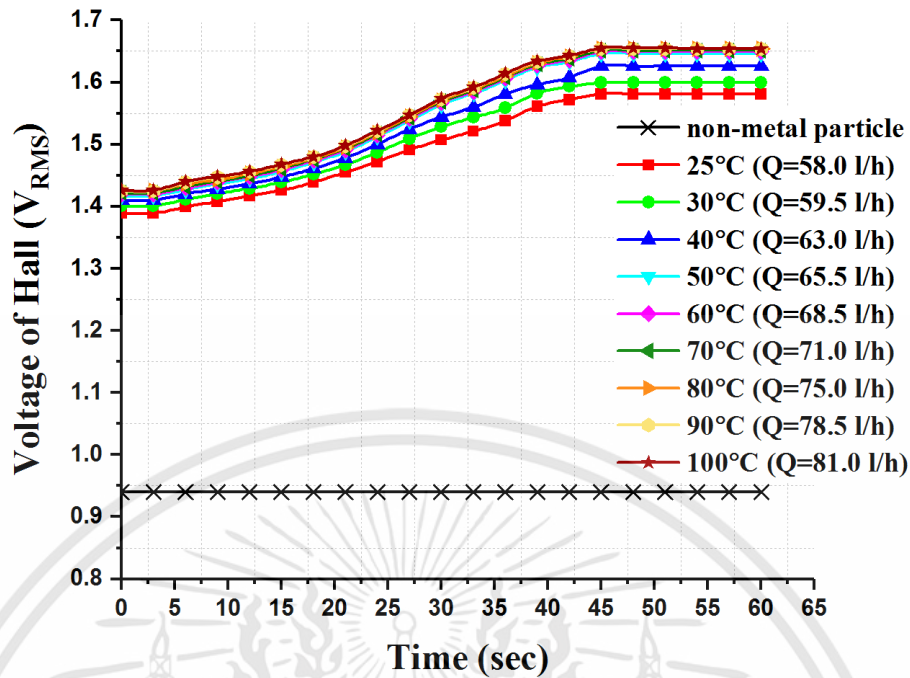
**ตารางที่ 4.45** ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	55.5	0.374
30°C	56.5	0.384
40°C	58.0	0.401
50°C	60.5	0.429

จากรูปที่ 4.44, รูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและความถี่ที่กระตุ้นให้กับขดลวดโซลินอยด์ของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยที่ความถี่ที่ 500 Hz จะเห็นการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ดังตารางที่ 4.43 มากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.44 และ 1,500 Hz ดังตารางที่ 4.45 เนื่องจากขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่ 500 เฮิร์ตซ์นั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz จึงทำให้อินдукโทรมีเวลาเพียงพอที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์ขณะที่ยังอยู่ในสถานะที่เป็นแม่เหล็ก ก่อนที่จะเปลี่ยนสถานะเป็นสภาพไร้อำนาจแม่เหล็ก และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อินдукโทรมีเคลื่อนที่ไปยังขดลวดโซลินอยด์ได้สะดวกกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีอุณหภูมิต่ำ

#### 4.2.4 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Frequency = 500 Hz  
 Time = 60 sec

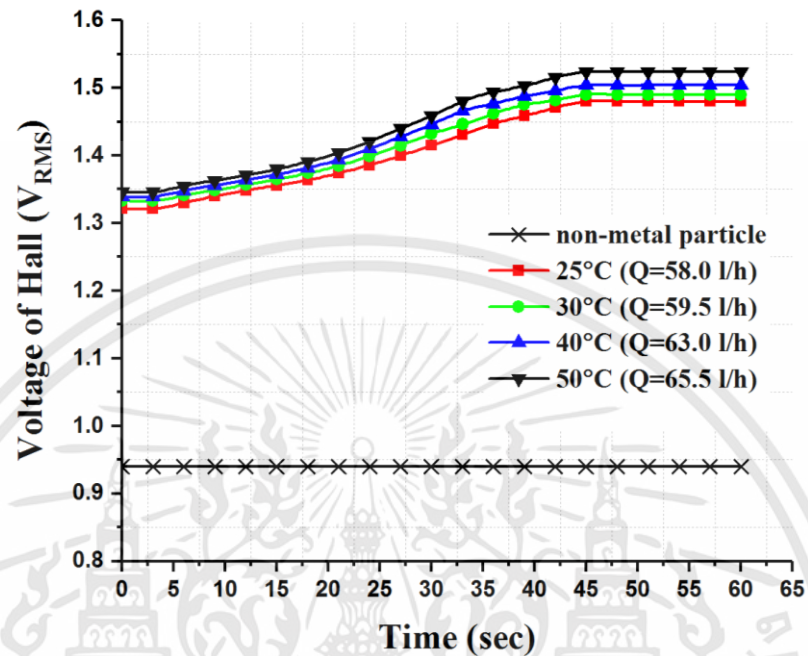


รูปที่ 4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz

ตารางที่ 4.46 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.641
30°C	59.5	0.659
40°C	63.0	0.686
50°C	65.5	0.706
60°C	68.5	0.706
70°C	71.0	0.711
80°C	75.0	0.714
90°C	78.5	0.714
100°C	81.0	0.714

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Frequency = 1000 Hz  
 Time = 60 sec

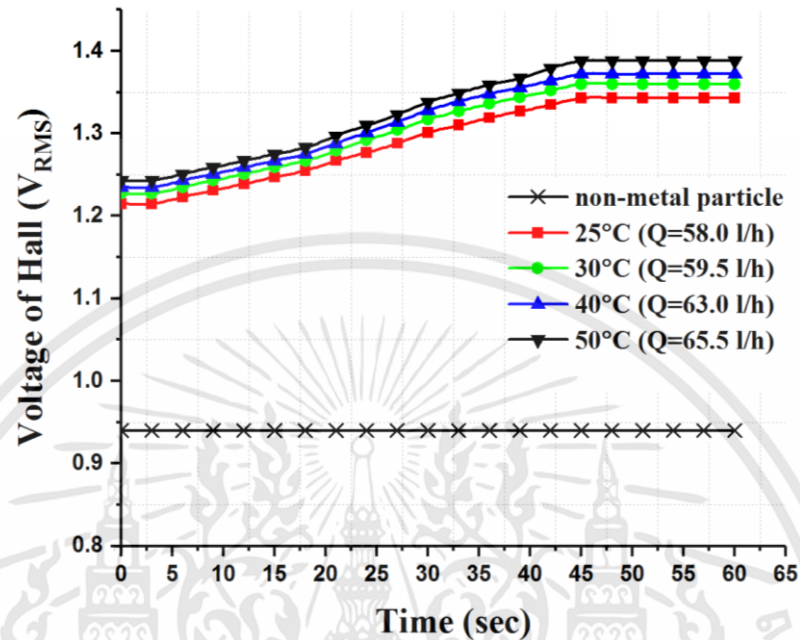


รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1000 Hz

ตารางที่ 4.47 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.540
30°C	59.5	0.550
40°C	63.0	0.564
50°C	65.5	0.584

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 46  
 Frequency = 1500 Hz  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้า กระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz

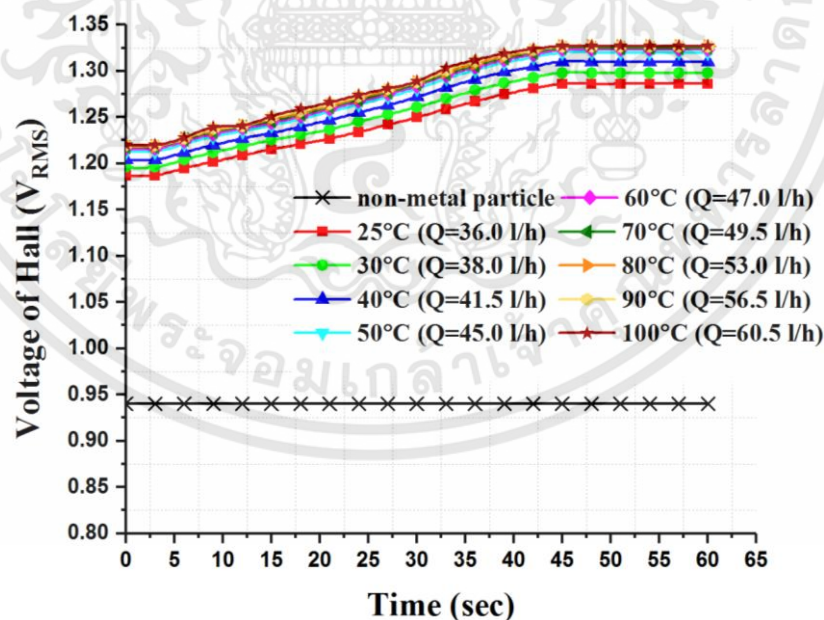
ตารางที่ 4.48 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	58.0	0.403
30°C	59.5	0.420
40°C	63.0	0.432
50°C	65.5	0.448

จากรูปที่ 4.47, รูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและความถี่ที่กระตุ้นให้กับขดลวดโซลินอยด์ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน โดยที่ความถี่ที่ 500 Hz จะเห็นการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์มากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz เนื่องจากขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่ 500 Hz นั้นจะค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อุณหภูมิโลหะเคลื่อนที่ไปยังขดลวดโซลินอยด์ได้สะดวกกว่าดังตารางที่ 4.46 ตารางที่ 4.47 และตารางที่ 4.48 ทั้งนี้ น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานจะมีการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เนื่องจากน้ำมันผ่านสภาวะที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้ประสิทธิภาพของน้ำมันในด้านของความหนืดนั้นลดลง

#### 4.2.5 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68  
Frequency = 500 Hz  
Time = 60 sec

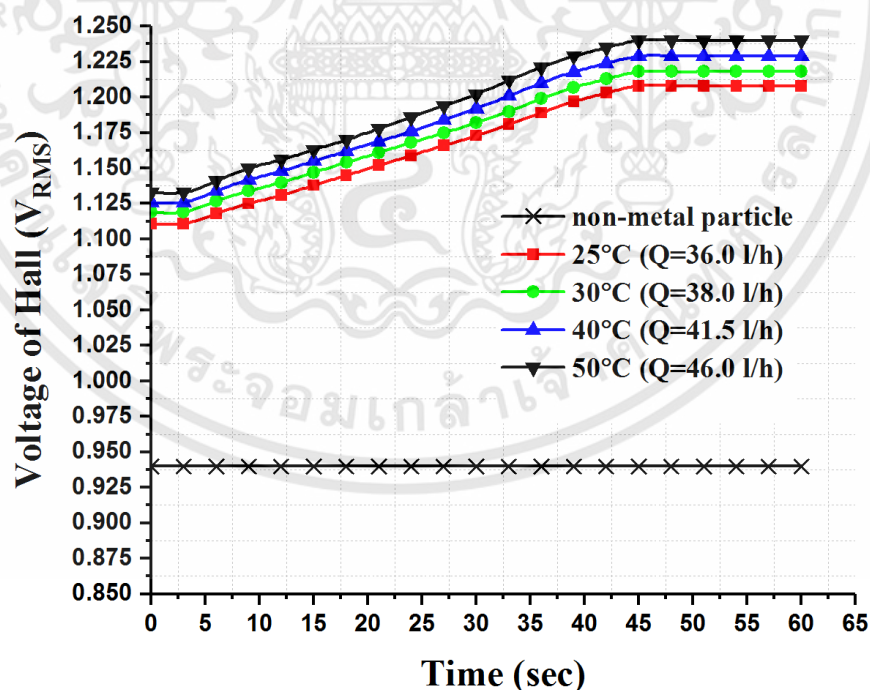


รูปที่ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz

ตารางที่ 4.49 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.346
30°C	38.0	0.358
40°C	41.5	0.370
50°C	45.0	0.380
60°C	47.0	0.383
70°C	49.5	0.385
80°C	53.0	0.387
90°C	56.5	0.387
100°C	60.5	0.387

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68  
Frequency = 1000 Hz  
Time = 60 sec



รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 1000 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

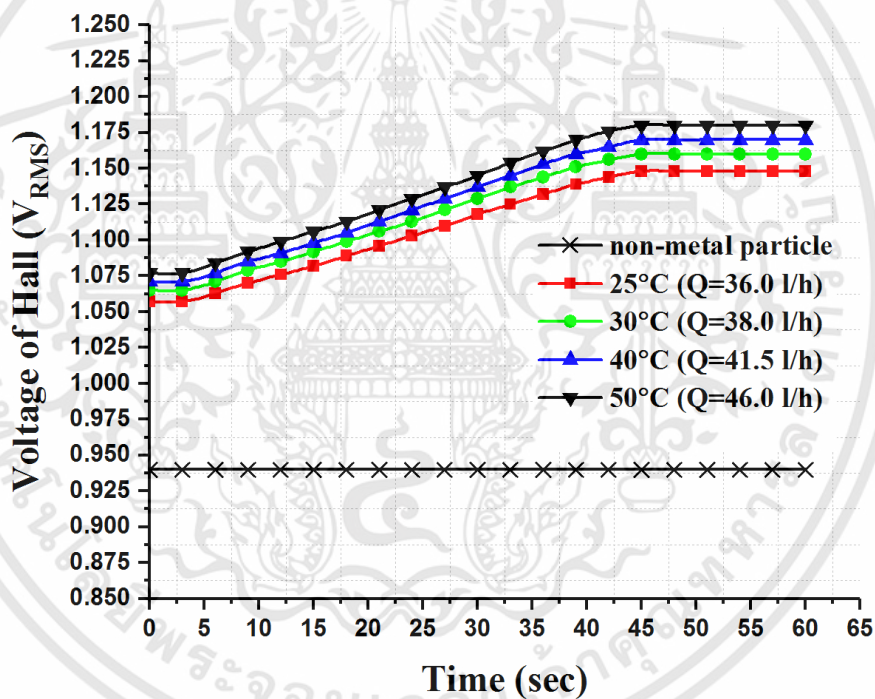
ตารางที่ 4.50 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.268
30°C	38.0	0.278
40°C	41.5	0.289
50°C	46.0	0.300

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = New Oil ISO 68

Frequency = 1500 Hz

Time = 60 sec



รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz

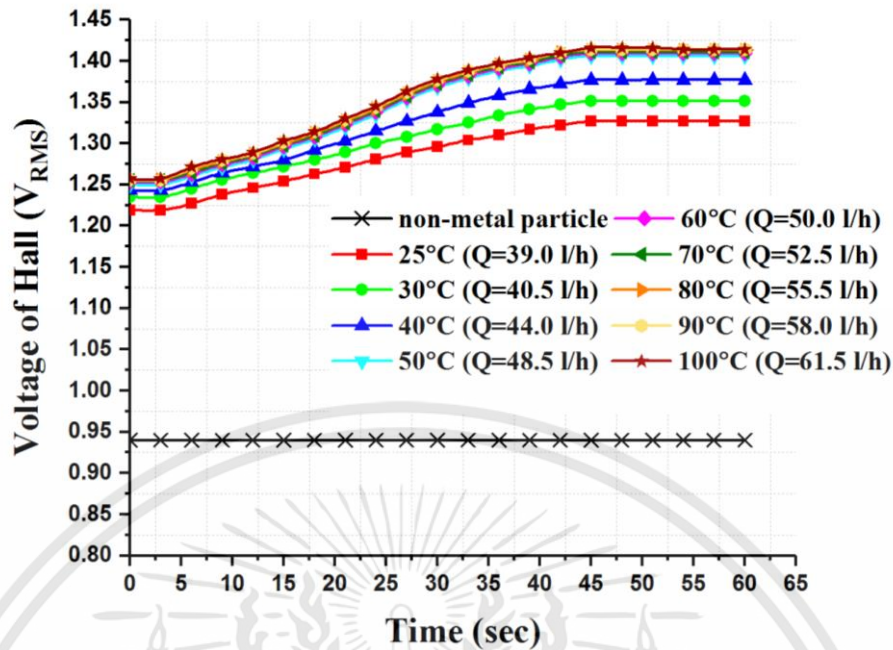
**ตารางที่ 4.51** ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	36.0	0.208
30°C	38.0	0.220
40°C	41.5	0.230
50°C	46.0	0.240

จากรูปที่ 4.50, รูปที่ 4.51 และรูปที่ 4.52 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและความถี่ที่กระตุ้นให้กับขดลวดโซลินอยด์ของน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยที่ความถี่ที่ 500 Hz จะเห็นการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ดังตารางที่ 4.49 มากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz ดังตารางที่ 4.50 และ 1,500 Hz ดังตารางที่ 4.51 เนื่องจากขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่ 500 Hz นั้นจะมีค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz จึงทำให้อนุภาคโลหะนั้นมีเวลาเพียงพอที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่หน้าตัดของขดลวดโซลินอยด์ขณะที่ยังอยู่ในสถานะที่เป็นแม่เหล็ก ก่อนที่จะเปลี่ยนสถานะเป็นสภาพไร้อำนาจแม่เหล็ก และเมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อนุภาคโลหะเคลื่อนที่ไปยังขดลวดโซลินอยด์ได้สะดวกกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่มีอุณหภูมิต่ำ

#### 4.2.6 ผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68  
 Frequency = 500 Hz  
 Time = 60 sec



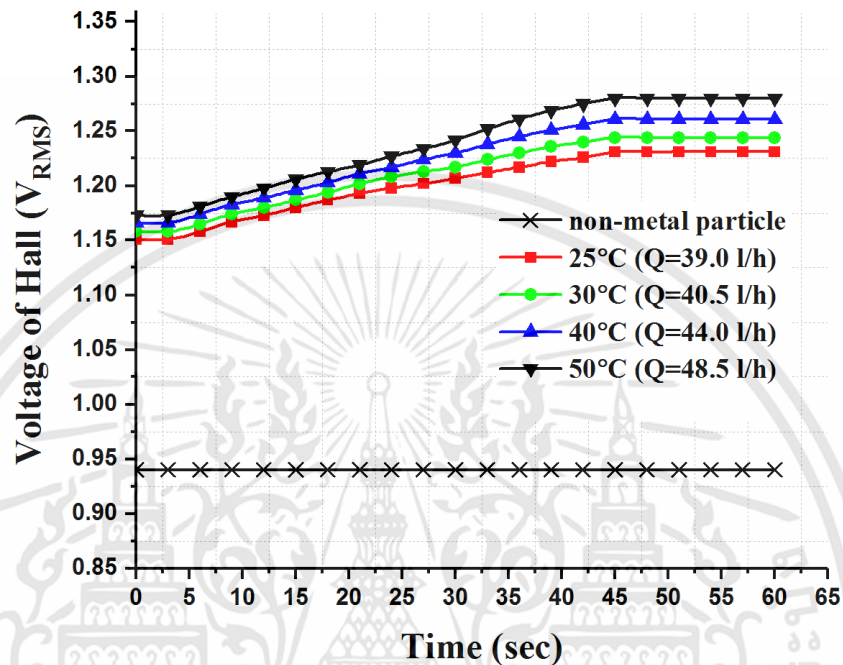
รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 500 Hz

ตารางที่ 4.52 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.387
30°C	40.5	0.411
40°C	44.0	0.437
50°C	48.5	0.466
60°C	50.0	0.469
70°C	52.5	0.471
80°C	55.5	0.473
90°C	58.5	0.474
100°C	61.5	0.474

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68  
 Frequency = 1000 Hz  
 Time = 60 sec



รูปที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 1000 Hz

ตารางที่ 4.53 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1000 Hz

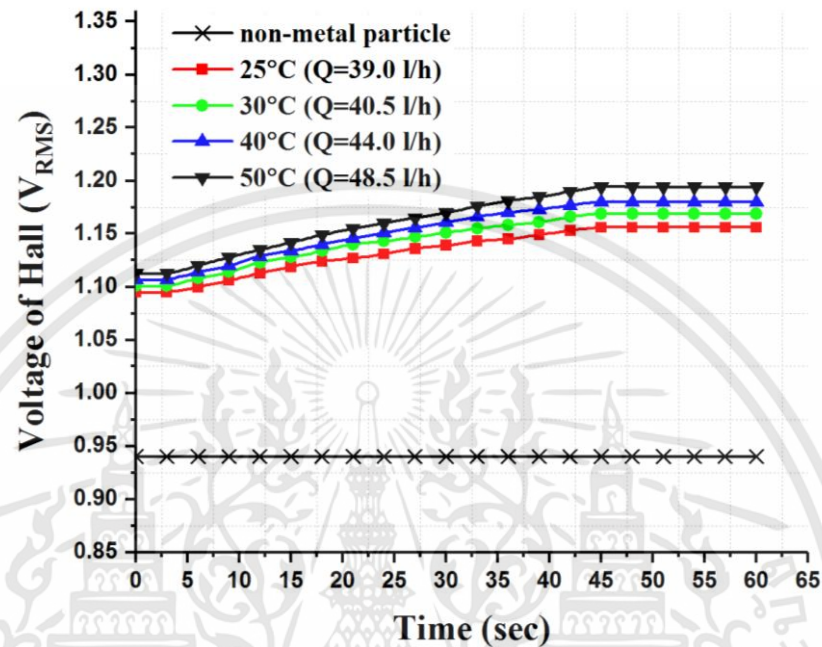
อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.291
30°C	40.5	0.304
40°C	44.0	0.321
50°C	48.5	0.340

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil ISO 68

Frequency = 1500 Hz

Time = 60 sec



รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ สำหรับน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 ภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ 1500 Hz

ตารางที่ 4.54 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 1500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	39.0	0.216
30°C	40.5	0.229
40°C	44.0	0.240
50°C	48.5	0.254

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.53, รูปที่ 4.54 และรูปที่ 4.55 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิและความถี่ที่กระตุ้นให้กับขดลวดโซลินอยด์ของน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งาน โดยที่ความถี่ที่ 500 Hz จะเห็นการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์มากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz เนื่องจากขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยความถี่ที่ 500 Hz นั้นจะค่าความเหนี่ยวนำมากกว่าความถี่ที่ 1,000 Hz และ 1,500 Hz เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการไหลนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย ทำให้อุณหภูมิของโลหะเคลื่อนที่ไปยังขดลวดโซลินอยด์ได้สะดวกกว่าดังตารางที่ 4.52 ตารางที่ 4.53 และตารางที่ 4.54 ทั้งนี้ น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานจะมีการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกเซนเซอร์มากกว่าน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เนื่องจากน้ำมันผ่านสภาวะที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้ประสิทธิภาพของน้ำมันในด้านของความหนืดนั้นลดลง

### 4.3 ผลการทดลองของน้ำมันเครื่องภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

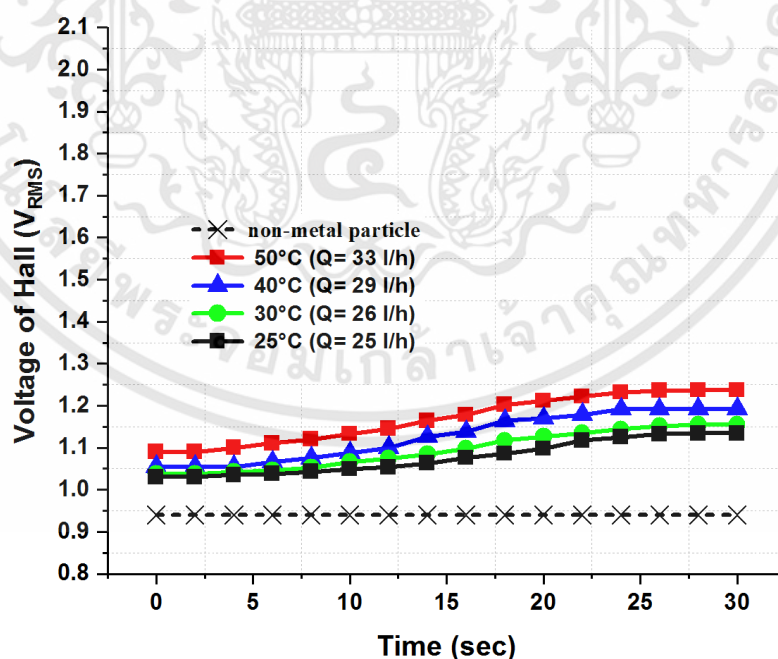
#### 4.3.1 ผลการทดลองของน้ำมันเครื่องที่ผ่านการใช้งานจริงเกรด SN 0W20 ภายใต้

##### เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับ

การตั้งค่าการทดลอง : Sample = Used Oil SN 0W20

Frequency = 500 Hz

Time = 60 sec



รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์สำหรับน้ำมันหล่อเครื่องที่ผ่านการใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.55 ผลการทดลองในแต่ละช่วงอุณหภูมิของน้ำมันเครื่องที่ผ่านการใช้งานจริง  
เมื่อจ่ายความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500 Hz

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการไหล (LPH)	$\Delta V (V_{non} - V_{out})$ at 60 sec (V)
25°C	25.0	0.194
30°C	26.0	0.215
40°C	29.0	0.252
50°C	33.0	0.297

จากรูปที่ 4.56 แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการตรวจสอบอนุภาคโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันเครื่องเกรด SN OW20 ได้ โดยน้ำมันเครื่องดังกล่าวมีการใช้งานมากกว่า 10,000 km ซึ่งมีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะในระดับหนึ่ง ดังตารางที่ 4.55



## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการจำลองตรวจวัดอุณหภูมิของโลหะที่ปนเปื้อนมากับน้ำมันหล่อลื่นที่ประยุกต์ร่วมกับอุปกรณ์ฮอลล์ โดยจะแบ่งการศึกษาทดลองออกเป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 ทดลองโดยการกระตุ้นขดลวดโซลินอยด์ด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีการทดลองย่อยคือ ทดลองที่อุณหภูมิ 25, 30, 40 และ 50 °C โดยในแต่ละอุณหภูมิจะจ่ายกระแสให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 A ได้ผลสรุปคือ ปริมาณกระแสที่จ่ายให้ขดลวดโซลินอยด์มากกว่า 0.9 A จะส่งผลให้ขดลวดโซลินอยด์นั้นเกิดความร้อนและเกิดความผิดพลาดในการวัด ในทางตรงกันข้ามเมื่อปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์น้อยกว่า 0.9 A จะทำให้ความแยกชั้นระหว่างน้ำมันที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะและน้ำมันที่ไม่มีการปนเปื้อนมีค่าน้อย ส่งผลให้การวิเคราะห์นั้นทำได้ยาก โดยค่าความแตกต่างที่มากที่สุดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตระหว่างมีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะและไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะของน้ำมันที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 ที่อุณหภูมิ 50 °C เมื่อจ่ายกระแส 0.9 A ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 0.084 V และเมื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นให้สูงขึ้น จะพบว่าค่าความหนืดของน้ำมันมีค่าลดลง โดยค่าความผิดพลาดของการวัดสำหรับการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 0.42%

ส่วนรูปแบบที่ 2 ทดลองโดยการกระตุ้นขดลวดโซลินอยด์ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีการทดลองย่อยคือ ทดลองที่อุณหภูมิ 25, 30, 40 และ 50 °C โดยในแต่ละอุณหภูมิจะกำหนดความถี่ให้กับขดลวดโซลินอยด์เท่ากับ 500, 1000 และ 1500 Hz ได้ผลสรุปคือ ระดับความถี่ที่ 500 Hz ที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์นั้น ส่งผลให้เอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ที่ตรวจวัดน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะและไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะมีความแตกต่างกันมากที่สุด โดยค่าความผิดพลาดของการวัดสำหรับการทดลองภายใต้เงื่อนไขของไฟฟ้ากระแสสลับเท่ากับ 0.38%

เมื่อเปรียบเทียบเอาต์พุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดระหว่างผลการทดลองของน้ำมันหล่อลื่นที่มีการปนเปื้อนและไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคโลหะนั้น พบว่าผลการทดลองของขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีค่าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าผลการทดลองของขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงเฉลี่ยโดยประมาณ 20 % และยังเกิดความร้อนที่ขดลวดโซลินอยด์น้อยกว่าเฉลี่ยโดยประมาณ 48 % สำหรับงานวิจัยนี้ น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 32 จะมีประสิทธิภาพลดลงจากน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานประมาณ 10.81% น้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 46 จะมีประสิทธิภาพลดลงจากน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่

ผ่านการใช้งานประมาณ 6.72% และน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้งานเบอร์ 68 จะมีประสิทธิภาพลดลงจากน้ำมันหล่อลื่นที่ยังไม่ผ่านการใช้งานประมาณ 7.165%

## 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

จากผลการทดลองที่ผ่านมาชี้แจงแสดงว่าประสิทธิภาพของระบบการตรวจสอบประสิทธิภาพของน้ำมันหล่อลื่นจะวิเคราะห์จากเอาต์พุตของอุปกรณ์ฮอลล์ ซึ่งจะวัดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปของขดลวดโซลินอยด์ โดยพบว่าขดลวดโซลินอยด์ที่ถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเกิดความร้อนประมาณ 68 °C ซึ่งส่งผลกับขดลวดโซลินอยด์โดยตรง และยังทำให้ระบบการวัดเกิดความไม่ต่อเนื่อง สาเหตุมาจากการพันขดลวดโดยไม่ใช่ผู้มีความชำนาญ เพราะการพันขดลวดที่ไม่เป็นระเบียบและไม่มีฉนวนหุ้มในแต่ละรอบ จะทำให้ขดลวดเกิดการช็อตเทิร์น (short turn) หมายความว่า เมื่อขดลวดไม่มีฉนวนหุ้มทำให้รอบของขดลวดที่อยู่ติดกันนั้นต่อถึงกัน จึงเป็นสาเหตุผลให้ความต้านทานของขดลวดนั้นมีค่าน้อยลง จากปัญหาดังกล่าวเมื่อมีการจ่ายกระแสให้กับขดลวด จะทำให้ปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขดลวดนั้นมีค่าสูง จึงทำให้ขดลวดโซลินอยด์นั้นเกิดความร้อนจนอาจทำให้ขดลวดไหม้ เพราะฉะนั้นในการพัฒนาของงานวิจัยชิ้นนี้ในอนาคตได้มีความคิดที่แก้ไขและพัฒนาในจุดนี้ โดยการใช้เครื่องมือในการพันขดลวดโดยเฉพาะ และต้องมีฉนวนหุ้มในแต่ละรอบ เมื่อขดลวดโซลินอยด์เกิดความร้อนในระดับที่ไม่ส่งผลต่อระบบการวัด จะทำให้ขอบเขตของการทดลองนั้นกว้างขึ้น โดยสามารถทดลองที่อุณหภูมิสูงได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Buiochi, R.T. Higuti, C.M. Furukawa, and J.C. Adamowski, **“Ultrasonic Measurement of Viscosity of Liquids”**, IEEE Ultrasonics. Symposium, Vol. 1, pp. 525-528, 2000, Puerto Rico, USA.
- [2] A. Agoston, C. Otsch, J. Zhuravleva, and B. Jakoby, **“An IR-Absorption Sensor System for the Determination of Engine Oil Deterioration”**, Proceedings of IEEE, Sensor, Vol. 1, pp. 463-466, 2004.
- [3] Yinglan Zhang, Mengmeng Huang, Ying Kan, Lianying Liu, Xiaoping Dai, Guiling Zheng, and Zhengdong Zhang, **“Influencing Factors of Viscosity Measurement by Rotational Method”**, Polymer Testing 70 (2018) 144–150.
- [4] C.T. Pinheiro, R.F. Pais, A.G.M. Ferreira, M.J. Quina, and L.M. Gando-Ferreira, **“Measurement and Correlation of Thermophysical Properties of Waste Lubricant Oil”**, The Journal of Chemical Thermodynamics, Vol. 116, January 2018, pp. 137-146
- [5] Cunguang Lou, and Da Xing, **“Photoacoustic Measurement of Liquid Viscosity”**, Applied Physics Letters 96 (2010).
- [6] Yang Dingxin, Zhang Xiaofei, Hu Zheng, and Yang Yongmin, **“Oil Contamination Monitoring Based on Dielectric Constant Measurement”**, 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Vol. 3, pp. 249-252
- [7] Witsarut Sriratana, and Riichi Murayama **“Application of Magnetic Field Method for Measuring Lubricant Viscosity”**, Materials Science Forum, Vol. 750 (2013), pp. 116–124.
- [8] J. Lenz, **“A review of magnetic sensors.”** Proc. IEEE, vol. 78, no. 6, p. 973.
- [9] John Clarke, and Roger H. Koch **“The Impact of High – temperature Superconductivity on SQUID Magnetometers”**, Science, Vol. 242 (Oct.14, 1988), pp. 217–223.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] U. Dibbern. "Sensors based on the magnetoresistive effect." *Sensor and Actuators A*, vol. 4, p. 221. 1983.
- [11] U. Dibbern. "Magnetic Field Sensors Using the Magnetoresistive Effect." *Sensor and Actuators A*, vol. 10, p. 127, 1986.
- [12] Pavel Ripka, "Magnetic Sensors for Industrial and Field Applications", *Sensors and Actuators A : Physical*, Vol. 42, pp.394-397. 1994.
- [13] R. Popovic. "Hall-effect devices." *Sensor and Actuators A*, vol. 17, p. 39, 1989.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1. ข้อมูลที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม ARDUINO สำหรับการเก็บผลการทดลอง

```

/*
DC Voltmeter Using a Voltage Divider
*/

int analogInput = A0;
int analogInput1 = A1;
int analogInput2 = A2;
float vout = 0.0;
float vin = 0.0;
float R1 = 30000.0; //
float R2 = 7500.0; //
int value = 0;
void setup(){
  // pinMode(A0, INPUT); // analog
  // pinMode(A1, INPUT);
  // pinMode(A2, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLRARDATA");
  Serial.println("LABEL,Time,Output Hall,Output LF351,Output Bridge");
}
void loop(){
  //Serial.print("DATA,TIME,"); //Serial.print(x); Serial.print(",");Serial.print("x+2");
  // Serial.print(A0);
  // read the value at analog input
  /* pinMode(A0, INPUT);*/
  Serial.print("DATA,TIME");
  Serial.print(",");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

value = analogRead(0); // Read analog signal at A0 pin
vout = (value * 5.0) / 1024.0; // see text
vin = vout / (R2/(R1+R2));
/*Serial.print(value);*/
Serial.print("");
Serial.print(vin,2);
Serial.print(",");
/* pinMode(A1, INPUT);*/
value = analogRead(1);
vout = (value * 5.0) / 1024.0; // see textx
vin = vout / (R2/(R1+R2));
Serial.print("");
Serial.print(vin,2);
Serial.print(",");
/*pinMode(A2, INPUT);*/
value = analogRead(2);
vout = (value * 5.0) / 1024.0; // see text
vin = vout / (R2/(R1+R2));
Serial.print("");
Serial.println(vin,2);

delay(1000);
}

```



ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Itti Inthawatkul, Witsarut Sriratana, Sutham Satthamsakul. “**Measurement of Metal Particles in Oil Lubricant using Hall Effect Sensor under Temperature Conditions**”, 2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Pages: 731 - 735



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

since 1961  
**SICE**®

**SICE ANNUAL CONFERENCE 2017**  
Final Program & Abstracts

# SICE 2017

International Conference on Instrumentation,  
Control, Information Technology and System Integration

**SICE Annual Conference 2017**

**September 19 - 22, 2017**

**Kanazawa University, Kanazawa, Japan**

**SICE**®  **IEEE**   **leo**  **ICROS**  **ISA**  **JEMIMA**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มาค้นพบ

## Measurement of Metal Particles in Oil Lubricant using Hall Effect Sensor Under Temperature Conditions

Itti Inthawatkul<sup>1†</sup>, Witsarut Sriratana<sup>2</sup> and Sutham Sathamsakul<sup>3</sup>

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand  
(Tel : +66(0)-2329-8347-8 ; E-mail: <sup>1</sup>58601081@kmitl.ac.th, <sup>2</sup>witsarut.sr@kmitl.ac.th, <sup>3</sup>sutham.sa@kmitl.ac.th)

**Abstract:** This paper develops a Hall-Effect sensor based system to assess the performance of a lubricant. The measurement methodology is based on the fact that the electromagnetically induced voltage is directly proportional to the amount of contaminants, which in turn affects the state of the lubricant. Two main cases are considered: the metal particles contaminant, and viscosity. The sample lubricant viscosity was experimentally found to be 49.2874 Cst, which is well within the range of internationally accepted values. Furthermore, the lubricant flow rate was also found to be temperature dependent. The output Hall voltage for the contaminated lubricant was 0.8 A for liquid flow rates between 0 to 30 l/h, which significantly deviates from the non-contaminated lubricant. These results suggests that the presented approach is a simple, low cost system capable of accurately assessing the performance of lubricants without consulting the manufacturer's information, even under normal operational loading.

**Keywords:** Ferrite coil, Hall Effect sensors, Lubricant, Magnetic field, Temperature, Viscosity

### 1. INTRODUCTION

The advent of advanced industrial technologies has seen several tasks that are now conducted by machines in place of humans, in order to sufficiently cater the needs of consumers. For this reason alone, constant assessment of the state of the machineries is vital to maintain efficient production. Lubricants, being the substance that reduces frictional heat produced during machine operation, becomes a vital cog in keeping the machine health. In this way the examination of the lubricating properties is deemed to be the early indicators towards assessing the entire machine life, and thus yielding the engineers important information as they manage these machines to maintain an efficient level of production. Several methods have been proposed by other researchers to assess the lubricating properties. Such as the ultrasonic measurement for dynamic viscosity of liquids [1], measurement of engine oil deterioration with IR absorption sensor [2] and static measurement for lubricant degradation using Hall Effect sensor with permanent magnet [3]. This article presents an alternative method to assess the lubricity under operation through the use of the Hall Effect sensor, where the magnetic field forces changes with the amount of metal particles in the flow lubricant. These changes influences the viscosity and thus the amount of metal particles contaminated in the lubricant, thereby indicating the performance of the lubricant without resorting to consulting the expiration date provided by the manufacturer. In this regard the engineer is armed with the ability to examine the lubricity at all times under normal operation as well as the capability of handling more lubrication systems.

<sup>†</sup> Itti Inthawatkul is the presenter of this paper.

### 2. FUNDAMENTAL METHOD

#### 2.1 Hall Effect Sensor

The Hall Effect sensor is a device that measures the magnitude of magnetic field when there is force ( $F$ ) acting on a charge ( $q$ ) moving through the magnetic field ( $B$ ) as described by Eq. (1) [4]. The magnetic field yields a Hall voltage output, that changes with the intensity of the magnetic field provided by the Hall Effect sensor as described by Eq. (2). In this paper the Hall Effect sensor IC [5] is used to measure the lubricity efficacy. This Hall Effect sensor IC provides a maximum output voltage of 4.7 V in the presence of a magnetic field, and 2.4 to 2.6 V in the absence of the magnetic field.

$$F = qvB\sin\theta \quad (1)$$

$$V_H = \frac{R_H}{d} IB \quad (2)$$

where  $R_H$  is Hall coefficient ( $\Omega$ )

#### 2.2 Viscosity

Viscosity is an important variable which directly affects the performance of industrial lubricity, and thus the performance and state of the entire machines themselves. Eq. (3) gives the viscosity of the system with dynamic fluid movement and the temperature factor involved. This model is called the constant measurement systems, and are widely used in industry [6].

$$\eta = t_{moving} \frac{F}{A} \rho_T \quad (3)$$

where  $t_{moving}$  is the time taken to move the metal particles to the solenoid coil until the full extent (saturation)

$\rho_T$  is the liquid density at various temperatures

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น  $\rho_T$  คือ ความหนาแน่นของของไหลที่อุณหภูมิ

ไม่ก่อมลพิษใดๆทั้งสิ้น จึงขอให้นักวิจัยช่วยแปลเนื้อหา และต่อจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 Saturation Point of Hall Effect Sensor

When the amount of metal particles contaminated with the lubricant is attracted by the magnetic field to the full area of the Magnetic Field Generator, the output voltage rises to the saturation point (the point where the metal particles is filled up on the cross section of the Magnetic Field Generator) [7]. Figure 1 plots the amount of lubricant degradation against the amount of attracted metal particle and the saturation point. The contaminated metal particles varies with usage lifetime, while the output voltage from the Hall Effect sensor is dependent on the amount of metal particles contaminants. These contaminants can cause damage to the machineries, reducing their useful lifetimes.

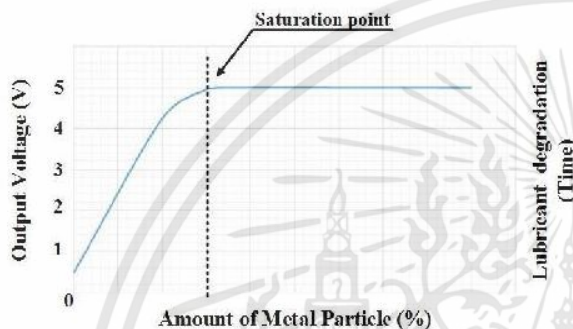


Fig.1 Shows the relationship between the time of oil degradation and output voltage / amount of metal particles.

## 3. EXPERIMENT DESIGN

### 3.1 Magnetic Field Generator

This study uses a cylindrical ferrite core with a diameter of 6 mm and a length of 50 mm, which is wound by the copper wire with diameter of 0.6 mm (SWG 23), with the number of winding equal to 423 as shown in Figure 2. This solenoid produces a magnetic field, with an inductance of 6.9187 mH. Eq. (4) gives relationship between Inductance and Magnetic field to calculate for Inductance value [8]. The Hall Effect sensor is then used to measure the intensity of the metal particles, before the current of the solenoid is cut off to release the metal particles from the sensor area.

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{l} \tag{4}$$

where  $L$  is the inductance (H)  
 $\mu_0$  is the permeability (H/m)

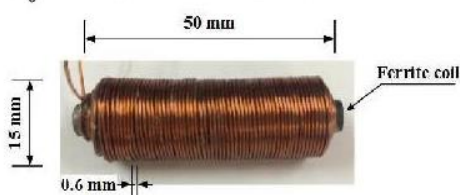


Fig. 2 Dimension of the solenoid coil.

### 3.2 Reference Metal Particles

Contamination of metal particles in the lubricant is attributable to several causes, with friction from internal parts of the machine and combustion soot being the main ones. Although the sizes of contaminated metal particles are on average very small, contamination greatly reduces the performance of the machine. This study thus uses the metal particles whose diameters are about 216  $\mu\text{m}$  on average as shown in Figure 3. The reference metal particles used for the experiments was analyzed by Scanning Electron Microscope (SEM) with Magnification (Mag) = 200 X and 1000 X as shown in Figure 4 (a) and (b), respectively.

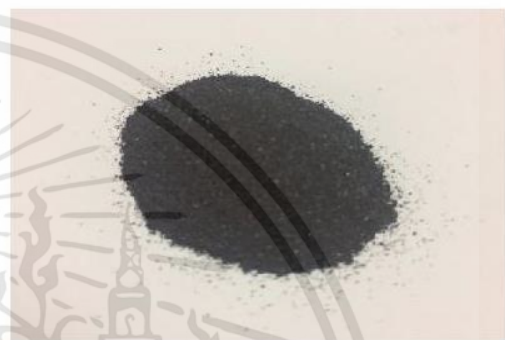
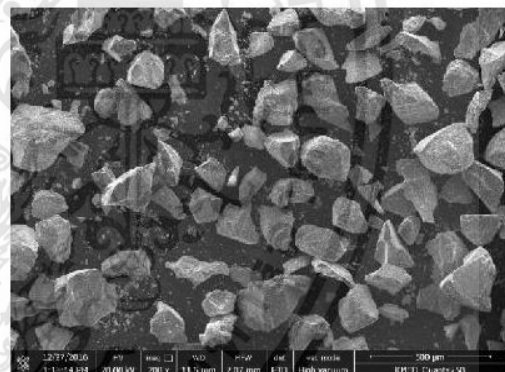
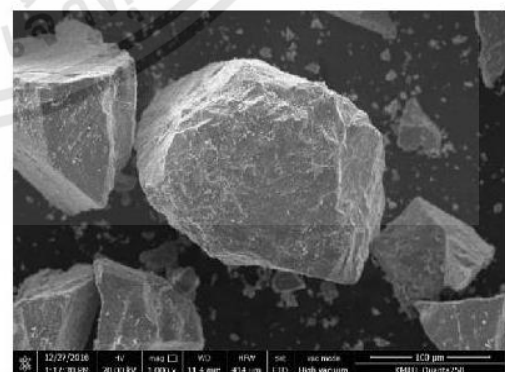


Fig. 3 Real size of reference metal particles.



(a)



(b)

Fig. 4 Reference metal particles size by SEM  
 (a) Magnification = 200 X  
 (b) Magnification = 1,000 X

**3.3 System Operation**

The lubricant performance test system is divided into two parts. The first part, as shown in Figure 5, consists of a magnetic field generator which generates an electromagnetic field to attract the metal particles. This field is directly proportional to the amount of metal particles, thus affecting the output hall voltage which is, in turn, sent over to a computer for post processing and analysis. The second part is a liquid flow system, whereby the lubricant to be tested is firstly heated and traverses through the magnetic field by way of a pump. The liquid flow meter then measures the flow rates of the tested liquid. The resulting flow rates are then compared with the referenced values from the manufacturers. This process is then repeated again to ensure accuracy.

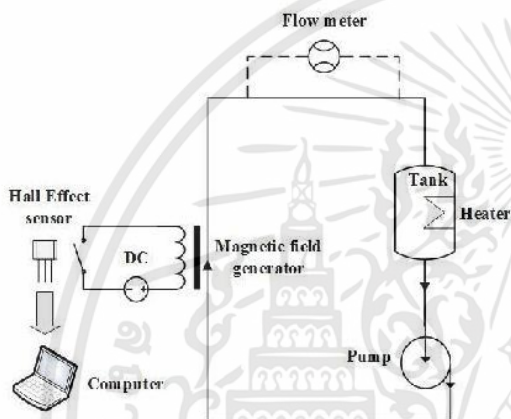


Fig. 5 Experimental system.

**4. EXPERIMENT AND RESULTS**

Experimental results are divided into two categories: viscosity measurements and lubricant metal particles measurements.

**4.1 Viscosity**

The viscosity test firstly measures the flow rate of three liquid samples: water, a new lubricant and a used lubricant, under no metal particles contamination at 25 °C, and determining a reference Hall voltage output. The second step of measuring the viscosity involves determining the time it takes for the Hall Effect sensor to reach saturation point. The lubricant used in the experiment is the SAE 15 standard hydraulic oil (ISO 46).

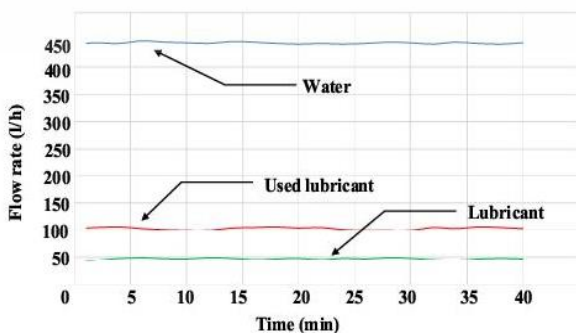


Fig. 6 Flow rates of three liquid samples at 25 °C.

Figure 6 shows the viscosity of all three types of liquids: average flow rate of water is 444.713 l/h, average flow of new lubricant is 48.119 l/h and average flow rate of used lubricant is 103.143 l/h. Which the output voltages of Hall Effect sensor for all three liquids without contamination of the metal particles are  $1 \pm 25$  mV. That causes the used lubricant to have a higher flow rate than the new lubricant, there are many reasons such as the operating environment and internal temperature of machinery.

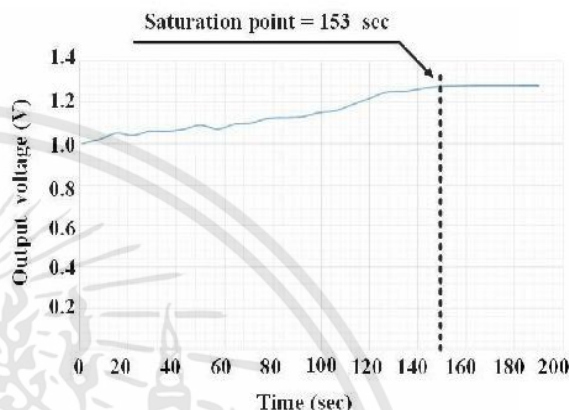


Fig. 7 Relationship between the output voltage and time.

Figure 7 shows the trajectory from the reference voltage of 1 V at set point to the saturation point of output voltage of Hall Effect sensor of 1.3115 V at 153 sec at 25 °C. Applying Eq. (3) yields the sample lubricant viscosity of 49.2874 Cst, which is well within the range of the accepted ISO viscosity levels (41.4 to 50.6 Cst). This result suggests that industrial engineers can easily infer the viscosity levels even under normal loading operation and thus able to accurately determine the lubricant change intervals.

**4.2 Timewise flow rates at various temperatures**

There are various machinery operating temperatures under normal operation, which directly affects the lubricating quality. This study thus investigates the flow rates at various temperatures as shown in Figure 8.

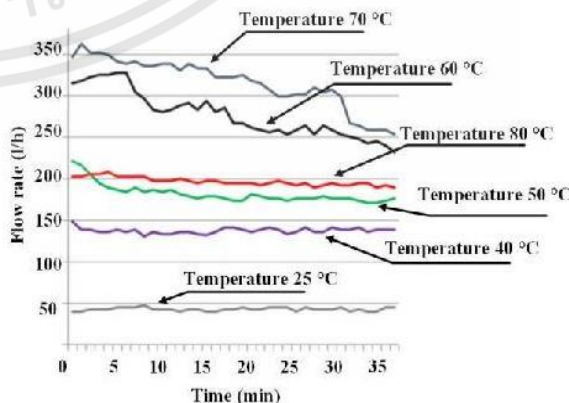


Fig. 8 flow rates relationship at various temperatures for a new lubricant sample.

Figure 8 plots the timewise flow rates at various temperatures for a sample of a new lubricant. Figure 9 shows the flow rates along the various temperatures for a sample of a used lubricant. These figures suggest a general trend, that the flow rates trends to increase with temperature increments. The average flow rate for the new lubricant sample was 42.95 l/h at 25 °C; the average flow rate for the used lubricant sample was 112.03 l/h at 25 °C. These results again indicates that the viscosity measurement approach provided by this paper can be used to easily infer the viscosity levels at normal operational loading, in order to assess the machinery lifetime.

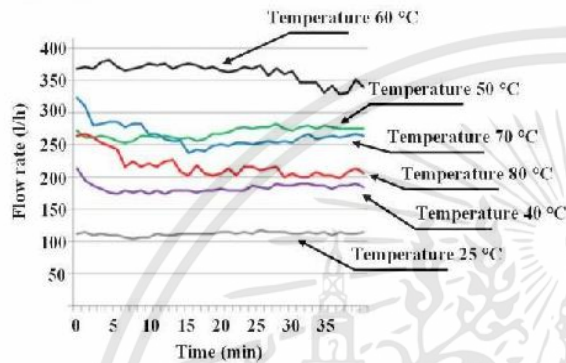


Fig. 9 Flow rates relationship at various temperatures for a used lubricant sample.

**4.3 The Results of Measurement Metal Particles**

The second testing condition involves the addition of a 0.5 A to 1 A current to the magnetic field generator, in order to attract metal particles contaminated with the lubricant. In this way the engineer is able to measure the output from the Hall voltage sensor to directly infer the state of the lubricant.

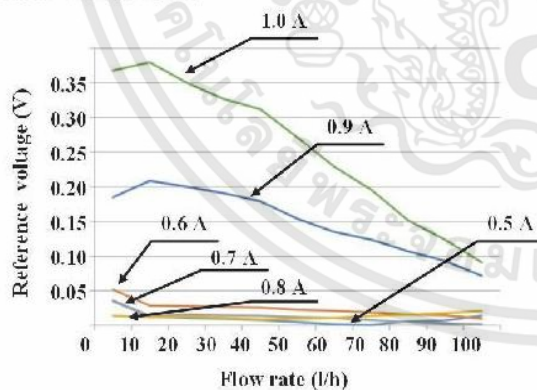


Fig. 10 Reference voltage response versus the flow rate for various levels of applied current.

Figure 10 plots the reference voltage against the flow rate for various currents between 0.5 A to 1 A. It is seen that, for current levels below 0.8 A, there is no significant distinction in output voltage levels between the contaminated lubricant and the non-contaminated one. Whereas this distinction is significantly evident as current levels rises above 0.8 A. Note that as current increases, the coil also gets hotter; this may affect the stability of the measurement system. For this reason the

most suitable current level is 0.9 A. Table 1 shows the output voltages for the case of 0.9 A supplying current. Where  $V_R$  is the output voltage of the adjustable resistor,  $V_H$  is the output voltage of the Hall Effect sensor,  $V_0$  is the reference output voltage when there is no metal particles in the system,  $V_1$  is the reference output voltage when there is metal particles in the system and  $\Delta V$  is the difference between the output voltage when there is metal particles and no metal particles in the system.

Table 1 Output voltage responses against the flow rates for current supply of 0.9 A at 25 °C.

Flow rate (l/h)	$V_R$	$V_H$	$V_0$	$V_1$	$\Delta V$
0	3.09	3.17	0.999	0.814	0.185
10	3	3.09	0.999	0.79	0.209
20	3	3.08	0.999	0.799	0.2
30	3	3.08	0.999	0.808	0.191
40	2.99	3.08	0.999	0.82	0.179
50	2.99	3.08	0.999	0.845	0.154
60	2.98	3.07	0.999	0.864	0.135
70	2.97	3.06	0.999	0.875	0.124
80	2.96	3.06	0.999	0.892	0.107
90	2.95	3.05	0.999	0.906	0.093
100	2.95	3.05	0.999	0.927	0.072

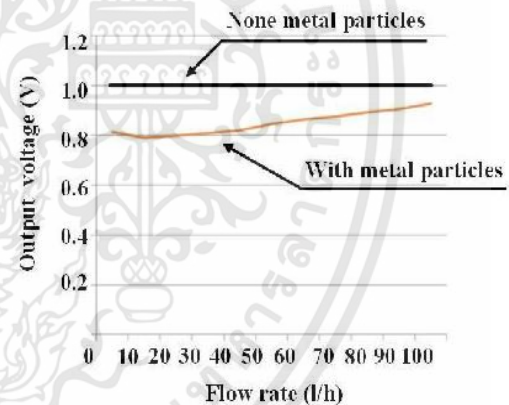


Fig. 11 The relation between output voltage and flow rate when supplying current to coil 0.9 A at 25 °C.

Figure 11 plots the output voltage comparison between the case where there is no metal particles present in the system, against the case where there is metal particles present, for various lubricant flow rates. For the case of no metal particles, the output voltage remains constant at  $1 \pm 2$  mV, which is specifically the reference voltage. This output voltage deviates significantly from the reference voltage in the presence of metal particles. These results further illustrates the ability of our proposed system to detect contamination of metal particles in the lubricant. Note however that this feature depends on the liquid flow rate, which limits the suction of the solenoid coil, thereby limiting the sensitivity of the Hall Effect sensor. It is thus recommended that a flow rate in the range of 0 to 30 l/h is used to ensure accurate measurement data.

## 5. CONCLUSION

This paper has developed a Hall Effect based system to assess the properties of a lubricant. In this regard there are two main lubricating properties being tested: viscosity and metal particles contamination. Viscosity measurements involve initially determining a reference Hall output voltage, then measuring the time it takes for the Hall Effect sensor to reach its saturation point. The metal particles contamination measurements involve an addition of a current to the magnetic field generator, to attract the metal particles contaminants, and directly measuring the Hall output voltages. It was experimentally found that a liquid flow rate of 0 to 30 l/h, and a 0.9 A additive current supply, was the most effective measurement range to ensure accurate viscosity as well as metal particles contamination measurements. The sample lubricant viscosity was found to be 49.2874 Cst, which is well within the range of internationally accepted values. The output Hall voltage for the contaminated lubricant was 0.8 A for liquid flow rates of 0 to 30 l/h, which significantly deviated from the non-contaminated lubricant. These results illustrate that the developed system is a low-cost effective system, capable of determining the performance of the lubricants even under normal operational loading.

## REFERENCES

- [1] F. Buiochi, R. T. Higuti, C. M. Furukawa, and J. C. Adamowski, "Ultrasonic Measurement of Viscosity of Liquids", *IEEE Ultrasonics Symposium*, Vol. 1, pp. 525-528, 2000.
- [2] A. Agoston, C. Otsch, J. Zhuravleva, and B. Jakoby, "An IR-Absorption Sensor System for the Determination of Engine Oil Deterioration", *Proceedings of IEEE, Sensors*, Vol. 1, pp. 463-466, 2004.
- [3] C. Chaiyachit, S. Sathamsakul, W. Sriratana and T. Suesut, "Hall Effect Sensor for Measuring Metal Particles in Lubricant", *IMECS2012*, Vol II, pp. 894-897, 2012.
- [4] E. Ramsden, and W., "Hall-Effect Sensor Theory and applications", Elsevier, Burlington MA01803, USA, pp. 195-196, 2006.
- [5] Datasheet Hall Effect sensor Website, "<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet2/2/04940otsfigzd5t3wyz41sfwfwcy.pdf>"
- [6] W. Sriratana, and R. Murayama, "Measurement of the Lubricant Properties Using Hall Effect Sensor: A Study on Contamination and Viscosity", *Engineer*, Vol. 4, No. 5, pp. 386-393, 2013.
- [7] W. Sriratana, and R. Murayama, "Lubricant Viscosity Measurement using Hall Effect Sensor", *SICE Annual Conference 2012*, pp. 23-26, 2012.
- [8] Martin A. Plonus, *APPLIED ELECTROMAGNETICS International Edition*, McGraw-Hill Book, Singapore, 1988.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอิทธิ อินทวัฒน์กุล
วัน เดือน ปีเกิด	16 มีนาคม 2536
ที่อยู่	94/84 ซ. สุภาพงษ์ 1 แยก 6 แขวงหนองบอน เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร
โทรศัพท์ อีเมล	(+66)89-206-6618, Itti.i@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	2558 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ วิชาเอก เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบระบบโดยการประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดต่างๆ 2.) การเขียนโปรแกรม Arduino
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	

- [1] Itti Inthawatkul, Witsarut Sriratana, and Sutham Sathamsakul “**Measurement of Metal Particles in Oil Lubricant using Hall Effect Sensor under Temperature Conditions**”  
Proceeding of the SICE Annual Conference 2017, September 19-22, 2017, Kanazawa University, Kanazawa, Japan, pp. 731 – 735.