

การวิเคราะห์ความนำของของเหลวโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์  
บนพื้นฐานทางคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ANALYSIS OF LIQUIDS CONDUCTIVITY USING HALL EFFECT SENSOR  
BASED ON ELECTROMAGNETIC FIELD PROPERTIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560  
KMITL-2017-EN-M-060-187

การวิเคราะห์ความนำของของเหลวโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์  
บนพื้นฐานทางคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ANALYSIS OF LIQUIDS CONDUCTIVITY USING HALL EFFECT SENSOR  
BASED ON ELECTROMAGNETIC FIELD PROPERTIES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-060-187  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF LIQUIDS CONDUCTIVITY USING HALL EFFECT SENSOR  
BASED ON ELECTROMAGNETIC FIELD PROPERTIES



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  
2017

KMITL-2017-EN-M-060-187

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ความนำของของเหลวโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์บนพื้นฐานทางคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Thesis Title Analysis of Liquids Conductivity using Hall Effect Sensor Based on Eletromagnetic Field Properties

นักศึกษ นายศิวกร ศอกจะบก

รหัสประจำตัว 58601073

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ

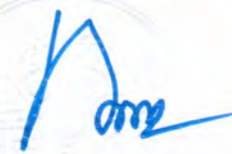
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-060-187

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.พุศศักดิ์ ชิวสุวิทย์	
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.ทวีพล ชื้อสสัย	
รศ.วิริยะ กองรัตน์	
รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพุธที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

  
(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความทน ของของเหลวโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ บนพื้นฐานทางคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
นักศึกษา	นายศิวกร ศอกจะบก
รหัสประจำตัว	58601073
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. วิศรุต ศรีรัตน์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ าสนอการใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์เพื่อจาแนกคุณลักษณะของของเหลวที่ต่างชนิดกันด้วยการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากแกนแม่เหล็กความถี่สูงชนิด Ferrite Solenoid Cores, Toroidal Iron Power Cores (T131-26) และขนาดของเส้นลวด (AWG 31) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการนำไฟฟ้าของของเหลว สำหรับการศึกษานี้ใช้ค่าคงที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเท่ากับ  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  และ  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  โดยวิเคราะห์ของเหลวต่างชนิดกันรวมทั้ง 70 ตัวอย่าง ภายใต้การออกแบบการติดตั้งตำแหน่งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ร่วมกับแกนแม่เหล็กความถี่สูงทั้ง 5 รูปแบบ คือ โซลินอยด์ 310 รอบ ทอลอยด์ 260 รอบ ทอลอยด์ 310 รอบ ทอลอยด์ C 310 รอบ และ ทอลอยด์ 530 รอบ โดยในกรณีของโซลินอยด์ 310 รอบ จากผลการทดสอบตัวอย่างน้ำผึ้งธรรมชาติจากประเทศเยอรมัน (C40) และสารให้ความหวานเทียมสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน (C21) ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถ านแณคุณลักษณะของของเหลวได้โดยพิจารณาจาก ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์  $C40 = 2.333 \text{ V}$ ,  $C21 = 2.374 \text{ V}$  และค่าความนำไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นฐานของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์  $C40 = 34.235 \text{ S}\cdot\text{T}$ ,  $C21 = 35.002 \text{ S}\cdot\text{T}$  ซึ่งตัวแปรข้างต้นใช้เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของของเหลว จากการศึกษาพบว่าฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถประยุกต์สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวได้ เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของตัวอย่าง C21 และ C40 ให้ค่าความแตกต่างที่สัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวโดยตรง สามารถสรุปได้ว่ารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับจาแนกคุณลักษณะของของเหลวในกลุ่มนี้ ึ่งธรรมชาติคือ รูปแบบทอลอยด์ C 310 รอบ โดยให้ค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $\pm 0.03$  เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	ANALYSIS OF LIQUIDS CONDUCTIVITY USING HALL EFFECT SENSOR BASED ON ELECTROMAGNETIC FIELD PROPERTIES
<b>Student</b>	Mr. Siwakon Sokjabok
<b>Student ID.</b>	58601073
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2017
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr. Witsarut Sriratana

## ABSTRACT

This research presents a Hall Effect based approach for analyzing and classifying characteristics of different liquids. This approach involves the excitation of electromagnetic fields from high frequency cores to generate an output Hall voltage for further analysis. Five high frequency magnetic field cores, namely a 310 turns Solenoid, a 260 turns Toroid, a 310 turns Toroid, a 310 turns C-shaped Toroid and a 530 turns Toroid; and three cells constants of  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  and  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  were investigated for the efficacy of liquid classification. Seventy liquid samples were used in the Hall Effect based analysis. For the case of the 310 turns solenoid, the output Hall Voltage was found to be 2.333 V for a German natural honey (C 40); and 2.374 V for the sugar substitute for diabetics (C 21). The associated output conductivity was found to be 34.235 S•T for the C 40 sample, and 35.002 S•T for the C 21 sample. Results show that all variables, namely the core ratios, and the cell constants, impacts the efficacy of the liquid classification and analysis. Further analyses also show that the most appropriate core for the classification of the natural honey properties is the 310 turns Toroid C core with an error of  $\pm 0.03\%$ .

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้นมาจากความเมตตากรุณาที่ได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆจาก รศ.ดร. วิศรุต ศรีรัตนะ พร้อมทั้ง ผศ. สุธรรม สัทธรรมสกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมดูแลการทําวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คาปรึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิทยานิพนธ์และดูแลควบคุมการทางานอย่างใกล้ชิด ผู้จัดทํามีความรู้สึกรักซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและคาสั่งสอนเพื่อนามาจัดทําวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณละมัย พวงบุรี คุณยุทพงษ์ กลิ่นธงชัย คุณวนิศรา แก้วนามชัย คุณเมธินี สงไทย และ คุณปภุมิ จันโทสถ สําหรับการให้คา ปรึกษา ในส่วนของโปรแกรมและเนื้อหาในส่วนต่างๆ ที่เป็นการสนับสนุนในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและห้องปฏิบัติการเซนเซอร์ และทรานสดิวเซอร์ หลักสูตรวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่ในการศึกษาวิจัยและสนับสนุนอุปกรณ์ในการจัดทําวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือพร้อมกำลังใจที่มีให้กันตลอดการเรียนและการจัดทํา วิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง รวมทั้งเพื่อน พี่ และน้อง ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้การสนับสนุนช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านทั้งเรื่องการเรียนและเรื่องต่าง ๆ ทําให้ผู้เขียนผ่านทุก ๆ อย่างจนมาถึงทุกวันนี้ได้

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา และน้องสาว ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และขอให้ทุก ๆ ท่านจงมีแต่ความสุขตลอดไป

ศิวกร ศอกจะบก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทหน้า.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.2 สันนิษฐานแม่เหล็กเหนี่ยวนำ.....	4
2.2.1 การประยุกต์กฎของแอมแปร์กับโซลินอยด์.....	5
2.2.2 การประยุกต์กฎของแอมแปร์กับทอลอยด์.....	9
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์.....	10
2.3.1 ตัวรับรู้อฮอลล์.....	11
2.3.2 ปรัากฎการณ์ฮอลล์.....	12
2.4 เคมีวิเคราะห์เชิงคุณภาพทางไฟฟ้า.....	15
2.5 การวัดความนำไฟฟ้า.....	19
2.5.1 สารอิเล็กโทรไลต์.....	19
2.5.2 การตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้า.....	20
2.5.2.1 ผลการเกิดโพลาไรเซชันต่อการวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	24
2.5.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อค่าความนำไฟฟ้า.....	24
2.5.3 อุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้า.....	25
2.5.3.1 อุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้าชนิดขั้วไฟฟ้า.....	25
2.5.3.2 อุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้าชนิดไม่ใช่ขั้วไฟฟ้า.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 คาร์โบไฮเดรตกับการวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	27
2.6.1 คุณสมบัติทางแสงกับความหวาน.....	27
2.6.1.1 การเบี่ยงเบนแสงโพลาไรส์ .....	27
2.6.1.2 การวัดด้วยวิธีการหักเหด้วยแสง.....	28
2.6.2 สารที่ให้ความหวานแทนน้ำตาล.....	28
2.6.2.1 น้ำตาลเทียม.....	28
2.6.2.2 น้ำผึ้ง.....	30
บทที่ 3 การออกแบบระบบ อุปกรณ์ และการดำเนินงาน.....	32
3.1 เครื่องตรวจวัดความนำไฟฟ้า.....	32
3.2 วงจรไฟฟ้าเคมีและวงจรของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์.....	37
3.3 การดำเนินการวิจัยและทดสอบส่วนประกอบของวงจรเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า.....	38
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ของเหลวตัวอย่างและขั้นตอนการวิเคราะห์.....	46
3.4.1 รายชื่อของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	54
4.1 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของทั้ง 5 รูปแบบ.....	55
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น.....	57
4.2.1 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น.....	58
4.2.2 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นกลุ่ม.....	62
4.2.3 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 34 mm 10 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น.....	64
4.2.4 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นกลุ่ม.....	68
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อพิจารณาคุณลักษณะของของเหลว.....	69
4.3.1 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 40 mm 40 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น.....	69
4.3.2 การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่างสำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้นพิจารณา C1 – C6.....	73
4.3.3 การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่างสำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น พิจารณาแต่ละรูปแบบ.....	76
4.3.4 การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่างสำหรับการทดลองความเป็นกลุ่ม.....	79

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลกำรวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลกำรวิจัย.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
เอกสารอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก ก ผลกำรวิจัยและรายชื่อของเหลวตัวอย่างทั้งหมด 70 ตัวอย่าง ทั้ง 3 เดือนไข.....	84
ภาคผนวก ข ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกำรวิจัยวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	103
ประวัติผู้เขียน.....	104



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เทคนิคของการวิเคราะห์โดยหลักการทำงานเคมีไฟฟ้า.....	16
2.2 ประเภทของสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	20
2.3 ค่ามุมเบี่ยงเบนจำเพาะ.....	28
2.4 ตำราแสดงส่วนประกอบของน้ำดื่มธรรมชาติ.....	30
3.1 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 24 mm และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 20 mL.....	47
3.2 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 34 mm และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 25 mL.....	48
3.3 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 40 mm และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 17 mL.....	49
4.1 การกำหนดค่าเฉพาะของตัวแปร สำหรับการหาค่าความนำไฟฟ้า.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แกนโซลินอยด์ และแกนทอลอยด์เทียบกับเหรียญ 5 บาท.....	4
2.2 แสดงค่าสนามแม่เหล็กตามความยาวของแกนโซลินอยด์ และการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์กับโซลินอยด์.....	7
2.3 แสดงค่าสนามแม่เหล็กตามความยาวของแกนทอลอยด์ และการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์กับทอลอยด์.....	9
2.4 ตัวรับรู้ฮอลล์.....	11
2.5 การต่อตัวรับรู้ฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์.....	11
2.6 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	12
2.7 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์.....	13
2.8 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์ $V_H$ .....	14
2.9 การแพร่ไอออนในสารละลาย.....	17
2.10 ตัวอย่างการอัดกระแสในกระบวนกำรนอนฟ้ารำเดอิก.....	17
2.11 สำรอเล็กโทรไลต์.....	19
2.12 สำรละลายที่แตกตัวเป็นไอออนสำรละลายที่นำไฟฟ้า.....	20
2.13 กำรวัดกำรต้านทานกำรไหลของกระแสไฟฟ้า.....	21
2.14 กำรวัดค่าความนำไฟฟ้าในของเหลว.....	22
2.15 อุปกรณ์วัดแบบขั้วไฟฟ้า.....	25
2.16 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้าแบบ 2 ขั้ว และ 4 ขั้ว.....	26
3.1 ชุดเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว.....	32
3.2 เครื่องทดลองกำรวัดค่าความนำไฟฟ้า 2 รูปแบบ.....	35
3.3 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า 5 รูปแบบ.....	36
3.4 โครงสร้างของวงจรเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า 5 รูปแบบ.....	37
3.5 วงจรไฟฟ้าเคมีและวงจรแม่เหล็ก.....	37
3.6 วงจรฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect Circuit).....	38
3.7 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrodes).....	38
3.8 แกนโซลินอยด์ โดยวัสดุของแกนเป็น Ferrite.....	40
3.9 แกนทอลอยด์ (Iron Powder Toroidal Cores (Series T-26)).....	41
3.10 กำรวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนโซลินอยด์ (Solenoid).....	43
3.11 กำรวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนทอลอยด์ (Toroid).....	44
3.12 แสดง AC/DC Magnetic Field Meter EXTECH SDL900.....	45
3.13 แสดง LCR Meter INSTEK816.....	45
3.14 ตัวอย่างและส่วนผสมของเหลวสำหับกำรศึกษา.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหับกำรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้ำนการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทำการทดลองเบื้องต้น.....	52
3.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	52
3.17 แสดงการวัดและการส่งข้อมูล.....	53
4.1 สารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ความลึก 40 mm และปริมาตรเท่ากับ 17 ml.....	54
4.2 ค่าความเหนียวน้ำทั้ง 5 รูปแบบ.....	55
4.3 ค่าความต้านทานและค่าความยาวของหลอดทองแดง ทั้ง 5 รูปแบบ.....	56
4.4 ค่าความกระแสของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง.....	58
4.5 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง.....	59
4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง.....	60
4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง.....	60
4.8 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง.....	61
4.9 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าระหว่างการพิจารณากระแสและแรงดันเอาต์ฮอลล์เอฟเฟกต์ ของแกนโซลินอยด์ 310.....	62
4.10 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าระหว่างการพิจารณากระแสและแรงดันเอาต์ฮอลล์เอฟเฟกต์ ของแกนทอลอยด์ 260.....	63
4.11 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์ฮอลล์เอฟเฟกต์ของ แกนโซลินอยด์ 310 และแกนทอลอยด์ 260.....	63
4.12 ค่าความกระแสของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 34 mm 10 อย่าง.....	64
4.13 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 34 mm 10 อย่าง.....	65
4.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 34 mm 10 อย่าง.....	66
4.15 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 34 mm 10 อย่าง.....	66
4.16 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 34 mm 10 อย่าง.....	67
4.17 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของน้ำผึ้งธรรมชาติทั้ง 10 ชนิด.....	68
4.18 ค่าความกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง.....	69
4.19 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่ ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของค่าคงที่ ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง..... 71
4.21	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแส ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 m 40 ตัวอย่าง..... 71
4.22	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง..... 72
4.23	ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C1-C6..... 73
4.24	ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11-C40..... 73
4.25	ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11-C13..... 74
4.26	ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40..... 74
4.27	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40..... 75
4.28	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40 ของแบบทอลอยด์ 4 รูปแบบ..... 76
4.29	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40 C40 ของรูปแบบโซลินอยด์ 310..... 76
4.30	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40 C40 ของแบบทอลอยด์ 260..... 77
4.31	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40 C40 ของแบบทอลอยด์ 310..... 77
4.32	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40 C40 ของแบบทอลอยด์ C 310..... 78
4.33	ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14-C40 C40 ของแบบทอลอยด์ 530 ..... 78
4.34	เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ของแกนโซลินอยด์310และแกนทอลอยด์260 กลุ่ม C ..... 79
4.35	เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ของแกนโซลินอยด์310และแกนทอลอยด์310 กลุ่ม C ..... 79
4.36	เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ของแกนโซลินอยด์310และแกนทอลอยด์ C 310 กลุ่ม C ..... 80
4.37	เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ของแกนโซลินอยด์310และแกนทอลอยด์ 530 กลุ่ม C ..... 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ Xing อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอัตราความเสี่ยงที่จะเป็นโรคต่าง ๆ เพิ่มขึ้นด้วยสาเหตุ 2 ข้อ คือการบริโภคคาร์โบไฮเดรตในปริมาณที่เกินความจำเป็นและการออกกำลังกายในปริมาณที่น้อยรวมทั้งการใช้ชีวิตที่เร่งรีบโดยทุกวันนี้มีผู้ป่วยโรคเบาหวานทั่วโลก 175 ล้านคน และที่สำคัญมีแนวโน้มจะสูงขึ้นถึง 366 ล้านคน ภายในปี 2030 แม้ว่าคนยุคใหม่จะมีพฤติกรรมการบริโภคน้ำตาลอย่างระมัดระวัง ส่งผลให้มีการศึกษาและวิจัยการตรวจวัดระดับน้ำตาลเกิดขึ้นในหลายๆด้าน ซึ่งหนึ่งในวิธีการตรวจวัด คือวิธีการวัดค่าความนำไฟฟ้า [1-2] เช่น การวัดโดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนแปลงความถี่ [3] การวัดคุณภาพของน้ำในแหล่งเกษตรกรรม [4] การวัดคุณภาพของน้ำในเครื่องทาความเย็น [5] การวัดโดยใช้เทคนิค Calibration-Free [6] การวัดโดยใช้เทคนิคทางการแพทย์ Hamtocrit ในการวัดค่าความนำของเลือดมนุษย์ (Human Blood) [7] การวัดโดยใช้คุณสมบัติจากองค์ประกอบของน้ำ ผังธรรมชาติ และน้ำตาลพร้อมทั้งการจำลองการส่งข้อมูลในรูปแบบการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของขดลวดที่มีความเหมาะสมกับผู้ป่วยโรคเบาหวาน [8-11] โดยการศึกษาวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์จากการทบทวนวรรณกรรมต่าง ๆ เช่น การวัดตำแหน่ง [12] การวัดความบริสุทธิ์ของวัสดุ [13] การวัดความดัน [14] การพัฒนาระบบการวัด SHPM (Scanning Hall Microscopy) [15] ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้มีจุดประสงค์สำหรับการวัดเพื่อจากแณกคุณลักษณะเชิงคุณภาพของน้ำ ผังธรรมชาติ น้ำดื่มเทียม น้ำหวาน เครื่องดื่มที่มีส่วนผสมของน้ำตาล น้ำดื่ม น้ำปลา น้ำสะอาด ทั้งนี้เพื่อออกแบบระเบียบวิธีการวัดอีกหนึ่งรูปแบบ โดยจะได้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูง 1 ข้อมูล ต่อจากการวัดซ้ำข้อมูลที่จุดเดิม 195 ข้อมูล จากการส่งข้อมูลของสัญญาณเอาต์พุตจากระบบแอนะล็อกอิเล็กทรอนิกส์ไปยังระบบพื้นฐานของคอมพิวเตอร์พร้อมทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลและความถูกต้อง ซึ่ง 1/195 ข้อมูล ได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด 800 ข้อมูล ในเวลา 60 วินาที ด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ขนาด 10 บิต เป็นการสังเกตสัญญาณแบบทันปัจจุบัน

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาระบบการตรวจวัดคุณลักษณะของของเหลวจากปฏิกิริยาเคมีวิเคราะห์เชิงความนำไฟฟ้าของของเหลวโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ได้
2. เพื่อศึกษาการออกแบบระบบการตรวจวัดคุณลักษณะโดยสามารถคาดคะเนองค์ประกอบของของเหลวโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ได้
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดคุณลักษณะของของเหลวที่ต่างชนิดกันโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ได้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาระบบการตรวจวัดคุณลักษณะเชิงคุณภาพของของเหลวที่ต่างชนิดกันเพื่อคาดคะเนองค์ประกอบและจำแนกชนิดของของเหลวซึ่งเป็นของเหลวที่จำหน่ายทั่วไปภายในประเทศ น้ำผึ้งธรรมชาติ น้ำผึ้งเทียม เป็นกรณีศึกษา โดยประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลองบนพื้นฐานของการนำไฟฟ้าของของเหลวด้วยหลักการวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าเคมี

### 1.4 ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟกต์และตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสม
2. ศึกษาหลักการตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวและการเลือกใช้รูปทรงของแกนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
3. ศึกษาการออกแบบและสร้างระบบการตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าโดยใช้หลักการพื้นฐานทางไฟฟ้าเคมีร่วมกับการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งานของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์
4. ศึกษาและวิเคราะห์ผลจากค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวที่แปรผันตรงกับกระแสพร้อมทั้งค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด

### 1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจวัดคุณลักษณะของของเหลวต่างชนิดกันได้
2. สามารถประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในการตรวจวัดคุณลักษณะและจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติ และน้ำผึ้งเทียมได้ รวมทั้งสามารถลดต้นทุนการตรวจสอบคุณลักษณะเชิงคุณภาพตามมาตรฐานสินค้าการเกษตรและสหกรณ์ได้

### 1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

- บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติและน้ำผึ้งเทียม
- บทที่ 2 กล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม ทฤษฎีการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวและฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์
- บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการสร้างแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและวิธีการตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวเพื่อจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติและน้ำผึ้งเทียม
- บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ผลในการตรวจวัดคุณลักษณะของของเหลว
- บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์การวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าต่อไป

## บทที่ 2

# ทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

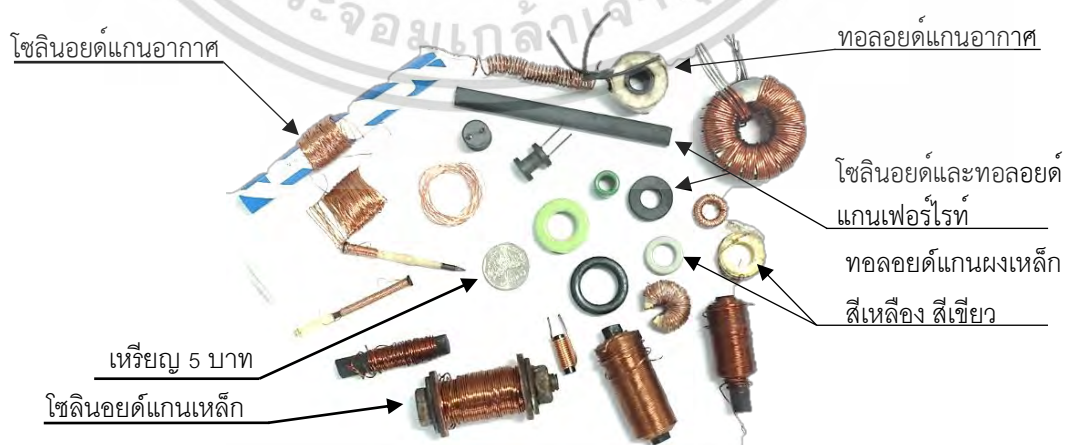
ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟกต์เซมิคอนดักเตอร์ร่วมกับการวิเคราะห์ผลจากการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวที่ต่างชนิดกัน เพื่อสามารถประยุกต์ใช้งานเซนเซอร์ในการนำเสนอระเบียบวิธีการจำแนกน้ำธรรมชาติและน้ำเทียม โดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าของของเหลว โดยอยู่บนพื้นฐานของเคมีไฟฟ้าวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้ร่วมกับคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้จากการทบทวนวรรณกรรมดังนี้

### 2.1 ทบทวนวรรณกรรม

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหลายแขนงวิชามีจุดประสงค์คือการศึกษาการประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟกต์เซมิคอนดักเตอร์สำหรับการตรวจวัดคุณภาพที่อยู่ในรูปแบบของคุณลักษณะของของเหลว สำหรับผู้ที่เสี่ยงเป็นโรคเบาหวานรวมถึงผู้รักสุขภาพที่ต้องการความเหมาะสมสำหรับการเลือกบริโภคน้ำตาลและสารให้ความหวานซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดสำหรับการวัดน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวานจากการตั้งสมมติฐานคือ การผสมกลูโคสรวมเข้ากับตัวอย่างของน้ำเกลือเทียมโดยอยู่บนพื้นฐานของการนำไฟฟ้าของของเหลวเพื่อดูแนวโน้มเป็นต้นได้ เนื่องจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซมิคอนดักเตอร์มีราคาถูกและมีคุณสมบัติเฉพาะตัวในการตรวจวัดคุณสมบัติของแม่เหล็กจึงถูกเลือกมาใช้งานวิจัย [12-13] โดยศึกษาการประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟกต์เซมิคอนดักเตอร์ในรูปแบบของการวัดระยะรวมทั้งการออกแบบการติดตั้งของฮอลล์เอฟเฟกต์เซมิคอนดักเตอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุ ทั้งสองงานวิจัยให้ความสำคัญในส่วนของการตอบสนองคุณสมบัติของแม่เหล็กเป็นสำคัญ และยังมีงานวิจัยที่ใช้ในด้านการศึกษาและปรับปรุงระบบการวัดที่มีความเฉพาะทางสูง อย่างเช่นเครื่อง SHPM (Scanning Hall Microscopy) และระบบวัดความดัน [14-15] รวมทั้งการศึกษางานวิจัยด้านการออกแบบและติดตั้งเซนเซอร์ที่ให้ความสำคัญในเรื่องการลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มความทนทานในการติดตั้ง [16] ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เห็นถึงความสำคัญของเคมีวิเคราะห์ในเรื่องของการนำไฟฟ้าของของเหลวซึ่งมีการศึกษาวิจัยอย่างมากมาตั้งแต่อดีต ตัวอย่างเช่น งานวิจัยทางด้านการศึกษาค่าความนำไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ของ QCM (Quartz Crystal Microbalance) สำหรับการประยุกต์ใช้ทอลอยด์ [3] ในรูปแบบที่คล้ายกันนั้น มีรูปแบบของการศึกษาวิจัยคือ การวัดค่าความนำของของเหลวด้วยเทคนิค Calibration-Free ที่พัฒนามาจากเทคนิค Coaxial Cylinders ซึ่งเป็นเทคนิคทางด้านเคมีวิเคราะห์ [6] ยิ่งไปกว่านั้นยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าโดยการให้ความถี่ คือ การวัดค่าความนำจากเลือดของมนุษย์ (Human - Blood) [7] ประโยชน์ของการศึกษาการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวนั้นสามารถบอกถึงคุณภาพของของเหลวได้ซึ่งสังเกตจากคุณลักษณะของของเหลว โดยจากงานวิจัยที่ศึกษาการตรวจสอบคุณภาพของน้ำดื่มในเครื่องทำน้ำเย็นภายในมหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง และการวัดคุณภาพของน้ำในพื้นที่ป่าเกษตรกรรมของกลุ่มน้ำสาขาแม่ถาง จังหวัดแพร่ [4-5] และมีงานวิจัยที่ศึกษาการวัดความหวานของสารให้ความหวานต่างๆ ซึ่งมีทั้งการศึกษาในรูปแบบการจำลองโดยใช้ ANSYS Sugar Software นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่อยู่บนพื้นฐานเดียวกันนั้นคือ การออกแบบเซนเซอร์วัดความหวานให้มีราคาถูก โดยใช้ Capacitor Sensor [9-10] ความสำคัญสำหรับงานวิจัยครั้งนี้คือ การศึกษาคุณลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของน้ำผึ้ง โดยมีงานวิจัย และการศึกษาอย่างกว้างขวาง ทั้งการศึกษาองค์ประกอบที่พบในน้ำผึ้ง ที่เป็นตัวชี้วัดความสดและคุณภาพของน้ำผึ้งได้ตีพิมพ์ขึ้นอีกทั้งมีการศึกษาการเก็บรักษาน้ำผึ้งให้อยู่ได้นาน ด้วยวิธีการอบแบบสุญญากาศเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและนอกจากนี้ยังมีการศึกษา การวัดค่าความนำไฟฟ้าเพื่อคาดคะเนคุณสมบัติและองค์ประกอบของน้ำผึ้งจากประเทศเวเนซุเอลา ซึ่งค่าความนำไฟฟ้าสามารถบอกส่วนประกอบที่สำคัญได้คือ สารจำพวกคาร์โบไฮเดรตที่เป็นน้ำตาล โมโนแซ็กคาไรด์ ได้แก่ น้ำตาลฟรักโทสและน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำผึ้ง โดยในงานวิจัยใช้เทคนิค HPLC (High Performance Liquid Chromatography) [8, 17-18] และ การศึกษางานวิจัยที่มุ่งเน้นเพื่อพัฒนาต่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากการตั้งสมมติฐานเพื่อมีจุดมุ่งหมาย ช่วยผู้ป่วยโรคเบาหวานเป็นสำคัญ การศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบการแสดงผลของเครื่องมือวัดที่ใช้ โปรแกรมการวัดเสมือนจริงโดยใช้โปรแกรม Matlab และ Labview รวมทั้งการศึกษางานวิจัย เกี่ยวกับโรคเบาหวาน โดยให้ความสคัญกับการวัดแบบทันปัจจุบันของการตรวจสอบน้ำตาลในเลือด ที่มุ่งเน้นให้มีราคาที่ถูกเพียง 5 USD นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่อยู่บนพื้นฐานเดียวกันคือ การศึกษา การตรวจวัดน้ำตาลในเลือดโดยไม่จำเป็นต้องเจาะนิ้วซึ่งเป็นการศึกษารับส่งข้อมูลด้วยระเบียบ วิธีการใช้การเหนี่ยวนำของขดลวด [1, 11, 19] ในบางกรณีนั้นสำหรับการวัดผลไม่จำเป็นต้องรู้ความ เป็นเชิงเส้นแต่ให้ความสำคัญกับการตรวจวัดที่ให้ผลเป็นเชิงคุณภาพ ตัวอย่างที่สำคัญสำหรับการ ประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวัน คือ โรค คนสวนใหญ่ต้องการรู้ว่า เป็นหรือไม่เป็น ในโรคนั้นๆ แต่ใน เบื้องต้นนั้นสามารถที่จะคาดคะเนปริมาณการปนเปื้อนหรือบอกแนวโน้มของการเป็นเชิงเส้นได้ ทำให้ ในงานวิจัยนี้เห็นถึงความสำคัญของผู้ป่วยโรคเบาหวาน หรือ บุคคลทั่วไปที่มีภาวะเสี่ยงที่มีโอกาส บริโภคน้ำตาลในปริมาณที่สูงและการบริโภคสารสังเคราะห์ที่ให้ความหวานแทนน้ำตาลนั้นในระยะ ยาวจะทำให้ผู้ป่วยขาดสารอาหารที่จำเป็นและมีความเสี่ยงต่อการสะสมของสารเคมีสังเคราะห์จน นำไปสู่การเสียชีวิตได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานระบบการวัดและการคาดคะเน เพื่อจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติ น้ำผึ้งเทียม โดยใช้เทคนิคการนำไฟฟ้าของของเหลวจากการวิเคราะห์เชิง ไฟฟ้าเคมี คือการวัดค่าความนำไฟฟ้ารวมกันกับการประยุกต์ใช้คุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ที่มีความทนทานและราคาถูกลงได้

## 2.2 สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (Induce Magnetic Field) [20]



รูปที่ 2.1 แกนโซลินอยด์ และแกนทอลอยด์เทียบกับเหรียญ 5 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $\mu_0$  คือ magnetic constant permeability  
 $N$  คือ จำนวนรอบของการพันขดลวด (รอบ)  
 $I$  คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด (A)  
 $l$  คือ ความยาวของแกน (m)  
 $z$  คือ พื้นที่เล็กๆของขดลวด  
 $a$  คือ รัศมีของแกนวัสดุ

แกนแม่เหล็กความถี่สูงที่ใช้งานในปัจจุบันเป็นสารแม่เหล็กที่ใช้ทำเป็นแกนแม่เหล็กในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีคุณสมบัติที่มีค่าความซึมซาบสูงและสารแม่เหล็กที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นแกนแม่เหล็กนั้นแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ เฟอร์โรแมกเนติกหรือโลหะแม่เหล็ก เฟอร์ไรต์ซึ่งมีวัสดุในการผลิตมาจากสารออกไซด์ของโลหะชนิดต่างๆ และซูเปอร์พาราแมกเนติกหรือผงโลหะอัด โดยหน่วยของสนามแม่เหล็กในระบบ SI มีหน่วยเป็น Tesla (1 Tesla ; T = 1 Weber/m<sup>2</sup>) และโดยทั่วไปหน่วยของสนามแม่เหล็กที่ใช้อยู่ในหน่วยย่อยคือระบบ cgs คือ Gauss (G) ซึ่ง  $1 T = 10^4 G$  เวกเตอร์สนามแม่เหล็กคือ  $B$  หรือเรียกว่า Magnetic Flux Density โดยแยกออกจากความเข้มสนามแม่เหล็ก  $H$  เมื่อ  $B = \mu H$  ในกรณีที่มีความสมมาตรของกฎของแอมแปร์จะถูกนำมาพิจารณาสัดส่วนความสัมพันธ์ของค่า  $\mu = \mu_r \times \mu_0$  โดย  $\mu_0$  คือ Permeability of Vacuum ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ ),  $\mu_r$  คือ Permeability of Material  $\mu$  คือ Scalar Permeability หรือ magnetic constant

### 2.2.1 การประยุกต์กฎของแอมแปร์กับโซลินอยด์

การประยุกต์กฎของแอมแปร์กับโซลินอยด์ (Ampere's Law of solenoid) ในกรณีของโซลินอยด์สนามแม่เหล็ก  $B$  จะพิจารณากฎของแอมแปร์เมื่อตัดขวางโซลินอยด์จะเต็มไปด้วยขดลวดตัวนำโดยสามารถออกแบบจำนวนรอบต่อความยาวได้  $n$  โดย  $n = N/l$  เมื่อ  $N$  คือ จำนวนรอบและ  $l$  คือ ความยาวของโซลินอยด์ สนามแม่เหล็กโซลินอยด์เป็นหนึ่งในโครงสร้างที่ถูกนำมาใช้สร้างสนามแม่เหล็กที่มีความแรงคือ จำนวนของขดลวดที่พันและถูกเรียกว่า โซลินอยด์ เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่คู่กับแกนสามารถใช้การพิจารณาของ Single Loop และเป็นข้อพิสูจน์ว่า Single Loop สามารถบอกได้ว่าแกนที่คู่ขนานไปกับแกนของ โซลินอยด์ คือ แกน  $z$  ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า  $B$  เท่านั้น

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (2.1)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} I \quad (2.2)$$

สามารถสังเกตได้ว่าโซลินอยด์มีกระแสลูปซ้อนทับกันอยู่จำนวนมากและสามารถคำนวณสนามแม่เหล็ก  $B$  ได้ให้เหมาะกับที่มีจำนวนรอบของการพันสูงๆ ( $N$ , Turns) และอยู่ในระบบปิดจึง

ให้  $z$  เป็นพื้นที่เล็กๆ ในขดลวดโซลินอยด์ให้ความกว้างของ  $z$  เป็น  $d_z$  โดยเริ่มจากจุดศูนย์กลางบนแกนของโซลินอยด์จากรูปที่ 2.2

$$dB_z = \frac{\mu_0 a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} \frac{NI}{l} dz \quad (2.3)$$

เมื่อกระแสใน  $d_z$  คือสัดส่วนปริมาณของกระแสลูป (Current Loop) โดยกระแสลูปคือ  $\frac{NI}{l} d_z$  สนามแม่เหล็กรวมที่จุดศูนย์กลางโดยใช้ความยาวของแกนและเลือกจุดที่ศูนย์กลางเป็นจุดกึ่งกลางของแกน

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{(4a^2 + l^2)^{1/2}} \quad (2.4)$$

สำหรับ โซลินอยด์ เมื่อ  $l \gg a$  โดย  $l$  คือความยาว  $a$  คือรัศมี โดยสามารถไม่พิจารณา  $a$  ได้และสามารถหาสนามแม่เหล็กได้โดย

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (2.5)$$

โดยสมการสามารถใช้หาสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของโซลินอยด์ที่มีความยาวมากๆได้ อย่างไรก็ตาม สนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของแกนด้วยอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นหนึ่งในสองที่จะใกล้เคียงกับสนามแม่เหล็กที่มีความยาวมากๆจาก สมการ 2.5 ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรมเพื่อที่จะได้สนามแม่เหล็ก  $B$  ในจุดที่แตกต่างกันโดยเริ่มต้นที่จุดศูนย์กลางของแกน  $z$  และจะเกิดขึ้นพร้อมกับจุดบนแกนของโซลินอยด์ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็ก  $B$  ตัวอย่างสนามแม่เหล็กของแกนที่มีขนาดความยาวจำกัดเป็นหนึ่งในสองที่จะใช้ สมการ 2.4 ได้โดยใช้  $-l/4$  และ  $3l/4$  สำหรับสนามแม่เหล็ก  $B$  ที่ปลายสุดของแกนซึ่งใช้ สมการ 2.6 ในกรณีพิจารณาบริเวณปลายสุดของโซลินอยด์ เมื่อ  $l \gg a$  สามารถใช้ สมการ 2.7

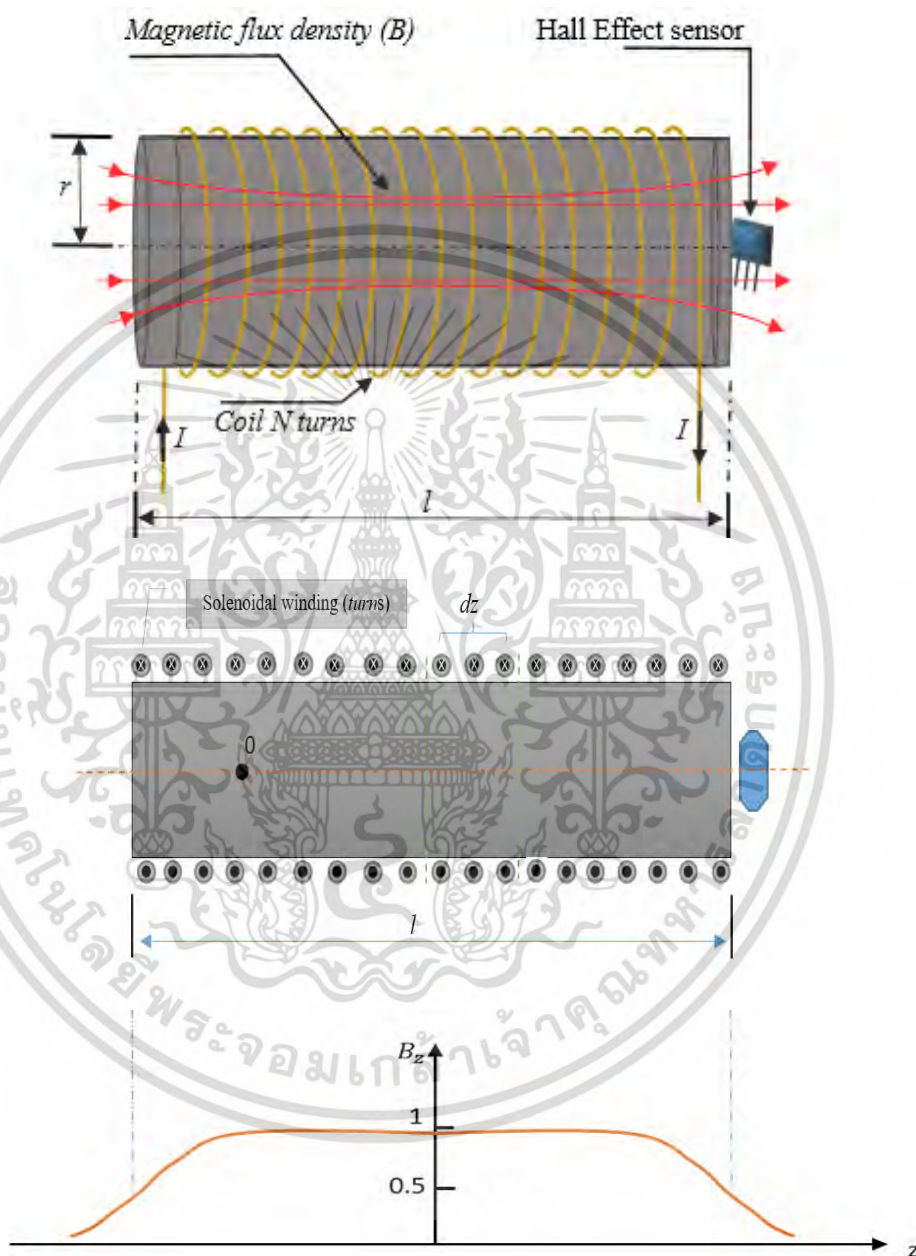
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2(a^2 + l^2)^{1/2}} \quad (2.6)$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2l} \quad (2.7)$$

ดังนั้นที่จุดปลายของแกนสนามแม่เหล็ก  $B$  จะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของจุดศูนย์กลาง โดยปริมาณ  $n = N/l$  คือ แอมแปร์-จนวนรอบ/ความยาวของแกน ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่า  $K$  เมื่อค่า  $K$  คือ Current Density โดย  $K = NI/l$  ถ้าจนวนรอบประกอบไปด้วยลวดบางๆในระบบปิดสามารถพิจารณาให้ความกว้างของ  $l$  เป็น Single Current Sheet ที่อยู่ภายในโซลินอยด์ การถ่ายโอนกระแสจะโค้งงอภายในทรงกระบอกจากรัศมี  $a$  ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของโซลินอยด์คือ  $B = \mu_0 K$  ในกรณี Short Coil จาก สมการที่ 2.4 สนามแม่เหล็กของโซลินอยด์ที่มีขนาดสั้นมากๆเมื่อ  $l \ll a$  โดยสามารถให้  $l=0$  โดยใช้สมการ

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2a} \quad (2.8)$$

แต่ถ้าพิจารณาจุดสุดท้ายปลายสุดของโซลินอยด์ เมื่อ  $l \ll a$  โดย  $z=0$  สามารถใช้ สมการ 2.8 ได้เช่นกัน



รูปที่ 2.2 แสดงค่าสนามแม่เหล็กตามความยาวของแกนโซลินอยด์ และการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์กับโซลินอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนความสามารถในการเก็บประจุ ความเหนี่ยวนำ  $L$  เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวนำ โดยเป็นการวัดค่าของฟลักซ์แม่เหล็กที่เชื่อมต่อกับวงจรไฟฟ้าเมื่อกระแส ( $I$ ) ไหลไปในวงจรไฟฟ้าอันเป็นการวัดเพื่อบอกว่ามีพลังงานอยู่เท่าใดที่ถูกเก็บไว้ในสนามแม่เหล็กของแกนตัวนำโดย flux linkage ( $\Lambda$ ) คือ ฟลักซ์ที่เชื่อมอยู่ในวงจรไฟฟ้าด้วยจำนวนของการพันขดลวดตัวอย่างในกรณีของโซลินอยด์ ทอลอยด์ โดย flux linkage ( $\Lambda$ ) หาได้จาก

$$\text{flux linkage } (\Lambda) = N\Phi = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \cong NBA \quad \text{wb} \quad (2.9)$$

แต่เป็นเพียงฟลักซ์ที่เคลื่อนที่อยู่ภายในโซลินอยด์ ดังนั้นฟลักซ์ที่เชื่อมกับจำนวนรอบทุกตัวจะถูกใช้ลูปของฟลักซ์ที่มีขนาดประมาณจำนวนรอบแต่ละตัวจะไม่สนใจในการวิเคราะห์ First-Order เพราะว่ามันจะเชื่อมเพียงแค่ 1 หรือ 2 จำนวนรอบโดยจะไหลผ่านพื้นที่เล็กๆ พื้นที่  $A$  คือ พื้นที่ที่มีฟลักซ์เชื่อมกับจำนวนรอบทุกจุดไหลผ่าน เนื่องจากสนามแม่เหล็กตรงกลางจะถูกคาดเดาว่าเป็นเส้นตรงโดยสนามแม่เหล็กที่เป็นสัดส่วนกับกระแสจะทำให้เกิดฟลักซ์จึงสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  ของตัวเหนี่ยวนำว่าเป็นอัตราส่วน flux linkage ( $\Lambda$ ) ต่อกระแสที่ไหลผ่านตัวนำโดยหน่วยของความสามารถในการเหนี่ยวนำคือ Henry ( $H$ )

$$L = \frac{\text{flux linkage } (\Lambda)}{I} = \frac{N \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}}{I} \quad H \quad (2.10)$$

สนามแม่เหล็กที่มีขนาดเหมาะสมในโซลินอยด์ที่เชื่อมต่อกับทุกจำนวนรอบคือสนามแม่เหล็กที่อยู่จุดศูนย์กลางโซลินอยด์นั่นคือ สมการที่ 2.5 แต่มีจุดรั่ว (Leakage) ที่ไม่เชื่อมทุกจุดอยู่บริเวณจุดปลายของโซลินอยด์เราจึงไม่ควรวัดค่าความเหนี่ยวนำที่บริเวณปลายของโซลินอยด์โดยค่าความเหนี่ยวนำ  $L$  ของโซลินอยด์หาได้ โดยที่  $l$  คือ ความยาวของโซลินอยด์  $A$  คือ พื้นที่ของวงกลม (Cross Section of Solenoid)

$$L = \frac{\text{flux linkage } (\Lambda)}{I} = \frac{NBA}{l} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} \quad (2.11)$$

โดยถ้า โซลินอยด์ มีขนาดสั้น  $l \ll a$  จะทำให้สมการที่ 2.8 และส่งผลให้สมการ

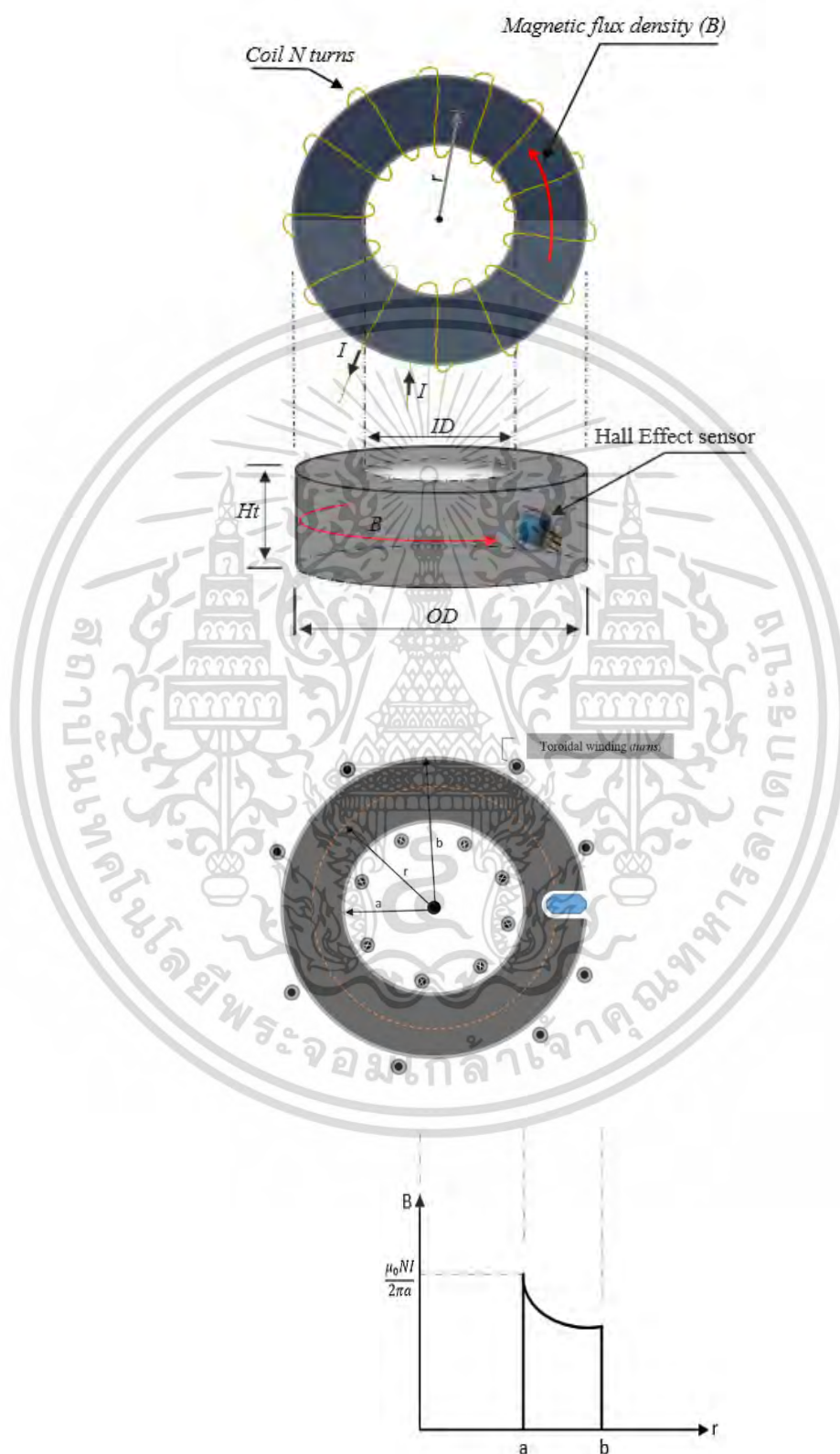
$$L = \mu_0 N^2 \frac{A}{2a} = \mu_0 N^2 \frac{\pi a}{2} \quad (2.12)$$

ในกรณีของการหาการเหนี่ยวนำ ขดลวด 1 Turns Loop จะได้สมการ คือ

$$L = \mu_0 \frac{\pi a}{2} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 การประยุกต์กฎของแอมแปร์กับทอลอยด์



รูปที่ 2.3 แสดงค่าสนามแม่เหล็กตามความยาวของแกนทอลอยด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับและมีการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์กับทอลอยด์ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของการประยุกต์กฎของแอมแปร์กับทอลอยด์ (Ampere's Law of Toroid) สนามแม่เหล็ก  $B$  พิจารณาการประยุกต์ใช้กฎของแอมแปร์โดยสนามแม่เหล็กภายนอกของทอลอยด์ เท่ากับศูนย์ และสนามแม่เหล็กภายในของทอลอยด์มีการปรับเปลี่ยนตามระยะ โดยรูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางของทอลอยด์กับกระแส ในจำนวนขดลวดของการพันจะพิจารณาการประยุกต์ใช้กฎของแอมแปร์สำหรับส่วนที่เป็นวงกลมเมื่อ  $r \leq a$  จะทำให้สมการที่ 2.14 เท่ากับศูนย์ เพราะว่าไม่มีกระแส อยู่ภายในกรณีนี้  $a < r < b$

$$\oint B dl = \mu_0 NI \quad (2.14)$$

อันเนื่องมาจากมีสัดส่วนที่สมมาตรสนามแม่เหล็ก  $B$  เป็นค่าคงที่เมื่อ  $r$  คงที่ได้ว่า

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad (2.15)$$

สนามแม่เหล็กทอลอยด์ ในกรณีแกนทอลอยด์ คือ โซลินอยด์ขนาดยาวที่ขดอยู่ในรูปร่างวงกลม ใช้หลักการสมมาตรเหมือนโซลินอยด์โดยระบบที่ที่ความสมมาตรเหมือนกันโดยใช้สมการที่มีแนวโน้มเดียวกันแต่จะเปลี่ยนตามรูปทรงคือ เมื่อ  $l = 2\pi r$  ได้ว่าค่าความเหนี่ยวนาของตัวเหนี่ยวนาเป็นอัตราส่วน flux linkage ( $\Lambda$ ) ต่อกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ และมีค่าน้อยมากเนื่องจาก ทอลอยด์ ไม่มีจุดปลายเหมือนโซลินอยด์ โดย Flux Leakage จะเท่ากับศูนย์ ถ้าเราให้การพันขดลวดเปรียบเสมือน 1 Current-Sheet ดังนั้นฟลักซ์ทั้งหมดที่เชื่อมกับจำนวนรอบทุกตัวจะนำไปคำนวณหาค่าการเหนี่ยวนา ได้โดยสมการ

$$L = \frac{\text{flux linkage } (\Lambda)}{I} = \frac{N \iint B \cdot dA}{I} \quad H \quad (2.16)$$

และใช้ สมการที่ 2.16 เพื่อหาสนามแม่เหล็กของทอลอยด์จะได้ค่า  $L$  จากสมการ โดยที่  $a < r < b$

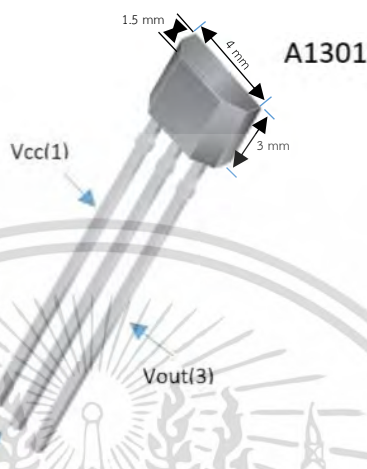
$$L = \frac{\text{flux linkage } (\Lambda)}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{2\pi r} \quad (2.17)$$

### 2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์ [21]

แม่เหล็กเป็นสิ่งที่สามารถดูด้วยตาเปล่าได้ เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) เป็นต้น การที่แม่เหล็กดูดสารบางอย่างได้ เนื่องจากบริเวณโดยรอบแม่เหล็กนั้นจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และสามารถตรวจสอบว่าบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กหรือไม่ โดยใช้เข็มทิศ แต่การใช้เข็มทิศนี้ไม่สามารถทราบได้ว่าสนามแม่เหล็กมีขนาดเท่าใด นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามคิดค้นวิธีวัดสนามแม่เหล็ก ด้วยวิธีการต่างๆ มากมาย และในปัจจุบันนี้นักวิทยาศาสตร์พบว่าสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้สะดวก และรวดเร็ว โดยใช้ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall Sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เอกซอร์ตันเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮอลล์ตัวรับรู้อฮอลล์เป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำตัวรับรู้อฮอลล์ไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ แล้วนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้

### 2.3.1 ตัวรับรู้อฮอลล์ (Linear Hall Sensor)

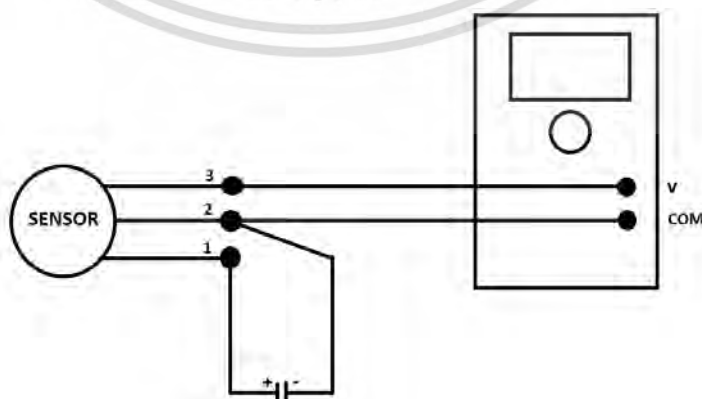


รูปที่ 2.4 ตัวรับรู้อฮอลล์

ตัวรับรู้อฮอลล์เป็นวงจรรวม มีขนาดและลักษณะ ดังรูปที่ 2.4 และมีคุณสมบัติดังนี้

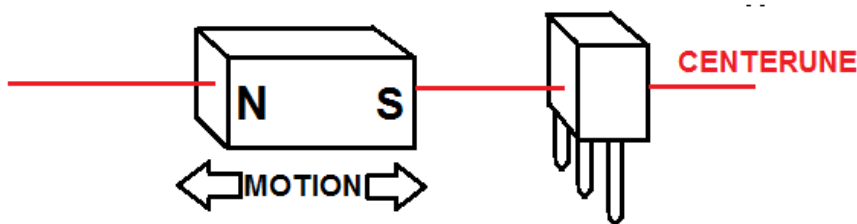
- Input Voltage 4.5-6 V
- Offset Voltage 2.5 V (โดยประมาณ)
- Sensitivity 2.5 mV/G

เมื่อต่อแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงหรือเซลล์ไฟฟ้า 4.5-6 โวลต์ เข้ากับขา 1 และขา 2 และต่อโวลต์มิเตอร์เข้ากับขา 2 และขา 3 ดังรูปที่ 2.5 โวลต์มิเตอร์จะแสดงค่าประมาณ 2.5 โวลต์ ค่านี้เป็นความต่างศักย์ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก เรียกว่า Offset Voltage ค่านี้อาจเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ต่อกับขา 1 และขา 2 และจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง



รูปที่ 2.5 การต่อตัวรับรู้อฮอลล์กับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงและโวลต์มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก

เมื่อนาแม่เหล็กเข้าใกล้พื้นที่ใช้งานของตัวรับรู้ฮอลล์ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศของสนามแม่เหล็กกล่าวคือถ้าเข้าหัวใต้เข้าใกล้ ความต่างศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเข้าหัวเหนือเข้าใกล้ความต่างศักย์จะมีค่าลดลง ความต่างศักย์ที่เปลี่ยนไป มีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density) ดังนี้

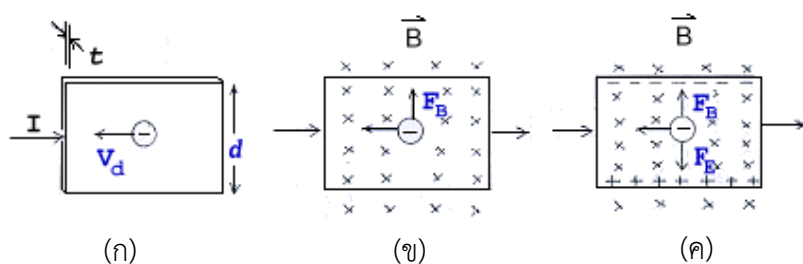
$$sens = \frac{V_{out(-B)} - V_{out(+B)}}{2B} \quad (2.18)$$

เมื่อ	$V_{out(-B)}$	คือ	ความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็กหัวเหนือ
	$V_{out(+B)}$	คือ	ความต่างศักย์ขณะมีสนามแม่เหล็กหัวใต้
	$sens$	คือ	สัมประสิทธิ์ความไว มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อเทสลา ( $mV/T$ )
	$B$	คือ	ความเข้มของสนามแม่เหล็กหรือความหนาแน่นฟลักซ์ของแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเทสลา ( $T$ )

ตัวรับรู้ฮอลล์สามารถวัดสนามแม่เหล็กในบริเวณใกล้แม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณปลายโซลินอยด์ และสนามแม่เหล็กใกล้เส้นลวดตัวนำ ที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านได้

### 2.3.2 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปคินส์ ซึ่งในขณะนั้นมีอายุ 24 ปี ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำ บางๆ ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (Charge Carriers) ในตัวนำนั้นสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำแผ่นบางๆ ในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้ เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์



รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

- (ก) แผ่นตัวนำบางบางมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า
- (ข) เมื่อใส่สนามแม่เหล็กที่แผ่นตัวนำบาง ทำให้เกิดแรงกระทำกับอิเล็กตรอน ส่งผลให้อิเล็กตรอนมีการเบน
- (ค) อิเล็กตรอนถูกผลักไปด้านบนของแผ่นตัวนำ และด้านล่างจะเกิดประจุบวกเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์

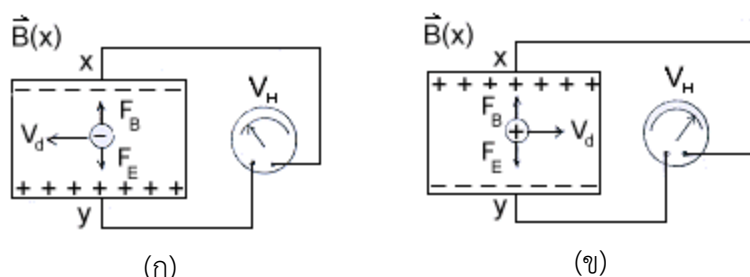
รูปที่ 2.7 (ก) แสดงตัวนำแผ่นบางๆ ที่มีความกว้าง ( $d$ ) หนา ( $t$ ) และมีกระแสไฟฟ้า (Conventional Current ( $I$ )) ไหลผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน ( $V_d$ ) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) จากด้านขวาไปด้านซ้าย

รูปที่ 2.7 (ข) เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก ( $B$ ) ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบาง จะเกิดแรงแม่เหล็ก  $F_B$  กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบาง รูปที่ 2.7 (ค) เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์  $E_H$  ในแผ่นตัวนำบาง มีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบนบน สนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า  $F_E$  กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะกระทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบนสนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำ บางมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์หรือโวลเตจ  $V$  ดังนี้

$$E_H = \frac{V}{d} \quad (2.19)$$

ความต่างศักย์หรือโวลเตจที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ฮอลล์ (Hall Potential Difference หรือ Hall Voltage)  $V_H$  พบว่าความต่างศักย์ฮอลล์มีค่ามากที่สุด เมื่อใช้ตัวนำแผ่นบางๆ ซึ่งหาจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน และเจอร์เมเนียม แต่เมื่อใช้ตัวนำไฟฟ้าที่ดีจะทำให้ค่าความต่างศักย์ฮอลล์มีค่าน้อยกว่ามาก จากสมการที่ 2.19 จะได้ว่า

$$V_H = E_H d \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.8 การวัดความต่างศักย์ฮอลล์  $V_H$

(ก) วัด  $V_H$  โดยต่อมิลลิโวลต์มิเตอร์ที่จุด  $x$  และจุด  $y$  พหะประจุ คือ อิเล็กตรอน

(ข) พหะประจุเป็นบวก ส่งผลให้ทิศของ  $V_d$  ตรงข้ามกับรูปที่ 2.8 (ก)

เราสามารถวัด  $V_H$  โดยต่อมิลลิโวลต์มิเตอร์เข้ากับจุด  $x$  และจุด  $y$  ดังรูปที่ 2.8 (ก) สภาพขั้วของ  $V_H$  ทราบได้จากเครื่องหมายที่อ่านได้จาก มิลลิโวลต์มิเตอร์ จากรูปที่ 2.8 (ก) พหะประจุคืออิเล็กตรอนจึงมีประจุลบ ถ้าพหะประจุมีประจุบวก ทิศของ  $V_d$  และ  $E_H$  จะตรงข้ามกับในรูปที่ 2.8 (ก) แต่ทิศของ  $F_B$  และ  $F_E$  ยังคงเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) ทำให้ประจุบวกถูกผลักไปที่ขอบด้านขวา ส่วนประจุลบถูกผลักไปที่ขอบด้านซ้าย และสภาพขั้วของ  $V_H$  จะตรงข้ามกับกรณีที่พหะประจุมีประจุลบ และ จากรูปที่ 2.7 (ค) ขณะที่แรงแม่เหล็กและแรงไฟฟ้ามีขนาดเท่ากัน จะได้ว่า

$$(-e)E_H = (-e)V_d B \quad (2.21)$$

$$E_H = V_d B$$

แทนสมการที่ 2.21 ในสมการที่ 2.20

$$V_H = E_H d$$

$$V_H = V_d B d \quad (2.22)$$

เนื่องจากอัตราเร็วลอยเลื่อน  $V_d$  มีค่า

$$V_d = \frac{I}{neA} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนพหะประจุต่อลูกบาศก์เมตร (หรือความหนาแน่นของพหะประจุ)

$e$  คือ ขนาดของอิเล็กตรอน

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ  $a$  แผ่มางๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ 2.23 ในสมการที่ 2.22 จะได้

$$V_H = \frac{IBd}{neA} \quad (2.24)$$

เนื่องจาก  $t = \frac{A}{d}$  คือความหนาของแผ่นตัวนำ บาง ดังนั้น

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (2.25)$$

สมการที่ 2.25 สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$B = netI^{-1}V_H \quad (2.26)$$

ปริมาณ  $V_H I$  และ  $t$  ในสมการที่ 2.26 หาได้จากการวัด ส่วนค่า  $n$  ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัด วัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะมีจนวนพาหะประจุน้อยกว่าตัวนำไฟฟ้าที่ดี แต่ก็ยังมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ ในส่วนของจนวนนั้นจะมีจนวนพาหะประจุน้อยมากและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพียงเล็กน้อย จากการศึกษาพบว่าสารกึ่งตัวนำ ที่มีสิ่งเจือปนมีค่า  $n \approx 10^{22} m^{-3}$  และโลหะทั่วไปมีค่า  $n \approx 10^{28} m^{-3}$  ดังนั้นเราจึงสามารถหาความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าจากสมการที่ 2.26 ได้ความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นเทสลา (Tesla) แทนด้วยสัญลักษณ์ T

## 2.4 พื้นฐานเคมีวิเคราะห์ [22-23]

การวิเคราะห์สามารถจำแนกได้ดังนี้ จำแนกตามวัตถุประสงค์จะสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) เป็นการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบชนิดของสารชนิดใดเป็นส่วนประกอบและการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารที่แน่นอนซึ่งนอกจากการวิเคราะห์โดยจำแนกจากวัตถุประสงค์แล้วยังสามารถวิเคราะห์และจำแนกตามหลักการหรือลักษณะของเครื่องมือได้ดังนี้ การวิเคราะห์พื้นฐานเป็นการวิเคราะห์ที่มีการใช้กันมาเป็นเวลานานและใช้อุปกรณ์ง่ายๆในห้องปฏิบัติการทั่วไปได้ โดยสามารถจำแนกตามคุณสมบัติทางกายภาพในขั้นตอนสุดท้ายของการตรวจวัดตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์โดยน้ำหนักและการวิเคราะห์โดยปริมาตรและการวิเคราะห์โดยเครื่องมือเป็นการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือที่มีความเฉพาะทางขั้นสูง เทคนิคการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าใช้การวัดกระแสเรียกว่า Amperometry ใช้วัดความต่างศักย์เรียกว่า Potentiometry ใช้วัดการนำไฟฟ้าเรียกว่า Conductivity และเทคนิคนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการประยุกต์ใช้เทคนิควิเคราะห์ทางไฟฟ้าโดยใช้เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) ซึ่งเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยการวิเคราะห์จะเกี่ยวกับการวัดการตอบสนองทางไฟฟ้าของสารตัวอย่างอันเป็นผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารนั้น ในการท าเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าต้องประกอบไปด้วยส่วนประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีที่นำกระแสได้ ส่วนของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งเป็นตัวนำที่ต่อเชื่อมกับอุปกรณ์การวัด และอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งอาจเป็นศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า แต่ที่น่าสนใจคือในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงและเพิ่มเติมในส่วนนี้โดยให้ความสนใจในเรื่องของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย

เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า เป็นเทคนิคของการวิเคราะห์โดยหลักการทางเคมีไฟฟ้า เป็นการให้สัญญาณไฟฟ้าแก่สารตัวอย่างแล้ววัดค่าพารามิเตอร์อื่นทางไฟฟ้าของสารละลายที่เกิดกาเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้น การให้สัญญาณไฟฟ้า และการวัดค่าทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันออกไปทำให้เกิดเป็นเทคนิควิธีการวิเคราะห์ ที่มีชื่อต่างกันไป ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เทคนิคของการวิเคราะห์โดยหลักการทางเคมีไฟฟ้า

เทคนิควิธี	สัญญาณไฟฟ้าที่ให้	ค่าทางไฟฟ้าที่วัด
โพเทนชิอเมตรี	กระแส = 0	ศักย์
แอมแปโรเมตรี	ศักย์คงที่	กระแส
โวลแทมเมตรี	ศักย์	กระแส
คูลอมเมตรี	กระแสหรือศักย์	ปริมาณไฟฟ้า
อิเล็กโทรแกรวิเมตรี	กระแสหรือศักย์	น้ำหนักของสาร

เซลล์เคมีไฟฟ้าในการวิเคราะห์เป็นส่วนประกอบของการท การวิเคราะห์โดยใช้หลักการเคมีไฟฟ้า มีทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ส่วนของขั้วไฟฟ้า และส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า โดยส่วนที่ 1 และ 2 มักจะถูกเรียกรวมว่าเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้า ในเซลล์เคมีไฟฟ้า 1 เซลล์ ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วจมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นสารอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน หรือต่างกันได้ โดยขั้วไฟฟ้า 1 ขั้วในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นเพียงครึ่งเซลล์ (Half-Cell) ของเซลล์เคมีไฟฟ้า โดยแต่ครึ่งเซลล์ต้องเกิดปฏิกิริยารับหรือให้อิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำในการรับส่งอิเล็กตรอนนั้น เพื่อให้รู้ถึงหน้าที่ของแต่ละขั้วไฟฟ้าโดยครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยาออกซิเดชัน (ให้อิเล็กตรอน) เรียกเป็นขั้วแอโนด และขั้วไฟฟ้าของอีกครึ่งเซลล์ที่มีปฏิกิริยารีดักชัน (รับอิเล็กตรอน) เกิดขึ้นเป็นขั้วแคโทด โดยเซลล์ไฟฟ้าเคมีสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามหน้าที่ของเซลล์คือ เซลล์กัลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ โดยเซลล์กัลวานิกหรือเซลล์โวลตาอิก เป็นเซลล์ซึ่งทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ โดยเกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดโดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก เช่น เซลล์อิเล็กโทรไลต์ เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอกในการท ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งการใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้า นั้น เป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอลูมิเนียม การเกาะของโลหะเงิน หรือทองบนขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ในด้านของการวิเคราะห์เซลล์อิเล็กโทรไลต์ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ต้องการ โดยเทคนิคการวิเคราะห์แบบต่างๆ เช่น โวลแทมเมตรี และอิเล็กโทรแกรวิเมตรี เป็นต้น การวิเคราะห์ไม่ว่าจะเป็นเซลล์กัลวานิกและเซลล์อิเล็กโทรไลต์ การเกิดปฏิกิริยาการรับส่งอิเล็กตรอน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ในสารละลาย ซึ่งท ให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรได้ ต้องเกิดขึ้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าเท่านั้น โดยไอออน

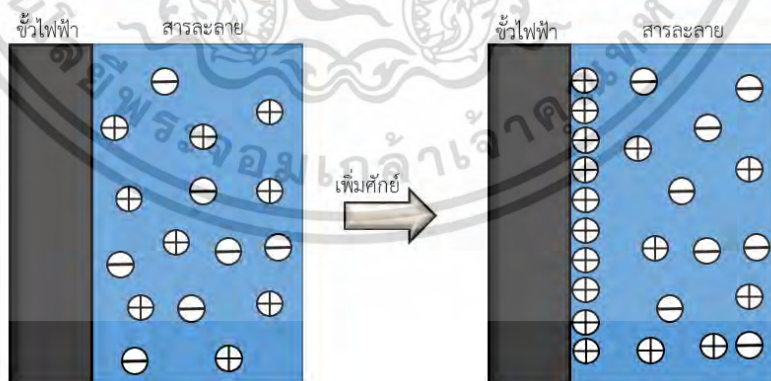
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต้องมีการเคลื่อนย้ายหรือถูกนำพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ก่อนที่จะเกิดกระบวนการส่งผ่านประจุหรืออิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น

การนำพาไอออนในสารละลายโดยไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วย 3 กลไกด้วยกันได้แก่ ไมเกรชัน เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น โดยที่ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบ และไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาขั้วบวก โดยความเร็วของการที่ไอออนเคลื่อนที่เข้าหา หรือเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลทำให้การไหลของกระแสในวงจรของเซลล์นั้นเพิ่มหรือลดไปด้วยกลไกต่อมาคือ การแพร่ เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้น ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำจนกว่าจะไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น โดยอัตราความเร็วของการแพร่ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่ต่างกัน และกลไกสุดท้ายคือ คอนเวกชันหรือการพา คือ การที่ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหา หรือออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.9 การแพร่ไอออนในสารละลาย



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก

- (ก) สภาพปกติของสารละลาย เมื่อศักย์ขั้วไฟฟ้ามีค่าเท่ากับค่าๆหนึ่ง  
 (ข) สภาพภายหลังการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า เมื่อขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์เท่ากับค่าๆหนึ่งที่เพิ่มขึ้นจากเดิม ประจุไอออนจะวิ่งเข้าหาขั้วไฟฟ้ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของกระบวนการที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้จะมีปฏิกิริยาของการรับและให้อิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ โดยเรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า “กระบวนการฟาราเดอิก” (Faradaic Process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการฟาราเดอิกที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้านั้น เรียกว่า กระแสฟาราเดอิก (Faradaic Current) ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้ มีการเรียงตัวตรงบริเวณรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงยังไม่ยุติ กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้น เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic Current) สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะเป็นฟาราเดอิก หรือ นอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นกับสถานะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิวัด หรือพลังงานจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด

ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) เป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้า ทาหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ต่อเชื่อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า ในการวิเคราะห์เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด การท วิเคราะห์เชิงไฟฟ้าด้วยเทคนิควิธีวิเคราะห์ต่างๆ โดยขั้วไฟฟ้าจะถูกใช้เป็นที่ต่อเพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้าเท่านั้น โดยมักจะถูกต่อไว้ทางด้านแอโนด และเรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่า ขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) ลักษณะเฉพาะของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าจะมีค่าเฉพาะที่ไม่แปรตามการไหลของกระแสในวงจร โดยการเปลี่ยนแปลงใดๆในสารละลายอันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาจากสารตัวอย่าง จะมีผลต่อค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้า ซึ่งทาหน้าที่เป็นขั้วแคโทดของเซลล์ และเรียกชื่อว่า ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode) หรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating Electrode) ในบางเทคนิควิธีการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้า 3 ขั้ว เช่น ในทางเทคนิคการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี เรียกขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมาว่า ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxillary Electrode) หรือ ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter Electrode) โดยหน้าที่เฉพาะของขั้วไฟฟ้าช่วย คือ เป็นผู้ช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร การที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสาม ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าช่วย ทาหน้าที่ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าได้ต่างกัน เนื่องจากส่วนประกอบที่ใช้ในการทาขั้วไฟฟ้าไม่เหมือนกัน เนื่องจากขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำ ไฟฟ้าที่เชื่อมต่อยกหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า ด้านของขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับอุปกรณ์วัดสัญญาณมักเป็นลวดตัวนำ พาหะส่งต่ออิเล็กตรอนเพื่อไปที่อุปกรณ์วัด โดยอีกด้านที่จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีส่วนประกอบที่แตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

## 2.5 การวัดความนำไฟฟ้า

### 2.5.1 สารอิเล็กโทรไลต์

สารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารประกอบที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เมื่อหลอมเหลวแล้วแตกตัวเป็นไอออน หรือละลายอยู่ในสารละลายที่แตกตัวเป็นไอออน สารละลายที่นำไฟฟ้าได้นั้นเรียกว่า “สารละลายอิเล็กโทรไลต์” สารละลายอิเล็กโทรไลต์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

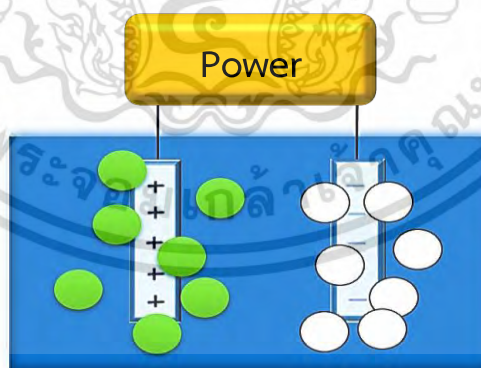
#### 1. สารละลายอิเล็กโทรไลต์แก่ (Strong Electrolyte)

สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้หมดหรือเกือบหมด ในน้ำ หรือในสารละลายเจือจางทำให้ในสารละลายนั้นมีไอออนจำนวนมาก จึงนำไฟฟ้าได้ดี เมื่อเขียนเป็นสมการแสดงการแตกตัวของสารอิเล็กโทรไลต์แก่จะเป็นสมการที่เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าเท่านั้น หรือเกิดปฏิกิริยาจากซ้ายไปขวาเท่านั้น

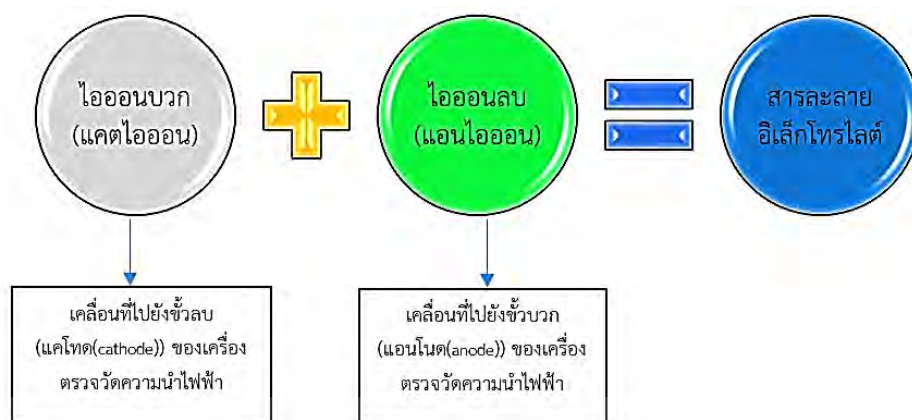


#### 2. สารอิเล็กโทรไลต์อ่อน (Weak Electrolyte)

แตกตัวให้ไอออนได้น้อย หรือแตกตัวได้ไม่หมด ในสารละลายเจือจาง แสดงว่าสารอิเล็กโทรไลต์อ่อนนั้นมีโมเลกุลของสารละลายบางส่วนเท่านั้นแตกตัวเป็นไอออนได้ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะยังคงอยู่ในรูปแบบโมเลกุล จึงนำไฟฟ้าได้น้อย เมื่อเขียนเป็นสมการการแตกตัวของสารละลายอิเล็กโทรไลต์อ่อน จะเป็นสมการย้อนกลับได้ ดังนี้



รูปที่ 2.11 สารอิเล็กโทรไลต์



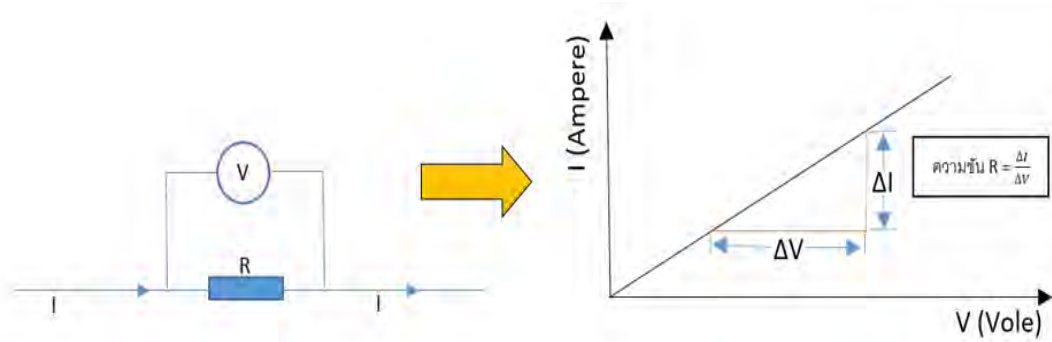
รูปที่ 2.12 สารละลายที่แตกตัวเป็นไอออนสารละลายที่นำไฟฟ้า

ตารางที่ 2.2 ประเภทของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สมบัติ	สารอิเล็กโทรไลต์แก่	สารอิเล็กโทรไลต์อ่อน	สารอนอิเล็กโทรไลต์
อนุภาคของตัวท ละลาย	ไอออน	โมเลกุลและไอออน	โมเลกุล
ภาวะสมดุล ระหว่างอนุภาค	ไม่มี	เกิดสมดุลมีทั้งโมเลกุลและ ไอออนปนอยู่ด้วยกัน	ไม่มี
ร้อยละของการ แตกตัว	แตกตัวได้หมด(100%)	อยู่ระหว่าง(0%-100%)	ไม่มี(0%)
ความน ำไฟฟ้า	น ำได้ดี	น ำได้บ้าง	ไม่ น ำ

### 2.5.2 การตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้า

การตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity) เป็นการวัดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า ตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานต่ำ จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากกว่าตัวนำที่มีความต้านทานสูง จากกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ตั้งโดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน George Simon Ohm ในปี ค.ศ.1826 ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำด้วยการผ่านความต่างศักย์ไฟฟ้าเข้าไป เมื่ออุณหภูมิคงที่ไหลผ่านตัวนำ จะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของตัวนำ



รูปที่ 2.13 การวัดการต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า

จากกฎของโอห์ม จะได้ว่า  $V/I =$  ค่าคงที่ (ที่อุณหภูมิคงที่) ค่าคงที่ในที่นี้คือ ความต้านทานของตัวนำ  $\alpha$  แทนที่ด้วย  $R$

$$V = IR \quad (2.27)$$

โดย  $V$  เป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุด  
 $I$  เป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน  $R$  หน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere, A)  
 $R$  เป็นความต้านทานของตัวนำ  $\alpha$  หน่วยเป็นโอห์ม (ohm)

ค่าความต้านทานของตัวนำ จะขึ้นอยู่กับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักดังนี้

1. ชนิดของวัสดุที่นำ มาใช้ในการทำ ตัวต้านทาน
2. อุณหภูมิของวัตถุ

ความต้านทานของตัวนำ จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังสมการที่ 2.30

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (2.28)$$

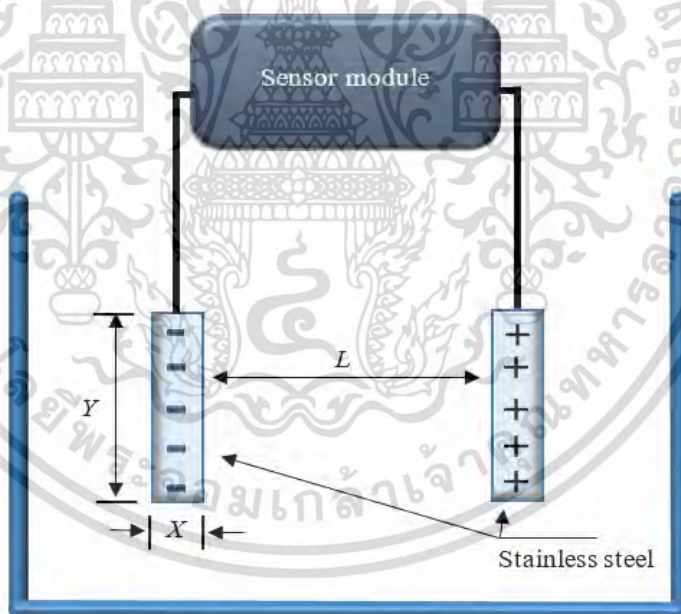
โดย  $R_t$  เป็นความต้านทานของตัวนำ ณอุณหภูมิ  $t$  องศาเซลเซียส  
 $R_0$  เป็นความต้านทานของตัวนำ ณอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส  
 $\Delta t$  เป็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป  
 $\alpha$  เป็นสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานตามอุณหภูมิ หน่วยเป็นต่อ องศาเซลเซียส

3. พื้นที่หน้าตัดและความยาวของตัวนำ ค่าความต้านทานจะแปรผันตรงกับความยาวของตัวนำ กับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ โดยได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$R = \rho L / A \quad (2.29)$$

การวัดค่าความนำไฟฟ้าเป็นการวัดความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลาย โลหะหรือแก๊ส โดยทั่วไปแล้วโลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากอิเล็กตรอนในโลหะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์หรือการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนบวกและไอออนลบในสารละลายจะเป็นตัวนำไฟฟ้า โดยพบว่าสารที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูง จะมีความนำไฟฟ้าต่ำ โดยสภาพความต้านทานไฟฟ้าเป็นดัชนีชี้บอกความยากง่ายของการไหลของ กระแสไฟฟ้าในตัวนำ แต่ความนำไฟฟ้าเป็นดัชนีชี้บอกถึงสภาพการนำไฟฟ้าของสาร โดยเมื่อจุ่ม ขั้วไฟฟ้า (Electrode or Probe) 2 ขั้วลงในสารละลาย จากนั้นผ่านความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งกับ ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว แล้ววัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น กระบวนการที่เกิดขึ้นจะพบว่าไอออนบวกจะเคลื่อนที่ ไปยังขั้วลบ ส่วนไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วบวก สารละลายจึงจัดเป็นตัวนำไฟฟ้า สารละลายที่ ประกอบด้วยไอออนจำนวนมาก ค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น โดยค่าความนำไฟฟ้าเป็นการวัดสภาพ การนำไฟฟ้าทั้งหมดของไอออนในสารละลาย (ทั้งไอออนบวกและไอออนลบ) ไม่ใช่การวัดไอออนใด ไอออนหนึ่งในสารละลาย โดยจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของเซลล์ (Cell Constant) เป็นค่าคงที่ของหัววัด (Probe Constant) หรือค่าคงที่ของเซนเซอร์ (Sensors Constant) หรือปัจจัยของเซลล์ (Cell Factor) แทนด้วย  $K_{cell}$  โดย  $K_{cell}$  คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า ( $L$ ) ต่อพื้นที่หน้าตัดของ ขั้วไฟฟ้า ( $A$ ) โดยหน่วยของค่าความนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร ต่อมาในปี ค.ศ. 1800 Dr. Siemen ได้ทำการทดลองวัดสภาพการต้านทานไฟฟ้าของน้ำ และได้ใช้หน่วยความนำไฟฟ้าเป็น Siemen/cm สำหรับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย หน่วยเป็น milliSiemen (mS/cm) microSiemen ( $\mu$ S/cm)



รูปที่ 2.14 การวัดค่าความนำไฟฟ้าในของเหลว

- โดย  $L$  เป็นความยาวของตัวนำ หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)  
 $A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร ( $\text{cm}^2$ )  
 $\rho$  สภาพความต้านทาน (Resistivity) หน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพความต้านทานเป็นความต้านทานของตัวนำที่มีความยาวหนึ่งเซนติเมตร และพื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตร โดยตัวนำที่มีความยาวมาก และพื้นที่หน้าตัดน้อยจะมีความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้ามาก และโดยทั่วไปแล้วสภาพความต้านทานของโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่สารกึ่งตัวนำมีสภาพความต้านทานลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิของตัวต้านทานจนมีความต้านทานคงที่ จะเรียกว่าสภาพความต้านทานตกค้าง (Residual Resistivity) โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และความบริสุทธิ์ของโลหะ

ลักษณะของการเป็นสื่อกระแสไฟฟ้า จะแสดงค่าเป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงศักยภาพของของเหลวที่มีการแพร่ของกระแสไฟฟ้า ซึ่งตัวเลขนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณผลรวมความเข้มข้นของสารละลาย และการแตกตัวเป็นไอออนที่อุณหภูมินั้นๆ ในขณะที่ทำการตรวจวัดของเหลว อีกทั้งการเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าจะมีเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลาย โดยระบบที่มีองค์ประกอบของน้ำจะมีไอออนที่แสดงถึงการแพร่ของกระแสไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่แล้วเป็นกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ เช่น สารที่มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับกรดในรูปแบบเกลือ และน้ำ เกลือ กรดไฮโดรคลอริก โซเดียม และคาร์บอนेटโซเดียมคลอไรด์ เป็นกลุ่มตัวนำที่ดี ซึ่งจะตรงข้ามกับกลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ เช่น น้ำตาลซูโครส และ เบนซีน (Benzene) จะมีการแพร่ของกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี หรือไม่สามารถที่จะแพร่กระแสไฟฟ้าได้ ในกรณีของน้ำกลั่น ขณะที่ออกจากกระบวนการผลิตจะมีค่าการแพร่ของกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.5-2 ( $\mu\text{mhos} / \text{cm}$ ) และเมื่อจัดเก็บไว้เป็นเวลานานไม่กี่สัปดาห์จะมีค่าการแพร่ของกระแสไฟฟ้า 2-4 ( $\mu\text{mhos} / \text{cm}$ ) โดยการเพิ่มขึ้นนี้มีสาเหตุมาจากการดูดซึมน้ำจากคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซแอมโมเนียในชั้นบรรยากาศ การแพร่ของกระแสไฟฟ้าของน้ำในทางสากลจะมีช่วงโดยทั่วไปอยู่ที่ 50-1500 ( $\mu\text{mhos} / \text{cm}$ ) การแพร่ของกระแสไฟฟ้าของน้ำสามารถบอกได้ถึงคุณสมบัติและลักษณะพิเศษของมัน ในปริมาณนั้นๆได้ โดยในบางอุตสาหกรรมที่มีค่าของการแพร่ของกระแสไฟฟ้าที่สูงถึงระดับ 10,000 ( $\mu\text{mhos} / \text{cm}$ ) สามารถสังเกต และอาจสรุปได้ว่าแหล่งน้ำนั้นเป็นน้ำเสีย

ข้อดีและประโยชน์ของการวัดการแพร่ของกระแสไฟฟ้า (Electrical Conductivity)

1. ความสามารถในการตรวจสอบความผิดปกติของน้ำ ในกรณีที่ได้รับผลกระทบจากการประกอบกิจการอุตสาหกรรมที่มีการระบายน้ำ ทั้ง ที่มีสารที่มีประจุอยู่มากลงสู่แหล่งน้ำ
2. ความสามารถในการคาดคะเนปริมาณของของแข็งทั้งหมดในตัวอย่างน้ำ กรณีหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของของแข็งทั้งหมด และสภาพนำไฟฟ้า
3. ความสามารถในการคาดคะเนผลของประจุไฟฟ้าต่างๆ ที่มีผลต่อสมดุลทางเคมี ผลทางกายภาพที่มีต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ และผลกระทบต่ออัตราการกักตัวของสารต่างๆ
4. ความสามารถในการประเมินหรือตรวจวัดความบริสุทธิ์ของน้ำ ที่ผ่านการบำบัดต่างๆ เพื่อให้ทราบว่า น้ำนั้นมีคุณภาพตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานหรือไม่
5. ความสามารถในการคาดคะเนจำนวนสารประกอบไอออนิก ที่จะใช้ในการตกตะกอนและการทำให้สารละลายเป็นกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

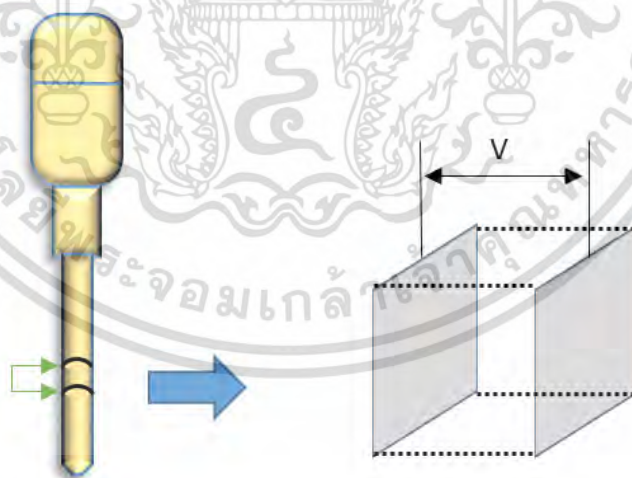


## 2.5.3 อุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้า

### 2.5.3.1 อุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้าชนิดขั้วไฟฟ้า

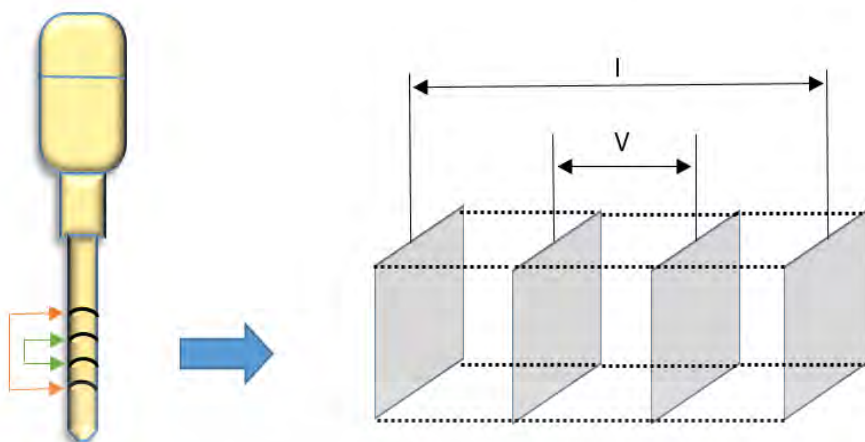
วัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้า จะทำหน้าที่เป็นสื่อไฟฟ้าส หรับให้อิเล็กตรอนไหลผ่านเท่านั้นและจะไม่ทำปฏิกิริยากับไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างเช่น โลหะแพลทินัมและทอง เป็นต้น และยังใช้ได้ดีกับสารละลายกรดและเบสที่มีความเข้มข้นสูง จึงจัดเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีสมรรถภาพสูงในการวัดค่าความนำไฟฟ้า โดยโลหะแพลทินัมจะฉาบด้วยแพลทินัมดำ (Platinum Black) เพื่อลดผลของการเกิดโพลาไรเซชัน และเพิ่มประสิทธิภาพในการให้อิออนเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้า โดยในปัจจุบันขั้วไฟฟ้าชนิดโลหะแพลทินัมที่นำมาใช้วัดความนำไฟฟ้าจะเป็นขั้วไฟฟ้าสำเร็จรูปพร้อมทั้งมีการระบุค่าคงที่ของเซลล์มาให้ นอกจากนี้ยังมีขั้วไฟฟ้าสำเร็จที่ทำจากไทเทเนียมแกรไฟต์หรือสแตนเลส ให้อการตอบสนองต่อการวัดค่าความนำไฟฟ้าที่ดีและทนต่อการกัดกร่อน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สแตนเลส 304 นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า โดยสแตนเลส เป็นโลหะแบบที่ไม่ขึ้นสนิม สแตนเลส AISI 304 เป็นสแตนเลสในกลุ่มของออสเทนนิติก และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุดในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุปกรณ์เครื่องครัว เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องใช้ในบาน อ่างล้างจาน ภาชนะหุงต้ม เป็นต้น เพราะสแตนเลส AISI 304 มีความทนทานต่อสารเคมีจากสารอินทรีย์และอนินทรีย์ได้เป็นอย่างดี เช่น กรดต่างๆ และนอกจากนี้สแตนเลส AISI 304 ยังมีส่วนผสมของโครเมียม 18% คาร์บอนไม่เกิน 0.08% และนิกเกิลอย่างน้อย 8%

อุปกรณ์วัดชนิดขั้วไฟฟ้าสำเร็จรูปที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้า มีด้วยกัน 2 แบบ คือ อุปกรณ์วัดแบบขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว (2-Pole Conductivity Cells) และอุปกรณ์วัดแบบขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว (4-Pole Conductivity Cells)



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

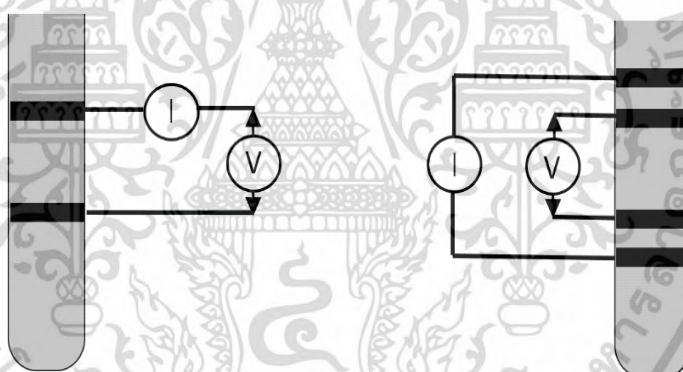


(ข)

รูปที่ 2.15 อุปกรณ์วัดแบบขั้วไฟฟ้า

(ก) อุปกรณ์วัดแบบขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว

(ข) อุปกรณ์วัดแบบขั้วไฟฟ้า 4 ขั้ว



รูปที่ 2.16 วงจรไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้าแบบ 2 ขั้ว และ 4 ขั้ว

### 2.5.3.2 อุปกรณ์วัดความนำไฟฟ้าชนิดไม่ใช้ขั้วไฟฟ้า

หัววัดที่มีลักษณะคล้ายรูปโดนัท โดยพันขดลวดรอบแท่งฉนวนทรงกลมหรือเรียกว่า ทอลอยด์ จากนั้นห่อด้วยวัสดุพอลิเมอร์ เช่น พอลิโพรพิลีนหรือเทฟลอน แล้วนำทอลอยด์สองอันประกบกันเป็นหัววัด toroidal Conductivity โดยเมื่อผ่านกระแสสลับ 1 ถึง 5 KHz ไปยังทอลอยด์ตัวหนึ่ง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมา ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสสลับเหนี่ยวนำในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Induced Solution Current) ขึ้นมาและเรียกตัวทอลอยด์นี้ว่า Drive Coil หรือ Drive toroid ส่วนทอลอยด์อีกหนึ่งตัวจะตอบสนองต่อไฟฟ้ากระแสสลับเหนี่ยวนำในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เรียกทอลอยด์ตัวนี้ว่า Pick-Up toroid ปริมาณกระแสสลับเหนี่ยวนำที่ Pick-Up toroid ตอบสนองนั้น จะแปรผันตรงกับค่าความนำไฟฟ้าของสารละลาย โดยสารละลายที่สกปรกอาจจะทำลายผิวของขั้วไฟฟ้าเมื่อใช้หัววัดชนิดขั้วไฟฟ้า และในกรณีสารละลายที่มีค่าความนำไฟฟ้ามากกว่า  $10,000 \text{ } (\mu\text{S}/\text{cm})$  เมื่อใช้หัววัดชนิดขั้วไฟฟ้าจะต้องเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับค่าคงที่ของเซลล์ให้มีค่ามากขึ้น มีผลทำให้เกิดโพลาริเซชัน และทำให้ผิวชั้นไฟฟ้าประอะเปื้อนได้ จึงได้มีการนำห้วงวัด toroidal Conductivity มาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว เนื่องจาก toroidal Coil ไม่มีผลต่อการวัดค่าความนำไฟฟ้า จึงใช้วัดในสารละลายที่ค่อนข้างกักกร่อนได้ ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำมัน และสิ่งปนเปื้อนมาเกาะจับ และสามารถตรวจวัดความนำไฟฟ้าได้สูงถึง  $2,000,000 (\mu S / cm)$  แต่อย่างไรก็ตามแกนทอลอยด์มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นขั้วไฟฟ้าและ Current Induced จากสารละลายจะเกิดขึ้นรอบๆทอลอยด์ดังนั้นจึงต้องบรรจุทอลอยด์ไว้ในท่อทรงกระบอกขนาดใหญ่

## 2.6 คาร์โบไฮเดรตกับการวัดค่าความนำไฟฟ้า [24]

คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) หรือพอลิแซ็กคาไรด์ (Saccharides มาจากภาษากรีกที่แปลว่า น้ำตาล หมายถึง สารประกอบพอลิไฮดรอกซีอัลดีไฮด์ สารประกอบพอลิไฮดรอกซีคีโตน และอนุพันธ์น้ำตาล คาร์โบไฮเดรต เป็นชีวโมเลกุลที่พบได้มากที่สุดบนโลกนี้ มีต้นกำเนิดจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) คาร์โบไฮเดรตมีบทบาทมากมายภายในสิ่งมีชีวิต ได้แก่ 1. เป็นแหล่งพลังงานสะสมเชื้อเพลิงและสร้างสารตัวกลางเมแทบอลิก เช่น แป้งในพืช และไกลโคเจนในสัตว์ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นกลูโคสเพื่อสังเคราะห์พลังงานได้ 2. น้ำตาลไลโบสและดีออกซีไรโบส 3. เป็นองค์ประกอบโครงสร้างของผนังเซลล์ของแบคทีเรียและพืชและโครงสร้างของเปลือกของดำนอกหรือเอกโซสเคเลตันของสัตว์จำพวกอาร์โทรพอด 4. คาร์โบไฮเดรตไปเชื่อมต่อกับโมเลกุลโปรตีนหรือลิพิดเรียกว่า ไกลโคลิพิด มีบทบาทที่สำคัญหลายอย่างเช่น การเป็นแอนติเจน การทำให้เป็นระบบหมุนเลือด การแข็งตัวของเลือด เป็นต้น

### 2.6.1 คุณสมบัติทางแสงกับความหวาน

#### 2.6.1.1 การเบี่ยงเบนแสงโพลาไรส์

น้ำตาลต่างๆจะมีความสามารถในการเบี่ยงเบนหรือเปลี่ยนระนาบแสงโพลาไรส์ในโพลาไรมิเตอร์ (Optical Rotation) แตกต่างกันไป อันเนื่องมาจากคาร์บอนไครัลในโมเลกุล ค่ามุมเบี่ยงเบนเฉพาะ (Specific Angle of Rotation,  $\alpha_D^T$ ) เป็นค่าที่เฉพาะของน้ำตาลแต่ละชนิด ในสารละลายตัวอย่าง หากเราทราบค่า  $\alpha_D^T$  จะสามารถระบุชนิดของน้ำตาลได้ โดยเครื่องหมายบวก หมายถึงการเบี่ยงเบนแสงไปทางขวา (Dextro Rotatory) และเครื่องหมายลบ เป็นการเบี่ยงเบนไปทางซ้าย (Leavo Rotatory) น้ำตาลกลูโคสมี  $\alpha_D^T$  เป็น  $+52.5^\circ$  ในบางครั้งเรียกว่าเป็น Dextrorotatory Glucose และกลายเป็นเด็กซ์โทรส (Dextrose) เช่นเดียวกับฟรุคโทสที่มีค่ามุมเบี่ยงเบนเฉพาะเป็น  $92.3^\circ$  เรียกว่า Leavo Rotatory Fructose และกลายเป็นเลวูโลส (Levulose) สำหรับน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ มีค่ามุมเบี่ยงเบนเฉพาะเป็น  $+66.5^\circ$

ตารางที่ 2.3 ค่ามุมเบี่ยงเบนจ าเพาะ

น้ำตาล	ค่ามุมเบี่ยงเบนจ าเพาะ ( $\alpha_D^T$ )
D-กลูโคส	+52.5°
D-ฟรุกโทส	-92.3 °
D-กาแลกโทส	+80.2 °
D-แมนโนส	+14.2 °
D-ไรโบส	-23.7 °
ซูโครส	+66.5 °
มอลโทส	+137.0 °

### 2.6.12 การวัดด้วยวิธีการหักเหด้วยแสง

Brix Refractometer หรือ Honey Refractometer เป็นอุปกรณ์สำหรับห้องปฏิบัติการสำหรับการวัดดัชนีหักเหของแสง (Refractometer) ที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งจะเป็น Refractometer แบบมือถือ โดยเป็นรูปแบบดั้งเดิมที่มีด้ามจับ มีสองประเภทคือ แบบอนาล็อกและดิจิตอล ซึ่งถือได้ว่ามีประโยชน์ในการวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายอย่างมาก เช่น น้ำที่คั้นจากผลไม้สด น้ำเชื่อม เครื่องดื่ม โดยแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักต่อ น้ำหนัก หลักการการวัดดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index) ของ Brix Refractometer คือ เมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง เช่น จากน้ำสู่อากาศ จากน้ำสู่คริสตัล จะทำให้มุมและความเร็ว (Velocity,  $v$ ) ของแสงแตกต่างกัน โดย Refractometer ยังสามารถวัดความหวานได้ โดยอาศัยดัชนีหักเหของแสง เมื่อแสงและความเร็วระหว่างตัวกลางทั้งสองแตกต่างกัน เช่น น้ำและอากาศ โดยพิจารณาการเชื่อมต่อกันระหว่างอากาศและน้ำ สารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันเมื่อแสงส่องผ่านจะเกิดการหักเห และให้ค่าดัชนีหักเหของแสงที่ต่างกันจะถูกนำไปประยุกต์เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายได้

### 2.6.2 สารที่ให้ความหวานแทนน้ำตาล [25-26]

#### 2.6.2.1 น้ำตาลเทียม

คนยุคใหม่รับประทานน้ำตาลแท่งน้อยลงเนื่องจากน้ำตาลแท้หรือน้ำตาลซูโครสหรือน้ำตาลทรายที่เรา รู้จักกันนั้น เมื่อบริโภคเข้าไปร่างกายจะสะสมอยู่ในรูปแบบของไขมัน ก่อให้เกิดโรคอ้วน และเบาหวาน จึงทำให้ความต้องการบริโภคน้ำตาลเทียมมีมากขึ้น และยิ่งไปกว่านั้นผู้ป่วยโรคเบาหวานที่ชอบรสหวาน อาจใช้แทนน้ำตาลทราย น้ำตาลสด เพื่อช่วยควบคุมน้ำตาลในเลือดและลดพลังงานส่วนเกินได้ ตัวอย่างเช่น

1. ซันทสกรหรือแซ็กคาริน เป็นสารให้ความหวานที่ใช้กันมานานแล้ว และนิยมใช้กันมากในยุคนี้ โดยมีความหวานมากกว่าน้ำตาลทราย 500 เท่า แต่ที่มีขายจะอยู่ในรูปของแซ็กคารินโซเดียมโรสมากกว่าน้ำตาลทรายอยู่ 375 เท่า เมื่อรับประทานเข้าไปจะถูกดูดซึมเข้าและถูกขับออกทางปัสสาวะในสภาพเดิมประมาณ 95% ภายใน 24 ชม. แต่ที่น่าสนใจคือ มีงานวิจัยที่ศึกษาในสัตว์ทดลอง พบว่าแซ็กคาริน มีแนวโน้มที่จะเป็นสาเหตุของมะเร็งในกระเพาะปัสสาวะ
2. ไซคลาเมต สารที่โด่งดังรองลงมาจากแซ็กคาริน แต่มีอันตรายมากกว่าคือ ไซคลาเมต (Cyclamate) มีความหวานมากกว่าน้ำตาลทราย 30 เท่า สารนี้เคยถูกใช้เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทราย และได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเกือบ 20 ปี ก่อนที่จะถูกยกเลิกการจำหน่ายโดยสำนักงานคณะกรรมการอาหาร และยาของสหรัฐอเมริกา (FDA) เนื่องจากมีรายงานว่าทำให้เกิดมะเร็งในหนูทดลอง
3. แอสพาร์เทม สารให้ความหวานอีกชนิดหนึ่งซึ่งขณะที่มีความนิยมมาก จำหน่ายในชื่อการค้าหลากหลาย เช่น อีควอล ฟิทเนส พอลสวีท สลิมมา เป็นต้น คือ แอสพาร์เทม ประกอบด้วยกรดอะมิโน 2 ตัวจับกัน กรดแอสพาร์ติกและกรดเฟนิลอะลานีน จะให้พลังงาน 4 กิโลแคลอรี/กรัม เท่ากับน้ำตาลทราย แต่เนื่องจากแอสพาร์เทมมีความหวานเป็น 200 เท่าของน้ำตาล เมื่อเทียบกับในกลุ่มของน้ำตาลเทียมด้วยกันแล้ว แอสพาร์เทมได้รับการทดสอบแล้วว่าปลอดภัยมากที่สุด เนื่องจากสารนี้ผลิตขึ้นเพื่อแก้ปัญหาของน้ำตาลเทียมชนิดอื่นที่ถูกผลิตมาก่อนหน้า แต่แอสพาร์เทมก็มีข้อจำกัดคือ ไม่ควรใช้ในกลุ่มเด็กเล็กๆ ทั่วไปและกลุ่มที่เป็นโรคเฟนิลคีโตนูเรีย เนื่องจากเด็กและผู้ป่วยเหล่านี้ขาดเอนไซม์ที่จะขจัดเฟนิลอะลานีนออกจากร่างกาย และหากได้รับเฟนิลอะลานีนในเลือดสูงกว่าปกติ จึงมีผลต่อสมองทำให้เกิดปัญญาอ่อน และอีกหนึ่งข้อเสียของแอสพาร์เทม คือไม่ทนต่อความร้อนจึงใช้ในขณะหุงต้มประกอบอาหารไม่ได้ เพราะความร้อนจัดทำให้สารนี้สูญเสียความหวาน ดังนั้นจึงควรเติมแอสพาร์เทมหลังจากประกอบอาหารเสร็จแล้ว
4. อะเซซัลเฟมโพแทสเซียม (Acesulfame Potassium) มีชื่อผลิตภัณฑ์ทางการค้าที่รู้จักกันคือ ซุนเนตต์ (Sunett) เป็นสารให้ความหวานล่าสุด ที่ได้รับอนุญาตจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาสหรัฐอเมริกา สารให้ความหวานนี้มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในยุโรป และได้รับการยอมรับถึงความปลอดภัย ในการบริโภคจากองค์การอนามัยโลก อะเซซัลเฟมโพแทสเซียมเป็นสารที่มีกัมมะถันเป็นองค์ประกอบ และมีโพแทสเซียมในปริมาณเล็กน้อย ไม่ให้พลังงาน ไม่มีโซเดียม มีรสหวานประมาณ 200 เท่าของน้ำตาล ไม่มีผลต่อระดับอินซูลินหรือน้ำตาลในเลือด ถูกขับออกจากร่างกายในสภาพเดิม นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาฟันผุเหมือนน้ำตาล และเนื่องจากอะเซซัลเฟมโพแทสเซียมใช้ในอาหารต่างๆ เช่น เครื่องดื่มของหวาน ขนม หมากฝรั่ง ลูกอมต่างๆ ยาอม โยเกิร์ต ซอสครีมต่างๆ และขนมอบ แม้ว่าอะเซซัลเฟมโพแทสเซียมจะมีสารกัมมะถัน เป็นองค์ประกอบ แต่คุณสมบัติจะแตกต่างจากสารประกอบกัมมะถันของ ซัลไฟต์และยาซัลฟาจึงไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ และจากการวิจัยการบริโภคในระยะยาวในสัตว์ทดลอง ยังไม่พบหลักฐานการเกิดมะเร็งในสัตว์ จึงได้รับการยอมรับถึงความปลอดภัยในผู้บริโภค แต่หญิงตั้งครรภ์ และเด็กไม่ควรใช้ เพราะบุคคลเหล่านั้นไม่มีความจำเป็นต้องจำกัดพลังงาน ยกเว้นในกรณีของแพทย์เห็นสมควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.2.2 น้ำผึ้ง

ส่วนประกอบของน้ำผึ้งประกอบด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ แร่ธาตุ วิตามิน กรดเอนไซม์ ละอองไขผึ้ง สารที่ให้กลิ่นและรสสารอินฮิบีน (Inhibine) และน้ำ

#### ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงส่วนประกอบของน้ำผึ้งธรรมชาติ

ความชื้น	17.20%
น้ำตาลกลูโคส Levulose หรือ D-Fructose	38.19%
น้ำตาลดกโทรส Dextrose หรือ D-Glucose	31.21%
น้ำตาลซูโครส Sucrose หรือ น้ำตาลทราย	1.31%
น้ำตาลมอลโทส Maltose	7.35%
น้ำตาลอื่นๆ Higher Sugar	1.50%
รวมน้ำตาล	96.76%
กรด Acids	0.57%
โปรตีน Protein	0.26%
แร่ธาตุ Minerals	0.17%
ส่วนประกอบอื่นๆ Minor Component	2.24%
รวม	100%

ความแตกต่างของน้ำผึ้งธรรมชาติ น้ำผึ้งเทียม ย่อมเป็นที่യാกรู้ในหมู่ผู้บริโภคน้ำผึ้งเพราะน้ำผึ้งเทียมมักจะมีขายอยู่ทั่วไป คนส่วนใหญ่หลงเชื่อ เพราะไม่เคยรู้และเข้าใจถึงความแตกต่างของน้ำผึ้งธรรมชาติและน้ำผึ้งเทียม ซึ่งตัวอย่างในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยน้ำผึ้งธรรมชาติและน้ำผึ้งเทียมส่วนประกอบของน้ำผึ้งเทียมที่หาขายในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล เช่น น้ำตาลทราย น้ำตาลต้นต และน้ำตาลมะพร้าว ในขณะที่ใช้น้ำตาลทรายมักปนด้วยกรดนม หรือ กรดนม ส้มกรดส้ม กรดผิวส้ม เพื่อให้ น้ำตาลเหลวไม่จับตัวเป็นก้อนหรือผลึกใสสีแดง สีที่เข้มทั้งชนิดที่ใช้ปรุงอาหาร และชนิดที่ใช้ย้อมผ้าซึ่งอันตรายต่อผู้บริโภค ใสแฉะแซ (ผลิตภัณฑ์จากแป้งมันสำปะหลัง) มีรสเปรี้ยวเล็กน้อยเพื่อให้เหนียวเหนียวมากขึ้น บางรายใส่สารกันบูด ใสกลิ่นหอม น้ำผึ้งเทียมจึงมีความเป็นมันและเมือกกลิ่น บางกรณีใช้สารเคมีที่มีความเป็นด่างผสมลงในส่วนผสมดังกล่าว เพื่อให้เกิดความเป็นกลางแล้วใช้เครื่องกวน (Mixer) ทำให้ส่วนผสมนั้นๆ เกาะตัวเข้ากันเป็นอย่างดี และในบางกรณีมีการใช้เครื่องนวด Homogenizer ที่สามารถนวดส่วนผสมนั้นให้เข้ากันทุกอนุภาคเป็นเนื้อเดียวกันหมด น้ำผึ้งเทียมชนิดนี้มีวิธีการท ที่ค่อนข้างยุ่งยากและประณีต แต่พิสูจน์ได้ง่ายเพียงชงลงในน้ำชาก็ทำให้ น้ำเปลี่ยนเป็นสีคล้ำขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติของน้ำผึ้งตามมาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 8003-2556 น้ำผึ้ง  
 สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กำหนดคุณภาพ  
 ของน้ำผึ้งไว้ ดังนี้ [27] ในงานวิจัยนี้ได้หาความสัมพันธ์ของหลักการของการใช้ฮออล์เอฟเฟกต์  
 เซนเซอร์ส สำหรับตรวจสอบคุณลักษณะเชิงคุณภาพเพื่อจ าแนกความบริสุทธิ์ของน้ำ ผึ้ง

1. เป็นของเหลวข้นเป็นเนื้อเดียวกัน ลักษณะใสไม่ขุ่นทึบ ปราศจากกลิ่น  
 แปลกปลอม มีสีตามธรรมชาติตั้งแต่สีเหลืองอ่อนถึงสีน้ำตาลเข้ม
2. กลิ่น รส เฉพาะตัวธรรมชาติ ไม่มีกลิ่นผิดปกติ เช่น กลิ่นหมักหรือกลิ่นบูด
3. ความชื้นไม่เกินร้อยละ 21 ของน้ำ หนัก
4. น้ำตาลกลูโคสกับน้ำตาลฟรุคโทสไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของน้ำ หนัก หรือมี  
 น้ำตาลรีดิซิงคิดเป็นอินเวิร์ตไม่น้อยกว่าร้อยละ 65 ของน้ำ หนัก
5. น้ำตาลซูโครสไม่เกินร้อยละ 5 ของน้ำ หนัก
6. สารที่ไม่ละลายน้ำไม่เกินร้อยละ 0.1 ของน้ำ หนัก
7. เถ้าไม่เกินร้อยละ 0.6 ของน้ำ หนัก
8. ปริมาณกรดทั้งหมดไม่เกิน 50 มิลลิควิวาเลนต์กรดต่อ 1 กิโลกรัม
9. ค่าไดแอสเทส (Diastase Number) ไม่น้อยกว่า 3
10. สารไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัล (Hydroxy Methyl Furfural; HMF) ไม่เกิน  
 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
11. ค่าการน ไฟฟ้า ไม่เกิน 0.8 มิลลิซีเมนซ์ต่อเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบระบบ อุปกรณ์ และการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อการวิเคราะห์ความนำไฟฟ้าของของเหลวบนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมี โดยการสร้างสนามแม่เหล็กสำหรับใช้เป็นเครื่องจางน้ำดื่มธรรมดา น้ำดื่มเทียม ได้ทำการออกแบบวงจรทางไฟฟ้าเคมีและวงจรตรวจรับสัญญาณของสนามแม่เหล็กจากการประยุกต์ใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (A1301) ในส่วนของการสร้างสนามแม่เหล็กได้เลือกใช้แกนโซลินอยด์กับแกนทอลอยด์ จากนั้นทำการทดลองการตรวจสอบคุณภาพของของเหลวทั้งหมด 70 ตัวอย่าง และการสร้างเครื่องมือการวัดค่าความนำไฟฟ้าเพื่อการจางน้ำดื่มธรรมดา น้ำดื่มเทียม มีการดำเนินการดังต่อไปนี้

### 3.1 เครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 ชุดเครื่องมือวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว

การศึกษาการดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวด้วยเซนเซอร์ตรวจรู้สนามแม่เหล็กที่อยู่บนหลักการทางไฟฟ้าเคมี โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้ออกแบบการติดตั้งเซนเซอร์ที่มีความเหมาะสมของเซนเซอร์พร้อมทั้งการออกแบบวงจรที่สามารถใช้งานร่วมกันได้ระหว่างวงจรไฟฟ้าเคมี วงจรแม่เหล็กไฟฟ้า และวงจรที่แสดงผลที่นำเสนอในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์และความสัมพันธ์ในรูปแบบของแม่โมเดลทางคณิตศาสตร์ จากวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้การวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ เริ่มจากการพิจารณา กฎของโอห์ม  $V = IR$  และจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.14 การพิจารณารูปแบบแมทโมเดลทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาหน่วยด้วย

เมื่อ	$I$	กระแสไฟฟ้า แอมแปร์
	$V$	แรงดันไฟฟ้า โวลต์
	$R$	ความต้านทาน โอห์ม
	$\rho$	สภาพความต้านทานไฟฟ้า โอห์ม-เมตร
	$L$	ความยาวระหว่างขั้วไฟฟ้า เมตร
	$A$	พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า ตารางเมตร

$$V(v) = I(A) \times R(\Omega) \quad (3.1)$$

$$V(v) = I(A) \times \rho(\Omega m) \times \frac{L(m)}{A(m^2)} \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{\rho(\Omega m)} = \frac{I(A)}{V(v)} \times K_{cell}(m^{-1}) \quad (3.3)$$

จากความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวจากเซนเซอร์ตรวจรูสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อบอกคุณภาพและจาแนกชนิดของของเหลวได้และในงานวิจัยนี้กระแสที่พิจารณาจากวิธีทางไฟฟ้าเคมีสามารถนำมาพัฒนาต่อเพื่อให้ตรวจรูสนามแม่เหล็กได้จากวงจรสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้แกนแม่เหล็กความถี่สูงและมีจ านวนการพันขดลวดที่ 260 310 530 รอบทั้งหมด 5 รูปแบบ ดังนี้

1.Solenoid 310	}	ขดลวดทองแดงยาวเท่ากับ 10 เมตร
2.Toroid 260		
3.Toroid 310	}	ขดลวดทองแดงยาวเท่ากับ 12.5 เมตร
4.ToroidC 310		
5.Toroid 530	}	ขดลวดทองแดงยาวเท่ากับ 20 เมตร

จากสมการที่ 3.3 จะได้ว่า

$$\sigma(\Omega^{-1}m^{-1}) = \frac{I(A)}{V(v)} \times K_{cell}(m^{-1}) \quad (3.4)$$

$$\frac{\sigma(\Omega^{-1}m^{-1}) \times V(v)}{K_{cell}(m^{-1})} = I(A) \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่น มาพิจารณาคือกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของของเหลวที่ต่างชนิดกันและน มาสร้าง เป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$B(T) = \frac{\mu(H \cdot m^{-1})N(\text{turn})I(A)}{l(m)} \quad (3.6)$$

$$I(A) = \frac{B(T) \times l(m)}{\mu(H \cdot m^{-1}) \times N(\text{turn})} \quad (3.7)$$

$$I(A) = \frac{\sigma(\Omega^{-1}m^{-1})V(v)}{K_{cell}(m^{-1})} \quad (3.8)$$

เมื่อกำหนดให้กระแสจากไฟฟ้าเคมีมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้ สนามแม่เหล็กที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้าจากกระแส

$$\frac{B(T) \times l(m)}{\mu(H \cdot m^{-1}) \times N(\text{turn})} = \frac{\sigma(\Omega^{-1}m^{-1})V(v)}{K_{cell}(m^{-1})} \quad (3.9)$$

$$B(T) = \frac{\sigma(\Omega^{-1}m^{-1}) \times V(v) \times \mu(H \cdot m^{-1}) \times N(\text{turn})}{K_{cell}(m^{-1}) \times l(m)} \quad (3.10)$$

เมื่อพิจารณาจากงานวิจัยที่ได้ใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$B(T) = \frac{\text{OutputVoltageHall}(v)}{2s_{ent}(v \cdot T^{-1})} \quad (3.11)$$

โดยการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ จึงกำหนดให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเท่ากับการตรวจวัดสนามแม่เหล็กของฮอลล์เซนเซอร์

$$\frac{\sigma(\Omega^{-1}m^{-1}) \times V(v) \times \mu(H \cdot m^{-1}) \times N(\text{turn})}{K_{cell}(m^{-1}) \times l(m)} = \frac{\text{OutputVoltageHall}(v)}{2s_{ent}(v \cdot T^{-1})} \quad (3.12)$$

และเมื่อจัดรูปแบบความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.12 ให้อยู่ในรูปของค่าความนำไฟฟ้า จะได้

$$\sigma(\Omega^{-1}m^{-1}) = \frac{\text{OutputVoltageHall}(v) \times K_{cell}(m^{-1}) \times l(m)}{2s_{ent}(v \cdot T^{-1}) \times V(v) \times \mu(H \cdot m^{-1}) \times N(\text{turn})} \quad (3.13)$$

เมื่อพิจารณาหน่วยของสมการที่ 3.13

$$(\Omega^{-1})(m^{-1}) = \frac{(v) \times (m^{-1}) \times (m)}{(v \cdot T^{-1}) \times (v) \times (H \cdot m^{-1}) \times (\text{turn})} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\Omega^{-1})(m^{-1}) = \frac{(T)(m)}{(v)(H)(turn)} \quad (3.15)$$

$$(S) = \frac{(T)(m)(m)}{(v)(H)(turn)} \quad (3.16)$$

จากกฎของโอห์ม เมื่อ  $V(v) = I(A) \times R(\Omega)$

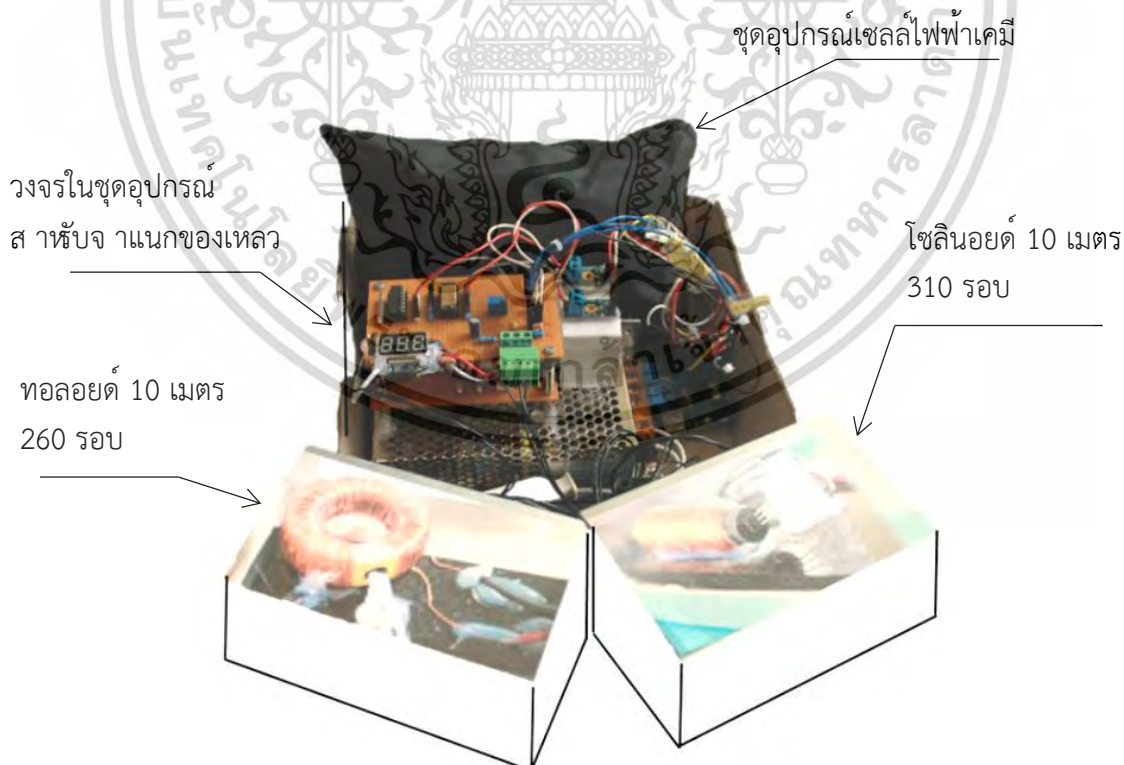
$$(S) = \frac{(T)(m)(m)}{(A)(\Omega)(H)(turn)} \quad (3.17)$$

$$(S) = (T)(\Omega^{-1}) \frac{(m)}{(A)(turn)} \frac{(m)}{(H)} \quad (3.18)$$

$$(S) = (S \cdot T) \frac{(1)}{(H)} \frac{(1)}{(\mu)} \quad (3.19)$$

จากความสัมพันธ์ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อ  $B(T) = \mu H$  ส่งผลให้  $S = S$  ดังนั้นจึงพิสูจน์ได้ว่าหน่วยค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ ซีเมน (S)

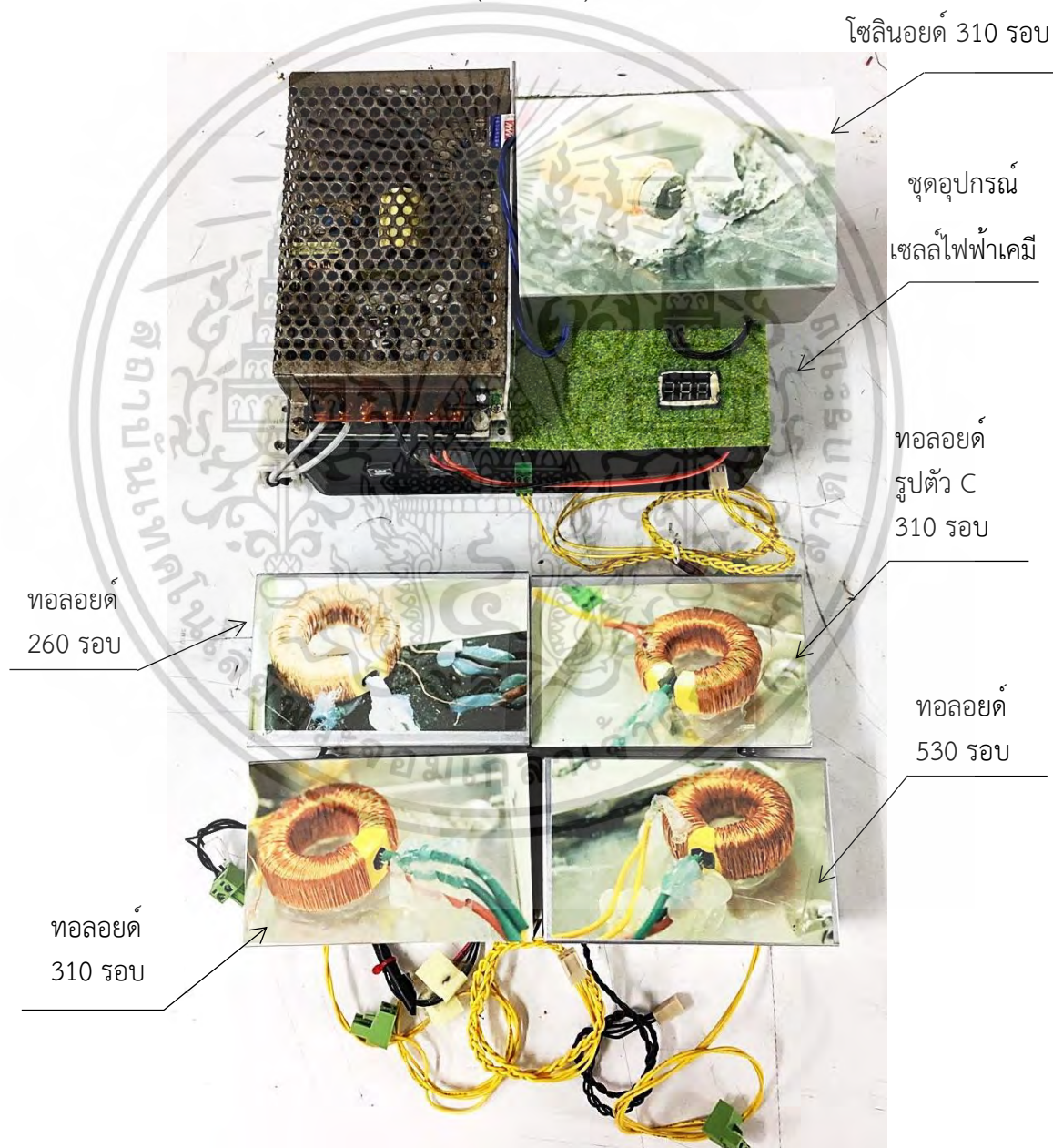
การศึกษากการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวนบนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมี โดยใช้การสร้างสนามแม่เหล็กนั้นในช่วงเริ่มต้นได้ทำเป็นชุดทดลองส สำหรับระบบการวัดที่เปรียบเทียบระหว่างแกนโซลินอยด์กับทอลอยด์ โดยกำหนดเงื่อนไขคือ ใช้ความยาวของขดลวดขนาด 10 เมตร เท่ากัน จากการศึกษาพบว่ารูปทรงของแกนทั้ง 2 รูปแบบ มีผลต่อปริมาณของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.2 เครื่องทดลองการวัดค่าความนำไฟฟ้า 2 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขยายขอบเขตการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อสนามแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ ได้ใช้แกนแม่เหล็กความถี่สูง 5 รูปแบบคือ ได้แก่ 1. โซลินอยด์ 310 รอบ (Solenoid 310) 2. ทอลอยด์ 260 รอบ (Toroid 260) 3. ทอลอยด์ 310 รอบ (Toroid 310) 4. ทอลอยด์ C 310 รอบ (Toroid C310) 5. ทอลอยด์ 530 รอบ (Toroid 530) และได้ทำการทดลอง โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขค่าความลึกและปริมาณของสารละลายตัวอย่างเป็นประจำนศึกษา ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ มีค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมีและปริมาณสารละลายตัวอย่างดังนี้ 1. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 mm 2. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 34 mm 3. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm ของตัวอย่างของเหลวทั้งหมด 70 ตัวอย่าง วัสดุของแกนโซลินอยด์ คือ Ferrite Cores และ วัสดุของแกนทอลอยด์ คือ Toroidal Iron Power Cores ( T131-26)



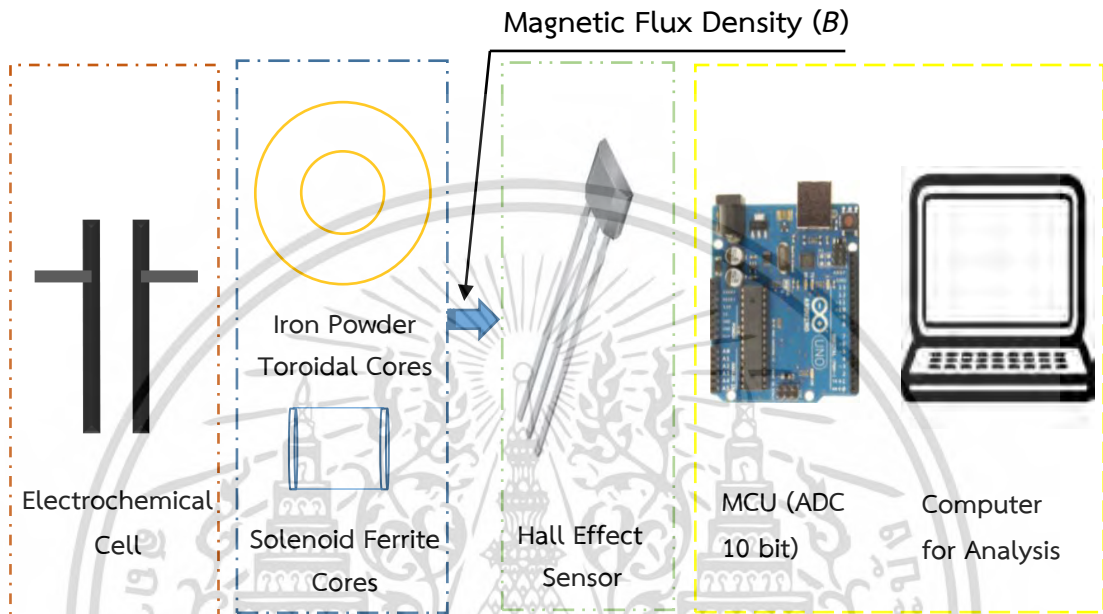
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า 5 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

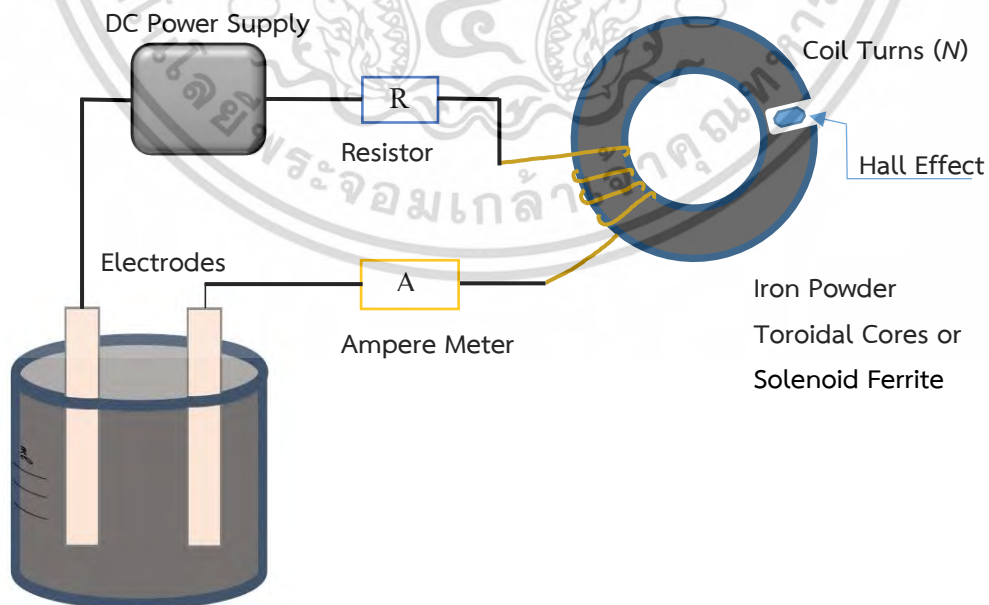
### 3.2 วงจรไฟฟ้าเคมีและวงจรของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

ในงานวิจัยนี้ วงจรของเครื่องวัดค่าความหนาแน่นไฟฟ้ามีส่วนประกอบดังนี้

1. วงจรไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Circuit)
2. วงจรแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Circuits)
3. วงจรฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect Circuit)

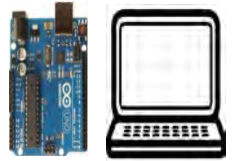
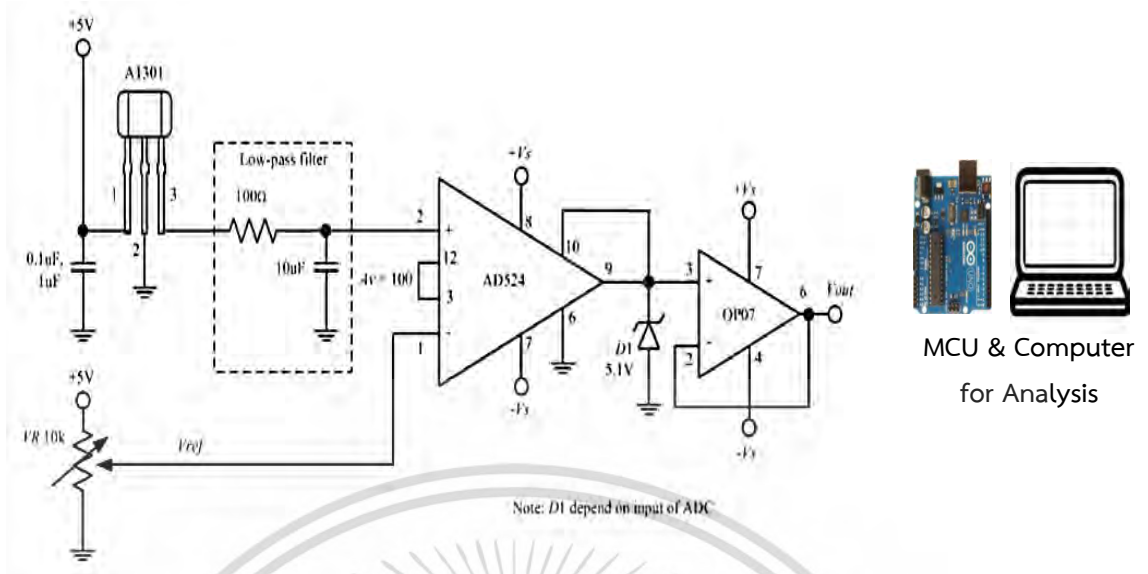


รูปที่ 3.4 โครงสร้างของวงจรเครื่องวัดค่าความหนาแน่นไฟฟ้า 5 รูปแบบ



รูปที่ 3.5 วงจรไฟฟ้าเคมีและวงจรแม่เหล็ก (Electrochemical and Electromagnetic Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MCU & Computer  
for Analysis

รูปที่ 3.6 วงจรฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect Circuit)

### 3.3 การดำเนินการวิจัยและทดสอบส่วนประกอบของวงจรเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า

จากการศึกษาวงจรไฟฟ้าเคมี เมื่อพิจารณาเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกัน ได้แก่ สเตนเลส 304 อลูมิเนียม และ ทองแดง และจากการศึกษาจึงได้เลือก Stainless Steel 304 เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเกิดการกัดกร่อนที่ส่งผลต่อตัวอย่างของเหลวขณะการทดสอบน้อยมากเมื่อเทียบกับอลูมิเนียมและทองแดง

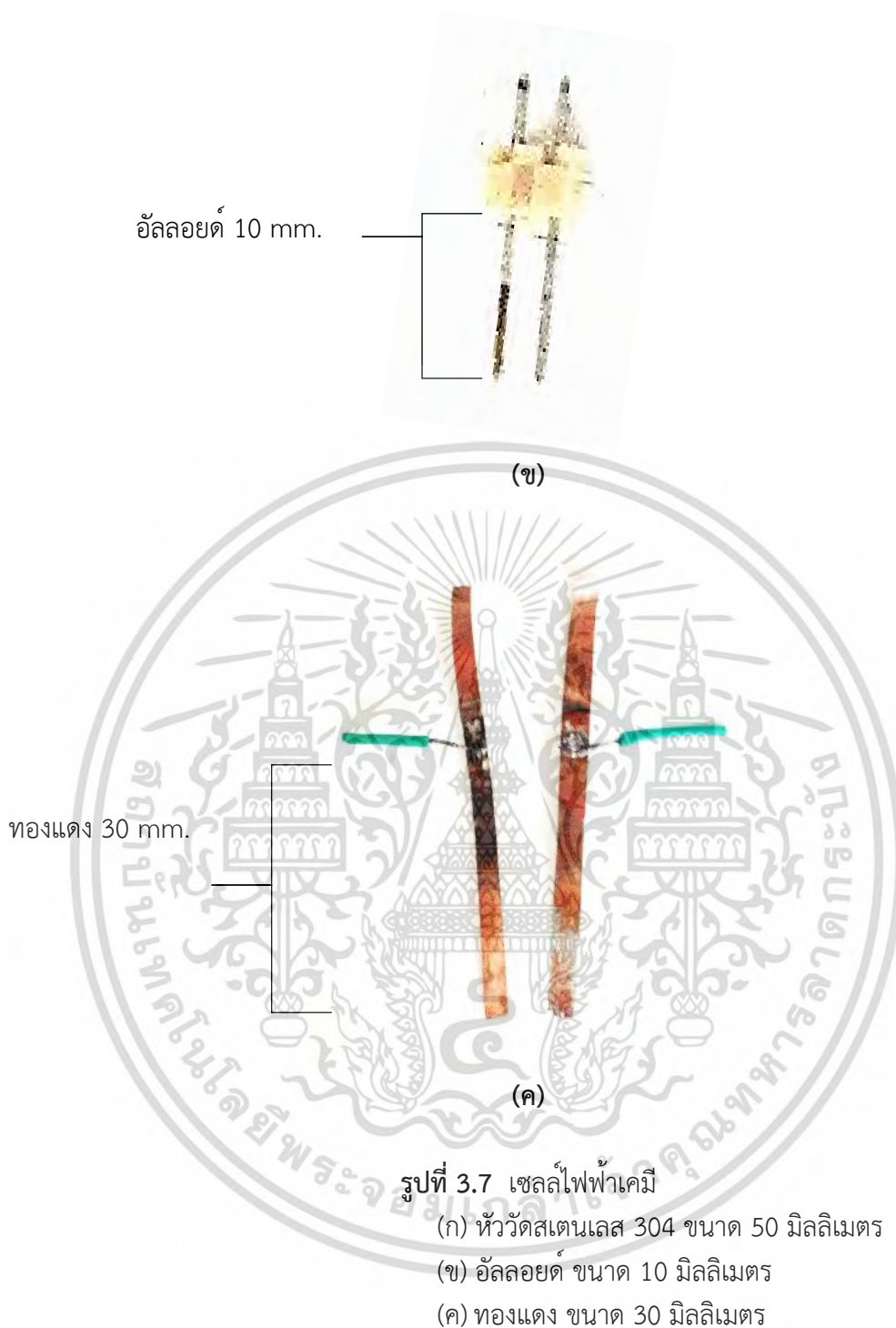


หัววัดสแตนเลส

50 mm.

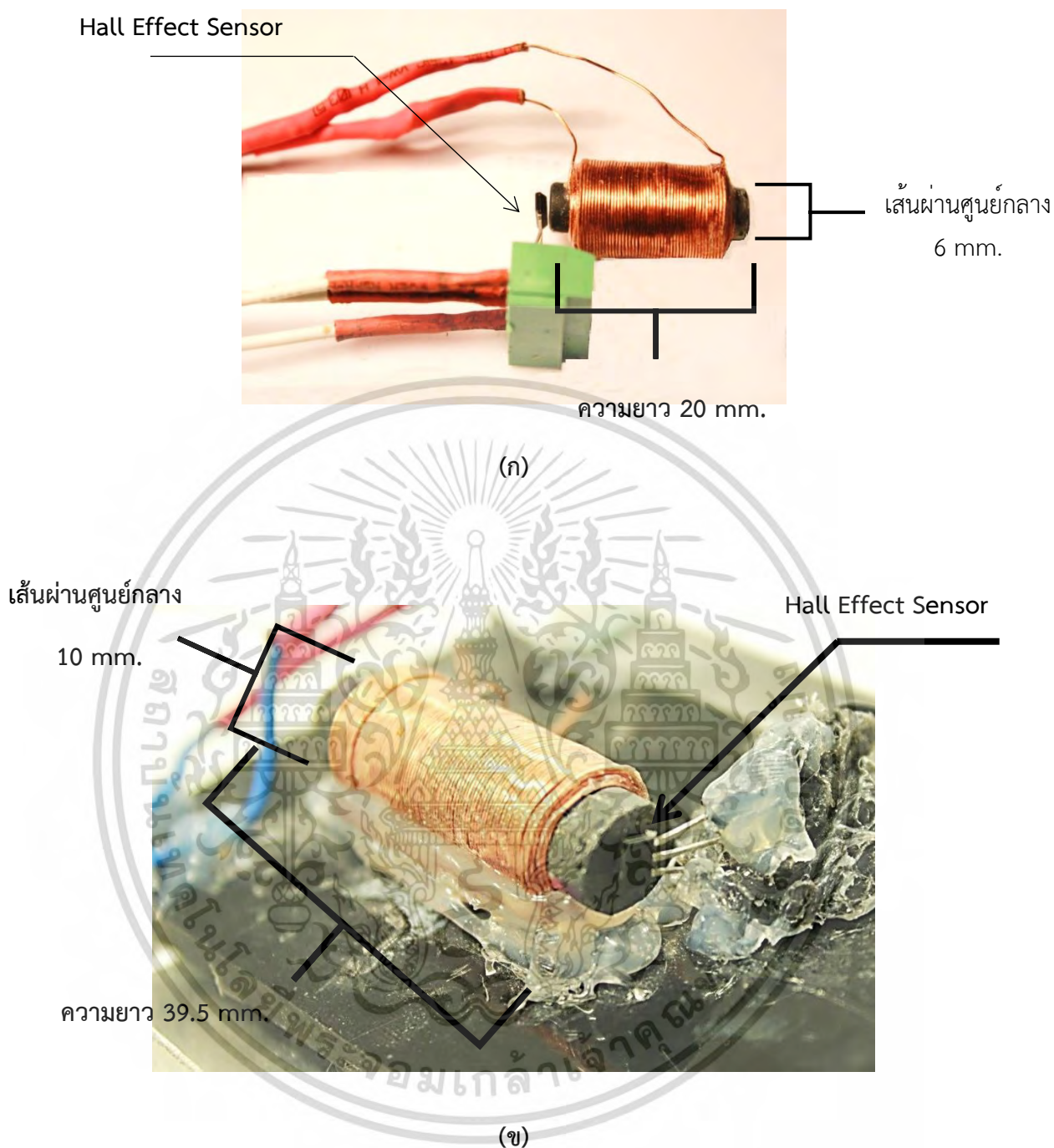
(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การศึกษาวงจรแม่เหล็กไฟฟ้า จะพิจารณาที่แกนสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กโซลินอยด์และทอลอยด์ โดยในเบื้องต้นได้ทดลองกับเครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า 2 รูปแบบ โดยเลือกใช้แกนโซลินอยด์และแกนทอลอยด์ ซึ่งสำหรับแกนโซลินอยด์นั้น ได้เลือกใช้ลวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 20 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาว 39.5 มิลลิเมตร เป็นโซลินอยด์แบบ ก. และ ข. ตามลำดับซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้แกนโซลินอยด์ ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



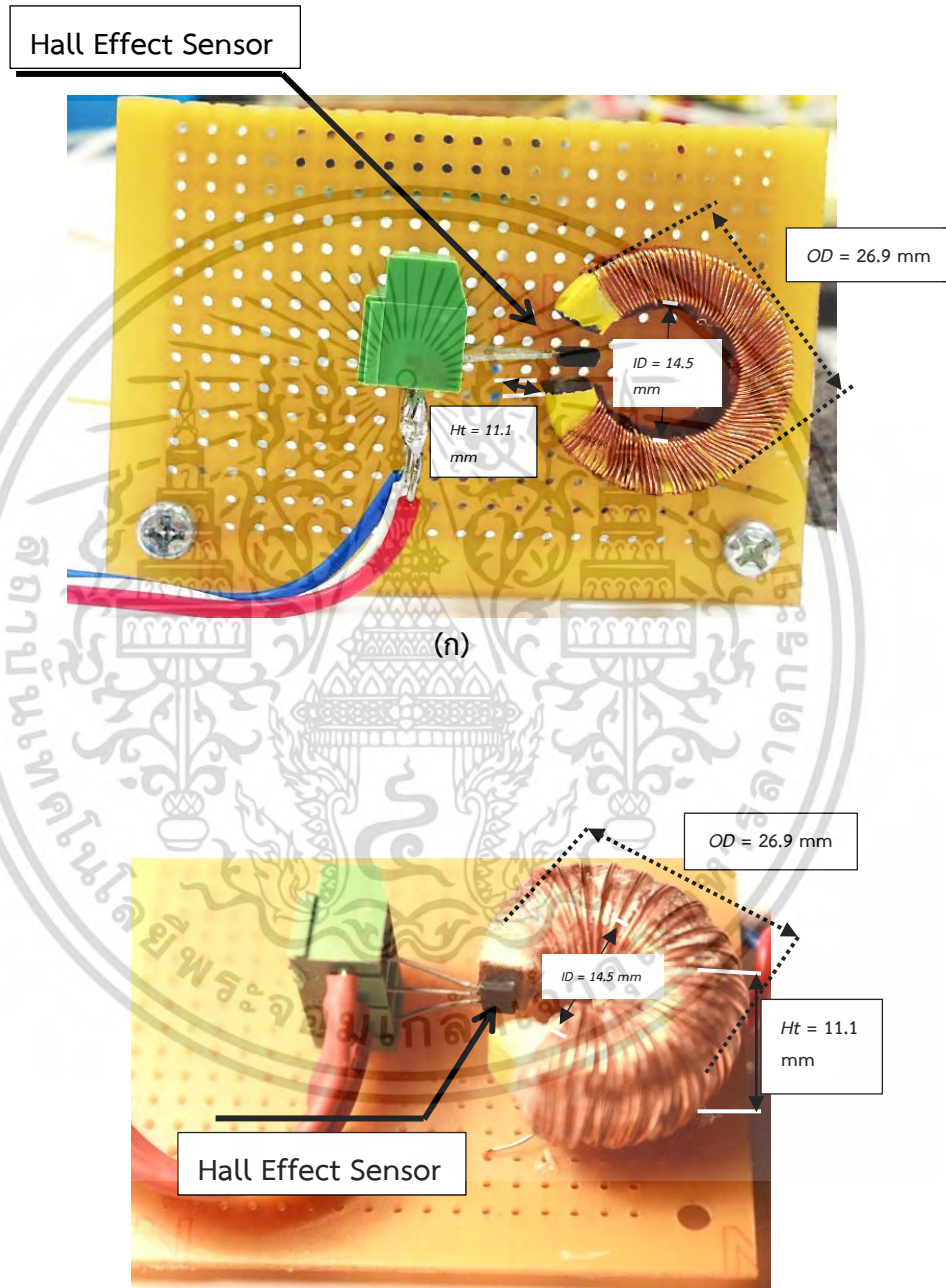
รูปที่ 3.8 แกนโซลินอยด์ โดยวัสดุของแกนเป็น Ferrite

(ก) โซลินอยด์ ความยาว 20 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

(ข) โซลินอยด์ ความยาว 10 มิลลิเมตร. เส้นผ่านศูนย์กลาง 39.5 มิลลิเมตร

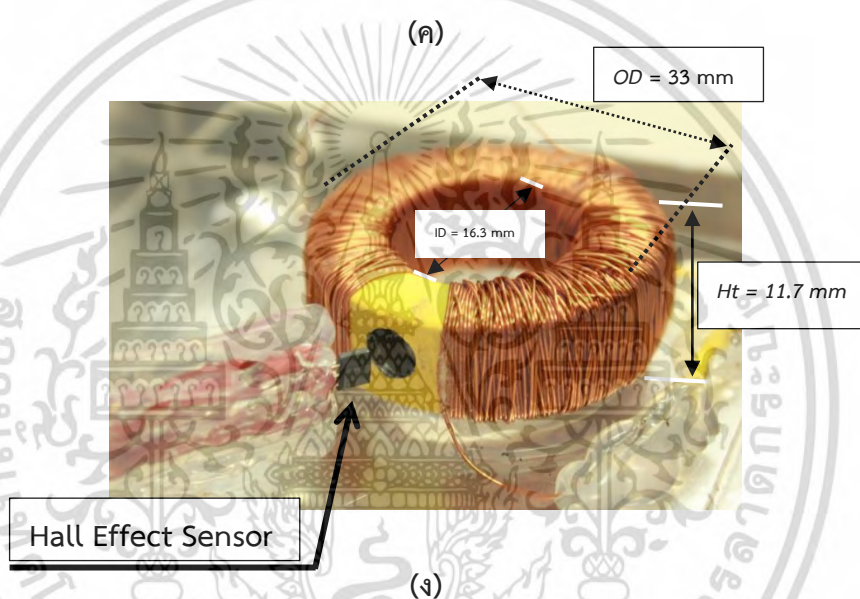
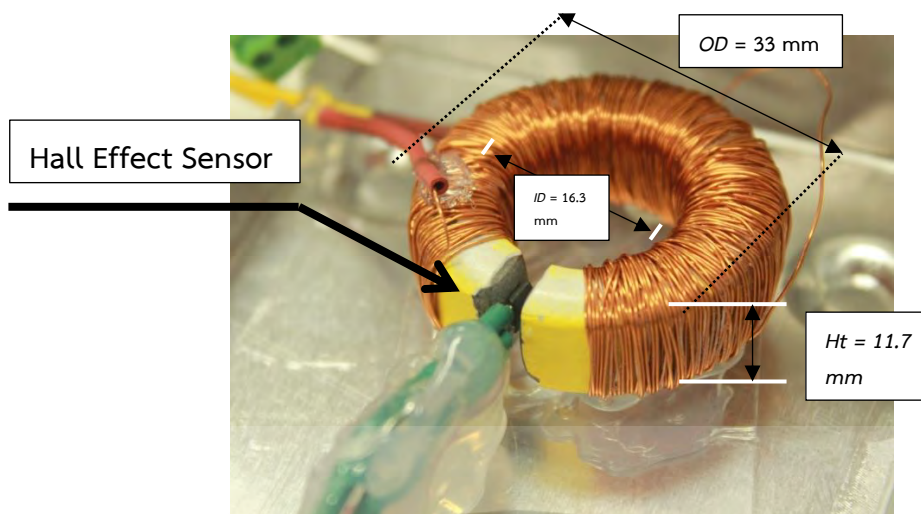
สำหรับเครื่องวัดค่าความหนาไฟฟ้า ที่เลือกใช้แกนทอลอยด์นั้น มีทั้งหมด 2 ขนาด ได้แก่ T106-26 และ T131-26 โดยทั้ง 2 ขนาดนี้มีทั้งรูปแบบโดניתและแบบตัวซี โดยแกนทอลอยด์ T106-26 รูปแบบตัวซี มีทั้งหมด 2 รูปแบบและมีขนาดเท่ากัน คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 26.9 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14.5 มิลลิเมตร ความหนา 11.1 มิลลิเมตร ติดตั้งเซนเซอร์ ระหว่างช่องว่างของแกนทอลอยด์และติดตั้งเซนเซอร์ชิดด้านใดด้านหนึ่งของแกนทอลอยด์ ตามล ทัพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ผ่านการอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของแกนทอลอยด์ T131-26 แบ่งเป็นรูปแบบโตนัทและตัวซีซึ่งมีขนาดเท่ากัน คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 33 มิลลิเมตร เส้นศูนย์กลางภายใน 16.3 มิลลิเมตร ความหนา 11.7 มิลลิเมตร ติดตั้งเซนเซอร์ภายในแกนทอลอยด์ที่เจาะรูขนาด 4.5 x 4.5 มิลลิเมตรและติดตั้งเซนเซอร์ชิดกับแกนทอลอยด์ทั้งสองด้าน ตามลวดับ



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

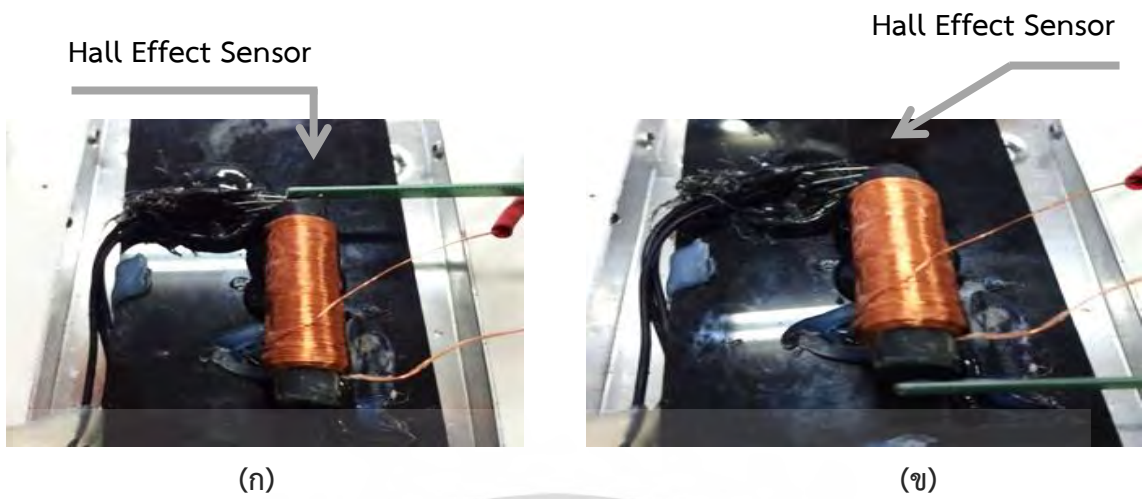


รูปที่ 3.9 แกนทอลอยด์ (Iron Powder Toroidal Cores (Series T-26))

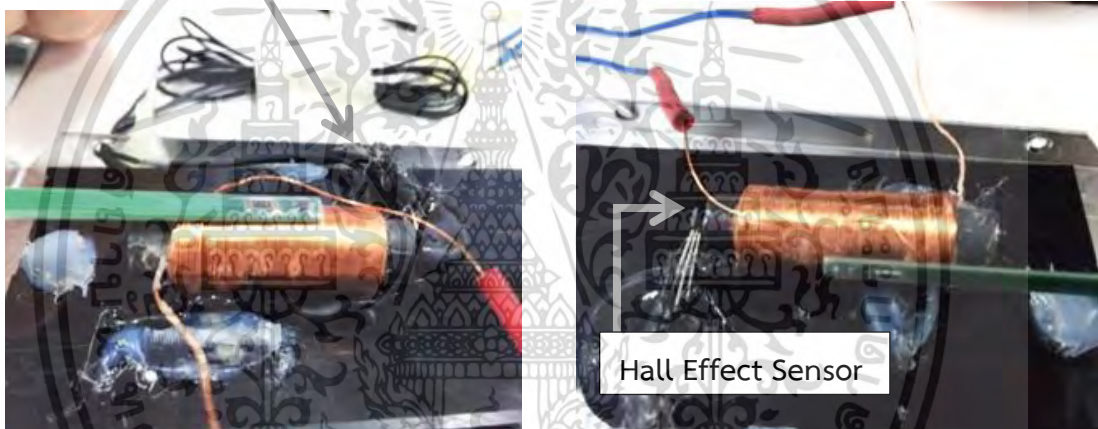
- (ก) ติดตั้งเซนเซอร์ระหว่างช่องว่างของแกนทอลอยด์ รัศมี 10 mm.
- (ข) ติดตั้งเซนเซอร์ชิดด้านใดด้านหนึ่งของแกนทอลอยด์ รัศมี 10 มิลลิเมตร
- (ค) ติดตั้งเซนเซอร์ชิดกับแกนทอลอยด์ทั้งสองด้าน รัศมี 16.3 มิลลิเมตร
- (ง) ติดตั้งเซนเซอร์ภายในแกนทอลอยด์ที่เจาะรู รัศมี 16.3 มิลลิเมตร

การศึกษาวจรแม่เหล็กไฟฟ้า ในเครื่องวัดค่าความหนาไฟฟ้าได้ทดสอบวิธีการวัดความหนาแน่นของเส้นแรงในรูปแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

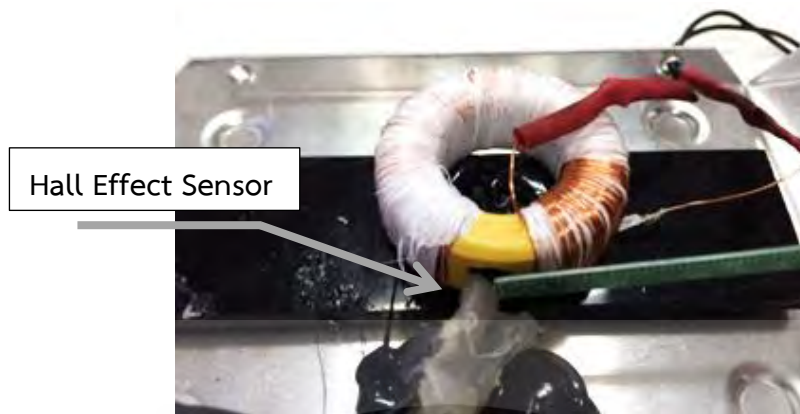


Hall Effect Sensor



รูปที่ 3.10 การวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนโซลินอยด์ (Solenoid)  
 (ก) วัดแกนแบบที่ 1 (South Pole)    (ข) วัดแกนแบบที่ 2 (North Pole)  
 (ค) วัดแกนแบบที่ 3 (Top Side)    (ง) วัดแกนแบบที่ 4 (Right Side)  
 (จ) วัดแกนแบบที่ 5 (Left Side)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.11 การวัดความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กของแกนทอลอยด์ (Toroid)

(ก) วัดแกนแบบที่ 1 (Front Side)

(ข) วัดแกนแบบที่ 2 (Center of Core)

(ค) วัดแกนแบบที่ 3 (Side)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาการวัดค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยในแกนโซลินอยด์และแกนทอลอยด์ ได้เลือกการติดตั้งแบบที่ 2 (North Pole) และการติดตั้งแบบที่ 1 (Front Side) ตามลำดับ เนื่องด้วยให้ค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กมากที่สุด

เพื่อการตรวจสอบประสิทธิภาพของแกนส ำห้สร้างสนามแม่เหล็ก จึงใช้เครื่องมือวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก คือ AC/DC Magnetic Field Meter ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ในการวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของแกน และใช้เครื่องแอลซีอาร์ (LCR Meter) เพื่อตรวจสอบค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้าของแกนและความต้านทานที่เกิดขึ้นภายในแกนขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 แสดง AC/DC Magnetic Field Meter EXTECH SDL900



รูปที่ 3.13 แสดง LCR Meter INSTEK816

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าความถูกต้องของแกนทั้ง 5 รูปแบบ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการวัด โดยได้ทำการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของเหลวและน้ำดื่มที่ยอมและกลุ่มของน้ำดื่มธรรมชาติ 100% จากความคลาดเคลื่อนทางสถิติ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมการดังต่อไปนี้

$$\%Accuracy = 100 - \%Error \quad (3.20)$$

โดย

$$Relative\ Error = \left| \frac{x_{mea} - x_t}{x_t} \right| \quad (3.21)$$

$$\%Error = Relative\ Error \times 100 \quad (3.22)$$

เมื่อ  $x_{mea}$  คือ ค่าที่ได้จากการวัด (Measure Value)  
 $x_t$  คือ ค่าจริง (True Value)

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ตัวอย่างของเหลวและขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ตัวอย่างของเหลวและส่วนผสม ทั้งหมด 70 ตัวอย่าง
2. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 16 โวลต์
3. มัลติมิเตอร์สำหรับวัดกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า สนามแม่เหล็กไฟฟ้า LCR
4. ปีกเกอร์ ขนาด 25 มิลลิลิตร
5. Syringe ขนาด 25 มิลลิลิตร
6. เครื่องชั่งสาร
7. ขวดขนาดเล็ก 20 มิลลิลิตร
8. ชุดเซนเซอร์วัดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างและส่วนผสมของเหลวสาหรับการศึกษา

### 3.4.1 รายชื่อของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด 70 ตัวอย่างทั้งหมด 3 เงื่อนไขดังนี้

1. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร ทั้งหมด 20 ตัวอย่าง
2. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 34 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 25 มิลลิลิตร ทั้งหมด 10 ตัวอย่าง
3. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร ทั้งหมด 40 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3.1 รายชื่อสารละลายทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 24 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร

Samples	Cell Constant $\text{cm}^{-1}$	Distance mm	Volume mL
A1 Deionized Water	0.15625	24	20
A2 Natural Water	0.15625	24	20
A3 Drinking Water	0.15625	24	20
A4 Tap Water	0.15625	24	20
A5 Cha Green Tea	0.15625	24	20
A6 Honey Natural Sun Forest	0.15625	24	20
A7 Vejpong Natural Honey	0.15625	24	20
A8 Good.b Natural Honey	0.15625	24	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.1** รายชื่อสารละลายทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 24 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร (ต่อ)

Samples	Cell Constant $\text{cm}^{-1}$	Distance mm	Volume mL
A9 Honey Syrup	0.15625	24	20
A10 Glucose Syrup	0.15625	24	20
A11 Honey Glucose Syrup (Veipong Natural Honey:Glucose Syrup 1:3)	0.15625	24	20
A12 Honey Glucose Syrup (Veipong Natural Honey:Glucose Syrup 1:1)	0.15625	24	20
A13 Honey Glucose Syrup (Good.b Natural Honey:Glucose Syrup 1:3)	0.15625	24	20
A14 Honey Glucose Syrup (Good.b Natural Honey:Glucose Syrup 1:1)	0.15625	24	20
A15 Syrup (Water : Sugar 1:1)	0.15625	24	20
A16 Syrup (Water : Sugar 2:1)	0.15625	24	20
A17 Syrup (Water: Sugar 3:1)	0.15625	24	20
A18 Salt Solution (Water : Salt 4:1)	0.15625	24	20
A19 Salt Solution (Water : Salt 6:1)	0.15625	24	20
A20 Salt Solution (Water : Salt 8:1)	0.15625	24	20

**ตารางที่ 3.2** รายชื่อสารละลายทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 34 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 25 มิลลิลิตร

Samples	Cell Constant $\text{cm}^{-1}$	Distance mm	Volume mL
B1 Honey Chieng Mai	0.11029	34	25
B2 Erawan Pure Honey	0.11029	34	25
B3 Honey Wild Flower Hilltribe Gourmet	0.11029	34	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.2** รายชื่อสารละลายทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 34 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 25 มิลลิลิตร (ต่อ)

Samples	Cell Constant $\text{cm}^{-1}$	Distance mm	Volume mL
B4 Honey Wild Flower Prapussorn	0.11029	34	25
B5 Chumchon Pure Honey	0.11029	34	25
B6 Langnese Golden Clear Honey (Germany)	0.11029	34	25
B7 TPA Wild Flower Honey	0.11029	34	25
B8 Song Pueng Natural Honey	0.11029	34	25
B9 Pure Grain Sunflower Honey	0.11029	34	25
B10 Bua Luang Honey	0.11029	34	25

**ตารางที่ 3.3** รายชื่อสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 40 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร

Samples	Cell Constant $\text{cm}^{-1}$	Distance mm	Volume mL
C1 Deionized Water	0.09375	40	17
C2 Water Distilled Battery	0.09375	40	17
C3 Drinking Water	0.09375	40	17
C4 Natural Water	0.09375	40	17
C5 Tap Water	0.09375	40	17
C6 Cha Green Tea	0.09375	40	17
C7 Salt Solution (Water : Salt 8:1)	0.09375	40	17
C8 Salt Solution (Water : Salt 6:1)	0.09375	40	17
C9 Salt Solution (Water : Salt 4:1)	0.09375	40	17
C10 Saline Water Clean	0.09375	40	17
C11 Syrup (Water : Sugar 3:1)	0.09375	40	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.3** รายชื่อสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 40 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร (ต่อ)

Samples	Cell Constant $\text{cm}^{-1}$	Distance mm	Volume mL
C12 Syrup (Water : Sugar 2:1)	0.09375	40	17
C13 Syrup (Water : Sugar 1:1)	0.09375	40	17
C14 Honey Glucose Syrup (Veijpong Natural Honey:Glucose Syrup 1:1)	0.09375	40	17
C15 Honey Glucose Syrup (Veijpong Natural Honey:Glucose Syrup 1:3)	0.09375	40	17
C16 Honey Glucose Syrup (Good.b Natural Honey:Glucose Syrup 1:1)	0.09375	40	17
C17 Honey Glucose Syrup (Good.b Natural Honey:Glucose Syrup 1:3)	0.09375	40	17
C18 Glucose Syrup	0.09375	40	17
C19 Honey Syrup	0.09375	40	17
C20 Maple Syrup	0.09375	40	17
C21 Sugar Substitute for Diabetics	0.09375	40	17
C22 Honey Natural Sun Forest	0.09375	40	17
C23 Veijpong Natural Honey	0.09375	40	17
C24 Good.b Natural Honey	0.09375	40	17
C25 Good.b Sunflower Honey	0.09375	40	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 3.3** รายชื่อสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมี 40 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร (ต่อ)

Samples	Cell Constant $\text{cm}^{-1}$	Distance mm	Volume mL
C26 Royal Chitralada Honey	0.09375	40	17
C27 Longan Honey TOPs	0.09375	40	17
C28 TPA Longan Honey	0.09375	40	17
C29 TPA Pure Honey	0.09375	40	17
C30 TPA Wild Flower Honey	0.09375	40	17
C31 Honey Longan Hilltribe Gourmet	0.09375	40	17
C32 Honey Wild Flower Hilltribe Gourmet	0.09375	40	17
C33 Honey Wild Flower Prapussorn	0.09375	40	17
C34 Erawan Pure Honey	0.09375	40	17
C35 Song Pueng Natural Honey	0.09375	40	17
C36 Chumchon Pure Honey	0.09375	40	17
C37 Pure Grain Sunflower Honey	0.09375	40	17
C38 Honey Chiangmai	0.09375	40	17
C39 Bua Luang Honey	0.09375	40	17
C40 Langnese Golden Clear Honey (Germany)	0.09375	40	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

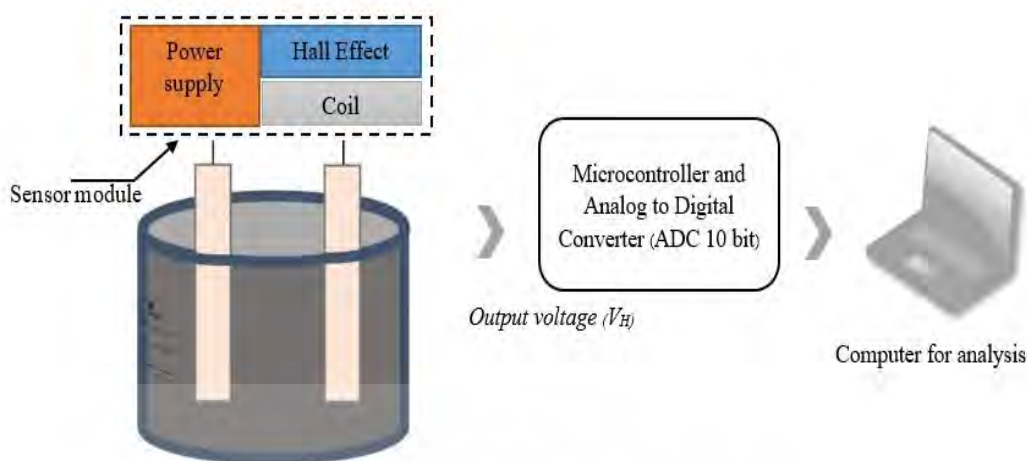


รูปที่ 3.15 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการทดสอบเบื้องต้น



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



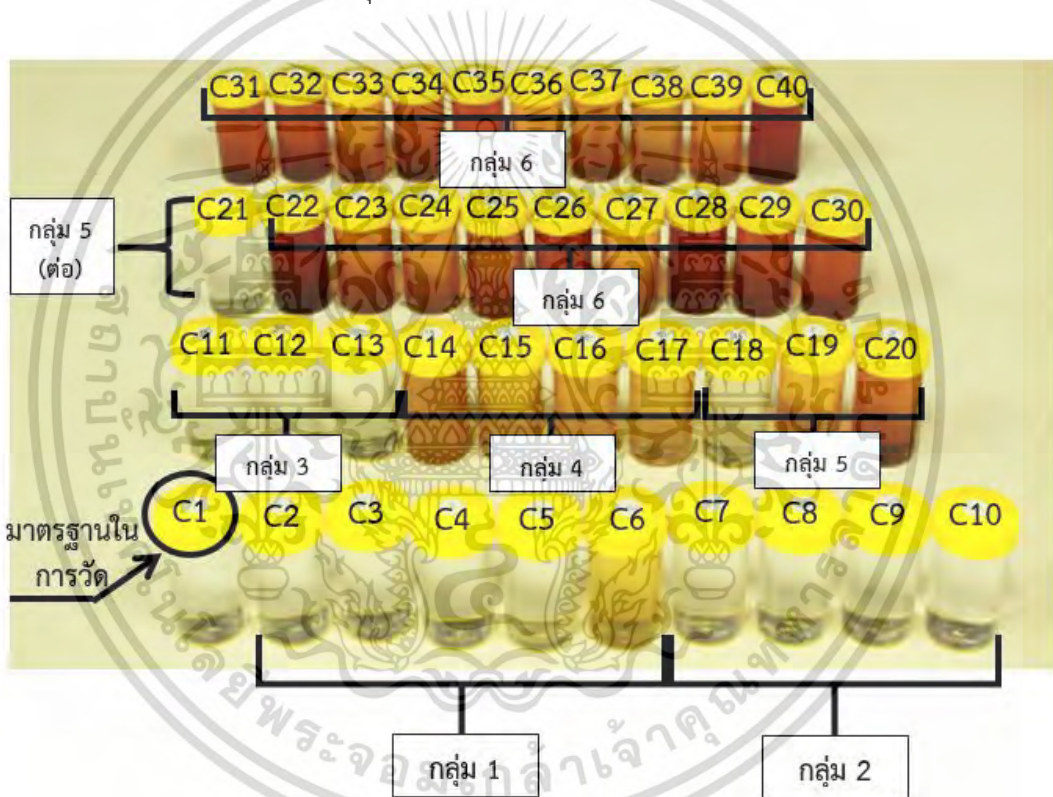
รูปที่ 3.17 แสดงการวัดและการส่งข้อมูล

จากรูปที่ 3.17 แสดงการวัดและการส่งข้อมูลของการทดลอง โดย 1 ข้อมูลได้จากการเฉลี่ยของ 800 ข้อมูล จะได้ข้อมูล 195 ข้อมูล ในเวลา 60 วินาที และเมื่อได้ 195 ข้อมูลแล้วทำการหาค่าเฉลี่ยของ 195 ข้อมูล ซึ่งจะได้ออกมาเป็น 1 ข้อมูล หลังจากนั้นจะส่งไปยังข้อมูลของสัญญาณเอาต์พุตจากระบบแอนะล็อกอิเล็กทรอนิกส์ ไปยังระบบพื้นฐานของคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งการวิเคราะห์ข้อมูลและความถูกต้อง ด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งทำงานร่วมกับคอนเวอร์เตอร์ขนาด 10 บิต เป็นการสังเกตสัญญาณแบบทันทีปัจจุบัน

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการวัดของการประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ร่วมกับแหล่งก านิตสนามแม่เหล็กความถี่สูง 5 รูปแบบ คือ โซลินอยด์ 310 รอบ ทอลอยด์ 260 รอบ ทอลอยด์ 310 รอบ ทอลอยด์ C 310 รอบ และ ทอลอยด์ 530 รอบ โดยมีเงื่อนไขความลึกและปริมาณของของเหลว ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ กำหนดค่าคงที่ไฟฟ้าเคมีและปริมาณของเหลวคือ  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกเท่ากับ 24 มิลลิเมตร  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกเท่ากับ 34 มิลลิเมตร และ  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกเท่ากับ 40 มิลลิเมตร รวมตัวอย่างของเหลวที่ต่างชนิดกันทั้งหมด 70 ตัวอย่าง โดยวัสดุของแกนโซลินอยด์ คือ Ferrite Cores และ วัสดุของแกนทอลอยด์ คือ Toroidal Iron Power Cores (T131-26)



รูปที่ 4.1 สารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึก 40 มิลลิเมตร และปริมาณเท่ากับ 17 มิลลิลิตร

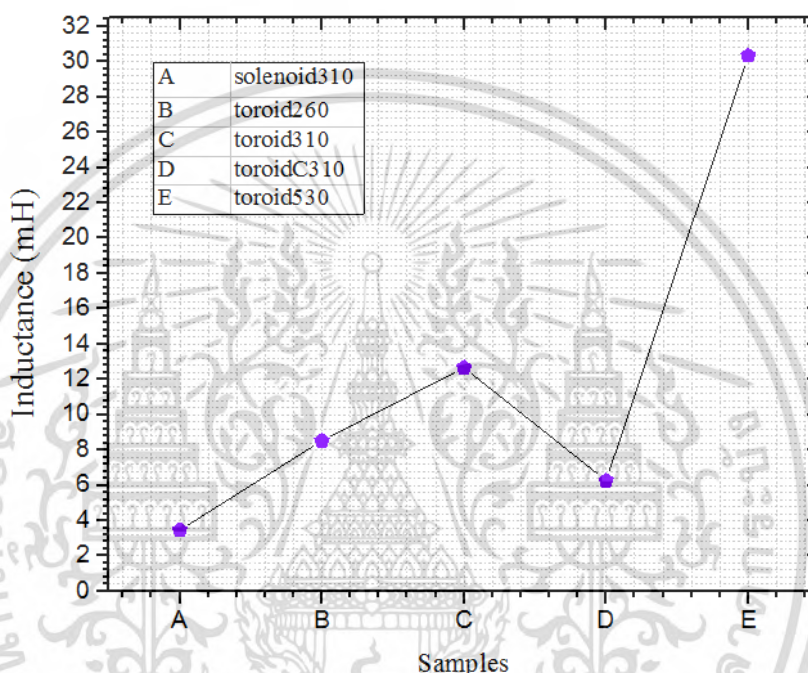
จากรูปที่ 4.1 การทดสอบลักษณะที่สำคัญของน้ำผึ้งธรรมชาติคือ สีและกลิ่นของน้ำผึ้งธรรมชาติ 100% จากคุณสมบัติตามมาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 8003-2556 “น้ำผึ้ง” สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [27] เนื่องจากแหล่งของน้ำหวานที่ผึ้งได้เก็บสะสมท าให้สามารถสังเกตลักษณะทางกายภาพจากสีการจ เนกของเหลวตัวอย่างทั้งหมดทางกายภาพ คือ ของเหลวชั้นเป็นเนื้อเดียวกัน ปราศจากกลิ่นแปลกปลอม มีรสชาติที่มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะตัวที่เป็นธรรมชาติ ด้านของสี่ คือ มีลักษณะใส ไม่ขุ่นทึบ มีสีตามธรรมชาติ ตั้งแต่สีเหลืองอ่อนถึงสีน้ำตาลเข้ม

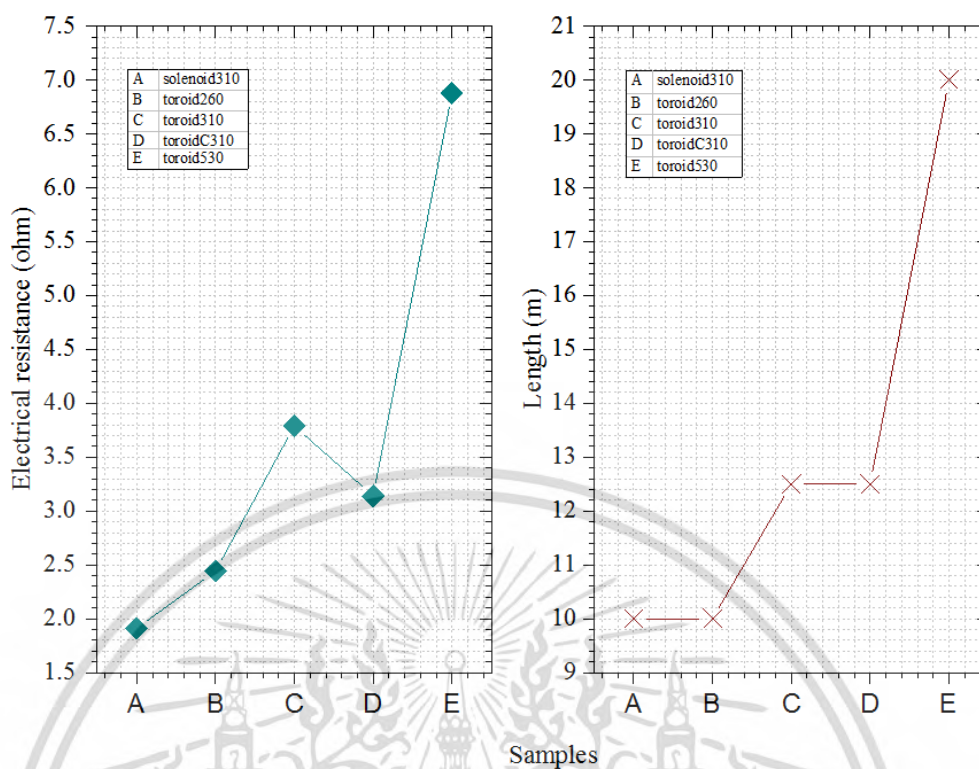
#### 4.1 ผลการทดลองการวัดค่าจากความสัมพันธ์ของทั้ง 5 รูปแบบ

ผลการทดลองเมื่อใช้แกนทั้ง 5 รูปแบบโดยในเบื้องต้นจะแสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนา mH และค่าความต้านทานที่วัดจากเครื่อง INSTRON LCR Meter 816 และค่าความยาว m ของลวดทองแดงที่นำมาพันรอบแกนโซลินอยด์และทอลอยด์ทั้ง 5 รูปแบบ



รูปที่ 4.2 ค่าความเหนี่ยวนาทั้ง 5 รูปแบบ

จากรูปที่ 4.2 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเหนี่ยวนาของทั้ง 5 รูปแบบ กับค่าของความยาวของลวดทองแดงที่ใช้พันและรูปแบบของแกนส หรือสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นซึ่งจะเห็นได้ว่า รูปแบบ A คือ โซลินอยด์ 310 มีจำนวนรอบของการพันที่ 310 รอบ ให้ค่าการเหนี่ยวนาที่น้อยที่สุดของทั้ง 5 รูปแบบ ในส่วนของ รูปแบบ B ทอลอยด์ 260 รูปแบบ C ทอลอยด์ 310 รูปแบบ E ทอลอยด์ 530 ในรูปแบบของทอลอยด์เหมือนกันแต่มีจำนวนรอบของการพันลวดทองแดงรอบแกน B, C และ E ที่ต่างกัน คือ 260 รอบ 310 รอบ และ 530 รอบ ตามลำดับ พบว่าค่าการเหนี่ยวนาเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของรูปแบบ D ทอลอยด์ C 310 มีจำนวนรอบการพันของลวดทองแดงรอบแกนที่ 310 รอบ ให้ค่าการเหนี่ยวนาที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบของทอลอยด์ B, C และ E เนื่องจากในส่วนของแกนของทอลอยด์ C 310 นั้นได้ตัดแปลงเป็นแกนรูปตัว C ส่งผลให้ปริมาณของวัสดุหรือพื้นที่ของวัสดุลดลง



รูปที่ 4.3 ค่าความต้านทานและค่าความยาวของลวดทองแดง ทั้ง 5 รูปแบบ

จากรูปที่ 4.3 ได้แสดงความสัมพันธ์กับค่าความเหนี่ยวนำจากรูปที่ 4.2 อย่างมีนัยสำคัญ คือ จำนวนรอบของการพันลวดทองแดงรอบแกนทั้งแกนโซลินอยด์และแกนทอลอยด์หรือความยาวของลวดทองแดงนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าของความต้านทานของแกนทั้ง 5 รูปแบบสำหรับการศึกษาครั้งนี้มีรายชื่อของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด 70 ตัวอย่าง มี 3 เงื่อนไขดังนี้

1. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร ทั้งหมด 20 ตัวอย่าง
2. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 34 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 25 มิลลิลิตร ทั้งหมด 10 ตัวอย่าง
3. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร ทั้งหมด 40 ตัวอย่าง

การวัดค่าความนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity,  $\sigma$ ) ในการศึกษานี้ได้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการเฉพาะของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ A1301 และหลักการเคมีไฟฟ้าจากความสัมพันธ์พื้นฐานของทั้ง 3 หลักการทำให้ได้สมการที่เป็นการอธิบายความสัมพันธ์ของการหาค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว โดยใช้สนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 4.1 โดยที่  $I$  คือ ค่าความยาวของแกนวัสดุ  $N$  คือ จำนวนรอบของการพันลวดทองแดง  $V$  คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า โวลต์ของเครื่องตรวจวัด  $\mu$  คือ Permeability ซึ่ง  $\mu = \mu_r \times \mu_0$  โดยที่  $\mu_r$  คือ Permeability of Material  $\mu_0$  คือ Permeability of Vacuum และ  $SENS$  คือ ค่าความไวในการตอบสนองเฉพาะตัวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\sigma) = \frac{V_{H(Output)} \times l \times K_{Cell}}{2SENS \times N \times V \times \mu} \quad (4.1)$$

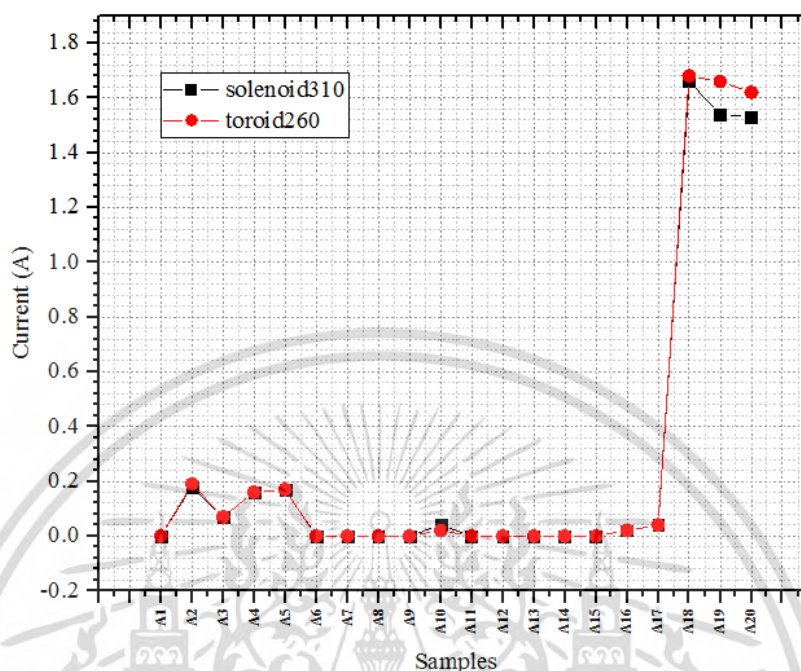
ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าเฉพาะของตัวแปรสำหรับการหาค่าความหนาแน่นไฟฟ้า

Variable	Description	Value	
		Solenoid	Toroid
$\mu$ (H/m)	Permeability	1.0048E-09	9.42E-05
$\mu_r$ (H/m)	Permeability of Material	8.00E-04	75
$\mu_o$ (H/m)	Permeability of Vacuum	$4\pi$ E-07	$4\pi$ E-07
$N$ (number)	Turns	310	260, 310, 530
$l$ (m)	Length of Cores	0.0390	0.0772
AWG	Standard of Coil	31	31
Sens (mV/G)	Magnetic Sensitivity	2.5	2.5
Vol (V)	Supply Voltage	16	16

## 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

โดยการเริ่มต้นทางการศึกษาได้ดำเนินการหาเงื่อนไขการทดลองที่ถูกต้องจากค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  และข้อค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการทดสอบการวัดค่าความหนาแน่นไฟฟ้าเพื่อจำแนกน้ำดื่มธรรมชาติ น้ำดื่มเทียม และใช้ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  สำหรับการเปรียบเทียบการวัดของแกนทั้ง 5 รูปแบบมาประยุกต์ใช้งานฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถจำแนกชนิดและบ่งบอกถึงคุณลักษณะของของเหลวได้ โดยเริ่มจากของเหลวที่ไม่สามารถจำแนกได้ด้วยตาเปล่าซึ่งกลุ่มตัวอย่างคือ กลุ่ม0 (A1) Deionized water เป็นมาตรฐาน กลุ่ม1 มีดั่งนี้ (A2) Natural water (A3) Drinking water (A4) Tap water (A5) Cha green tea กลุ่ม6 Salt solution โดยการทดสอบเบื้องต้นนั้นเป็นการเลือกใช้ความยาวของเส้นลวดที่มีความยาวเท่ากันคือ 10 เมตร ของแกนแม่เหล็กความถี่สูงคือ โซลีนอยด์ 310 รอบ และ ทอลอยด์ 260 รอบ ของกลุ่มตัวอย่างของค่าคงที่ไฟฟ้าเคมีเท่ากับ  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่า 24 มิลลิเมตร

#### 4.2.1 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น

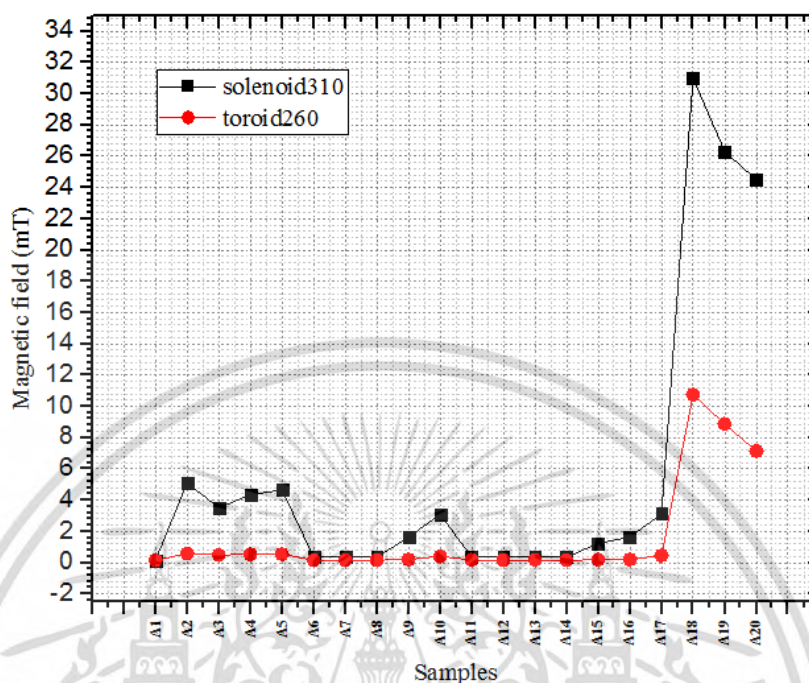


รูปที่ 4.4 ค่าความกระแสของค่าคงที่  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 89]

จากรูปที่ 4.4 การวัดและทดสอบการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่าง ๆ ของรูปแบบ A และ รูปแบบ B สามารถสังเกตได้ว่า ของเหลวตัวอย่าง A2 - A5 คือ Natural Water, Drinking Water, Tap Water และ Cha Green Tea ตามลำดับ โดยผลของการวัดค่ากระแสจากของเหลว นั้น ให้ค่าของกระแสที่สูงกว่าตัวอย่างของเหลวโดยรวมของทั้งหมด โดยเทียบสารละลายมาตรฐาน A1 คือ Deionized Water สารละลายตัวอย่าง A6 - A17 เป็นกลุ่มของของเหลวที่มีค่าของกระแสที่น้อยที่สุดจากทั้งหมด เมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน A1 และเนื่องจากเป็นกลุ่มของคาร์โบไฮเดรต และในกลุ่มต่อมาคือ ของเหลวตัวอย่าง A18 A19 A20 มีค่าของกระแสที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน เนื่องด้วยเป็นกลุ่มที่เป็นเกลือซึ่งมีการแตกตัวเป็นไอออนได้ดี

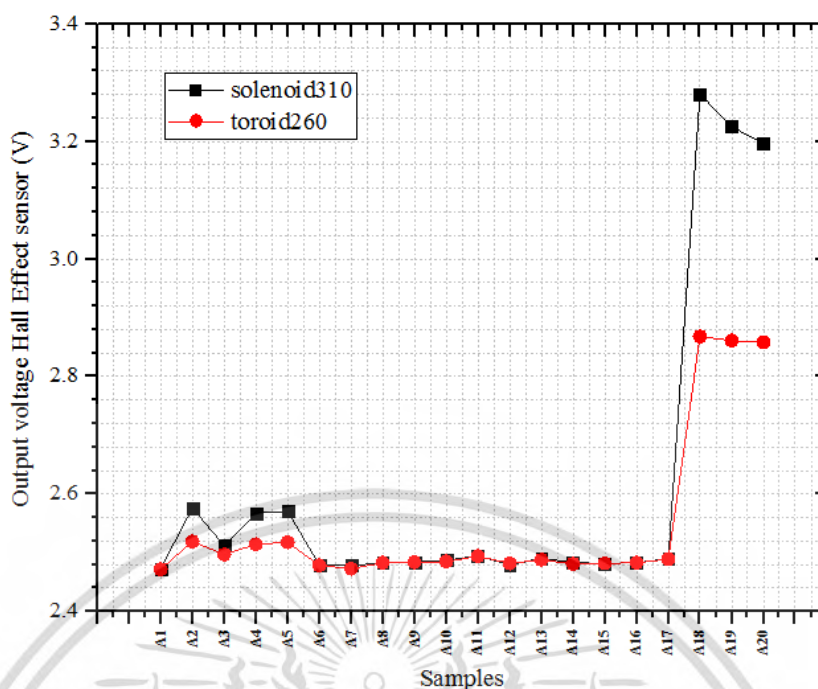
จากรูปที่ 4.5 ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าสนามแม่เหล็กจากการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆและจากวงจรสร้างสนามแม่เหล็กในหัวข้อวิธีการดำเนินงานวิจัยใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก รุ่น EXTECH AC/DC Magnetic Meter SDL900 นั้น สามารถอธิบายผลได้ดังนี้ สามารถสังเกตได้ว่าของเหลวตัวอย่าง A2 - A5 คือ Natural Water Drinking Water Tap Water Cha Green Tea ตามลำดับ โดยผลของการวัดค่าสนามแม่เหล็กจากของเหลว นั้น ให้ค่าของสนามแม่เหล็กที่สูงกว่าตัวอย่างของเหลวโดยรวมของทั้งหมด โดยเทียบสารละลายมาตรฐาน A1 คือ Deionized Water สารละลายตัวอย่าง A6 - A17 เป็นกลุ่มของของเหลวที่มีค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าน้อยที่สุดจากทั้งหมด เมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน A1 เนื่องจากเป็นกลุ่มของ

คาร์โบไฮเดรต และในกลุ่มต่อมาคือ ของเหลวตัวอย่าง A18 A19 A20 มีค่าของสนามแม่เหล็กที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน เนื่องด้วยเป็นกลุ่มที่เป็นเกลือ ซึ่งมีการแตกตัวเป็นไอออนได้ดี

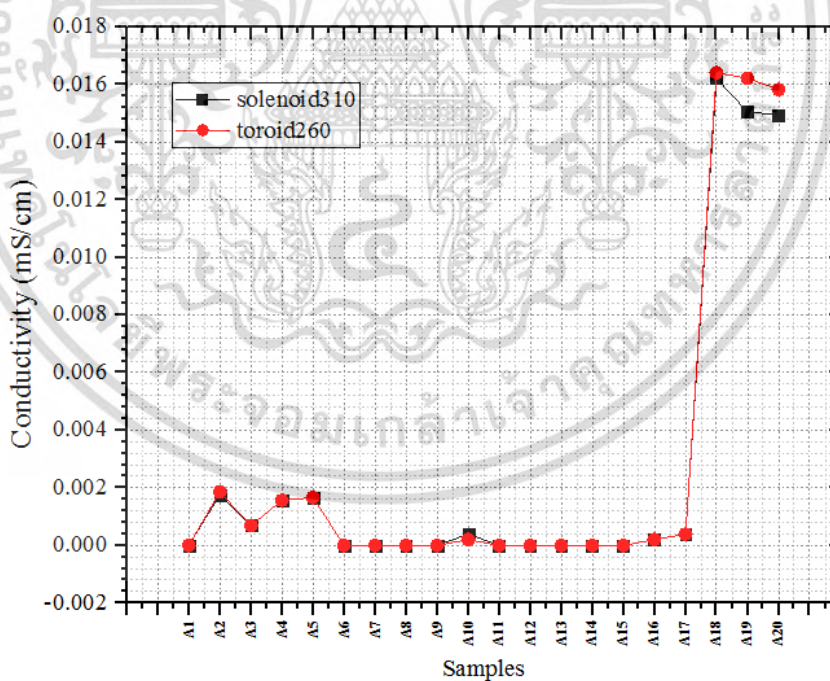


รูปที่ 4.5 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 89]

จากรูปที่ 4.6 ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์จากการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่าง ๆ และจากวงจรสร้างสนามแม่เหล็กในหัวข้อวิธีการดำเนินงานวิจัย และใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กรุ่น EXTECH AC/DC Magnetic Meter SDL900 นั้นสามารถอธิบายผลได้ดังนี้ สามารถสังเกตได้ว่าของเหลวตัวอย่าง A2 - A5 คือ Natural Water Drinking Water Tap Water Cha Green Tea ตามลำดับ โดยผลการทดลองของค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ให้ค่าที่สูงกว่าตัวอย่างของเหลวโดยรวมของทั้งหมด โดยเทียบสารละลายมาตรฐาน A1 คือ Deionized Water สารละลายตัวอย่าง A6 - A17 เป็นกลุ่มของของเหลวที่มีค่าของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์น้อยที่สุดจากทั้งหมด เมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน A1 เนื่องจากเป็นกลุ่มของคาร์โบไฮเดรต และในกลุ่มต่อมาคือ ของเหลวตัวอย่าง A18 A19 A20 มีค่าของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน เนื่องด้วยเป็นกลุ่มที่เป็นเกลือ ซึ่งมีการแตกตัวเป็นไอออนได้ดี



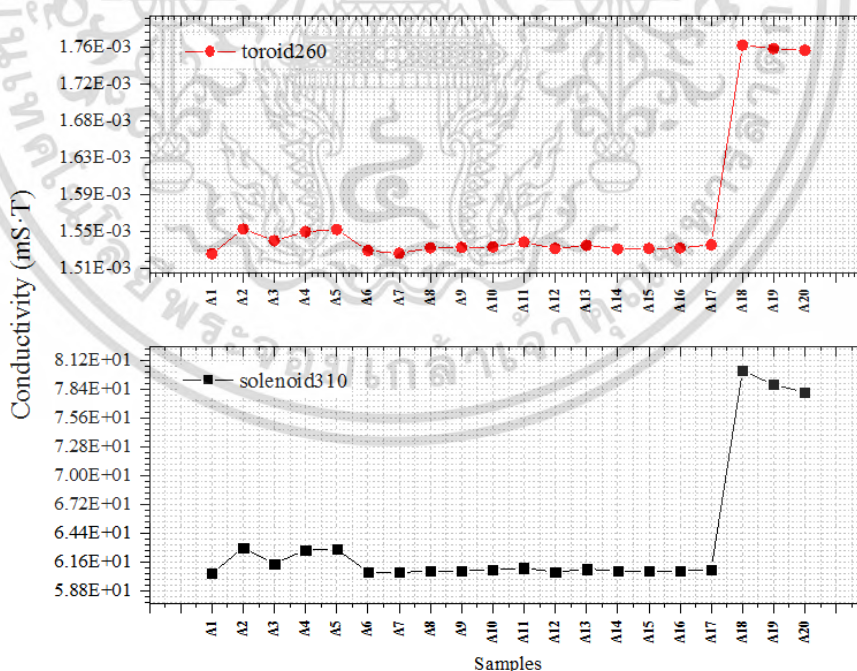
รูปที่ 4.6 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของค่าคงที่  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่  $24 \text{ mm}$  20 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 89]



รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่  $24 \text{ mm}$  20 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 90]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

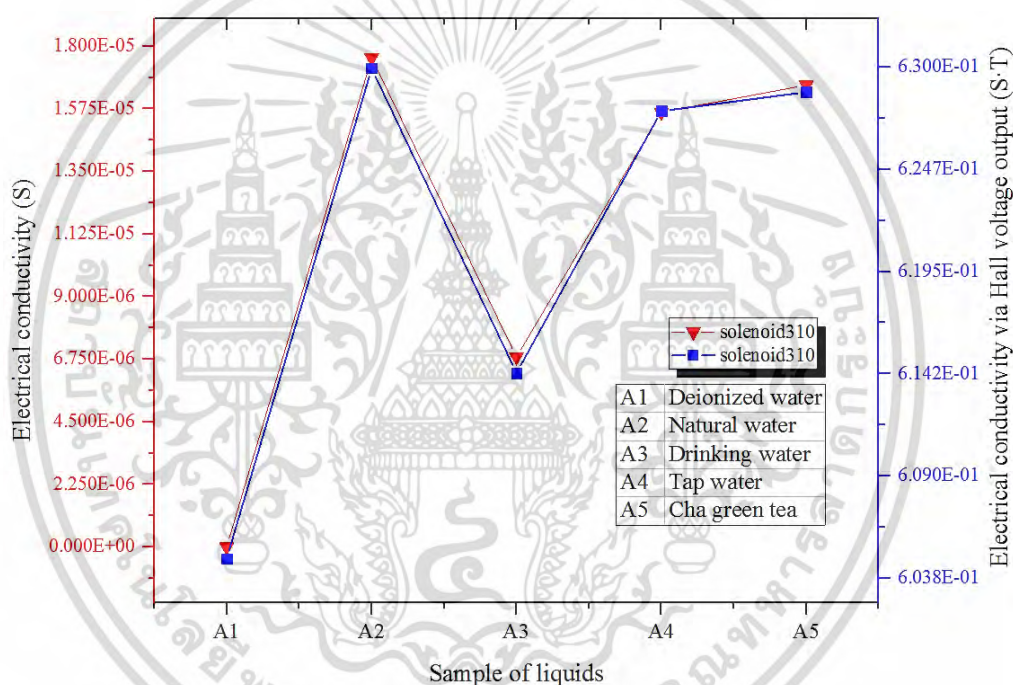
จากรูปที่ 4.7 ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์จากการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ และจากรความสัมพันธ์ของกฎของโอห์ม ในหัวข้อการตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้า โดยสามารถอธิบายได้ว่าค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวนั้น มีความสัมพันธ์กับค่าของกระแสโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ และในทานองเดียวกันนั้น จากรูปที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ได้ใช้ความสัมพันธ์จากกฎของโอห์มในหัวข้อการตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้า ได้รวมเข้ากับความสัมพันธ์กฎของแอมแปร์จากหัวข้อการประยุกต์กฎของแอมแปร์ของโซลินอยด์และทอลอยด์ และความสัมพันธ์ของความเฉพาะตัวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ A1301 ทำให้ในเบื้องต้นนี้สามารถที่จะพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าของสนามแม่เหล็กได้ โดยสามารถอธิบายได้ว่าค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวสามารถสังเกตว่าของเหลวตัวอย่าง A2 - A5 คือ Natural Water, Drinking Water, Tap Water และ Cha Green Tea ตามลำดับ โดยผลของการวัดค่าการนำไฟฟ้า ที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ให้ค่าที่สูงกว่าตัวอย่างของเหลวโดยรวมของทั้งหมด โดยเทียบสารละลายมาตรฐาน A1 คือ Deionized Water สารละลายตัวอย่าง A6 - A17 เป็นกลุ่มของของเหลวที่มีค่าของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์น้อยที่สุดจากทั้งหมดเมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน A1 ส่งผลให้ค่าความนำไฟฟ้าโดยตรง และอีกทั้งเนื่องจากเป็นกลุ่มของคาร์โบไฮเดรต ในทานองเดียวกันนั้นในกลุ่มต่อมาคือ ของเหลวตัวอย่าง A18 A19 A20 มีค่าของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับสารละลายมาตรฐาน ทำให้ในกลุ่มนี้ มีค่าความนำไฟฟ้าดีที่สุด และเนื่องด้วยเป็นกลุ่มที่เป็นเกลือ ซึ่งมีการแตกตัวเป็นไอออนได้ดี



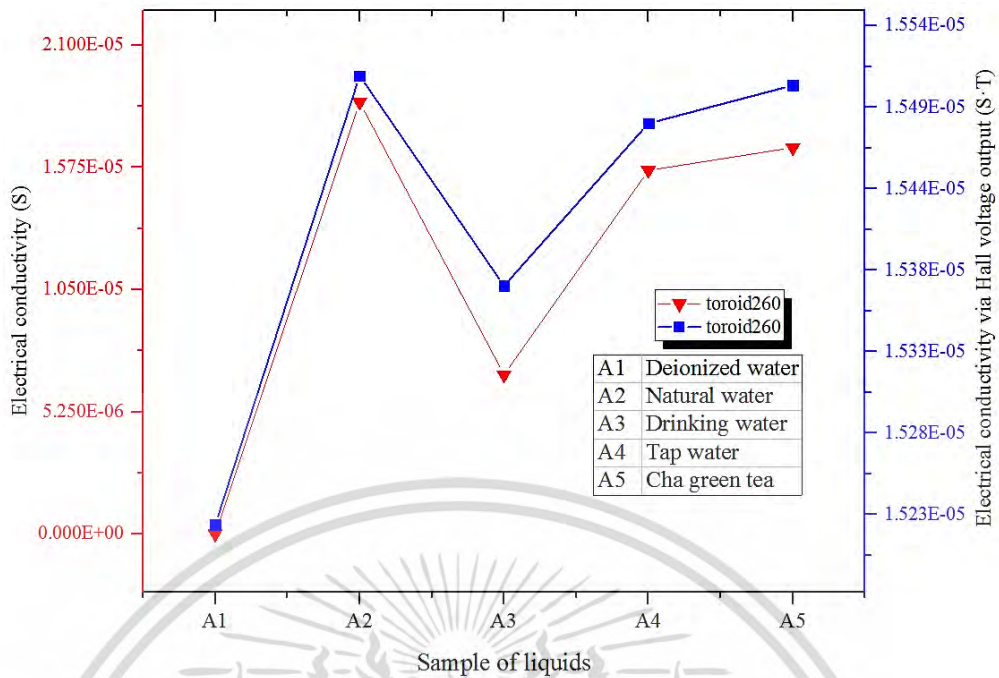
รูปที่ 4.8 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของค่าคงที่  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่  $24 \text{ mm}$  20 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 90]

แต่เนื่องด้วยค่าความนำไฟฟ้าทั้ง 2 กรณีไม่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ จากค่าความนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าของกระแส ค่าความนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและความเฉพาตัวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์นั้นอาจเกิดเนื่องจาก มุมของการวัดค่าของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของการติดตั้งมุมของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ มุมการวางระนาบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่ส่งผลโดยตรงกับค่าของกระแสที่ไหลผ่านของเหลวตัวอย่างและความแตกต่างของอุณหภูมิ ทั้งกรณีของอุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิของของเหลว ด้วยทั้งหมดนี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า ในการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวในกรณีของค่าคงที่เซลล์ไฟฟ้าเคมีเท่ากับ  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของเซลล์ไฟฟ้าเคมี 24 mm ของตัวอย่าง 20 ตัวอย่าง

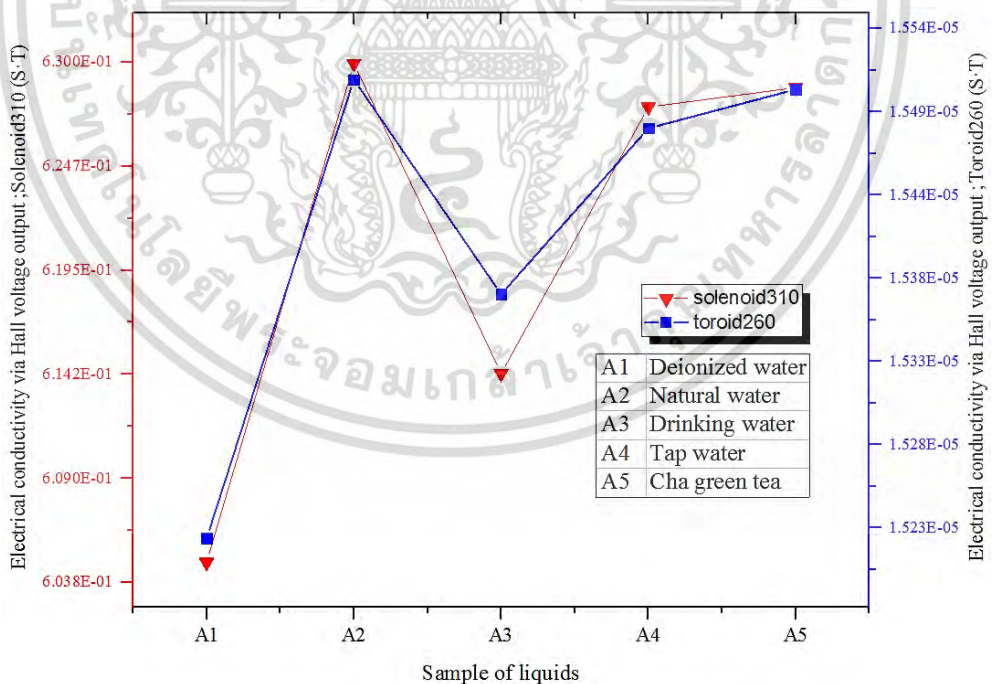
#### 4.2.2 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 24 mm 20 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นกลุ่ม



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าระหว่างการพิจารณากระแสและแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ของแกนโซลินอยด์ 310 [ภาคผนวก ก หน้า 90]



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าระหว่างการพิจารณากระแสและแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ของแกนทอลอยด์ 260 [ภาคผนวก ก หน้า 90]

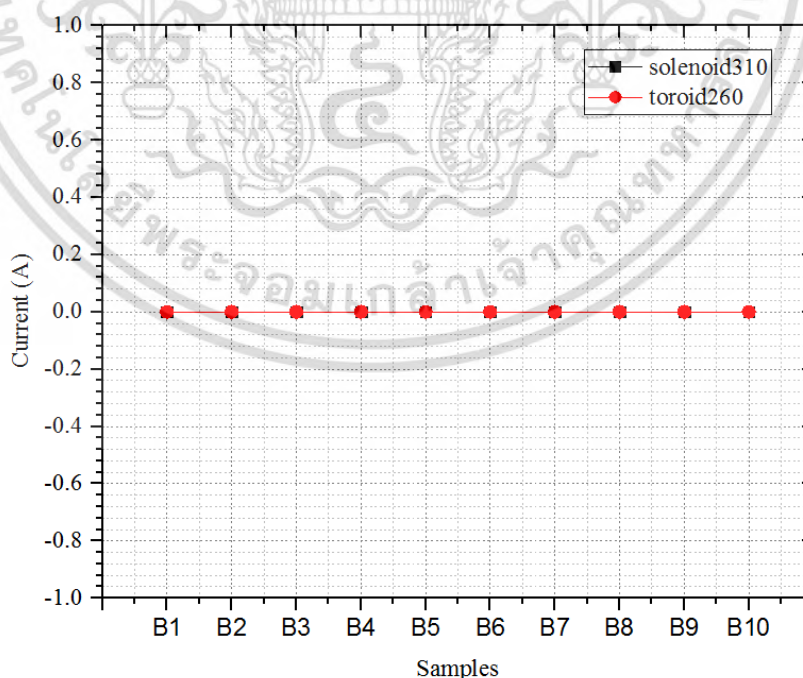


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ของแกนโซลินอยด์ 310 และแกนทอลอยด์ 260 [ภาคผนวก ก หน้า 90]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางผลการทดลองนั้นได้แสดงค่า กระแส สนามแม่เหล็ก แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ผลจากการคำนวณจากความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์คือ ค่าความนำไฟฟ้าที่ พิจารณาความสัมพันธ์กับค่ากระแส และค่าความนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ แต่ด้วยตัวอย่างของเหลวที่ไม่พิจารณาในเบื้องต้นนี้คือกลุ่ม 6 Salt solution เนื่องจากมีค่าความนำไฟฟ้าที่สูง และ กลุ่ม 1 (A5) Cha green tea ที่มีความแตกต่างของสีเพียง เล็กน้อยสามารถจำแนกได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งค่าความนำไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมีมีหน่วยเป็น ซีเมน (S) และค่าความนำไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมีที่มีความสัมพันธ์กับค่าของแรงดัน เอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์มีหน่วยเป็น ซีเมนเทสลา S·T จากรูปที่ 4.9 เป็นการอธิบายค่า ความนำไฟฟ้าจากการพิจารณากระแสไฟฟ้าที่อยู่บนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมีเทียบกับค่าความนำไฟฟ้าที่ พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของโซลินอยด์ 310 รอบเท่ากัน โดยจะ สังเกตได้ว่าผลการทดลองของทั้ง 2 รูปแบบนั้นไปในทิศทางเดียวกัน จากรูปที่ 4.10 พบว่าทอลอยด์ 260 ก็ให้ผลการทดลองในทิศทางเดียวกัน เช่นกัน และรูปที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบค่าความนำ ไฟฟ้าที่พิจารณาแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ระหว่างโซลินอยด์ 310 และ ทอลอยด์ 260 สามารถสรุปได้ว่า ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว ได้ ส่งผลให้สามารถจำแนกคุณลักษณะของของเหลวได้ เป็นต้น

#### 4.2.3 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ $34 \text{ mm}$ 10 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น



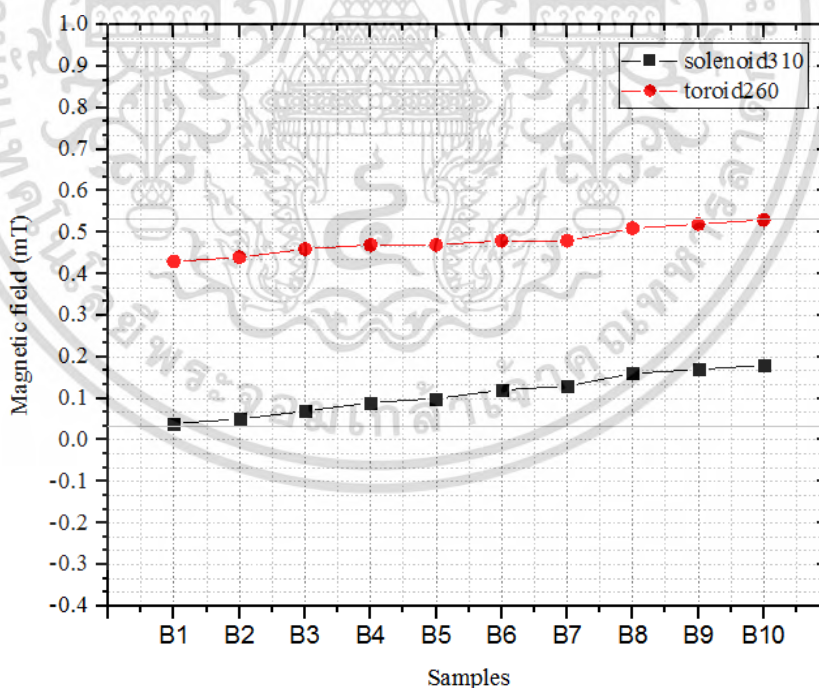
รูปที่ 4.12 ค่าความกระแสของค่าคงที่  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่  $34 \text{ mm}$  10 อย่าง

[ภาคผนวก ก หน้า 92]

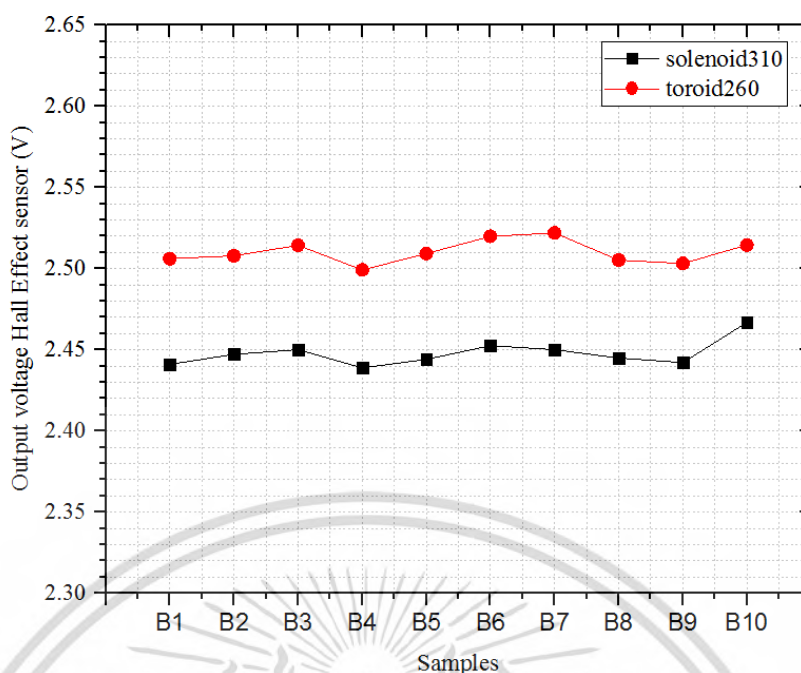
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 การวัดและทดสอบการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ ของรูปแบบ A คือ โซลินอยด์ 310 และ รูปแบบ B คือ ทอลอยด์ 260 สามารถสังเกตได้ว่าของเหลวตัวอย่าง B1 - B10 คือ น้ำผึ้งธรรมชาติและเป็นน้ำผึ้งที่หาซื้อได้โดยทั่วไปตามท้องตลาด และหนึ่งในน้ำผึ้งธรรมชาติ มีน้ำผึ้งที่นำเข้ามาจากประเทศเยอรมัน (Germany) โดยผลของการวัดค่ากระแสจากน้ำผึ้งธรรมชาตินั้นสามารถอธิบายได้ว่า ค่ากระแสของน้ำผึ้งธรรมชาติที่วัดด้วยเครื่องวัดกระแสแบบมาตรฐานทั่วไปนั้น มีความละเอียดไม่พอสำหรับการจำแนกในลักษณะของการวัดกระแส แต่มีนัยสำคัญว่า น้ำผึ้งที่นำมาทดสอบนั้นเป็นน้ำผึ้งธรรมชาติและมีค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำมาก ตามคุณสมบัติของน้ำผึ้งตามมาตรฐานสินค้า มกษ 8003-2556 “น้ำผึ้ง” สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [27] เนื่องจากเป็นกลุ่มของคาร์โบไฮเดรต

จากรูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของการพันขดลวดที่ต่างกันนั้น เพื่อทดสอบเงื่อนไขของความยาวที่เท่ากัน 10 เมตร โดยมีอีกหนึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญมาก คือ ชนิดของวัสดุที่เลือกมาใช้ในการวัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำผึ้งธรรมชาติ โดยรูปแบบ A คือ โซลินอยด์ 310 เป็นวัสดุชนิด Ferrite และ รูปแบบ B คือ ทอลอยด์ 260 เป็นวัสดุชนิด Toroidal Iron Powder Cores (T131-26) ใช้เครื่องวัดสนามแม่เหล็กรุ่น EXTECH AC/DC Magnetic Meter SDL900 ที่ความลึกของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ 34 mm ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ความลึก 24 mm ส่งผลให้พื้นที่ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถรู้ช่วงของสนามแม่เหล็กของน้ำผึ้งธรรมชาติได้คือ ประมาณ 0.5-5.5 mT ที่ค่าคงที่ของเซลล์ไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ด้วยเหตุผลที่ว่า ชนิดของแกนแม่เหล็ก ความถี่สูงและตำแหน่งการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

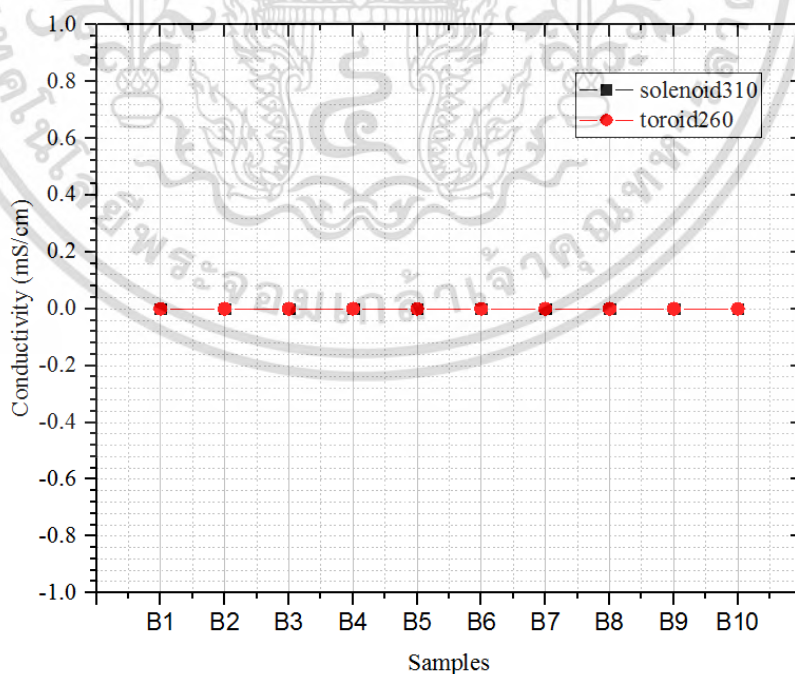


รูปที่ 4.13 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ 34 mm 10 อย่าง  
[ภาคผนวก ก หน้า 92]



รูปที่ 4.14 ค่าแรงดันไฟฟ้าแฮดฟุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของค่าคงที่  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ 34 mm 10 อย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 92]

จากรูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของจำนวนรอบของการพันขดลวดที่ต่างกันนั้นเพื่อทดสอบเงื่อนไขของความยาวที่เท่ากันของขดลวดที่ 10 เมตร และจากผลของการวัดค่าสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ว่า ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถตรวจวัดได้เป็นปกติ จึงให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าแฮดฟุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ทอลอยด์ 260 อยู่ในระดับที่สูงกว่า โซลินอยด์ 310 ในทวนเดียวกันกับค่าของสนามแม่เหล็ก

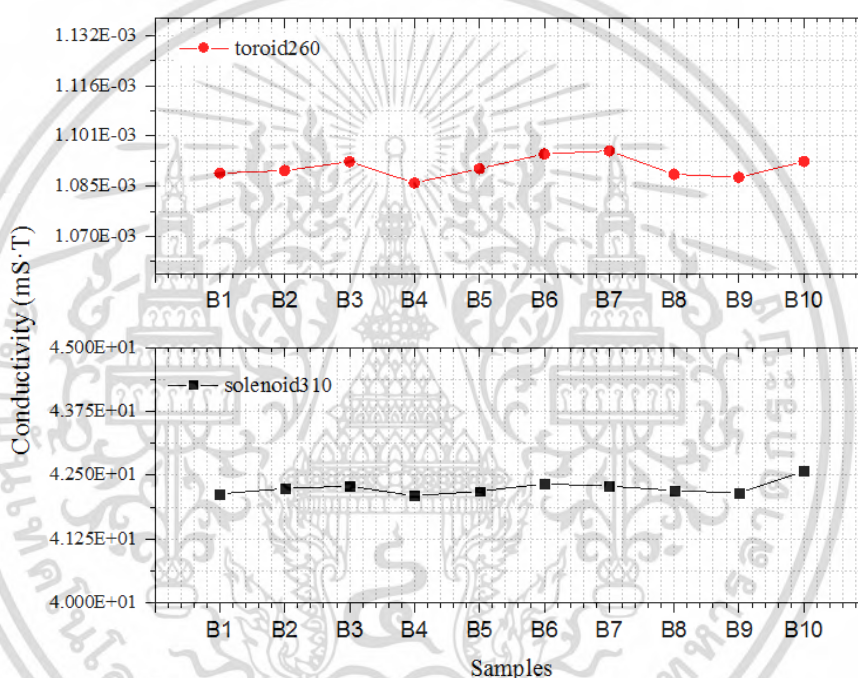


รูปที่ 4.15 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ 34 mm 10 อย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 92]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าของของเหลวที่อยู่บนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมี สำหรับการวัดตัวอย่างน้ำฝิ่งธรรมชาติ 10 ชนิด (B1 – B10) โดยในกลุ่มน้ำฝิ่งธรรมชาตินั้น เป็นกลุ่มที่มีการไหลผ่านของกระแสที่ต่ำมากๆ สำหรับการวัดค่ากระแสที่สัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวนั้น ไม่สามารถหาแนวคุณลักษณะของน้ำฝิ่งออกจากกันได้

จากรูปที่ 4.16 สามารถอธิบายค่าความนำไฟฟ้าของน้ำฝิ่งธรรมชาติ ถ้าพิจารณาค่าการนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ได้ใช้ความสัมพันธ์จากกฎของโอห์ม ในหัวข้อการตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้รวมเข้ากับความสัมพันธ์ของแอมแปร์จากหัวข้อการประยุกต์กฎของแอมแปร์ของโซลินอยด์และทอลอยด์ และความสัมพันธ์ของความเฉาะตัวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ A1301 ทำให้ในเบื้องต้นนี้สามารถที่จะพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าของสนามแม่เหล็กได้



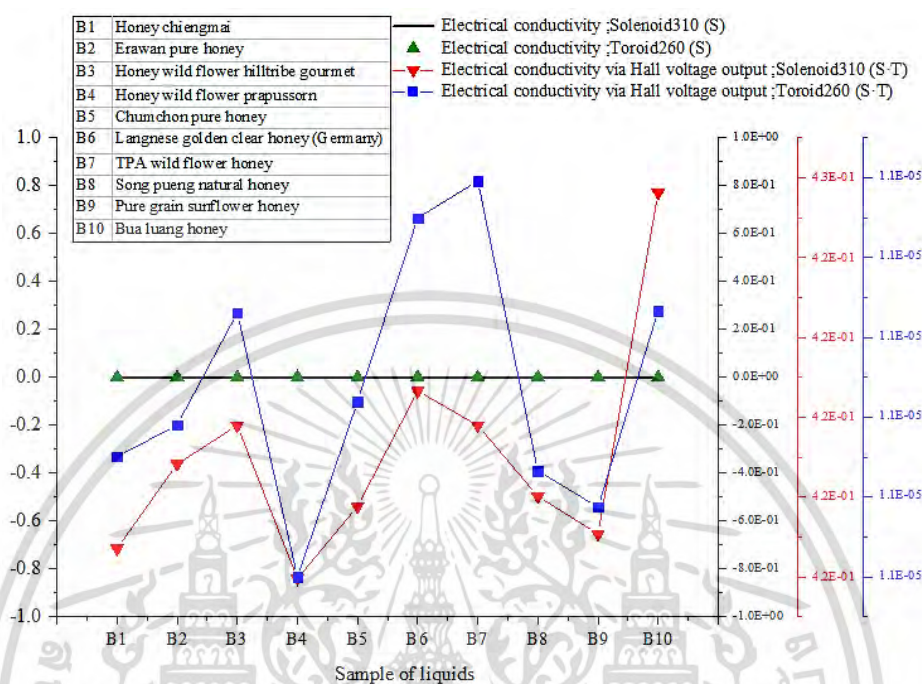
รูปที่ 4.16 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

ของค่าคงที่  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่  $34 \text{ mm}$  10 อย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 92]

จากความสัมพันธ์ของค่าความนำไฟฟ้าที่สามารถหาแนวคุณลักษณะของเหลวออกจากกันได้ นั้น ทาการขยายผลการทดลองตามสมมติฐานต่อมาคือ สามารถหาแนวน้ำฝิ่งธรรมชาติ น้ำฝิ่งเทียมได้ ได้เริ่มการทดลองจากกลุ่มตัวอย่างน้ำฝิ่งธรรมชาติที่ผ่านมาตรฐานการค่าน้ำฝิ่งที่สามารถหาซื้อได้ โดยทั่วไปนั้นทั้งหมด 10 ตัวอย่าง จากตารางผลการทดลองค่าความนำไฟฟ้าในส่วนที่พิจารณา กระแสไฟฟ้านั้นไม่สามารถคาดคะเนคุณลักษณะของน้ำฝิ่งทั้ง 10 ชนิดได้จากค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ  $34 \text{ มิลลิเมตร}$  จึงทาการเปรียบเทียบสัญญาณจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อทดสอบการหาแนวน้ำฝิ่งธรรมชาติและน้ำฝิ่งเทียมได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการทดลองการวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.11029 \text{ cm}^{-1}$ ที่ 34 mm 10 ตัวอย่าง สำหรับการทดลองความเป็นกลุ่ม



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าของน้ำผึ้งธรรมชาติทั้ง 10 ชนิด  
[ภาคผนวก ก หน้า 92]

จากรูปที่ 4.17 เป็นการอธิบายการคาดคะเนค่าความนำไฟฟ้าของน้ำผึ้งธรรมชาติจากการสังเกตรูปแบบของค่าความนำไฟฟ้าแบบพิจารณากระแสแบบพื้นฐานไม่สามารถคาดคะเนได้แต่จากการวัดค่าความนำไฟฟ้าที่ใช้ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์นั้นสามารถคาดคะเนได้อย่างมีนัยสำคัญ และจากตารางผลการทดลองการวัดค่าความนำของน้ำผึ้งธรรมชาติ น้ำผึ้งเทียม และของเหลวที่ต่างชนิดกันจากตัวอย่างในกลุ่ม A (A1 - A20) และ กลุ่ม B (B1 - B10) นั้นสามารถขยายผลการทดลองและได้ตั้งสมมติฐานว่า ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติและน้ำผึ้งเทียมได้จากการทดลองในกลุ่มตัวอย่าง C

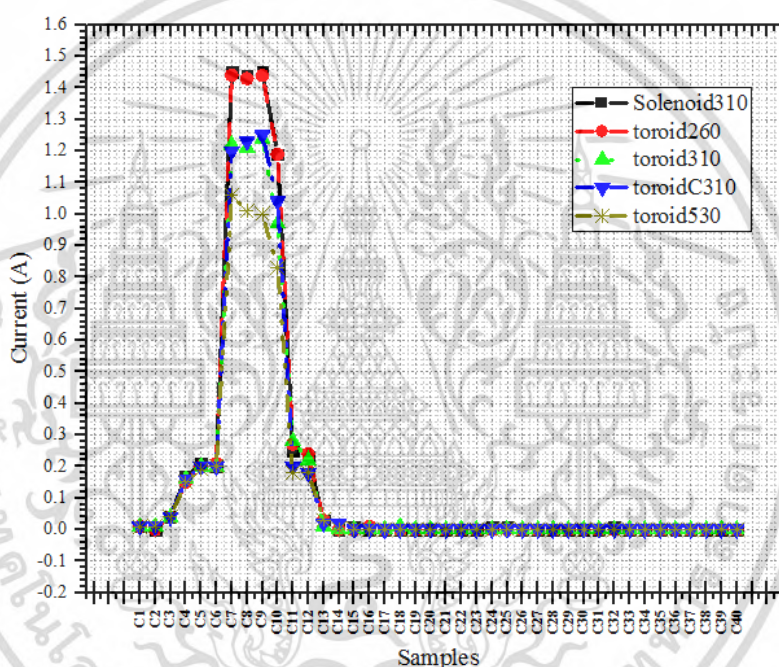
จากการทดสอบสมมติฐานเบื้องต้นสามารถทราบถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ พื้นที่ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีผลโดยตรงต่อความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทานองเดียวกันนั้นมีผลโดยตรงกับแรงดันเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์และเพื่อทดสอบการใช้ตัวอย่างของเหลวที่เหมาะสมกับการใช้งานจึงได้จัดเตรียมขวดสำหรับการทดลองที่พอดี โดยการทดลองแบ่งกลุ่มตัวอย่าง C ออกเป็น 7 ตัวอย่างตามรูปภาพที่ 4.1 และเพื่อวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าจากการเปรียบเทียบสัญญาณจากแกนแม่เหล็กความถี่สูงซึ่งใช้ทั้งหมด 5 รูปแบบ คือ โซลินอยด์ 310 ทอลอยด์ 260 ทอลอยด์ 310 ทอลอยด์ C 310 ทอลอยด์ 530 โดยแสดงค่าความนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับคณิตศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อพิจารณาค่าลักษณะของของเหลว

#### 4.3.1 การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่างสำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น

จากการศึกษาจากเงื่อนไขก่อนหน้านี้ คือ การวัดค่าความหนาไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขสำหรับทดสอบ จุดประสงค์การตรวจวัดค่าความหนาไฟฟ้าของของเหลวเพื่อคาดคะเน น้ำผึ้งธรรมชาติ น้ำผึ้งเจีปน น้ำผึ้งผสม น้ำผึ้งเทียม ในการทดสอบนี้เพิ่มเงื่อนไขเพื่อหาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี เพิ่มเป็น 40 mm และการทดสอบได้ลดการใช้ปริมาณตัวอย่างในส่วนของของเหลวตัวอย่างเป็น 17 mL ในภาชนะที่เหมาะสม

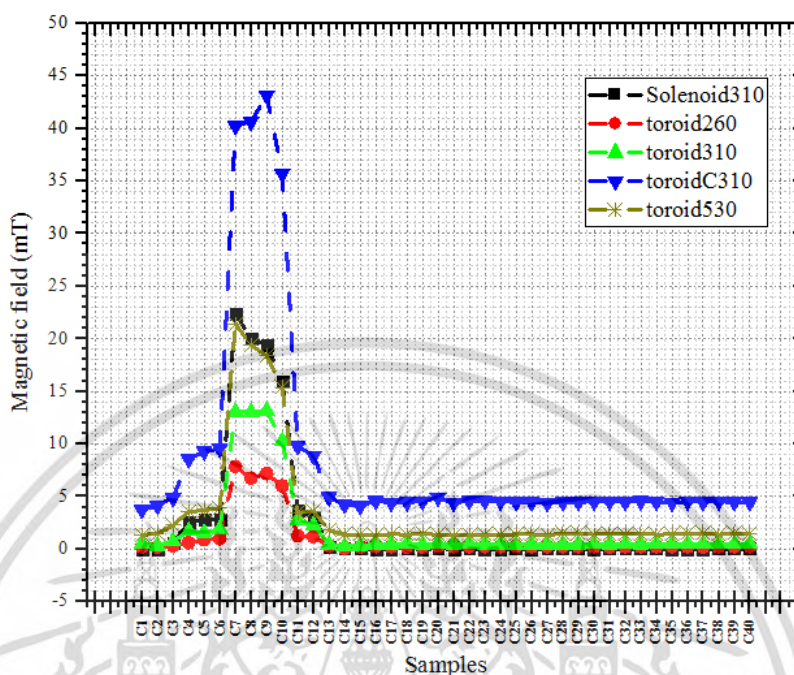


รูปที่ 4.18 ค่าความกระแสของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 96]

จากรูปที่ 4.18 การทดสอบคุณภาพของของเหลวที่ต่างชนิดกันด้วยวิธีการคาดคะเน จากการวัดค่าความหนาไฟฟ้าของของเหลวจากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ตามตารางที่ 4.3 ที่ค่าคงที่เซลล์ไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  โดยทำการทดสอบทั้ง 5 รูปแบบ คือ โซลินอยด์ 310 ทอลอยด์ 260 ทอลอยด์ 310 ทอลอยด์ C 310 และ ทอลอยด์ 530 ซึ่งจากรูปที่ 4.3 ได้แสดงค่าความต้านทาน ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวของหลอดทองแดงและรูปทรงของแต่ละรูปแบบ ททำให้ส่งผลโดยตรงอย่างมีนัยสำคัญกับการวัดกระแสจากรูปที่ 4.18 นั้น ในกลุ่มของตัวอย่างที่ C7 - C10 มีความสอดคล้องกันโดยตรง คือ หากความต้านทานลดลง กระแสจะเพิ่มขึ้น ซึ่งในกลุ่มของ C7 - C10 เป็นกลุ่มของน้ำเกลือที่มีการแตกตัวเป็นไอออน สามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่ในทางตรงกันข้าม การวัดค่ากระแสไฟฟ้าในกลุ่มของ C11 - C13 คือ กลุ่มของน้ำเชื่อม C14 - C17 คือ น้ำผึ้งผสม และน้ำผึ้งเจีปน C18 - C40 คือ น้ำผึ้งธรรมชาติ ค่าของวัดของกระแสไฟฟ้า ไม่สามารถวัดได้อย่างชัดเจนในกลุ่มของสารประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

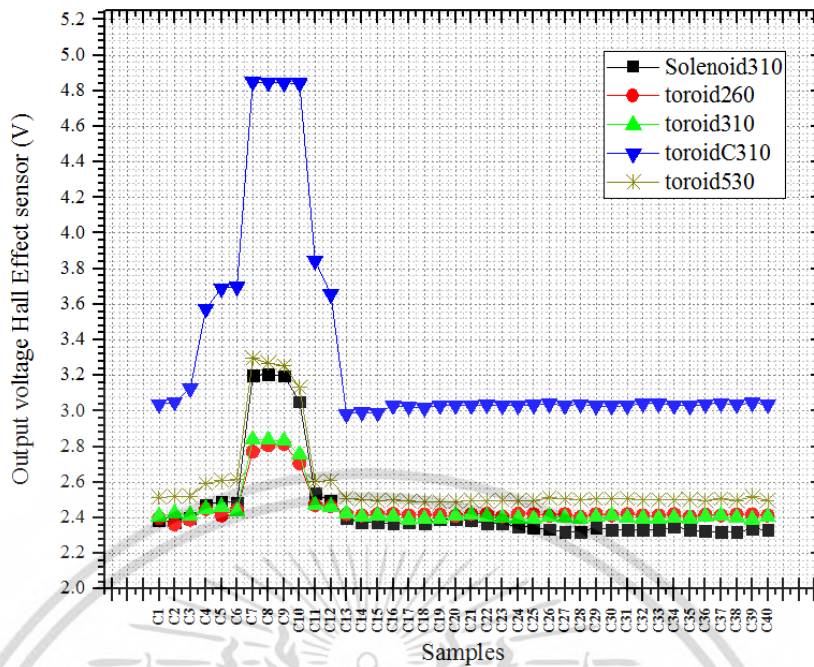
คาร์โบไฮเดรต แต่กลับจาแนกของเหลวได้ดีในกลุ่มที่มีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกันและมีการแตกตัวได้ดีคือ C2 - C10



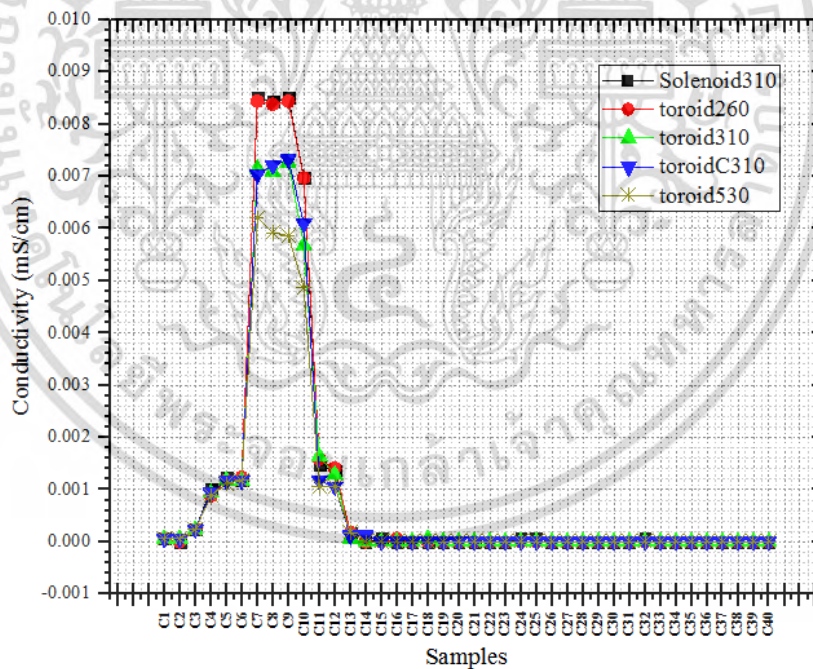
รูปที่ 4.19 ค่าสนามแม่เหล็กของคาคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 93]

จากรูปที่ 4.19 ได้แสดงค่าของสนามแม่เหล็กของกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 40 ตัวอย่าง จากการวัดค่าความหนาไฟฟ้าเพื่อตรวจสอบคุณลักษณะของของเหลว โดยพิจารณาระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดทั้ง 5 รูปแบบ สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ ในการทดสอบ มีจุดประสงค์เพื่อ พยายามจะนำเอาสนามแม่เหล็กมาคาดคะเนความธรรมชาติและไม่ธรรมชาติของน้ำผึ้งจากพื้นฐานของการวัดค่าความหนาไฟฟ้า โดยในกลุ่มของ C2 - C6 เป็นกลุ่มของของเหลวใส ที่สามารถแยกทางกายภาพได้เพราะมีลักษณะใสไม่มีสีเหมือนกัน แต่สนามแม่เหล็กนี้ สามารถที่จะบอกถึงความแตกต่างกันได้ในตัวอย่าง C2 - C3 เป็นน้ำ กลั่นและน้ำ ดื่มสะอาด คือ มีการปนเปื้อนของโมเลกุลผสมอยู่ในน้ำ น้อยกว่าในตัวอย่าง C4 - C6 คือ น้ำ แร่ น้ำประปาและน้ำ ชาเขียวดังแสดงในภาพที่ 4.19

จากรูปที่ 4.20 นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าของสนามแม่เหล็ก ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของ  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง ซึ่งระดับค่าที่สูงที่สุดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และสามารถจาแนกตัวอย่างของเหลวได้ดี คือ จากรูปแบบของทอลอยด์ C 310 และเมื่อพิจารณาตัวแปรทั้งหมดจากสมการที่ 4.1 ทั้งค่าความเฉพาตัวของวัสดุ จานวนรอบของการพันขดลวด และรูปทรงของแต่ละรูปแบบนั้น ส่งผลให้ค่าความหนาที่มีความสัมพันธ์กับค่าของสนามแม่เหล็ก



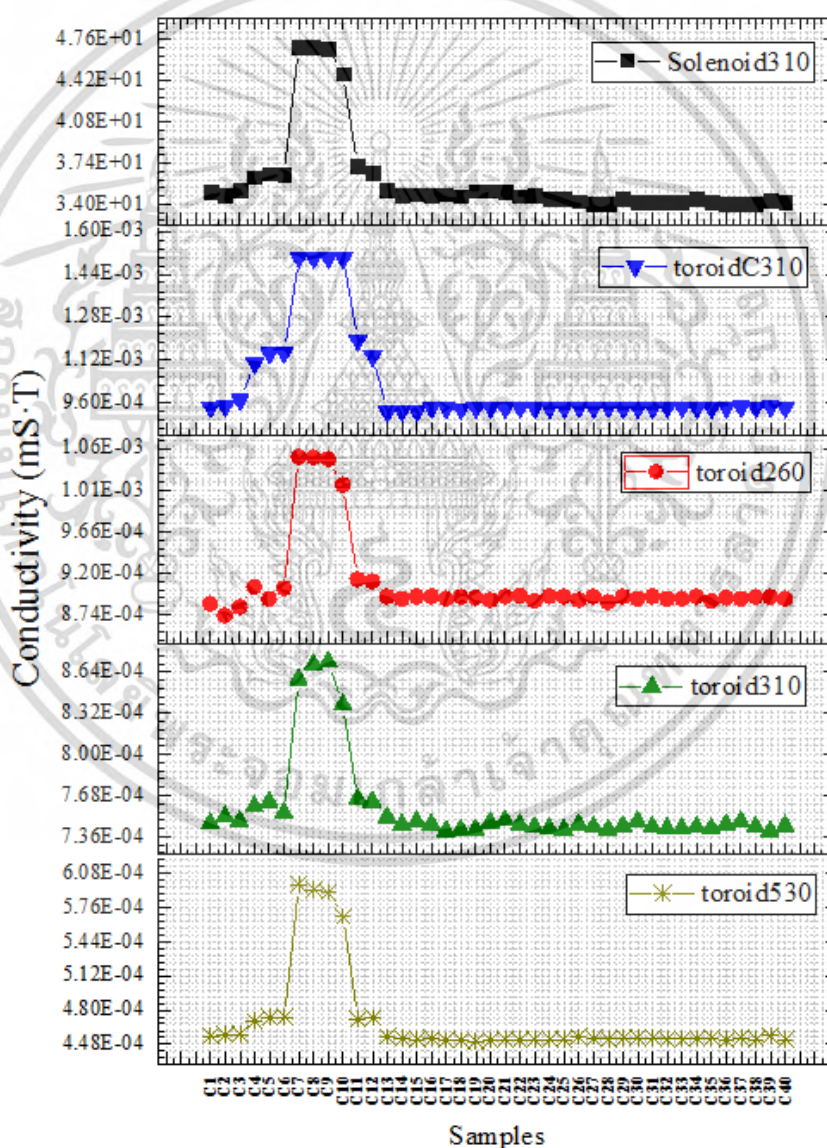
รูปที่ 4.20 ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของ  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 98]



รูปที่ 4.21 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 100]

จากรูปที่ 4.21 ได้แสดงความสัมพันธ์ของค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์จากการวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวชนิดต่างๆ และจากความสัมพันธ์ของกฎของโอห์ม ในหัวข้อการตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้า ด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้า โดยสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปเผยแพร่ในสื่อใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายได้ว่า ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวนั้นที่อยู่บนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมี มีความสัมพันธ์กับค่าของกระแสโดยตรง อย่างมีนัยสำคัญ และในทานองเดียวกันนั้น จากรูปที่ 4.22 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ ได้ใช้ความสัมพันธ์จากกฎของโอห์ม ในหัวข้อการตรวจวัดสัญญาณทางไฟฟ้าด้วยหลักการทางสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้รวมเข้ากับความสัมพันธ์จากกฎของแอมแปร์ จากหัวข้อการประยุกต์กฎของแอมแปร์ของโซลินอยด์และทอลอยด์ และความสัมพันธ์ของความเฉพาะตัวของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ A1301 ทำให้ในเบื้องต้นนี้ สามารถที่จะพิจารณาค่าความนำไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าของสนามแม่เหล็กได้ โดยในรูปที่ 4.22 เป็นการแสดงให้เห็นช่วงในการวัดของทั้ง 5 รูปแบบ ของค่าความนำไฟฟ้าที่นำเอาค่าสนามแม่เหล็กมาพิจารณาตามลำดับช่วงการจัดจากมากไปน้อยตามลำดับคือ โซลินอยด์ 310 ทอลอยด์ C 310 ทอลอยด์ 260 ทอลอยด์ 310 และทอลอยด์ 530



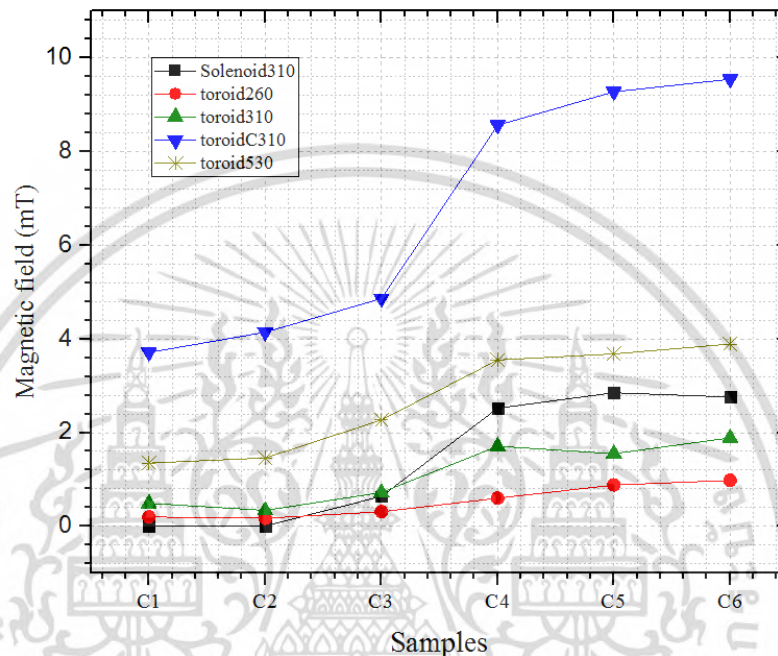
รูปที่ 4.22 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่าง [ภาคผนวก ก หน้า 103]

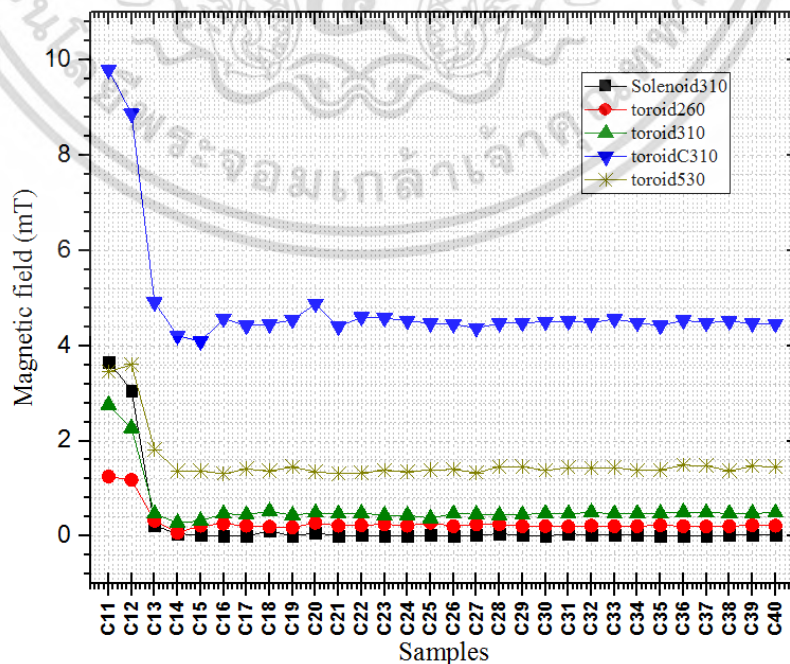
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารนี้ ไม่มีการรับประกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่างสำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้นพิจารณา C1 – C6

เมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแกนทั้ง 5 รูปแบบ คือ โซลินอยด์ 310 ทอลอยด์ 260 ทอลอยด์ 310 ทอลอยด์ C 310 และ ทอลอยด์ 530 แกนโซลินอยด์ 310 ในช่วงที่มีค่าสนามแม่เหล็กน้อย มีแนวโน้มไม่สามารถวัดค่าได้แต่ในช่วงที่มีค่าสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้นสามารถพิจารณาการวัดค่าได้



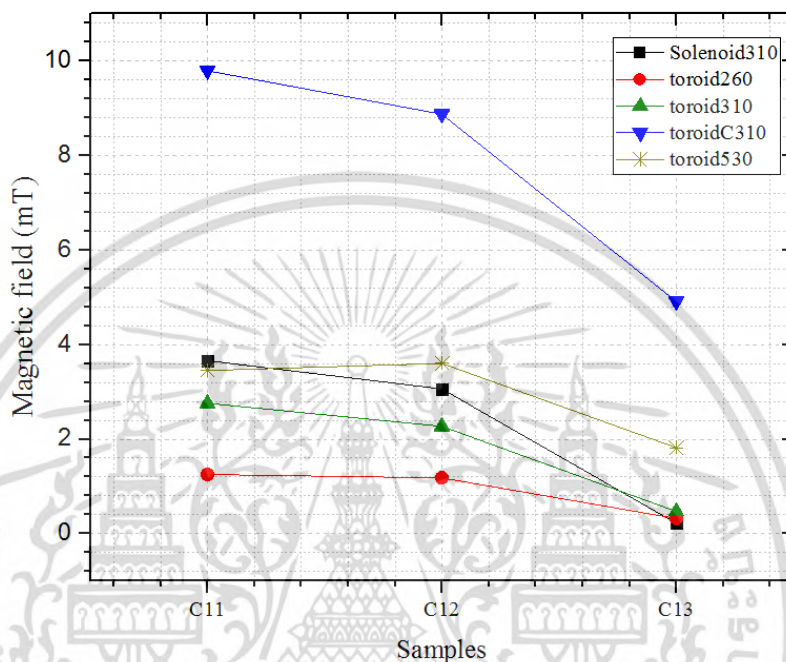
รูปที่ 4.23 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C1 - C6 [ภาคผนวก ก หน้า 93]



รูปที่ 4.24 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 เอกสารนี้เผยแพร่เพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ผู้ใช้ควรพิจารณาข้อมูลที่เกี่ยวข้องอย่างรอบคอบ ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

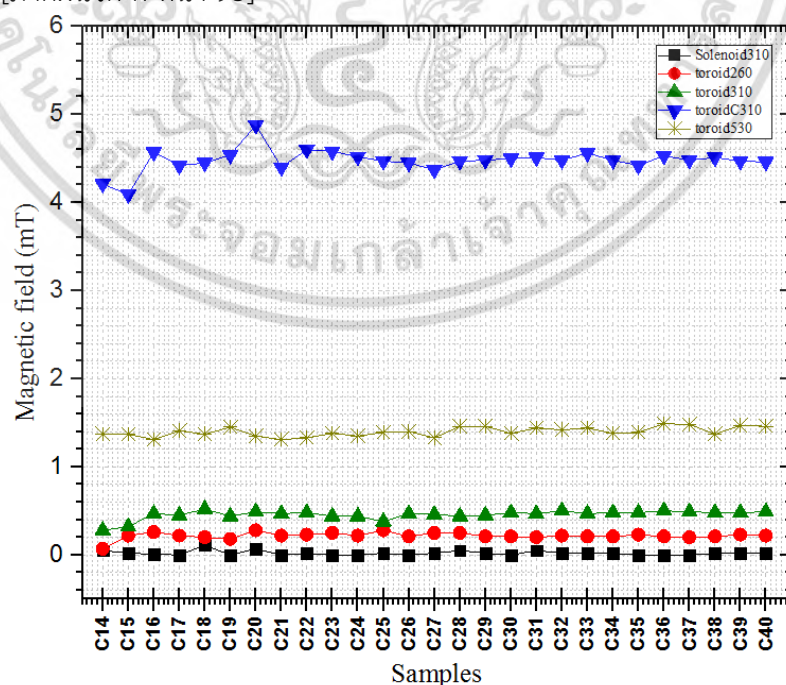
[ภาคผนวก ก หน้า 93]

จากจุดประสงค์การวัดค่าความหนาไฟฟ้าของของเหลวเพื่อตรวจสอบความธรรมดาติ ไม่ธรรมดาติของน้ำผึ้งนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 อธิบายได้ว่ากลุ่มของเหลวตัวอย่าง C11 - C40 โดยกลุ่มตัวอย่าง C11 - C13 คือ น้ำเชื่อม C14 - C17 คือ น้ำผึ้งผสม และน้ำผึ้งเจือปน C18 - 20 คือ น้ำผึ้งปลอม C21 - C40 เป็นน้ำผึ้งธรรมดาติ ซึ่งได้แสดงในรูปที่ 4.21 - 4.22 โดยสามารถสังเกตได้ว่า ทอลอยด์ C 310 สามารถจ าแนกได้ดีและให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่สูงในกลุ่ม C11 - C13



รูปที่ 4.25 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C13

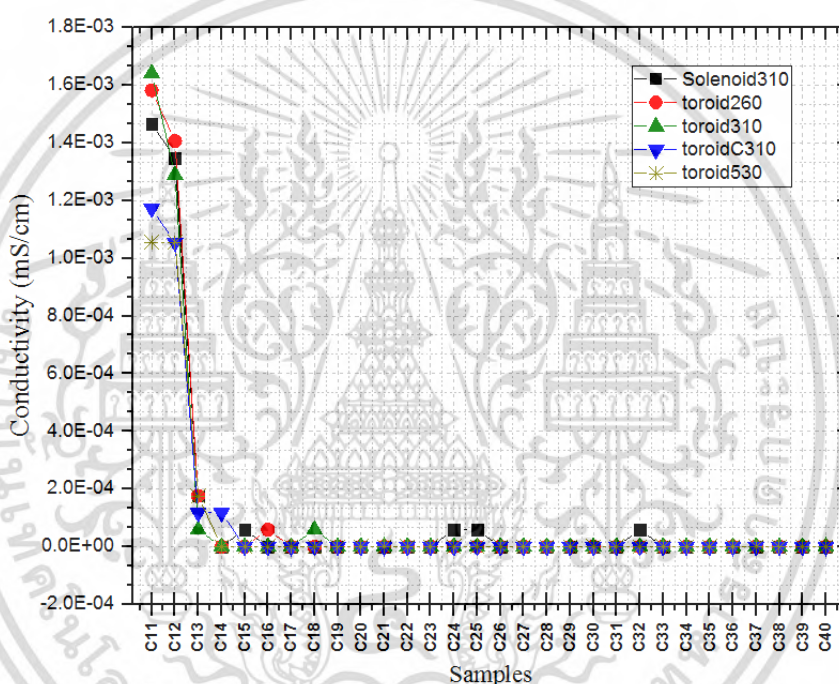
[ภาคผนวก ก หน้า 93]



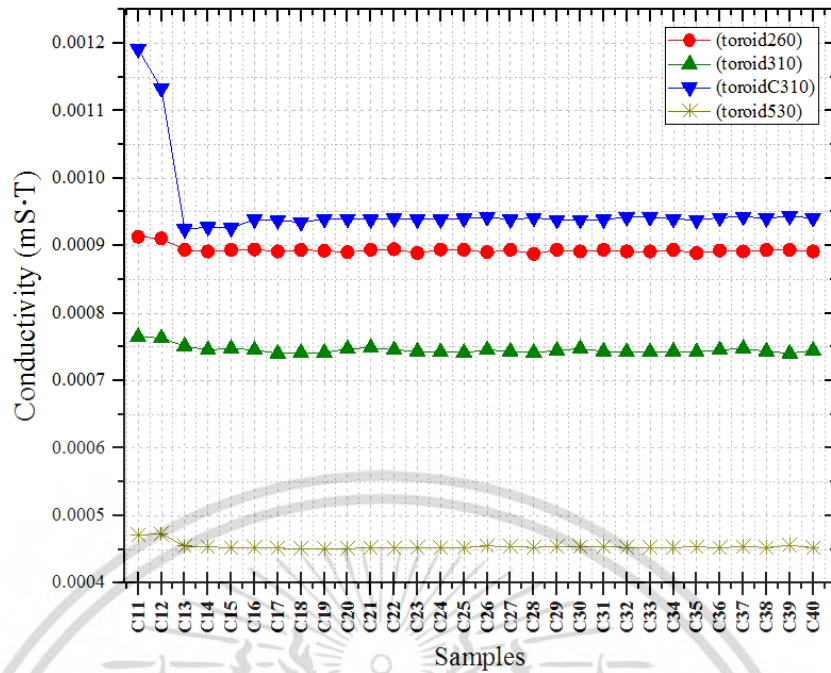
รูปที่ 4.26 ค่าสนามแม่เหล็กของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C14 - C40 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[ภาคผนวก ก หน้า 93]

พิจารณาค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับพื้นฐานไฟฟ้าเคมีของค่ากระแสไฟฟ้าของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 จากรูปที่ 4.23 และจากรูปที่ 4.28 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 ของรูปแบบทอลอยด์ 4 รูปแบบสามารถสังเกตได้ว่า ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษานั้น การวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวต่างชนิดกันได้ แสดงให้เห็นว่า ฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทางการเคมีวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะและปริมาณของของเหลวได้ ยิ่งไปกว่านั้น สามารถที่จะคาดคะเนหรือจำแนกองค์ประกอบของของเหลวชนิดต่างๆ ได้จากรูปค่าความนำไฟฟ้าจากการพิจารณาของแต่ละรูปแบบการวัดตามรูปที่ 4.29 ถึง รูปที่ 4.33



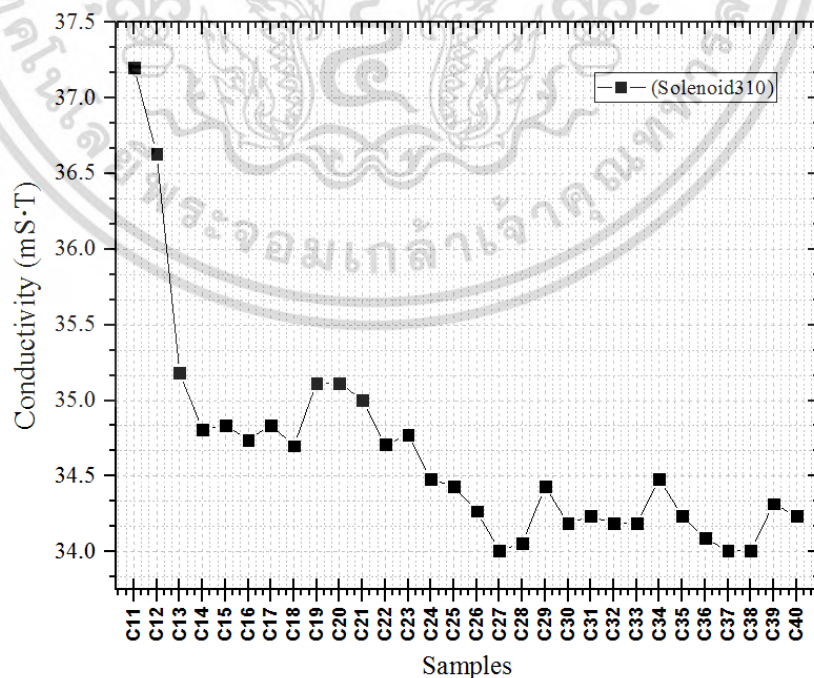
รูปที่ 4.27 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าของกระแสของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 [ภาคผนวก ก หน้า 100]



รูปที่ 4.28 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์

ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 ของแบบทอลอยด์ 4 รูปแบบ [ภาคผนวก ก หน้า 103]

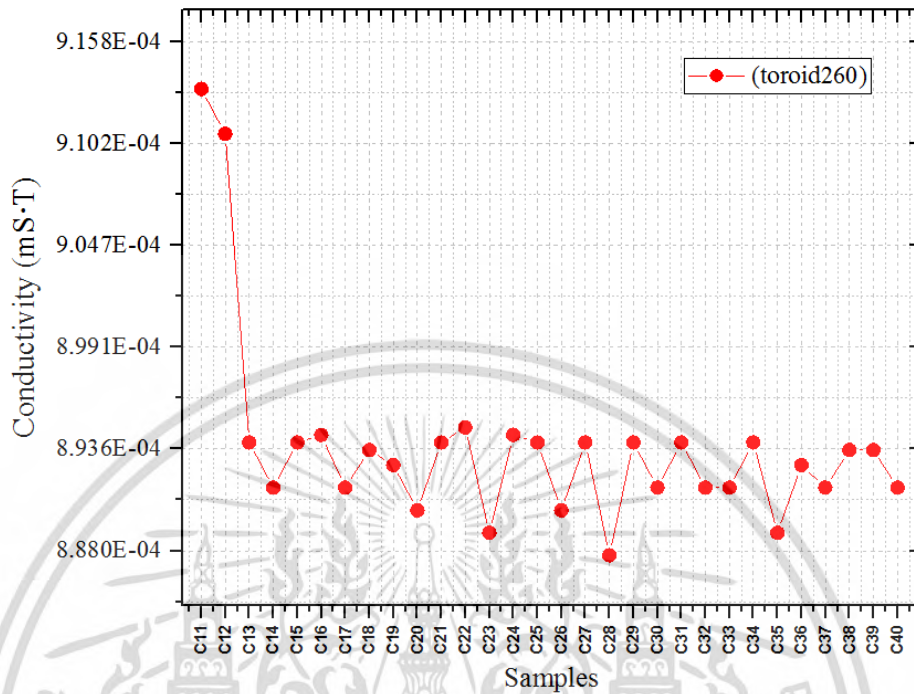
#### 4.3.3 การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่างสำหรับการทดลองความเป็นเชิงเส้น พิจารณาแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 4.29 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์

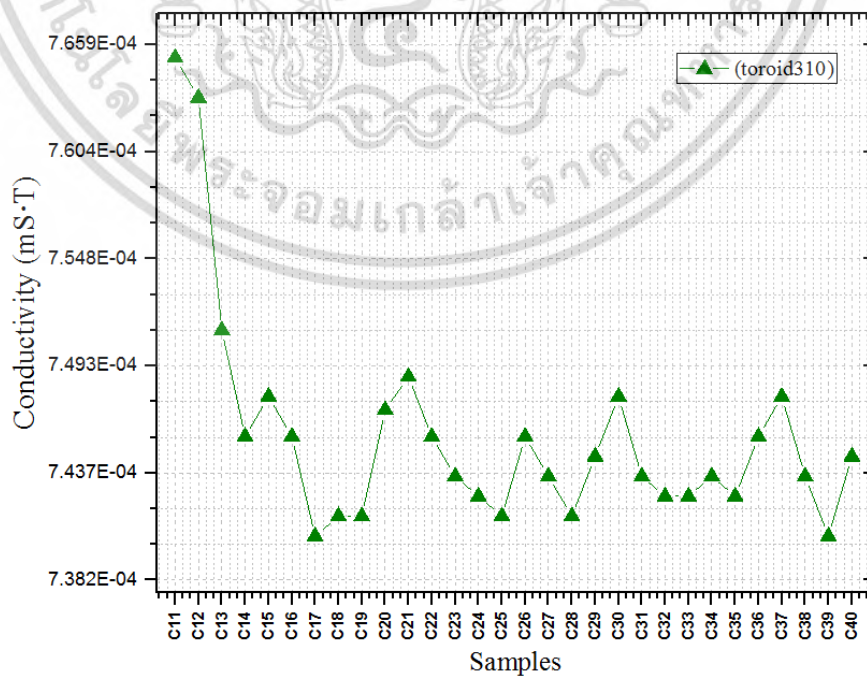
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 ของรูปแบบ  
โซลินอยด์ 310 [ภาคผนวก ก หน้า 103]



รูปที่ 4.30 คำนวณ ไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์  
เซนเซอร์

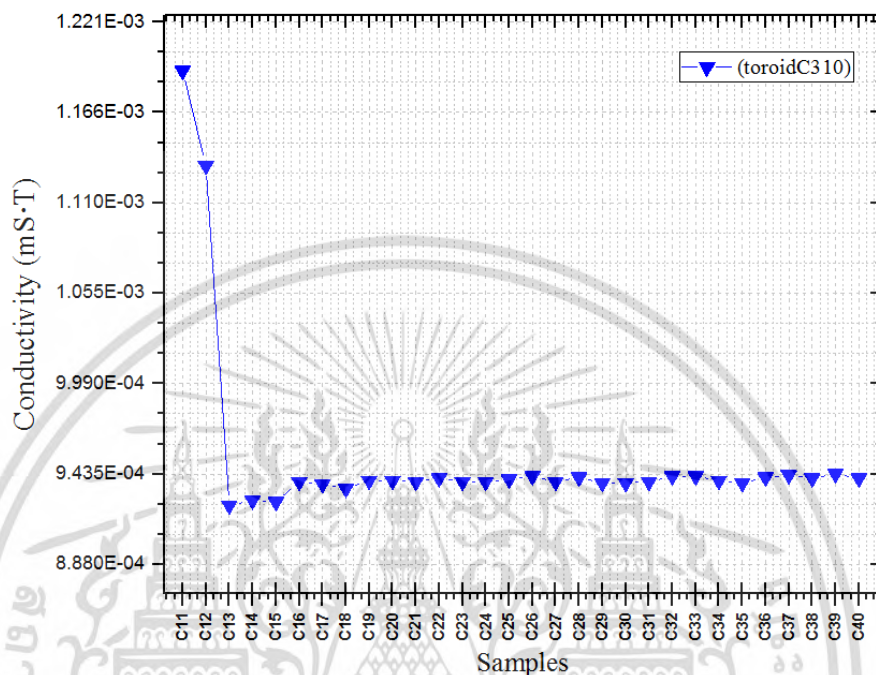
ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 ของแบบทอลอยด์  
260 [ภาคผนวก ก หน้า 103]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

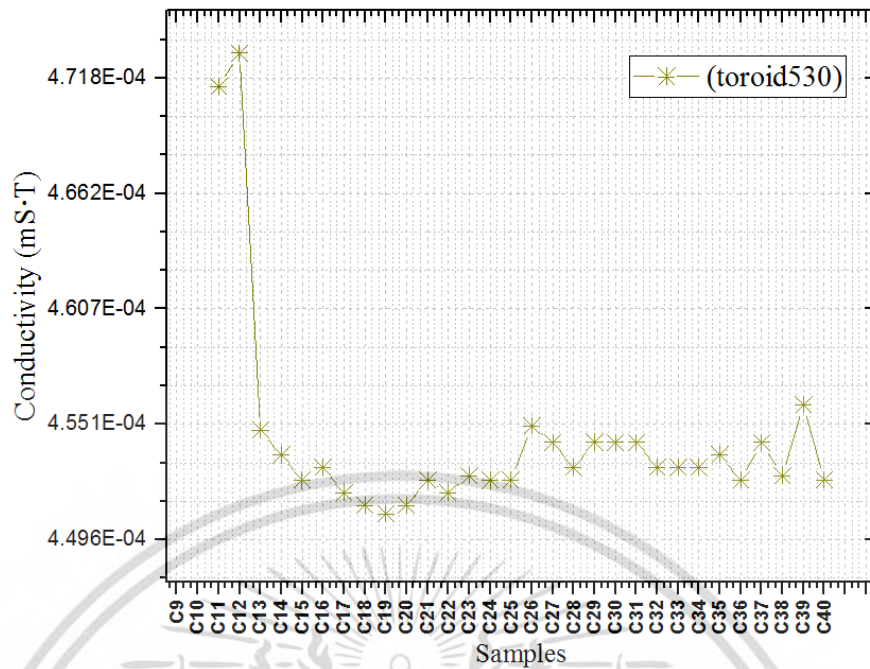
รูปที่ 4.31 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์

ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 ของแบบทอลอยด์ 310 [ภาคผนวก ก หน้า 103]



รูปที่ 4.32 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์

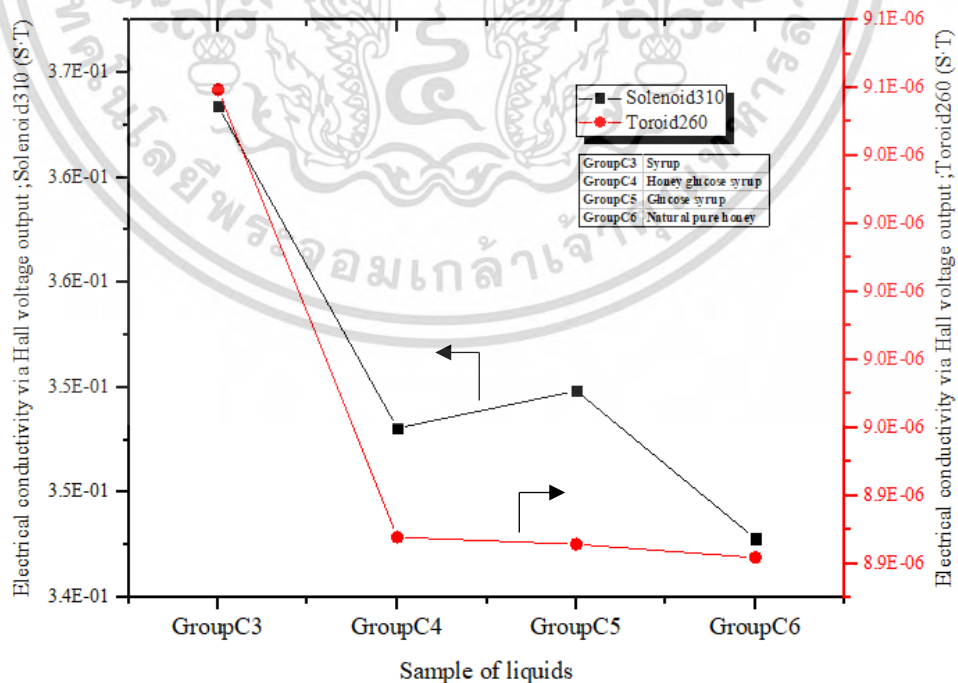
ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 ของแบบทอลอยด์ C 310 [ภาคผนวก ก หน้า 103]



รูปที่ 4.33 ค่าการนำไฟฟ้าของของเหลวที่สัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์

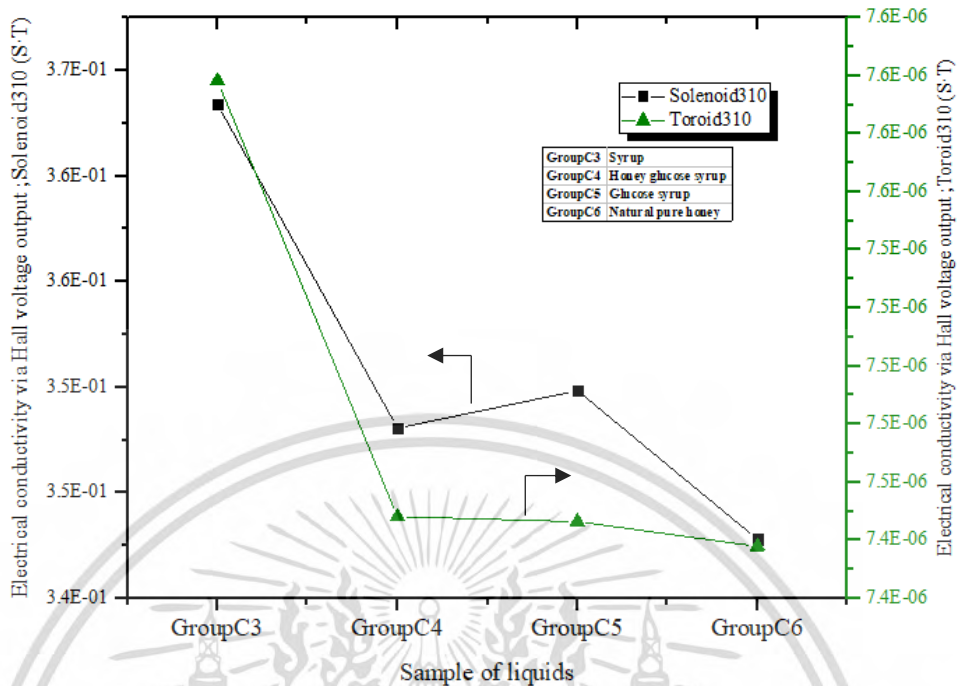
ของค่าคงที่  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึก 40 mm ตัวอย่าง C11 - C40 ของแบบทอลอยด์ 530 [ภาคผนวก ก หน้า 103]

#### 4.3.4 การวัดค่าที่มีความสัมพันธ์ของค่าคงที่ $0.09375 \text{ cm}^{-1}$ ที่ความลึก 40 mm 40 ตัวอย่างสำหรับการทดลองความเป็นกลุ่ม

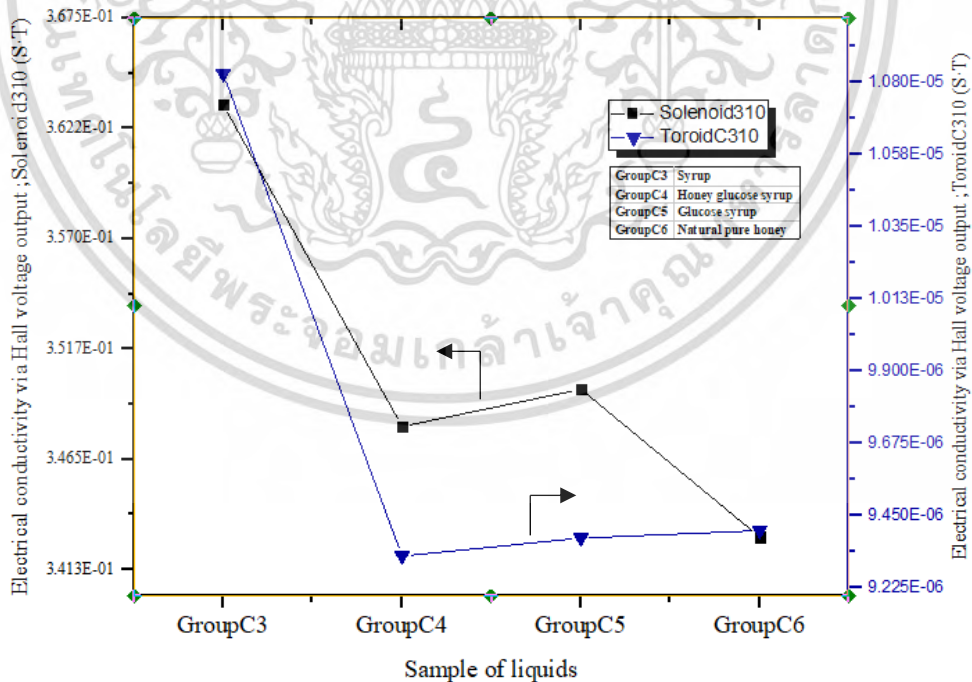


รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแกนโซลินอยด์ 310 และแกนทอลอยด์ 260 กลุ่ม C [ภาคผนวก ก หน้า 103]

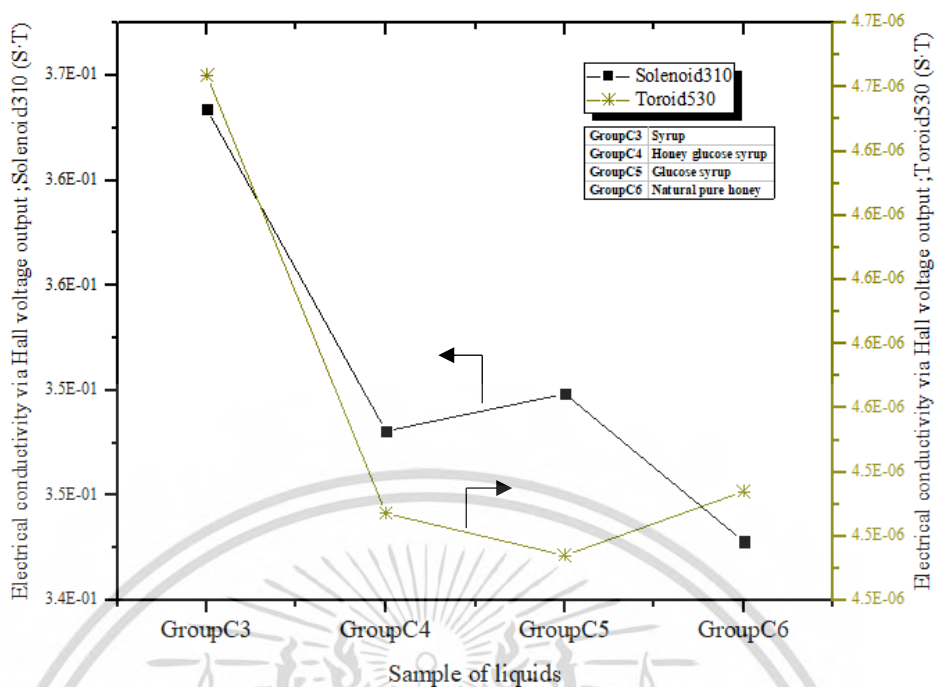


รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของแกนโซลินอยด์ 310 และแกนทอลอยด์ 310 กลุ่ม C [ภาคผนวก ก หน้า 103]



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของแกนโซลินอยด์ 310 และแกนทอลอยด์ C 310 กลุ่ม C [ภาคผนวก ก หน้า 103]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่าความนำไฟฟ้าการพิจารณาแรงดันเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ของแกนโซลินอยด์ 310 และแกนทอลอยด์ 530 กลุ่ม C [ภาคผนวก ก หน้า 103]

จากผลการทดสอบการตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าเพื่อจำแนกความบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งในเงื่อนไขที่ 1 นั้นสามารถจำแนกชนิดของเหลวอื่นๆได้และในเงื่อนไขที่ 2 การตรวจสอบตัวอย่างของน้ำผึ้งธรรมชาติทั้งหมด 10 ตัวอย่างที่เป็นน้ำผึ้งธรรมชาติที่หาซื้อได้ตามท้องตลาดตามมาตรฐานการค่าน้ำผึ้งนั้นสามารถบอกได้ถึงแนวโน้มเดียวกันทั้งหมดและสามารถสรุปได้ว่าเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดค่าความนำไฟฟ้าและจากแนกน้ำผึ้งนั้นเชื่อถือได้ และในเงื่อนไขที่ 3 การทดสอบเพื่อจำแนกคุณลักษณะของของเหลว โดยมีน้ำผึ้งธรรมชาติเป็นกรณีศึกษานั้นสรุปได้ว่าทั้ง 5 รูปแบบการวัดสามารถจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติและน้ำเชื่อมออกจากกันได้อย่างชัดเจน โดยมีค่าความถูกต้องแม่นยำของเครื่องมือวัดในรูปแบบทอลอยด์ C 310 ที่เหมาะสมสำหรับการจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติ น้ำผึ้งเทียม มีค่าความถูกต้องแม่นยำเท่ากับ 99.97 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $\pm 0.03$  เปอร์เซ็นต์ และสำหรับกลุ่มของของเหลวอื่นๆ นั้นรูปแบบที่เหมาะสมคือ โซลินอยด์ 310 มีค่าความถูกต้องแม่นยำ 99.96 เปอร์เซ็นต์ หรือมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $\pm 0.04$  เปอร์เซ็นต์

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอหลักการประยุกต์ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ตรวจวัดความเข้มข้นสนามแม่เหล็กที่สัมพันธ์โดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว เพื่อวิเคราะห์และจำแนกคุณลักษณะของน้ำผึ้งธรรมชาติ โดยจำแนกการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ การทดสอบเบื้องต้นสำหรับของเหลวตัวอย่างที่ต่างชนิดกัน ทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ได้ผลสรุปคือ ฮอลล์เอฟเฟกต์ให้ค่าความนำไฟฟ้าที่สามารถจำแนกคุณลักษณะของน้ำผึ้งธรรมชาติออกจากตัวอย่างของเหลวที่ต่างชนิดกันได้ เนื่องจากค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันของแกนทั้ง 2 รูปแบบนั้นคือ รูปแบบ โซลินอยด์ 310 รอบ และ ทอลอยด์ 260 รอบ ที่ความยาวของเส้นลวดเท่ากับ 10 เมตร ส่งผลโดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว ในส่วนที่สอง ได้เพิ่มพื้นที่ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีสำหรับการตรวจวัดน้ำผึ้งธรรมชาติทั้งหมด 10 ชนิด สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ชุดตรวจวัดนี้สามารถคาดคะเนคุณลักษณะของของเหลวในกลุ่มของน้ำผึ้งธรรมชาติที่จำหน่ายโดยทั่วไปในประเทศตามมาตรฐานการค่าน้ำผึ้งได้ และในที่สุดท้ายการตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวที่แตกต่างชนิดกันทั้งหมด 40 ตัวอย่าง โดยการเพิ่มจำนวนรอบการพันของขดลวดและยิ่งไปกว่านั้นได้เพิ่มตำแหน่งการติดตั้งฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ร่วมกับรูปแบบต่างๆ ของแกนแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงอีกทั้งยังได้เพิ่มพื้นที่ของเซลล์ไฟฟ้าเคมี จึงสามารถลดปริมาณการใช้ของเหลวตัวอย่างลงได้เป็นอย่างดี สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีและจำนวนรอบของขดลวดมีผลโดยตรงสำหรับในกรณีการตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าของของเหลว ตัวแปรข้างต้นทั้งหมดส่งผลโดยตรงกับ ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้าของฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ ค่าความนำไฟฟ้าของของเหลวทั้งที่อยู่บนพื้นฐานของไฟฟ้าเคมีและที่อยู่บนพื้นฐานของเอาต์พุตฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ สำหรับกรณีการจำแนกน้ำผึ้งธรรมชาติ รูปแบบของแกนที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคือ รูปแบบของทอลอยด์ C 310 รอบ ที่ให้ค่าความแม่นยำ เท่ากับ 99.97 เปอร์เซ็นต์ หรือ ที่ความคลาดเคลื่อน เท่ากับ  $\pm 0.03$  เปอร์เซ็นต์

### 5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

เนื่องจากการศึกษาการทาวิจัยนี้ ในเรื่องของปริมาณความเข้มข้นของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ขนาดของเส้นลวดและรูปแบบแกนรวมทั้งชนิดของวัสดุของแต่ละรูปแบบแกนที่นำมาใช้เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีความหลากหลายและสามารถนำไปใช้เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพได้ พร้อมทั้งการออกแบบขั้วของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีขนาดที่เล็กลง สามารถพกพาได้ง่าย และเหมาะสมต่อการวัดค่าของเหลวที่มากขึ้น เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ การค้าเชิงพาณิชย์ และการเกษตร เป็นต้น เช่น การศึกษาการตรวจวัดระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวาน เพื่อลดต้นทุนสำหรับบุคคลทั่วไป โดยการพัฒนาต่อให้มีความเหมาะสม สำหรับการตรวจวัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำตาลเทียมในกลุ่มของ (D-Glucose) โดยการตั้งสมมติฐานจากการทดลอง การวัดค่ากลูโคสเทียมจากน้ำเลือดเทียมเพื่อดูความเป็นเชิงเส้นของผลการทดลองในเบื้องต้นได้เป็นแนวทางต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ShumitSaha, NayanSarker, AvijitHira. (2014). **Design & Implementation of a Low Cost Blood Glucose Meter with Hight Accuracy**. IEEE International Conference on Electrical and Information & Communication Technology (ICEEICT)
- [2] American Public Health Association. (c1976). **American Water Works Association Water Pollution Control Federation, Standard methods for the examination of water and wastewater**, Washington, DC : The Association
- [3] Michael Rodahl. (1996). **QCM Operation in Liquids: An Explanation of Measured Variations in Frequency and Q Factor with Liquid Conductivity**. American Chemical Society, Analytical Chemistry, Vol. 68. No. 13, pp 2219-2227
- [4] NapapornTippmasn , SomnimirtPukngam. (2009). **Water Quality Monitoring in Forested, Agricultural and Mixed Forested-Agricultural Areas Using Small Waterheds in the Mae Thang Sub-Watershed**, Phrae Province. Thai J., For. 28 (1), pp 51-66
- [5] Tanawat Rakkamon , Bhunyabhadh Chaimay , Sutee Inraksa , Warawanninee Rachasong. (2012). **Quality of Drinking Water from Water Cooler at Thaksin University, Phatthalung Campus**. Thaksin.J., Vol. 15 (2)
- [6] Susan L. Schiefelbein , Naomi A. Fried , Kevin G. Rhoads , Donald R. Sadoway. (1998). **A high-accuracy, calibration-free technique for measuring the electrical conductivity of liquids**. American Institute of Physics, Review of Scientific Instruments, Volume 69, No. 9
- [7] Klaas R. Visser. (1989). **Electri Conductivity of Stationary and Flowing Human Blood at Low Frequencies**. IEEE Engineering In Medicine & Biology Society 11<sup>TH</sup> Annual International Conference
- [8] S Bogdanov, P Vit, V Kichenmann. (1996). **Sugar profiles and conductivity of stingless bee honeys from Venezuela**. Apidologie, Springer Verlag, 27(6), pp.445-450
- [9] N. Angkantarawichai , T. Manasri. (2012). **Determination of Sugar Content in Sugar Solutions using Interdigital Capacitor Sensor**. Measurement Science Review, Volume 12, No. 1
- [10] Michal Szermer , Andrzej Napieralski. (2009). **Multidomain Simulations of Silicon Sensors with usage of ANSYS and SUGAR Software**. IEEE International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] P. Häfiger , E.Johannessen. (2008). **Analog to Interval Encoder with Active Use of Gate Leakage for an Implanted Blood-Sugar Sensor**. IEEE Conference Biomedical and Systems
- [12] Jaromír Jezný , Miloslav Čurilla. (2013). **Position Measurement with Hall Effect Sensor**. Science and Education, American Journal of Mechanical Engineering, Vol. 1, No. 7, 231-235
- [13] Witsarut Sriratana , Riichi Murayama. (2013). **Application of Hall Effect Sensor: A Study on the Influences of Sensor Placement**. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), No.22
- [14] Hui-Yang , Ming Qin , Meng Nie , Qing-An Huang. (2011). **A MEMS Pressure Sensor Based on Hall Effect**. IEEE Sensors
- [15] S. Sousen , O. Karci , M. Dede , S. Aksoy , A. Oral. (2014). **Single layer sraphene Hall sensor for scanning Hall probe microscopy (SHPM) in 3-300 K temperature range**. ELSEVIER Applied Surface Science, Volume 308, pp 414-418
- [16] Naregalkar Akshay , M.Praveen Kumar , B.Harish , Sujata Dhanorkar. (2010). **An Efficient Approach for Sensor Deployments in Wireless Sensor Network**. IEEE International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies (INTERACT)
- [17] **เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงรวดเร็วสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณ HMF ในน้ำผึ้งและน้ำผลไม้**. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว ปีที่ 29 ฉบับที่1 2556
- [18] Maswaja Choorat , Voranuch Srijesaruk. (2013). **Effect of Drying Condition and Drying Aids on Quality Characteristics of Longan Honey Power Obtaine from Vacuum Drying**. Graduate Research Conference Khon Kaen University (GRC), pp 607-615
- [19] Qiu Chengqun. (2013). **Design of Virtual Instrument Based on MATLAB LABVIEW**. IEEE, Computer Society Fifth Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)
- [20] Martin A. Plonus 2531. **Applied electromagnetics**, McGraw-Hill Book Company
- [21] นางสาววนิตรา แก้วนามชัย และคณะ (2559). **การจำแนกชนิดของวัสดุตัวนำไฟฟ้าบนพื้นฐานของฮอลล์เอฟเฟคเซนเซอร์**. ปรินูญานิพนธ์สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] รศ.ดร. เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. **เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [23] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์. (2555). **หลักการตรวจวิเคราะห์น้ำทางเคมี**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [24] สมจิตต์ ตรีหอนันต์.(2555). **ชีวโมเลกุลพื้นฐาน Basic Biomolecules**. ปทุมธานี: ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [25] แสนนัต หงส์ทรงเกียรติ. **เทคโนโลยีการเลี้ยงผึ้ง**. คณะเทคโนโลยีการเกษตร สจล.
- [26] รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบูรณ์ **การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของน้ำผึ้งโดยใช้เนียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 2557
- [27] **มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 8003-2556 น้ำผึ้ง** ส. นักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติกระทรวงเกษตรและสหกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
(ผลการศึกษาและรายชื่อของเหลวตัวอย่างทั้งหมด 70 ตัวอย่าง ทั้ง 3 เงื่อนไข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. รายชื่อของสารละลายตัวอย่างทั้งหมด 70 ตัวอย่าง มี 3 เงื่อนไขดังนี้

1. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร ทั้งหมด 20 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 7 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่ม A0 Standard กลุ่ม A1 Water กลุ่ม A2 Natural Pure Honey กลุ่ม A3 Glucose Syrup กลุ่ม A4 Honey Glucose Syrup กลุ่ม A5 Syrup กลุ่ม A6 Sail Solution

2. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ที่ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 34 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 25 มิลลิลิตร ทั้งหมด 10 ตัวอย่าง

3. ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของสารละลายตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร ทั้งหมด 40 ตัวอย่าง แบ่งเป็น 7 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่ม C0 Standard กลุ่ม C1 Water กลุ่ม C2 Salt Solution กลุ่ม C3 Syrup กลุ่ม C4 Honey Glucose Syrup กลุ่ม C5 Glucose Syrup กลุ่ม C6 Natural Pure Honey

โดยการเริ่มต้นทางการศึกษาได้ดำเนินการหาเงื่อนไขการทดลองที่ถูกต้องจาก ข้อ 1 และข้อ 2 เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการทดสอบการวัดค่าความนำไฟฟ้าเพื่อจากแนกน้ำผึ้งแท้ น้ำผึ้งเทียม และใช้ ข้อ 3 สำหรับการเปรียบเทียบการวัดของแกนทั้ง 5 รูปแบบ

ตารางที่ 1 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์

Samples	Magnetic field ( $B$ )		Current ( $I$ )		Hall Voltage $V_H(\text{Output})$	
	mT		A		V	
	Solenoid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260
(A1)	0.140	0.150	0	0	2.473	2.472
(A2)	5.100	0.590	0.180	0.190	2.576	2.519
(A3)	3.520	0.490	0.070	0.070	2.512	2.497
(A4)	4.330	0.530	0.160	0.160	2.567	2.514
(A5)	4.660	0.550	0.170	0.170	2.571	2.518
(A6)	0.340	0.160	0	0	2.479	2.478
(A7)	0.340	0.160	0	0	2.478	2.473
(A8)	0.340	0.160	0	0	2.483	2.483
(A9)	1.640	0.210	0	0	2.484	2.484
(A10)	3.080	0.410	0.040	0.020	2.487	2.485
(A11)	0.350	0.170	0	0	2.495	2.494
(A12)	0.340	0.160	0	0	2.479	2.482
(A13)	0.350	0.170	0	0	2.491	2.488

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีประโยชน์เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Magnetic field ( $B$ )		Current ( $I$ )		Hall Voltage $V_H(\text{Output})$	
	mT		A		V	
	Solenoid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260
(A14)	0.340	0.160	0	0	2.483	2.481
(A15)	1.240	0.180	0	0	2.482	2.482
(A16)	1.640	0.210	0.020	0.020	2.483	2.483
(A17)	3.120	0.460	0.040	0.040	2.490	2.489
(A18)	31.000	10.740	1.660	1.680	3.281	2.868
(A19)	26.300	8.860	1.540	1.660	3.225	2.861
(A20)	24.500	7.140	1.530	1.620	3.196	2.858

ตารางที่ 2 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )		Electrical conductivity ( $\sigma$ )	
	S	S	S·T	S·T
	Solenoid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260
Deionized Water (A1)	0	0	60.475218	0.001522
Natural Water (A2)	0.001758	0.001855	62.994000	0.001551
Drinking Water (A3)	0.000684	0.000684	61.428931	0.001537
Tap Water (A4)	0.001563	0.001563	62.773912	0.001548
Cha Green Tea (A5)	0.001660	0.001660	62.871729	0.001550
Honey Natural Sun Forest (A6)	0	0	60.621943	0.001526
Veijpong Natural Honey (A7)	0	0	60.597489	0.001522
Good.b Natural Honey (A8)	0	0	60.719760	0.001529
Honey Syrup (A9)	0	0	60.744214	0.001529
Glucose Syrup (A10)	0.000391	0.000195	60.817577	0.001530
Honey Glucose Syrup (Veijpong Natural Honey:Glucose Syrup 1:3) (A11)	0	0	61.013210	0.001535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 20 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 24 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 20 มิลลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )		Electrical conductivity ( $\sigma$ )	
	S	S	S•T	S•T
	Solenoid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260
Honey Glucose Syrup (Vejpong Natural Honey:Glucose Syrup 1:1) (A12)	0	0	60.621943	0.001528
Honey Glucose Syrup (Good.b Natural Honey:Glucose Syrup 1:3) (A13)	0	0	60.915393	0.001532
Honey Glucose Syrup (Good.b Natural Honey:Glucose Syrup 1:1) (A14)	0	0	60.719760	0.001527
Syrup (Water : Sugar 1:1) (A15)	0	0	60.695306	0.001528
Syrup (Water : Sugar 2:1) (A16)	0.000195	0.000195	60.719760	0.001529
Syrup (Water: Sugar 3:1) (A17)	0.000391	0.000391	60.890939	0.001532
Salt Solution (Water : Salt 4:1) (A18)	0.016211	0.016406	80.234205	0.001766
Salt Solution (Water : Salt 6:1) (A19)	0.015039	0.016211	78.864771	0.001761
Salt Solution (Water : Salt 8:1) (A20)	0.014941	0.015820	78.155599	0.001759
Honey Glucose Syrup (Vejpong Natural Honey:Glucose Syrup 1:1) (A12)	0	0	60.621943	0.001528
Honey Glucose Syrup (Good.b Natural Honey:Glucose Syrup 1:3) (A13)	0	0	60.915393	0.001532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 34 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 25 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์

Samples	Magnetic field ( $B$ )		Current ( $I$ )		Hall Voltage $V_H$ (Output)	
	mT		A		V	
	Solenoid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260
(B1)	0.040	0.430	0	0	2.441	2.506
(B2)	0.050	0.440	0	0	2.447	2.508
(B3)	0.070	0.460	0	0	2.450	2.514
(B4)	0.090	0.470	0	0	2.439	2.499
(B5)	0.100	0.470	0	0	2.444	2.509
(B6)	0.120	0.480	0	0	2.453	2.520
(B7)	0.130	0.480	0	0	2.450	2.522
(B8)	0.160	0.510	0	0	2.445	2.505
(B9)	0.170	0.520	0	0	2.442	2.503
(B10)	0.180	0.530	0	0	2.467	2.514

ตารางที่ 4 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 34 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 25 mL โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )		Electrical conductivity ( $\sigma$ )	
	S	S	S·T	S·T
	Solenoid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260
Honey Chiang Mai (B1)	0	0	42.135672	0.001089
Erawan Pure Honey (B2)	0	0	42.241337	0.001090
Honey Wild Flower Hilltribe Gourmet (B3)	0	0	42.289789	0.001093
Honey Wild Flower Prapussorn (B4)	0	0	42.097999	0.001086
Chumchon Pure Honey (B5)	0	0	42.188253	0.001090
Langnese Golden Clear Honey (Germany) (B6)	0	0	42.332942	0.001095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 10 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.11029 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ  $34 \text{ mm}$  และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ  $25 \text{ mL}$  โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )		Electrical conductivity ( $\sigma$ )	
	S	S	S•T	S•T
	Solenoid310	Toroid260	Soloid310	Toroid260
TPA Wild Flower Honey (B7)	0	0	42.289789	0.001096
Song Pueng Natural Honey (B8)	0	0	42.200787	0.001089
Pure Grain Sunflower Honey (B9)	0	0	42.153618	0.001088
Bua Luang Honey (B10)	0	0	42.581248	0.001093

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ  $40 \text{ mm}$  และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ  $17 \text{ mL}$  โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

Samples	Magnetic field ( $B$ )				
	mT				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Deionized water (C1)	0.010	0.200	0.490	3.710	1.350
Water distilled battery (C2)	0.010	0.170	0.340	4.140	1.460
Drinking water (C3)	0.640	0.310	0.720	4.860	2.270
Natural water (C4)	2.520	0.600	1.710	8.560	3.550
Tap water (C5)	2.850	0.880	1.550	9.270	3.680
Cha green tea (C6)	2.760	0.980	1.890	9.540	3.890
Salt solution (water:salt 8:1) (C7)	22.390	7.840	13.050	40.260	21.390
Salt solution (water:salt 6:1) (C8)	20.0	6.720	13.020	40.640	19.39
Salt solution (water:salt 4:1) (C9)	19.420	7.190	13.160	43.150	18.360
Saline water clean (C10)	15.920	6.010	10.270	35.710	15.360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Magnetic field ( <i>B</i> )				
	mT				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Syrup (water:sugar 3:1) (C11)	3.660	1.250	2.760	8.79/9.79	3.450
Syrup (water:sugar 2:1) (C12)	3.060	1.180	2.270	8.870	3.600
Syrup (water:sugar 1:1) (C13)	0.220	0.320	0.470	4.910	1.820
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:1) (C14)	0.050	0.070	0.280	4.21	1.370
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:3) (C15)	0.020	0.220	0.32	4.090	1.370
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:1) (C16)	0.010	0.260	0.470	4.570	1.310
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:3) (C17)	0.000	0.220	0.450	4.420	1.410
Glucose syrup (C18)	0.110	0.200	0.520	4.450	1.370
Honey syrup (C19)	0.000	0.180	0.440	4.540	1.450
Maple syrup (C20)	0.070	0.280	0.490	4.880	1.350
Sugar substitute for diabetics (C21)	0.000	0.220	0.470	4.400	1.310
Honey natural sun forest (C22)	0.020	0.230	0.480	4.600	1.330
Vejpong natural honey (C23)	0.000	0.250	0.440	4.580	1.380
Good.b natural honey (C24)	0.000	0.220	0.440	4.520	1.350
Good.b sunflower honey (C25)	0.020	0.280	0.380	4.470	1.390
Royal chitralada honey (C26)	0.000	0.210	0.470	4.450	1.400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Magnetic field ( $B$ )				
	mT				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Longan honey TOPs (C27)	0.020	0.250	0.460	4.370	1.330
TPA longan honey (C28)	0.050	0.250	0.440	4.470	1.460
TPA pure honey (C29)	0.020	0.210	0.450	0.480	1.460
TPA wild flower honey (C30)	0.000	0.210	0.480	4.500	1.380
Honey longan hilltribe gourmet (C31)	0.050	0.200	0.470	4.510	1.440
Honey wild flower hilltribe gourmet (C32)	0.020	0.220	0.500	0.480	1.420
Honey wild flower prapussorn (C33)	0.020	0.210	0.470	4.560	1.440
Erawan pure honey (C34)	0.020	0.210	0.480	4.480	1.380
Song pueng natural honey (C35)	0.000	0.230	0.480	4.420	1.390
Chumchon pure honey (C36)	0.000	0.210	0.500	4.530	1.490
Pure grain sunflower honey (C37)	0.000	0.200	0.490	4.480	1.480
Honey chiengmai (C38)	0.020	0.210	0.480	4.510	1.370
Bua luang honey (C39)	0.020	0.230	0.480	4.470	1.470
Langnese golden clear honey (Germany) (C40)	0.020	0.220	0.490	4.460	1.460

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Current ( <i>I</i> )				
	A				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Deionized water (C1)	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
Water distilled battery (C2)	0.000	0.000	0.010	0.010	0.010
Drinking water (C3)	0.040	0.040	0.040	0.040	0.040
Natural water (C4)	0.170	0.150	0.160	0.160	0.150
Tap water (C5)	0.210	0.200	0.200	0.200	0.190
Cha green tea (C6)	0.200	0.210	0.200	0.200	0.200
Salt solution (water:salt 8:1) (C7)	1.450	1.440	1.220	1.200	1.060
Salt solution (water:salt 6:1) (C8)	1.440	1.430	1.210	1.230	1.010
Salt solution (water:salt 4:1) (C9)	1.450	1.440	1.240	1.250	1.000
Saline water clean (C10)	1.190	1.190	0.970	1.040	0.830
Syrup (water:sugar 3:1) (C11)	0.250	0.270	0.280	0.200	0.180
Syrup (water:sugar 2:1) (C12)	0.230	0.240	0.220	0.180	0.180
Syrup (water:sugar 1:1) (C13)	0.030	0.030	0.010	0.020	0.030
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:1) (C14)	0	0	0	0.020	0
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:3) (C15)	0.010	0	0	0	0
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:1) (C16)	0	0.010	0	0	0
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:3) (C17)	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Current ( <i>I</i> )				
	A				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Glucose syrup (C18)	0	0	0	0	0
Honey syrup (C19)	0	0	0	0	0
Maple syrup (C20)	0	0	0	0	0
Sugar substitute for diabetics (C21)	0	0	0	0	0
Honey natural sun forest (C22)	0	0	0	0	0
Veijpong natural honey (C23)	0	0	0	0	0
Good.b natural honey (C24)	0.010	0	0	0	0
Good.b sunflower honey (C25)	0.010	0	0	0	0
Royal chitralada honey (C26)	0	0	0	0	0
Longan honey TOPs (C27)	0	0	0	0	0
TPA longan honey (C28)	0	0	0	0	0
TPA pure honey (C29)	0	0	0	0	0
TPA wild flower honey (C30)	0	0	0	0	0
Honey longan hilltribe gourmet (C31)	0	0	0	0	0
Honey wild flower hilltribe gourmet (C32)	0	0	0	0	0
Honey wild flower prapussorn (C33)	0	0	0	0	0
Erawan pure honey (C34)	0	0	0	0	0
Song pueng natural honey (C35)	0	0	0	0	0
Chumchon pure honey (C36)	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Current ( $I$ )				
	A				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Pure grain sunflower honey (C37)					
Honey chiengmai (C38)	0	0	0	0	0
Bua luang honey (C39)	0	0	0	0	0
Langnese golden clear honey (Germany) (C40)	0	0	0	0	0

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Hall Voltage $V_H(\text{Output})$				
	V				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Deionized water (C1)	2.386	2.398	2.409	3.038	2.514
Water distilled battery (C2)	2.372	2.363	2.426	3.051	2.520
Drinking water (C3)	2.399	2.389	2.414	3.127	2.522
Natural water (C4)	2.472	2.449	2.451	3.574	2.590
Tap water (C5)	2.491	2.413	2.463	3.690	2.610
Cha green tea (C6)	2.484	2.446	2.436	3.699	2.613
Salt solution (water:salt 8:1) (C7)	3.201	2.771	2.840	4.851	3.297
Salt solution (water:salt 6:1) (C8)	3.207	2.808	2.838	4.847	3.270
Salt solution (water:salt 4:1) (C9)	3.198	2.814	2.833	4.844	3.254
Saline water clean (C10)	3.053	2.707	2.756	4.842	3.132
Syrup (water:sugar 3:1) (C11)	2.536	2.472	2.470	3.844	2.601

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Hall Voltage $V_H(\text{Output})$				
	V				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Syrup (water:sugar 2:1) (C12)	2.497	2.466	2.463	3.657	2.610
Syrup (water:sugar 1:1) (C13)	2.398	2.420	2.424	2.983	2.510
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:1) (C14)	2.372	2.413	2.407	2.993	2.503
Honey Glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:3) (C15)	2.374	2.420	2.413	2.990	2.497
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:1) (C16)	2.368	2.421	2.407	3.030	2.500
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:3) (C17)	2.374	2.413	2.390	3.026	2.493
Glucose syrup (C18)	2.365	2.419	2.393	3.017	2.490
Honey syrup (C19)	2.393	2.417	2.393	3.032	2.488
Maple syrup (C20)	2.393	2.410	2.411	3.032	2.490
Sugar substitute for diabetics (C21)	2.386	2.420	2.417	3.030	2.497
Honey natural sun forest (C22)	2.366	2.422	2.407	3.037	2.493
Vejpong natural honey (C23)	2.370	2.407	2.400	3.030	2.498
Good.b natural honey (C24)	2.350	2.421	2.397	3.030	2.497
Good.b sunflower honey (C25)	2.347	2.420	2.393	3.034	2.497
Royal chitralada honey (C26)	2.336	2.410	2.407	3.041	2.511
Longan honey TOPs (C27)	2.318	2.420	2.400	3.030	2.507
TPA longan honey (C28)	2.321	2.403	2.393	3.039	2.500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 mm และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 mL โดยแสดงค่า สนามแม่เหล็ก กระแส แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์ เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Hall Voltage $V_H(\text{Output})$				
	V				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
TPA pure honey (C29)	2.347	2.420	2.403	3.028	2.507
TPA wild flower honey (C30)	2.330	2.413	2.413	3.028	2.507
Honey longan hilltribe gourmet (C31)	2.333	2.420	2.400	3.030	2.507
Honey wild flower hilltribe gourmet (C32)	2.330	2.413	2.397	3.041	2.500
Honey wild flower prapussorn (C33)	2.330	2.413	2.397	3.041	2.500
Erawan pure honey (C34)	2.350	2.420	2.400	3.032	2.500
Song pueng natural honey (C35)	2.333	2.407	2.397	3.028	2.503
Chumchon pure honey (C36)	2.323	2.417	2.407	3.039	2.497
Pure grain sunflower honey (C37)	2.318	2.413	2.413	3.043	2.507
Honey chiengmai (C38)	2.318	2.419	2.400	3.037	2.498
Bua luang honey (C39)	2.339	2.419	2.390	3.046	2.517
Langnese golden clear honey (Germany) (C40)	2.333	2.413	2.403	3.037	2.497

ตารางที่ 7 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )				
	S				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Deionized water (C1)	0.000059	0.000059	0.000059	0.000059	0.000059
Water distilled battery (C2)	0.000000	0.000000	0.000059	0.000059	0.000059
Drinking water (C3)	0.000234	0.000234	0.000234	0.000234	0.000234

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์ กับ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )				
	S				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Natural water (C4)	0.000996	0.000879	0.000938	0.000938	0.000879
Tap water (C5)	0.001230	0.001172	0.001172	0.001172	0.001113
Cha green tea (C6)	0.001172	0.001230	0.001172	0.001172	0.001172
Salt solution (water:salt 8:1) (C7)	0.008496	0.008438	0.007148	0.007031	0.006211
Salt solution (water:salt 6:1) (C8)	0.008438	0.008379	0.007090	0.007207	0.005918
Salt solution (water:salt 4:1) (C9)	0.008496	0.008438	0.007266	0.007324	0.005859
Saline water clean (C10)	0.006973	0.006973	0.005684	0.006094	0.004863
Syrup (water:sugar 3:1) (C11)	0.001465	0.001582	0.001641	0.001172	0.001055
Syrup (water:sugar 2:1) (C12)	0.001348	0.001406	0.001289	0.001055	0.001055
Syrup (water:sugar 1:1) (C13)	0.000176	0.000176	0.000059	0.000117	0.000176
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:1) (C14)	0	0	0	0.000117	0
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:3) (C15)	0.000059	0	0	0	0
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:1) (C16)	0	0.000059	0	0	0
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:3) (C17)	0	0	0	0	0
Glucose syrup (C18)	0	0	0.000059	0	0
Honey syrup (C19)	0	0	0	0	0
Maple syrup (C20)	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )				
	S				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Sugar substitute for diabetics (C21)	0	0	0	0	0
Honey natural sun forest (C22)	0	0	0	0	0
Veijpong natural honey (C23)	0	0	0	0	0
Good.b natural honey (C24)	0.000059	0	0	0	0
Good.b sunflower honey (C25)	0.000059	0	0	0	0
Royal chitralada honey (C26)	0	0	0	0	0
Longan honey TOPs (C27)	0	0	0	0	0
TPA longan honey (C28)	0	0	0	0	0
TPA pure honey (C29)	0	0	0	0	0
TPA wild flower honey (C30)	0	0	0	0	0
Honey longan hilltribe gourmet (C31)	0	0	0	0	0
Honey wild flower hilltribe gourmet (C32)	0	0	0	0	0
Honey wild flower prapussorn (C33)	0	0	0	0	0
Erawan pure honey (C34)	0	0	0	0	0
Song pueng natural honey (C35)	0	0	0	0	0
Chumchon pure honey (C36)	0	0	0	0	0
Pure grain sunflower honey (C37)	0	0	0	0	0
Honey chiengmai (C38)	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )				
	S				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Bua luang honey (C39)	0	0	0	0	0
Langnese golden clear honey (Germany) (C40)	0	0	0	0	0

ตารางที่ 7 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )				
	S·T				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Deionized water (C1)	35.008622	0.000886	0.000746	0.000941	0.000456
Water distilled battery (C2)	34.806467	0.000873	0.000751	0.000945	0.000457
Drinking water (C3)	35.197734	0.000882	0.000748	0.000969	0.000457
Natural water (C4)	36.273719	0.000905	0.000759	0.001107	0.000469
Tap water (C5)	36.550866	0.000891	0.000763	0.001143	0.000473
Cha green tea (C6)	36.453050	0.000903	0.000755	0.001146	0.000474
Salt solution (water:salt 8:1) (C7)	46.968352	0.001024	0.000880	0.001503	0.000597
Salt solution (water:salt 6:1) (C8)	47.049866	0.001037	0.000879	0.001502	0.000593
Salt solution (water:salt 4:1) (C9)	46.919444	0.001040	0.000878	0.001501	0.000590
Saline water clean (C10)	44.800081	0.001000	0.000854	0.001500	0.000568
Syrup (water:sugar 3:1) (C11)	37.202978	0.000913	0.000765	0.001191	0.000471
Syrup (water:sugar 2:1) (C12)	36.632380	0.000911	0.000763	0.001133	0.000473
Syrup (water:sugar 1:1) (C13)	35.181432	0.000894	0.000751	0.000924	0.000455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )				
	S•T				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:1) (C14)	34.806467	0.000891	0.000746	0.000927	0.000454
Honey glucose syrup (vejpong natural honey:glucose syrup 1:3) (C15)	34.839073	0.000894	0.000748	0.000926	0.000452
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:1) (C16)	34.741256	0.000894	0.000746	0.000939	0.000453
Honey glucose syrup (good.b natural honey:glucose syrup 1:3) (C17)	34.839073	0.000891	0.000740	0.000937	0.000452
Glucose syrup (C18)	34.700499	0.000893	0.000741	0.000935	0.000451
Honey syrup (C19)	35.116220	0.000893	0.000741	0.000939	0.000451
Maple syrup (C20)	35.116220	0.000890	0.000747	0.000939	0.000451
Sugar substitute for diabetics (C21)	35.002101	0.000894	0.000749	0.000939	0.000452
Honey natural sun forest (C22)	34.708650	0.000895	0.000746	0.000941	0.000452
Vejpong natural honey (C23)	34.773862	0.000889	0.000744	0.000939	0.000453
Good.b natural honey (C24)	34.480411	0.000894	0.000742	0.000939	0.000452
Good.b sunflower honey (C25)	34.431503	0.000894	0.000741	0.000940	0.000452
Royal chitralada honey (C26)	34.268475	0.000890	0.000746	0.000942	0.000455
Longan honey TOPs (C27)	34.007630	0.000894	0.000744	0.000939	0.000454
TPA longan honey (C28)	34.056539	0.000888	0.000741	0.000941	0.000453
TPA pure honey (C29)	34.431503	0.000894	0.000745	0.000938	0.000454

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 รายชื่อของสารละลายทั้งหมด 40 ตัวอย่าง ที่ค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าเคมี  $0.09375 \text{ cm}^{-1}$  ความลึกของขั้วไฟฟ้าเคมีเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และปริมาณของของเหลวตัวอย่างเท่ากับ 17 มิลลิลิตร โดยแสดงค่า ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับกระแส ความนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากฮอลล์เอฟเฟกต์เซนเซอร์ (ต่อ)

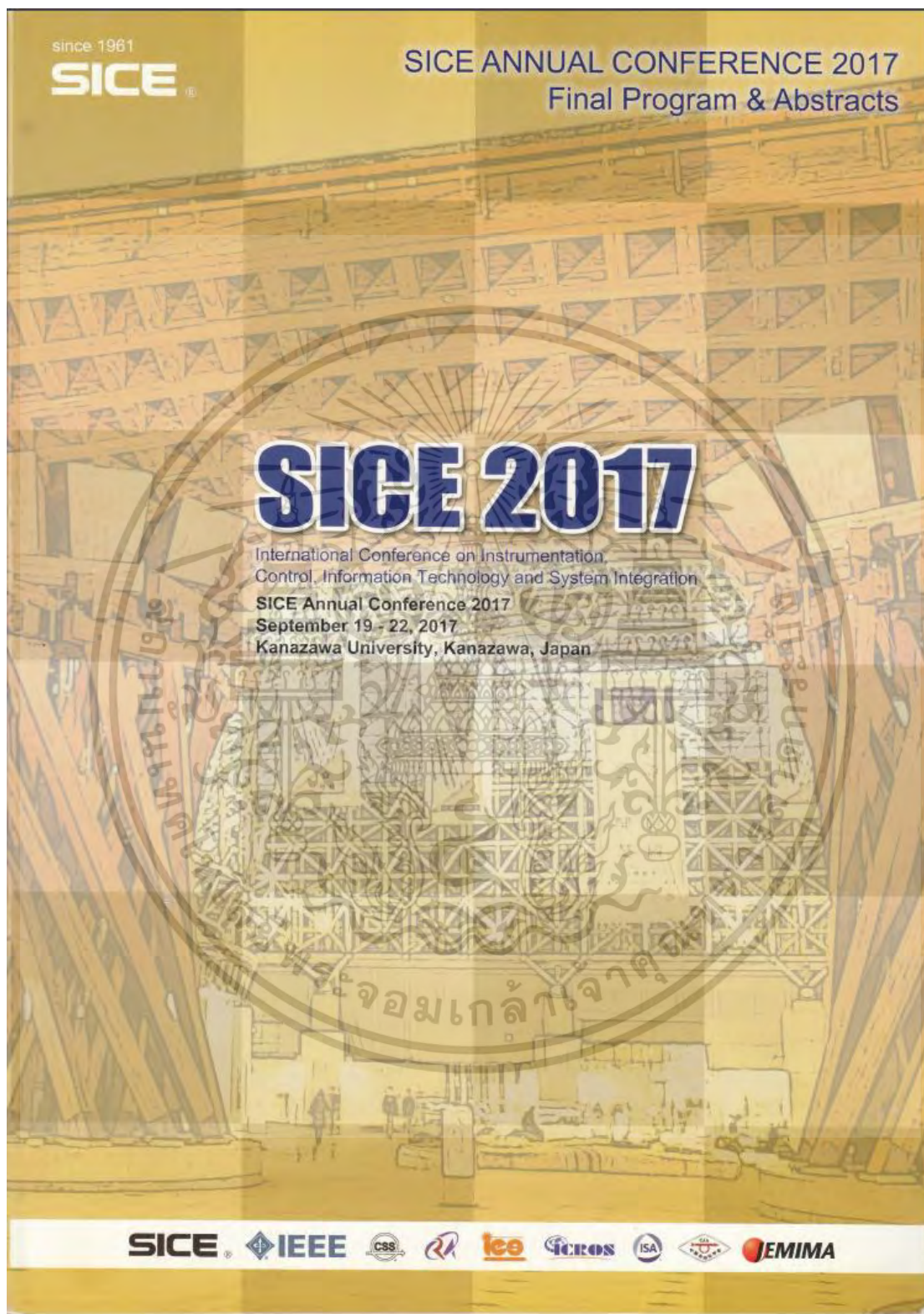
Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )				
	S•T				
	Solenoid310	Toroid260	Toroid310	ToroidC310	Toroid530
TPA wild flower honey (C30)	34.186961	0.000891	0.000748	0.000938	0.000454
Honey longan hilltribe gourmet (C31)	34.235869	0.000894	0.000744	0.000939	0.000454
Honey wild flower hilltribe gourmet (C32)	34.186961	0.000891	0.000742	0.000942	0.000453
Honey wild flower prapussorn (C33)	34.186961	0.000891	0.000742	0.000942	0.000453
Erawan pure honey (C34)	34.480411	0.000894	0.000744	0.000939	0.000453
Song pueng natural honey (C35)	34.235869	0.000889	0.000742	0.000938	0.000454
Chumchon pure honey (C36)	34.089144	0.000893	0.000746	0.000941	0.000452
Pure grain sunflower honey (C37)	34.007630	0.000891	0.000748	0.000943	0.000454
Honey chiengmai (C38)	34.007630	0.000893	0.000744	0.000941	0.000453
Bua luang honey (C39)	34.317383	0.000893	0.000740	0.000944	0.000456
Langnese golden clear honey (Germany) (C40)	34.235869	0.000891	0.000745	0.000941	0.000452

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
(ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการท าวินิจฉัยและได้รับการตีพิมพ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Analysis of Liquids Conductivity Using Hall Effect Sensor Based on Electromagnetic Field Properties

Sivakon Sokjabok<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)-2-329-8347-8; E-mail: <sup>1</sup>s58601073@kmitl.ac.th, <sup>2</sup>witsarut.sr@kmitl.ac.th, <sup>3</sup>sutham.sa@kmitl.ac.th)

**Abstract:** This paper presents a new methodology of analyzing liquid conductivity via the Hall Effect sensor based on electrochemical properties. Two different magnetic field cores with the same coil length (10 m, AWG 31) were studied, namely ferrite solenoid cores and toroidal iron powder cores (T131-26). The magnetic field generated by both type of cores was then used to generate a Hall voltage with the cores ratios of 1:1. The output Hall voltage is, in turn, sent through a microcontroller, together with a 10 bit converter for real time data analysis. The magnetic-field density of the solenoid for analyzing the conductivity of brine is 31 mT for solenoid, and 10.74 mT for toroid cores, respectively. Results from other materials are compared to the reference conductivity values of salt solution, which amounts to 16.211 mS/cm when assessed with the solenoid core, and 16.406 mS/cm when assessed with the toroid core.

**Keywords:** Conductivity, Hall Effect, Magnetic, Electrochemical, Toroid

### 1. INTRODUCTION

The advent of the Hall Effect sensors has played an important role in several aspects of daily life, manufacturing, and industry. Several characteristics of Hall Effects are exploited to conceive several sensorial applications from non-invasively measuring glucose in diabetes patients [1], measuring positions [2], pressure [3], as well as the Scanning Hall Probe Microscopy, SHPM [4]. Electrical conductivity is one of the main quantities that can reveal the characteristics of a particular liquid through its electrochemical properties, for example the effects of various charges and composition. This can be used to monitor water qualities affected by daily activities, for example industrial wastewater. In this light, a number of researchers have focused on unveiling the characteristics of liquids such honey [5] and human blood [6] through conductivity.

This paper focus to solve the problem of measuring the conductivity of liquids with less electrical charge due to expensive instrumentation and special measure methods. In this case study used ability of Hall Effect sensor for classifying liquids by measuring in different magnetic field with on solenoids cores and toroid cores, based on electrochemical (oxidation and reduction) methods. Data acquired from the Hall Effect sensor is sent to a computer for real-time post processing and analysis. This paper is organized as follows; Section 2 gives an overview of the Hall Effect sensor; Section 3 gives an overview of the Electrical Conductivity; Section 4 describes the magnetic field generation for the Hall Effect sensor; Section 5 describes the measurement system; Sections 6 gives the results of the conductivity experiments. This paper concludes in Section 7, along with describing some tentative future works.

### 2. HALL EFFECT SENSOR

The Hall Effect sensor also known as Hall Generator,

<sup>†</sup>Sivakon Sokjabok is the presenter of this paper.

is widely applied to analyze electrochemical systems because the output signal Hall voltage ( $V_H$ ) is steady and continuous as shown in Eq. (1). This voltage is analyzed by the Lorentz force ( $F$ ), which in turn is related to the magnetic flux density ( $B$ ), the electron on magnetic field ( $q$ ), the angle ( $\theta$ ), the velocity of the electron due to an electric field ( $V$ ) as depicted in Eq. (2). The sensitivity of Hall device package is related to the north and south polarities ( $+B$ ) and ( $-B$ ) as shown in Eq. (3) [2, 7].

$$V_H = \frac{R_H}{w} IB \quad (1)$$

$$F = qvBs \sin\theta \quad (2)$$

$$Sens = \frac{V_{H(-B)} - V_{H(+B)}}{2B} \quad (3)$$

where  $w$  is thickness of the Hall generator (mm).

$I$  is the constant current (mA).

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

### 3. ELECTRICAL CONDUCTIVITY

Electrical conductivity ( $\sigma$ ) is defined as the reciprocal of resistivity ( $\rho$ ), and then is measured in Siemens per meter (S/m) from Ohm's law. When  $L/A$  is the cell constant  $0.15625 \text{ cm}^{-1}$ , that is measured in Siemens per meter (S/m) actually it is more conveniently expressed as mS/cm or  $\mu\text{S/cm}$  in Eq. (4) [8].

$$\sigma = \frac{I(L/A)}{V} = \frac{IK_{cell}}{V} \quad (4)$$

where  $V$  is the constant voltage (V).

$I$  is the drive current (A).

$L$  is the length between cells (cm).

$A$  is the electrochemical cell area ( $\text{cm}^2$ ).

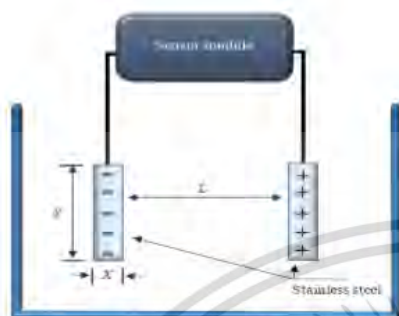


Fig. 1 Electrochemical cell based on (Oxidation and Reduction).

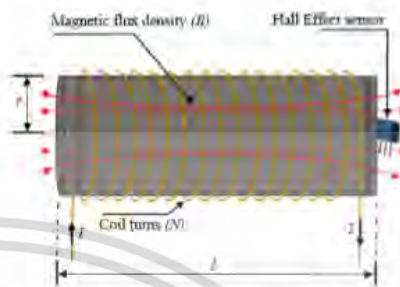


Fig. 2 Sensor module of solenoid ferrite cores.

Table 1 Measured electrical conductivities of 7 liquids using the Hall Effect sensor.

Samples	Electrical conductivity ( $\sigma$ )		Electrical conductivity ( $\sigma$ )	
	( $\mu\text{S T}$ )	( $\mu\text{S T}$ )	( $\text{mS cm}$ )	( $\mu\text{S cm}$ )
	Solenoid	Toroid	Solenoid	Toroid
Salt solution	1.246	169.461	16.211	16.406
Natural water	0.978	148.840	1.758	1.855
Tap water	0.975	148.545	1.565	1.563
Cha green tea	0.976	148.781	1.660	1.660
Drinking water	0.954	147.540	0.684	0.684
Honey syrup	0.943	146.772	0.000	0.000
Deionized water	0.935	146.063	0.000	0.000

4. GENERATED OF MAGNETIC FIELD

This section describes the magnetic field generation through current induction. Current flows through the fluid resistance which is determined by the magnetic field generated by the number of different coil windings by the same length of 10 m (AWG 31). Eqs. (5) – (8) give relationships between the Inductance ( $L$ ) and Magnetic field of cores ( $B$ ) as functions of the number of winding ( $N$ ), the material permeability ( $\mu$ ), and the core area ( $A$ ) [9].

$$B_{\text{solenoid}} = \frac{\mu NI}{l} \tag{5}$$

$$B_{\text{toroid}} = \frac{\mu NI}{2\pi r} \tag{6}$$

$$L_{\text{solenoid}} = \frac{\mu N^2 A}{l} \tag{7}$$

$$L_{\text{toroid}} = \frac{\mu N^2 A}{2\pi r} \tag{8}$$



Fig. 3 Sensor module of iron powder toroidal cores.

In this study two Hall Effect sensors, each with the number of cores equal to the number of sensors, were used. Both cores are wired from the same 10 m wire (AWG 31). However, one sensor uses a solenoid core with length ( $l$ ) of 39.5 mm, and radius ( $r$ ) of 5.0 mm. The other sensor uses a toroid core with outer diameter ( $OD$ ) of 33 mm, inside diameter ( $ID$ ) of 16.3 mm, height ( $H$ ) of 11.7 mm, and radius ( $r$ ) of 16.3 mm. The windings are 310 turns for the solenoid, and 260 turns for the toroid. The inductance of the solenoid core is 3.4672 mH and 8.5240 mH for the toroid core.

5. MEASURING SYSTEM

In the experiment, the efficiency increment of the Hall Effect sensor measurement under different liquids was investigated. The magnetic field was measured by EXTECH SDL 900 as part of the Hall Effect sensor. The Hall Effect signal output was sent to a 10 bit analog to digital converter for post processing and determination of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

liquid conductivity. Table 1 shows the electrical conductivity of different liquids, in comparison to deionized water.



Fig. 4 Block diagram and measurement system.

### 6. EXPERIMENT AND RESULTS

All experiments of this study were conducted by comparing the characteristics of both cores with the A1301 Hall Effect sensor, in order to infer the electrical conductivity of different liquids. Five quantities are considered: the current of electrochemical cell ( $I$ ), the magnetic field ( $B$ ), the Hall Voltage signal output ( $V_H$ ), the Electrical conductivity ( $\sigma$ ), and the Hall Voltage conductivity from different cores. Results are grouped into three categories: group 1 denotes liquids giving low conductivity; group 2 liquids giving medium conductivity; and group 3 liquids giving high conductivity from our experiment. The amount of the liquids are kept fixed at 20 ml.

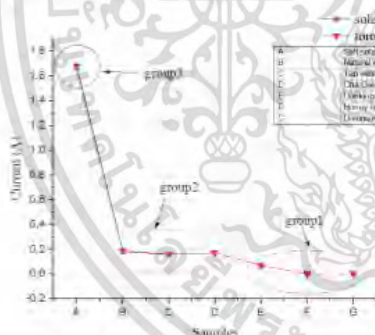


Fig. 5 Current density from different cores.

Figure 5 shows the current density from both the solenoid and toroid cores for all liquids of Table 1. Note that there is non-noticeable differences between the electrochemical currents of the solenoid and the toroid cores. It is also observed that salt solution has the least resistance with maximum conductivity compared to deionized water.

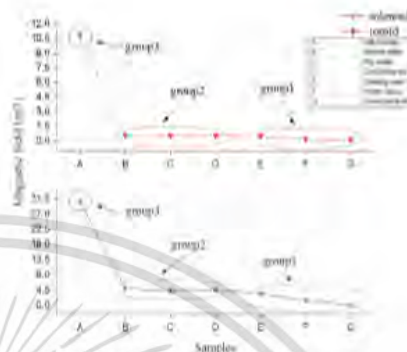


Fig. 6 Magnetic field from different cores.

Figure 6 shows the magnetic field induction of both cores. Note that the solenoid induces higher magnetic field level than that of the toroid. Salt solution is again shown to have the least resistance and the maximum magnetic field relative to deionized water. Note also that the magnetic field is directly proportional to the amount of core winding, and this is seen in the difference between the magnetic field induction levels.

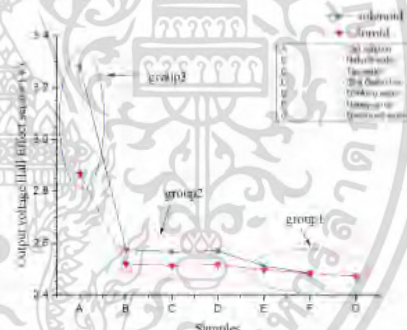


Fig. 7 Output voltage from Hall Effect sensor of different cores.

Figure 7 shows the Hall Effect sensor output voltage. There is some significant differences between the voltage of the solenoid core compared to that of the toroid for group 2 and 3 liquids, with a small difference for group 1 liquids. For both cores, salt solution yields the maximum output voltage, and thus the least resistance and the most electrical conductance compared with deionized water. This result is to be expected since the output Hall voltage is directly proportional to the amount of magnetic field induction.

Figure 8 shows the case of inferring the electrical conductivity through the current obtained from chemical reaction. Note that there is non-noticeable differences between both cores. It is shown that salt solution provides



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายศิวกร สอกจะบก
วัน เดือน ปี เกิด	27 กุมภาพันธ์ 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	เลขที่333/7 หมู่บ้านโคราชวิลเลจ4 ถนนราชสีมาปักธงชัย ต.บล.ไชยมงคล อ.เมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ – อีเมล	(+66)92-2545341 - Siwakon.sokjabok@gmail.com - 58601073@kmitl.ac.th
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชาเอก เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญด้าน	1. ระบบปลูกฟิล์มบางวัสดุสารกึ่งตัวนำ ำ (RF-magnetron sputtering, ITO thin film) 2. ระบบการวัดโดยฮอลล์เอฟเฟกต์เซนส์ (Hall Effect Sensing and Application)
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	

[1] Siwakon Sokjabok, Witsarut Sriratana, Sutham Satthamsakul “Analysis of Liquids Conductivity Using Hall Effect Sensor Based on Electromagnetic Field Properties” Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, September 19-22, 2017, Kanazawa University, Kanazawa, Japan, pp. 131-134.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้