



เครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัวใจกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

เครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดก้องจุลทรรศน์
แรงแม่เหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

APPARATUS FOR MEASURING FREQUENCY AND MAGNETIC RESPONSE OF
MAGNETIC FORCE MICROSCOPY PROBES



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (PHYSICS)
Science Silpakorn University
Academic Year 2016
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	เครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัวใจ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก
โดย	ณัฐวัฒน์ พันธุ์ชาติ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรวิทย์ เถาวัลย์)



57306202 : พิธีกรส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : การตรวจสอบหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก, การทดสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงาน, กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม, กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก, หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

นาย ญัฐวัฒน์ พันธุ์ชาติ: เครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ศักดิ์

การวิเคราะห์คุณลักษณะและการตรวจสอบหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กโดยทั่วไปจะกระทำโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมร่วมกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กที่มีรูปแบบเฉพาะซึ่งใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบ ในระหว่างการวิเคราะห์คุณลักษณะของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กอาจเกิดความเสียหายหรือชำรุด เนื่องจากหัววัดต้องมีการสัมผัสกับตัวอย่างทดสอบ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องมือต้นแบบที่สามารถวัดได้ทั้งการตอบสนองทางความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กโดยไม่ทำให้เกิดความเสียหาย เครื่องมือนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ (1) ขดลวดโซลินอยด์แบบวงแหวน ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กแบบเอาต์ออฟเพลน (2) ระบบการกวัดแกว่งทางแสง ซึ่งใช้ในการตรวจวัดการสั่นของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก สำหรับการวัดการตอบสนองต่อความถี่ หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะถูกสั่นด้วยเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ขนาดของแอมพลิจูดในการสั่นและเฟสที่เปลี่ยนไปเทียบกับความถี่ที่ใช้กระตุ้นจะถูกใช้ในการวิเคราะห์หาความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก การตอบสนองทางแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์ทางแม่เหล็กหาได้โดยการวัดเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยขดลวดโซลินอยด์ ฮิสเทอรีซิสลูปของการตอบสนองของหัววัดภายใต้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกันถูกตรวจสอบเพื่อดูการกลับทิศของแมกนีไทเซชันของหัววัด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีความสอดคล้องกับผลการวัดที่ได้จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม นอกจากนี้การทดลองโดยใช้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการแยกแยะหัววัดที่แตกต่างกัน

57306202 : Major (PHYSICS)

Keyword : MFM tip inspection, non-destructive testing, AFM, MFM, magnetic probes

MR. Natthawat PHANCHAT: Apparatus for measuring frequency and magnetic response of magnetic force microscopy probes Thesis advisor : Badin Damrongsak, Ph.D.

Characterization and inspection of magnetic force microscopy (MFM) probes are generally done in a conventional atomic force microscope (AFM) with a patterned magnetic recording media as a test sample. During the characterization, a MFM probe under test can be damaged or worn out since it must have a physical contact to the sample. To avoid this problem, we designed and developed a prototype apparatus that can measure both the frequency and magnetic response of MFM probes without causing damage. The apparatus was composed of two main parts: (1) a ring-type solenoid coil as an out-of-plane magnetic field generator and (2) an optical beam deflection system which was employed to detect the oscillation of the test MFM probe. For frequency response measurement, the test MFM probe was oscillated by a piezoelectric transducer. The oscillation amplitude and phase shift corresponding to the excitation frequencies were used to determine the resonant frequency of the test MFM probe. The magnetic response of MFM probes was done by detecting the probe phase shift under the presence of the magnetic field generated by the solenoid coil. Hysteresis loop of the probe response under a variation in magnetic field strength was also investigated to investigate the switching of the tip magnetization. Experimental results showed a good agreement with measurement results from a standard AFM machine. Moreover, experiments using the developed apparatus successfully demonstrated the potential to distinguish between different samples of MFM probes.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ ดร. บดินทร์ คำรงค์ดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน และรองศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ เภา ลัดดา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์มหาวิทยาลัยศิลปากรทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และประสบการณ์อันมีค่าแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด (ประเทศไทย) ที่คอยสนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ คุณกานต์ แสงแก้ว ผู้จัดการแผนกวิศวกรรมทดสอบผลิตภัณฑ์ บริษัทเวสเทิร์น ดิจิตอล จำกัด ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลือในส่วนของคุณสมบัติต่าง ๆ ที่มีความรู้แก่ในงานวิจัย ตลอดจนพนักงานทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนในการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน สำหรับกำลังใจ แรงผลักดัน และความสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหลักสูตรทุกคนที่ร่วมกันศึกษา แลกเปลี่ยนความรู้ให้คำปรึกษาด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ และคอยให้กำลังใจตลอดมา

ณัฐวัฒน์ พันธุ์ชาติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	5
2.1.1 การตอบสนองทางด้านความถี่.....	7
2.1.2 การตอบสนองต่อแรงทางแม่เหล็ก.....	10
2.1.3 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	14
2.2 หลักการเกิดสนามแม่เหล็กโดยขดลวดโซลินอยด์	15
2.2.1 กฎของบีโอดี-ซาวาร์ต (Biot-Savart's Law).....	16
2.2.2 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law).....	17
2.2.3 สนามแม่เหล็กในขดลวดโซลินอยด์	18

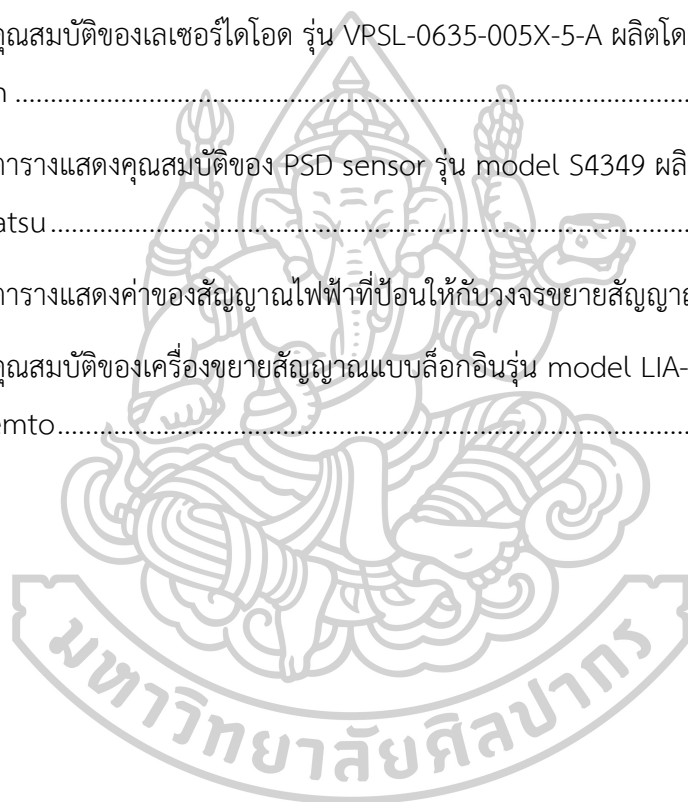
2.3 วงจรขยายไฟฟ้าเบื้องต้น.....	20
2.3.1 ออปแอมป์เบื้องต้น.....	21
2.3.2 วงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟส (inverting amplifier).....	24
2.3.3 วงจรขยายแรงดันแบบรวมแรงดัน (summing amplifier).....	25
2.3.4 วงจรขยายแรงดันผลต่าง (difference amplifier).....	27
2.4 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (lock-in amplifier).....	28
2.4.1 หลักการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน.....	29
2.4.2 การวัดขนาดของแอมพลิจูดและเฟสจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน.....	30
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดคุณภาพของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	33
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างเครื่องมือในงานวิจัย.....	35
3.1 การศึกษาและการออกแบบสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	35
3.1.1 ระบบสร้างสนามแม่เหล็ก.....	36
3.1.2 ระบบการสั่นหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	45
3.1.3 ระบบวัดการสั่นของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	47
3.1.4 ระบบขยายสัญญาณ.....	52
3.1.5 ระบบวัดและวิเคราะห์ผลของสัญญาณไฟฟ้า.....	58
3.2 กระบวนการในวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	59
3.2.1 การวัดการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	60
3.2.2 การวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	62
บทที่ 4 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ.....	65
4.1 ผลกระทบของความเข้มแสงของเลเซอร์ต่อการวัดตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	65

4.2 ผลกระทบของแอมพลิฟิเคชันในการสั่นหัววัดต่อการตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	67
4.3 ความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น	68
4.4 การวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	69
4.5 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	75
4.5.1 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเชิงพาณิชย์.....	75
4.5.2 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้น.....	78
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล.....	83
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	89



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ตารางคุณสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็ก รุ่น HMMT-6J04-VR ผลิตโดยบริษัท lakeshore	38
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของสายโคแอกซ์เซี่ยลที่ใช้ในงานวิจัย	46
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด รุ่น VPSL-0635-005X-5-A ผลิตโดยบริษัท Blue Sky Research	48
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงคุณสมบัติของ PSD sensor รุ่น model S4349 ผลิตโดยบริษัท Hamamatsu	51
ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าของสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขยายสัญญาณ	55
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินรุ่น model LIA-MVD-200-H ผลิตโดย บริษัท Femto.....	59



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ลักษณะของโมเมนต์แม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูล	1
รูปที่ 1.2 ภาพถ่ายหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กโดยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	2
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	6
รูปที่ 2.2 โมเดลของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.3 ผลการจำลองการตอบสนองทางความถี่ของหัววัดที่พิจารณาว่าหัววัดมีลักษณะเป็นแบบ จุดมวล (ซ้าย) ขนาดของแอมพลิจูดที่ความถี่ต่างกัน (ขวา) ผลของเฟสที่ความถี่ต่างกัน	10
รูปที่ 2.4 แบบจำลองการวัดแรงแม่เหล็กบนชิ้นงาน	11
รูปที่ 2.5 ผลของแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อระบบได้รับแรงแม่เหล็กมากกระทำ	13
รูปที่ 2.6 ผลของเฟสในการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อระบบได้รับแรงแม่เหล็กมากกระทำ	13
รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัด	14
รูปที่ 2.8 สนามแม่เหล็ก dB ณ จุด P ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านส่วนของเส้นลวด ds	16
รูปที่ 2.9 ทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดตัวนำ (ซ้าย) ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวด (ขวา) มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวด	17
รูปที่ 2.10 เส้นแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์	18
รูปที่ 2.11 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก (ซ้าย) การเหนี่ยวนำของขดลวดโซลินอยด์ (ขวา) แท่งแม่เหล็ก	19
รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของโซลินอยด์อุดมคติ บริเวณภายในขดลวดสนามแม่เหล็กจะมีความ สม่ำเสมอส่วนบริเวณภายนอกของขดลวดโซลินอยด์สนามแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์	19
รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายของออปแอมป์เบอร์ CA3140	21
รูปที่ 2.14 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	22
รูปที่ 2.15 วงจรออปแอมป์ในอุดมคติ	22
รูปที่ 2.16 วงจรออปแอมป์ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ	23

รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส.....	24
รูปที่ 2.18 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟส.....	25
รูปที่ 2.19 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมแรงดัน.....	25
รูปที่ 2.20 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายแรงดันแบบรวมแรงดันแบบ 3 อินพุต.....	26
รูปที่ 2.21 วงจรขยายสัญญาณแรงดันผลต่าง.....	27
รูปที่ 2.22 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายแรงดันผลต่าง.....	28
รูปที่ 2.23 เครื่องขยายสัญญาณแบบบล็อกอิน รุ่น LIA-MV-200-H ผลิตโดยบริษัท Femto.....	28
รูปที่ 2.24 รูปสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนให้กับเครื่อง สัญญาณที่ต้องการวัดค่า และสัญญาณอ้างอิงที่ เครื่องสร้างขึ้น.....	29
รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบบล็อกอินชนิดเฟสเดียว.....	31
รูปที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบบล็อกอินชนิดเฟสคู่.....	32
รูปที่ 2.27 ภาพข้อมูล bit บนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	33
รูปที่ 2.28 ลักษณะของ Ω -shaped gold ring ที่ใช้ตรวจสอบหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	34
รูปที่ 3.1 แผนผังระบบของเครื่องมือในงานวิจัยนี้.....	36
รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (ซ้าย) โมเดล (ขวา) ภาพถ่าย.....	37
รูปที่ 3.3 ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากโซลินอยด์.....	37
รูปที่ 3.4 หัววัดสนามแม่เหล็กรุ่น HMMT-6J04-VR ผลิตโดยบริษัท lakeshore.....	38
รูปที่ 3.5 เกาส์มิเตอร์รุ่น Model 475 ผลิตโดยบริษัท lakeshore.....	38
รูปที่ 3.6 ที่ยึดจับหัววัดสนามแม่เหล็กในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก.....	39
รูปที่ 3.7 ผังขั้นตอนในการตรวจสอบคุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก.....	40
รูปที่ 3.8 ภาพจำลองการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิด สนามแม่เหล็ก.....	40
รูปที่ 3.9 ภาพองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน X.....	41
รูปที่ 3.10 ภาพองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Y.....	41

รูปที่ 3.11 ภาพองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z.....	42
รูปที่ 3.12 ผลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน Z ตามเส้นผ่านศูนย์กลางของโซลินอยด์ในแนวแกน X.....	42
รูปที่ 3.13 ผลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน Z ตามเส้นผ่านศูนย์กลางของโซลินอยด์ในแนวแกน Y.....	43
รูปที่ 3.14 ผลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ความสูงต่าง ๆ กัน.....	44
รูปที่ 3.15 ผลของสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ	45
รูปที่ 3.16 ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ รุ่น model 33210 A จากบริษัท Agilent.....	46
รูปที่ 3.17 สายโคแอกซ์เซี่ยลที่ใช้ในงานวิจัย	47
รูปที่ 3.18 สายส่งสัญญาณที่ออกแบบเพื่อใช้กับเพียโซอิเล็กทริก.....	47
รูปที่ 3.19 เลเซอร์ไอโอดีน รุ่น VPSL-0635-005X-5-A ผลิตโดยบริษัท Blue Sky Research	48
รูปที่ 3.20 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไอโอดีน.....	48
รูปที่ 3.21 แผนผังของระบบจัดเรียงและตรวจวัดการกวัดแกว่งของแสง.....	49
รูปที่ 3.22 ระบบจัดเรียงแสงที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
รูปที่ 3.23 ระบบจัดเรียงแสง.....	50
รูปที่ 3.24 PSD sensor รุ่น model S4349 ผลิตโดยบริษัท Hamamatsu.....	51
รูปที่ 3.25 ตำแหน่งของโฟโตไดโอดใน PSD sensor.....	52
รูปที่ 3.26 ผังวงจรเปลี่ยนสัญญาณเชิงกระแสไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า	52
รูปที่ 3.27 ลักษณะการตกกระทบของลำแสงเลเซอร์บน PSD sensor.....	53
รูปที่ 3.28 แผนผังวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบรวมแรงดันและแบบผลต่างแรงดัน	54
รูปที่ 3.29 ภาพถ่ายวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบรวมแรงดันและแบบผลต่างแรงดัน.....	54
รูปที่ 3.30 สัญญาณอินพุตทั้งสี่ที่ป้อนให้กับวงจรขยายสัญญาณ	55
รูปที่ 3.31 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ A+B ในวงจรขยายสัญญาณ.....	56
รูปที่ 3.32 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ C+D ในวงจรขยายสัญญาณ	56

รูปที่ 3.33 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ A+B+C+D ในวงจรขยายสัญญาณ	57
รูปที่ 3.34 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ (A+B)-(C+D) ในวงจรขยายสัญญาณ.....	57
รูปที่ 3.35 ออสซิลโลสโคปรุ่น DS1052E ผลิตโดยบริษัท RIGOL	58
รูปที่ 3.36 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินรุ่น model LIA-MVD-200-H ผลิตโดยบริษัท Femto58	
รูปที่ 3.37 ลำดับขั้นตอนการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก	60
รูปที่ 3.38 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดในโหมดแอมพลิฟายด์	61
รูปที่ 3.39 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดในโหมดเฟส	62
รูปที่ 3.40 ผลของแอมพลิฟายด์ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสนามแม่เหล็ก เมื่อกระตุ้นให้หัววัดสั่นด้วยความถี่ต่างกัน.....	62
รูปที่ 3.41 ผลของเฟสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสนามแม่เหล็ก เมื่อกระตุ้นให้หัววัดสั่นด้วยความถี่ต่างกัน.....	63
รูปที่ 3.42 ผลของสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดคุณภาพดีที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน.....	63
รูปที่ 3.43 ผลของสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดคุณภาพต่ำที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน.....	64
รูปที่ 3.44 ตัวอย่างผลเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน	64
รูปที่ 4.1 ผลของแอมพลิฟายด์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ความเข้มแสงต่างกัน	66
รูปที่ 4.2 ผลของเฟสที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ความเข้มแสงต่างกัน	66
รูปที่ 4.3 ผลของแอมพลิฟายด์ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ค่าแอมพลิฟายด์ในการสั่นหัววัดต่างกัน.....	67
รูปที่ 4.4 ผลของเฟสที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ค่าแอมพลิฟายด์ในการสั่นหัววัดต่างกัน	68
รูปที่ 4.5 ผลการวัดความเรโซแนนซ์ของของหัววัดด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเทียบกับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก.....	69
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองทางแม่เหล็กของหัววัดที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ.....	70
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในขั้นที่ 1 ของ hysteresis loop	71
รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในขั้นที่ 2 ของ hysteresis loop	71
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในขั้นที่ 3 ของ hysteresis loop	72
รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในขั้นที่ 4 ของ hysteresis loop	73

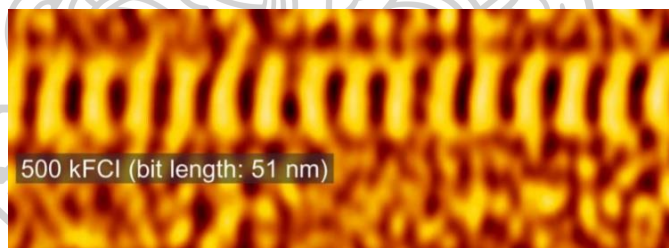
รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในชั้นที่ 5 ของ hysteresis loop	73
รูปที่ 4.12 ผลการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop ของหัววัดเชิงพาณิชย์ ที่ความหนา 40 nm (ซ้าย) และความหนา 50 nm (ขวา).....	74
รูปที่ 4.13 ผลการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop ของหัววัดที่พัฒนาขึ้น ที่ความหนา 40 nm (ซ้าย) และความหนา 60 nm (ขวา).....	74
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัดเชิงพาณิชย์.....	75
รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองของหัววัดเชิงพาณิชย์ที่ความหนา 40 nm โดยวัดที่ความเข้มของ สนามแม่เหล็กต่างกัน	76
รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยของผลการตอบสนองของหัววัดที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน	76
รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเชิงพาณิชย์ที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ต่างกัน.....	77
รูปที่ 4.18 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเชิงพาณิชย์ที่ความหนาต่างกัน โดย คำนวณจากความชันของผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงความเข้ม 0 – 100 Oe.....	77
รูปที่ 4.19 ผลของเฟสที่เปลี่ยนไปที่ความหนาของสารเคลือบต่างกันของหัววัดเชิงพาณิชย์ โดยทำการ วัดช่วงอิมิตัวที่ 210 Oe	78
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัดที่พัฒนาขึ้น.....	79
รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นที่ความหนา 60 nm โดยวัดที่ความเข้มของ สนามแม่เหล็กต่างกัน	79
รูปที่ 4.22 ค่าเฉลี่ยของผลการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นที่ความหนา 60 nm โดยวัดที่ความเข้ม ของสนามแม่เหล็กต่างกัน	80
รูปที่ 4.23 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่พัฒนาขึ้นที่ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ต่างกัน.....	80
รูปที่ 4.24 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่ได้พัฒนาขึ้นที่ความหนาต่างกัน โดย คำนวณจากความชันของผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงความเข้ม 0 – 100 Oe.....	81
รูปที่ 4.25 ผลของเฟสที่เปลี่ยนไปที่ความหนาของสารเคลือบต่างกันของหัววัดที่พัฒนาขึ้น โดยทำการ วัดช่วงอิมิตัวที่ 210 Oe	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (magnetic force microscopy) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการพัฒนาต่อยอดมาจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscopy) โดยหัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะเคลือบด้วยสารแม่เหล็ก เพื่อใช้ในวัดแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัดกับสนามแม่เหล็กบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยข้อมูลที่วัดได้จะนำมาประมวลผลออกมาเป็นรูปภาพลักษณะของสนามแม่เหล็กบนชิ้นงานตัวอย่าง จากรูปที่ 1.1 เป็นตัวอย่างของภาพที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กโดยเป็นการวัดข้อมูลแม่เหล็กบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (media) ภายในรูปจะเห็นทิศของแมกนีไทเซชันภายในแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งแสดงออกมาในลักษณะจุดหรือแถบสีที่ต่างกัน เช่น สีเหลืองแสดงลักษณะทิศของแมกนีไทเซชันมีทิศพุ่งออก และจุดหรือแถบสีดำแสดงลักษณะทิศของแมกนีไทเซชันมีทิศพุ่งเข้าแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ซึ่งจะแทนข้อมูลดิจิทัลแบบไบนารีด้วยบิต 0 และ 1 ที่บันทึกบนแผ่นบันทึกข้อมูล

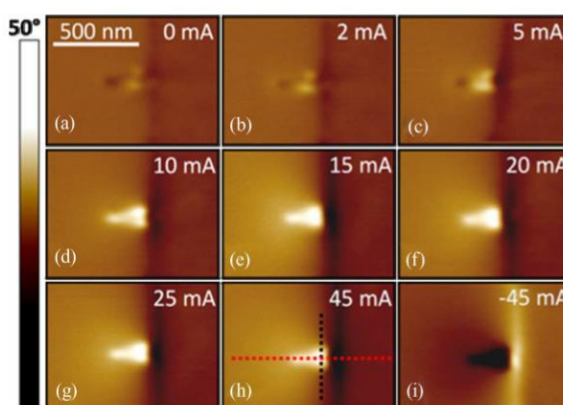


รูปที่ 1.1 ลักษณะของโมเมนต์แม่เหล็กภายในแผ่นบันทึกข้อมูล

แก้ไขจาก : M. Futamoto, et. al., "Improvement of Magnetic Force Microscope Resolution and Application to High-Density Recording Media," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 6, pp. 2748-2754, 2013.

ปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กถือเป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีความสำคัญต่อการศึกษาและการวิจัยวัสดุทางแม่เหล็ก เช่น การกระจายตัวของโมเมนต์แม่เหล็กในวัสดุแม่เหล็ก [1-3] การศึกษาลักษณะของโดเมนแม่เหล็ก เป็นต้น นอกจากนี้จะใช้ในภาคการศึกษาและการวิจัยแล้ว ในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กก็ได้รับ

ความนิยมสูงเนื่องจากหัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีขนาดเล็กมาก ซึ่งให้ความละเอียดในการตรวจวัดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้เครื่องมือชนิดนี้เหมาะที่จะใช้ในการตรวจสอบหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก (magnetic write head) [4] ดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากหัวเขียนมีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตร ด้วยเหตุนี้จึงมีบริษัทผลิตฮาร์ดดิสก์ใคร่พไม่น้อยเลือกใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจสอบหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็ก



รูปที่ 1.2 ภาพถ่ายหัวเขียนข้อมูลแม่เหล็กโดยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

แก้ไขจาก : N. Amos, et. al., Ultrahigh Coercivity Magnetic Force Microscopy Probes to Analyze High-Moment Magnetic Structures and Devices, IEEE Magn. Lett. 1 (2010).

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาจะเห็นว่ากล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีความสำคัญทั้งในด้านการศึกษา การวิจัย และอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก เพื่อให้หัววัดมีความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กดียิ่งขึ้น และให้ภาพที่มีความละเอียดสูง โดยใช้เทคนิคที่หลากหลายในการปรับปรุงคุณภาพ เช่น การใช้เทคนิค carbon nanotubes [5, 6] การใช้เทคนิค focused ion beam etching [7-10] และการปรับปรุงสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบบนหัววัดรวมถึงการใช้สารแม่เหล็กที่เคลือบหลายชั้น (multilayers) [11] เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ดี การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมมีความจำเป็นอย่างมากในการตรวจสอบคุณภาพของการวัดให้ได้มาตรฐานอยู่เสมอ และหนึ่งในตัวแปรสำคัญของคุณภาพในการวัดคือ หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยปกติแล้ว การตรวจสอบคุณภาพของหัววัดมักตรวจสอบโดยวัดกับตัวอย่างมาตรฐาน หรือวัดโดยใช้แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก [11, 12] ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ทั้งความ

ไวในการตอบสนองของหัววัด (sensitivity) และความละเอียดของภาพ (resolution) นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายกลุ่มได้ตรวจสอบคุณภาพของหัววัดด้วย ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมขึ้นเอง เช่น Carl และคณะ ได้เตรียม an Ω -shaped gold ring เพื่อใช้ในการตรวจสอบ magnetization reversal และค่า coercivity ของหัววัด [13] T. Weis และคณะ ได้สร้างตัวอย่างทางแม่เหล็กเพื่อใช้ตรวจสอบ magnetization reversal และ hysteresis loop ของหัววัด [14] เป็นต้น

จากเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดคุณภาพของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแล้วแต่เป็นเทคนิคที่อาจทำลายชิ้นงานและหัววัดทั้งสิ้น เนื่องจากเทคนิคต่าง ๆ ที่กล่าวมาจะใช้ชิ้นงานตัวอย่างมาตรฐาน หรือแผ่นบันทึกข้อมูลร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจสอบหัววัด และในการวัดโดยใช้เครื่องมือนี้จะมีการสัมผัสกันระหว่างหัววัดกับชิ้นงานตัวอย่างมาตรฐาน หรือแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในระหว่างการตรวจสอบหัววัด

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจที่จะออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายระหว่างชิ้นงานกับหัววัด เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้ชุดลดโซลินอยด์เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการตรวจวัดความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด ซึ่งในการตรวจสอบหัววัดจะไม่เกิดการสัมผัสกับวัตถุใด ๆ จึงไม่ทำให้หัววัดเกิดการเสียหาย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กโดยไม่ทำลายชิ้นงาน พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการทดลองกับเครื่องมือมาตรฐาน
2. นำเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ตรวจสอบหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กที่มีความหนาต่างกัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะขึ้นกับ ชนิดของสารแม่เหล็ก ปริมาตรของสารที่เคลือบบนหัววัด และขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก โดยแต่ละชนิดของสารแม่เหล็กจะมีค่าแมกนีไทเซชันอิ่มตัว (saturation magnetization: M_s) ต่างกัน จะส่งผลให้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กต่างกัน และถ้ามีปริมาณหรือความหนาของสารเคลือบต่างกันก็จะส่งผลให้ให้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเทคนิคการวัดการสั่นของหัววัดด้วยวิธี optical beam deflection ในการศึกษาการตอบสนองของหัววัด ซึ่งเป็นวิธีวัดการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของแอมพลิจูด และเฟสของการสั่นของหัววัด โดยจะเลือกใช้โซลินอยด์

เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อวัดการตอบสนองทางแม่เหล็กของหัววัด โดยในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะไม่เกิดการสัมผัสใด ๆ กับหัววัด ดังนั้นหัววัดคล้องจูลทรศน์แรงแม่เหล็กที่วัดด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้จะไม่เกิดความเสียหายกับหัววัด

1.4 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดคล้องจูลทรศน์แรงแม่เหล็กที่มีความถี่เรโซแนนซ์ตั้งแต่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 80 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นหัววัดที่มีความยาวตั้งแต่ 150 ไมโครเมตร ถึง 500 ไมโครเมตร หัววัดคล้องจูลทรศน์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 รูปทรงคือ ATEC และ OPUS ซึ่งถูกเคลือบด้วยด้วยสารแม่เหล็กแบบอ่อน (นิกเกิล) โดยเคลือบที่ความหนา 20 – 60 นาโนเมตร นอกจากนี้แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กที่ใช้ในงานวิจัยสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มตั้งแต่ -200 เออร์สเตด จนถึง 200 เออร์สเตด ซึ่งเป็นช่วงที่ครอบคลุมค่าสภาพล้าแม่เหล็กของนิกเกิล

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้วัดความถี่เรโซแนนซ์และความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดคล้องจูลทรศน์แรงแม่เหล็กได้
2. เครื่องมือที่พัฒนาขึ้น สามารถใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดคล้องจูลทรศน์แรงแม่เหล็กได้
3. งานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางสู่การวิจัยในด้านอื่น ๆ เช่น ใช้ในการตรวจวัดอนุภาคแม่เหล็กระดับนาโนเมตรในสารละลาย

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในยุคปัจจุบัน กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ได้รับความนิยมสูงในการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุทางแม่เหล็ก ซึ่งเป็นเครื่องมือที่พัฒนามาจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม นอกจากนี้ ในกลุ่มบริษัทผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) ส่วนใหญ่ยังเลือกใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจสอบมาตรฐานการผลิตหัวเขียนแม่เหล็ก (magnetic write head) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากหัวเขียนแม่เหล็กที่ใช้กันนั้นมีขนาดเล็กมาก ซึ่งมีความกว้างประมาณ 60 นาโนเมตร ดังนั้นการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแม่เหล็กต้องมีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง หนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กคือ หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของหัววัดอยู่เสมอ และการตรวจสอบหัววัดในปัจจุบันมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การตรวจสอบหัววัดโดยการวิเคราะห์ข้อมูลที่เขียนอยู่บนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก (media) ซึ่งเป็นการวัดที่ทำลายชิ้นงาน เนื่องจากต้องมีการสัมผัสกันระหว่างหัววัดกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยการสัมผัสกันนี้อาจทำให้เกิดความเสียหายกับหัววัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบสร้างเครื่องมือวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งในการวัดความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดโดยไม่ทำลายชิ้นงาน

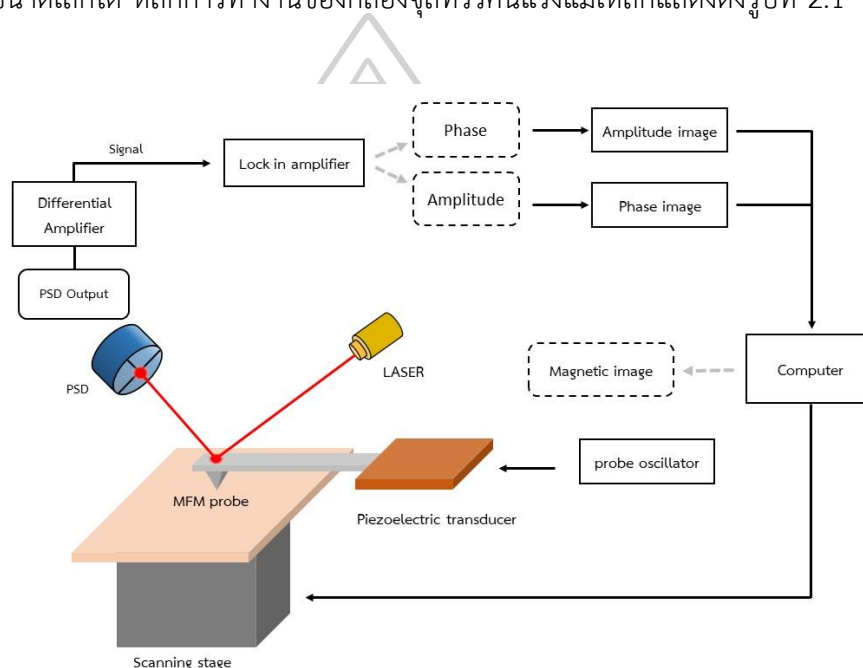
ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดความเข้าใจเบื้องต้น ซึ่งจะประกอบไปด้วย หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก หลักการเกิดสนามแม่เหล็กโดยขดลวดโซลินอยด์ (solenoid coil) วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าเบื้องต้น และหลักการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (lock-in amplifier) รวมไปถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ภายหลังจากประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมได้มีการพัฒนาต่อยอดให้เครื่องมือมีความสามารถในวัดการตอบสนองแรงทางแม่เหล็กโดยเรียกเครื่องมือนี้ว่า กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กถูกพัฒนาและสร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1987 โดยสองนักวิทยาศาสตร์คือ Martin และ Wickramasinghe [15] ซึ่งได้นำเอากล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมาศึกษารูปร่างของแรงแม่เหล็กด้วยการวัดแรงแม่เหล็กระหว่างหัววัดและวัสดุทางแม่เหล็กขนาดเล็ก ผลจาก

การศึกษานี้ทำให้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นที่รู้จักและใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ทั้งในด้านวัสดุศาสตร์ ด้านเทคโนโลยีด้านการบันทึกข้อมูลทางแม่เหล็ก หรือด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์

กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม แต่กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะใช้หัววัดต่างจากกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ตามปกติ โดยที่หัววัดของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีการเคลือบด้วยสารแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ที่ปลายของหัววัด สารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบนี้จะเป็นตัวที่ใช้วัดแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมจากแรงอะตอมปกติ และด้วยคุณสมบัติที่หัววัดมีขนาดจิ๋วทำให้เครื่องมือนี้มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวที่สามารถตรวจวัดวัตถุแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กได้ หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 2.1



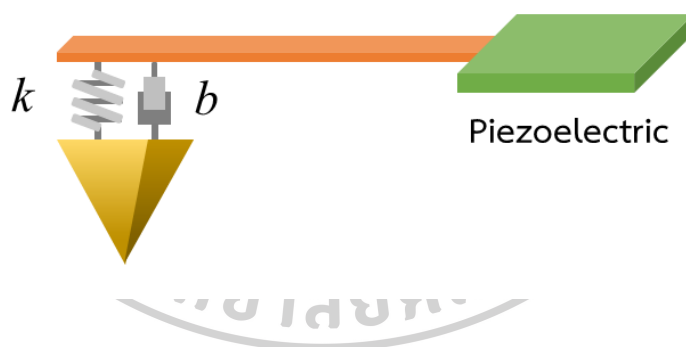
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในขั้นตอนการวัด หัววัดถูกสั่นด้วยความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด และมีกระบวนการทำงานเพื่อให้แรงที่วัดเป็นแรงแม่เหล็กเพียงแรงเดียว ซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็นสองขั้นตอน ในขั้นแรกหัววัดจะกวาดไปบนพื้นผิวของวัตถุเพื่อหาความสูงหรือสภาพพื้นผิวเป็นตัวอ้างอิง ในการวัดครั้งที่สอง หัววัดจะกวาดไปในตำแหน่งเดิม โดยการกวาดพื้นผิวในครั้งนี้มี การยกคานให้มีความสูงค่า ๆ หนึ่งจากพื้นผิว (เป็นระดับความสูงที่มีเพียงแรงแม่เหล็กกระทำต่อหัววัด) ซึ่งเป็นความสูงที่อ้างอิงจากการวัดครั้งแรก โดยจะเรียกการทำงานในลักษณะดังกล่าวว่า โหมดการตรวจวัดแบบไม่สัมผัสที่มีระยะห่างคงที่ (lift mode) การทำงานในโหมดนี้ทำให้หัววัดตอบสนองต่อแรงทางแม่เหล็กเพียงแรงเดียวเท่านั้น สนามแม่เหล็กที่มีขนาดและทิศทางพุ่งเข้าหรือออกจากวัตถุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการสั่นของหัววัด ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงการสั่นของหัววัดด้วยลำแสงของเลเซอร์ที่

สะท้อนจากหัววัดไปยัง PSD sensor ซึ่งจะเปลี่ยนการกวัดแกว่งของลำเลเซอร์ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า สัญญาณไฟฟ้าที่ได้นี้ถูกวัดให้ออกมาอยู่ในรูปของแอมพลิจูดและเฟสโดยเครื่องขยายสัญญาณล็อกอิน (lock-in amplifier) สัญญาณเหล่านี้จะถูกแปลงให้ออกมาเป็นภาพต่อไป

2.1.1 การตอบสนองทางด้านความถี่

การวัดการตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะพิจารณาจากการสั่นของหัววัด โดยที่สมมติให้โมเดลการสั่นของหัววัดมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 2.2 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อมีแรงมากระทำกับหัววัดในแนวแกน Z ส่งผลให้หัววัดมีการสั่นอยู่ในแนวแกน Z เมื่อการสั่นของหัววัดถูกควบคุมให้มีการสั่นในรูปแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ (simple harmonics) เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะสมมติว่าหัววัดมีลักษณะเป็นจุดมวล (point mass) [16] ซึ่งประมาณว่าหัววัดมีขนาดเล็กมากเทียบได้เป็นจุดจึงไม่มีแรงภายในหัววัด แรงที่ป้อนให้กับหัววัดเพื่อให้หัววัดเกิดการสั่นที่มีลักษณะเป็นคาบคือ $F_{Drive}(t) = F_0 e^{i\omega t}$ ณ ความถี่ค่าหนึ่ง โดยที่ F_0 คือขนาดของแรงที่กระทำกับหัววัด แรงยืดหยุ่นของคาน (elastic force) จะอยู่ในรูปค่าคงที่ของสปริง (spring constant : k) และมีสัมประสิทธิ์ความหน่วง (damping coefficient : b)



รูปที่ 2.2 โมเดลของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยพิจารณาว่าหัววัดมีการเคลื่อนขึ้นลงโดยติดอยู่กับสปริง

การพิจารณาโมเดลของหัววัดในรูปที่ 2.2 จะให้คานอยู่กับที่ โดยมีเพียงหัววัดที่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z ดังนั้นระยะของหัววัดที่ตำแหน่งใดสามารถหาได้จาก $z(t) = A_0 e^{i(\omega t - \phi)}$ โดยที่ A_0 คือขนาดของแอมพลิจูดสูงสุดในการสั่นของหัววัด และ $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ คือความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด การเคลื่อนที่ของหัววัดอธิบายได้ดังสมการที่ 2.1

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + kz(t) = F_0 e^{i\omega t} \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง (second order differential equation) ซึ่งสามารถหาผลของแอมพลิจูดและเฟสของการสั่นได้ดังนี้ [16]

จัดรูปสมการที่ 2.1 ใหม่และหารด้วย m ทั้งสมการ

$$\left(-\omega^2 A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} + \omega_0^2 A_0\right) e^{i(\omega t - \phi)} = \frac{F_0 e^{i\omega t}}{m} \quad (2.2)$$

$$(\omega_0^2 - \omega^2) A_0 + \frac{ib\omega A_0}{m} = \frac{F_0 e^{i\phi}}{m} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.3 จะเห็นว่าเทอมด้านซ้ายมือจะอยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งประกอบด้วยส่วนจริง (real part) และส่วนจินตภาพ (imaginary part) รูปแบบดังกล่าวสามารถเขียนออกมาให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler's formula) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันตรีโกณมิติกับฟังก์ชันเลขชี้กำลังเชิงซ้อนได้คือ $e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t$

เมื่อพิจารณาส่วนจำนวนจริงจะได้

$$\cos \phi = \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) A_0}{\frac{F_0}{m}} \quad (2.4)$$

$$(\omega_0^2 - \omega^2) A_0 = \frac{F_0}{m} \cos \phi \quad (2.5)$$

และพิจารณาส่วนจำนวนจินตภาพจะได้

$$\sin \phi = \frac{\frac{b\omega A_0}{m}}{\frac{F_0}{m}} \quad (2.6)$$

$$\frac{F_0}{m} \sin \phi = \frac{b\omega A_0}{m} \quad (2.7)$$

จากนั้นนำสมการที่ 2.5 และ 2.7 มายกกำลังสองจะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

$$\left\{(\omega_0^2 - \omega^2) A_0\right\}^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \cos^2 \phi \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{b\omega A_0}{m}\right)^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \sin^2 \phi \quad (2.9)$$

นำสมการที่ 2.8 บวกกับ 2.9 จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$(\omega_0^2 - \omega^2)^2 A_0^2 + b\omega^2 A_0^2 = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \quad (2.10)$$

$$A_0^2 \left[(\omega_0^2 - \omega^2) + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2 \right] = \left(\frac{F_0}{m}\right)^2 \quad (2.11)$$

$$A = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \left(\frac{b\omega}{m}\right)^2}} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จัดรูปของสมการให้อยู่ในเทอมของความถี่โดยการแทนค่า Q factor ซึ่งมีค่า $Q = \frac{\sqrt{mk}}{b}$ ในสมการที่ 2.12 จะได้แอมพลิจูดของการสั่นเป็นไปดังสมการที่ 2.13

$$A = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega\omega_0/Q)^2}} \quad (2.13)$$

ในส่วนของเฟสการสั่นสามารถคำนวณได้จาก

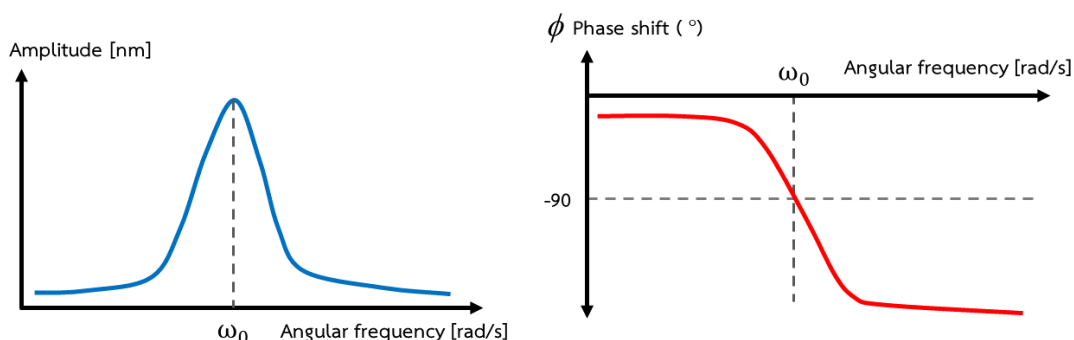
$$\tan \phi = -\frac{b\omega A_0}{(\omega_0^2 - \omega^2)A_0} \quad (2.14)$$

จัดรูปสมการที่ 2.14 ใหม่ได้

$$\tan \phi = -\frac{\omega_0\omega}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (2.15)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(-\frac{\omega\omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right) \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาในระบบที่ให้แรงกระตุ้นกับหัววัด เพื่อให้หัววัดมีการสั่นในรูปแบบของคลื่นไซน์ จะพบว่าเมื่อระบบเกิดการสั่นและเข้าสู่สภาวะสมดุล ขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของการสั่นจะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.13 และ 2.16 ตามลำดับ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่สั่นให้กับหัววัด ขนาดของแอมพลิจูดและเฟสก็จะเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 2.3



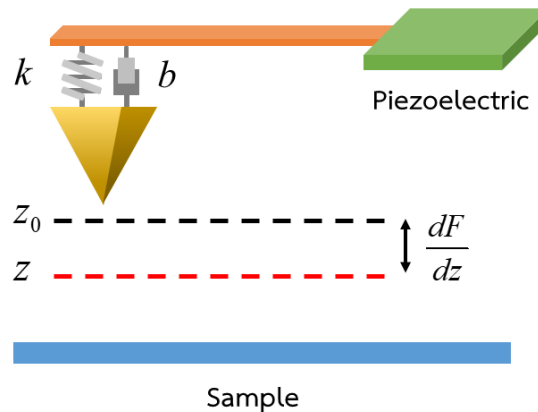
รูปที่ 2.3 ผลการจำลองการตอบสนองทางความถี่ของหัววัดที่พิจารณาว่าหัววัดมีลักษณะเป็นแบบจุดมวล (ซ้าย) ขนาดของแอมพลิจูดที่ความถี่ต่างกัน (ขวา) ผลของเฟสที่ความถี่ต่างกัน

จากรูปที่ 2.3 (ซ้าย) จะเห็นว่าเมื่อให้หัววัดสั่นด้วยความถี่ที่ค่าเดียวกันกับความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด ขนาดของแอมพลิจูดในการสั่นของหัววัดจะให้ค่าสูงสุดและมีค่าลดลงเมื่อความถี่ในการสั่นหัววัดมีค่าออกห่างจากความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด และในรูปที่ 2.3 (ขวา) จะพบว่าเมื่อความถี่ที่ใช้ในการสั่นของหัววัดเป็นความถี่เดียวกันกับความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด จะมีเฟสในการสั่นอยู่ 90 องศาเมื่อเทียบกับสัญญาณที่กระตุ้นให้หัววัดสั่น แต่เมื่อความถี่ที่ทำให้หัววัดสั่นมีค่าต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด ค่าของเฟสจะมีค่าเข้าสู่ 0 องศา ในขณะที่ความถี่ทำให้หัววัดเกิดการสั่นมีค่าสูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดความต่างเฟสจะมีค่าเข้าสู่ 180 องศา

2.1.2 การตอบสนองต่อแรงทางแม่เหล็ก

การวัดการตอบสนองทางแม่เหล็กเป็นการวัดแรงทางแม่เหล็กที่กระทำกับหัววัด ในการพิจารณาจะสมมติให้หัววัดมีลักษณะเป็นจุดมวล ซึ่งจะลดความซับซ้อนในการตีความลง เนื่องจากการพิจารณาหัววัดเป็นจุดมวลจึงไม่สนใจแรงภายในหัววัด (ในความจริง วัตถุต่าง ๆ จะมีปริมาตรหรือก็คือจุดมวลหลาย ๆ จุดรวมกันอยู่ ซึ่งจุดมวลแต่ละจุดจะมีแรงอันตรกิริยากระทำระหว่างกันมากมาย เพื่อลดความซับซ้อนในการพิจารณาจะให้การเคลื่อนที่เป็นกลุ่มมวล) ระยะห่างระหว่างหัววัดและชิ้นงานตัวอย่างเป็นตัวแปรสำคัญต่อการเกิดแรงปฏิกริยาระหว่างหัววัดและชิ้นงานตัวอย่าง การพิจารณาต่อไปนี้จะกำหนดให้ความสูงเริ่มต้นของหัววัดมีความสูงเป็น z_0 และมีแรง F เป็นแรงที่กระทำต่อหัววัด โดยผลของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อหัววัดจะส่งทำให้เสมือนว่า ค่าคงที่ของสปริงเกิดการเปลี่ยนแปลงไป [17] การที่เสมือนว่าค่าคงที่ของสปริงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจะพิจารณาค่าอยู่ในรูปของค่าคงที่ยังผลของสปริง (effective spring constant : k_{eff}) จากรูปที่ 2.4 แรงแม่เหล็กที่กระทำ

ต่อหัววัดจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของ z โดยที่ระบบการสั่นของหัววัดจะเปลี่ยนไปตามเกรเดียนต์แรงแม่เหล็ก $\frac{dF}{dz}$ ที่ z ใด ๆ ลักษณะดังนี้ทำให้เกิดค่าคงที่ยังผลของสปริงดั่งสมการ $k_{eff} = k - \frac{dF}{dz}$



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการวัดแรงแม่เหล็กบนชิ้นงาน

ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของหัววัดสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + k(z(t) - z_0) = F_0 e^{i\omega t} + F \quad (2.17)$$

เนื่องจากแรงปฏิกิริยาที่กระทำระหว่างหัววัดกับตัวอย่างมีขนาดน้อยมาก แต่ยังมีขนาดเพียงพอที่จะไปรบกวนระบบการสั่นของหัววัด และเนื่องจากระบบการสั่นของหัววัดมีแอมพลิจูดการสั่นน้อย ทำให้สามารถใช้การกระจายของเทเลอร์ (Taylor expansion) มาอธิบายการสั่นรอบสมดุลนี้ได้ ดังสมการที่ 2.18

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + k(z - z_0) = F_0 e^{i\omega t} + F_{z=z_0} + \left(\frac{dF}{dz} \right) \Big|_{z=z_0} (z - z_0) \quad (2.18)$$

$$m\ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + \left[k - \left(\frac{dF}{dz} \right) \Big|_{z=z_0} \right] (z - z_0) = F_0 e^{i\omega t} + F_{z=z_0} \quad (2.19)$$

โดยปกติแล้วขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของการสั่นของหัววัดเมื่อไม่มีแรงแม่เหล็กมากระทำสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 2.13 และ 2.16 แต่เมื่อระบบถูกรบกวนด้วยแรงแม่เหล็กที่มากระทำกับหัววัด ส่งผลทำให้เกิดค่าคงที่ยังผลของสปริงและเกรเดียนต์แรงแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้องดังสมการที่ 2.19 ทำให้หัววัดมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ (ω'_0)

โดยทั่วไปค่าของ $\left(\frac{dF}{dz}\right)_{z=z_0} \ll k$ ทำให้สามารถประมาณคำตอบด้วยอนุกรมการกระจายของเทเลอร์อันดับที่หนึ่ง (first order Taylor polynomial) ดังนี้

$$\omega'_0 \approx \sqrt{\frac{k_{eff}}{m}} \approx \sqrt{\frac{k - \left(\frac{dF}{dz}\right)}{m}} = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{dF}{dz}}{k}} \quad (2.20)$$

$$\omega'_0 \approx \omega_0 \cdot \left(1 - \frac{\frac{dF}{dz}}{2k}\right) \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 จะเห็นว่าเมื่อระบบของการสั่นมีแรงแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยผลต่างของความถี่เรโซแนนซ์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.22

$$\Delta\omega_0 = \omega'_0 - \omega_0 = \left(\omega_0 - \frac{\omega_0}{2k} \frac{dF}{dz}\right) - \omega_0 \quad (2.22)$$

$$\Delta\omega_0 = -\frac{\omega_0}{2k} \frac{dF}{dz} \quad (2.23)$$

ผลของแรงเกรเดียนท์แม่เหล็กของชิ้นงานตัวอย่างที่กระทำต่อหัววัดจะส่งผลทำให้แอมพลิจูดของการสั่นที่ความถี่เรโซแนนซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งขนาดของแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไป ณ ความถี่เรโซแนนซ์สามารถประมาณได้ด้วยสมการที่ 2.24

$$\Delta A \approx \frac{2A_0 Q}{3\sqrt{3}k} \frac{dF}{dz} \quad (2.24)$$

ตามปกติการสั่นของหัววัดที่ความถี่เรโซแนนซ์จะมีเฟสต่างกันอยู่ $\frac{\pi}{2}$ โดยเมื่อหัววัดมีการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ใหม่ ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ใหม่นี้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์เดิมนั้นคือ $\omega'_0 \approx \omega_0$ ดังนั้น $\omega'_0 + \omega_0 \approx 2\omega_0$ จากสมการที่ 2.15 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

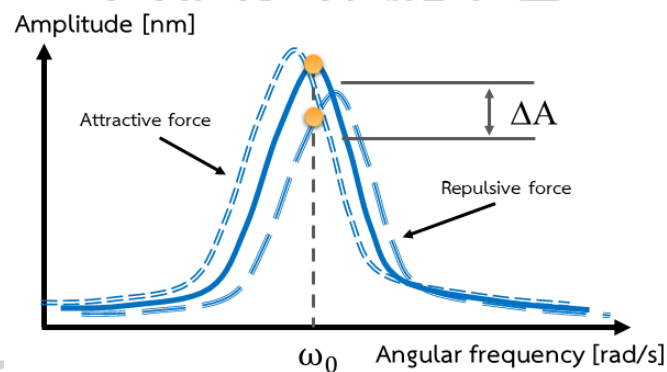
$$\tan \phi = \frac{\omega'_0 \omega}{Q(\omega_0'^2 - \omega^2)} \approx -\frac{\omega^2}{Q[(\omega'_0 + \omega)(\omega'_0 - \omega)]} = \frac{\omega}{2Q\Delta\omega} = \frac{k}{Q \frac{dF}{dz}} \quad (2.25)$$

เนื่องจากความถี่เรโซแนนซ์ใหม่นี้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์เดิม ซึ่งมีความต่างเฟสอยู่ที่ $\frac{\pi}{2}$ จะสามารถหาความต่างเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปได้ได้ด้วยสมการที่ 2.25 จาก $\phi = -\frac{\pi}{2} + \Delta\phi$ ดังสมการที่ 2.26

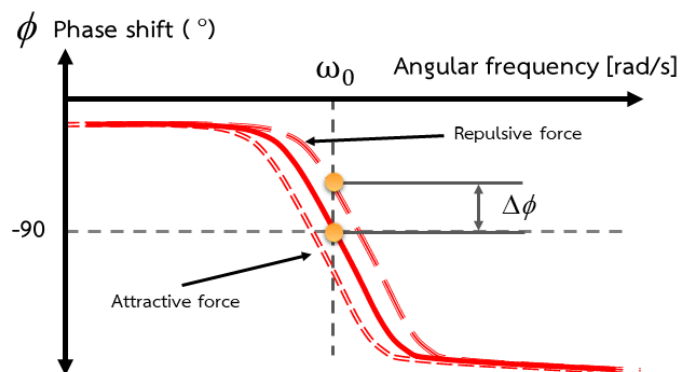
$$\phi = -\frac{\pi}{2} + \Delta\phi = \arctan\left(\frac{k}{Q \frac{dF}{dz}}\right) \approx -\frac{\pi}{2} - \frac{Q \frac{dF}{dz}}{k} \quad (2.26)$$

ดังนั้นผลต่างของเฟสที่เปลี่ยนแปลง $\Delta\phi$ ไปจาก $\frac{\pi}{2}$ เป็นไปตามสมการที่ 2.27

$$\Delta\phi \approx -\frac{Q}{k} \frac{dF}{dz} \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.5 ผลของแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อระบบได้รับแรงแม่เหล็กมากกระทำ

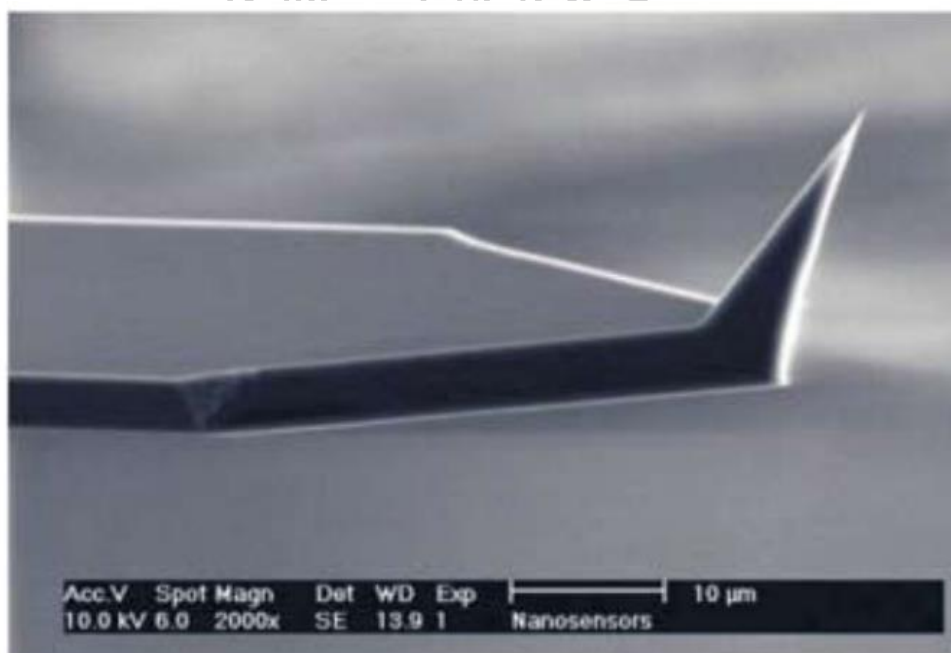


รูปที่ 2.6 ผลของเฟสในการสั่นที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อระบบได้รับแรงแม่เหล็กมากกระทำ

จากรูปที่ 2.5 และ 2.6 จะเป็น ΔA และ $\Delta\phi$ ที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากมีแรงแม่เหล็กจากชิ้นงานตัวอย่างที่กระทำต่อหัววัด โดยค่าของแอมพลิจูดและเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.24 และ 2.27 ตามลำดับ

2.1.3 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากทำหน้าที่ในการตรวจวัดแรงแม่เหล็ก หัววัดที่ผลิตในปัจจุบันมีขนาดเล็กมากดังรูปที่ 2.7 โดยปกติแล้วหัววัดจะทำมาจากซิลิกอน (Si) แล้วเคลือบด้วยสารแม่เหล็กเพื่อใช้ในการตรวจวัดแรงแม่เหล็ก ซึ่งสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบนั้นมีทั้งสารแม่เหล็กแบบอ่อน (soft magnetic material) และสารแม่เหล็กแบบแข็ง (hard magnetic material) โดยสารที่เคลือบบนหัววัดจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน แต่โดยส่วนมากมักนิยมใช้หัววัดที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กแบบอ่อน เนื่องจากจะไม่มีผลของสนามแม่เหล็กจากหัววัดไปรบกวนโมเมนต์แม่เหล็กภายในชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัด
ที่มา : (15 May 2016). AdvancedTEC™ Silicon-SPM-Probes. Available:
<http://www.nanosensors.com/pdf/AdvancedTEC.pdf>

เมื่อหัววัดอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงกระทำกับหัววัด โดยแรงที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ในรูปของพลังงานซีแมน (zeeman energy : E) ดังสมการที่ 2.28 ซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดจากโมเมนต์แม่เหล็กของวัตถุนั้นพยายามเรียงตัวไปตามทิศของสนามแม่เหล็กภายนอก [16]

$$E = -\mu_0 \int \vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample} dV_{tip} \quad (2.28)$$

เมื่อ μ_0	คือ ค่าซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของสุญญากาศ
\vec{M}_{tip}	คือ แมกนีไทเซชันของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด
\vec{H}_{sample}	คือ สนามแม่เหล็กภายนอกของตัวอย่างที่กระทำต่อหัววัด
dV_{tip}	คือ ปริมาตรเล็ก ๆ ของสารแม่เหล็กที่เคลือบบนหัววัด

จากสมการที่ 2.28 สามารถหาค่าในรูปแบบของแรงที่กระทำต่อหัววัดได้ดังสมการที่ 2.29

$$\vec{F}_{tip-sample} = -\vec{\nabla} \cdot E = \mu_0 \int \vec{\nabla} (\vec{M}_{tip} \cdot \vec{H}_{sample}) dV_{tip} \quad (2.29)$$

เมื่อ $\vec{F}_{tip-sample}$ คือ แรงทางแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างหัววัดกับผิวของตัวอย่าง

จากสมการที่ 2.29 เมื่อพิจารณาให้หัววัดสั้นอยู่ในแนวแกน Z เพียงแกนเดียวจะสามารถเขียนสมการได้ใหม่เป็น

$$\vec{F}_{tip-sample} = \hat{k} \cdot \mu_0 \cdot \int \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial}{\partial z} (\vec{M}_{tip,i} \cdot \vec{H}_{sample,i}) dV_{tip} \quad (2.30)$$

เนื่องจากให้สนามแม่เหล็กภายนอกแก่หัววัดในแนวแกน Z เพียงทิศเดียว ดังนั้นแรงที่กระทำต่อหัววัดประมาณได้ดังสมการที่ 2.31

$$\vec{F}_{tip-sample} = \hat{k} \cdot \mu_0 \cdot \int \vec{M}_{tip,total} \cdot \frac{\partial \vec{H}_{sample,Z}}{\partial z} dz = \hat{k} \cdot \mu_0 \cdot \vec{M}_{tip,total} \cdot \vec{H}_{sample} \quad (2.31)$$

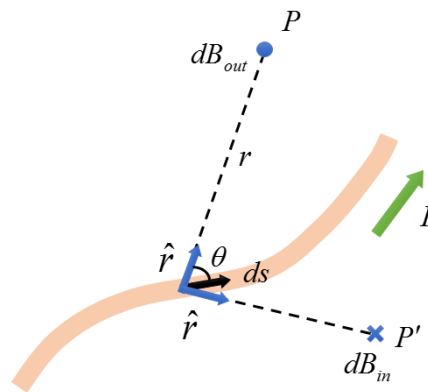
จากสมการจะเห็นว่า ผลลัพธ์ของแรงที่กระทำต่อหัววัดจะขึ้นอยู่กับแมกนีไทเซชันภายในหัววัดและความเข้มของสนามแม่เหล็กภายนอก

2.2 หลักการเกิดสนามแม่เหล็กโดยขดลวดโซลินอยด์

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กโดยใช้ขดลวดโซลินอยด์เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการตรวจวัดความไวในการตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยได้แบ่งหัวข้อย่อยในการอธิบายดังต่อไปนี้

2.2.1 กฎของบีโตร์-ซาวาร์ต (Biot-Savart's Law)

ในปีค.ศ. 1819 สองนักวิทยาศาสตร์คือ Jean-Baptiste Biot และ Félix Savart ได้ทำการทดลองเพื่อหาข้ออธิบายถึงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวด โดยได้อธิบายการเกิดของสนามแม่เหล็กดังกล่าวด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 2.32 โดยเป็นสมการที่อธิบายสนามแม่เหล็ก dB ที่จุด P ซึ่งเป็นจุดตำแหน่งใด ๆ ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านส่วนย่อย ๆ ds ของความยาวเส้นลวด ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สนามแม่เหล็ก dB ณ จุด P ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านส่วนของเส้นลวด ds

- เวกเตอร์ dB มีทิศตั้งฉากกับ ds (มีทิศทางเดียวกับการไหลของกระแสไฟฟ้า) และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ \hat{r} มีทิศทางจาก ds ไปยังจุด P
- ขนาดของ dB แปรผกผันกับสัดส่วนของ r^2 เมื่อ r คือระยะทางจาก ds ไปยังจุด P
- ขนาดของ dB เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้า I และขนาดของส่วนความยาว ds
- ขนาดของ dB เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\sin\theta$ เมื่อ θ เป็นมุมระหว่าง ds กับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ \hat{r}

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.32)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{ds \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.33)$$

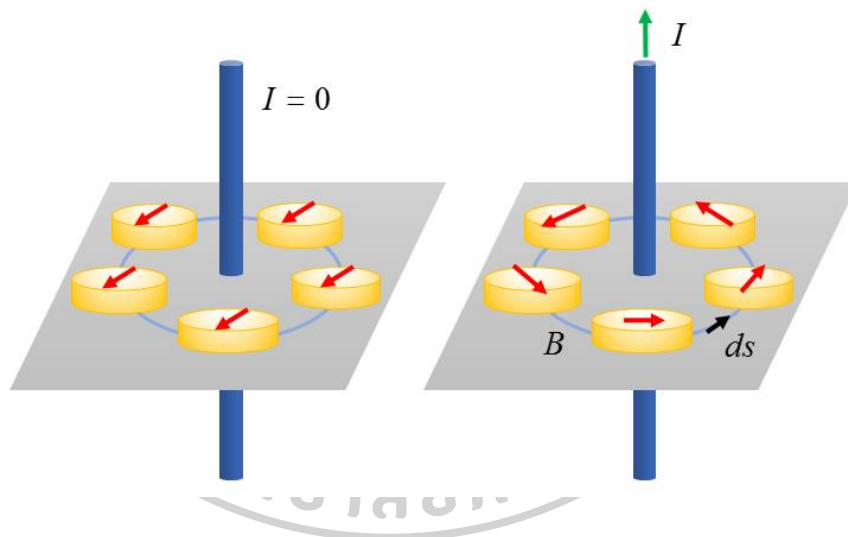
จากสมการที่ 2.32 จะเห็นว่าสนามแม่เหล็ก dB เป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านส่วนของเส้นลวด ds โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำทั้งเส้นจะต้องอินทิเกรตไปตามเส้นทางที่กระแสไหลผ่านตั้งนั้นสมการที่ 2.33

2.2.2 กฎของแอมแปร์ (Ampere's Law)

การค้นพบของ Oersted ในปีค.ศ. 1819 ได้นำมาสู่ทฤษฎีและการค้นพบปรากฏการณ์อีกมากมายในทางแม่เหล็ก หนึ่งในนั้นคือกฎของแอมแปร์ กฎของแอมแปร์นำมาใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเส้นลวดยาวอนันต์และขดลวดที่มีกระแสไหลผ่าน เมื่อพิจารณาเส้นทางปิดใด ๆ จะได้ผลรวมของสนามแม่เหล็กรอบเส้นทางปิด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวด ตัวนำ โดยสามารถเขียนเป็นรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I \quad (2.34)$$

สนามแม่เหล็กของเส้นลวดยาวอนันต์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าไม่มีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเส้นลวดตัวนำเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวด แต่เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดโดยมีลักษณะหมุนวนเป็นวงกลมรอบเส้นลวดตัวนำ



รูปที่ 2.9 ทิศของสนามแม่เหล็กรอบเส้นลวดตัวนำ (ซ้าย) ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวด (ขวา) มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวด

สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้โดยสมมติให้มีเส้นทางปิดรอบเส้นลวดตัวนำที่อยู่ห่างออกไปจากเส้นลวดเป็นระยะ r ซึ่งขนาดของสนามแม่เหล็ก dB จะมีค่าคงที่ตลอดเส้นทางปิด และทิศทางของสนามแม่เหล็ก dB มีทิศเดียวกันกับทิศทางของส่วนย่อย ๆ ds ของเส้นลวดตัวนำ จากสมการที่ 2.34 จะได้เขียนได้ใหม่เป็น

$$B \oint ds = B(2\pi r) = \mu_0 I \quad (2.35)$$

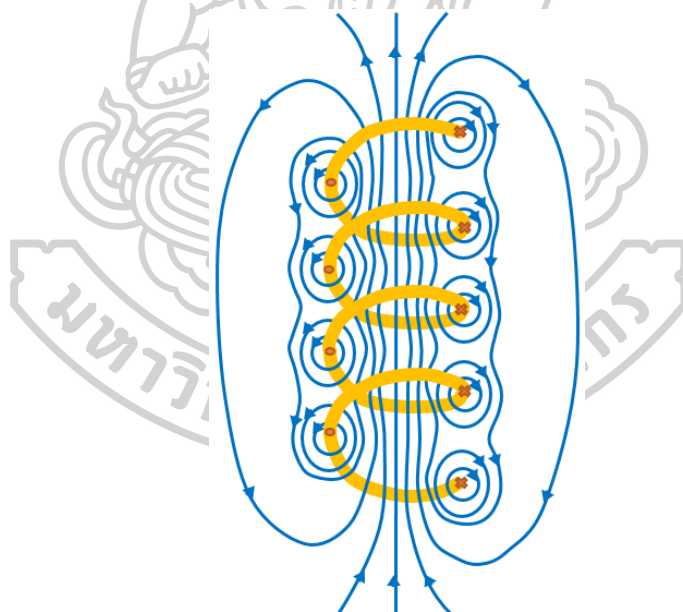
ดังนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็น

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ 2.36 จะเห็นว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน I จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลภายในขดลวด และความเข้มของสนามแม่เหล็กจะแปรผกผันกันระยะห่างจากเส้นลวด

2.2.3 สนามแม่เหล็กในขดลวดโซลินอยด์

โซลินอยด์เป็นเส้นลวดยาวที่ถูกนำมาขดเป็นวงเรียงซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าวิ่งในขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในขดลวดจะมีลักษณะเป็นสนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอ เนื่องจากผลการรวมกันแบบเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กจากขดลวดแต่ละวง ดังรูปที่ 2.10

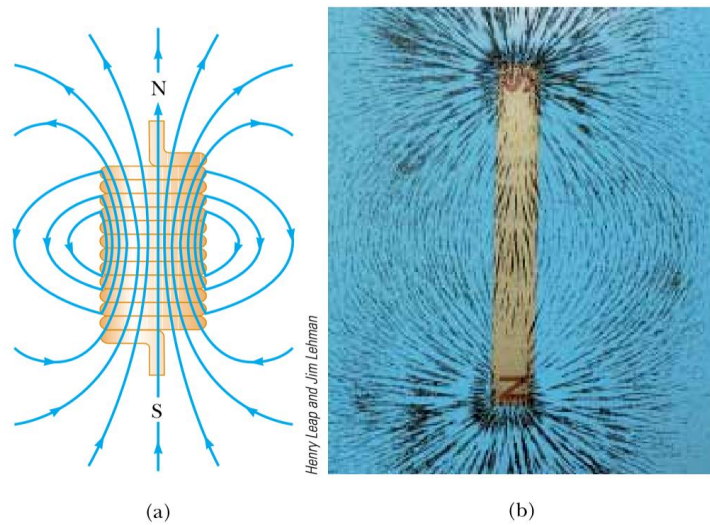


รูปที่ 2.10 เส้นแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยด์

แก้ไขจาก : (18 February 2016). Magnetization. Available:

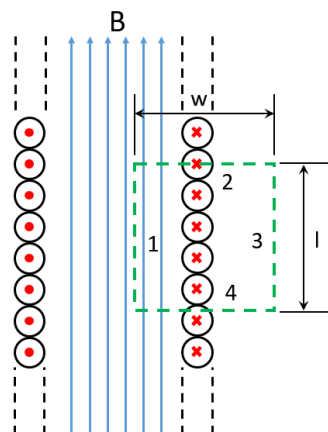
<http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide09.pdf>

โซลินอยด์ที่วงลวดชิดกันและมีความยาวค่าหนึ่งจะพบว่าแม่เหล็กเป็นดังรูปที่ 2.11 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ปรากฏมีลักษณะคล้ายกับลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็ก บริเวณปลายของขดลวดโซลินอยด์ด้านหนึ่งมีพฤติกรรมเป็นขั้วแม่เหล็กเหนือและอีกด้านเป็นขั้วแม่เหล็กใต้ ถ้าเพิ่มความยาวของโซลินอยด์ให้ยาวขึ้นสนามแม่เหล็กบริเวณตรงกลางของขดลวดโซลินอยด์จะมีความสม่ำเสมอยิ่งขึ้นและสนามแม่เหล็กรอบนอกของขดลวดจะลดลง



รูปที่ 2.11 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจาก (ซ้าย) การเหนี่ยวนำของขดลวดโซลินอยด์ (ขวา) แท่งแม่เหล็ก

ที่มา : R. A. Serway and J. W. Jewett, Physics for Scientists and Engineers. Thomson-Brooks/Cole, 2004.



รูปที่ 2.12 ภาพตัดขวางของโซลินอยด์อุดมคติ บริเวณภายในขดลวดสนามแม่เหล็กจะมีความสม่ำเสมอส่วนบริเวณภายนอกของขดลวดโซลินอยด์สนามแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

ลักษณะของโซลินอยด์อุดมคติสามารถพบได้ เมื่อวงของขดลวดชิดติดกันและโซลินอยด์มีความยาวมากกว่าระยะของรัศมีมาก ๆ รูปที่ 2.12 ในรูปที่เป็นภาพตัดขวางส่วนหนึ่งของโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าขนาด I ไหลอยู่และพบว่ามีสนามแม่เหล็กด้านนอกของขดลวดน้อยมาก โดยมีขนาดเข้าใกล้ศูนย์ และสนามแม่เหล็กภายในขดลวดมีขนาดเท่ากันและมีความสม่ำเสมอ

สำหรับโซลินอยด์อุดมคติสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์ (\vec{B}) มีความสม่ำเสมอและขนานไปตามแกนของโซลินอยด์ ลักษณะดังกล่าวถ้าพิจารณาโดยใช้กฎของแอมแปร์เพื่อหาสนามแม่เหล็กภายในโซลินอยด์ (\vec{B}) โดยจะหาได้จาก การสร้างเส้นสี่เหลี่ยมที่มีความยาว l และมีความกว้าง w ดังรูปที่ 2.12 และคำนวณหาสนามแม่เหล็กได้จากการอินทิกรัล $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ ของแต่ละด้านในรูปสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้น ผลการคำนวณพบว่าด้านที่ 2 และ 4 ผลลัพธ์ออกมาเป็นศูนย์ เนื่องจากสนามแม่เหล็ก (\vec{B}) ตั้งฉากกับ $d\vec{s}$ และด้านที่ 3 ผลลัพธ์ออกมาเป็นศูนย์เช่นกันเนื่องจากพิจารณาว่ามีสนามแม่เหล็กด้านนอกของโซลินอยด์มีน้อยมากหรือเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นจึงเหลือด้านที่ 1 เพียงด้านเดียวและสนามแม่เหล็กภายในมีความสม่ำเสมอ (\vec{B}) และขนานไปกับ $d\vec{s}$ ผลของการอินทิเกรตเส้นทางรอบสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นนี้จึงได้ตั้งสมการที่ 2.37

$$\oint_{\text{path1}} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_{\text{path1}} \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \int_{\text{path1}} ds = Bl \quad (2.37)$$

กระแสที่ไหลผ่านในช่วงที่พิจารณาก็คือ ผลรวมของกระแสที่ไหลภายในของขดลวดแต่ละวง ซึ่งก็คือ NI โดยที่ N คือจำนวนรอบของขดลวดในโซลินอยด์ยาว l และ I คือขนาดของกระแสไฟฟ้า ซึ่งการประยุกต์ใช้กฎของแอมแปร์จะได้ตั้งสมการที่ 2.39

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = Bl = \mu_0 NI \quad (2.38)$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I \quad (2.39)$$

เมื่อ n คือ จำนวนรอบของขดลวดต่อความยาวของโซลินอยด์

ผลจากสมการที่ 2.39 ทำให้ทราบว่า ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยขดลวดโซลินอยด์ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบของขดลวดต่อความยาวของโซลินอยด์ และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดโซลินอยด์

2.3 วงจรขยายไฟฟ้าเบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบวงจรขยายไฟฟ้าเพื่อขยายสัญญาณจาก PSD sensor ซึ่งวงจรที่ได้ทำการออกแบบนี้ใช้ออปแอมป์ (operation amplifier, op-amp) เป็นตัวหลักในการทำหน้าที่

ขยายสัญญาณไฟฟ้า โดยทำการขยายสัญญาณในสองรูปแบบ คือ การขยายสัญญาณแบบรวมแรงดัน (summing amplifier) และการขยายสัญญาณแบบแรงดันผลต่าง (difference amplifier) ซึ่งมีวัตถุประสงค์การใช้งานแตกต่างกันออกไป ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการต่าง ๆ เกี่ยวกับวงจรขยายสัญญาณ โดยได้ทำการแบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

2.3.1 ออปแอมป์เบื้องต้น

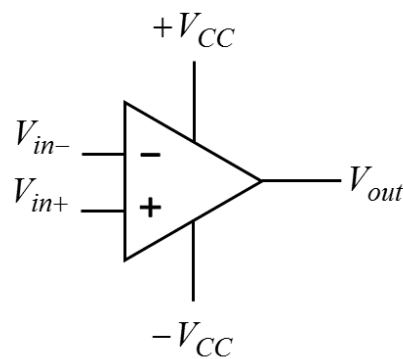
ออปแอมป์ (operation amplifier, op-amp) หรือวงจรขยายเชิงดำเนินการเป็นอุปกรณ์วงจรรวมหรือไอซีประเภทเชิงเส้น (linear integrated circuit) เป็นวงจรขยายสัญญาณที่มีอัตราขยายสูง ตอบสนองความถี่ได้ตั้งแต่ DC จนถึงความถี่สูงหลายเมกะเฮิรตซ์ ออปแอมป์ถูกออกแบบครั้งแรกในปี 1948 เพื่อช่วยปฏิบัติการด้านคณิตศาสตร์ในเครื่องอนาล็อกคอมพิวเตอร์ (analog computer) ปัจจุบันได้มีการนำเอาออปแอมป์ไปใช้งานในด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ความก้าวหน้าในพัฒนาการผลิตวงจรรวม (integrated circuit, IC) วงจรทั้งหมดของออปแอมป์สามารถผลิตรวมกันไว้บนแผ่นซิลิกอนขนาดจิ๋ว ซึ่งจะถูกบรรจุในตัวถังพลาสติกแบบ DIP 8 ขา ด้วยเหตุนี้ออปแอมป์จึงเป็นวงจรรวมที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นการใช้ออปแอมป์ในวงจรขยายเสียง วงจรรีจูลเตอร์ วงจรเครื่องมือวัด วงจรกำเนิดสัญญาณ วงจรในระบบควบคุมอัตโนมัติ วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ วงจรแปลงสัญญาณ วงจรอินเทอร์เฟซระหว่างสัญญาณอนาล็อกและดิจิตอล รวมทั้งวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นต้น



รูปที่ 2.13 ภาพถ่ายของออปแอมป์เบอร์ CA3140

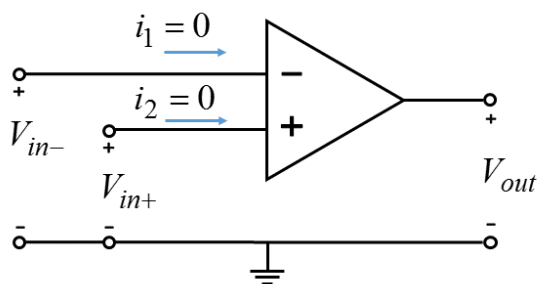
ออปแอมป์ในอุดมคติ

สัญลักษณ์ของออปแอมป์ดังรูปที่ 2.14 เป็นรูปสามเหลี่ยมมี 2 อินพุต คืออินพุตลบ (inverting input, -) และอินพุตบวก (non-inverting input, +) และมี 1 เอาต์พุต มีแหล่งจ่ายไฟให้กับออปแอมป์ คือ $+V_{CC}$ แรงดันไบอัสบวก และ $-V_{CC}$ แรงดันไบอัสลบ



รูปที่ 2.14 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

การออกแบบวงจรหรือพิจารณาวงจรออปแอมป์มักพิจารณาว่าออปแอมป์เป็นออปแอมป์ในอุดมคติเพื่อให้เข้าใจง่ายและ สะดวกต่อการคำนวณ ออปแอมป์ในอุดมคติแสดงดังรูป 2.15 การพิจารณาออปแอมป์ในอุดมคติจะพิจารณาว่าออปแอมป์มีอัตราขยายลูปเปิดมีค่าเป็นอนันต์ ความต้านทานอินพุตมีค่าเป็นอนันต์ และ ที่เอาต์พุตไม่มีความต้านทาน ดังนี้



รูปที่ 2.15 วงจรออปแอมป์ในอุดมคติ

การพิจารณาออปแอมป์ในอุดมคติจะพิจารณาว่าออปแอมป์มีอัตราขยายลูปเปิดมีค่าเป็นอนันต์ อิมพีแดนซ์อินพุตมีค่าเป็นอนันต์ และ ที่เอาต์พุตมีอิมพีแดนซ์เป็นศูนย์ ดังนี้

$$A = \infty$$

$$Z_i = \infty$$

$$Z_o = 0$$

เมื่อพิจารณาจากหลักดังกล่าวจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าออปแอมป์ทางด้านอินพุตจะเท่ากับศูนย์ดังสมการ 2.40 และแรงดันไฟฟ้าที่ขาบวกและขาลบจะมีค่าเท่ากัน ดังสมการ 2.41

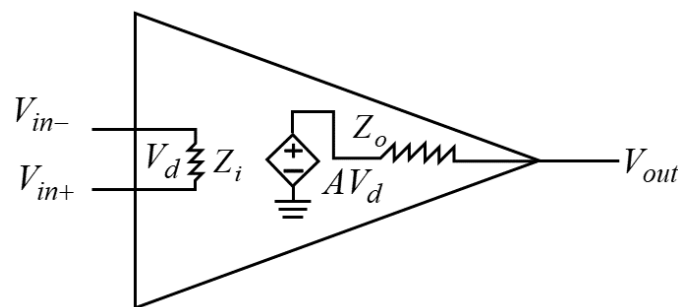
$$i_- = 0, i_+ = 0 \text{ หรือ } i_- = i_+ \quad (2.40)$$

$$V_+ = V_- \quad (2.41)$$

นอกจากนั้นแล้วแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าไม่เกินแรงดันที่จ่ายให้กับออปแอมป์และการทำงานของออปแอมป์ยังไม่ขึ้นกับอุณหภูมิอีกด้วย

วงจรรออปแอมป์ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ

ออปแอมป์ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ (non-ideal) จะพิจารณาวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรรออปแอมป์ในสถานะที่ไม่เป็นอุดมคติ

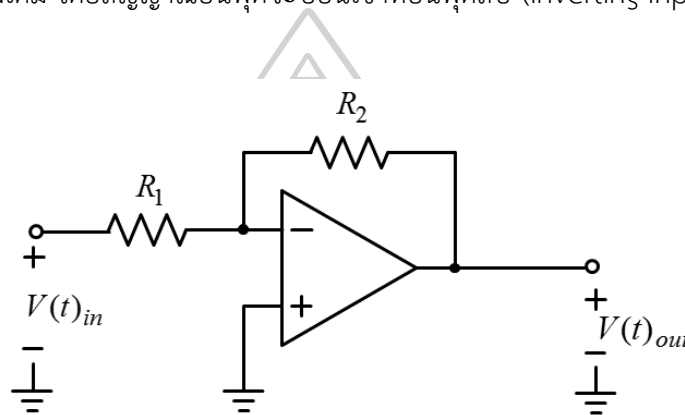
กำหนดให้	Z_i	คืออิมพีแดนซ์อินพุต
	V_d	คือผลต่างของแรงดันอินพุต ($V_d = V_{in+} - V_{in-}$)
	Z_o	คืออิมพีแดนซ์เอาต์พุต
	A	คืออัตราขยายแรงดัน (voltage gain)
	V_o	คือแรงดันเอาต์พุต
	V_{in-}	คือแรงดันอินพุตที่ขา ลบ
	V_{in+}	คือแรงดันอินพุตที่ขา บวก

การไบอัสแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายให้กับออปแอมป์โดยปกติจะใช้การไบอัสแบบคู่คือ $+V_{CC} = +$, $-V_{CC} = -$ ค่าแรงดันไบอัสบวกและลบตามปกติมักไม่เกิน 15V ($+V_{CC} = +15V$, $-V_{CC} = -$

15V) และต้องไบอัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าด้วยแรงดันที่เท่ากัน โดยค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสควรพิจารณาจากรุ่นของออปแอมป์นั้น ๆ แรงดันอิมิตัวคือแรงดันเอาต์พุตสูงสุดของออปแอมป์ที่จ่ายออกมาซึ่งค่าแรงดันนี้จะมีค่าไม่เกินกว่าค่าแรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับตัวออปแอมป์ ตามปกติค่าแรงดันอิมิตัวสูงสุดมักจะต่ำกว่าค่าแรงดันไบอัส ประมาณ 1 – 1.5 V

2.3.2 วงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟส (inverting amplifier)

วงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟสเป็นวงจรที่ขยายและกลับสัญญาณอินพุตให้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับของเดิม โดยสัญญาณอินพุตจะป้อนเข้าที่อินพุตลบ (inverting input) ของออปแอมป์



รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

จากคุณสมบัติของออปแอมป์นั้นคือ $V_+ = V_-$ และ $I_+ = I_- = 0$ เมื่อพิจารณาจากวงจรพบว่า

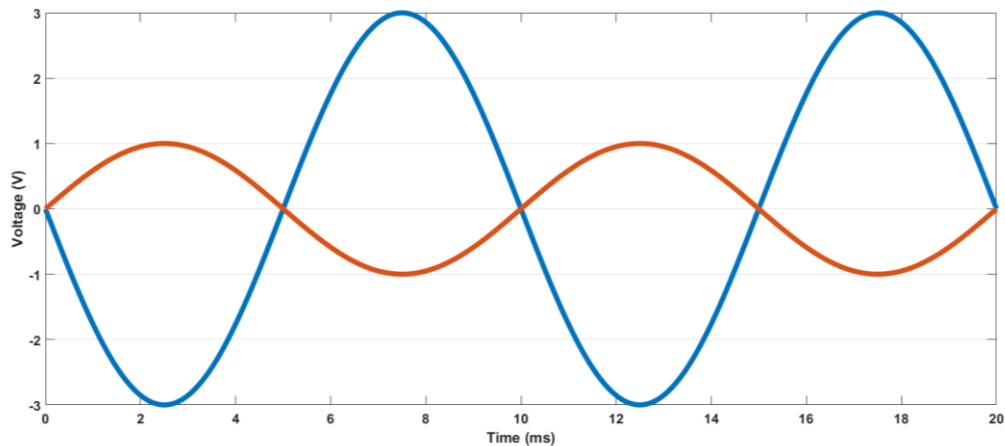
$$\frac{V_- - V_{in}}{R_1} + \frac{V_- - V_{out}}{R_2} = 0 \quad (2.42)$$

เมื่อแทนค่า $V_- = 0$ ในสมการที่ 2.42 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเป็น

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} = A V_{in} \quad (2.43)$$

เมื่อ $-\frac{R_2}{R_1}$ คือ A หรืออัตราขยายแรงดัน (voltage gain)

ผลของการจำลองสัญญาณในวงจรขยายแรงดันแบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 2.18

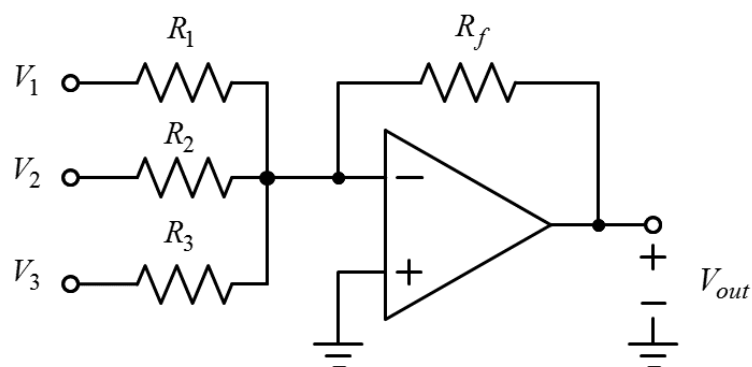


รูปที่ 2.18 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถ่ายแรงดันแบบกลับเฟส โดยมีอัตราขยายแรงดันเป็น 3 เท่า

ผลของการจำลองสัญญาณในวงจรถ่ายแรงดันแบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 2.18 โดยเส้นสีแดงคือสัญญาณอินพุต และเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่ายสัญญาณแบบกลับเฟส ซึ่งมีอัตราขยายแรงดันเป็น 3 เท่า

2.3.3 วงจรถ่ายแรงดันแบบรวมแรงดัน (summing amplifier)

วงจรถ่ายแรงดันแบบรวมแรงดันเป็นวงจรที่รวมอินพุตตั้งแต่ 2 อินพุตขึ้นไปมารวมกันและแรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับผลรวมของแรงดันอินพุตคูณกับอัตราขยายของวงจร รูปที่ 2.19 เป็นตัวอย่างวงจรถ่ายรวมสัญญาณแบบ 3 อินพุต



รูปที่ 2.19 วงจรถ่ายสัญญาณแบบรวมแรงดัน

จากคุณลักษณะของออปแอมป์นั้นคือ $V_+ = V_-$ และ $I_+ = I_- = 0$ เมื่อพิจารณาจากวงจรจะพบว่า

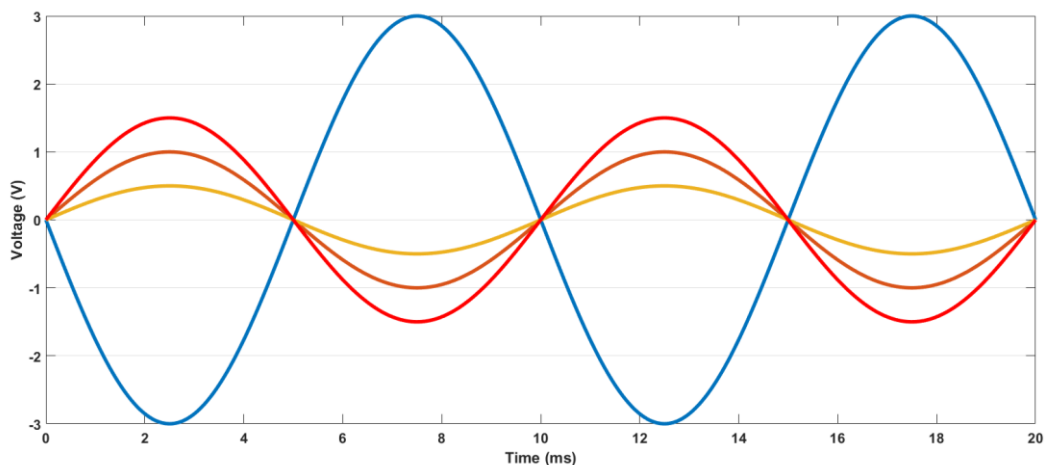
$$\frac{V_- - V_1}{R_1} + \frac{V_- - V_2}{R_2} + \frac{V_- - V_3}{R_3} + \frac{V_- - V_{out}}{R_f} = 0 \quad (2.44)$$

เมื่อแทนค่า $V_- = 0$ ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตเป็น

$$\frac{-V_1}{R_1} + \frac{-V_2}{R_2} + \frac{-V_3}{R_3} + \frac{-V_{out}}{R_f} = 0 \quad (2.45)$$

ถ้า $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ ทำให้ $A = -\frac{R_f}{R}$ ดังนั้น

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2 + V_3) \quad (2.46)$$

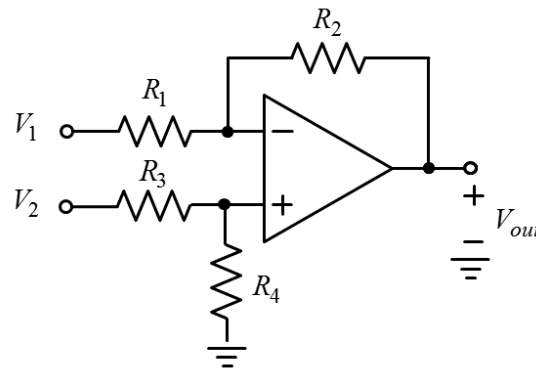


รูปที่ 2.20 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายแรงดันแบบรวมแรงดันแบบ 3 อินพุต

ผลของการจำลองสัญญาณในวงจรขยายแรงดันแบบรวมแรงดันแสดงดังรูปที่ 2.20 โดยเส้นสีแดง ส้ม และเหลือง คือสัญญาณอินพุต และเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณแบบรวมแรงดัน ซึ่งเป็นแรงดันรวมของสัญญาณอินพุตทั้ง 3 โดยมีอัตราขยายแรงดันเป็น 1 เท่า

2.3.4 วงจรขยายแรงดันผลต่าง (difference amplifier)

วงจรขยายแรงดันผลต่างเป็นวงจรที่ทำหน้าขยายแรงดัน ที่เกิดจากผลต่างแรงดันระหว่างแรงดันที่ ป้อนเข้ามาที่อินพุตทั้งสองของวงจรรูปแบบดังรูปที่ 2.21 เมื่อผลต่างของแรงดันอินพุตทั้งสองคือ $V_2 - V_1$



รูปที่ 2.21 วงจรขยายสัญญาณแรงดันผลต่าง

จากรูปที่ 2.21 พิจารณาที่ตำแหน่ง V_+ ด้วยกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$\frac{V_+ - V_2}{R_3} + \frac{V_+}{R_4} = 0 \quad (2.47)$$

$$V_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \quad (2.48)$$

เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง V_- ด้วยกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$\frac{V_- - V_1}{R_1} + \frac{V_- - V_{out}}{R_2} = 0 \quad (2.49)$$

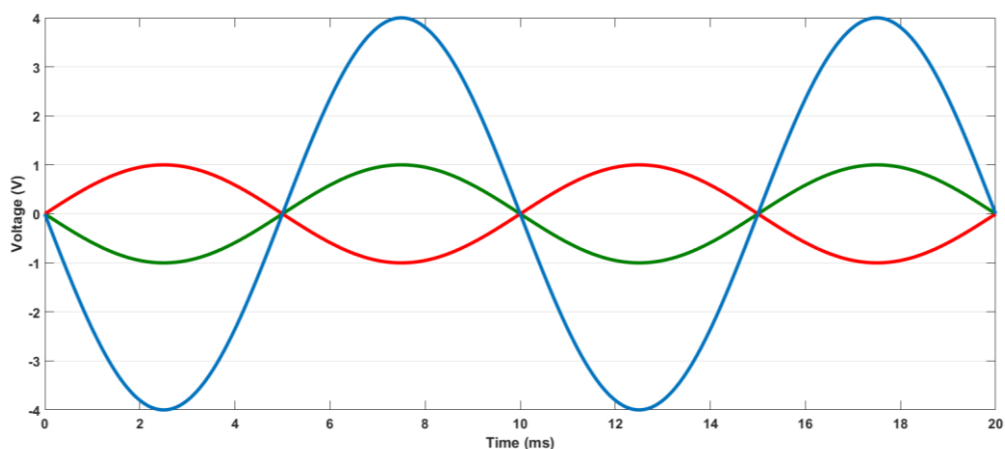
$$V_{out} = \left[\frac{R_2}{R_1} + 1 \right] V_- - \left[\frac{R_2}{R_1} \right] V_1 \quad (2.50)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดัน $V_+ = V_-$ แทนสมการ (2.48) ใน (2.50) จะได้

$$V_{out} = \left[\frac{R_2}{R_1} + 1 \right] \left[\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 \right] - \left[\frac{R_2}{R_1} \right] V_1 \quad (2.51)$$

เมื่อกำหนดให้ $R_1 = R_3 = R_i$ และ $R_2 = R_4 = R_f$ จะได้

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} V_2 - V_1 \quad (2.52)$$



รูปที่ 2.22 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายแรงดันผลต่าง

ผลของการจำลองสัญญาณในวงจรถยายแรงดันผลต่างแสดงดังรูปที่ 2.22 โดยเส้นสีแดง และ สีเขียวคือสัญญาณอินพุต และเส้นสีน้ำเงินคือสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถยายสัญญาณผลต่างแรงดัน โดยมีอัตราขยายแรงดันเป็น 2 เท่า

2.4 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (lock-in amplifier)

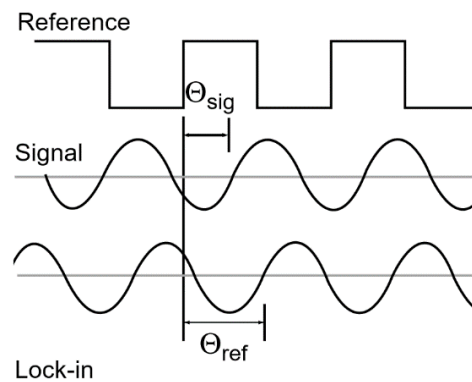
เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณของข้อมูลที่มีความเข้มของสัญญาณต่ำมาก ซึ่งสามารถวัดสัญญาณได้ถึงระดับนาโนโวลต์ และมีความสามารถในการคัดกรองสัญญาณออกจากสัญญาณรบกวน (noise) เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิคการตรวจวัดเฟส (phase-sensitive detection) ซึ่งเป็นเทคนิคการแยกสัญญาณที่ความถี่ค่าหนึ่ง โดยเป็นความถี่เดียวกันกับสัญญาณอ้างอิง สัญญาณรบกวนที่ความถี่อื่นจะถูกคัดแยกออก หรือไม่ส่งผลกับการวัดสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 2.23 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน รุ่น LIA-MV-200-H ผลิตโดยบริษัท Femto

2.4.1 หลักการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินมีลักษณะการทำงานคล้ายกับมิเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltmeter) การทำงานของเครื่องจะป้อนสัญญาณอ้างอิง (reference signal) ที่ความถี่ค่าหนึ่งจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (function generator) จากนั้นเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินจะตอบสนองกับสัญญาณอินพุตที่มีความถี่เดียวกันกับสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนให้กับเครื่อง



รูปที่ 2.24 รูปสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนให้กับเครื่อง สัญญาณที่ต้องการวัดค่า และสัญญาณอ้างอิงที่เครื่องสร้างขึ้น

ที่มา : (26 February 2016). About Lock-In Amplifiers. Available:

<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/AboutLIAs.pdf>

ในการพิจารณาหลักการทำงานของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน เริ่มต้นสัญญาณอ้างอิงจะถูกป้อนให้กับเครื่อง โดยในที่นี้สัญญาณอ้างอิงจะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (square wave) ที่ความถี่ ω_r และสัญญาณอินพุตเป็นไปตามสมการที่ 2.53 เมื่อ V_{sig} คือแอมพลิจูดของสัญญาณ ω_r คือความถี่ของสัญญาณ และ θ_{sig} เป็นเฟสของสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.24

$$V(t) = V_{sig} \sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \quad (2.53)$$

เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินจะสร้างสัญญาณอ้างอิงขึ้นภายในเครื่องจากเฟสล็อกลูป (phase locked loop) โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นจะอ้างอิงจากสัญญาณอ้างอิงภายนอกที่ป้อนให้กับเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน สัญญาณที่สร้างขึ้นนี้มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ดังสมการที่ 2.54

$$V_L(t) = V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref}) \quad (2.54)$$

จากนั้นทั้งสองสัญญาณจะถูกนำมาคูณกัน โดยสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดเฟสจะมีลักษณะเป็นผลคูณของคลื่นไซน์ (sine) ทั้งสองสัญญาณดังสมการที่ 2.55

$$V_{psd} = V_{sig} V_L \sin(\omega_r t + \theta_{sig}) \sin(\omega_L t + \theta_{ref}) \quad (2.55)$$

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos[(\omega_r - \omega_L)t + (\theta_{sig} - \theta_{ref})] - \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos[(\omega_r + \omega_L)t + (\theta_{sig} + \theta_{ref})] \quad (2.56)$$

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref}) \quad (2.57)$$

สัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดเฟสเป็นสัญญาณ AC สองสัญญาณรวมกันอยู่คือ สัญญาณที่มีความถี่เป็น $(\omega_r - \omega_L)$ และสัญญาณที่มีความถี่เป็น $(\omega_r + \omega_L)$ ตามปกติสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดเฟสจะถูกคัดกรองให้ผ่านได้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ต่ำโดยให้สัญญาณผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ (low pass filter) ดังนั้นในกรณีที่ความถี่ ω_r เท่ากับ ω_L จะทำให้สัญญาณที่ผ่าน ตัวกรองความถี่ต่ำ มีลักษณะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ 2.57

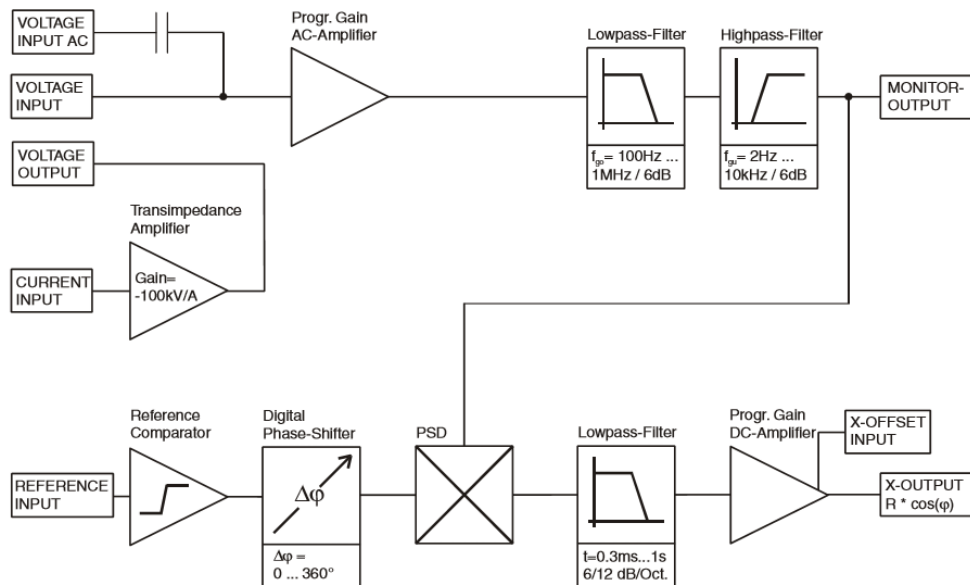
2.4.2 การวัดขนาดของแอมพลิจูดและเฟสจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

ในการวัดขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณจะพิจารณาจากสมการที่ 2.58 ภายในสมการจะเห็นว่าสัญญาณจากการตรวจวัดเฟสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $V_{sig} \cos(\theta)$ โดยที่ $\theta = (\theta_{sig} - \theta_{ref})$ จะเห็นว่า θ เป็นผลต่างเฟสระหว่างสัญญาณที่วัดกับสัญญาณอ้างอิงที่สร้างขึ้นโดยเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน กรณีที่เฟสของทั้งสองสัญญาณมีเฟสตรงกัน สัญญาณจากการตรวจวัดเฟสที่วัดได้จะมีค่าเท่ากับ V_{sig} แต่ถ้าทั้งสองสัญญาณมีเฟสต่างกัน 90° ก็จะไม่มีการส่งสัญญาณไฟฟ้าออกมา ดังสมการที่ 2.58 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่มีการแสดงผลค่านี้เพียงค่าเดียว จะเรียกเครื่องประเภทนี้ว่า เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสเดียว (single-phase lock-in amplifier)

$$V_{psd} = V_{sig} \cos(\theta) \quad (2.58)$$

เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินโดยทั่วไป จะมีเพียงช่องของเฟสออกมาเพียงช่องเดียวเท่านั้น แต่ในบางรุ่นจะพบว่า มีช่องของเฟสและขนาดของแอมพลิจูดออกมาด้วย รุ่นของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่มีการแสดงผลทั้งขนาดของแอมพลิจูดและเฟสถูกพัฒนาให้มีการจำลองสัญญาณอ้างอิงเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งสัญญาณ โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นใหม่นี้มีเฟสต่างไปจากสัญญาณอ้างอิงแรก 90 องศา ดังสมการที่ 2.59

$$V_L(t) = V_L \sin(\omega_L t + \theta_{ref} + 90^\circ) \quad (2.59)$$



รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรม (block diagram) ของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินซินิเดเฟสเดี่ยว
 ที่มา : (10 February 2016). Datasheet LIA-MV-200-H. Available:
http://www.femto.de/images/pdf-dokumente/de-lia-mv-200-h_1.pdf

เมื่อพิจารณาสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดเฟสแล้วผ่านตัวกรองความถี่ต่ำ สัญญาณที่เกิดขึ้น
 จะมีลักษณะของสัญญาณเป็นคลื่นไซน์ ดังสมการที่ 2.61

$$V_{psd} = \frac{1}{2} V_{sig} V_L \cos(\theta_{sig} - \theta_{ref} - 90^\circ) \quad (2.60)$$

$$V_{psd} \approx V_{sig} \sin(\theta) \quad (2.61)$$

ช่องของสัญญาณในเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินแบบเฟสคู่จะมี 2 ช่องสัญญาณคือ
 ช่องสัญญาณ X เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\cos(\theta)$ และช่องสัญญาณ Y เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\sin(\theta)$
 ดังสมการที่ 2.62 และ 2.63 ตามลำดับ

$$X = V_{sig} \cos(\theta) \quad (2.62)$$

$$Y = V_{sig} \sin(\theta) \quad (2.63)$$

ช่องสัญญาณ X และ Y เป็นช่องสัญญาณที่บ่งบอกถึงแวกเตอร์ของสัญญาณเทียบกับสัญญาณ
 อ้างอิงของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน โดยที่ X เรียกว่า in-phase signal และ Y เรียกว่า
 quadrature signal ในกรณีที่ $\theta = 0$ สัญญาณของช่อง X จะเป็นค่าของสัญญาณอินพุต และ

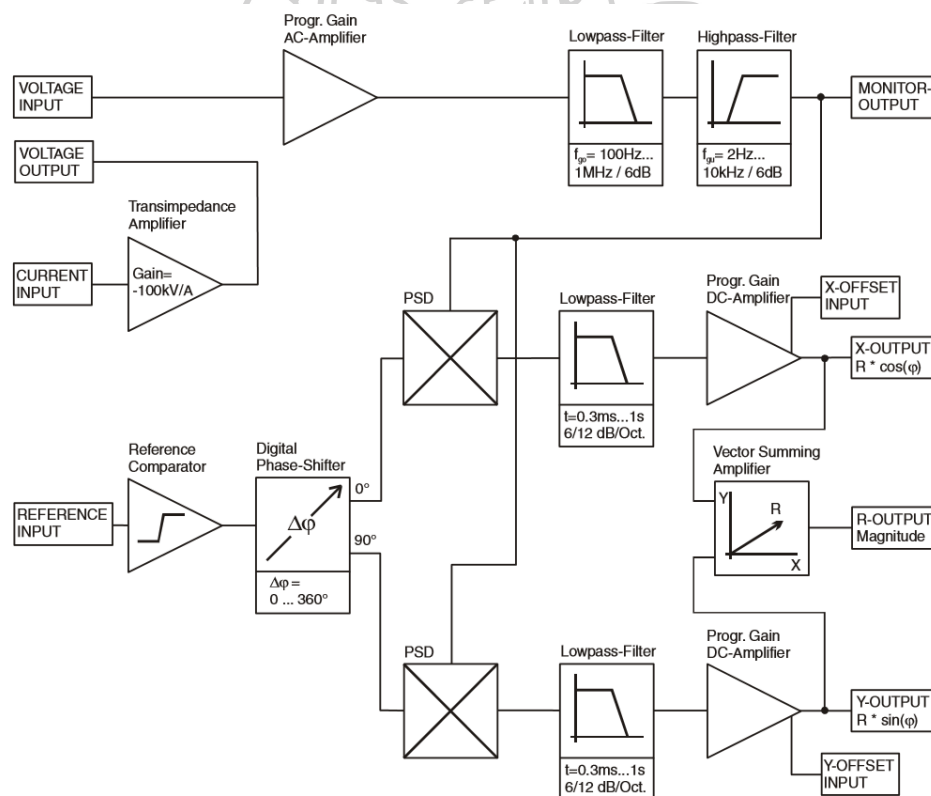
ช่องสัญญาณ Y จะมีค่าเท่าเท่ากับศูนย์ การคำนวณหาค่า magnitude (R) ของสัญญาณ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.64

$$R = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}} = V_{sig} \quad (2.64)$$

เมื่อ R คือ แอมพลิจูดของสัญญาณที่ไม่ขึ้นกับมุมเฟส

เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินแบบเฟสคู่ (dual-phase lock-in) สามารถวัด X Y และ R ได้โดยตรง ซึ่งเฟสของสัญญาณสามารถคำนวณได้จาก

$$\theta = \tan^{-1}(Y / X) \quad (2.65)$$

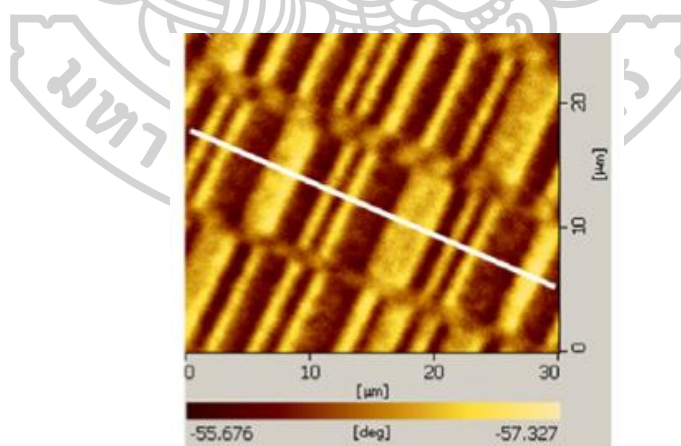


รูปที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรม (block diagram) ของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินชนิดเฟสคู่
ที่มา : (10 February 2016). Datasheet LIA-MV-200-H. Available:

http://www.femto.de/images/pdf-dokumente/de-lia-mvd-200-h_1.pdf

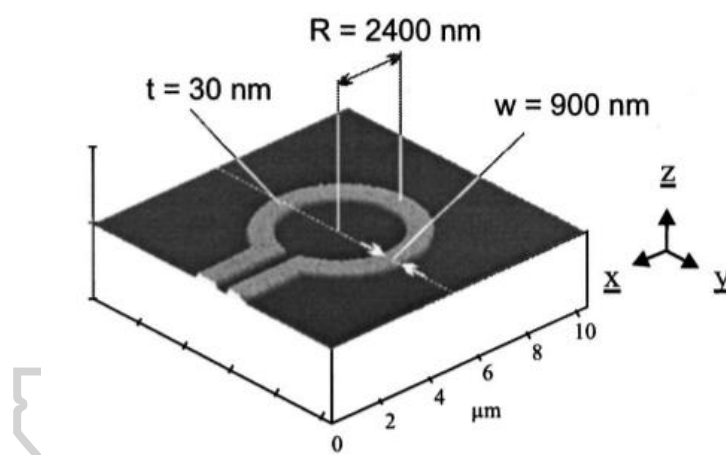
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดคุณภาพของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่าการตรวจวัดคุณภาพของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีวิธีการวัดด้วยเทคนิคที่หลากหลาย โดยส่วนมากมักนิยมวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กร่วมกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก หรือตัวอย่างมาตรฐานดังเช่น ในปี 2006 ผู้วิจัยชื่อ Huang H. S. และคณะ [18] ได้ทำการวัดการตอบสนองของหัววัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กดังรูปที่ 2.27 เพื่อตรวจสอบหัววัดที่ได้พัฒนาและปรับปรุงคุณภาพ ด้วยเทคนิค focused ion beam โดยผลที่ได้พบว่าภาพที่ได้จากการวัดด้วยหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่สร้างขึ้นมีความละเอียดมาก ซึ่งสามารถแยกข้อมูลแม่เหล็กที่บันทึกบนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กได้ในระดับ 20 นาโนเมตร ในปี 2013 ผู้วิจัยชื่อ Futamoto M. และคณะ [11] ได้ทำการวัดการตอบสนองของหัววัด โดยวัดทั้ง resolution และ sensitivity ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กชนิดต่างกัน และความหนาต่างกันเพื่อการเงื่อนไขที่เหมาะสมในแต่ละจุดประสงค์ของการใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดการตอบสนองของหัววัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ร่วมกับแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กในการตรวจสอบหัววัด และวัด resolution ของภาพด้วยเทคนิค fast fourier transform power spectrum และในปีเดียวกันนี้เองยังมีนักวิจัยชื่อ Ishihara S. และคณะ [12] ได้ทำการตรวจสอบหัววัดด้วยการใช้แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ในการวัด resolution sensitivity และ hysteresis loop ของหัววัดที่เคลือบด้วย FePd FePt และ CoPt ที่ความหนาของสารเคลือบต่างกัน



รูปที่ 2.27 ภาพข้อมูล bit บนแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก
ที่มา : Huang, H.S., et al., Improving the spatial resolution of a magnetic force microscope tip via focused ion beam modification and magnetic film coating. Scripta Materialia, 2007. 56(5): p. 365-368.

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการตรวจสอบคุณภาพของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก จะใช้ตัวอย่างมาตรฐานหรือแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กร่วมกับการวัดโดยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ในการตรวจสอบหัววัด แต่ยังมีอีกหลายวิธีที่ทำการสร้างชิ้นงานตัวอย่างขึ้นมาโดยเฉพาะ เพื่อใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการตรวจวัดคุณภาพของหัววัด เช่น ในปี 2001 นักวิจัยชื่อ Carl A. และคณะ [13] ได้สร้าง Ω -shaped gold ring ดังรูปที่ 2.28 เพื่อใช้ในการตรวจสอบ magnetization reversal และค่า coercivity ของหัววัด โดย Ω -shaped gold ring ที่ได้ออกแบบ และสร้างนี้จะใช้ในการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z ซึ่งจะใช้ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในการวัดการตอบสนองของหัววัด และในปี 2008 นักวิจัยชื่อ Weis T. และคณะ [14] ได้เตรียมชิ้นงานตัวอย่างด้วยเทคนิค ion bombardment และเหนี่ยวนำให้ชิ้นงานมีรูปแบบของ สนามแม่เหล็กเฉพาะ คือให้มีสนามแม่เหล็กบนชิ้นงานออกมาในรูปแบบของ in - plane magnetic field เพื่อใช้ในการตรวจสอบหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก



รูปที่ 2.28 ลักษณะของ Ω -shaped gold ring ที่ใช้ตรวจสอบหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก
ที่มา : Carl, A., et al., Magnetization reversal and coercivity of magnetic-force microscopy tips. Journal of Applied Physics, 2001. 89(11): p. 6098-6104.

จากเทคนิคต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมา จะเห็นได้ว่าการตรวจวัดคุณภาพของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กแล้วแต่ใช้ชิ้นงานที่ได้ออกแบบมาเฉพาะหรือใช้แผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก ร่วมกับการวัดโดยกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก แต่ในการวัดด้วยเครื่องมือนี้จะมีการสัมผัสกันระหว่างหัววัดกับชิ้นงานหรือแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็ก โดยที่การสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับหัววัดอาจทำให้เกิดความเสียหายทั้งกับหัววัดและชิ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายระหว่างหัววัดกับชิ้นงาน โดยรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้างเครื่องมือในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกึ่งจูลทรอร์นแรงแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการของกึ่งจูลทรอร์นแรงแม่เหล็กมาพัฒนาและปรับปรุงให้เครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกึ่งจูลทรอร์นแรงแม่เหล็กได้โดยไม่ทำลายชิ้นงาน

ภายในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบและสร้างเครื่องมือเป็นหลัก และได้ทำการทดสอบระบบต่าง ๆ ของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น โดยได้แบ่งหัวข้อเป็นดังต่อไปนี้

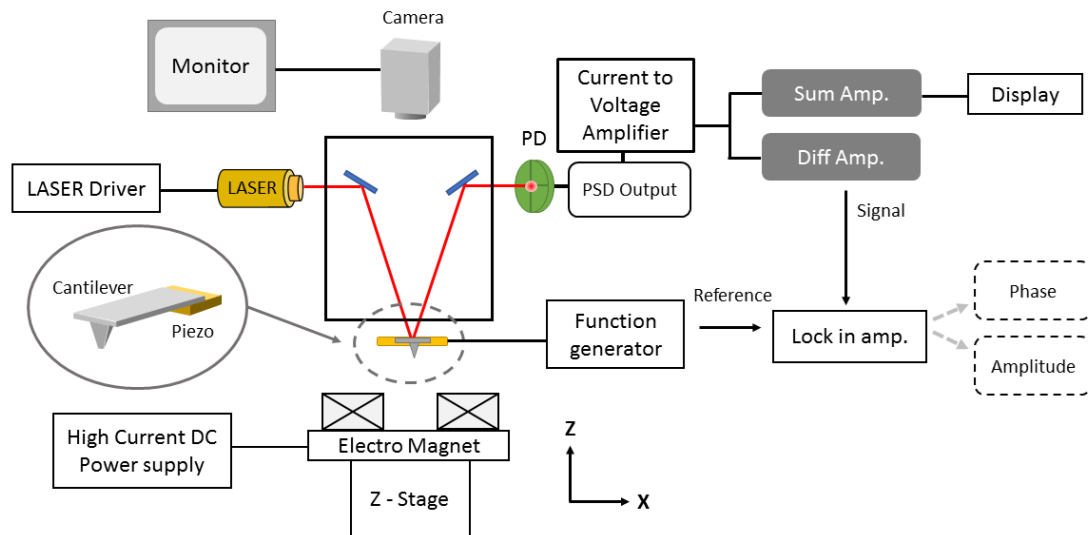
3.1 การศึกษาและการออกแบบสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกึ่งจูลทรอร์นแรงแม่เหล็ก

3.2 กระบวนการในวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกึ่งจูลทรอร์นแรงแม่เหล็ก

3.1 การศึกษาและการออกแบบสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกึ่งจูลทรอร์นแรงแม่เหล็ก

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องมือวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกึ่งจูลทรอร์นแรงแม่เหล็กโดยใช้โซลินอยด์ (solenoid coil) เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการตรวจสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด แผนผังของระบบของเครื่องมือวัดในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งวัดการสั่นของหัววัดด้วยเทคนิคทางแสงโดยใช้วิธี optical beam deflection เมื่อหัววัดอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูดและเฟสในการสั่น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจะขึ้นอยู่กับความไวในการตอบสนองของหัววัด

ระบบของเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นนี้ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งลำแสงของเลเซอร์จะถูกจัดเรียงให้ไปตกกระทบยังบริเวณปลายของหัววัดแล้วสะท้อนกลับไปยังฉากรับแสงของเซนเซอร์บอกตำแหน่ง (position sensitive detector, PSD sensor) ขณะทำการวัด โซลินอยด์จะทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก และเพียโซอิเล็กทริกจะทำหน้าที่ในการสั่นหัววัด ซึ่งทำให้เกิดการกวัดแกว่งของลำแสงที่สะท้อนจากหัววัดไปยัง PSD sensor โดยลำแสงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและขยายสัญญาณด้วยเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (lock in amplifier) สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะนำไปวิเคราะห์การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดต่อไป

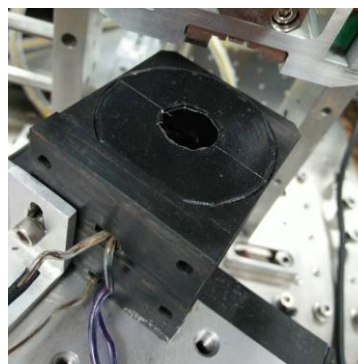
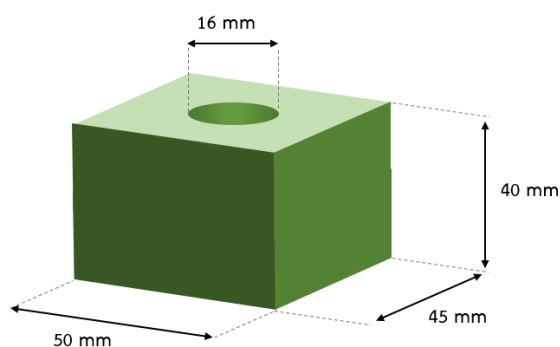


รูปที่ 3.1 แผนผังระบบของเครื่องมือในงานวิจัยนี้

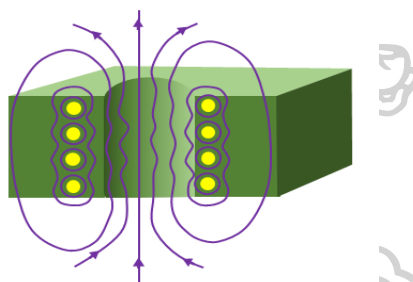
การทำงานของระบบภายในเครื่องมือที่ออกแบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ 1. ระบบสร้างสนามแม่เหล็ก 2. ระบบสั้นของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก 3. ระบบวัดการสั้นของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก การทำงานของระบบต่าง ๆ อธิบายไว้ในหัวข้อย่อยดังต่อไปนี้

3.1.1 ระบบสร้างสนามแม่เหล็ก

ผู้วิจัยได้ออกแบบแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กโดยใช้โซลินอยด์เป็นตัวเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศของสนามแม่เหล็กอยู่ในแนวแกน Z ซึ่งอยู่ในทิศเดียวกับการสั้นของหัววัด โซลินอยด์ที่ออกแบบเป็นแกนอากาศซึ่งทำมาจากเส้นลวดทองแดง โดยนำมาขดเป็นวงซ้อนกันจำนวน 500 วง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงในเท่ากับ 16 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอกเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และมีความยาวเท่ากับ 40 มิลลิเมตร เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายและติดตั้ง โซลินอยด์ถูกนำมาบรรจุไว้ในกล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างเท่ากับ 45 มิลลิเมตร มีความยาวเท่ากับ 50 มิลลิเมตร และมีความสูงเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก (ซ้าย) โมเดล (ขวา) ภาพถ่าย

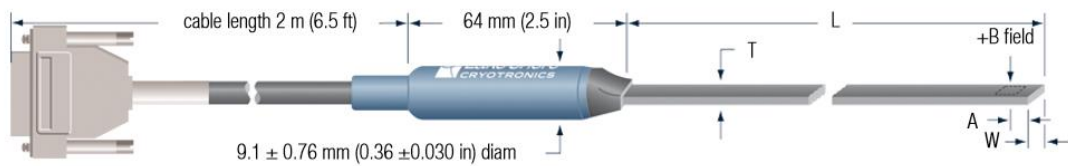


รูปที่ 3.3 ลักษณะของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจากโซลินอยด์

สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นนี้จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 200 Oe โดยมีบริเวณที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากันอยู่ตรงกลางของโซลินอยด์ ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบลักษณะของสนามแม่เหล็กเพื่อหาตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมที่จะใช้ในงานวิจัย

ในการตรวจสอบลักษณะของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้ใช้เกาส์มิเตอร์ (gauss meter) และหัววัดสนามแม่เหล็กชนิดฮอลล์เซนเซอร์ (hall probe) ในการวัดค่าของสนามแม่เหล็กเพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมกับการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากันและมีทิศอยู่ในแนวแกน Z

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของสนามแม่เหล็ก ผู้วิจัยใช้หัววัดสนามแม่เหล็กจากบริษัท lakeshore รุ่น HMMT-6J04-VR ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 ใช้ร่วมกับเกาส์มิเตอร์จากบริษัท lakeshore รุ่น Model 475 ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 หัววัดสนามแม่เหล็กกรุ่น HMMT-6J04-VR ผลิตโดยบริษัท lakeshore
ที่มา : (5 May 2016). Hall probes. Available:

http://www.lakeshore.com/Documents/Hall%20Probes_L.pdf

ตารางที่ 3.1 ตารางคุณสมบัติของหัววัดสนามแม่เหล็กกรุ่น HMMT-6J04-VR ผลิตโดยบริษัท lakeshore

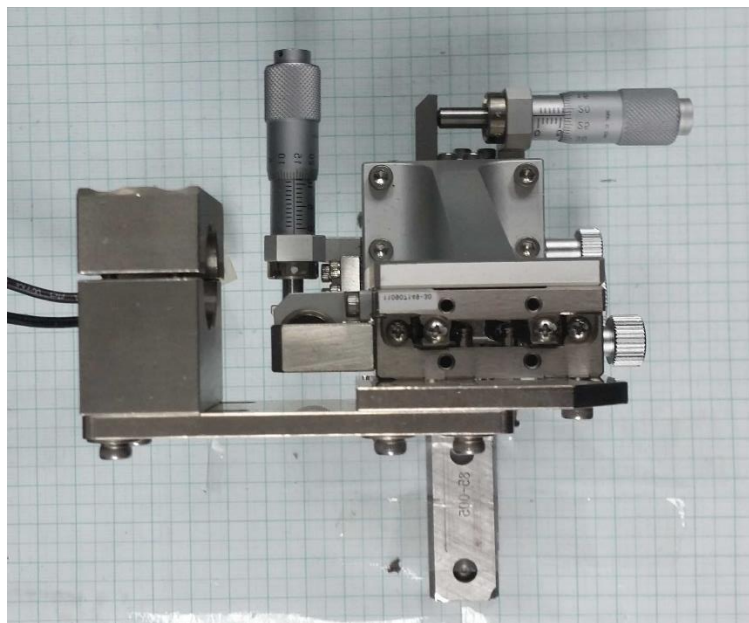
Hall probe: HMMT-6J04-VR

L (mm)	101.6 ± 3.2
T (mm)	1.55
W (mm)	4.57 ± 0.13
A (mm)	3.81 ± 1.27
Stem material	Aluminum
Frequency range	DC to 800 Hz
Corrected accuracy (% rdg at 25 °C)	$\pm 0.20\%$ to 30 kG; $\pm 0.25\%$ 30 to 35 kG
Operating temp range	0 °C to +75 °C
Temp coefficient (max) zero	± 0.09 G/°C



รูปที่ 3.5 เกาส์มิเตอร์กรุ่น Model 475 ผลิตโดยบริษัท lakeshore

เพื่อที่จะหาตำแหน่งของสนามแม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอจากการเหนี่ยวนำโดยโซลินอยด์ ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างที่ยึดจับหัววัดสนามแม่เหล็กสำหรับวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถปรับตำแหน่งของหัววัดสนามแม่เหล็กได้ในระนาบ XY (ความสูงของระนาบคงที่) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



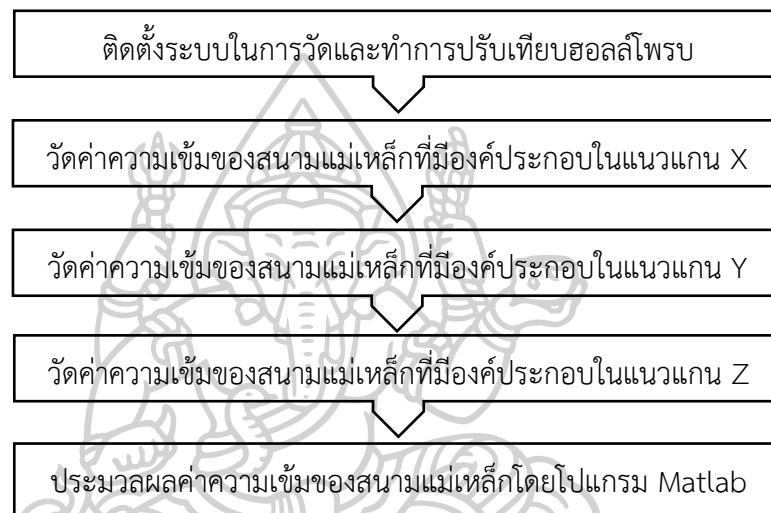
รูปที่ 3.6 ที่ยึดจับหัววัดสนามแม่เหล็กในการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.7 โดยขั้นตอนแรกจะเตรียมการสำหรับวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยปรับเทียบศูนย์สนามแม่เหล็กให้กับหัววัดสนามแม่เหล็กและทำการติดตั้งในที่ยึดจับ จากนั้นป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับโซลินอยด์โดยป้อนกระแสไฟฟ้าขนาด 2.35 แอมแปร์ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำของโซลินอยด์

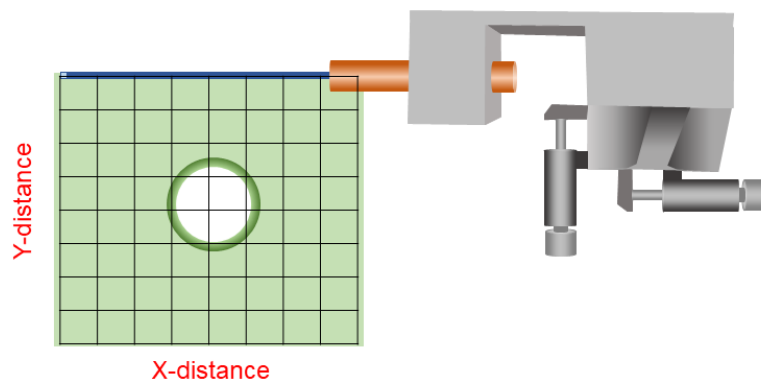
ขั้นตอนที่สองเป็นการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน X โดยจะเริ่มวัดค่าที่ตำแหน่งอ้างอิงจุดหนึ่ง ซึ่งจะกำหนดให้เป็นพิกัด (0,0) และในการบันทึกค่ากำหนดให้สนามแม่เหล็กที่มีทิศพุ่งไปในแนวแกน +X แทนด้วยเครื่องหมาย + ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งไปในแนวแกน -X แทนด้วยเครื่องหมาย - จากนั้นเคลื่อนตำแหน่งในการวัดออกไปในแกน X อีก 5 มิลลิเมตร แล้วบันทึกค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก ทำการวัดทุก ๆ จุดในลักษณะดังกล่าวจนครบ 50 มิลลิเมตร (0,50) ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นเลื่อนตำแหน่งของหัววัดสนามแม่เหล็กไปในแกน Y อีก 5 มิลลิเมตร (5,0) โดยทำการวัดค่าในลักษณะนี้จนครบทุกจุดทั่วทั้งพื้นที่ (50,45)

ขั้นตอนที่สามและขั้นตอนที่สี่เป็นการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน Y และ Z ตามลำดับ โดยทำการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กในลักษณะเช่นเดียวกันกับการวัดค่าสนามแม่เหล็กในขั้นตอนที่สอง

เมื่อได้ข้อมูลของค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในองค์ประกอบแกน X Y และ Z ขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนของการประมวลผลและแสดงผลของข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งตัวอย่างของโค้ดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถดูได้ที่ภาคผนวก



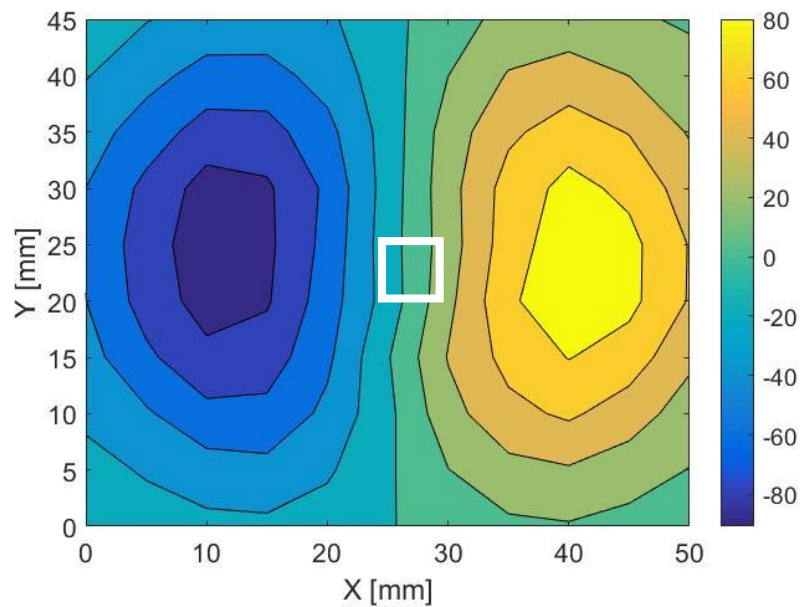
รูปที่ 3.7 ผังขั้นตอนในการตรวจสอบคุณสมบัติของสนามแม่เหล็ก



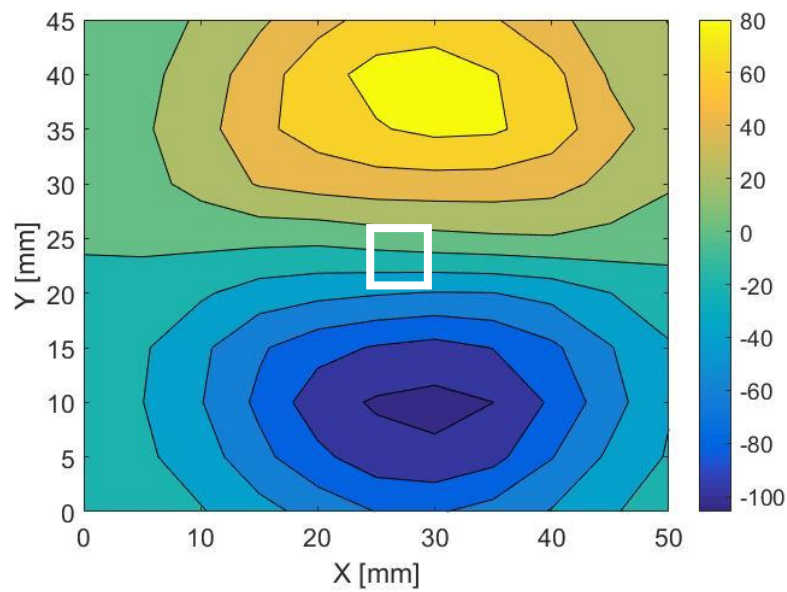
รูปที่ 3.8 ภาพจำลองการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่จุดต่าง ๆ ของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ผลของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยโซลินอยด์

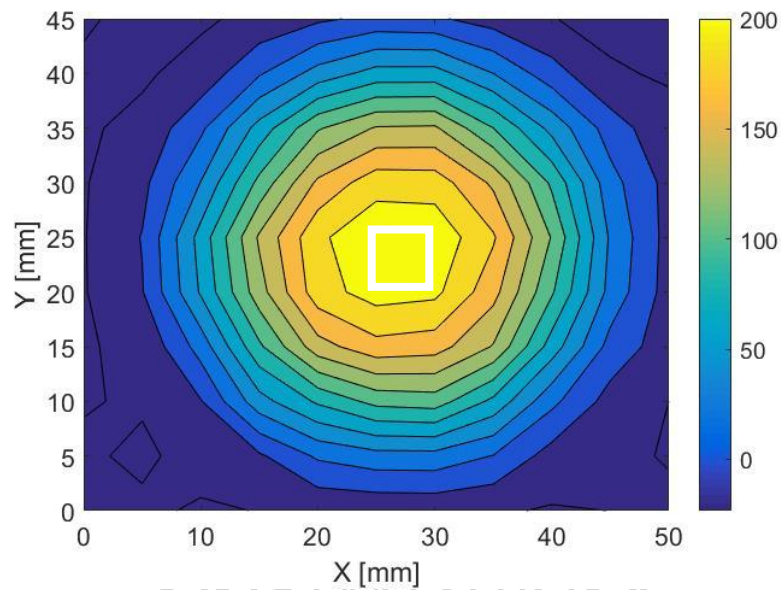
รูปที่ 3.9 – 3.11 แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในองค์ประกอบ X Y และ Z ตามลำดับ โดยที่สีภายในรูปแทนขนาดและทิศของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยโซลินอยด์



รูปที่ 3.9 ภาพองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน X

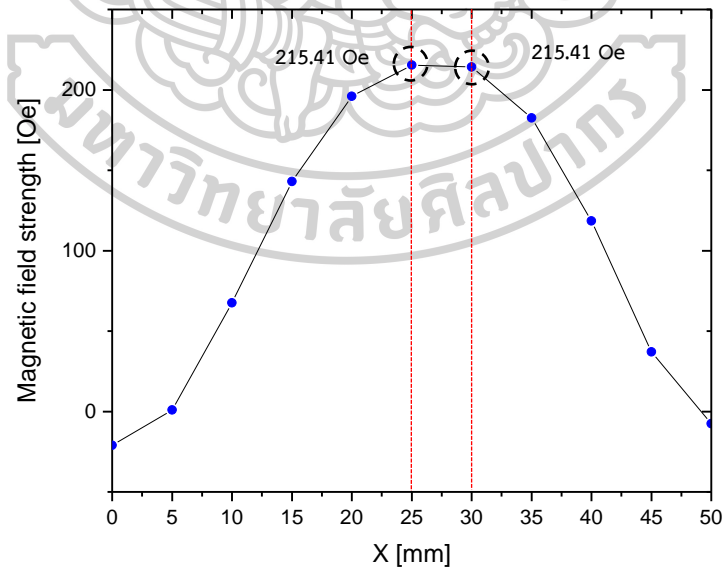


รูปที่ 3.10 ภาพองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Y

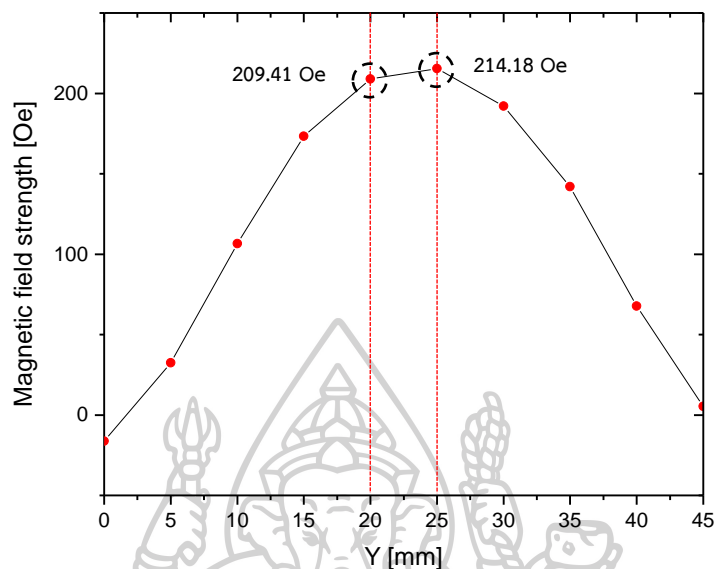


รูปที่ 3.11 ภาพองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z

รูปที่ 3.12 – 3.13 แสดงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน Z ตามเส้นผ่านศูนย์กลางของโซลินอยด์ในแนวแกน X และ Y ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 ผลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน Z ตามเส้นผ่านศูนย์กลางของโซลินอยด์ในแนวแกน X

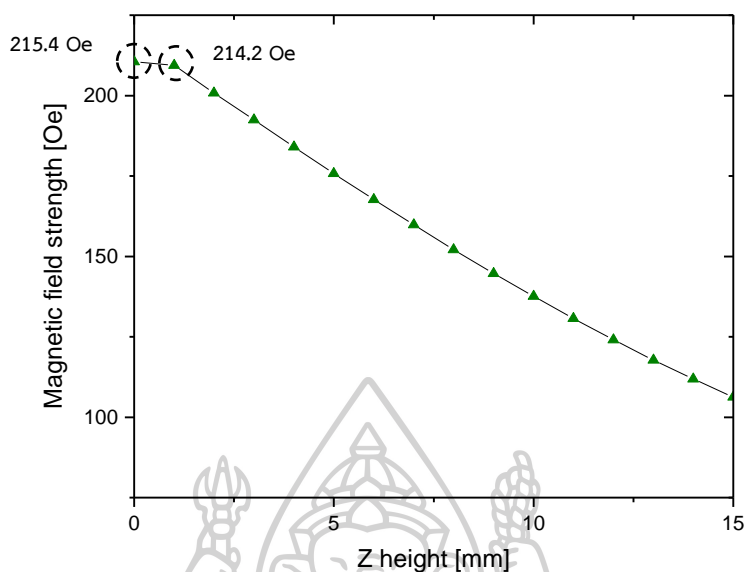


รูปที่ 3.13 ผลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบอยู่ในแนวแกน Z ตามเส้นผ่านศูนย์กลางของโซลินอยด์ในแนวแกน Y

ผลการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กพบว่าบริเวณตรงกลางของโซลินอยด์จะให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z สูง และพบว่าองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน X และ Y มีค่าต่ำกว่ามากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าบริเวณนี้เป็นตำแหน่งที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในงานวิจัย ตำแหน่งดังกล่าวเป็นมีลักษณะเป็นรูปร่างกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยในบริเวณนี้将有ความต่างของค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่เกิน 5 %

ผลของสนามแม่เหล็กที่ความสูงต่าง ๆ กัน

นอกจากผลของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามตำแหน่งต่าง ๆ บนแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กแล้วยังได้วัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ความสูงต่าง ๆ เหนือขึ้นไปจากโซลินอยด์ โดยได้ทำการวัดค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กความสูงต่าง ๆ ตั้งแต่จุดปลายของโซลินอยด์ซึ่งวันที่จุดศูนย์กลาง ($h=0$ mm) จนถึงระยะห่างจากปลายของโซลินอยด์เป็น 15 มิลลิเมตร ($h=15$ mm) ผลของค่าสนามแม่เหล็กที่ความสูงต่าง ๆ กันแสดงดังรูปที่ 3.14

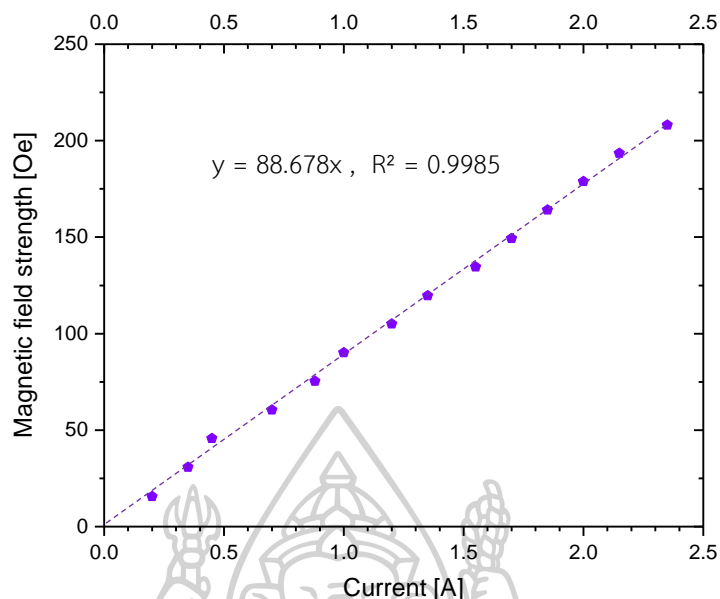


รูปที่ 3.14 ผลความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ความสูงต่าง ๆ กัน

เมื่อพิจารณาค่าความเข้มขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z พบว่ามีช่วงที่สนามแม่เหล็กมีค่าความเข้มใกล้เคียงกันแคบมากคือมีค่าประมาณ 1 มิลลิเมตร และมีค่าลดลงเมื่อมีความสูงเพิ่มขึ้น ผลการวัดชี้ให้เห็นว่าระยะของความสูงมีผลต่อสนามแม่เหล็กอย่างมาก เพื่อแก้ไขผลของสนามแม่เหล็กเนื่องจากความสูง ในงานวิจัยนี้จึงออกแบบติดตั้งแหล่งกำเนิดไว้กับที่ยึดจับซึ่งมีความสูงคงที่เพื่อความแม่นยำในการวัด โดยให้หัววัดอยู่บริเวณปลายของโซลินอยด์ ซึ่งได้กำหนดระยะห่างระหว่างหัววัดกับโซลินอยด์ด้วย Z-stage โดยที่สามารถปรับระดับความสูงได้โดยไมโครมิเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้วัดสามารถวัดได้ที่ความสูงคงค่าเดิมทุกครั้ง

ผลของสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ กัน

ในการตรวจสอบหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก เราต้องการที่จะทราบผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กที่ค่าของสนามแม่เหล็กต่าง ๆ กัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยโซลินอยด์ โดยได้ทำการวัดค่าของสนามแม่เหล็กบริเวณกึ่งกลางของโซลินอยด์ ณ ตำแหน่ง $Z = 0$ ที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 – 2.35 แอมแปร์ เพื่อจะนำไปใช้ในการควบคุมสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น โดยผลของความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ กัน แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ผลของสนามแม่เหล็กที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

จากรูปจะเห็นว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบเชิงเส้นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ 99.85 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้สามารถควบคุมโซลินอยด์ให้สร้างสนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้มต่าง ๆ ได้โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า

3.1.2 ระบบการสั่นหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบการสั่นของหัววัดให้มีการสั่นขึ้นลงในแนวแกน Z ซึ่งมีทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น โดยทำการติดหัววัดไว้กับเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสั่นให้กับหัววัด และได้ใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (function generator) รุ่น model 33210 A จากบริษัท Agilent ดังรูปที่ 3.16 เป็นตัวกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าให้กับเพียโซอิเล็กทริก โดยสัญญาณไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองสัญญาณ โดยสัญญาณส่วนหนึ่งจะนำไปใช้กับเพียโซอิเล็กทริก และสัญญาณอีกส่วนจะนำไปเป็นสัญญาณอ้างอิงให้กับเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.16 ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ รุ่น model 33210 A จากบริษัท Agilent

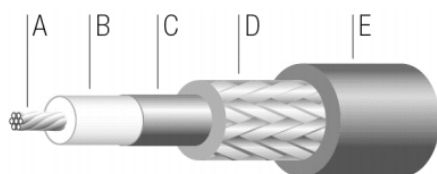
สายส่งสัญญาณที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นสายส่งสัญญาณแบบสัญญาณรบกวนต่ำ ซึ่งทำมาจากสายโคแอกซ์เชียล (coaxial cable) โดยมีคุณสมบัติดังตาราง ที่ 3.2 ลักษณะของสายส่งสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงคุณสมบัติของสายโคแอกซ์เชียลที่ใช้ในงานวิจัย

สายโคแอกซ์เชียล (coaxial cable)

<i>Impedance</i>	$(50 \pm 5) \Omega$
<i>Capacitance</i>	96 pF/m
<i>Insulation resistance</i>	$> 10^{14} \Omega \cdot m$
<i>DC resistance, inner conductor</i>	$< 800 \text{ m}\Omega/m$
<i>DC resistance, outer conductor</i>	$< 45 \text{ m}\Omega/m$
<i>Attenuation</i>	$\leq 0.1 \text{ dB/m, DC to 4 MHz}$
<i>Maximum operating voltage</i>	$< 50 \text{ VAC, } < 75 \text{ VDC}$
<i>Temperature range</i>	$-55 \text{ }^\circ\text{C to } +200 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Weight</i>	$(42 \pm 4) \text{ g, for length 1.0 m}$

A Inner conductor	copper, 7 x \emptyset 0.1 mm, \emptyset 0.3 mm
B Dielectric	polytetrafluoroethylene (PTFE), \emptyset 0.84 mm
C Coating	semi conductive, \emptyset 0.88 mm
D Shield	silver plated tensile flex braid 90 %, \emptyset 1.35 mm
E Jacket	perfluoroalkoxy (PFA), \emptyset 1.9 mm



รูปที่ 3.17 สายโคแอกซ์เซี่ยลที่ใช้ในงานวิจัย

ที่มา : (5 May 2016). Datasheet CAB-LN1 Low Noise Cable. Available:
http://www.femto.de/images/pdf-dokumente/de-cab-ln1_r2.pdf



รูปที่ 3.18 สายส่งสัญญาณที่ออกแบบเพื่อใช้กับเพียโซอิเล็กทริก

3.1.3 ระบบวัดการสั่นของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระบบวัดการสั่นของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วย ส่วนสำคัญดังต่อไปนี้คือ แหล่งกำเนิดแสง ระบบจัดเรียงและตรวจวัดการกวัดแกว่งของแสง ระบบขยายสัญญาณ และระบบวัดและวิเคราะห์ผลของสัญญาณไฟฟ้า

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเลเซอร์ไดโอดที่ให้แสงสีแดงซึ่งมีความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร (รุ่น VPSL-0635-005X-5-A ผลิตโดยบริษัท Blue Sky Research) ดังรูปที่ 3.19 และมีคุณสมบัติดัง ตารางที่ 3.3 โดยเลเซอร์ที่เลือกใช้นี้ตอบสนองได้ดีกับตัวตรวจวัดแสงที่เลือกใช้ ลำแสงที่สร้างขึ้นเป็น ลำแสงขนานคือมีค่า beam divergence ต่ำ



รูปที่ 3.19 เลเซอร์ไดโอด รุ่น VPSL-0635-005X-5-A ผลิตโดยบริษัท Blue Sky Research

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเลเซอร์ไดโอด รุ่น VPSL-0635-005X-5-A ผลิตโดยบริษัท Blue Sky Research

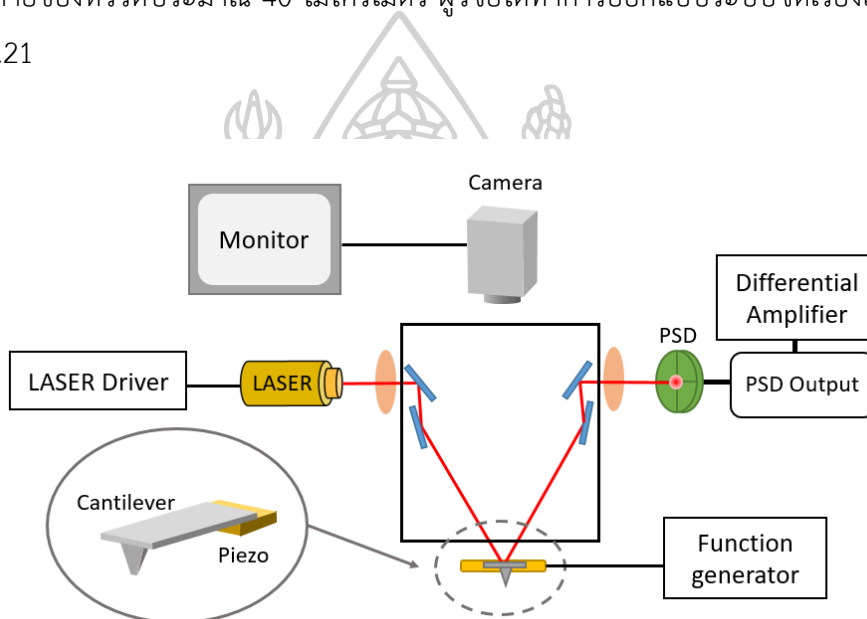
	Min	Typ	Max	Unit
Optical output power	-	5	-	mW
Operating current		34	50	mA
Operating voltage		2.2	2.7	V
Lasing wavelength	630	635	640	nm
Beam divergence II	6	8	12	deg



รูปที่ 3.20 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอด

ในส่วนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดผู้วิจัยได้เลือกแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (รุ่น MPS-6005L-1 ผลิตโดยบริษัท MATRIX) ดังรูปที่ 3.20 โดยใช้งานในโหมดแหล่งจ่ายกระแส (current source) ซึ่งจะทำให้ความเข้มแสงคงที่ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ไดโอดจะมีขนาดเท่ากับ 40 – 45 มิลลิแอมแปร์ โดยปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตของ PSD sensor

ระบบจัดเรียงแสงและตรวจวัดการกวัดแกว่งของลำแสงถือเป็นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดในงานวิจัยนี้ เนื่องจากหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีขนาดระดับไมโครเมตร ซึ่งมีความกว้างของบริเวณปลายของหัววัดประมาณ 40 ไมโครเมตร ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระบบจัดเรียงแสงดังแสดงในรูปที่ 3.21

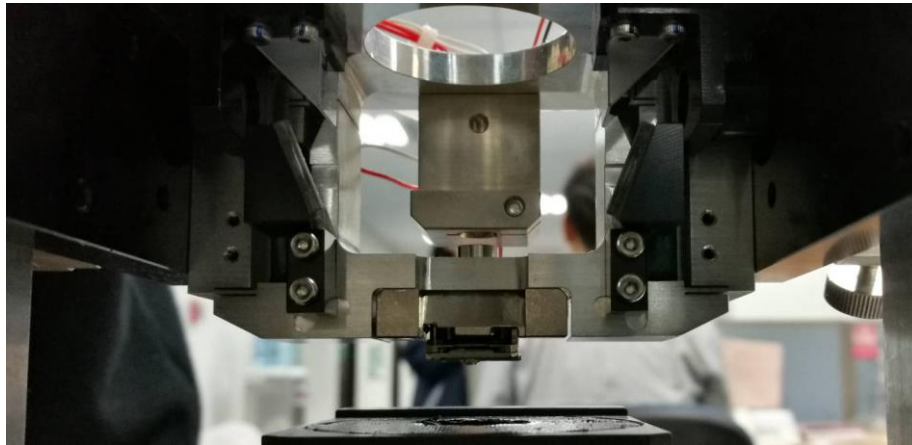


รูปที่ 3.21 แผนผังของระบบจัดเรียงและตรวจวัดการกวัดแกว่งของแสง

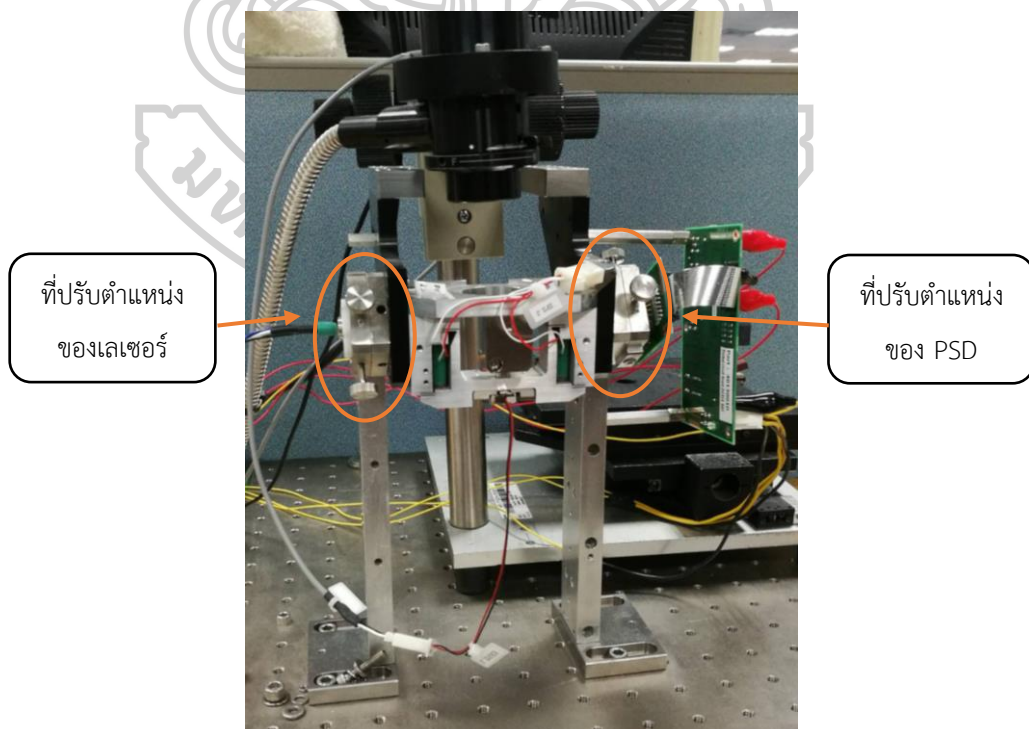
จากรูปจะเห็นว่าลำแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์หมุนที่มีความยาวโฟกัสเหมาะสมและกระจกเงาสะท้อน ซึ่งจะทำให้ลำแสงเลเซอร์โฟกัสและตกกระทบไปยังบริเวณปลายของหัววัด โดยลำแสงที่ตกกระทบจะมีลักษณะเป็นจุด จากนั้นลำแสงจะสะท้อนจากปลายของหัววัดไปยังฉากรับแสงของ PSD sensor โดยจะผ่านกระจกเงาสะท้อนและเลนส์หมุน ซึ่งจะทำให้ลำแสงที่ออกมาเป็นลำแสงขนาน

สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก PSD sensor จะการแปลจากสัญญาณเชิงกระแสไฟฟ้าเป็นสัญญาณเชิงแรงดันไฟฟ้าโดย current to voltage convertor จากนั้นสัญญาณจะถูกขยายสัญญาณโดยวงจรขยายสัญญาณแบบแรงดันผลต่างและแบบรวมแรงดัน (differential-summing amplifier) ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบจัดเรียงแสงดังรูปที่ 3.22 ซึ่งระบบจัดเรียงแสงมีหลักการทำงานเหมือนดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยที่ระบบติดตั้งไว้กับแท่งเหล็กที่มีความยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งจะยึดติดอยู่กับแผ่นเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.23 และบริเวณใต้แผ่นเหล็กได้ทำการติดตั้งฉนวนกันสะเทือนไว้โดยรอบ



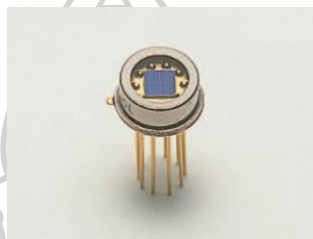
รูปที่ 3.22 ระบบจัดเรียงแสงที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.23 ระบบจัดเรียงแสง

ในการจัดเรียงลำแสงโดยให้ตกกระทบไปยังบริเวณปลายของหัววัด กระทำโดยการปรับตำแหน่งของเลเซอร์ในระนาบ Y-Z โดยหมุนตำแหน่ง Y-Z ของเลเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ในการตรวจสอบว่าลำแสงเลเซอร์ได้ตกกระทบยังบริเวณปลายของหัววัด กระทำได้โดยการส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 20 เท่า และการปรับให้ลำแสงไปตกยังตรงกลางของ PSD sensor กระทำได้โดยการปรับตำแหน่งของ PSD sensor โดยการหมุนตำแหน่ง Y-Z ของ PSD sensor

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ PSD sensor (รุ่น model S4349 ผลิตโดยบริษัท Hamamatsu) ดังรูปที่ 3.24 โดยตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นในย่าน 190 – 1000 นาโนเมตร มีความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) เท่ากับ 20 เมกะเฮิรท์ซ์ และมีคุณสมบัติอื่น ๆ เป็นไปดังตารางที่ 3.4

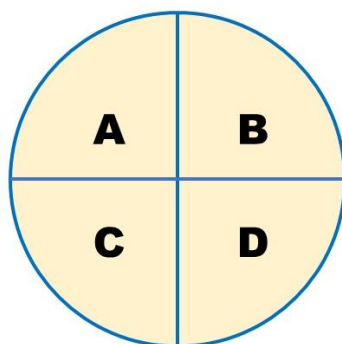


รูปที่ 3.24 PSD sensor รุ่น model S4349 ผลิตโดยบริษัท Hamamatsu

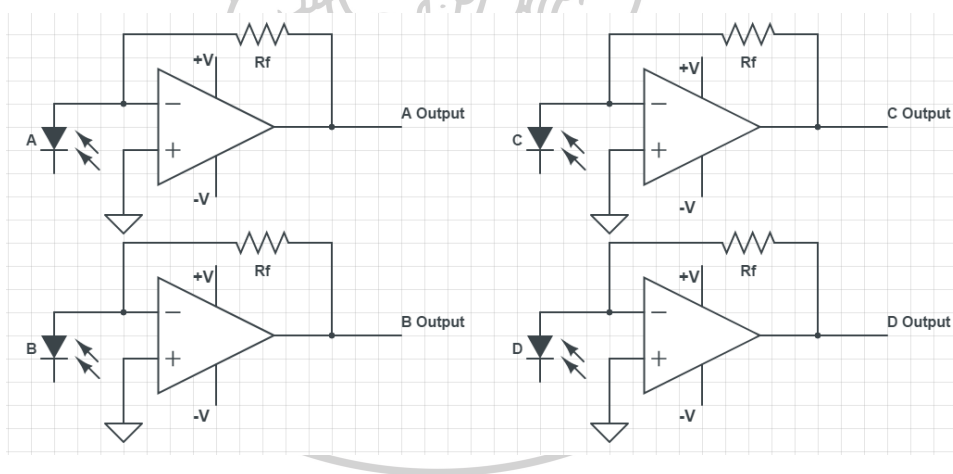
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงคุณสมบัติของ PSD sensor รุ่น model S4349 ผลิตโดยบริษัท Hamamatsu

<i>PSD model S4349, Hamamatsu</i>	<i>Typ</i>	<i>Unit</i>
<i>Photosensitive area</i>	3.0/4 element	mm
<i>Element gap</i>	100	μm
<i>Reverse voltage</i>	20	V
<i>Operating temperature</i>	-20 to +60	$^{\circ}\text{C}$
<i>Spectral response range</i>	190 to 1000	nm
<i>Peak sensitivity wavelength</i>	720	nm
<i>Photosensitivity</i>	0.45	A/W
<i>Dark current</i>	0.01	nA
<i>Cutoff frequency</i>	20	MHz
<i>Noise equivalent power</i>	4.0×10^{-15}	$\text{W/Hz}^{1/2}$

ภายใน PSD sensor ประกอบไปด้วยโฟโตไดโอด (Photo diode) จำนวน 4 ตัวดังรูปที่ 3.25 ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจาก PSD sensor จะมีทั้งหมดสี่ช่องสัญญาณคือ A B C และ D โดยเป็นสัญญาณแบบแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 3.26



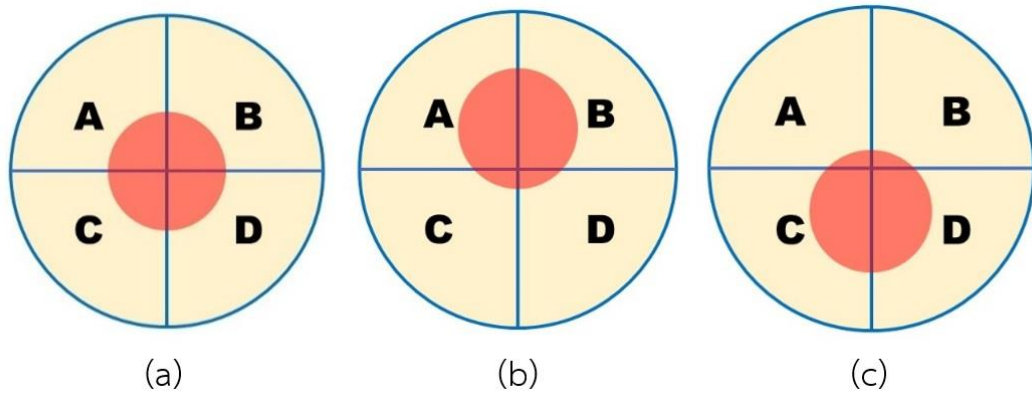
รูปที่ 3.25 ตำแหน่งของโฟโตไดโอดใน PSD sensor



รูปที่ 3.26 ผังวงจรเปลี่ยนสัญญาณเชิงกระแสไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

3.1.4 ระบบขยายสัญญาณ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรขยายสัญญาณเพื่อขยายสัญญาณจาก PSD sensor โดยมีการขยายสัญญาณใน 2 ลักษณะคือ การขยายสัญญาณแบบรวมแรงดัน (summing amplifier) และการขยายสัญญาณแบบผลต่างแรงดัน (differential amplifier) ซึ่งการใช้งานวงจรจะพิจารณาดังนี้



รูปที่ 3.27 ลักษณะการตกกระทบของลำแสงเลเซอร์บน PSD sensor

วงจรรขยายสัญญาณแบบรวมแรงดันจะมีหน้าที่ในการรวมสัญญาณจาก A B C และ D เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงของความเข้มแสงที่ตกกระทบบน PSD sensor เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.27 จะเห็นว่าในกรณีที่หัววัดไม่มีการสั่นดังรูปที่ 3.27(a) ลำแสงของเลเซอร์จะอยู่ตรงกลางของ PSD sensor เมื่อหัววัดกำลังสั่นลงดังรูปที่ 3.27(b) ลำแสงของเลเซอร์จะเคลื่อนไปทาง AB และเมื่อหัววัดเคลื่อนที่ขึ้นดังรูปที่ 3.27(c) ลำแสงของเลเซอร์จะเคลื่อนที่ไปยัง CD ซึ่งทั้งสามกรณีสามารถหาสัญญาณอ้างอิงความเข้มแสงได้จากผลรวมของสัญญาณทั้งสี่ดังสมการที่ 3.1

$$\text{สัญญาณอ้างอิงของความเข้มแสง} = A+B+C+D \quad (3.1)$$

วงจรรขยายสัญญาณแบบผลต่างแรงดันจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อใช้วัดการแกว่งของหัววัด จากรูปที่ 3.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อหัววัดมีการสั่นลำแสงที่ตกกระทบบน PSD sensor จะมีการแกว่งขึ้นลง ซึ่งวงจรรนี้จะสร้างสัญญาณขึ้นใหม่จาก A B C และ D โดยเป็นการรวมสัญญาณดังสมการที่ 3.2 ผลของการรวมสัญญาณแบบนี้ทำให้ค่าสัญญาณที่ได้มีค่าเป็นศูนย์เมื่อลำแสงอยู่ตรงกลางของ PSD sensor ค่าของสัญญาณเป็นบวกเมื่อลำแสงอยู่ด้านบนจากจุดศูนย์กลางของ PSD sensor และค่าของสัญญาณติดลบเมื่อลำแสงอยู่ด้านล่างจากจุดศูนย์กลางของ PSD sensor

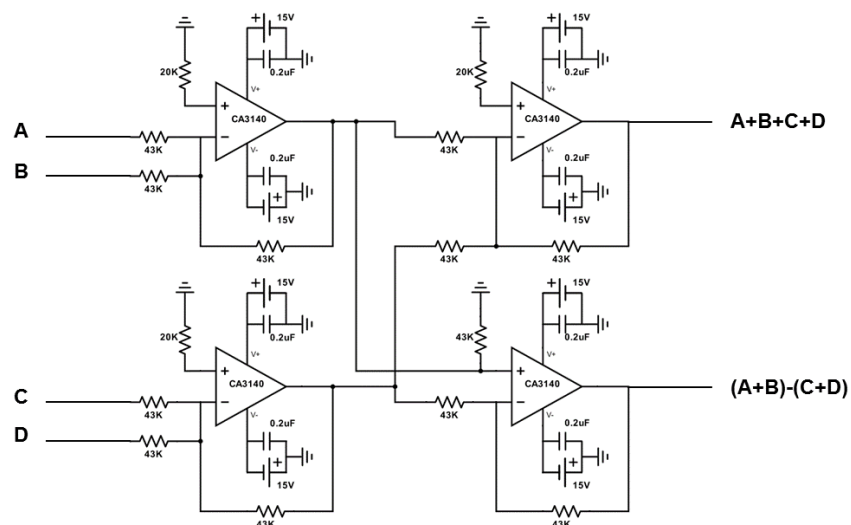
$$\text{สัญญาณวัดการสั่นของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก} = (A+B) - (C+D) \quad (3.2)$$

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรรขยายสัญญาณแบบรวมแรงดันและขยายสัญญาณแบบผลต่างแรงดันดังรูปที่ 3.28 โดยวงจรรขยายสัญญาณแบบรวมแรงดันมีเกนขยาย (gain) เท่ากับ 1 ซึ่งสามารถ

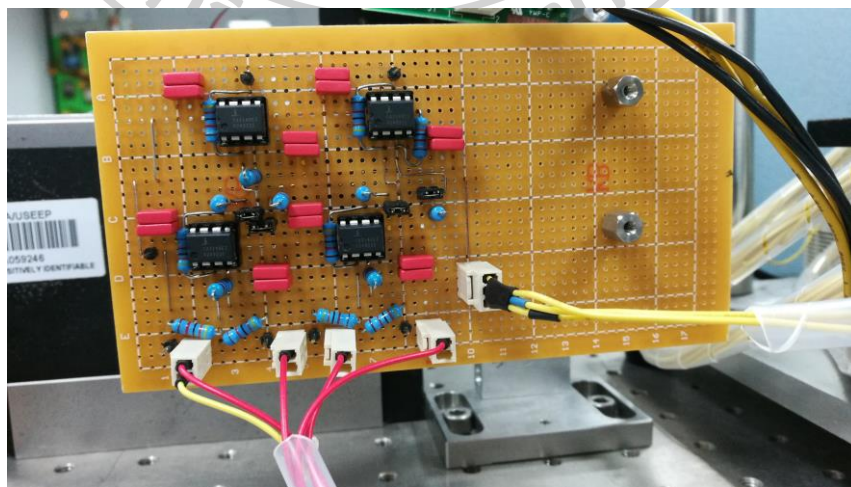
คำนวณได้จากสมการที่ 3.3 และในวงจรขยายสัญญาณแบบผลต่างแรงดันมีเกนขยายเท่ากับ 1 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R} (V_A + V_B + V_C + V_D) \quad (3.3)$$

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_i} V_{A+B} - V_{C+D} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.28 แผนผังวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบรวมแรงดันและแบบผลต่างแรงดัน



รูปที่ 3.29 ภาพถ่ายวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบรวมแรงดันและแบบผลต่างแรงดัน

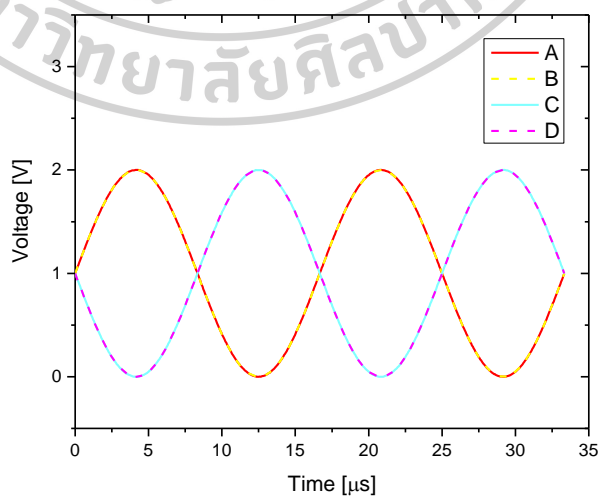
การทดสอบประสิทธิภาพของวงจรมายสัญญาณ

ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรมายสัญญาณที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น โดยใช้ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์เป็นตัวกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (sine wave) ที่มีความถี่ 60 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งมีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ในการทดลองผู้วิจัยได้ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 1 โวลต์เป็นค่าออฟเซต ร่วมกับสัญญาณคลื่นไซน์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจาก PSD sensor โดยทำการสร้างสัญญาณไฟฟ้าออกเป็นสองช่องสัญญาณที่มีเฟส 0 องศา และ 180 องศา ซึ่งแทนสัญญาณที่ได้จาก ช่องสัญญาณ A B C และ D ของ PSD sensor โดยป้อนให้กับแผงวงจรมายสัญญาณที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าของสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรมายสัญญาณ

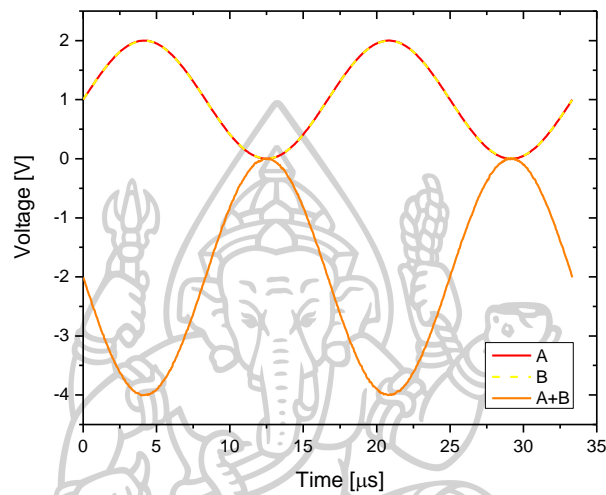
ช่องสัญญาณ	ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสลับ (V)	ค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (V)	เฟส (deg)
A	1	1	0
B	1	1	0
C	1	1	180
D	1	1	180

ผลของสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรมายสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.30 โดยเป็นการวัดด้วยออสซิลโลสโคป (oscilloscope)

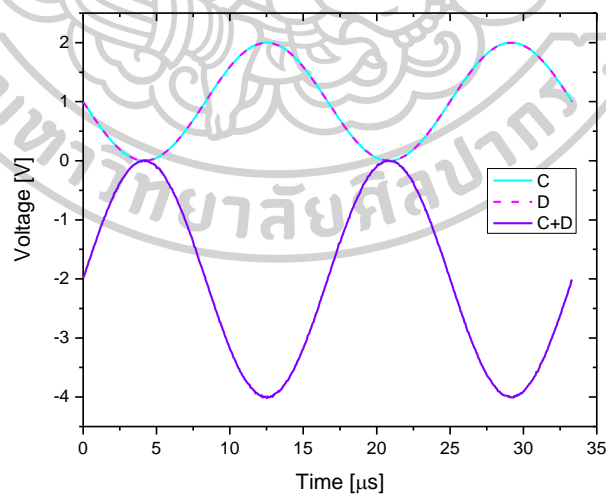


รูปที่ 3.30 สัญญาณอินพุตทั้งสี่ที่ป้อนให้กับวงจรมายสัญญาณ

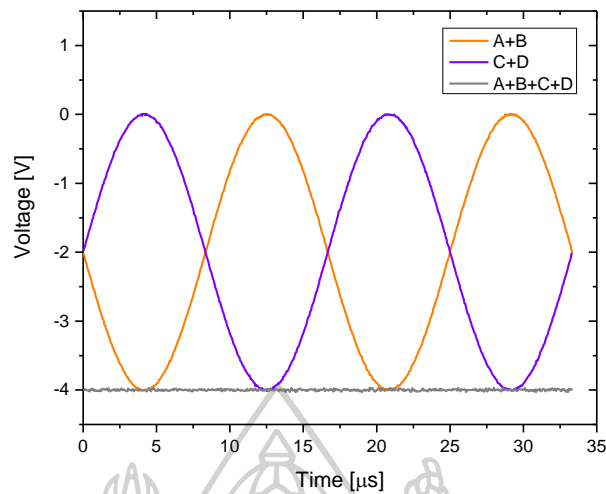
ผลของสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากสัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ A+B แสดงดังรูปที่ 3.31 และผลของสัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ C+D แสดงดังรูปที่ 3.32 จากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้จากทั้งสองช่องสัญญาณเป็นการขยายสัญญาณแบบรวมแรงดัน โดยมีกำลังขยาย 1 เท่า ซึ่งได้สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎีที่ได้ออกแบบมาให้มีกำลังขยายเท่ากับ 1 และค่าที่ได้เป็นค่าผลรวมแรงดันของทั้งสองช่องสัญญาณ



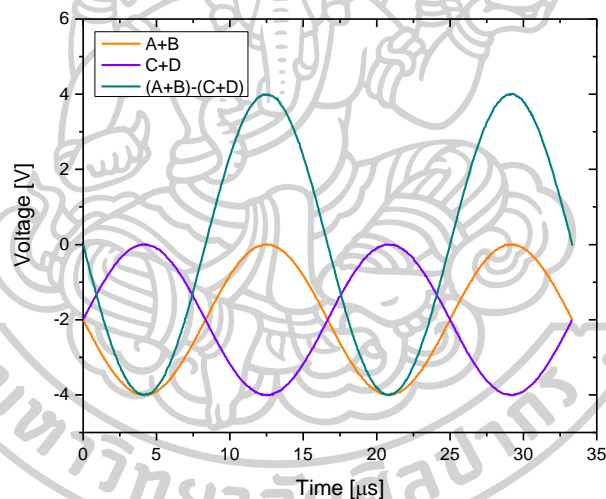
รูปที่ 3.31 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ A+B ในวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.32 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ C+D ในวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.33 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ A+B+C+D ในวงจรขยายสัญญาณ



รูปที่ 3.34 สัญญาณเอาต์พุตของช่องสัญญาณ (A+B)-(C+D) ในวงจรขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 3.33 จะเห็นว่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะมีเพียงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากการป้อนกระแสไฟฟ้าสลับที่มีขนาดเท่ากันและเฟสตรงข้ามกันจะเกิดการหักล้าง ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จึงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแต่ละช่องสัญญาณโดยไม่ขึ้นกับการสั้นของหัววัด จากรูปที่ 3.34 จะเห็นว่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์และไม่มีค่าออฟเซตโดยมีกำลังขยายเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณคือ 4 เท่า จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สัญญาณไฟฟ้าที่ได้ออกแบบมีความสอดคล้องกับวงจรที่ได้ออกแบบในเชิงทฤษฎี

3.1.5 ระบบวัดและวิเคราะห์ผลของสัญญาณไฟฟ้า

ในการวัดและวิเคราะห์ผลของสัญญาณไฟฟ้า ผู้วิจัยได้เลือกใช้ใช้ออสซิลโลสโคป (รุ่น DS1052E ที่ผลิตโดยบริษัท RIGOL) ดังรูปที่ 3.35 เป็นเครื่องมือเบื้องต้นในการวิเคราะห์สัญญาณทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.35 ออสซิลโลสโคปรุ่น DS1052E ผลิตโดยบริษัท RIGOL

และการวิเคราะห์ผลโดยละเอียด ผู้วิจัยได้เลือกใช้เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินรุ่น model LIA-MVD-200-H ผลิตโดยบริษัท Femto ดังรูปที่ 3.36 โดยมีคุณสมบัติเป็นไปตามตารางที่ 3.6 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณไฟฟ้าซึ่งให้ความละเอียดในการวัดสูงกว่าออสซิลโลสโคป



รูปที่ 3.36 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินรุ่น model LIA-MVD-200-H ผลิตโดยบริษัท Femto

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินรุ่น model LIA-MVD-200-H, Femto

<i>Lock-in-amplifier, model LIA-MVD-200-H, Femto</i>			
<i>Voltage Input Range</i>	3 μ V ... 1V	<i>Reference Input Voltage Range</i>	\pm 100 mV ... \pm 5 V
<i>Voltage Input Coupling</i>	AC	<i>Phase Shifter Type</i>	Digital, Working Frequency 50 Hz ... 120 kHz
<i>Voltage Input Impedance</i>	1 M Ω // 4 pF	<i>Phase Shifter Resolution</i>	1.4 ° @ f < 60 kHz, 2.8 ° @ f > 60 kHz
<i>Voltage Input Noise</i>	12 nV/ \sqrt Hz	<i>Phase Shifter Accuracy</i>	< 0.3 °
<i>Signal Monitor Output Gain</i>	1 ... 3333 (depends on Gain-Setting)	<i>Output Voltage Range</i>	\pm 10 V (@ 2 k Ω Load)
<i>Signal Monitor Output Impedance</i>	100 Ω	<i>Output Impedance</i>	50 Ω
<i>Supply Voltage</i>	\pm 15 Vdc ... \pm 18 Vdc		

เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินที่เลือกใช้เป็นชนิดเฟสคูซึ่งจะมีเอาต์พุตทั้งหมด 3 ค่าคือ ค่าแมกนิจูด (magnitude: R) ค่าสัญญาณอินเฟส (X) และค่าสัญญาณ Y (Y) โดยค่าของแมกนิจูดก็คือแอมพลิจูดของสัญญาณ และในการหาค่าเฟสจะอาศัยค่า R และ X มาคำนวณเพื่อหาค่าเฟสซึ่งสามารถคำนวณหาค่าเฟสได้ดังสมการที่ 3.5

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (3.5)$$

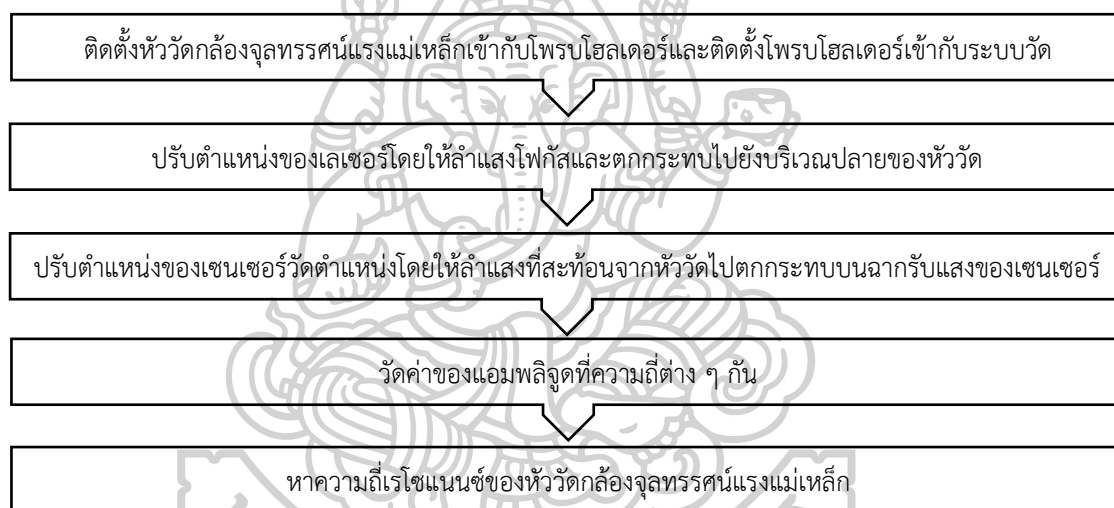
3.2 กระบวนการในวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล่องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล่องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กด้วยระบบที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น โดยจะแบ่งการวัดการตอบสนองของหัววัดออกเป็น 2 หัวข้อคือ การวัดการตอบสนองต่อความถี่ และการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก

3.2.1 การวัดการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

การวัดการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กมีจุดประสงค์เพื่อจะหาความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) ของหัววัด ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของหัววัด เช่น ค่าคงที่ของสปริง และค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเป็นต้น โดยทั่วไปความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดจะมีค่าประมาณ 60 – 70 กิโลเฮิร์ตซ์

ในการหาความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดทำได้โดยการให้สัญญาณไฟฟ้ากับเพียโซอิเล็กทริกเพื่อไปกระตุ้นให้หัววัดสั่น และทำการกวาดหาความถี่ในช่วง 60 – 70 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อตรวจหาความถี่ที่ทำให้แอมพลิจูดในการสั่นของหัววัดมีค่าสูงสุด ซึ่งจะมีค่าความต่างเฟสระหว่างการสั่นของหัววัดกับสัญญาณที่ป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกอยู่ 90 องศา โดยมีลำดับขั้นตอนในการวัดดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 ลำดับขั้นตอนการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

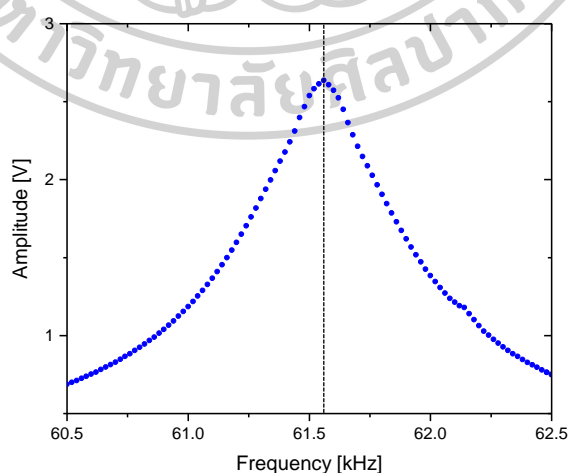
จากผังลำดับขั้นตอนในการวัดจะเริ่มจากการติดตั้งหัววัดลงบนโพรบโฮลเตอร์ ระหว่างการติดตั้งหัววัดลงบนโพรบโฮลเตอร์จะใช้สำลีชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (iso propyl alcohol) เพื่อทำความสะอาดโพรบโฮลเตอร์และฐานของหัววัดเพื่อกำจัดเศษฝุ่นผง เมื่อทำการติดตั้งหัววัดเรียบร้อยแล้ว ทำการติดตั้งโพรบโฮลเตอร์เข้ากับระบบวัด

ทำการจัดเรียงลำแสงเลเซอร์ให้โฟกัสและตกกระทบบนไปยังบริเวณตรงปลายของหัววัด จากนั้นตรวจสอบลำแสงเลเซอร์บนหัววัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูการตกกระทบบนของลำแสงซึ่งกล้องได้ถูกติดตั้งไว้ด้านบนของระบบจัดวางแสง ในขั้นตอนนี้จะปรับให้ลำแสงที่ไปตกกระทบบนหัววัดมีลักษณะเป็นจุดและอยู่กึ่งกลางของบริเวณปลายของหัววัด

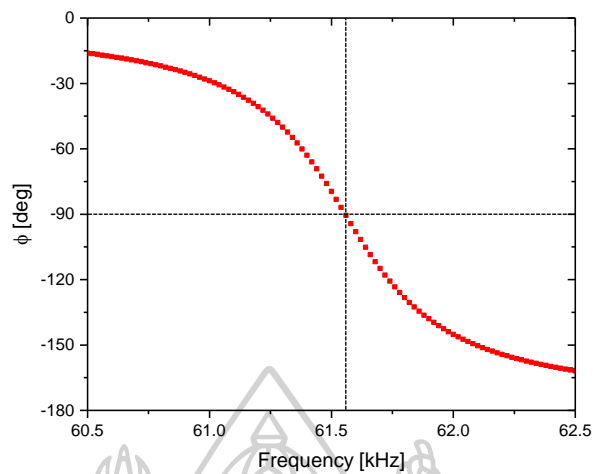
เมื่อลำแสงตกกระทบยังปลายของหัววัดจะสะท้อนกลับไปยัง PSD sensor ซึ่งจะทำให้การปรับให้ลำแสงตกลงบริเวณตรงกลางของฉากรับแสงใน PSD sensor โดยการปรับตำแหน่งของ PSD sensor และตรวจสอบลำแสงที่ตกกระทบลงบนฉากรับแสงโดยการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จาก PSD sensor ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จาก PSD sensor จะมีทั้งหมด 4 ช่องสัญญาณโดยแต่ละช่องสัญญาณแทนความเข้มของแสงที่ตกกระทบลงบนฉากรับแสงของแต่ละตำแหน่งใน PSD sensor โดยปรับตำแหน่งของ PSD sensor ให้ค่าของสัญญาณไฟฟ้าที่มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

หลังจากนั้นทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้าให้กับเพียโซอิเล็กทริกเพื่อกระตุ้นให้หัววัดสั่น โดยป้อนสัญญาณไฟฟ้าเป็นรูปคลื่นไซน์ แล้ววัดผลของขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าด้วยออสซิลโลสโคป ทำการกวาดความถี่ของสัญญาณที่ป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกตั้งแต่ 60 – 70 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อพบช่วงของความถี่เรโซแนนซ์แล้ว จึงทำการวัดค่าของแอมพลิจูดและเฟสของการสั่นของหัววัดโดยละเอียด โดยเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดโดยละเอียด

ตัวอย่างของผลการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในโหมดของแอมพลิจูดและเฟสแสดงดังรูปที่ 3.38 และ รูปที่ 3.39 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าหัววัดมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 61.56 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่ที่ให้ค่าแอมพลิจูดสูงสุดและให้เฟสในการสั่นเท่ากับ -90 องศา เพื่อความสะดวกในการทดลองจะใช้ค่าแอมพลิจูดในการหาความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด



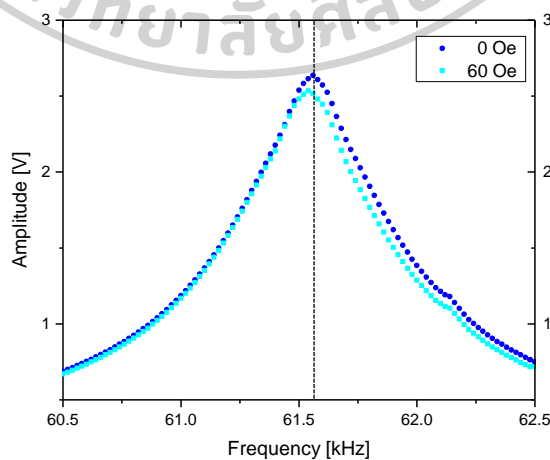
รูปที่ 3.38 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดในโหมดแอมพลิจูด



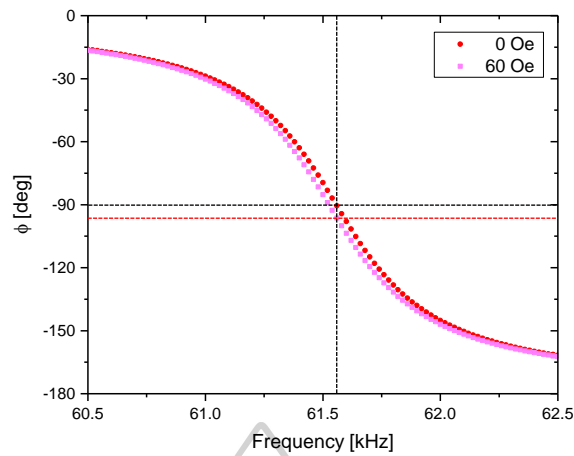
รูปที่ 3.39 ผลการตอบสนองต่อความถี่ของหัววัดในโหมดเฟส

3.2.2 การวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

การวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเป็นการวัดความไวในการเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูดหรือเฟสในการส่งที่ความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดเทียบกับสัญญาณที่ป้อนให้เพียงโซ่อิเล็กทริก เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำโดยโซลินอยด์ ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้เคลือบหัววัดและความหนาของสารที่เคลือบเป็นตัวแปรสำคัญ การเปลี่ยนแปลงขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของการส่งของหัววัดแสดงดังรูปที่ 3.40 และ รูปที่ 3.41 ตามลำดับ



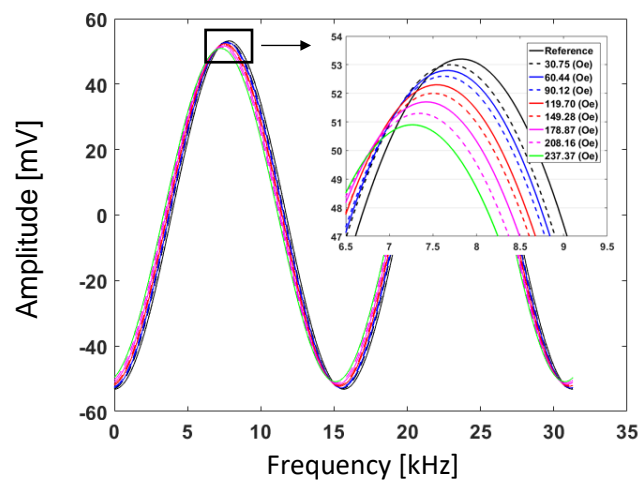
รูปที่ 3.40 ผลของแอมพลิจูดที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสนามแม่เหล็ก เมื่อกระตุ้นให้หัววัดส่งด้วยความถี่ต่างกัน



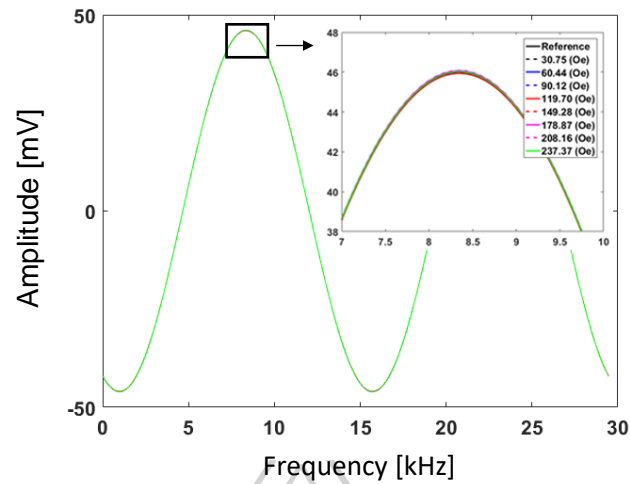
รูปที่ 3.41 ผลของเฟสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากสนามแม่เหล็ก เมื่อกระตุ้นให้หัววัดสั่นด้วยความถี่ต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.40 และ รูปที่ 3.41 จะพบว่าขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของการสั่นมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่หัววัด โดยจะสังเกตได้ว่าที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าของแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลงไปมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าของเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวัดการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่ความถี่เรโซแนนซ์มาใช้เป็นตัวแทนของความไวในการตอบสนองของหัววัดคลั่งจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในการทดลองสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้จากออสซิลโลสโคปดังแสดงในรูปที่ 3.42 และ รูปที่ 3.43 ซึ่งจะเห็นว่าแต่ละหัววัดมีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแตกต่างกันออกไป ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.42 เป็นผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่มีการตอบสนองที่ดี และรูปที่ 3.43 เป็นผลการตอบสนองของหัววัดที่มีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กต่ำ

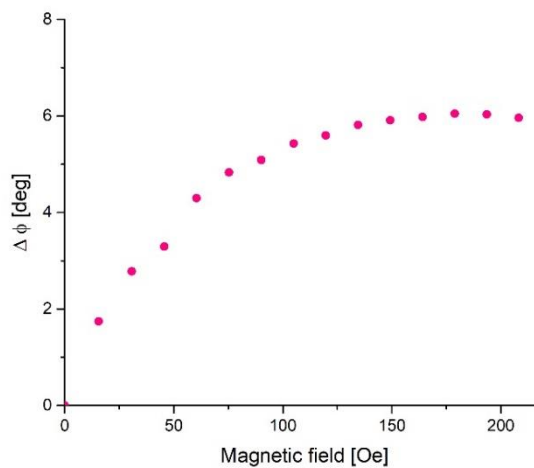


รูปที่ 3.42 ผลของสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดคุณภาพดีที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน



รูปที่ 3.43 ผลของสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดคุณภาพต่ำที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน

ดังนั้นในการวิเคราะห์ความไวในการตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กจะทำการวัดเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปจากเฟสของสัญญาณไฟฟ้าขณะไม่ใส่สนามแม่เหล็ก โดยวันที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 ตัวอย่างผลเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน

จากรูปจะเห็นว่าหัววัดจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีในช่วงของสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 – 100 Oe และเมื่อให้สนามแม่เหล็กมากกว่า 100 Oe ขึ้นไปจะพบว่ามีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจะมีการอิ่มตัว ซึ่งก็คือเป็นช่วงอิ่มตัวในการวัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกให้การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 – 100 Oe และให้อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสเนื่องจากความเข้มของสนามแม่เหล็กแทนความไวในการตอบสนองของหัว

บทที่ 4

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลกระทบต่าง ๆ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการวัดการตอบสนองของหัววัดในเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้น และได้ทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือโดยทำการเปรียบเทียบความถี่ของแอมพลิจูดที่วัดได้จากเครื่องมือที่พัฒนากับเครื่องมือมาตรฐาน นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่เคลือบด้วยความหนาต่างกัน ภายในบทนี้ได้แบ่งหัวข้อเป็นดังต่อไปนี้

4.1 ผลกระทบของความเข้มแสงของเลเซอร์ต่อการวัดตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

4.2 ผลกระทบของขนาดแอมพลิจูดในการสั่นหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กต่อการวัดตอบสนองของหัววัด

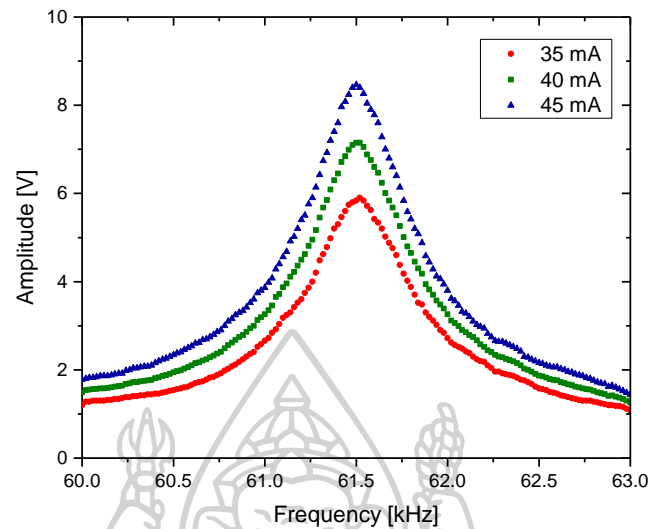
4.3 ความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

4.4 การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่าง ๆ กัน

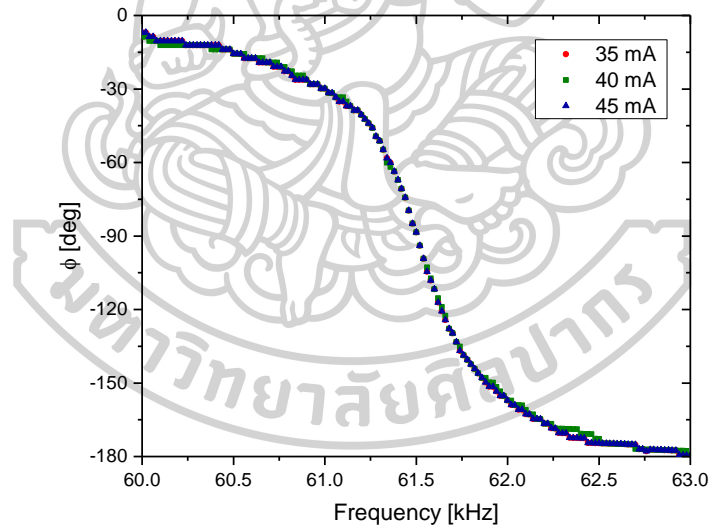
4.5 ความไวในการตอบสนองทางแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

4.1 ผลกระทบของความเข้มแสงของเลเซอร์ต่อการวัดตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของความเข้มแสงของเลเซอร์ว่าส่งผลอย่างไรต่อการวัดการสั่นของหัววัด โดยทำการศึกษาขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จาก PSD sensor ผู้วิจัยได้เลือกจ่ายกระแสให้กับเลเซอร์จำนวน 3 ค่า คือ 35 40 และ 45 มิลลิแอมป์ ซึ่งให้ความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ต่างกัน โดยผลของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ความเข้มแสงต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ผลของแอมพลิจูดที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ความเข้มแสงต่างกัน



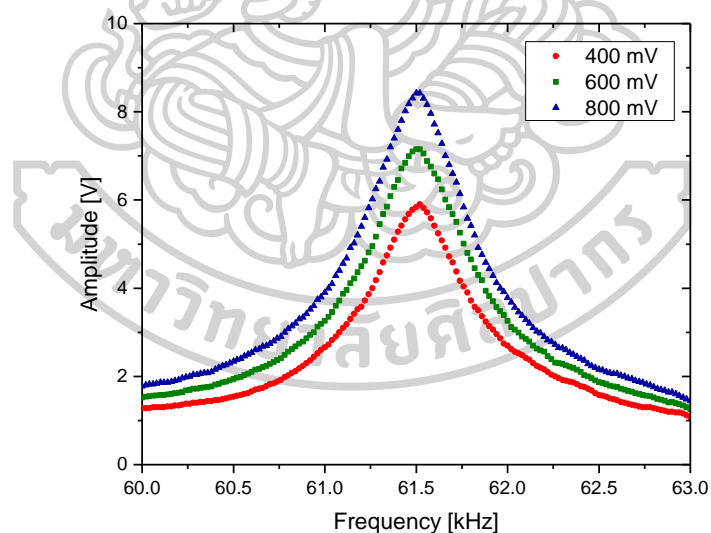
รูปที่ 4.2 ผลของเฟสที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ความเข้มแสงต่างกัน

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าความเข้มแสงเลเซอร์ส่งผลต่อขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จาก PSD sensor โดยเมื่อเพิ่มขนาดของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเลเซอร์ แสงเลเซอร์ก็จะมีค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของวงจรรขยายสัญญาณที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 โดยเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นแรงดันไฟฟ้าจาก PSD sensor ก็เพิ่มขึ้นด้วย และพบว่าขนาดของความเข้มแสงไม่

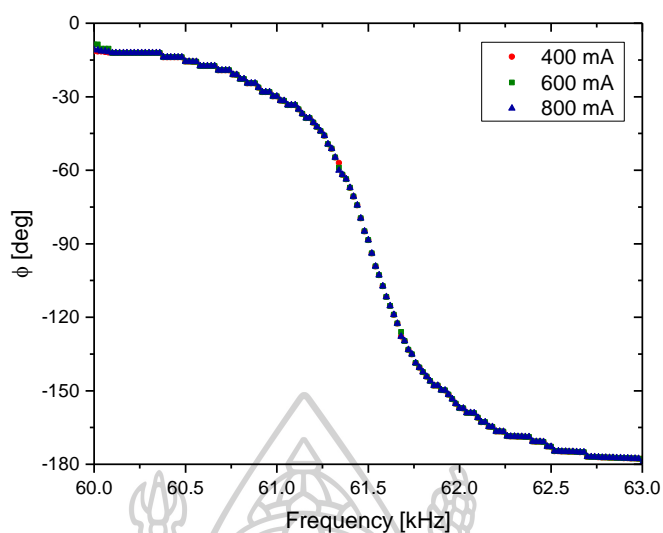
ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัด เมื่อพิจารณาผลของเฟสของสัญญาณไฟฟ้าจาก PSD sensor จะเห็นว่า ความเข้มของแสงไม่ส่งผลต่อค่าเฟสของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้ค่าของเฟสเป็นวัดการตอบสนองของหัววัด เพื่อลดผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงเลเซอร์อันเนื่องมาจากการจ่ายกระแสที่ไม่คงที่จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า

4.2 ผลกระทบของแอมพลิจูดในการสั่นหัววัดต่อการตอบสนองของหัววัดคลังจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

จากทฤษฎีจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของสัญญาณที่วัดได้จาก PSD sensor จะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของการสั่นหัววัด ดังสมการที่ 2.13 ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของเฟสจะไม่ขึ้นกับแอมพลิจูดของการสั่น ในหัวข้อนี้เป็นทดสอบผลของขนาดแอมพลิจูดในการสั่นหัววัดที่ค่าต่างกัน เพื่อดูว่าขนาดของแอมพลิจูดส่งผลอย่างไรต่อการสั่นของหัววัด โดยได้ทำการศึกษาผลกระทบของขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าที่ป้อนให้เพียโซอิเล็กทริก ผู้วิจัยได้เลือกขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้ามาทดลองจำนวน 3 ค่าคือ 400 600 และ 800 มิลลิโวลต์ เพื่อดูผลของแอมพลิจูดและเฟสในการสั่นของหัววัดที่ความถี่ต่าง ๆ ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลของแอมพลิจูดที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ค่าแอมพลิจูดในการสั่นหัววัดต่างกัน

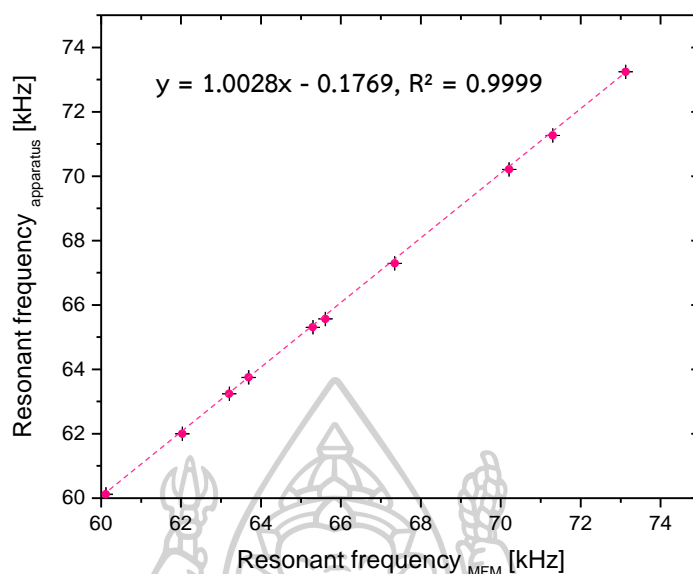


รูปที่ 4.4 ผลของเฟสที่ความถี่ต่าง ๆ โดยวัดที่ค่าแอมพลิจูดในการสั่นหัววัดต่างกัน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดของแอมพลิจูดในการสั่นของหัววัดส่งผลโดยตรงต่อขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณที่วัดได้จาก PSD sensor เมื่อเพิ่มขนาดแอมพลิจูดของการสั่น จะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จาก PSD sensor มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดและเฟสของสัญญาณที่วัดได้จาก PSD sensor ซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวัดผลในรูปของเฟสของสัญญาณไฟฟ้าเพื่อลดผลกระทบในการสั่นของหัววัด และเลือกใช้ค่า 600 มิลลิโวลต์เป็นค่ามาตรฐานในการขับให้เพียโซอิเล็กทริกสั่น

4.3 ความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

เพื่อทดสอบความเที่ยงตรงและความแม่นยำแม่นยำในการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้วัดความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดโดยเปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์ที่วัดได้จากกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กซึ่งถือเป็นเครื่องมือมาตรฐานกับเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น ในการทดสอบ ผู้วิจัยได้เลือกตัวอย่างของหัววัดมาทดสอบวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์จำนวน 10 ตัวอย่างซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



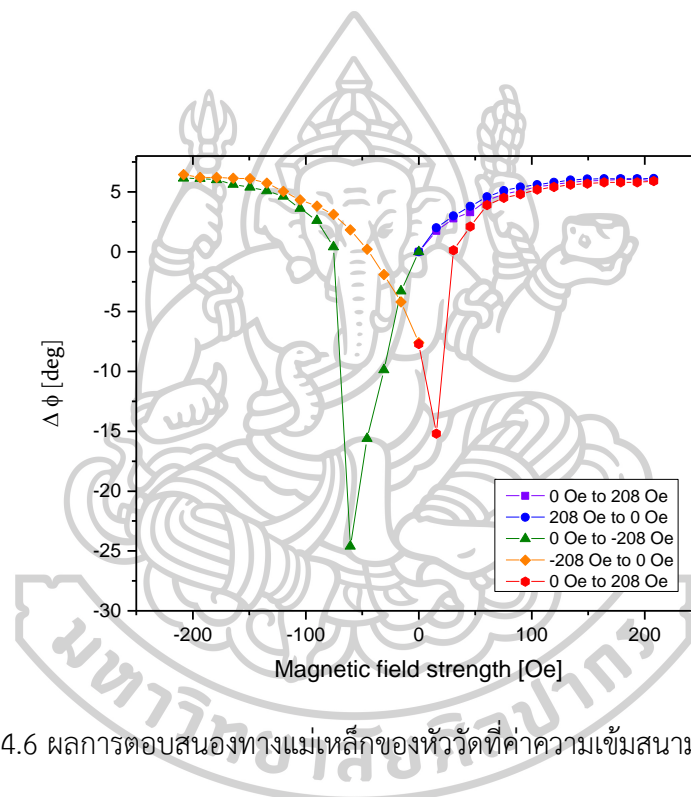
รูปที่ 4.5 ผลการวัดความถี่เรโซแนนซ์ของของหัววัดด้วยเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นเทียบกับกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

จากรูปจะเห็นว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กได้ใกล้เคียงกับการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยค่าที่วัดได้มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.0028 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 99.99% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดได้แม่นยำใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน

4.4 การวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop ของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

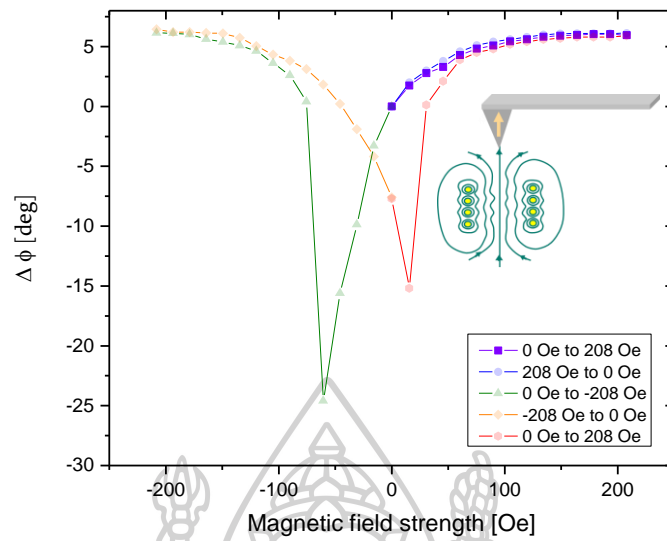
ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กค่าต่าง ๆ เพื่อดูพฤติกรรมของการตอบสนองของหัววัด โดยจะทำการหาช่วงของการตอบสนองที่เหมาะสม ซึ่งจะนำไปใช้ในการวัดความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำหัววัดมาทำการศึกษาทั้งหมด 2 ประเภทคือ หัววัดเชิงพาณิชย์ และหัววัดที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเคลือบด้วยสารแม่เหล็กชนิดเดียวกันคือ นิกเกิล ที่ความหนาต่างกัน แต่ด้วยการตอบสนองของหัววัดทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะคล้ายกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงขออธิบายตัวอย่างจากการวัดเพียงตัวอย่างเดียว ซึ่งแทนพฤติกรรมของการตอบสนองของหัววัดในงานวิจัยนี้ทั้งหมด

ในการทดลองเพื่อวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop ผู้วิจัยได้วัดผลการตอบสนองของหัววัดในรูปแบบเฟสของสัญญาณไฟฟ้าจาก PSD sensor ที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน และเพื่อความสะดวกในการพิจารณา ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลโดยพิจารณาจากเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปจากเฟสของสัญญาณไฟฟ้าขณะที่หัววัดไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังรูปที่ 4.6 โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำวัดการตอบสนองของหัววัดภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มตั้งแต่ 0-200 Oe และมีทิศทางพุ่งขึ้นและลงในแนวแกน Z จากรูปจะเห็นได้ว่าการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดมีลักษณะเป็น hysteresis loop โดยสามารถอธิบายลักษณะของปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ดังต่อไปนี้



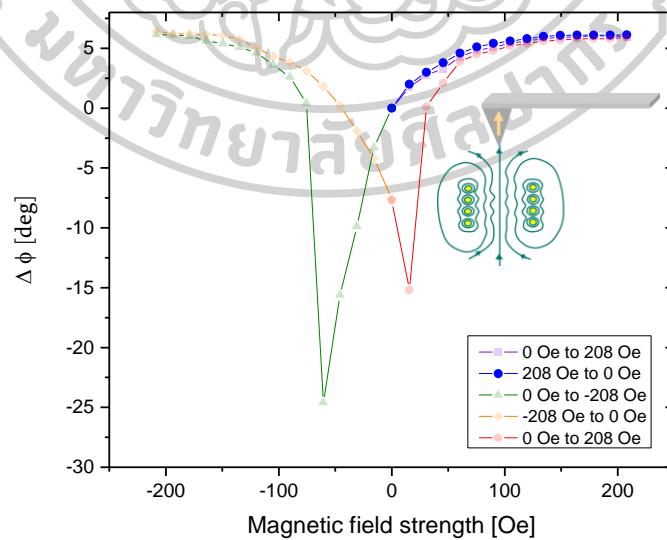
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองทางแม่เหล็กของหัววัดที่ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ

ในขั้นตอนแรกของการวัด ผู้วิจัยได้ให้สนามแม่เหล็กที่มีทิศพุ่งขึ้นในแนวแกน Z เพื่อให้ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดมีทิศทางพุ่งขึ้นในสภาวะเริ่มต้น จากนั้นเริ่มให้สนามแม่เหล็กแก่หัววัดตั้งแต่ 0 Oe จนถึง 200 Oe โดยผลการทดลองแสดงในเส้นสีม่วงในรูปที่ 4.7 ในช่วงนี้ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดมีทิศพุ่งขึ้น และทิศของสนามแม่เหล็กที่ให้แก่หัววัดมีทิศทางพุ่งขึ้นในแนวแกน Z เช่นเดียวกัน ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดแรงดูดต่อหัววัด



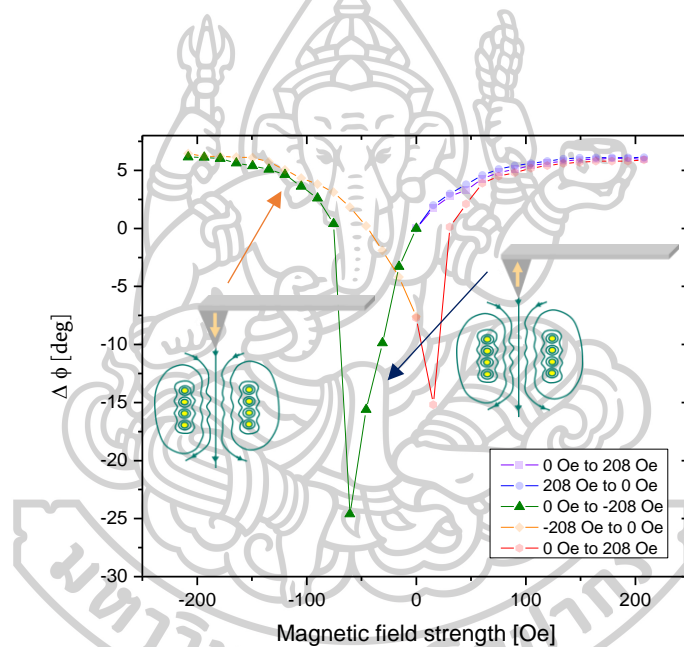
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในชั้นที่ 1 ของ hysteresis loop

จากนั้นลดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ให้กับหัววัดลงจาก 200 Oe จนถึง 0 Oe ผลการวัดแสดงในเส้นสีน้ำเงินของรูปที่ 4.8 ซึ่งในช่วงนี้ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดยังคงมีทิศพุ่งขึ้น และทิศของสนามแม่เหล็กที่ให้แก่หัววัดก็มีทิศทางพุ่งขึ้นในแกน Z เช่นเดียวกัน ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดแรงดูดกระทำต่อหัววัด



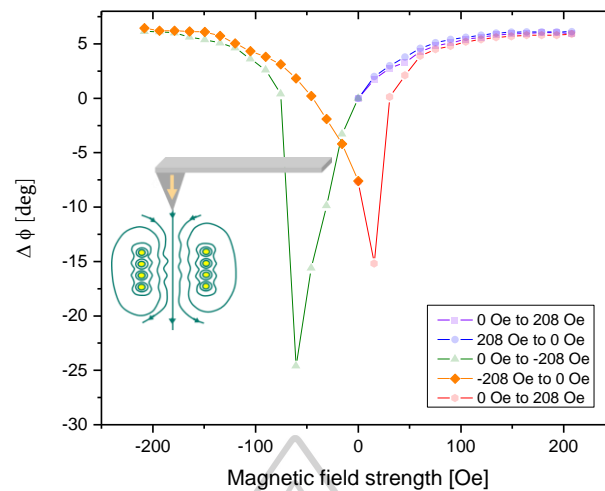
รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในชั้นที่ 2 ของ hysteresis loop

หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ให้กับหัววัด โดยการเปลี่ยนทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโซลินอยด์ และให้สนามแม่เหล็กแก่หัววัดตั้งแต่ 0 Oe ถึง -200 Oe ผลการวัดแสดงในเส้นสีเขียวในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่าเมื่อให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มจาก 0 Oe จนถึง -75 Oe ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดเฉลี่ยยังคงมีทิศพุ่งขึ้นแต่สนามแม่เหล็กที่ให้แก่หัววัดมีทิศพุ่งลงลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดแรงผลักกระทำต่อหัววัด และพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอีกทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดจะมีการเปลี่ยนทิศเป็นทิศลงในขณะที่สนามแม่เหล็กที่ให้แมกนีทิสตลงซึ่งทำให้แรงที่กระทำต่อหัววัดเป็นแรงดูด และมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับแรงที่มากระทำต่อหัววัดเป็นแรงผลัก โดยเมื่อเวลาที่กระทำเป็นแรงดูด ผลการตอบสนองของหัววัดจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเฟสคล้ายกันกับในขั้นตอนแรกซึ่งแรงที่มากระทำเป็นแรงดูดเช่นเดียวกัน



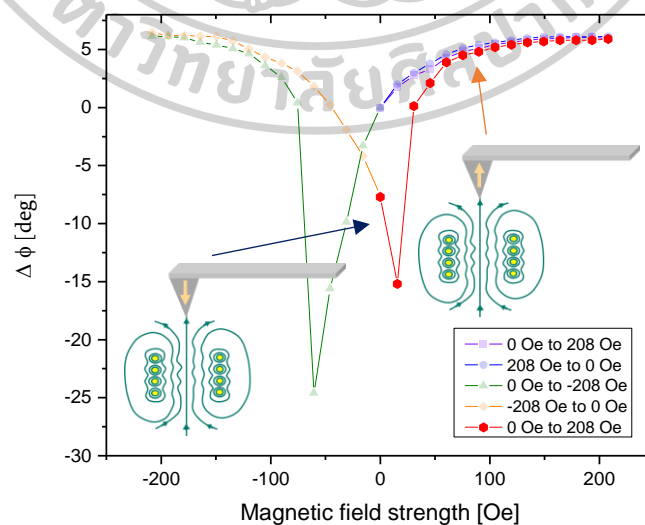
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในขั้นที่ 3 ของ hysteresis loop

จากนั้นทำการลดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ให้กับหัววัดจาก -200 Oe ถึง 0 Oe โดยผลของการวัดแสดงในเส้นส้มของรูปที่ 4.10 ในช่วงนี้ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดยังคงมีทิศพุ่งลงในแนวแกน Z และทิศของสนามแม่เหล็กที่ให้แก่หัววัดก็มีทิศทางพุ่งลงในแกน Z เช่นเดียวกันลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดแรงดูดกระทำต่อหัววัด



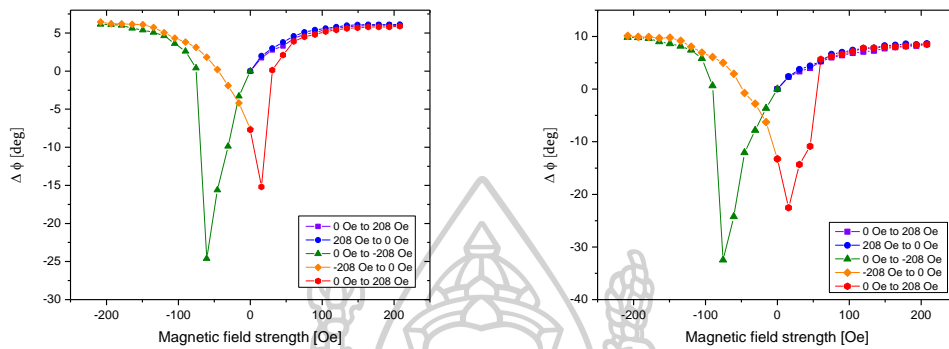
รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในชั้นที่ 4 ของ hysteresis loop

ขั้นตอนสุดท้ายจะทำการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กที่ให้กับหัววัด จากสนามแม่เหล็กที่มีทิศพุ่งลงในแนวแกน Z ให้มีทิศพุ่งขึ้นในแนวแกน Z โดยให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มตั้งแต่ 0 Oe ไปจนถึง 200 Oe ผลของการวัดแสดงด้วยเส้นสีแดงในรูปที่ 4.11 ในขั้นตอนนี้พบว่า การตอบสนองของหัววัดมีลักษณะคล้ายกับในขั้นตอนที่ 3 คือเมื่อให้สนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจาก 0 Oe จนถึง 20 Oe ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดเฉลี่ยยังคงมีทิศพุ่งลงในแนวแกน Z แต่สนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแรงผลักกระทำต่อหัววัด และพบว่าเมื่อให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดก็จะมี การเปลี่ยนทิศเป็นทิศพุ่งขึ้น เช่นเดียวกับสนามแม่เหล็ก จึงทำให้แรงที่กระทำต่อหัววัดเป็นแรงดูด

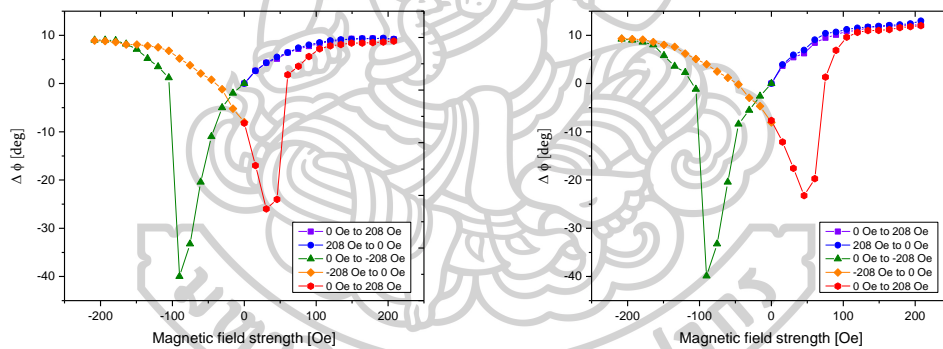


รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดในชั้นที่ 5 ของ hysteresis loop

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำหัววัดมาทำการศึกษาทั้งหมด 2 ประเภทคือ หัววัดเชิงพาณิชย์ และ หัววัดที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งเคลือบด้วยสารแม่เหล็กชนิดเดียวกันคือ นิกเกิล ที่ความหนาต่างกัน ผลการวัด การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop มีลักษณะคล้ายกัน ดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ผลการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop ของหัววัดเชิงพาณิชย์ ที่ ความหนา 40 nm (ซ้าย) และความหนา 50 nm (ขวา)



รูปที่ 4.13 ผลการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop ของหัววัดที่พัฒนาขึ้น ที่ ความหนา 40 nm (ซ้าย) และความหนา 60 nm (ขวา)

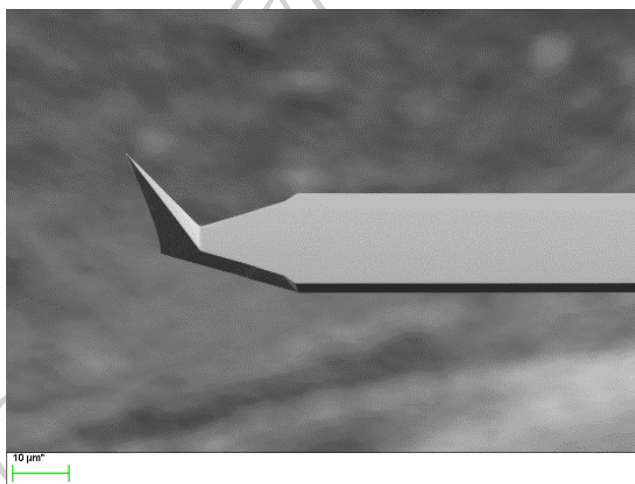
จากการศึกษาพฤติกรรมของการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดพบว่า มีลักษณะการตอบสนองในแบบเดียวกันแต่มีค่าอิมิตัวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กและค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดแตกต่างกันออกไป ผู้วิจัยจึงเลือกวิธีการตรวจวัดความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กด้วยการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากสภาวะเริ่มต้นคือให้ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดมีทิศเดียวกันกับสนามแม่เหล็กที่ใช้ทดสอบ ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้สนามแม่เหล็กและทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดมีทิศทางพุ่งขึ้นในแนวแกน Z

4.5 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้เป็นการวัดความไวในการตอบสนองทางแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยได้ทำการศึกษาดัวย่างของหัววัดที่ความหนาของสารเคลือบต่าง ๆ กัน โดยหัววัดตัวอย่างที่ได้นำมาศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ หัววัดเชิงพาณิชย์ และหัววัดที่ได้พัฒนาขึ้น

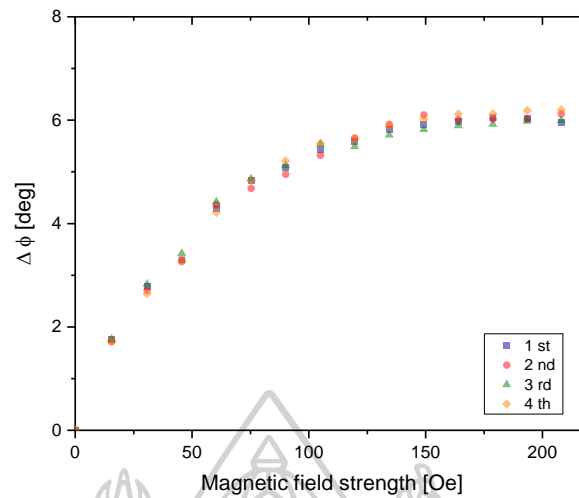
4.5.1 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กเชิงพาณิชย์

หัววัดเชิงพาณิชย์ที่ได้นำมาศึกษาลิตขึ้นโดยบริษัท Nanosensors™ ซึ่งมีรูปทรงเป็นแบบ ATEC ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยเคลือบด้วยนิกเกิลและมีความหนา 3 ขนาดคือ 30 40 และ 50 nm

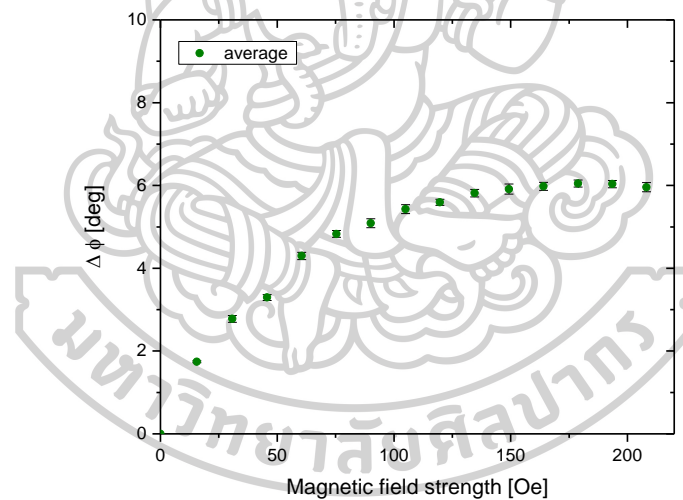


รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัดเชิงพาณิชย์

ในกระบวนการวัดความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 1 ในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กแบบ hysteresis loop คือวัดการเปลี่ยนแปลงของเฟสจากเฟสในกรณี หัววัดไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของเฟสเนื่องจากสนามแม่เหล็กตั้งแต่ 0 Oe จนถึง 200 Oe ในสถานะที่ทิศของแมกนีไทเซชันภายในหัววัดมีทิศเดียวกับทิศของสนามแม่เหล็ก โดยได้ทำการวัดซ้ำจำนวน 4 ครั้งดังรูปที่ 4.15 และนำข้อมูลที่วัดได้มาเฉลี่ยดังในรูปที่ 4.16

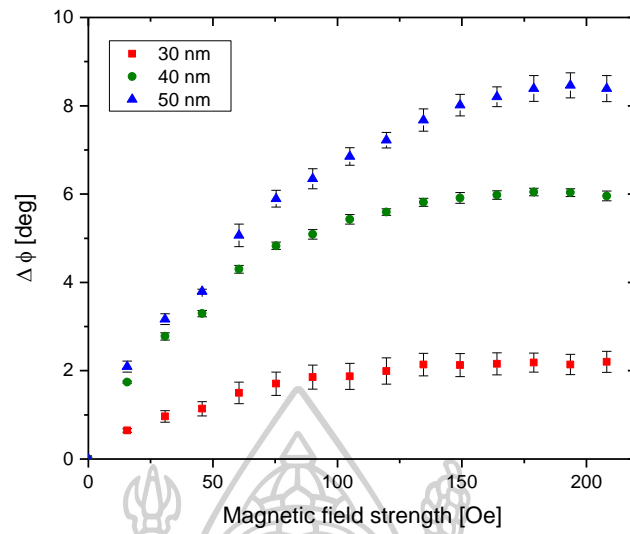


รูปที่ 4.15 ผลการตอบสนองของหัววัดเชิงพาณิชย์ที่ความหนา 40 nm โดยวัดที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน

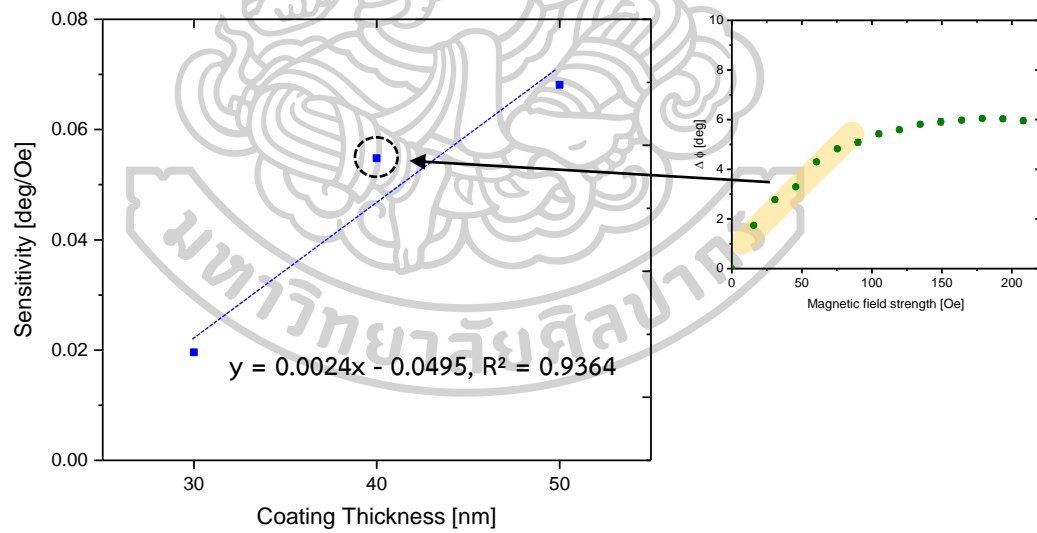


รูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยของผลการตอบสนองของหัววัดที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน

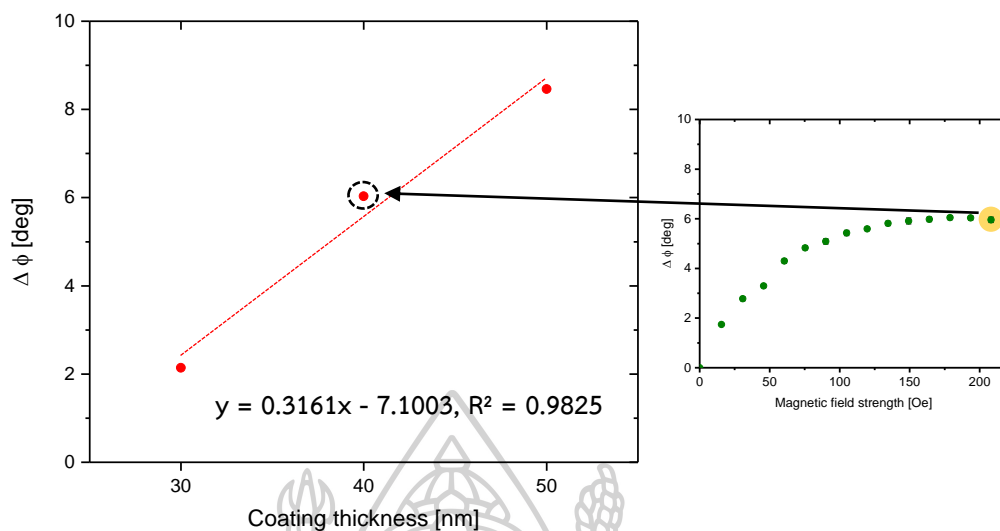
ผลการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่ความหนา 30 40 และ 50 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.17 จากรูปจะเห็นว่าหัววัดจะตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กได้ดีในช่วงความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่เกิน 100 Oe ซึ่งจะเป็นช่วงที่ใช้ในการบ่งบอกถึงความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด และเมื่อให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่า 100 Oe พบว่าเฟรมมีการเปลี่ยนแปลงคงที่ เนื่องจากเป็นช่วงอิ่มตัวของ การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด



รูปที่ 4.17 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเชิงพาณิชย์ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กต่างกัน



รูปที่ 4.18 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเชิงพาณิชย์ที่ความหนาต่างกัน โดยคำนวณจากความชันของผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงความถี่ 0 Oe – 100 Oe

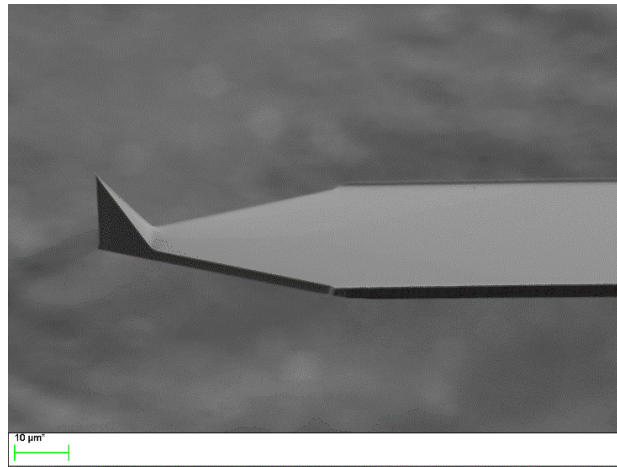


รูปที่ 4.19 ผลของเฟสที่เปลี่ยนไปที่ความหนาของสารเคลือบต่างกันของหัววัดเชิงพาณิชย์ โดยทำการวัดช่วงอิมิตัวที่ 210 Oe

การหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ คำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต่างเฟสของสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นความต่างเฟสระหว่างเฟสของสัญญาณขณะที่หัววัดอยู่ในสนามแม่เหล็กกับเฟสของสัญญาณขณะที่หัววัดไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ผลของความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเชิงพาณิชย์ที่ความหนาต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.18 จากรูปแสดงให้เห็นว่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดขึ้นอยู่กับความหนาของสารเคลือบบนหัววัด โดยเมื่อความหนาของสารเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้ความไวในการตอบสนองดีขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับทางทฤษฎี นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของเฟสเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สภาวะอิมิตัวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้ทำการวัดที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 210 Oe โดยผลของการวัดแสดงดังรูปที่ 4.19 จากรูปจะเห็นว่าที่สภาวะอิมิตัวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสามารถใช้ในจำแนกความหนาของสารเคลือบได้

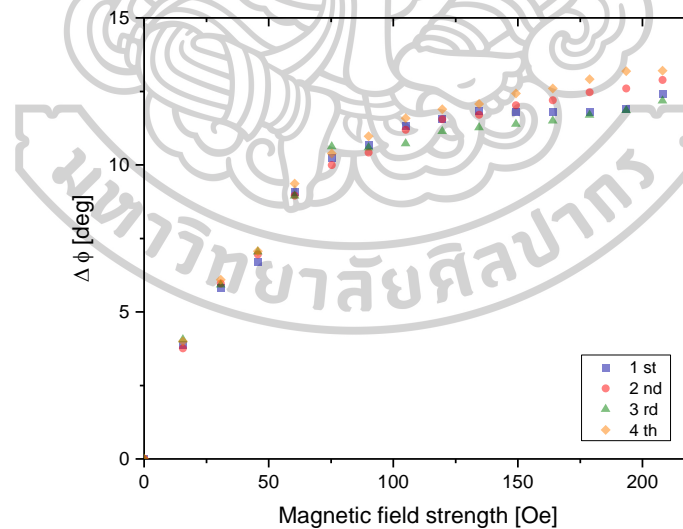
4.5.2 หัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาหัววัดโดยใช้เทคนิคเคลือบบนหัววัด ซึ่งใช้เทคนิค electron beam evaporation ในการเคลือบนิเกิลลงบนหัววัด โดยได้ทำการเคลือบที่ความหนาต่างกัน 3 ค่าคือ 20, 40 และ 60 นาโนเมตร ลักษณะของหัววัดที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.20

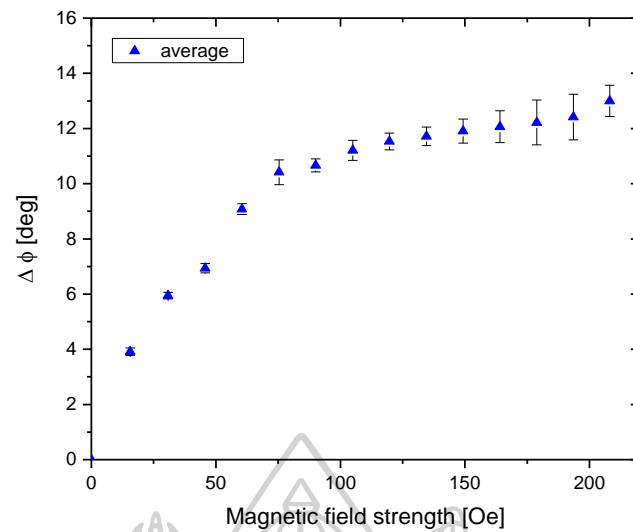


รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของหัววัดที่พัฒนาขึ้น

กระบวนการวัดความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่พัฒนาขึ้นใช้หลักการเดียวกันในการวัดความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดเชิงพาณิชย์ โดยทำการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกันจำนวน 4 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาเฉลี่ยดังรูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22 ตามลำดับ

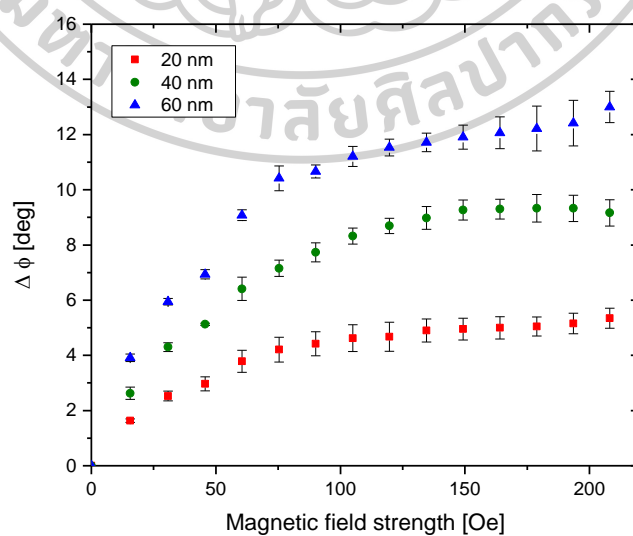


รูปที่ 4.21 ผลการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นที่ความหนา 60 nm โดยวัดที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน

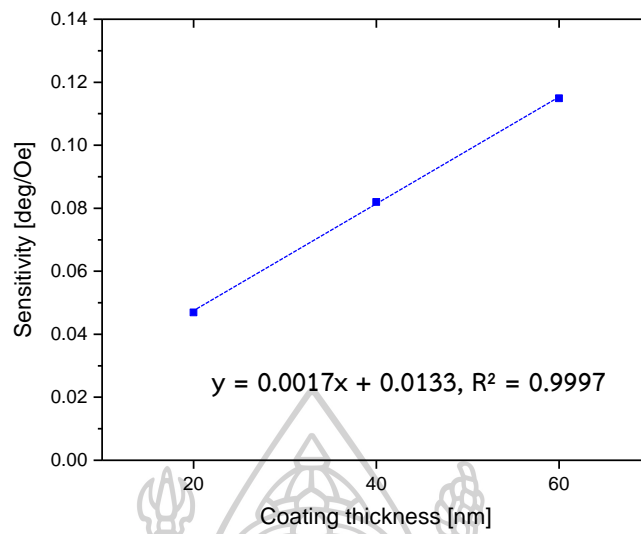


รูปที่ 4.22 ค่าเฉลี่ยของผลการตอบสนองของหัววัดที่พัฒนาขึ้นที่ความหนา 60 nm โดยวัดที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน

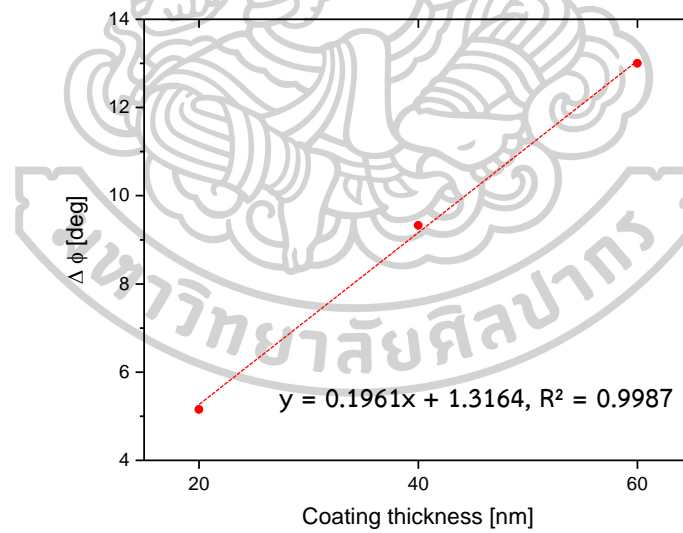
ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่ความหนา 20 40 และ 60 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.23 จากรูปจะเห็นว่า การตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดจะตอบสนองได้ดีในช่วงความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่เกิน 100 Oe โดยช่วงนี้จะใช้ในการบ่งบอกถึงความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด และเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่า 100 Oe จะพบว่าเฟสมีการเปลี่ยนแปลงคงที่ ซึ่งก็คือเป็นช่วงอิ่มตัวในการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด



รูปที่ 4.23 ผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่พัฒนาขึ้นที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน



รูปที่ 4.24 ความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่ได้พัฒนาขึ้นที่ความหนาต่างกัน โดยคำนวณจากความชันของผลการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กในช่วงความเข้ม 0 Oe – 100 Oe



รูปที่ 4.25 ผลของเฟสที่เปลี่ยนไปที่ความหนาของสารเคลือบต่างกันของหัววัดที่พัฒนาขึ้น โดยทำการวัดช่วงอิมิตัวที่ 210 Oe

การหาค่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกัล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ คำนวณจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความต่างเฟสของสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นความต่างเฟสระหว่างเฟสของสัญญาณขณะที่หัววัดอยู่ในสนามแม่เหล็กกับเฟสของสัญญาณขณะที่หัววัดไม่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ผลของความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่พัฒนาขึ้นโดยวัดที่ความหนาต่างกันดังรูปที่ 4.24 จากรูปแสดงให้เห็นว่าความไวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดขึ้นอยู่กับความหนาของสารเคลือบบนหัววัด โดยเมื่อความหนาของสารเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้ความไวในการตอบสนองดีขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับทางทฤษฎี นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของเฟสเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่สภาวะอิมิตัวการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็ก ซึ่งได้ทำการวัดที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่ากับ 210 Oe โดยผลของการวัดแสดงดังรูปที่ 4.25 จากรูปจะเห็นว่าที่สภาวะอิมิตัวในการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กสามารถใช้ในจำแนกความหนาของสารเคลือบได้เช่นกัน



บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือเพื่อใช้สำหรับวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก โดยได้ใช้ขดลวดโซลินอยด์เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก โซลินอยด์นี้เองจะสร้างสนามแม่เหล็กเพื่อใช้วัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัด และเนื่องจากออกแบบให้โซลินอยด์เป็นแกนอากาศ จึงทำให้การตรวจสอบหัววัดจะไม่เกิดการสัมผัสกับวัตถุใด ๆ ทำให้เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นการตรวจวัดแบบไม่ทำลาย (nondestructive testing) เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถตรวจวัดหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กที่มีความถี่เรโซแนนซ์ตั้งแต่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 80 กิโลเฮิร์ตซ์ และหัววัดต้องมีความยาวตั้งแต่ 150 ไมโครเมตร และต้องยาวไม่เกิน 500 ไมโครเมตร

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กพบว่า สามารถเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กได้ตั้งแต่ -200 Oe ถึง 200 Oe โดยการควบคุมกระแสไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาลักษณะของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นได้พบว่า บริเวณจุดศูนย์กลางของโซลินอยด์จะให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่าเท่า ๆ กันโดยที่ตำแหน่งดังกล่าวเป็นมีลักษณะเป็นรูปร่างกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร โดยในบริเวณนี้จะมีความต่างของค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่เกิน 5 % ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะห่างระหว่างหัววัดกับโซลินอยด์ด้วย Z-stage โดยที่สามารถปรับระดับความสูงได้โดยไมโครมิเตอร์ ซึ่งจะทำให้วัดสามารถวัดได้ที่ความสูงคงค่าเดิมทุกครั้ง

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ออกแบบวงจรขยายสัญญาณเพื่อใช้กับ PSD sensor โดยเฉพาะ ผลการทดสอบประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณที่ได้ออกแบบนี้ พบว่าสามารถทำงานร่วมกับ PSD sensor ได้เป็นอย่างดี โดยสัญญาณที่ผ่านการขยายโดยวงจรจะได้สัญญาณที่มีความเข้มเพิ่มขึ้นและมีสัญญาณรบกวนต่ำ เนื่องจากเป็นการรวมสัญญาณทั้งสี่ช่องของ PSD sensor เข้าด้วยกัน

จากการศึกษาผลกระทบของความเข้มของแสงเลเซอร์และผลกระทบของแอมพลิจูดในการสั่นของหัววัดต่อการตอบสนองของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก แสดงให้เห็นว่าทั้งสองตัวแปรจะส่งผลโดยตรงต่อขนาดแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จาก PSD sensor แต่ไม่ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดและเฟสของสัญญาณที่วัดได้จาก PSD sensor ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงเลือกวัดผลการตอบสนองของหัววัดในรูปของเฟสของสัญญาณไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบอันจะเกิดได้จากความเข้มของแสงเลเซอร์และขนาดของแอมพลิจูดในการสั่นของหัววัดที่อาจไม่เท่ากันตลอดการตรวจสอบหัววัด

ในการตรวจสอบความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการวัดการตอบสนองต่อความถี่ของเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดแต่ละหัววัด กับการวัดความถี่เรโซแนนซ์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก ซึ่งถือได้ว่าเป็นเครื่องมือมาตรฐาน ผลในการเปรียบเทียบพบว่าเครื่องมือที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีความเที่ยงตรงและมีความแม่นยำสูง ซึ่งสามารถวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหัววัดได้เท่ากับกับเครื่องมือมาตรฐาน และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 99.99%

การทดสอบการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กและการทดสอบการใช้งานจริงของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับหัววัด ทั้ง หัววัดเชิงพาณิชย์ และหัววัดที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นหัววัดที่ใช้วัสดุแม่เหล็กในการเคลือบเหมือนกันคือ นิกเกิล ทำการเคลือบที่ความหนาต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือที่ได้พัฒนาสามารถใช้ในการจำแนกความหนาของสารที่เคลือบได้ โดยความไวในการตอบสนองของหัววัดจะขึ้นอยู่กับความหนาของสารแม่เหล็กที่ใช้เคลือบหัววัด นอกจากนี้ยังพบว่ายังสามารถจำแนกความหนาของสารที่เคลือบบนหัววัดโดยการวัดการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กของหัววัดที่สภาวะอิมิตัวได้อีกวิธีหนึ่ง

โดยสรุปแล้วเครื่องมือที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ในการวัดการตอบสนองต่อความถี่และสนามแม่เหล็กของหัววัดกล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี สิ่งหนึ่งที่ต้องควรระวังเป็นพิเศษในการใช้งานคือ การติดตั้งหัววัดเข้ากับระบบวัดเนื่องจากหัววัดมีขนาดเล็กมากอยู่ในระดับไมโครเมตรและประกบกับตัวของหัววัดเองค่อนข้างบอบบาง ดังนั้นจึงต้องใช้ความละเอียดรอบคอบอย่างมากในการติดตั้งหัววัดเข้ากับระบบวัด เครื่องมือที่ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาขึ้นนี้เป็นเพียงต้นแบบการวัดการตอบสนองของหัววัดโดยเป็นการวัดแบบไม่ทำลายชิ้นงาน ยังสามารถพัฒนาต่อยอดให้การวัดมีประสิทธิภาพขึ้นได้อีก เช่น การทำระบบการวัดให้เป็นแบบอัตโนมัติ คือให้การบันทึกค่าของเฟสและแอมพลิจูดสามารถทำได้ด้วยตัวเองด้วยระบบคอมพิวเตอร์

รายการอ้างอิง

- [1] W.-S. Hsu, M.-D. Y. Yang, Y.-C. Wang, and L.-J. Lin, "A Study of Magnetic Domain Distribution in Ferrite by Magnetic Force Microscopy " *Proceedings of the 2009 IEEE 3rd International Conference on Nano/Molecular Medicine and Engineering*, pp. 273-277, 2009.
- [2] H. Kuramochi, T. Manago, D. Koltsov, M. Takenaka, M. Iitate, and H. Akinaga, "Advantages of CNT–MFM probes in observation of domain walls of soft magnetic materials," *Surface Science*, vol. 601, no. 22, pp. 5289-5293, 2007.
- [3] J. M. Garcia, A. Thiaville, J. Miltat, K. J. Kirk, and J. N. Chapman, "MFM imaging of patterned permalloy elements under an external applied field," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 1267–1269, 2002.
- [4] N. Amos *et al.*, "Ultrahigh Coercivity Magnetic Force Microscopy Probes to Analyze High-Moment Magnetic Structures and Devices," *IEEE Magnetics Letters*, vol. 1, pp. 6500104-6500104, 2010.
- [5] M. R. Koblischka and U. Hartmann, "Recent advances in magnetic force microscopy," *Ultramicroscopy*, vol. 97, no. 1-4, pp. 103-112, 2003.
- [6] Z. Deng *et al.*, "Metal-coated carbon nanotube tips for magnetic force microscopy," *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 25, pp. 6263-6265, 2004.
- [7] L. Folks, M. E. Best, P. M. Rice, B. D. Terris, D. Weller, and J. N. Chapman, "Perforated tips for high-resolution in-plane magnetic force microscopy," *Applied Physics Letters*, vol. 76, no. 7, pp. 909-911, 2000.
- [8] Z. Liu, Y. Dan, Q. Jinjun, and Y. Wu, "Magnetic force microscopy using focused ion beam sharpened tip with deposited antiferro–ferromagnetic multiple layers," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, p. 8843, 2002.
- [9] G. N. Phillips, M. Siekman, L. Abelmann, and J. C. Lodder, "High resolution magnetic force microscopy using focused ion beam modified tips," *Applied Physics Letters*, vol. 81, no. 5, pp. 865-867, 2002.
- [10] L. Gao *et al.*, "Focused Ion Beam Milled CoPt Magnetic Force Microscopy Tips for High Resolution Domain Images," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no.

- 4, pp. 2194-2196, 2004.
- [11] M. Futamoto, T. Hagami, S. Ishihara, K. Soneta, and M. Ohtake, "Improvement of Magnetic Force Microscope Resolution and Application to High-Density Recording Media," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 6, pp. 2748-2754, 2013.
- [12] S. Ishihara, M. Ohtake, and M. Futamoto, "Magnetic force microscope tips coated with FePd, FePt, and CoPt alloy films," *Thin Solid Films*, vol. 546, pp. 205-210, 2013.
- [13] A. Carl, J. Lohau, S. Kirsch, and E. F. Wassermann, "Magnetization reversal and coercivity of magnetic-force microscopy tips," *Journal of Applied Physics*, vol. 89, no. 11, pp. 6098-6104, 2001.
- [14] T. Weis *et al.*, "Characterization of magnetic force microscopy probe tip remagnetization for measurements in external in-plane magnetic fields," *Journal of Applied Physics*, vol. 104, no. 12, p. 123503, 2008.
- [15] Y. Martin and H. K. Wickramasinghe, "Magnetic imaging by "force microscopy" with 1000 Å resolution," *Applied Physics Letters*, vol. 50, no. 20, pp. 1455-1457, 1987.
- [16] Ó. I. Freire, *Advances in Magnetic Force Microscopy*. Universidad Autónoma de Madrid 2014.
- [17] A. Hendrych, R. Kubinek, and A. V. Zhukov, "The magnetic force microscopy and its capability for nano magnetic studies - The short compendium," *Modern Research and Educational Topics in Microscopy*, pp. 805-811, 2007. FORMATEX
- [18] H. S. Huang, M. W. Lin, Y. C. Sun, and L. J. Lin, "Improving the spatial resolution of a magnetic force microscope tip via focused ion beam modification and magnetic film coating," *Scripta Materialia*, vol. 56, no. 5, pp. 365-368, 2007.

ภาคผนวก

1. คำสั่ง MATLAB ที่ใช้ในการสร้างภาพสนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์

```
clear all
clc; clf;
close all
%%
xcompo = csvread('xcompo.csv');
ycompo = csvread('ycompo.csv');
zcompo = csvread('zcompo.csv');
x = csvread('x.csv');
y = csvread('y.csv');
z = csvread('z.csv');
xmin = min(x(:));
xmax = max(x(:));
ymin = min(y(:));
ymax = max(y(:));
zmin = min(z(:));
zmax = max(z(:));
xccompo = xcompo;
yccompo = ycompo;
zccompo = zcompo;
yc = y;
xc = x;
x(:, :, 2) = x(:, :, 1);
y(:, :, 2) = y(:, :, 1);
z(:, :, 2) = z(:, :, 1) + 1;
xcompo(:, :, 2) = z(:, :, 1);
ycompo(:, :, 2) = z(:, :, 1);
zcompo(:, :, 2) = z(:, :, 1);

Ampiltude = sqrt(xcompo.^2 + ycompo.^2 + zcompo.^2);
colors = Ampiltude;
scale = 1;

figure(1);
[cx cy cz] = meshgrid(xmin:5:xmax, ymin:5:ymax, zmin:5:zmax);
c = coneplot(x, y, z, xcompo, ycompo, zcompo, x, y, z, scale, colors);

set(c, 'EdgeColor', 'none');

view([0 90]);
camlight right

c.FaceLighting = 'gouraud';
c.AmbientStrength = 0.6;
c.DiffuseStrength = 0.8;
c.SpecularStrength = 0.9;
c.SpecularExponent = 25;
c.BackFaceLighting = 'unlit';

hold on
```



```

contourf(xc,yc,zccompo,8)
% view(3)
colormap cool
figure(2)
contourf(xc,yc,ycocompo,'ShowText','on')
colormap cool

figure(3)
contourf(xc,yc,xccompo,'ShowText','on')
colormap cool

figure(4)
contourf(xc,yc,zccompo,8,'ShowText','on')
colormap cool

figure(5)
surf(xc,yc,xccompo)
colormap cool
view([0 90])

figure(6)
surf(xc,yc,ycocompo)
colormap cool
view([0 90])

figure(7)
surf(xc,yc,zccompo)
colormap cool
view([0 90])

figure(8);
[cx cy cz] = meshgrid(xmin:5:xmax,ymin:5:ymax,zmin:5:zmax);
c = coneplot(x,y,z,xcompo,ycompo,zcompo,x,y,z,scale,colors);

set(c,'EdgeColor','none');

view([0 90]);
camlight right

c.FaceLighting = 'gouraud';
c.AmbientStrength = 0.6;
c.DiffuseStrength = 0.8;
c.SpecularStrength = 0.9;
c.SpecularExponent = 25;
c.BackFaceLighting = 'unlit';

colormap cool

```

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐวัฒน์ พันธุ์ชาติ
วัน เดือน ปี เกิด	4 กุมภาพันธ์ 2534
สถานที่เกิด	จังหวัดเพชรบุรี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์) (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	22 หมู่ 1 ตำบลตำหรุ อำเภอบ้านลาด จังหวัดเพชรบุรี 76150
ผลงานตีพิมพ์	N. Phanchat, K. Saengkaew, I. Cheowanish, P. Damrongsak and B. Damrongsak, "Implementation of a Measurement System for Inspection of Magnetic Force Microscopy Probes," Journal of Physics: Conference Series (JPCS). [accepted]

