

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก

ปริญญานิพนธ์

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กุมภาพันธ์ 2551

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก

ปริญญานิพนธ์

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กุมภาพันธ์ 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ดำนทัศนศาสตร์แม่เหล็ก

บทคัดย่อ

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กุมภาพันธ์ 2551

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร. (2551). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก. ปรินซ์นิพนธ์ วท.ม. (ฟิลิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ดร. วิชุดา บุญยรัตกลิน, ผศ. ดร. ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล.

ปรินซ์นิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายที่จะออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กเพื่อใช้วัดและตรวจสอบคุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กตามแนวระนาบและนอกระนาบของผิวของสารแม่เหล็ก ระบบการวัดประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน โพลาริเซอร์ควบคุม โพลาริเซอร์วิเคราะห์ ตัววัดแสง และแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งต่อเข้ากับแหล่งจ่ายกำลังแบบสองขั้ว แหล่งจ่ายกำลังและตัววัดแสงต่อประสานเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางแผงวงจรจีพีไอบี ช่องทางขนาน และชุดคำสั่งแลปวิว เพื่อควบคุมค่าสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าและบันทึกข้อมูลค่ากำลังแสงเลเซอร์ในเวลาเดียวกัน เครื่องมือวัดถูกจัดวางเป็นสองรูปแบบเพื่อวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามยาวและแบบเชิงขั้ว

เพื่อให้ได้ค่าสนามแม่เหล็กตามที่ต้องการเราได้ใช้ชุดคำสั่งเรเดียสร้างแบบจำลองของแม่เหล็กไฟฟ้า คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก และสร้างพื้นผิวสามมิติ ทั้งนี้ได้ออกแบบขั้วแม่เหล็กเป็นสองรูปแบบคือ รูปร่างสี่เหลี่ยมและรูปร่างสามเหลี่ยม จากการคำนวณสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กทั้งสองแบบพบว่ามีความแตกต่างจากการวัดด้วยหัววัดฮอลล์ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์

ระบบที่สร้างขึ้นนี้ถูกนำไปทดสอบในเบื้องต้นโดยการสร้างวงฮิสเทอรีซิสของผลึกเดี่ยวนิเกิลระนาบ (111) เหล็ก โคบอลต์บริสุทธิ์ และฟิล์มของเหล็ก วงฮิสเทอรีซิสจากผลการทดสอบที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องสโม่และวีเอสเอ็ม โดยที่ระบบสโม่ใช้หัวดวงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มนิเกิลบนแพลทินัมระนาบ (111) และฟิล์มโคบอลต์บนแพลทินัมระนาบ (111) ในขณะที่เครื่องวีเอสเอ็มใช้หัวดวงฮิสเทอรีซิสของเหล็กและฟิล์มเหล็ก ซึ่งพบว่ารูปร่างของวงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากเครื่องมือดังกล่าว

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE MAGNETO-OPTIC KERR EFFECT (MOKE)
MEASUREMENT SYSTEM

AN ABSTRACT
BY
SURACHET RATTANASUPORN

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Science Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
February 2008

Surachet Rattanasuporn. (2008). *Design and Construction of the Magneto-Optic Kerr Effect (MOKE) Measurement System*. Master Thesis, M.S. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor committee: Wichuda Boonyaratgalin, Assist. Prof. Prayoon Songsirithigul.

This thesis aimed to design and construct a magneto-optic Kerr effect measurement system, which was used to measure and examine the characteristic of in-plane and out of plane magnetization of magnetic material. The measurement system consisted of a He-Ne laser source, a controlled polarizer, an analyzer polarizer, a photodetector and an electromagnet that was connected to a bipolar power supply. The power supply and the photodetector were interfaced with a computer via GPIB card, RS-232 port and LabView software so that the magnetic field of the electromagnet could be controlled and the laser power data can be recorded simultaneously. The instruments were set up into two configurations to measure the longitudinal and the polar magneto-optic Kerr effects.

In order to achieve the desired magnetic field, the electromagnet was designed using Radia code which simulated the model of electromagnet, calculated magnetic field and built 3D surface of the magnetic field. The magnet poles were designed in two different shapes, square and triangular. For both of them, the magnetic fields obtained from the calculation differ from the measured values via Hall probe by 3%.

The measurement system was primarily tested on Ni(111) single crystal, iron, pure cobalt and iron films. The resulting hysteresis loops for these materials were compared with those obtained from SMOKE and VSM. SMOKE was used for measuring 7.4 ML Ni/Pt(111) films and 6.5 ML Co/Pt(111) films, while VSM was used for measuring bulk Fe and 7000 Å Fe films. The shapes of the hysteresis loops resulted from the constructed system shown good agreement with those attained by the existing measurement systems.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์แวนต์บนตัวนำแม่เหล็ก

ของ

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่.....เดือน พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน)

(อาจารย์ ดร.สุพจน์ มุศิริ)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล)

(อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร ไอสถจันทร์)

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับทุนอุดหนุน

จาก

ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล ที่ได้ให้โอกาสให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และได้ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการพัฒนาระบบ ผู้วิจัยซาบซึ้งและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สุพจน์ มุศิริ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร โสสถจันทร์ ที่ให้ความกรุณาในการเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติที่ได้ให้ทุนวิจัยสนับสนุนงานปริญญานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณ Dr.Hideki Nakajima ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการพัฒนาระบบเสมอมา และขอขอบคุณ คุณสำเร็จ ดั่งวงนิล และเจ้าหน้าที่ส่วนงานผลิตชิ้นงานของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติที่ได้ให้การสนับสนุนในการจัดทำอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับระบบ MOKE

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการทำปริญญานิพนธ์จนสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และนักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติทุกคน ที่ได้คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำปริญญานิพนธ์ตลอดมา ขอขอบคุณ คุณจิตติพงศ์ เครือหงส์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือดำเนินการในเรื่องต่างๆ จนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายที่สุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ขอบคุณพี่สาวและน้องชาย ที่ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุนการศึกษาและการทำปริญญานิพนธ์ของผู้เขียนตลอดมา

สุรเชษฐ์ รัตนสุพร

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
1.1 ภูมิหลัง.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
1.3 ความสำคัญของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 นิยามศัพท์.....	3
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.1.1 ปรัชญาการทัศน์ทัศน์ศาสตร์แม่เหล็ก.....	5
2.1.2 ปรัชญาการทัศน์ของฟาราเดย์.....	5
2.1.3 ปรัชญาการทัศน์ของเคอร์ตันทัศน์ทัศน์ศาสตร์แม่เหล็ก.....	6
2.1.4 รูปแบบของปรัชญาการทัศน์ของเคอร์ตันทัศน์ทัศน์ศาสตร์แม่เหล็ก.....	7
2.1.5 อิลลิปโซเมทรี.....	8
2.1.6 วงฮิสเทอรีซิส.....	10
2.1.7 รูปนัยนิยมมหรรณของปรัชญาการทัศน์ของเคอร์ตันทัศน์ทัศน์ศาสตร์แม่เหล็ก.....	12
2.2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
2.2.1 งานวิจัยของบาเดอร์ มูก และคิว.....	33
2.2.2 งานวิจัยของแฮมตัน อัลเบอร์ตและอบรรณา.....	36
2.2.3 งานวิจัยของลีและคณะ.....	40
2.2.4 งานวิจัยของเชิร์นและคณะ.....	42
3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 ข้อกำหนดความต้องการของระบบ.....	48
3.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบ.....	49
3.2.1 การออกแบบแม่เหล็กไฟฟ้า.....	49
3.2.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดมุมการหมุนของเคอร์.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
3.2.3 การออกแบบการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด L-MOKE และ P-MOKE..	53
3.3 การดำเนินงานพัฒนาระบบ MOKE.....	55
3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับระบบการวัด MOKE.....	55
3.3.2 การสร้างแม่เหล็กไฟฟ้า.....	58
3.3.3 การติดตั้งและต่อประสานระบบการวัด MOKE.....	59
3.3.4 การวัดทดสอบระบบ.....	59
4 ผลการวิจัย.....	60
4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณสนามแม่เหล็กระหว่างแบบจำลองแม่เหล็กไฟฟ้า โดยชุดคำสั่งเรเดียกับผลการวัดโดยหัววัดฮอลล์.....	60
4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับค่ากระแส.....	69
4.3 การสร้างวงฮิสเทอรีซิสและวัดมุมการหมุนของเคอร์.....	73
4.3.1 การสร้างวงฮิสเทอรีซิส.....	75
4.3.2 การวัดมุมการหมุนของเคอร์โดยการปรับมุมโพลาริเซชันวิเคราะห์.....	83
5 สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	84
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	87
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	88
บรรณานุกรม.....	90
ภาคผนวก.....	93
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	105

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	ทิศของสนามแม่เหล็กที่ให้กับสารตัวอย่างของปรากฏการณ์ของเคอร์ตัน	
	ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (a) แบบเชิงชั่ว (b) แบบตามยาว และ (c) แบบตามขวาง.....	8
2	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของอิลลิปโซมิเตอร์.....	9
3	วงฮิสเทอรีซิสที่แสดงค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างและค่าสนามลบล้างแม่เหล็กในสาร....	11
4	องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงเส้น องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงวงกลม องค์ประกอบ การโพลาไรซ์เชิงวงรี การหมุนของเคอร์ และความรีของเคอร์.....	15
5	คลื่นตกกระทบ คลื่นหักเห และคลื่นสะท้อนบริเวณรอยต่อของตัวกลางสองชนิด.....	18
6	กราฟแสดงค่าการหมุนของเคอร์จากผลการทดลองและจากทฤษฎีสำหรับเอสและพี โพลาไรซ์ บน (a) Cu/Co แบบหลายชั้น (multilayer) ในรูปแบบตามยาว และ (b) Co/Pd แบบหลายชั้นในรูปแบบเชิงชั่ว.....	31
7	ค่าการหมุนของเคอร์และความรีของเคอร์ที่แปรกับมุมตกกระทบจากทฤษฎีเมื่อ เปลี่ยนค่าดัชนีหักเห (n) และค่าคงที่ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (Q).....	32
8	วงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวัด SMOKE ของฟิล์ม Fe บนผลึก Au(100) โดย (a) วัดที่ อุณหภูมิ 60 °C (b) วัดที่อุณหภูมิ 65 °C และ (c) วัดที่อุณหภูมิ 104 °C.....	33
9	องค์ประกอบและการจัดชุดระบบการวัด SMOKE ของคิวและบาเดอร์.....	34
10	วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ที่ได้จากการวัดฟิล์ม 6 ML Fe/Ag(100).....	36
11	รูปแบบการจัดวางเครื่องมือสำหรับวัดสัญญาณ SMOKE แบบตามยาวของแฮมตัน อัลเบิร์ตโตและอบูนา.....	37
12	แม่เหล็กสำหรับระบบ SMOKE โดยมีสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง X เป็น 500 Oe และ ที่ตำแหน่ง Y เป็น 400 Oe ที่กระแส 4 A.....	38
13	วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ทั้งสามแบบ ของฟิล์มโคบอลต์บนควอตซ์.....	39
14	แผนภาพแสดงระบบการวัด SMOKE ทั้งสามรูปแบบของลีและคณะ.....	40
15	วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ทั้งสามรูปแบบที่แปรค่าตามความหนาของ ฟิล์ม Co เมื่อปลูกบน Pd(111) glass และ 200 Å Pd/glass.....	41
16	แผนภาพแสดงการติดตั้งระบบการวัด MOKE ของเชิร์นและคณะ.....	43
17	วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม Ni/Pt(111) วัดโดยเทคนิค MOKE แบบเชิงชั่ว.....	44

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
18 วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม Ni/Pt(111) วัดโดยเทคนิค MOKE แบบตามยาว ที่มุมเอซิมัทเป็น (a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90° (e) 120° (f) 150° (g) 180°	45
19 สัญญาณของเคอร์ที่เทียบกับสนามแม่เหล็กและความหนาของฟิล์ม Co บน (a) Pt (111) และ (b) Sputtered Pt (111).....	47
20 เส้นโค้งของความเป็นแม่เหล็กแบบกระแสดตรงสำหรับวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ.....	50
21 รูปร่างและขนาดของแม่เหล็กที่ออกแบบในมุมมองด้านหน้าและด้านข้าง.....	50
22 ขั้วแม่เหล็กด้านหน้าและด้านข้าง (a) รูปแบบที่ 1 และ (b) รูปแบบที่ 2.....	51
23 ขดลวดโซเลนอยด์และสนามแม่เหล็กของขดลวดโซเลนอยด์.....	52
24 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด L-MOKE	54
25 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด P-MOKE ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และแบบที่ 2..	55
26 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน และแหล่งจ่ายกำลัง.....	56
27 (a) โพลาริเซอร์แบบกลาน-เทเลอร์ และ (b) ตัวหมุนแบบละเอียด	56
28 แหล่งจ่ายกำลังกระแสดตรง BOP 20-20M ที่ติดตั้งแผ่นวงจรต่อประสาน BIT 4886 ไว้ใน.....	57
29 ตัววัดแสงชนิดโฟโตไดโอดแบบซิลิกอนและชุดควบคุม.....	58
30 ภาพจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบโดยใช้ชุดคำสั่งเรเดียสำหรับใช้ในระบบ MOKE โดย (a) ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ (b) ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	60
31 แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นซึ่งมีขั้วแม่เหล็กเป็นแบบที่ 2.....	61
32 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วย หัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	62
33 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วย หัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2.....	63
34 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการคำนวณ จากชุดคำสั่งเรเดียเทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับ ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1.....	64

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 35 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการวัดด้วย
หัววัดฮอลล์เทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับขั้วแม่เหล็ก
แบบที่ 1 64
- 36 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการคำนวณ
จากชุดคำสั่งเรเดียเทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $z = 206$ สำหรับ
ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 65
- 37 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการวัดด้วย
หัววัดฮอลล์เทียบกับระยะทางบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $z = 206$ สำหรับขั้วแม่เหล็ก
แบบที่ 2 65
- 38 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนาม
แม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$
ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1..... 67
- 39 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนาม
แม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$
ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1..... 67
- 40 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนาม
แม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง
 $z = 206$ mm ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2..... 68
- 41 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการคำนวณองค์ประกอบของสนาม
แม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ของ
ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2..... 68
- 42 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อลดกระแสจาก 5 A ไปถึง -5 A
และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1..... 69
- 43 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อเพิ่มกระแสจาก -5 A ไปถึง 5 A
และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1..... 70

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
44 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อลดกระแสจาก 5 A ไปถึง -5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของหัวแม่เหล็กแบบที่ 2.....	71
45 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อเพิ่มกระแสจาก -5 A ไปถึง 5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของหัวแม่เหล็กแบบที่ 2.....	72
46 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด L-MOKE.....	73
47 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด P-MOKE ของหัวแม่เหล็กแบบที่ 2	74
48 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรมแลปวิว.....	75
49 วงฮิสเทอรีซิสจากการวัด L-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับฟิล์ม 7.4ML Ni/Pt(111) ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	76
50 วงฮิสเทอรีซิสจากการวัด L-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับค่าความรีของเคอร์ของฟิล์ม Ni/Pt(111).....	77
51 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับความรีของเคอร์ของฟิล์ม Ni/Pt(111).....	78
52 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของเหล็กแบบปริมาตรเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้จากเครื่อง VSM.....	79
53 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของเหล็ก.....	79
54 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%) เปรียบเทียบกับฟิล์ม 6.5 ML Co/Pt(111).....	80
55 วงฮิสเทอรีซิสของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงหัวของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%).....	81
56 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å เปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่อง VSM ของฟิล์มเหล็กหนา 7000 Å.....	82
57 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å.....	82

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

58	การเปลี่ยนแปลงของกำลังแสงเลเซอร์ที่ตกบนโฟโตไดโอดแปรค่าตามการเปลี่ยนแปลงมุมของโพลาริเซอริวเคราะห์ เมื่อไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก ให้สนามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ 5 A และให้สนามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ -5 A ของเหล็ก.....	83
59	แสดงองค์ประกอบกรโพลาริเซชันแนวเอสและพี เมื่อเกิดการหมุนของเคอร์.....	88
60	วงฮิสเทอรีซิสจาก L-MOKE ของโคบอลต์เมื่อวัดซ้ำ 4 รอบ.....	89
61	กำลังแสงเลเซอร์ที่แปรค่าตามเวลา เมื่อเปิดเครื่องเลเซอร์ทันที เวลาผ่านไป 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ความรู้ทางฟิสิกส์ด้านสมบัติเชิงแม่เหล็ก (magnetic properties) ของวัสดุ เป็นความรู้สาขาหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยี สำหรับการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ เครื่องใช้ต่าง ๆ เพื่ออำนวยความสะดวกในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ทั้งนี้ในการนำความรู้ดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ นักวิทยาศาสตร์ได้มีการศึกษาและวิจัยทั้งที่เป็นเชิงพื้นฐานทางฟิสิกส์ของวัสดุแม่เหล็กเพื่ออธิบายที่มาและกลไกพื้นฐานของความเป็นแม่เหล็ก และการวิจัยเชิงประยุกต์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของวัสดุแม่เหล็กที่เหมาะสมในเชิงอุตสาหกรรมควบคู่กันไป ตัวอย่างเช่น การทำแม่เหล็กจากวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กแรง (hard magnetic materials) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแม่เหล็กได้ยาก ต้องใช้วัสดุแม่เหล็กที่มีค่าสภาพแม่เหล็กตกค้าง (remanent magnetization) สูงซึ่งทำให้สามารถรักษาสภาพการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเนื่องจากการให้สนามแม่เหล็กภายนอกได้มาก และมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็ก (coercive field) สูง ซึ่งต้องใช้สนามแม่เหล็กแรงในการทำลายความเป็นแม่เหล็ก (demagnetize) ของวัสดุ การทำแกนหม้อแปลงต้องเลือกวัสดุที่มีความเป็นแม่เหล็กอ่อน (soft magnetic materials) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างและค่าสนามลบล้างแม่เหล็กต่ำ และการทำอุปกรณ์บันทึกแม่เหล็ก ต้องใช้วัสดุที่มีค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างสูง และมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กที่เหมาะสม เพื่อลดพลังงานในการเขียนข้อมูลให้น้อยที่สุด เป็นต้น

การศึกษาสมบัติเชิงแม่เหล็กของวัสดุอย่างหนึ่งที่ยินยอมทำกันคือ การวัดค่าความเป็นแม่เหล็ก (magnetization) ของวัสดุและการสร้างวงฮิสเทอรีซิสของวัสดุ โดยเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดค่าความเป็นแม่เหล็กของวัสดุนั้นมีอยู่หลายชนิด เช่น (Du Trémolet de Lacheisserie; Gignoux; & Schlenker. 2002: 446-453)

- แมกนีโตมิเตอร์แบบเกรเดียนต์กระแสสลับ (alternating current gradient magnetometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กของสารกับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นเมื่อสารตัวอย่างที่ติดอยู่กับไพโซอิเล็กทริกควอตซ์สั่นในสนามแม่เหล็ก
- แมกนีโตมิเตอร์แบบอุปกรณ์แทรกสอดทางควอนตัมของตัวนำยิ่งยวดวัดถึงความถี่วิทยุ (radio frequency superconducting quantum interference device magnetometer, RF-SQUID) เป็นเครื่องมือที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กของสารกับความถี่วิทยุ

แม่เหล็กของสารกับกระแสเหนี่ยวนำในวงแหวนตัวนำยิ่งยวดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อเลื่อนตำแหน่งของสารตัวอย่างในขดลวดตัวนำ

- แมกนีโตมิเตอร์แบบตัวอย่างสั่น (vibrating sample magnetometer, VSM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นแม่เหล็กของสารกับความต่างศักย์ที่เหนี่ยวนำบนขดลวดเมื่อให้ตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นแม่เหล็กสั่นขึ้นลงในขดลวดนั้น

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างวงฮิสเทอรีซิสนั้น ที่นิยมใช้มากในปัจจุบันคือ ระบบการวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (magneto-optic Kerr effect, MOKE) ซึ่งสร้างวงฮิสเทอรีซิสโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงของเคอร์ (Kerr intensity) หรือมุมการหมุนของเคอร์ (Kerr rotation, θ_K) ซึ่งเป็นมุมที่เปลี่ยนแปลงไปของระนาบการโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนจากผิวของสารแม่เหล็กตัวอย่างกับค่าสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้กับตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น เทคนิค MOKE มีข้อได้เปรียบ คือมีต้นทุนต่ำ ใช้เวลาในการวัดน้อย สามารถวัดเฉพาะบริเวณที่สนใจได้ (local probe) เป็นเทคนิคการวัด ณ ตำแหน่งเดิม (in situ technique) ซึ่งสามารถวัดในขณะที่ทำการปลูกฟิล์มได้ และสามารถศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุในขณะที่ทำการให้สนามแม่เหล็กภายนอกได้ แต่เทคนิค MOKE มีข้อเสียเปรียบคือไม่สามารถวัดค่าสัมบูรณ์ (absolute value) ของความเป็นแม่เหล็กของวัสดุได้เนื่องจากเป็นการวัดความเข้มแสง (I) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ามุมการหมุนของเคอร์ โดยที่มุมการหมุนของเคอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความเป็นแม่เหล็กของวัสดุ

ในประเทศไทยเครื่องมือที่ใช้วัดสมบัติเชิงแม่เหล็กของวัสดุมีน้อยมากและเป็นเครื่องมือที่ไม่ทันสมัย ประกอบกับทางศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติมีความประสงค์ที่จะมีเครื่องมือสำหรับวัดสมบัติเชิงแม่เหล็กของวัสดุไว้ประจำ ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ จ. นครราชสีมา เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับนักวิจัยทั่วไป ใช้ศึกษาสมบัติแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก ดังนั้นจึงได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยให้ผู้วิจัยได้ศึกษาและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดสมบัติทางแม่เหล็กของสารแม่เหล็กทั้งที่เป็นปริมาตร (bulk) และที่เป็นฟิล์มบาง (thin films) ด้วยเทคนิค MOKE ในอนาคตเครื่องมือนี้จะถูกพัฒนาเป็นระบบการวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กพื้นผิว (surface magneto-optic Kerr effect, SMOKE) ให้สามารถใช้วัดฟิล์มบางมากๆ (ultrathin films) ของสารแม่เหล็กในระบบสุญญากาศระดับสูงยิ่ง (ultrahigh vacuum, UHV) ซึ่งทำให้สามารถนำไปใช้ศึกษาสมบัติแม่เหล็กพื้นผิวของสารแม่เหล็กที่เป็นฟิล์มบางมากๆ ได้

1.2 ความมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องมือวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก สำหรับศึกษาสมบัติเชิงแม่เหล็กของสารแม่เหล็กที่เป็นปริมาตรและสารแม่เหล็กที่เป็นฟิล์มบาง

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้เครื่องมือที่จะนำไปใช้สำหรับศึกษาสมบัติเชิงแม่เหล็กของสารแม่เหล็ก ทั้งที่เป็นปริมาตรและเป็นฟิล์มบาง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและติดตั้งชุดอุปกรณ์การวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กจาก อุปกรณ์ที่มีอยู่ เพื่อสามารถวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงชั่วและแบบ ตามยาวของสารตัวอย่างที่เป็นปริมาตรและเป็นฟิล์มบาง

2. ออกแบบแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ MOKE ด้วยชุดคำสั่งเรเดีย (Radia code) และสร้าง แม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กในบริเวณที่วัดสารตัวอย่างได้ประมาณ 0.1 T โดย สนามแม่เหล็กต้องมียุคประกอบในทิศทางเดียวในบริเวณที่แสงตกกระทบผิวสาร

3. เขียนโปรแกรมแลปวิว (Labview) เพื่อทำการต่อประสาน (interface) อุปกรณ์ในระบบ ให้ สามารถควบคุม รับส่งข้อมูล และประมวลผลได้โดยระบบคอมพิวเตอร์

4. ทดสอบเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ

1.5 นิยามศัพท์

1. ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก หมายถึง ปรากฏการณ์ที่แสงโพลาไรซ์มี ระยะเวลาของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสะท้อนจากผิวของสารแม่เหล็ก

2. ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กพื้นผิว หมายถึง ปรากฏการณ์ที่แสง โพลาไรซ์มีระยะเวลาของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสะท้อนจากผิวของสารแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาที่ ขีดจำกัดของฟิล์มบางมากๆ (ultrathinfilms limit) (Yang; Scheinfein. 1993: 6811) ซึ่งมีค่าเป็น $2\pi|n_1|d_1 \ll \lambda$ โดย n_1 เป็นดัชนีหักเหของฟิล์มบางสารแม่เหล็ก d_1 เป็นความหนาของฟิล์ม และ λ เป็นความยาวคลื่นแสงที่ใช้ (You; Shin. 1998: 543)

3. ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงชั่ว (polar magneto-optic Kerr effect) หมายถึง ปรากฏการณ์ที่แสงโพลาไรซ์มีระยะเวลาของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อสะท้อน จากผิวของสารแม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับระนาบของผิว

4. ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามยาว (longitudinal magneto-optic Kerr effect) หมายถึง ปรากฏการณ์ที่แสงโพลาไรซ์มีระนาบของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสะท้อนจากผิวของสารแม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กในทิศขนานกับระนาบของผิวและระนาบของการตกกระทบ

5. ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามขวาง (transverse magneto-optic Kerr effect) หมายถึง ปรากฏการณ์ที่แสงโพลาไรซ์มีระนาบของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสะท้อนจากผิวของสารแม่เหล็กที่มีความเป็นแม่เหล็กในทิศขนานกับระนาบของผิวและตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบ

6. การหมุนของเคอร์ หมายถึง มุมระหว่างระนาบของการโพลาไรซ์ของแสงตกกระทบกับระนาบของการโพลาไรซ์ของแสงสะท้อนจากผิวของสารแม่เหล็ก

7. ความรีของเคอร์ (Kerr ellipticity) หมายถึง มุมที่เกิดจากอาร์กแทนเจนต์ของอัตราส่วนระหว่างองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกนหลักกับองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวแกนรอง ซึ่งมีเฟสต่างกันในพิกัดคาร์ทีเซียน

8. สภาพแม่เหล็กตกค้าง หมายถึง ความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสารและยังคงเหลืออยู่หลังจากให้สนามแม่เหล็กปริมาณมากแล้วลดสนามแม่เหล็กจนเป็นศูนย์

9. สนามลบล้างแม่เหล็ก หมายถึง สนามที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าความเป็นแม่เหล็กจากค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างให้เป็นศูนย์ โดยจะวัดจากขนาดของสนามที่ให้กับสารในขนาดเพียงพอที่จะกลับทิศความเป็นแม่เหล็กได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก

ปรากฏการณ์ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (magneto-optic effect) คือปรากฏการณ์ที่แสงโพลาไรซ์มีระนาบของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไปเมื่อแสงโพลาไรซ์ทะลุผ่านหรือสะท้อนจากผิวของสารแม่เหล็ก ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบในช่วงกลางของศตวรรษที่ 18 โดยในปี ค.ศ. 1845 ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michel Faraday) ได้ค้นพบปรากฏการณ์แบบทะลุผ่าน (transmission effect) จากการทดลองฉายแสงโพลาไรซ์ทะลุผ่านแท่งแก้วซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็กและพบว่าแสงที่ทะลุผ่านออกมามีระนาบของการโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์ของฟาราเดย์ (Faraday effect) ในปี ค.ศ. 1877 จอห์น เคอร์ (Rev. John Kerr) ได้ค้นพบปรากฏการณ์แบบสะท้อน (reflection effect) จากการทดลองฉายแสงโพลาไรซ์ไปที่ผิวหน้าของขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าและพบว่าแสงที่สะท้อนออกมามีระนาบของการโพลาไรซ์เปลี่ยนไปจากเดิมปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (Qiu; & Bader. 2000: 1243)

ในปี ค.ศ. 1973 เออร์สกายและสเตอร์น (Erskine; & Stern. 1973: 1329) ได้นำเทคนิคสเปกโทรสโกปีของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (magneto-optic Kerr effect spectroscopy) มาใช้ศึกษาความกว้างของแถบพลังงานดี (d-band) และโพลาไรเซชันของสปินของอิเล็กตรอน (electron spin polarization, ESP) ของนิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) และเหล็ก (Fe) ในปี ค.ศ. 1985 บาร์เดอร์และมูก (Barder; & Moog. 1987: 3731) ได้พัฒนาเทคนิค MOKE เพื่อนำไปใช้ศึกษาสมบัติเชิงแม่เหล็กของสารฟิล์มบางโดยสามารถสร้างวงฮิสเทอรีซิสของเหล็กที่ปลูกเป็นฟิล์มบางมาก (ultrathinfilms) บนทองระนาบ (100) (Fe/Au(100)) ได้ และเรียกเทคนิคที่ใช้นี้ว่าเทคนิคการวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กพื้นผิว (SMOKE) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมใช้ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของสารฟิล์มบางจนถึงปัจจุบัน

2.1.2 ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์

ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์เป็นปรากฏการณ์ที่ฟาราเดย์ทำการทดลองฉายแสงโพลาไรซ์ทะลุผ่านแท่งแก้วซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก โดยการให้สนามแม่เหล็กเพื่อแมกนีไทซ์ตัวกลาง ในการสร้างปรากฏการณ์ฟาราเดย์สามารถทำได้ในทิศทางเดียวคือในแนวขนานกับลำแสงที่ส่องทะลุสารเนื่องจากความเป็นแม่เหล็กของสารซึ่งมีทิศในแนวขนานกับแนวแกนลำแสงจะส่งผลต่อองค์ประกอบ

ของสนามไฟฟ้าของแสงทำให้ระนาบการโพลาไรซ์ของแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่ความเป็นแม่เหล็กของสารซึ่งมีทิศในแนวตั้งฉากกับแนวแกนลำแสงจะไม่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของแสง แสงที่ทะลุผ่านออกมาจะมีระนาบของการโพลาไรซ์เปลี่ยนไปจากระนาบเดิมเป็นมุม θ_F เรียกว่า การหมุนของฟาราเดย์ (Faraday rotation) โดยที่

$$\theta_F = k_V H l \quad (2.1)$$

เมื่อ k_V คือ ค่าคงที่ของเวอร์เดต (Verdet's constant) มีหน่วยเป็น $\text{arc min} \cdot \text{Oe}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

H คือ ค่าสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Oe

l คือ ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านตัวกลาง มีหน่วยเป็น m

(Robinson. 1964: 1163)

2.1.3 ปฏิกิริยาของเคอร์ด้วยทัศนศาสตร์แม่เหล็ก

ปฏิกิริยาของเคอร์ด้วยทัศนศาสตร์แม่เหล็กเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างความเป็นแม่เหล็กของสารแม่เหล็กกับองค์ประกอบสนามไฟฟ้าหรือโพลาไรเซชันของแสงที่ตกกระทบที่ผิวของสาร ซึ่งจะทำให้ระนาบการโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนจากผิวสารหมุนไปจากระนาบเดิมเป็นมุม θ_K เรียกว่า การหมุนของเคอร์ โดยที่

$$\theta_K = \frac{2 \cdot 10^{-7} nmM}{f(p^2 - h^2 f^2)} \quad (2.2)$$

เมื่อ n คือ ฟังก์ชันของค่าดัชนีหักเหของสารตัวอย่าง

m คือ ฟังก์ชันของการกระจายพลังงานในแถบพลังงาน 3d มีหน่วยเป็น J

p คือ ฟังก์ชันของการกระจายพลังงานในแถบพลังงาน 4s มีหน่วยเป็น J

f คือ ความถี่ของแสง มีหน่วยเป็น Hz

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ $6.6260693 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

M คือ ค่าความเป็นแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น Am^{-1}

(Prutton. 1964: 135)

ในกรณีของเหล็กจะมีค่า $n = 2.4$, $p = 6.4 \times 10^{-19}$ J, $m = 3.2 \times 10^{-20}$ J เมื่อใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 633 nm มีความถี่เท่ากับ 4.739×10^{14} Hz มีค่าความเป็นแม่เหล็กอิมิตวี่ 840 G จะคำนวณค่ามุมการหมุนของเคอร์ได้เท่ากับ 5.25 arcmin หรือ 0.08754° มีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จริงซึ่งมีค่าประมาณ 24.6 arcmin หรือ 0.41°

2.1.4 รูปแบบของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (MOKE configuration)

ในการพิจารณารูปแบบของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กจะพิจารณาจากทิศทางการให้สนามแม่เหล็กภายนอกเพื่อให้สารมีความเป็นแม่เหล็ก ซึ่งสามารถจำแนกปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กได้เป็น 3 รูปแบบ คือ (Du Trémolet de Lacheisserie; Gignoux; & Schlenker. 2002: 403)

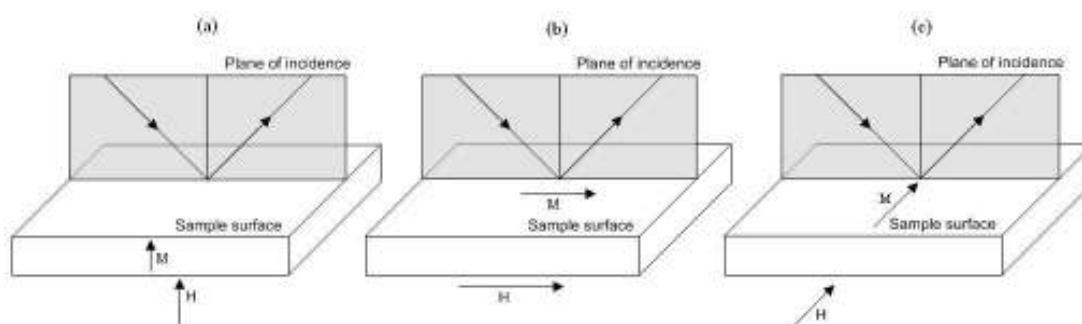
2.1.4.1 ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงขั้ว (polar MOKE, P-MOKE) เกิดจากการฉายแสงที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นตกกระทบบนผิวหน้าของสารตัวอย่าง (sample) โดยให้สนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับผิวหน้าของสาร ดังภาพประกอบ 1 (a) แสงที่สะท้อนจะมีทิศการโพลาไรซ์หมุนไปเป็นมุมการหมุนของเคอร์ ตัวอย่างเช่นเมื่อใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 633 nm ตกกระทบบนสารตัวอย่างซึ่งเป็นโคบอลต์ เหล็ก และนิกเกิล ที่อุณหภูมิห้อง แสงที่สะท้อนจะมีระนาบของการโพลาไรซ์หมุนไปเป็นมุม 0.30° 0.41° และ 0.13° ตามลำดับ

2.1.4.2 ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามยาว (longitudinal MOKE, L-MOKE) เกิดจากการฉายแสงที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นตกกระทบบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ให้สนามแม่เหล็กในทิศขนานกับผิวหน้าของสารและระนาบการตกกระทบบน ดังภาพประกอบ 1(b) ถ้าแสงที่ตกกระทบบนมีทิศการโพลาไรซ์ในแนวตั้งฉาก (s-polarization) หรือในแนวขนาน (p-polarization) กับระนาบตกกระทบบนเพียงอย่างเดียวจะทำให้แสงที่สะท้อนออกไปเกิดความรีของเคอร์ (ϵ_K) โดยมีแกนหลักของวงรีทำมุมกับทิศการโพลาไรซ์เดิมเท่ากับค่ามุมการหมุนของเคอร์ ขนาดของมุมการหมุนและความรีของเคอร์จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบบน อุณหภูมิ และมุมตกกระทบบน

2.1.4.3 ปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามขวาง (transverse MOKE, T-MOKE) เกิดจากการฉายแสงที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นตกกระทบบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ให้สนามแม่เหล็กในทิศขนานกับผิวหน้าของสารและตั้งฉากกับระนาบตกกระทบบน ดังภาพประกอบ 1 (c) สำหรับแสงตกกระทบบนที่มีทิศการโพลาไรซ์ในแนวตั้งฉากหรือในแนวขนานกับระนาบตกกระทบบนจะไม่ทำให้เกิดการหมุนของทิศการโพลาไรซ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นแม่เหล็ก แต่การกลับทิศของความรีแม่เหล็กจะทำให้ความเข้มของแสงสะท้อนมีค่าเปลี่ยนไปสำหรับแสงตกกระทบบนที่มีโพลาไรเซชันใน

แนวนาน โดยจะวัดปรากฏการณ์นี้ในรูปของอัตราส่วนของค่าการเปลี่ยนแปลงสภาพการสะท้อน (reflectivity) ต่อค่าสภาพการสะท้อนของสารตัวอย่าง ($\Delta R/R$) ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเป็นแม่เหล็กเฉลี่ยในบริเวณที่วัด ค่า $\Delta R/R$ จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ อุณหภูมิ และมุมตกกระทบของแสง ซึ่งมีค่าประมาณ 65° ถึง 80° สำหรับโลหะ

ปรากฏการณ์ของเคอร์ตามขวางถูกใช้ในการศึกษาพื้นผิวของฟิล์มบางแม่เหล็กโดยเฉพาะโลหะทรานซิชัน 3d (3d transition metal) ตัวอย่างเช่นการวัดค่า $\Delta R/R$ ของฟิล์มโคบอลต์ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่น 700 nm มุมตกกระทบ 71° และแสงที่มีความยาวคลื่น 632.8 nm มุมตกกระทบ 60° จะมีค่าสูงสุดประมาณ 1.5×10^{-2} และ 1.1×10^{-2} ตามลำดับ

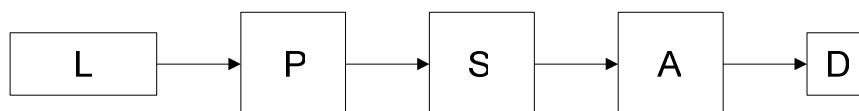


ภาพประกอบ 1 ทิศของสนามแม่เหล็กที่ให้กับสารตัวอย่างของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (a) แบบเชิงซ้าย (b) แบบตามยาว และ (c) แบบตามขวาง

ที่มา: Homan Yuen. (2000). *Construction of a Surface Magneto-Optic Kerr Effect Apparatus for the Measurement of Magnetic Properties of Thin Films*. p. 7.

2.1.5 อิลลิปโซเมทรี (ellipsometry)

อิลลิปโซเมทรีเป็นเทคนิคทางทัศนศาสตร์สำหรับตรวจวัดคุณลักษณะของรอยต่อหรือฟิล์มของตัวกลางสองชนิดโดยใช้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงการโพลาไรซ์ของแสงที่สะท้อนหรือทะลุผ่านรอยต่อหรือฟิล์มที่ต้องการศึกษา โดยจะเรียกเครื่องมือนี้ว่าอิลลิปโซมิเตอร์ (ellipsometer)



ภาพประกอบ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของอีลิปโซมิเตอร์

ที่มา: R. M. A. Azzam; & N. M. Bashara. (1987). *Ellipsometry and Polarized Light*. p. 154.

แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของอีลิปโซมิเตอร์แสดงดังภาพประกอบ 2 แหล่งกำเนิดแสง (L) จะสร้างลำแสงขนาน (well-collimated) ที่เป็นแสงเอกรงค์ (monochromatic) เดินทางผ่านโพลาไรเซอร์ (P) ซึ่งทำหน้าที่เป็นโพลาไรเซอร์ควบคุม (controlled polarizer) สำหรับกำหนดทิศทางการโพลาไรซ์ของแสง ลำแสงนี้จะไปตกกระทบสารตัวอย่าง (S) ที่ต้องการศึกษาและเกิดอันตรกิริยาต่อกัน ทำให้โพลาไรเซชันของแสงที่เดินทางออกจากสารตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป ลำแสงจะเดินทางผ่านโพลาไรเซอร์ (A) ซึ่งทำหน้าที่เป็นโพลาไรซ์วิเคราะห์ (analyzer polarizer) เพื่อตรวจวัดสถานะของการโพลาไรซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ตกลงบนโฟโตดีเทคเตอร์ (D) (Azzam; & Bashara. 1987: 153) เมื่อพิจารณาว่าอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแสงกับสารตัวอย่างเป็นเชิงเส้นและความถี่ของคลื่นไม่เปลี่ยนแปลง สารตัวอย่างจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของการโพลาไรซ์ของคลื่นได้ใน 3 รูปแบบ คือ

2.1.5.1 การสะท้อนหรือการหักเห เมื่อคลื่นแสงสะท้อนหรือหักเหบริเวณรอยต่อของตัวกลางสองชนิดที่แตกต่างกันจะทำให้สถานะการโพลาไรซ์ของแสงเปลี่ยนในทันที ซึ่งเกิดจากองค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงเส้นของแสงในแนวขนาน และแนวตั้งฉากมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรเนล (Fresnel reflection coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน (transmission coefficient) แตกต่างกัน โดยเรียกว่าอีลิปโซเมทรีสะท้อน (reflection ellipsometry) หรืออีลิปโซเมทรีพื้นผิว (surface ellipsometry) ซึ่งถูกนำไปใช้วัดสมบัติทางทัศนศาสตร์และการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับความถี่ของสาร สามารถวัดได้ทั้งในเฟสของแข็งและของเหลวซึ่งอาจมีไอโซทรอปี (isotropy) หรือแอนไอโซทรอปี (anisotropy) ทางทัศนศาสตร์ และสามารถวัดได้ทั้งในรูปแบบของปริมาตรและฟิล์มบาง โดยสามารถตรวจวัดปรากฏการณ์บนพื้นผิวที่เกิดจากการปลูกฟิล์มหรือขจัดฟิล์มที่มีความหนาตั้งแต่ระดับโมโนเลเยอร์ (submonolayer) ขึ้นไป อีกทั้งยังสามารถวัดปัจจัยทางฟิสิกส์ที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางทัศนศาสตร์ได้ เช่น สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก ความเค้น และอุณหภูมิ เป็นต้น

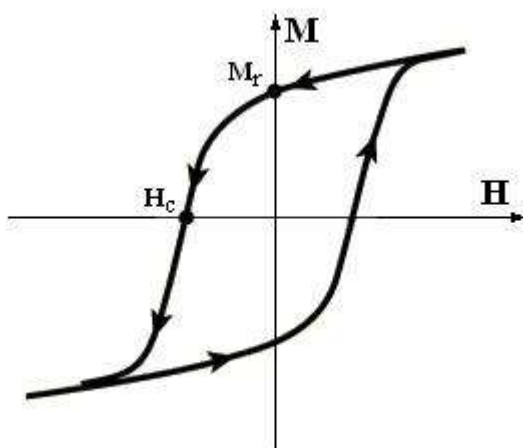
2.1.5.2 การทะลุผ่าน โดยสถานะของการโพลาไรซ์ของแสงจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาที่แสงเดินทางอยู่ภายในตัวกลาง เรียกว่าอิลลิปโซเมทรีทะลุผ่าน (transmission ellipsometry) หรือโพลาไรเมทรี (polarimetry) เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่สำคัญทางฟิสิกส์เคมีซึ่งสามารถนำไปใช้วัดสารตัวอย่างที่เป็นปริมาตรได้ทุกเฟส สามารถวัดการหมุนทางทัศนศาสตร์ธรรมชาติ (natural optical rotation) และไดโครอิซึมวงกลม (circular dichroism) สามารถวัดการหักเหสองแนวเชิงเส้นธรรมชาติ (natural linear birefringence) และไดโครอิซึมเชิงเส้น (linear dichroism) และสามารถวัดการหักเหสองแนวเชิงวงรีธรรมชาติ (natural elliptical birefringence) และไดโครอิซึมวงรี (elliptical dichroism) อีกทั้งยังสามารถวัดแอนไอโซทรอปีทางทัศนศาสตร์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำและการกระจายความยาวคลื่นของปรากฏการณ์ต่างๆ เช่นการหักเหสองแนวอย่างต่อเนื่อง (streaming birefringence) สภาพยืดหยุ่นของแสง (photoelasticity) ปรากฏการณ์ของฟาราเดย์ ปรากฏการณ์ของเคอร์ และปรากฏการณ์ของคอตตอน-มูตัน (Cotton-Mouton effects) โดยวัตถุประสงค์หลัก คือการใช้ศึกษาตรวจสอบโครงสร้างโมเลกุลของสาร

2.1.5.3 การกระเจิง โดยเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแสงเดินทางในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหไม่เอกพันธ์ (inhomogeneous) และมีจุดศูนย์กลางของการกระเจิง เช่น ในละอองลอย (aerosols) หรืออิมัลชัน (emulsion) โดยเรียกว่าอิลลิปโซเมทรีกระเจิง (scattering ellipsometry) ซึ่งถูกประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การวัดความหนาแน่นและขนาดอนุภาคที่กระจายในสารละลายคอลลอยด์และละอองลอย การประยุกต์ใช้ในอุตุนิยมวิทยา เช่น การศึกษาหมอก เมฆ และฝน การประยุกต์ใช้ในทางดาราศาสตร์ เช่น การศึกษาบรรยากาศของดาวเคราะห์ เป็นต้น

2.1.6 วงฮิสเทอรีซิส

ในการใช้ระบบการวัด MOKE และ SMOKE เพื่อศึกษาคุณลักษณะความเป็นแม่เหล็กของสาร โดยส่วนมากนิยมวัดในรูปของวงฮิสเทอรีซิส ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นแม่เหล็ก (M) กับสนามแม่เหล็กภายนอกที่ให้กับสาร (H) ดังแสดงในภาพประกอบ 2 โดยสมบัติของวงฮิสเทอรีซิส (Bertotti, 1998: 11) ที่ถูกนำมาพิจารณาได้แก่ ค่าสภาพแม่เหล็กตกค้าง (M_r) ในสาร ซึ่งแสดงความเป็นแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสารหลังจากให้สนามแม่เหล็กปริมาณมากแล้วลดสนามแม่เหล็กจนเป็นศูนย์ และสนามลบล้างแม่เหล็ก (H_c) ซึ่งเป็นสนามที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าความเป็นแม่เหล็กจากค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างให้เป็นศูนย์ โดยจะวัดจากขนาดของสนามที่ให้กับสารในขนาดเพียงพอที่จะกลับทิศความเป็นแม่เหล็กได้ โดยสนามลบล้างแม่เหล็กจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1 Am^{-1} ถึง 10^6 Am^{-1}

โดยทั่วไปสารแม่เหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารแม่เหล็กอ่อนและสารแม่เหล็กแข็ง โดยที่สารแม่เหล็กอ่อนเป็นสารที่ทำให้เป็นแม่เหล็กได้ง่ายโดยจะมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กต่ำเช่น ในโลหะผสมของซิลิกอนและเหล็ก (Si-Fe alloys) และเหล็กคาร์บอนต่ำ (low carbon steels) จะมีค่าประมาณ $50-100 \text{ Am}^{-1}$ ในโลหะผสมของซิลิกอนและเหล็กแบบเกรนเรียง (grain-oriented Si-Fe alloys) โลหะเฟอร์ไรต์ของแมงกานีส-สังกะสี (Mn-Zn ferrite) และโลหะเฟอร์ไรต์ของนิกเกิล-สังกะสี (Ni-Zn ferrite) จะมีค่าประมาณ 10 Am^{-1} สำหรับสารแม่เหล็กอ่อนมากๆ จะเป็นโลหะผสมของนิกเกิล เช่น โลหะผสมนิกเกิล 80% เหล็ก 20% หรือเพิร์มอัลลอย (permalloys) จะมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กต่ำกว่า 1 Am^{-1} ส่วนสารแม่เหล็กแข็งเป็นสารที่มีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กสูง เช่น ในอัลนิโคอัลลอย (alnico alloys) ซึ่งเป็นโลหะผสมของเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม และทองแดง จะมีค่าประมาณ $50-100 \text{ kAm}^{-1}$ ในสารเฟอร์ไรต์เฮกซะโกนัลซึ่งเป็นออกไซด์ของเหล็ก เช่น แบเรียมเฟอร์ไรต์ ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) หรือ สตรอนเตียมเฟอร์ไรต์ ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) จะมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กประมาณ 300 kAm^{-1} ในสารแม่เหล็กที่เป็นธาตุหายาก (rare earth) เช่น ซามาเรียม-โคบอลต์ (Sm-Co) หรือนีโอไดเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B) จะมีค่ามากกว่า 1000 kAm^{-1}



ภาพประกอบ 3 วงฮิสเทอรีซิสที่แสดงค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างและค่าสนามลบล้างแม่เหล็กในสาร

ที่มา: Giorgio Bertotti. (1998). *Hysteresis in Magnetism*. p. 9.

วงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากเครื่องมือวัด MOKE และ SMOKE จะสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กภายนอกและมุมการหมุนของเคอร์ ซึ่งแปรผันตรงกับความเป็นแม่เหล็กของสารตัวอย่าง การวัดปรากฏการณ์ของเคอร์จะให้ข้อมูลบริเวณผิวของสารในระยะเวลาที่แสงทะลุผ่านลงไปได้ซึ่งจะได้วงฮิสเทอรีซิสที่แตกต่างจากที่ได้ในปริมาตรสาร ซึ่งความแตกต่างนี้แสดงให้เห็นว่าโดเมนแม่เหล็กในปริมาตรสารมีทิศของความเป็นแม่เหล็กแตกต่างไปจากโดเมนบริเวณผิวของสาร การเปรียบเทียบวงฮิสเทอรีซิสที่เกิดจากการให้สนามในทิศที่การเปลี่ยนแปลงความเป็นแม่เหล็กทำได้ง่ายและยากจะทำให้ทราบถึงความเป็นแอนไอโซทรอปี้ของฟิล์มและค่าสนามลบล้างแม่เหล็กหรือค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างในสารอีกทั้งยังใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟส (phase transition) ในสารแม่เหล็ก

2.1.7 รูปนัยนิยมมหรรณของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (macroscopic formalism of the magneto-optic Kerr effect)

การวิเคราะห์รูปนัยนิยมมหรรณของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กจะพิจารณาผลของความไม่สมมาตรของสมาชิก (element) ในไดอิเล็กทริกเทนเซอร์ (dielectric tensor) ของตัวกลางที่มีผลต่อองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าของแสงที่เดินทางผ่าน โดยแมกเวลล์ (James Clerk Maxwell) ได้แสดงว่าแสงที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้นเกิดจากผลรวมขององค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงวงกลมสองชุดและปรากฏการณ์ของฟาราเดย์เป็นผลของความแตกต่างของความเร็วในการแผ่คลื่นของรูปแบบเชิงวงกลมทั้งสองในตัวกลางที่เป็นแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิดกระบวนการได้สองแบบ (Qiu; & Bader. 2000: 1243) คือ แบบที่หนึ่งรูปแบบ (mode) การโพลาไรซ์เชิงวงกลมทั้งสองเกิดการเลื่อนเฟส (phase shift) แตกต่างกันเนื่องจากความเร็วในการแผ่คลื่นแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการหมุนของระนาบการโพลาไรซ์ แบบที่สองอัตราการดูดกลืน (absorption rate) ในตัวกลางของรูปแบบการโพลาไรซ์เชิงวงกลมทั้งสองแตกต่างกันส่งผลให้เกิดความรี (ellipticity)

การวิเคราะห์รูปนัยนิยมจะเริ่มจากการพิจารณาให้แสงที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized) เป็นคลื่นระนาบเอกพันธ์ทั่วไป (general homogeneous plane wave) (Jackson. 1999: 300) ที่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าอยู่ในทิศ $\hat{e}_1$ และ $\hat{e}_2$ ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในสมการ (2.3) โดย $\tilde{E}_1$ และ $\tilde{E}_2$ เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าที่เป็นค่าเชิงซ้อนเพื่อสามารถพิจารณาความต่างเฟสระหว่างองค์ประกอบทั้งสองของสนามไฟฟ้าได้

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = (\hat{e}_1 \tilde{E}_1 + \hat{e}_2 \tilde{E}_2) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - i\omega t} \quad (2.3)$$

โดยสมการ (2.3) สามารถแสดงได้ในรูปแบบที่สมนัยกันขององค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงวงกลม (circularly polarized) ดังสมการ (2.4) โดยที่ $\tilde{E}_+$ และ $\tilde{E}_-$ เป็นขนาดเชิงซ้อนขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรซ์เชิงวงกลมวนซ้าย (left circularly polarized) และโพลาไรซ์เชิงวงกลมวนขวา (right circularly polarized) เมื่อผู้สังเกตมองไปยังทิศที่แสงเคลื่อนที่มา โดย $\hat{e}_+$ และ $\hat{e}_-$ เป็นเวกเตอร์หน่วยในทิศวนซ้ายและวนขวา ตามลำดับ

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = (\hat{e}_+ \tilde{E}_+ + \hat{e}_- \tilde{E}_-) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - i\omega t} \quad (2.4)$$

$$\text{โดย } \tilde{E}_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{E}_1 - i\tilde{E}_2) \quad \tilde{E}_- = \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{E}_1 + i\tilde{E}_2) \quad \hat{e}_+ = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e}_1 + i\hat{e}_2) \quad \text{และ} \quad \hat{e}_- = \frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{e}_1 - i\hat{e}_2)$$

กรณีที่ $\tilde{E}_+$ และ $\tilde{E}_-$ มีการดุดกลืนในตัวเองต่างกันจะทำให้มีขนาดแตกต่างกันส่งผลให้ $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$ มีโพลาไรซ์เชิงวงรี (elliptically polarized) ซึ่งมีความยาวครึ่งแกนหลักเป็น $\frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{E}_+ + \tilde{E}_-)$ และความยาวครึ่งแกนรองเป็น $\frac{i}{\sqrt{2}}(\tilde{E}_+ - \tilde{E}_-)$ โดยค่าอาร์กแทนเจนต์ของอัตราส่วนระหว่างความยาวครึ่งแกนรองต่อความยาวครึ่งแกนหลัก คือ ความรีของเคอร์ (ε_K) จะมีค่าเท่ากับ (Reichl. 2005:17)

$$\varepsilon_K = \tan^{-1} \frac{|\tilde{E}_+ - \tilde{E}_-|}{|\tilde{E}_+ + \tilde{E}_-|} \quad (2.5)$$

และถ้าความเร็วในการแผ่คลื่นในตัวเองของ $\tilde{E}_+$ และ $\tilde{E}_-$ ต่างกันทำให้องค์ประกอบทั้งสองมีเฟสเป็น ϕ_+ และ ϕ_- ตามลำดับ เมื่อรวมองค์ประกอบทั้งสองเข้าด้วยกันความต่างเฟส (Δ) จะส่งผลให้แกนหลักของวงรีหมุนไปจากแนวเดิมเท่ากับการหมุนของเคอร์ (θ_K) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของความต่างเฟสระหว่างองค์ประกอบทั้งสอง เมื่อ $\Delta = \phi_+ - \phi_-$ โดย

$$\theta_K = \frac{\Delta}{2} \quad \text{และ} \quad \tan \phi_{\pm} = \frac{\text{Im}(\tilde{E}_{\pm})}{\text{Re}(\tilde{E}_{\pm})} \quad (2.6)$$

รูปแบบขององค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงเส้น องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงวงกลม องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงวงรี การหมุนของเคอร์ และความรีของเคอร์ แสดงได้ดังภาพประกอบ 4

ในกรณีที่คลื่นระนาบเป็นแบบคลื่นระนาบเคลื่อนที่สนามไฟฟ้าตามขวางเอกฐาน (uniform transverse electric travelling plane wave, TE) จะสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าในรูปของ Jones vector (Jones vector, $\mathbf{E}(0)$) ได้เป็น (Azzam; & Bashara. 1987: 15)

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \text{Re}[\mathbf{E}(0)e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x} - i\omega t}] \quad (2.7)$$

โดย Jones vector สำหรับระบบพิกัดคาร์ทีเซียน คือ

$$\mathbf{E}(0) = \begin{bmatrix} \tilde{E}_1 \\ \tilde{E}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tilde{E}_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tilde{E}_2 = \xi_x \tilde{E}_1 + \xi_y \tilde{E}_2 \quad (2.8)$$

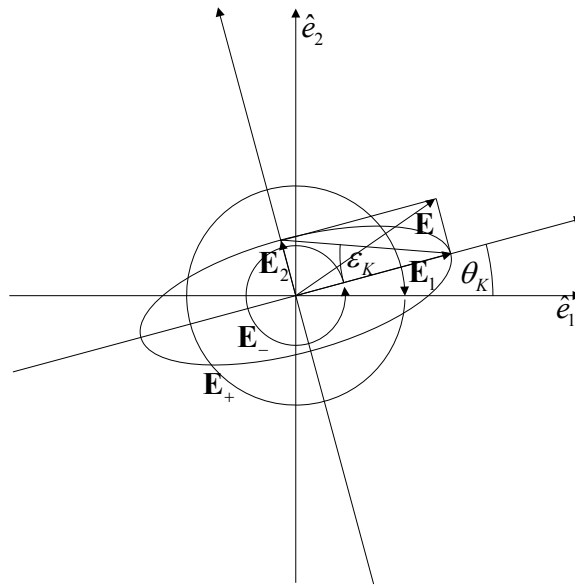
และ Jones vector สำหรับระบบวงกลม คือ

$$\mathbf{E}(0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{E}_+ \\ \tilde{E}_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix} \tilde{E}_+ + \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \tilde{E}_- = \frac{1}{\sqrt{2}} \xi_+ \tilde{E}_+ + \frac{1}{\sqrt{2}} \xi_- \tilde{E}_- \quad (2.9)$$

โดย ξ_x และ ξ_y คือ เวกเตอร์ฐานหลัก (basis vector) สำหรับระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

ξ_+ และ ξ_- คือ เวกเตอร์ฐานหลักสำหรับระบบวงกลม

เมื่อพิจารณาคลื่นที่ตำแหน่ง $\mathbf{x} = 0$ สำหรับคลื่นเอกรงค์ (monochromatic wave) ซึ่งมีการสั่นแบบฟังก์ชันไซน์ด้วยความถี่ที่จึงสามารถลดรูปพจน์ของเวลา ทำให้สามารถแทนสมการของสนามไฟฟ้าด้วย Jones vector ได้



ภาพประกอบ 4 องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงเส้น องค์ประกอบการโพลาไรซ์เชิงวงกลม องค์ประกอบ
การโพลาไรซ์เชิงวงรี การหมุนของเคอร์ และความรีของเคอร์

ที่มา: Irene Reichl. (2005). *Theoretical Investigations of Magneto-Optical Properties of Multilayer Systems*. p. 18.

พิจารณาปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กในกรณีที่แสงตกกระทบบนทำมุมตั้งฉาก (normal incidence) กับระนาบของผิวสารตัวอย่าง เมทริกซ์การสะท้อน (reflectivity matrix, $\mathfrak{R}$) บริเวณผิวรอยต่อจะเป็น

$$\mathfrak{R}_{surf}^{xy} = \begin{pmatrix} \tilde{r}_{xx} & \tilde{r}_{xy} \\ \tilde{r}_{yx} & \tilde{r}_{yy} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าตกกระทบบนมีการสั่นอยู่ในแนวแกน x จะแทนด้วย $\mathbf{E} = (E_x, 0)$ คลื่นสะท้อนจะมีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าแสดงในรูปเวกเตอร์ฐานหลักสำหรับระบบวงกลมได้เป็น

$$\mathbf{E}'' = \frac{\tilde{a}_+}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} E_x + \frac{\tilde{a}_-}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} E_x \equiv \begin{pmatrix} \tilde{r}_{xx} \\ \tilde{r}_{yx} \end{pmatrix} E_x \quad (2.11)$$

โดย $\tilde{a}_+ = a_+ e^{i\phi_+} = \tilde{r}_{xx} - i\tilde{r}_{yx}$ และ $\tilde{a}_- = a_- e^{i\phi_-} = \tilde{r}_{xx} + i\tilde{r}_{yx}$

จากสมการ (2.5) และ (2.6) จะได้ค่าการหมุนและความรีของเคอร์เป็น

$$\theta_K = \frac{1}{2}(\phi_+ - \phi_-) \text{ โดย } \phi_{\pm} = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\tilde{a}_{\pm})}{\text{Re}(\tilde{a}_{\pm})} \right) \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_K = \tan^{-1} \frac{|\tilde{a}_+| - |\tilde{a}_-|}{|\tilde{a}_+| + |\tilde{a}_-|} \quad (2.13)$$

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าตกกระทบบนผิวที่มีการสั่นอยู่ในแนวแกน y จะแทนด้วย $\mathbf{E} = (0, E_y)$ คลื่นสะท้อนจะมีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าแสดงในรูปเวกเตอร์ฐานหลักสำหรับระบบวงกลมเป็น

$$\mathbf{E}'' = \frac{\tilde{b}_+}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} E_y + \frac{\tilde{b}_-}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} E_y \equiv \begin{pmatrix} \tilde{r}_{xy} \\ \tilde{r}_{yy} \end{pmatrix} E_y \quad (2.14)$$

โดย $\tilde{b}_+ = b_+ e^{i\phi_+} = \tilde{r}_{xy} - i\tilde{r}_{yy}$ และ $\tilde{b}_- = b_- e^{i\phi_-} = \tilde{r}_{xy} + i\tilde{r}_{yy}$

ค่าการหมุนและความรีของเคอร์เป็นเช่นเดียวกับสมการ (2.12) และ (2.13) โดยเปลี่ยนค่า $\tilde{a}_{\pm}$ เป็น $\tilde{b}_{\pm}$ เมื่อพิจารณาในกรณีที่แสงตกกระทบบนผิวทำมุมตกกระทบบนผิวเป็นมุมเอียง (oblique incidence) กับระนาบของผิวสารตัวอย่างดังภาพประกอบ 5 เมทริกซ์การสะท้อนจะเป็น

$$\mathfrak{R}_{surf}^{sp} = \begin{pmatrix} \tilde{r}_{ss} & \tilde{r}_{sp} \\ \tilde{r}_{ps} & \tilde{r}_{pp} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

ในกรณีที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวขนานกับระนาบตกกระทบบนผิว (p-polarized wave) สนามไฟฟ้าตกกระทบบนผิวจะมีการสั่นอยู่ในแนวแกน p จะแทนด้วย $\mathbf{E} = (E_p, 0)$ คลื่นสะท้อนจะมีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าแสดงในรูปเวกเตอร์ฐานหลักสำหรับระบบวงกลมเป็น

$$\mathbf{E}'' = \frac{\tilde{a}_+}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} E_p + \frac{\tilde{a}_-}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} E_p \equiv \begin{pmatrix} \tilde{r}_{pp} \\ \tilde{r}_{sp} \end{pmatrix} E_p \quad (2.16)$$

โดย $\tilde{a}_+ = a_+ e^{i\phi_+} = \tilde{r}_{pp} - i\tilde{r}_{sp}$ และ $\tilde{a}_- = a_- e^{i\phi_-} = \tilde{r}_{pp} + i\tilde{r}_{sp}$

ในกรณีที่องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบตกกระทบ (s-polarized wave) สนามไฟฟ้าตกกระทบจะมีการสั่นอยู่ในแนวแกน s จะแทนด้วย $\mathbf{E} = (0, E_s)$ คลื่นสะท้อนจะมีองค์ประกอบสนามไฟฟ้าแสดงในรูปเวกเตอร์ฐานหลักสำหรับระบบวงกลมเป็น

$$\mathbf{E}'' = \frac{\tilde{a}_+}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} E_s + \frac{\tilde{a}_-}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} E_s \equiv \begin{pmatrix} \tilde{r}_{ps} \\ \tilde{r}_{ss} \end{pmatrix} E_s \quad (2.17)$$

$$\text{โดย } \tilde{b}_+ = b_+ e^{i\phi_+} = \tilde{r}_{ps} - i\tilde{r}_{ss} \text{ และ } \tilde{b}_- = b_- e^{i\phi_-} = \tilde{r}_{ps} + i\tilde{r}_{ss}$$

การหาค่าการหมุนและความรีของเคอร์ทำได้โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์ $\tilde{a}_\pm$ และ $\tilde{b}_\pm$ ในสมการ (2.12) และ (2.13) ตามลำดับ

การพิจารณาปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กที่เกิดจากการสะท้อนบริเวณรอยต่อของตัวกลางสองชนิด โดยปกติจะเป็นปรากฏการณ์ที่แสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางในตัวกลางที่หนึ่งซึ่งเป็นอากาศและสะท้อนที่ผิวรอยต่อกับตัวกลางที่สองคือสารตัวอย่างที่มีสภาพเป็นแม่เหล็ก ซึ่งมีทางเดินของแสงและระบบพิกัดเป็นดังภาพประกอบ 5 โดยจะพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองที่ตำแหน่ง $z = 0$ คือ

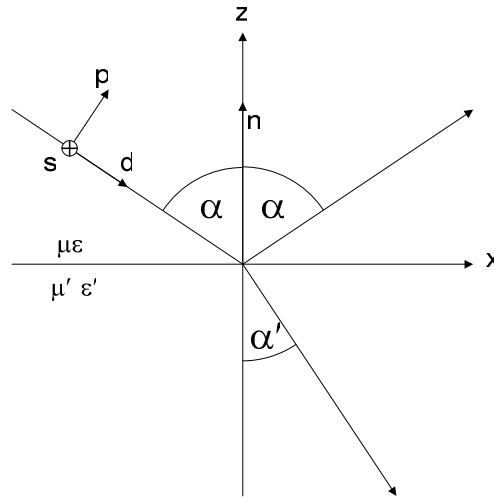
$$[\varepsilon(\mathbf{E} + \mathbf{E}'') - \varepsilon'\mathbf{E}'] \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (2.18)$$

$$[\mu(\mathbf{H} + \mathbf{H}'') - \mu'\mathbf{H}'] \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (2.19)$$

$$(\mathbf{E} + \mathbf{E}'' - \mathbf{E}') \times \mathbf{n} = 0 \quad (2.20)$$

$$(\mathbf{H} + \mathbf{H}'' - \mathbf{H}') \times \mathbf{n} = 0 \quad (2.21)$$

เมื่อ $\mathbf{n}$ เป็นเวกเตอร์หน่วย (unit vector) ในทิศตั้งฉากกับผิว



ภาพประกอบ 5 คลื่นตกกระทบ คลื่นหักเห และคลื่นสะท้อนบริเวณรอยต่อของตัวกลางสองชนิด

ที่มา: Irene Reichl. (2005). *Theoretical Investigations of Magneto-Optical Properties of Multilayer Systems*. p. 24.

เมื่อกำหนดให้แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบ $\mathbf{E} = E_0 e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - i\omega t}$ โดยมีเวกเตอร์คลื่นของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นหักเหเป็น $\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} n \hat{e}_k$ $\mathbf{k}'' = \frac{\omega}{c} n \hat{e}_{k''}$ และ $\mathbf{k}'_{\pm} = \frac{\omega_{\pm}}{c} n'_{\pm} \hat{e}_{k'_{\pm}}$ ตามลำดับ โดยพิจารณาสมบัติของคลื่นในสองลักษณะคือ

สมบัติทางจลนศาสตร์ (kinematic properties) หรือกฎของสเนลล์ (Snell's law)

พิจารณาคลื่นที่ตำแหน่ง $z = 0$ และไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา (time independence) ดังนั้น $\omega = \omega'' = \omega'_{\pm}$ จะมีเวกเตอร์คลื่นเป็น

$$(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x})_{z=0} = -(\mathbf{k}'' \cdot \mathbf{x})_{z=0} \text{ และ } (n\mathbf{k} \cdot \mathbf{x})_{z=0} = (n'_{\pm}\mathbf{k}'_{\pm} \cdot \mathbf{x})_{z=0} \quad (2.22)$$

กำหนดให้ระนาบ xz เป็นระนาบตกกระทบ ทิศทางของคลื่นตกกระทบ คลื่นหักเห และคลื่นสะท้อนจะเป็น

$$\hat{e}_k = (\sin \alpha, 0, \cos \alpha) \quad \hat{e}'_{k_{\pm}} = (\sin \alpha'_{\pm}, 0, \cos \alpha'_{\pm}) \quad \hat{e}''_k = (\sin \alpha'', 0, -\cos \alpha'') \quad (2.23)$$

จากสมการ (2.22) ทำให้ได้กฎของสเนลล์ คือ

$$\alpha = \alpha'' \text{ และ } n \sin \alpha = n'_\pm \sin \alpha'_\pm \quad (2.24)$$

สมบัติทางพลศาสตร์ (dynamic properties) หรือสมการของเฟรเนล (Fresnel equations)

การหาสมการเฟรเนลสำหรับตัวกลางแม่เหล็กจะพิจารณาจากสมการแมกเวลล์

$$\epsilon_{lmn} \partial_m E_n = -\frac{1}{c} \partial_0 H_l \quad (2.25)$$

$$\epsilon_{lmn} \partial_m H_n = \frac{4\pi}{c} j_l + \frac{1}{c} \partial_0 D_l \quad (2.26)$$

เนื่องจากในการพิจารณาไม่มีประจุภายนอกและกระแสในระบบ เมื่อทำผลคูณเชิงเวกเตอร์กับสมการ (2.25) จะได้

$$\epsilon_{pql} \partial_q \epsilon_{lmn} \partial_m E_n = -\frac{1}{c} \partial_0 \epsilon_{pql} \partial_q H_l \quad (2.27)$$

$$\epsilon_{pql} \partial_q H_l = \frac{1}{c} \partial_0 D_p \quad (2.28)$$

แทนสมการ (2.28) ในสมการ (2.27) และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์เลวี-ซีวิตา (Levi-Civita symbol) กับโครเนกเคอร์เดลตา (kronecker delta) จะได้

$$(\delta_{pm} \delta_{qn} - \delta_{pn} \delta_{qm}) \partial_q \partial_m E_n = -\frac{1}{c^2} \partial_0 \partial_0 D_p \quad (2.29)$$

สำหรับคลื่นระนาบ $E_n = E_{n0} e^{i(k_n x_n - \omega t)}$ และ $D_p = \epsilon_{pn} E_n$ โดย $k_n = \frac{\omega}{c} n e_{kn}$ เมื่อแทนค่าในสมการ (2.29) จะได้สมการเฟรเนลเป็น

$$n^2 (e_{kn} e_{kp} - \delta_{pn}) E_n + \epsilon_{pn} E_n = 0 \quad (2.30)$$

พิจารณาสมการเฟรเนลในพจน์ของการกระจัดไฟฟ้า (Electric displacement, $\mathbf{D}$) จะได้

$$\mathbf{D} = n^2 (\mathbf{E} - \hat{e}_k (\hat{e}_k \cdot \mathbf{E})) = n^2 (\epsilon^{-1} \mathbf{D} - \hat{e}_k (\hat{e}_k \cdot \epsilon^{-1} \mathbf{D})) \quad (2.31)$$

โดยไดอิเล็กตริกในตัวกลางจะแสดงได้ในรูปของเทนเซอร์ ϵ_{ij} ขนาด 3×3 เมื่อ $i, j = x, y, z$ โดย

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} = \epsilon_{xx} \begin{pmatrix} 1 & -iQm_z & iQm_x \\ iQm_z & 1 & -iQm_y \\ -iQm_x & iQm_y & 1 \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

ค่า $Q = i \frac{\epsilon_{xy}}{\epsilon_{xx}}$ เรียกว่าค่าคงที่ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (magneto-optical constant) หรือเวกเตอร์เวกเตอร์ (Voigt vector) และ m_i โดย $i = x, y, z$ เป็นโคไซน์แสดงทิศทาง (direction cosine) ของเวกเตอร์ความเป็นแม่เหล็ก (magnetization vector)

สำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงขั้วจะมีความเป็นแม่เหล็กเฉพาะในแกน z โดยสมาชิกของไดอิเล็กตริกเทนเซอร์ในแนวทแยงมุม (diagonal) จะมีค่าเท่ากัน คือ $\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \epsilon_{zz}$ และสมาชิกนอกแนวทแยงมุมจะมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน คือ $\epsilon_{yx} = -\epsilon_{xy}$ (Yang; & Scheinfein. 1993: 6813)

$$\epsilon_{polar} = \epsilon^z = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ -\epsilon_{xy} & \epsilon_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{xx} \end{pmatrix} = \epsilon_{xx} \begin{pmatrix} 1 & -iQm_z & 0 \\ iQm_z & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

สำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามยาวจะมีความเป็นแม่เหล็กเฉพาะในแกน x โดย $\epsilon_{zx} = -\epsilon_{xz}$ จะมีไดอิเล็กตริกเทนเซอร์เป็น

$$\epsilon_{longitudinal} = \epsilon^x = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & \epsilon_{xz} \\ 0 & \epsilon_{xx} & 0 \\ -\epsilon_{xz} & 0 & \epsilon_{xx} \end{pmatrix} = \epsilon_{xx} \begin{pmatrix} 1 & 0 & iQm_x \\ 0 & 1 & 0 \\ -iQm_x & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

สำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามขวางจะมีความเป็นแม่เหล็กเฉพาะในแกน y โดย $\epsilon_{zy} = -\epsilon_{yz}$ จะมีไดอิเล็กตริกเทนเซอร์เป็น

$$\epsilon_{transverse} = \epsilon^y = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{xx} & \epsilon_{yz} \\ 0 & -\epsilon_{yz} & \epsilon_{xx} \end{pmatrix} = \epsilon_{xx} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -iQm_y \\ 0 & iQm_y & 1 \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

โดยจะสามารถหาเมทริกซ์ผกผัน (inverse matrix) ของทั้งสามรูปแบบได้ คือ

$$\mathcal{E}_{polar}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\mathcal{E}_{xx}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xy}^2} & \frac{\mathcal{E}_{xy}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xy}^2} & 0 \\ \frac{-\mathcal{E}_{xy}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xy}^2} & \frac{\mathcal{E}_{xx}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xy}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\mathcal{E}_{xx}} \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

$$\mathcal{E}_{longitudinal}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\mathcal{E}_{xx}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xz}^2} & 0 & \frac{-\mathcal{E}_{xz}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xz}^2} \\ 0 & \frac{1}{\mathcal{E}_{xx}} & 0 \\ \frac{\mathcal{E}_{xz}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xz}^2} & 0 & \frac{\mathcal{E}_{xx}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{xz}^2} \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

$$\mathcal{E}_{transverse}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\mathcal{E}_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\mathcal{E}_{xx}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{yz}^2} & \frac{-\mathcal{E}_{yz}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{yz}^2} \\ 0 & \frac{\mathcal{E}_{yz}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{yz}^2} & \frac{\mathcal{E}_{xx}}{\mathcal{E}_{xx}^2 + \mathcal{E}_{yz}^2} \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

จากการกำหนดพิกัด (p, s, d) ดังภาพประกอบ 5 จะสามารถหาค่าผกผันของไดอิเล็กตริกเทนเซอร์ในระบบพิกัด (p, s, d) จากระบบพิกัด (x, y, z) ได้โดย

$$(\mathcal{E}^{-1})_{psd} = S^{-1} (\mathcal{E}^{-1})_{xyz} S \quad (2.39)$$

เมื่อ $S = S^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \end{pmatrix}$ เรียกว่าเมทริกซ์การหมุนในสามมิติ (3D rotation matrix)

ในกรณีที่การกระจายไฟฟ้ามีทิศตั้งฉากกับเวกเตอร์คลื่นและแกน d ขนานกับเวกเตอร์คลื่น ดังนั้นองค์ประกอบของการกระจายไฟฟ้าตามแกน d จะมีค่าเป็นศูนย์ ($D_d = 0$) จากสมการ (2.31) จะสามารถแสดงองค์ประกอบของการกระจายไฟฟ้าตามแกน p s และ d ได้เป็น

$$D_p = n^2 \left((\varepsilon^{-1})_{pp} D_p + (\varepsilon^{-1})_{ps} D_s \right) \quad (2.40)$$

$$D_s = n^2 \left((\varepsilon^{-1})_{sp} D_p + (\varepsilon^{-1})_{ss} D_s \right) \quad (2.41)$$

$$D_d = 0 \quad (2.42)$$

โดยจะสามารถลดรูปไดอิเล็กทริกเทนเซอร์ผกผันเป็นขนาด 2×2 คือ

$$\varepsilon^{-1} = \begin{pmatrix} (\varepsilon^{-1})_{pp} & (\varepsilon^{-1})_{ps} \\ (\varepsilon^{-1})_{sp} & (\varepsilon^{-1})_{ss} \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

พิจารณาเฉพาะในกรณีของรูปแบบเชิงขั้วซึ่งจะมีองค์ประกอบของไดอิเล็กทริกเทนเซอร์ผกผันเป็น

$$(\varepsilon^{-1})_{pp} = (\varepsilon^{-1})_{xx} \cos^2 \alpha + (\varepsilon^{-1})_{zz} \sin^2 \alpha = \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos^2 \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\varepsilon_{xx}} \quad (2.44)$$

$$(\varepsilon^{-1})_{ps} = (\varepsilon^{-1})_{xy} \cos \alpha = \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos \alpha \quad (2.45)$$

$$(\varepsilon^{-1})_{sp} = (\varepsilon^{-1})_{yx} \cos \alpha = -\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos \alpha \quad (2.46)$$

$$(\varepsilon^{-1})_{ss} = (\varepsilon^{-1})_{yy} = \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \quad (2.47)$$

$$(\varepsilon^{-1})_{dp} = \left(\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} - \frac{1}{\varepsilon_{xx}} \right) \sin \alpha \cos \alpha \quad (2.48)$$

$$(\varepsilon^{-1})_{ds} = \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \sin \alpha \quad (2.49)$$

จัดรูปสมการ (2.40) และ (2.41) จะได้สมการระบบในรูปของการกระจัดไฟฟ้าเป็น

$$0 = \left(n^2 (\varepsilon^{-1})_{pp} - 1 \right) D_p + n^2 (\varepsilon^{-1})_{ps} D_s \quad (2.50)$$

$$0 = n^2 (\varepsilon^{-1})_{sp} D_p + \left(n^2 (\varepsilon^{-1})_{ss} - 1 \right) D_s \quad (2.51)$$

ถ้าสมการ (2.50) และ (2.51) มีผลเฉลยแสดงว่าดีเทอร์มิแนนต์ของระบบมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจะได้สมการพหุนามของดัชนีหักเหเป็น

$$\begin{aligned}
& n^4 \left(\frac{\varepsilon_{xx}^3 \cos^2 \alpha + \varepsilon_{xx} (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2) \sin^2 \alpha + \varepsilon_{xx} \varepsilon_{xy}^2 \cos^2 \alpha}{\varepsilon_{xx} (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2)^2} \right) \\
& - n^2 \left(\frac{\varepsilon_{xx}^2 \cos^2 \alpha + (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2) \sin^2 \alpha + \varepsilon_{xx}^2}{\varepsilon_{xx} (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2)} \right) + 1 = 0
\end{aligned} \tag{2.52}$$

และสามารถลดรูปได้เป็น

$$n^4 - n^2 \frac{2\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2 \sin^2 \alpha}{\varepsilon_{xx}} + (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2) = 0 \tag{2.53}$$

โดยใช้การประมาณเชิงเส้น (linear approximation) สำหรับ ε_{xy} จะได้ผลเฉลยของสมการ (2.53) เป็น

$$\begin{aligned}
n_{\pm}^2 &= \frac{2\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2 \sin^2 \alpha}{2\varepsilon_{xx}} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2 \sin^2 \alpha}{\varepsilon_{xx}} \right)^2 - 4(\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2)} \\
&= \varepsilon_{xx} + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{2\varepsilon_{xx}} \sin^2 \alpha \pm i\varepsilon_{xy} \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\varepsilon_{xy}^2 \sin^2 \alpha}{4\varepsilon_{xx}^2 \cos^2 \alpha}} \\
&\approx \varepsilon_{xx} + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{2\varepsilon_{xx}} \sin^2 \alpha \pm i\varepsilon_{xy} \cos \alpha
\end{aligned} \tag{2.54}$$

แทนค่า $(\varepsilon)_{pp}^{-1}$ และ $(\varepsilon)_{ps}^{-1}$ ในสมการ (2.50) และใช้ค่าประมาณของ $n_{\pm}^2$ จากสมการ (2.54) จะได้สมการความสัมพันธ์ของการกระจัดไฟฟ้าระหว่างแกน p และ s เป็น

$$\begin{aligned}
D_{p\pm} &= \frac{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2}{n_{\pm}^2 \varepsilon_{xy} \cos \alpha} \left(\frac{n_{\pm}^2 \varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} - 1 \right) D_{s\pm} \\
&= \frac{1}{n_{\pm}^2 \varepsilon_{xy} \cos \alpha} (n_{\pm}^2 \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{xy}^2) D_{s\pm} \\
&= \frac{1}{n_{\pm}^2 \varepsilon_{xy} \cos \alpha} \left(\left(\varepsilon_{xx} + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{2\varepsilon_{xx}} \sin^2 \alpha \pm i\varepsilon_{xy} \cos \alpha \right) \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{xy}^2 \right) D_{s\pm} \\
&= \frac{1}{n_{\pm}^2 \cos \alpha} \left(\varepsilon_{xy} \left(\frac{1}{2} \sin^2 \alpha - 1 \right) \pm i\varepsilon_{xx} \cos \alpha \right) D_{s\pm}
\end{aligned} \tag{2.55}$$

โดยใช้การประมาณเชิงเส้นสำหรับ ε_{xy} ของพจน์แรกในสมการ (2.55) จะได้

$$\begin{aligned} (n_{\pm}^2 \cos \alpha)^{-1} &= \left(\varepsilon_{xx} \cos \alpha \left(1 + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{2\varepsilon_{xx}^2} \sin^2 \alpha \pm i \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}} \cos \alpha \right) \right)^{-1} \\ &\approx \frac{1}{\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \left(1 \mp i \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}} \cos \alpha \right) \end{aligned} \quad (2.56)$$

แทนสมการ (2.56) ลงในสมการ (2.55) และใช้การประมาณเชิงเส้นของ ε_{xy} จะได้องค์ประกอบของการกระจัดไฟฟ้าเป็น

$$\begin{aligned} D_{p\pm} &\approx \frac{1}{\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \left(1 \mp i \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}} \cos \alpha \right) \left(\frac{\varepsilon_{xy}}{2} \sin^2 \alpha - \varepsilon_{xy} \pm i \varepsilon_{xx} \cos \alpha \right) D_{s\pm} \\ &\approx \frac{1}{\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \left(\frac{\varepsilon_{xy}}{2} \sin^2 \alpha - \varepsilon_{xy} \pm i \varepsilon_{xx} \cos \alpha \pm i \frac{\varepsilon_{xy}^2}{\varepsilon_{xx}} \cos \alpha \mp i \frac{\varepsilon_{xy}^2}{2\varepsilon_{xx}} \sin^2 \alpha \cos \alpha + \varepsilon_{xy} \cos^2 \alpha \right) D_{s\pm} \\ &\approx \frac{1}{\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \left(-\frac{\varepsilon_{xy}}{2} \sin^2 \alpha \pm i \varepsilon_{xx} \cos \alpha \right) D_{s\pm} \\ &\approx \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \pm i \right) D_{s\pm} \\ D_{d\pm} &= 0 \end{aligned} \quad (2.57)$$

จากความสัมพันธ์ $\mathbf{E} = \varepsilon^{-1} \mathbf{D}$ และใช้การประมาณเชิงเส้นของ ε_{xy} จะได้ความสัมพันธ์ของการกระจัดไฟฟ้าในพจน์ของสนามไฟฟ้าเป็น

$$E_{p\pm} = \frac{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2 \sin^2 \alpha}{\varepsilon_{xx} (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2)} D_{p\pm} + \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos \alpha D_{s\pm} \quad (2.58)$$

$$E_{s\pm} = -\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos \alpha D_{p\pm} + \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} D_{s\pm} \quad (2.59)$$

$$E_{d\pm} = \left(\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} - \frac{1}{\varepsilon_{xx}} \right) \sin \alpha \cos \alpha D_{p\pm} + \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \sin \alpha D_{s\pm} \quad (2.60)$$

ใช้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบการกระจัดไฟฟ้าในแนว p และ s จากสมการ (2.57) เพื่อกำจัดพจน์ $D_{p\pm}$ จะได้

$$E_{p\pm} = \left(\frac{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2 \sin^2 \alpha}{\varepsilon_{xx} (\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2)} \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \pm i \right) + \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos \alpha \right) D_{s\pm} \quad (2.61)$$

$$E_{s\pm} = \left(-\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos \alpha \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \pm i \right) + \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \right) D_{s\pm} \quad (2.62)$$

$$E_{d\pm} = \left(\left(\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} - \frac{1}{\varepsilon_{xx}} \right) \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \pm i \right) \cos \alpha - \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \right) \sin \alpha D_{s\pm} \quad (2.63)$$

จากสมการ (2.62) จะแสดงการกระจายไฟฟ้าในรูปของสนามไฟฟ้าเป็น

$$\begin{aligned} D_{s\pm} &= \left(-\frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \cos \alpha \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha} \pm i \right) + \frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2} \right)^{-1} E_{s\pm} \\ &\approx \frac{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{xy}^2}{\varepsilon_{xx}} \left(1 \pm i \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}} \cos \alpha \right) E_{s\pm} \end{aligned} \quad (2.64)$$

แทนค่า $D_{s\pm}$ ในสมการ (2.61) และ (2.63) และใช้กฎของสเนลล์สำหรับคลื่นหักเหจะได้

$$E'_{p\pm} \approx \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \pm i \right) E'_{s\pm} \quad (2.65)$$

$$E'_{d\pm} \approx \frac{\varepsilon_{xy} \sin \alpha'_{\pm}}{\varepsilon_{xx}} E'_{s\pm} \quad (2.66)$$

พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงขั้ว โดยในรูปแบบเชิงขั้วแกนของความเป็นแม่เหล็กจะตั้งฉากกับผิวหน้าของสารตัวอย่างและทำมุม α กับลำแสงตกกระทบ โดยบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างสองตัวกลางองค์ประกอบในแนวตั้งฉากกับระนาบ (normal-to-plane) $D_{\perp}$ และ $B_{\perp}$ และองค์ประกอบในแนวระนาบ (in-plane) $D_{\parallel}$ และ $B_{\parallel}$ จะมีค่าต่อเนื่อง โดยใช้ความสัมพันธ์ขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในระบบพิกัด xyz และ psd คือ

$$E_x = E_p \cos \alpha + E_d \sin \alpha \rightarrow \in E_{\parallel} \quad (2.67)$$

$$E_y = E_s \rightarrow \in E_{\parallel} \quad (2.68)$$

$$E_z = E_p \sin \alpha - E_d \cos \alpha \rightarrow \in E_{\perp} \quad (2.69)$$

สำหรับในสุญญากาศ $E_d = 0$ โดยมีเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของแสงตกกระทบ แสงหักเห และแสงสะท้อนในพิกัด (p, s, d) เป็น

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_p \\ E_s \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{E}'_{\pm} = \begin{pmatrix} E'_{p\pm} \\ E'_{s\pm} \\ E'_{d\pm} \end{pmatrix}, \mathbf{E}'' = \begin{pmatrix} E''_p \\ E''_s \\ 0 \end{pmatrix}$$

และในพิกัดคาร์ทีเซียนเป็น

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \mathbf{E}'_{\pm} = \begin{pmatrix} E'_{x\pm} \\ E'_{y\pm} \\ E'_{z\pm} \end{pmatrix} \text{ และ } \mathbf{E}'' = \begin{pmatrix} E''_x \\ E''_y \\ E''_z \end{pmatrix}$$

โดยในตัวกลางแม่เหล็กขนาดขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแกน p จะมีค่าเท่ากับ

$$|E_{p\pm}| = \pm \sqrt{E_{p\pm}^2 + E_{d\pm}^2} = \pm E_{s\pm} \sqrt{\left(-\frac{\epsilon_{xy} \sin^2 \alpha_{\pm}}{2\epsilon_{xx} \cos \alpha_{\pm}} \pm i \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{xy} \sin \alpha_{\pm}}{\epsilon_{xx}} \right)^2} \quad (2.70)$$

องค์ประกอบเชิงวงกลมของคลื่นแสงหักเหจะเป็น

$$E'_{p\pm} \approx \left(-\frac{\epsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\epsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \pm i \right) E'_{s\pm} \quad (2.71)$$

โดยใช้วิธีเดียวกันจะสามารถหาค่าขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าตามแกน x และ z ได้เป็น

$$E_{x\pm} = \left(-\frac{\epsilon_{xy} \sin^2 \alpha_{\pm}}{2\epsilon_{xx} \cos \alpha_{\pm}} \mp i \right) \cos \alpha_{\pm} E_{s\pm} \quad (2.72)$$

$$E_{z\pm} = \left(\frac{\epsilon_{xy} (1 - \cos^2 \alpha_{\pm})}{2\epsilon_{xx} \cos \alpha_{\pm}} \mp i \right) \sin \alpha_{\pm} E_{s\pm} \quad (2.73)$$

จากเงื่อนไขสำหรับองค์ประกอบในแนวระนาบจะได้

$$\cos \alpha (E_p - E_p'') = \sum_{\pm} \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \mp i \right) \cos \alpha'_{\pm} E_{s\pm}' \quad (2.74)$$

$$E_s + E_s'' = \sum_{\pm} E_{s\pm}' \quad (2.75)$$

จากนั้นจะหาค่าสนามแม่เหล็กจาก $\mathbf{H} = n\hat{e}_k \times \mathbf{E}$ โดยที่เวกเตอร์คลื่นมีค่าเท่ากับ

$$n\hat{e}_k = n \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ -\cos \alpha \end{pmatrix} \quad n'_{\pm}\hat{e}'_k = n' \begin{pmatrix} \sin \alpha'_{\pm} \\ 0 \\ -\cos \alpha'_{\pm} \end{pmatrix} \quad n\hat{e}_k'' = n \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{pmatrix}$$

สนามแม่เหล็กสำหรับคลื่นตกกระทบ ($\mathbf{H}$) คลื่นสะท้อน ($\mathbf{H}'$) และคลื่นหักเห ($\mathbf{H}''$) จะเป็น

$$\mathbf{H} = n \begin{pmatrix} \cos \alpha E_y \\ -\cos \alpha E_x - \sin \alpha E_z \\ \sin \alpha E_y \end{pmatrix} \quad (2.76)$$

$$\mathbf{H}' = n'_{\pm} \begin{pmatrix} \cos \alpha'_{\pm} E'_{y\pm} \\ -\cos \alpha'_{\pm} E'_{x\pm} - \sin \alpha'_{\pm} E'_{z\pm} \\ \sin \alpha'_{\pm} E'_{y\pm} \end{pmatrix} \quad (2.77)$$

$$\mathbf{H}'' = n \begin{pmatrix} -\cos \alpha E''_y \\ -\cos \alpha E''_x - \sin \alpha E''_z \\ \sin \alpha E''_y \end{pmatrix} \quad (2.78)$$

โดยองค์ประกอบในแนวแกน y สามารถทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายและอยู่ในสุญญากาศจะได้

$$\begin{aligned} n(-\cos \alpha E_x - \sin \alpha E_z - \cos \alpha E''_x - \sin \alpha E''_z) &= n(-\cos^2 \alpha E_p - \sin^2 \alpha E_p + \cos^2 \alpha E_p'' + \sin^2 \alpha E_p'') \\ &= -n(E_p + E_p'') \end{aligned} \quad (2.79)$$

สำหรับคลื่นที่เดินทางในตัวกลางเนื้อเดียว (homogeneous medium) จะได้

$$\sum_{\pm} n'_{\pm} (-\cos \alpha'_{\pm} E'_{x\pm} - \sin \alpha'_{\pm} E'_{z\pm}) = -\sum_{\pm} n'_{\pm} E'_{s\pm} \approx \sum_{\pm} n'_{\pm} E'_{p\pm} \quad (2.80)$$

จากความต่อเนื่องขององค์ประกอบสนามแม่เหล็กในแนวระนาบจะได้

$$n \cos \alpha (E_s - E_s'') = \sum_{\pm} n'_{\pm} \cos \alpha'_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.81)$$

$$n(E_p - E_p'') = \sum_{\pm} n'_{\pm} \left(\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \mp i \right) E'_{s\pm} \quad (2.82)$$

สมการ (2.74) (2.75) (2.81) และ (2.82) เป็นข้อสรุปของความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นหักเหที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของรอยต่อระหว่างตัวกลางแม่เหล็กและตัวกลางที่ไม่ใช่แม่เหล็ก โดยจะแยกพิจารณาเป็นสองกรณี คือ

2.1.7.1 ในกรณีที่คลื่นตกกระทบเป็นเอสโพลาไรซ์ (s-polarized) ไม่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวขนาน ($E_p = 0$) แทนค่าในสมการ (2.74) (2.75) (2.81) และ (2.82) จะได้

$$E_s + E_s'' = \sum_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.83)$$

$$-\cos \alpha E_p'' = \sum_{\pm} \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \mp i \right) \cos \alpha'_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.84)$$

$$n \cos \alpha (E_s - E_s'') = \sum_{\pm} n'_{\pm} \cos \alpha'_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.85)$$

$$nE_p'' = \sum_{\pm} n'_{\pm} \left(\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \mp i \right) E'_{s\pm} \quad (2.86)$$

จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้เป็น

$$\frac{E_p''}{E_s} = \tilde{r}_{ps} = \frac{\varepsilon_{xy} n \cos \alpha}{n' (n \cos \alpha' + n' \cos \alpha) (n \cos \alpha + n' \cos \alpha')} \quad (2.87)$$

$$\frac{E_s''}{E_s} = \tilde{r}_{ss} = \frac{n \cos \alpha - n' \cos \alpha'}{n \cos \alpha + n' \cos \alpha'} \quad (2.88)$$

2.1.7.2 ในกรณีที่คลื่นตกกระทบเป็นพีโพลาไรซ์ (p-polarized) ไม่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก ($E_s = 0$) แทนค่าในสมการ (2.74) (2.75) (2.81) และ (2.82) จะได้

$$E_s'' = \sum_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.89)$$

$$\cos \alpha (E_p - E_p'') = \sum_{\pm} \left(-\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \mp i \right) \cos \alpha'_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.90)$$

$$-n \cos \alpha E_s'' = \sum_{\pm} n'_{\pm} \cos \alpha'_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.91)$$

$$n(E_p + E_p'') = \sum_{\pm} n'_{\pm} \left(\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \alpha'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \cos \alpha'_{\pm}} \mp i \right) E'_{s\pm} \quad (2.92)$$

จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้เป็น

$$\frac{E_s''}{E_p} = \tilde{r}_{sp} = \frac{\varepsilon_{xy} n \cos \alpha}{n' (n \cos \alpha' + n' \cos \alpha) (n \cos \alpha + n' \cos \alpha')} \quad (2.93)$$

$$\frac{E_p''}{E_p} = \tilde{r}_{pp} = \frac{n' \cos \alpha - n \cos \alpha'}{n' \cos \alpha + n \cos \alpha'} \quad (2.94)$$

จากสมการ (2.12) แทนค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากสมการ (2.87) (2.88) (2.93) และ (2.94) จะสามารถหาสมการของมุมการหมุนของเคอร์ได้เป็น

$$\tan \theta_K^p = \frac{\tilde{r}_{sp}}{\tilde{r}_{pp}} = \frac{n \varepsilon_{xy} \cos \alpha}{n' \cos (\alpha + \alpha') (n^2 - n'^2)} \quad (2.95)$$

$$\tan \theta_K^s = \frac{\tilde{r}_{ps}}{\tilde{r}_{ss}} = \frac{n \varepsilon_{xy} \cos \alpha}{n' \cos (\alpha - \alpha') (n^2 - n'^2)} \quad (2.96)$$

พิจารณาเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามยาวซึ่งจะมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในพิกัด (p, s, d) เป็น

$$E'_{s\pm} \approx \left(\frac{\varepsilon_{xy} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} - \beta'_{\pm} \right)}{2\varepsilon_{xx} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta'_{\pm} \right)} \pm i \right) E'_{p\pm} = \left(\frac{\varepsilon_{xy} \cos^2 \beta'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \sin \beta'_{\pm}} \pm i \right) E'_{p\pm} \quad (2.97)$$

$$E'_{d\pm} \approx -\frac{\varepsilon_{xy} \sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta'_{\pm} \right)}{\varepsilon_{xx}} E'_{p\pm} = -\frac{\varepsilon_{xy} \cos \beta'_{\pm}}{\varepsilon_{xx}} E'_{p\pm} \quad (2.98)$$

โดยมุม $\beta_{\pm} = 90^\circ - \alpha_{\pm}$

จากเงื่อนไขขอบเขตสมการ (2.18)-(2.21) จะได้

$$\cos \beta (E_p - E_p'') = \sum_{\pm} \left(\frac{\varepsilon_{xy} (1 + \sin^2 \beta'_{\pm})}{2\varepsilon_{xx} \sin \beta'_{\pm}} \mp i \right) \cos \beta'_{\pm} E'_{s\pm} \quad (2.99)$$

$$n(E_p + E_p'') = \sum_{\pm} n'_{\pm} \left(\frac{\varepsilon_{xy} \cos^2 \beta'_{\pm}}{2\varepsilon_{xx} \sin \beta'_{\pm}} \mp i \right) E'_{s\pm} \quad (2.100)$$

จะสามารถหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ คือ

$$\frac{E_s''}{E_s} = \tilde{r}_{ss} = \frac{n \cos \beta - n' \cos \beta'}{n \cos \beta + n' \cos \beta'} \quad (2.101)$$

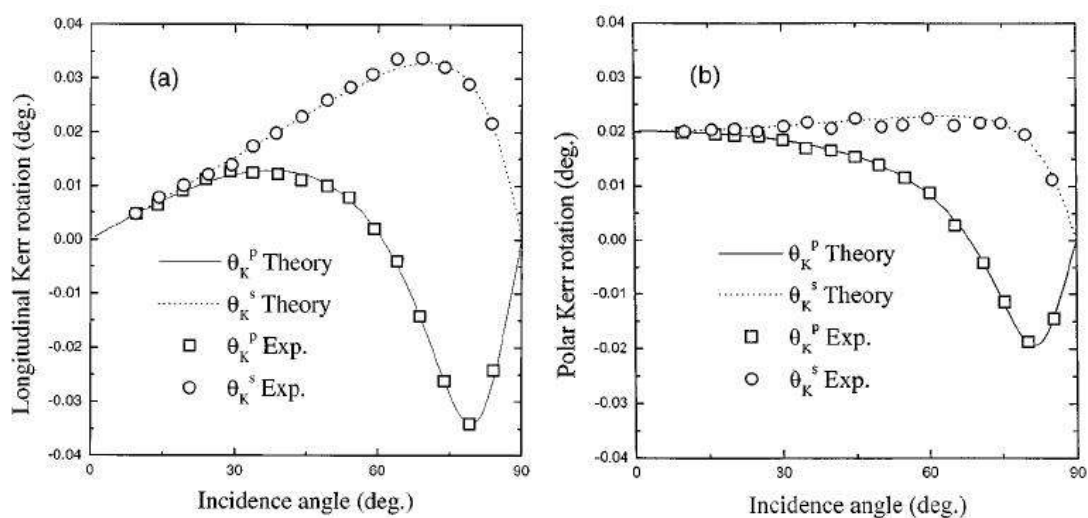
$$\frac{E_p''}{E_p} = \tilde{r}_{pp} = \frac{n' \cos \beta - n \cos \beta'}{n' \cos \beta + n \cos \beta'} \quad (2.102)$$

$$\frac{E_p''}{E_s} = \tilde{r}_{ps} = -\frac{E_s''}{E_p} = -\tilde{r}_{sp} = \frac{\varepsilon_{xy} n \cos \beta}{n' (n \cos \beta' + n' \cos \beta) (n \cos \beta + n' \cos \beta')} \tan \beta' \quad (2.103)$$

โดยจะได้มุมการหมุนของเคอร์เป็น

$$\tan \theta_K^p = \frac{\tilde{r}_{sp}}{\tilde{r}_{pp}} = \frac{n \varepsilon_{xy} \cos \beta \tan \beta'}{n' \cos(\beta + \beta') (n'^2 - n^2)} \quad (2.104)$$

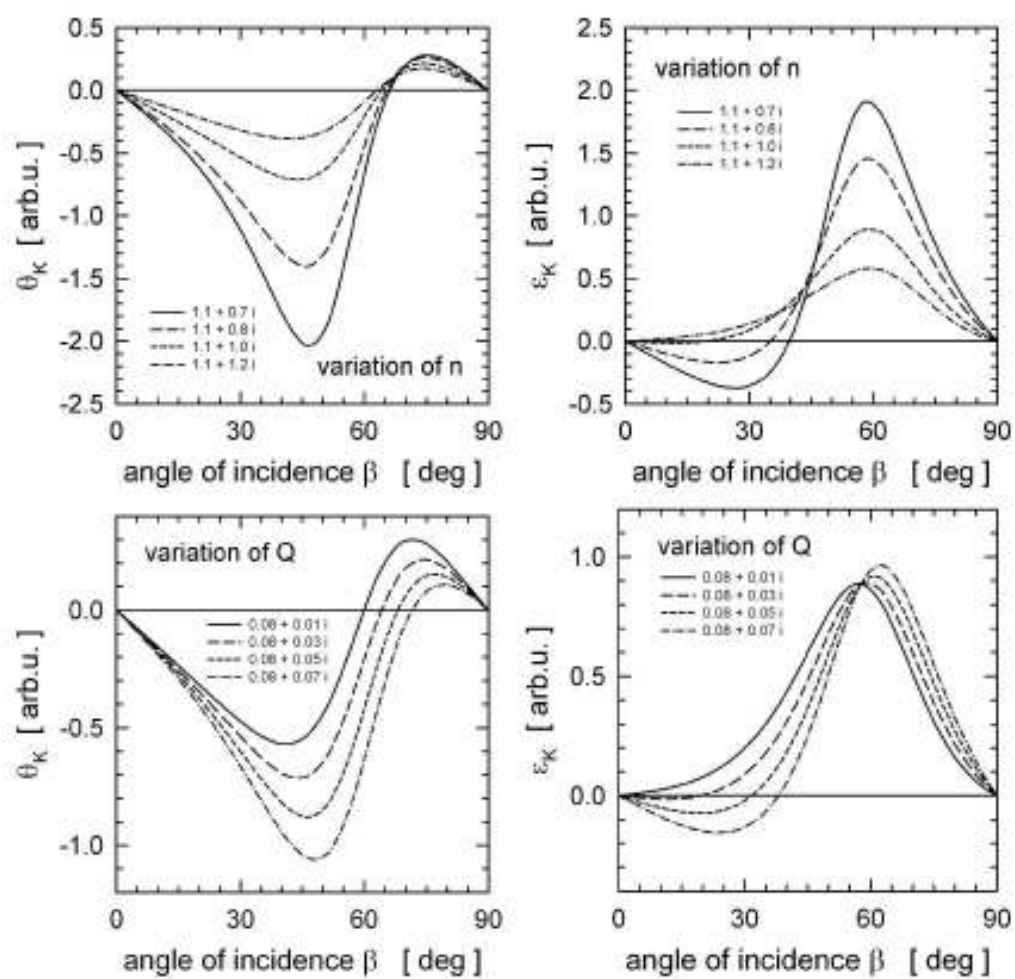
$$\tan \theta_K^s = \frac{\tilde{r}_{ps}}{\tilde{r}_{ss}} = -\frac{n \varepsilon_{xy} \cos \beta \tan \beta'}{n' \cos(\beta - \beta') (n^2 - n'^2)} \quad (2.105)$$



ภาพประกอบ 6 กราฟแสดงค่าการหมุนของเคอร์จากผลการทดลองและจากทฤษฎีสำหรับเฮสและพีโพลาไรซ์ บน (a) Cu/Co แบบหลายชั้น (multilayer) ในรูปแบบตามยาว และ (b) Co/Pd แบบหลายชั้นในรูปแบบเชิงขั้ว

ที่มา: Chun Yeol You; & Sung Chul Shin. (1998, July 1). Generalize Analytic Formulae for Magneto-Optical Kerr Effects. *Journal of Applied Physics*. 84(1): 546.

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรเนลจากสมการ (2.87) (2.88) (2.93) (2.94) (2.101) (2.102) และ (2.103) มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของยูและชิน (You; & Shin. 1998: 542) งานวิจัยของแยงและชินเฟิน (Yang; & Scheinfein. 1993: 6813) และงานวิจัยของฮันท์ (Hunt. 1967: 1655) โดยผลการคำนวณตามสมการ (2.95) (2.96) (2.104) และ (2.105) จะสอดคล้องกับผลการทดลองดังภาพประกอบ 6 และแสดงค่าการหมุนของเคอร์และความรีของเคอร์กับมุมตกกระทบจากทฤษฎีที่แปรค่าตามค่าดัชนีหักเห (n) และค่าคงที่ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (Q) ดังภาพประกอบ 7



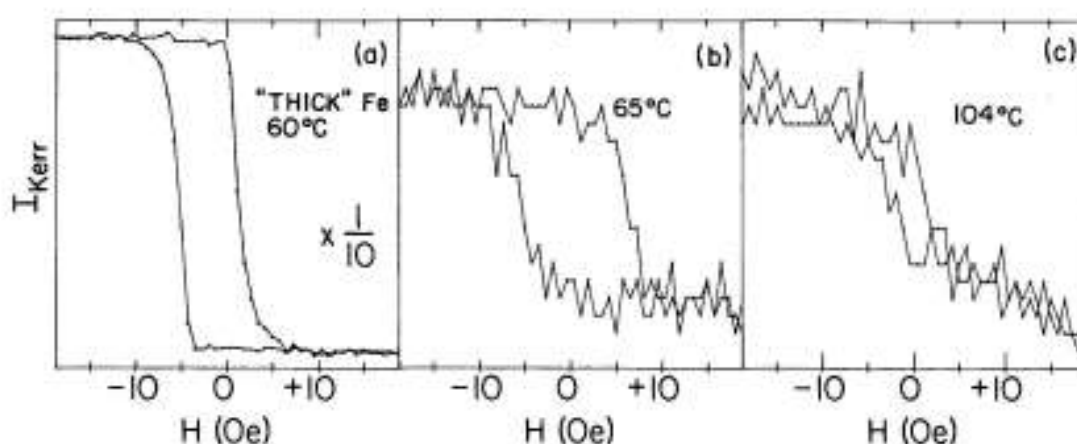
ภาพประกอบ 7 ค่าการหมุนของเคอร์และความรีของเคอร์ที่แปรกับมุมตกกระทบจากทฤษฎีเมื่อเปลี่ยนค่าดัชนีหักเห (n) และค่าคงที่ทัศนศาสตร์แม่เหล็ก (Q)

ที่มา: Irene Reichl. (2005). *Theoretical Investigations of Magneto-Optical Properties of Multilayer Systems*. p. 34.

2.2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยของบาเดอร์ มูก และคิว

บาเดอร์และมูก (Bader; & Moog. 1987: 3730) ได้ออกแบบและสร้างระบบการวัด SMOKE ระบบแรกขึ้นในปี ค.ศ. 1985 เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มเหล็กปลูกบนทองระนาบ (100) (Fe/Au(100)) โดยสามารถสร้างวงฮิสเทอรีซิสซึ่งเป็นสัญญาณระหว่างค่าความเข้มของเคอร์ (Kerr intensity) และสนามแม่เหล็กที่ให้กับสารตัวอย่างได้ดังภาพประกอบ 8 ในเวลาต่อมา คิวและบาเดอร์ (Qiu; & Bader. 2000: 1243) ได้พัฒนาระบบการวัด SMOKE ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยระบบมีองค์ประกอบและการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดสัญญาณของเคอร์แบบเชิงชั่วและแบบตามยาว ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 8 วงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวัด SMOKE ของฟิล์ม Fe บนผลึก Au(100) โดย (a) ฟิล์ม Fe หนา วัดที่อุณหภูมิ 60 °C (b) วัดที่อุณหภูมิ 65 °C และ (c) วัดที่อุณหภูมิ 104 °C

ที่มา: S. D. Bader; & E. R. Moog. (1987, April 15). Magnetic Properties of Novel Epitaxial Films (Invited). *Journal of Applied Physics*. 61(8). 61(8): 3731.

การวัดสัญญาณของเคอร์ของคิวและบาเดอร์จะพิจารณาจากองค์ประกอบสนามไฟฟ้าของแสงที่ตกกระทบบนผิวสาร ถ้าฉายแสงที่เป็นแสงโพลาไรซ์ในแนวขนาน (E_p) ตกกระทบบนผิวสารที่ไม่เป็นแม่เหล็ก แสงที่สะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์ในแนวขนานเพียงอย่างเดียวจะไม่มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากเกิดขึ้น แต่ถ้าฉายแสงตกกระทบบนผิวสารที่เป็นแม่เหล็กเฟร์โรจะทำให้มีองค์ประกอบการโพลาไรซ์ในแนวตั้งฉาก (E_s) เกิดขึ้นด้วย โดยอัตราส่วนของขนาดสนามไฟฟ้าใน

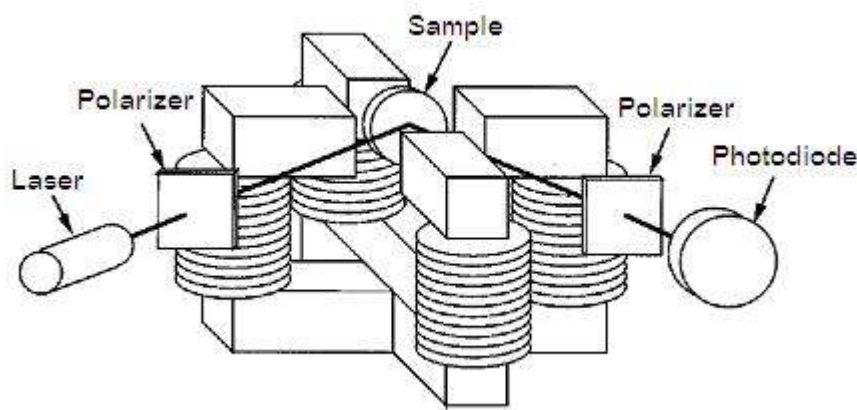
แนวตั้งฉากและแนวขนาน (E_s/E_p) คือการหมุนของเคอร์ ดังนั้นการสร้างเครื่องมือสำหรับวัดปรากฏการณ์เคอร์ คือการวัดองค์ประกอบสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก (E_s) ซึ่งทำได้โดยการติดตั้งโพลาริซอร์เชิงเส้นไว้หน้าตัววัดแสง (photo detector) เพื่อตัดองค์ประกอบในแนวขนานออกไป แต่วิธีนี้มีข้อบกพร่องเนื่องจากอุปกรณ์วัดแสงจะวัดความเข้มแสง ($\sim |E|^2$) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มแม่เหล็กยกกำลังสองและเป็นการยากที่จะหาค่าการหมุนของเคอร์ที่แท้จริง การแก้ปัญหานี้สามารถทำได้โดยการหมุนโพลาริซอร์เป็นมุม δ จากแกน p ทำให้ความเข้มแสงที่วัดได้โดยอุปกรณ์วัดแสงหลังจากผ่านโพลาริซอร์มีค่าเป็น

$$I = |E_p \sin \delta + E_s \cos \delta|^2 \approx |E_p \delta + E_s|^2 \quad (2.106)$$

และโดยการกำหนดให้ $E_s/E_p = \phi' + i\phi''$ โดยที่ ϕ' เป็นการหมุนของเคอร์และ ϕ'' เป็นความรีของเคอร์ ดังนั้นจะได้สมการ (2.106) เป็น

$$I = |E_p|^2 |\delta + \phi' + i\phi''|^2 \approx |E_p|^2 (\delta^2 + 2\delta\phi') = I_0 \left(1 + \frac{2\phi'}{\delta}\right) \quad (2.107)$$

โดยที่ $I_0 = |E_p|^2 \delta^2$ คือ ความเข้มแสงที่การหมุนของเคอร์เป็นศูนย์



ภาพประกอบ 9 องค์ประกอบและการจัดชุดระบบการวัด SMOKE ของคิวและบาเดอร์

ที่มา: Z. Q. Qiu; & S. D. Bader. (2000, March). Surface Magneto-Optic Kerr Effect. *Review of Scientific Instruments*. 71(3): 1247.

ถ้าทำให้ทั้ง ϕ' และ ϕ'' เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเป็นแม่เหล็ก ความเข้มแสงที่วัดได้จะเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก ($\mathbf{H}$) และจะทำให้ได้เป็นวงฮิสเทอรีซิสของสารตัวอย่าง และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับสารตัวอย่างจนถึงจุดอิ่มตัวค่าการหมุนของเคอร์จะมีค่าสูงสุด โดยการหมุนของเคอร์เมื่อแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation Kerr rotation, ϕ'_m) จะหาได้จาก

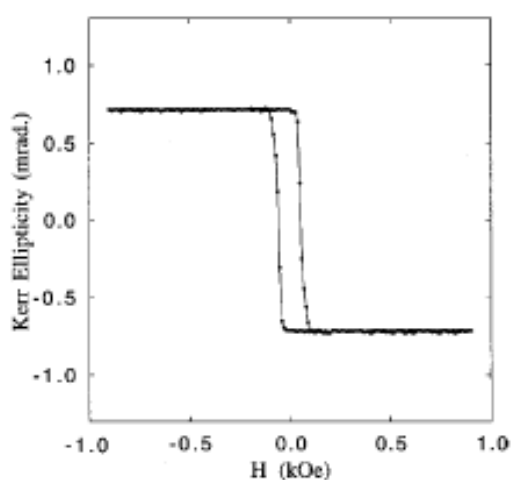
$$\phi'_m = \frac{\delta}{4} \cdot \frac{\Delta I}{I_0} \quad (2.108)$$

ในชุดอุปกรณ์ของระบบ SMOKE ในภาพประกอบ 9 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นแสงเลเซอร์ที่มีกำลังต่ำ แต่ในการทดลองบางอย่าง เช่นการศึกษาระดับโมโนเลเยอร์ (monolayer, ML) ต้องการแสงเลเซอร์ที่มีเสถียรภาพของความเข้มสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงจะลดสัญญาณของเคอร์ลง และจะทำให้การวัดวงฮิสเทอรีซิสมีการบิดเบี้ยวไป การใช้โพลาไรเซอร์แบบปริซึมผลึก สามารถใช้ได้ทั้งเป็นตัวกำหนดการโพลาไรซ์และเป็นตัววิเคราะห์ก่อนเข้าอุปกรณ์วัดแสง โดยโพลาไรเซอร์แบบแผ่นก็สามารถใช้ได้แต่จะลดอัตราการหักล้างของแสงมากกว่าแบบปริซึม ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการศึกษาระดับโมโนเลเยอร์ สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับสารตัวอย่าง ประกอบด้วยขดลวดโซเลนอยด์สองคู่แยกจากกัน สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวและแนวตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน เพื่อวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ตามยาวและเชิงขั้ว โดยแม่เหล็กมีความสูง 13 cm ยาว 15 cm และช่องระหว่างขั้วกว้าง 4 cm พันขดลวดจำนวนประมาณ 300 รอบ โดยใช้ลวดเกจ 12 หรือ 13 (AWG 12, AWG 13) ซึ่งสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ประมาณ 1.5 kOe ที่กระแสขนาด 20 A สำหรับการวัดในระบบสุญญากาศ กระแสที่ใช้ให้แสงเดินทางผ่านจะทำให้เกิดการหักเหสองแนวซึ่งจะทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนสามารถแก้ไขได้โดยการใส่แผ่นเลื่อนคลื่นหนึ่งในสี่ (quarter-wave plate) ก่อนเข้าตัววิเคราะห์เพื่อกำจัดผลของการหักเหสองแนวออกไป โดยจะทำให้เกิดความต่างเฟสระหว่างองค์ประกอบในแนวขนานและแนวตั้งฉากเป็น $\pi/2$ ทำให้ตัววิเคราะห์สร้างสัญญาณในพจน์ของ $i(\phi' + i\phi'') = -\phi'' + i\phi'$ ซึ่งจะทำให้สามารถวัดความเข้มของเคอร์ได้เป็น

$$I = |E_p|^2 (\delta^2 + 2\delta\phi'') = I_0 \left(1 + \frac{2\phi''}{\delta} \right) \quad (2.109)$$

นั่นคือจะสามารถวัดค่าความรีของเคอร์แทนค่าการหมุนของเคอร์ได้ ถ้าต้องการที่จะวัดการหมุนของเคอร์จะต้องใช้แผ่นเลื่อนครึ่งคลื่น (half-wave plate) แทนแผ่นเลื่อนคลื่นหนึ่งในสี่

เนื่องจากความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิวของสารตัวอย่างมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการหมุนและความรีของเคอร์ตามสมการ (2.107) และ (2.109) และการหมุนของเคอร์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเป็นแม่เหล็กตามสมการ (2.2) เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงหรือการหมุนของเคอร์หรือความรีของเคอร์กับสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีลักษณะเป็นวงฮิสเทอรีซิส ดังเช่นในภาพประกอบ 10 ซึ่งเป็นวงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวัดสัญญาณของความรีของเคอร์เทียบกับสนามแม่เหล็กภายนอกของฟิล์มเหล็กหนา 6 ไมโนเลเยอร์ ปลูกบนเงินระนาบ (100) (Fe/Ag(100))



ภาพประกอบ 10 วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ที่ได้จากการวัดฟิล์ม 6 ML Fe/Ag(100)

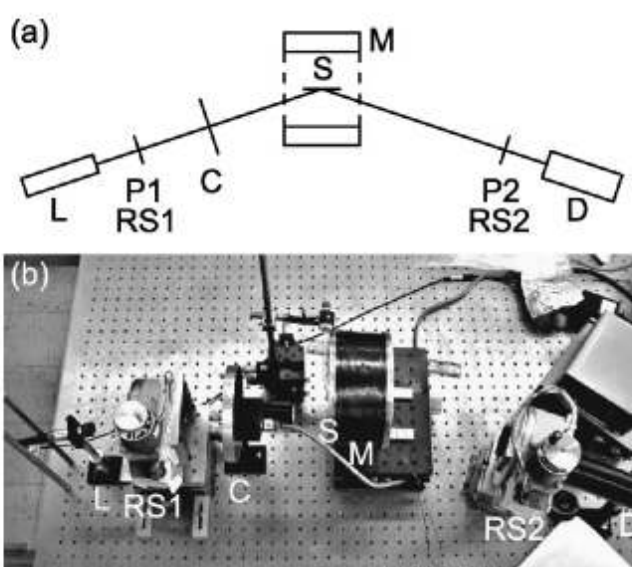
ที่มา: Z. Q. Qiu; & S. D. Bader. (2000, March). Surface Magneto-Optic Kerr Effect. *Review of Scientific Instruments*. 71(3): 1247.

2.2.2 งานวิจัยของแฮมตัน อัลเบอร์ตโตและอบรูน่า

แฮมตัน อัลเบอร์ตโตและอบรูน่า (Hampton; Albertos; & Abruna. 2002: 3018-3021) ได้พัฒนาระบบ SMOKE เพื่อใช้ในงานด้านไฟฟ้าเคมีในปี ค.ศ. 2002 โดยระบบเป็นดังภาพประกอบ 11 แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดขนาด 5 mW ความยาวคลื่น 635 nm ซึ่งมีเสถียรภาพของความเข้มแสงและระนาบของการโพลาไรซ์สูง โดยแสงจะเดินทางจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านโพลาไรเซอร์ (P1) สะท้อนที่ตัวอย่างแล้วผ่านโพลาไรเซอร์ (P2) และวัดความเข้มแสงด้วยโฟโตมิเตอร์ (D) โพลาไรเซอร์ที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 49 mm ติดตั้งบนฐาน RS1 และ RS2 ที่หมุนได้ซึ่งสามารถปรับตำแหน่ง

มุมการหมุนได้อย่างละเอียด โพลาริเซอร์ที่ใช้นี้จะมีอัตราส่วนการหักล้างของแสง (extinction ratio) ประมาณ 10^{-4}

สนามแม่เหล็กภายนอกจะถูกสร้างโดยแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีโครงสร้างดังภาพประกอบ 12 โดยใช้ลวดทองแดงเคลือบฉนวนขนาดเกจ 18 (AWG 18) พันรอบแกนอะลูมิเนียมยาว 95 mm กว้าง 117 mm โดยมีความต้านทานของขดลวดประมาณ $20\ \Omega$ ให้แหล่งจ่ายกำลังขนาดกระแส 4 A ที่ความต่างศักย์ 100 V สามารถวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้หัววัดฮอลล์ (Hall probe) ได้สูงสุด 500 Oe ที่ตำแหน่งกลางแม่เหล็กและ 400 Oe ที่ขอบ โดยสามารถใช้วัดปรากฏการณ์เคอร์แบบตามยาว แบบตามขวาง และแบบเชิงซ้ายได้ อีกทั้งยังสามารถติดเข้ากับแฟลนจ์ (flanges) ขนาด 4.5 in เพื่อใช้วัด ณ ตำแหน่งเดิม (in situ) ในระบบสุญญากาศ ความเข้มแสงจะถูกมอดูเลตโดยชอปเปอร์เชิงกล (mechanical chopper) ที่ความถี่ประมาณ 500 Hz และผ่านเข้าสู่เครื่องขยายแบบล็อกอิน (lock-in amplifier) ซึ่งแหล่งจ่ายกำลังและเครื่องขยายแบบล็อกอินจะถูกควบคุมและประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านแผ่นวงจรจีพีไอบีโดยใช้โปรแกรมแลปวิว (Labview)



ภาพประกอบ 11 รูปแบบการจัดวางเครื่องมือสำหรับวัดสัญญาณ SMOKE แบบตามยาวของแฮมตัน อัลเบอร์ตโตและอบรูน

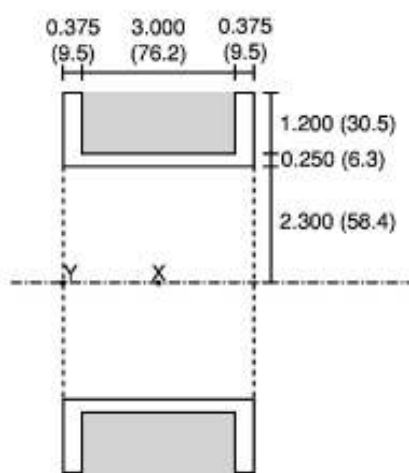
ที่มา: Jenifer R. Hampton; José Luis Martínez Albertos; & Héctor D. Abruna. (2002, August). Development of a Versatile SMOKE System with Electrochemical Applications. *Review of Scientific Instruments*. 73(8): 3019.

ในการใช้งานจะปรับโพลาไรเซอร์ตัวแรกเพื่อให้ได้แสงที่มีระนาบการโพลาไรซ์ที่ต้องการ จากนั้นจะปรับโพลาไรเซอร์ตัวที่สองเพื่อให้ได้ความเข้มแสงที่อุปกรณ์วัดแสงน้อยที่สุด โดยมีอัตราส่วนการหักล้างของแสงเมื่อโพลาไรเซอร์วิเคราะห์ขนานกับโพลาไรเซอร์ตัวแรกอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5×10^{-5} ถึง 5×10^{-4} เพื่อให้การวัดมีความถูกต้อง แสงที่ตกกระทบต้องมีโพลาไรซ์ในแนว s หรือ p เพียงอย่างเดียว จากนั้นปรับมุมของตัววิเคราะห์ให้หมุนไปเป็นมุม δ ซึ่งมีค่าประมาณ 5° ถึง 8° จากตำแหน่งที่แสงหักล้างกัน โดยจะได้มุมการหมุนของเคอร์เป็น

$$\phi' = \frac{\delta}{2} \frac{I - I_0}{I_0} \quad (2.110)$$

โดยที่ I คือ ความเข้มแสงที่วัดได้

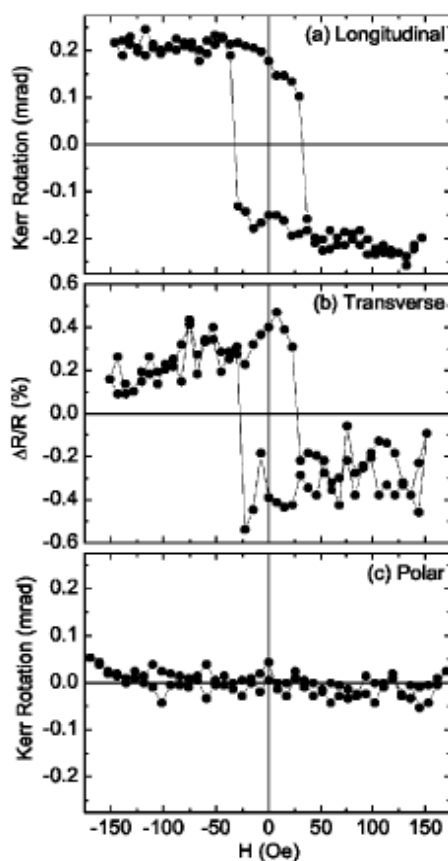
I_0 คือ ความเข้มแสงเฉลี่ยในวงฮิสเทอรีซิส หรือความเข้มแสงที่วัดได้เมื่อไม่มีการหมุนของเคอร์



ภาพประกอบ 12 แม่เหล็กสำหรับระบบ SMOKE โดยมีสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่ง X เป็น 500 Oe และที่ตำแหน่ง Y เป็น 400 Oe ที่กระแส 4 A

ที่มา: Jenifer R. Hampton; José Luis Martínez Albertos; & Héctor D. Abruna. (2002, August). Development of a Versatile SMOKE System with Electrochemical Applications. *Review of Scientific Instruments*. 73(8): 3019.

การทดสอบระบบนี้จะใช้ฟิล์มของโคบอลต์เคลือบแบบไอ (vapor deposited) บนฉล็กควอตซ์ที่มีความหนาของฟิล์มประมาณ 100 Å โดยจะวัดปรากฏการณ์เคอร์ทั้งสามแบบคือแบบตามยาว ตามขวาง และเชิงขั้ว เมื่อให้แสงเลเซอร์ตกกระทบผิวสารตัวอย่างด้วยมุมใกล้เคียงตั้งฉากกับผิว โดยจะได้ผลการวัดดังภาพประกอบ 13 ซึ่งจะสามารถเห็นวงฮิสเทอรีซิสได้ยกเว้นแบบเชิงขั้วแสดงว่าความเป็นแม่เหล็กในสารตัวอย่างนี้ไม่มีทิศในแนวตั้งฉากกับผิว ความไวของเครื่องมือนี้แสดงได้จากการสามารถวัดวงฮิสเทอรีซิสในปรากฏการณ์แบบตามยาวซึ่งมีสัญญาณน้อยมากได้

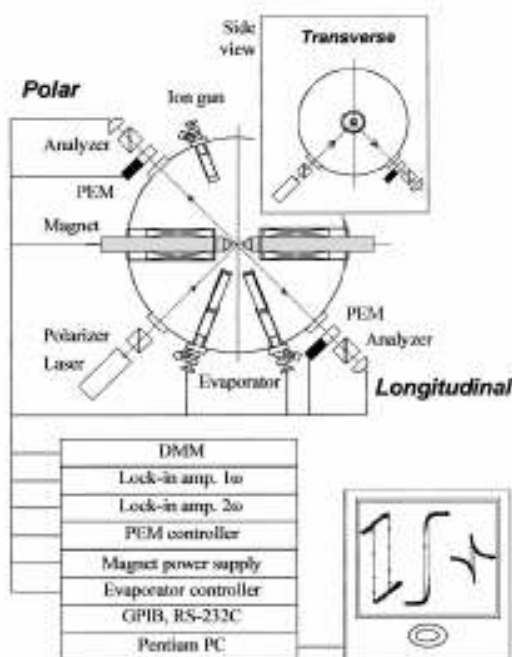


ภาพประกอบ 13 วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ทั้งสามแบบ ของฟิล์มโคบอลต์บนควอตซ์

ที่มา: Jenifer R. Hampton; José Luis Martínez Albertos; & Héctor D. Abruna. (2002, August). Development of a Versatile SMOKE System with Electrochemical Applications. *Review of Scientific Instruments*. 73(8): 3020.

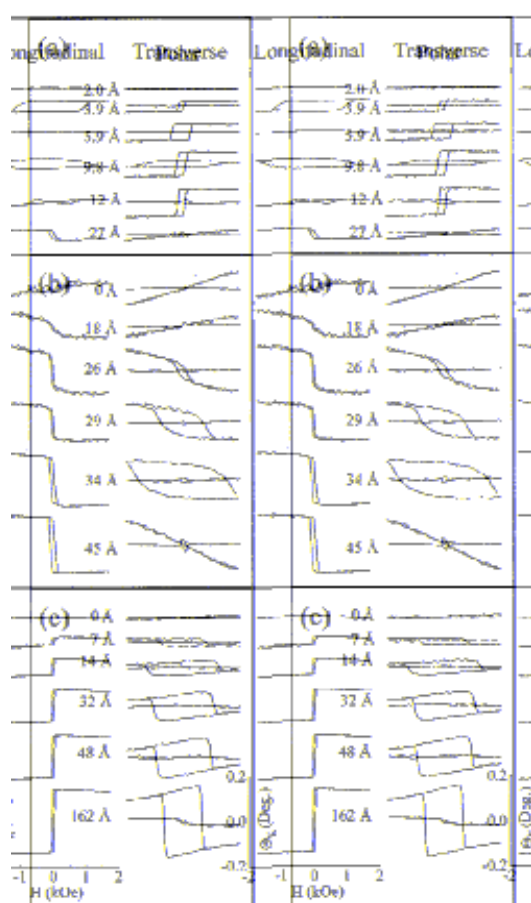
2.2.3 งานวิจัยของลีและคณะ

ลีและคณะ (Lee; et al. 2000: 3801-3805) ได้สร้างระบบการวัด SMOKE ซึ่งสามารถวัดวงฮิสเทอรีซิสได้ทั้งสามรูปแบบ ณ ตำแหน่งที่ทำการปลูกฟิล์มภายในส่วนทดลองระบบสุญญากาศระดับสูงยิ่ง โดยระบบเป็นดังภาพประกอบ 14 ประกอบด้วยห้องทดลอง (chamber) ทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 mm ติดตั้งระบบปั๊มเพื่อสร้างระบบสุญญากาศระดับสูงยิ่งประกอบด้วยไอออนปั๊ม (ion pump) ขนาด 240 l/s ของ POSCON ไทเทเนียมซับลิเมชันปั๊ม (titanium sublimation pump) ของ Physical Electronics จำนวน 2 ชุด เทอร์โบโมเลกุลาร์ปั๊ม (turbomolecular pump) ขนาด 400 l/s ของ Alcatel ATP400 และปั๊มเชิงกล (mechanical pump) ขนาด 500 l/min ของ KODIVAC เมื่อใช้ระบบปั๊มทั้งหมดจะสร้างความดันภายในส่วนทดลองอยู่ที่ 5×10^{-11} torr



ภาพประกอบ 14 แผนภาพแสดงระบบการวัด SMOKE ทั้งสามรูปแบบของลีและคณะ

ที่มา: J. W. Lee; et al. (2000, October). Three-Configurational Surface Magneto-Optical Kerr Effect Measurement System for an Ultrahigh Vacuum in situ Study of Ultrathin Magnetic Films. *Review of Scientific Instruments*. 71(10): 3802.



ภาพประกอบ 15 วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ทั้งสามรูปแบบที่แปรค่าตามความหนาของฟิล์ม Co เมื่อปลูกบน Pd(111) glass และ 200 Å Pd/glass

ที่มา: J. W. Lee; et al. (2000, October). Three-Configurational Surface Magneto-Optical Kerr Effect Measurement System for an Ultrahigh Vacuum in situ Study of Ultrathin Magnetic Films. *Review of Scientific Instruments*. 71(10): 3803.

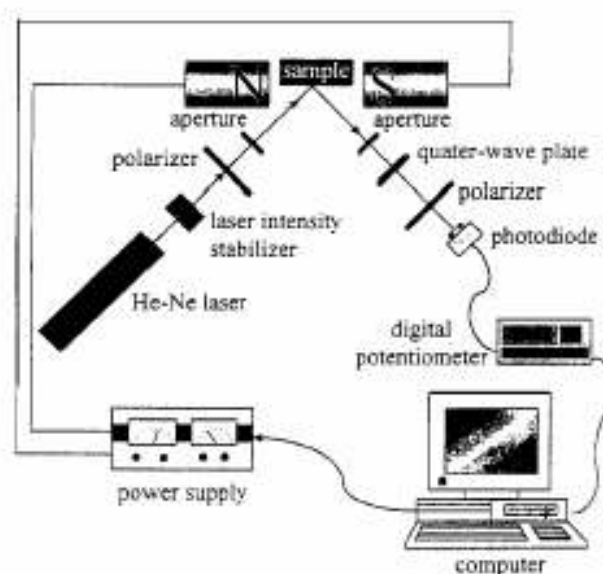
อุปกรณ์สำหรับระบบการวัด SMOKE จะประกอบด้วยแม่เหล็กซึ่งพันด้วยลวดทองแดงอบน้ำยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm มีความต้านทานรวม 3.5Ω ใช้กับแหล่งจ่ายกำลังชนิด bipolar ของ EMI BOSS โดยตัวแม่เหล็กจะติดตั้งกับแฟลนก์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 in และอยู่ภายในระบบสุญญากาศทั้งหมด ขั้วแม่เหล็กจะทำจากเหล็กอ่อน เช่น เพอร์เมนเดอร์ (permender) ซึ่งจะให้สนามแม่เหล็กตกค้าง (remanence field) น้อยกว่า 20 Oe และแม่เหล็กจะให้สนามแม่เหล็กสูงสุด 2.0 kOe โดยมีความกว้างของช่องระหว่างขั้วแม่เหล็กเป็น 29 mm แหล่งกำเนิดแสงใช้เป็น

เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ของ Uniphase และอุปกรณ์วัดแสงใช้ซิลิกอนโฟโตไดโอด ของ Hinds DET90 โฟลาไรเซอร์ใช้ชนิดกลาน-เทเลอร์ (Glan-Taylor) ของบริษัท Newport และใช้โฟโตอิลาสติคมอดูเลเตอร์ (photoelastic modulator) ของ Hinds PEM90D ที่ความถี่ 50 kHz สำหรับเพิ่มความละเอียดในการวัดสัญญาณ อุปกรณ์ในการอ่านสัญญาณจะใช้ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ของ HP34401A และเครื่องขยายแบบล็อกอิน ของ EG&G 7265 จำนวน 2 ชุด การต่อประสานระบบกับคอมพิวเตอร์จะผ่านทางซีพียูและช่องทางอนุกรม (RS-232) โดยใช้โปรแกรมแลปวิว

การวัดทดสอบจะใช้ตัวอย่างเป็นฟิล์มของโคบอลต์ปลูกบนพาลลาเดียมระนาบ (111) (Co/Pd(111)) ฟิล์มของโคบอลต์ปลูกบนแก้ว (Co/glass) และฟิล์มของโคบอลต์ปลูกบนพาลลาเดียมปลูกบนแก้ว (Co/Pd/glass) โดยจะได้ผลดังภาพประกอบ 15 โดยสัญญาณ SMOKE ทั้งสามรูปแบบของฟิล์ม Co บนผลึกเดี่ยว Pd(111) พบว่าที่โมโนเลเยอร์ของ Co น้อยกว่า 3.9 Å จะไม่มีวงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ SMOKE ทั้งสามรูปแบบซึ่งแสดงว่าไม่เป็นแม่เหล็กเฟอร์โร ค่าลบสำหรับแม่เหล็กแบบเชิงขั้ว (polar coercivity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนสูงสุดที่ 6 Å แล้วลดลงเช่นเดียวกับสัญญาณของเคอร์ตามยาว แสดงให้เห็นว่าแกนง่าย (easy-axis) จะอยู่บนระนาบของผิวเพิ่มขึ้นเมื่อปลูกฟิล์มหนาขึ้น

2.2.4 งานวิจัยของเชิร์นและคณะ

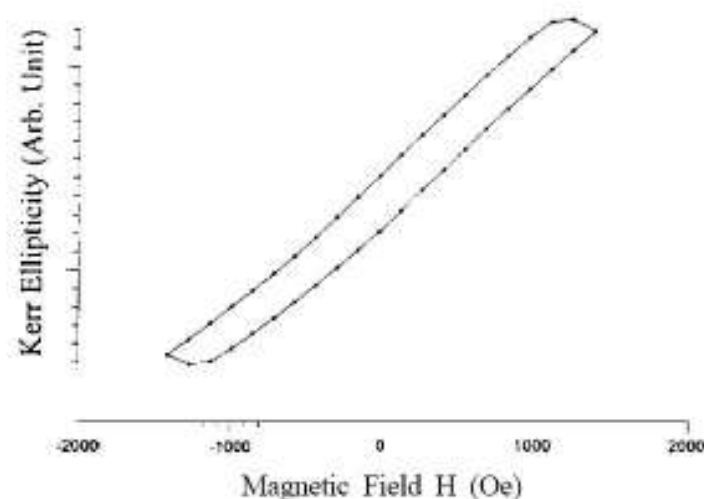
เชิร์นและคณะ (Shern; et al. 1998: 106-113) ได้ใช้ระบบการวัด SMOKE ศึกษาฟิล์ม Ni บน Pt(111) โดยมีองค์ประกอบดังภาพประกอบ 16 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ความยาวคลื่น 6328.8 Å มีกำลังออก 5 mW โฟลาไรเซอร์สำหรับแสงตกกระทบเป็นชนิดปริซึมแบบกลาน-ทอมสัน (Glan-Thompson) มีอัตราการหักล้างแสง 1×10^{-6} โดยในการทดลองจะเลือกปรับระนาบการโพลาไรซ์ให้อยู่บนระนาบตกกระทบ (p-polarized) โดยจะมีช่องเปิดอยู่หลังจากโฟลาไรเซอร์เพื่อป้องกันรัศมีของแสง หลังจากสะท้อนจากผิวของสารตัวอย่างแสงจะเดินทางผ่านแผ่นเลื่อนคลื่นหนึ่งในสี่ซึ่งทำให้เกิดการเลื่อนเฟสของแสงเท่ากับ $\pi/2$ ซึ่งจะสลับค่าการหมุนของเคอร์ไปเป็นความรีของเคอร์ โฟลาไรเซอร์วิเคราะห์เป็นชนิดปริซึมแบบวอลลาสตัน (Wollaston) ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบของแสงเป็น เอส-โพลาไรซ์ และ พี-โพลาไรซ์ ทำให้สามารถอ่านค่าสัญญาณของเคอร์ได้แม่นยำยิ่งขึ้นเมื่อวัดเฉพาะองค์ประกอบ เอส-โพลาไรซ์ ของลำแสงสะท้อนหลังจากเกิดการหมุนของเคอร์ เนื่องจากอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่อความเข้มแสงเดิมขององค์ประกอบ เอส-โพลาไรซ์ ($\Delta I/I$) จะมีค่ามากกว่าขององค์ประกอบ พี-โพลาไรซ์ สัญญาณของเคอร์จะถูกตรวจวัดโดยโฟโตไดโอดและถูกบันทึกเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก (H) ที่ให้กับสารตัวอย่าง เพื่อสร้างวงฮิสเทอรีซิสด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยระบบนี้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 1410 Oe



ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงการติดตั้งระบบการวัด MOKE ของเซิร์นและคณะ

ที่มา: C. S. Shern; et al. (1998, April). Magnetic Properties of Ni/Pt(111) Thin Films Studied by MOKE. *Chinese Journal of Physics*. 36(2-I): 107.

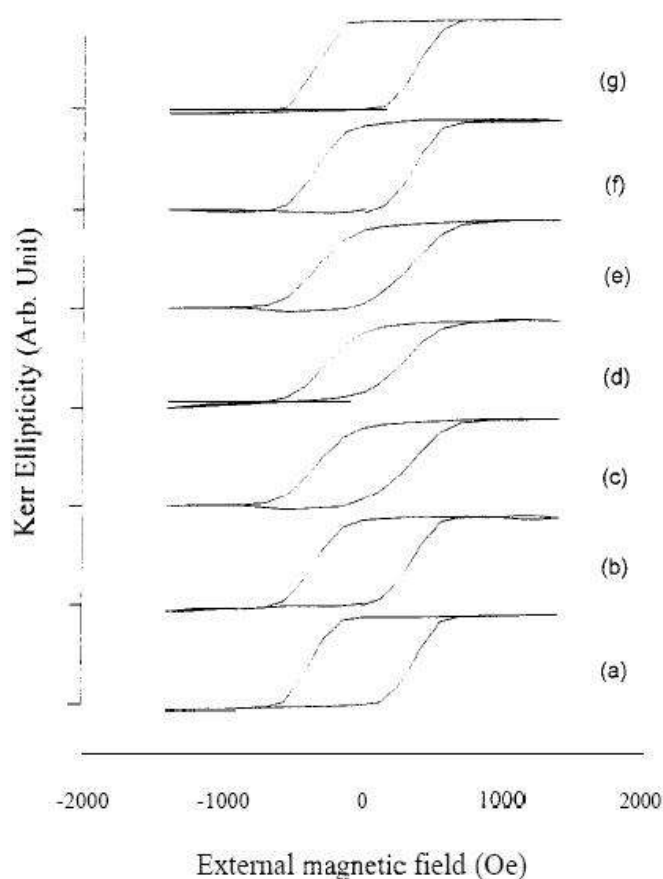
การพัฒนาของระบบ MOKE นี้อย่างที่หนึ่ง คือ การใช้อุปกรณ์รักษาเสถียรภาพความเข้มแสงเลเซอร์ (laser intensity stabilizer) ของ THORLABS ซึ่งเป็นระบบป้อนกลับเพื่อรักษาระดับความเข้มแสงของลำเลเซอร์และปรับปรุงอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal-noise ratio) สำหรับสัญญาณ MOKE ที่มีสัญญาณอ่อน การพัฒนาอย่างที่สอง คือ การตรวจวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่อความเข้มแสงเดิม ($\Delta I/I$) แทนการวัดเฉพาะการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง (ΔI) ซึ่งกระบวนการนอัมัลไลซ์นี้จะลดการกวัดแกว่ง (fluctuation) ของสัญญาณของเคอร์ และใช้โฟโตไดโอดของ ONSET (ET 4000) ซึ่งมีพื้นที่ตรวจวัดขนาดใหญ่ถึง 20 mm² ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์สำหรับรวมแสงทำให้ลดปัญหาเสถียรภาพของทางเดินแสงลง



ภาพประกอบ 17 วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม Ni/Pt(111) วัดโดยเทคนิค P-MOKE

ที่มา: C. S. Shern; et al. (1998, April). Magnetic Properties of Ni/Pt(111) Thin Films Studied by MOKE. *Chinese Journal of Physics*. 36(2-I): 109.

สำหรับการวัดสัญญาณ MOKE ทั้งสามรูปแบบ เนื่องจากปรากฏการณ์ของเคอร์รีด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบตามขวางจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยมากสำหรับแสงที่เป็น พี-โพลาไรซ์ ดังนั้นจึงทำการวัดเฉพาะแบบตามยาวและแบบเชิงขั้วเท่านั้น การพิจารณาแกนง่ายและแกนยาก (hard axis) บนระนาบทำได้โดยการวัด MOKE แบบตามยาวเมื่อเปลี่ยนแปลงค่ามุมแอซิมัท (azimuth) ในภาพประกอบ 17 จะแสดงวงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มที่เกิดจากการวัด MOKE แบบเชิงขั้ว โดยเป็นฟังก์ชันของความเข้มของความเร็วของเคอร์รีซึ่งเป็นสัดส่วนกับความเป็นแม่เหล็กของฟิล์มที่เกิดปลูกบนแพลทินัมระนาบ (111) (Ni/Pt(111)) และสนามแม่เหล็ก รูปร่างของวงจะมีลักษณะยาวและแคบ และความเป็นแม่เหล็กยังคงไม่อิ่มตัวเมื่อให้สนามแม่เหล็กถึงค่าสูงสุด 1410 Oe โดยค่าสภาพแม่เหล็กตกค้างและสนามลบค้างแม่เหล็กมีค่าน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแกนยากของความเป็นแม่เหล็กสำหรับระบบนี้จะอยู่ตั้งฉากกับผิวของสารตัวอย่างและแกนง่ายจะอยู่บนระนาบของผิว



ภาพประกอบ 18 วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์ม Ni/Pt(111) วัดโดยเทคนิค L-MOKE ที่มุมเอซิมัทเป็น
(a) 0° (b) 30° (c) 60° (d) 90° (e) 120° (f) 150° (g) 180°

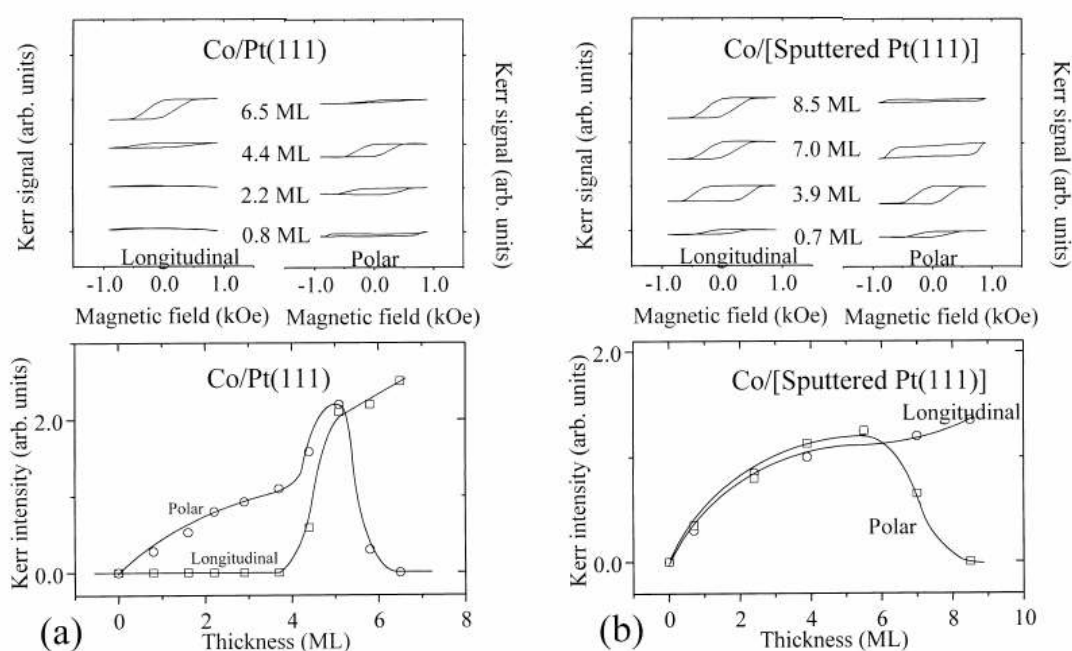
ที่มา: C. S. Shern; et al. (1998, April). Magnetic Properties of Ni/Pt(111) Thin Films Studied by MOKE. *Chinese Journal of Physics*. 36(2-I): 110.

การตรวจสอบแอนไอโซทรอปีบนระนาบทำโดยใช้การวัด MOKE แบบตามยาวเพื่อหาแกนง่ายบนระนาบของผิวสารตัวอย่าง เนื่องจากความรีของเคอร์เป็นสัดส่วนกับความเป็นแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบในแนวเวกเตอร์การแผ่ของแสง ดังนั้นเมื่อให้มุมตกกระทบมีค่ามากขึ้นจะทำให้ความรีของเคอร์มีค่าเพิ่มขึ้นสำหรับ MOKE แบบตามยาว โดยในการทดลองนี้ใช้มุมตกกระทบ 45° และใช้สนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าตั้งแต่ -1410 ถึง 1410 Oe โดยทำการหมุนสารตัวอย่างรอบแกนตั้งฉากกับผิวสารตัวอย่างเพื่อเปลี่ยนค่ามุมเอซิมัท (ϕ) โดยชุดของวงฮิสเทอรีซิสที่ค่ามุมเอซิมัทต่างๆ เป็นดังภาพประกอบ 18 รูปร่างของวงฮิสเทอรีซิสที่มุม $\phi = 0^\circ$ จะคล้ายรูปสี่เหลี่ยมแสดงถึงการมีเพียงสอง

สถานะเท่านั้น ความเป็นแม่เหล็กจะอิ่มตัวที่ $H_s = 675$ Oe และยังคงอิ่มตัวเมื่อสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าลดลงจาก 1410 Oe ถึง -150 Oe โดยมีค่าสนามลบด้านแม่เหล็กเท่ากับ 375 Oe เมื่อเปรียบเทียบกับวงอื่นๆ ค่า H_s ที่ $\varphi = 0^\circ$ จะมีค่าน้อยที่สุด แต่มีค่าสนามลบด้านแม่เหล็กและความเป็นแม่เหล็กคงเหลือสูงที่สุด ซึ่งแสดงถึงการเป็นแกนง่ายของความเป็นแม่เหล็ก เมื่อมุม φ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0° ถึง 90° รูปร่างของวงฮิสเทอรีซิสจะแคบลงและค่า H_s จะเพิ่มขึ้น โดยจะเปลี่ยนจากรูปสี่เหลี่ยมไปเป็นเส้นโค้ง ในขณะที่ H_s จะมีค่าสูงสุดและค่าสนามลบด้านแม่เหล็กและความเป็นแม่เหล็กคงเหลือมีค่าต่ำที่สุดที่มุม $\varphi = 90^\circ$ ซึ่งแสดงถึงการเป็นแกนยากของความเป็นแม่เหล็กบนระนาบของฟิล์ม โดยพบว่าวงฮิสเทอรีซิสที่มุม $180^\circ < \varphi < 360^\circ$ จะเหมือนกับที่มุม $0^\circ < \varphi < 180^\circ$ แสดงว่าฟิล์มนี้มีแอนไอโซทรอปีแม่เหล็กแบบแกนเดียว (uniaxial) บนระนาบ โดยแกนง่ายจะอยู่ในทิศที่ $\varphi = 0^\circ$

ในปี ค.ศ.1999 เซิร์นและคณะ (Shern; et al. 1999: 497-502) ใช้ระบบการวัด MOKE ในการศึกษาฟิล์มของโคบอลต์ปลูกบนแพลทินัมระนาบ (111) (Co/Pt(111)) ที่มีผิวหน้าเรียบและฟิล์มของโคบอลต์ปลูกบนแพลทินัมระนาบ (111) ที่มีผิวหน้าขรุขระโดยการสับเตอร์ด้วยไอออนของอาร์กอน (Ar) โดยมีผลการทดลองดังภาพประกอบ 19 พบว่าสัญญาณของเคอร์เทียบกับสนามแม่เหล็กของฟิล์มของโคบอลต์ปลูกบนแพลทินัมระนาบ (111) ผิวเรียบที่อุณหภูมิห้อง ที่ความหนาของฟิล์ม 0.8 และ 2.2 ML จะมีเพียงสัญญาณของเคอร์แบบเชิงขั้วเท่านั้น แสดงว่าแกนง่ายของความเป็นแม่เหล็กอยู่บนระนาบของผิว นั่นคือฟิล์มโคบอลต์จะมีแอนไอโซทรอปีแม่เหล็กแบบตั้งฉากที่ฟิล์มหนา 4.4 ML จะมีสัญญาณของเคอร์ทั้งแบบเชิงขั้วและแบบตามยาวซึ่งยังคงแสดงแอนไอโซทรอปีแม่เหล็กแบบตั้งฉาก เมื่อฟิล์มหนาถึง 6.5 ML จะพบเพียงสัญญาณของเคอร์แบบตามยาวแสดงแอนไอโซทรอปีที่อยู่บนระนาบเท่านั้น นั่นคือแอนไอโซทรอปีจากรูปร่าง (shape anisotropy) มีค่าเพิ่มขึ้นจากอันตรกิริยาไดโพล

เมื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงของเคอร์อิ่มตัวเทียบกับความหนาพบว่าที่ความหนาน้อยกว่า 3.7 ML จะมีเพียงสัญญาณของเคอร์เชิงขั้วซึ่งแสดงแอนไอโซทรอปีแม่เหล็กแบบตั้งฉากเท่านั้น ที่ความหนาระหว่าง 4.5 ถึง 5.8 ML พบการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของเคอร์ทั้งแบบเชิงขั้วและแบบตามยาว จากการวัดโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ (low energy electron diffraction, LEED) และสเปกโทรสโกปีของเออเจอีเล็กตรอน (auger electron spectroscopy, AES) พบว่ารูปแบบของการปลูกฟิล์มเป็นแบบเกาะสามมิติ (three-dimensional island) ซึ่งทำให้ฟิล์มไม่สม่ำเสมอและแอนไอโซทรอปีที่ผิวไม่มีผลต่อระบบ เมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มมากกว่า 5.8 ML ความเข้มของเคอร์แบบเชิงขั้วจะหายไป มีเพียงความเข้มของเคอร์แบบตามยาวแสดงถึงแอนไอโซทรอปีจากรูปร่างจะมีผลทำให้แอนไอโซทรอปีแม่เหล็กเปลี่ยนจากตั้งฉากกับระนาบมาอยู่บนระนาบของผิว



ภาพประกอบ 19 สัญญาณของเคอร์เทียบกับสนามแม่เหล็กและความหนาของฟิล์ม Co บน

(a) Pt(111) และ (b) Sputtered Pt(111)

ที่มา: C. S. Shern; et al. (1999, March 23). Response and Enhancement of Surface Magneto-Optic Kerr Effect for Co–Pt(111) Ultrathin Films and Surface Alloy. *Surface Science*. 429: L498–L499.

ถ้าพิจารณากรณีฟิล์มของโคบอลต์ปลูกบนแพลทินัมระนาบ (111) ที่ผ่านการสัต์เตอร์ด้วยไอออนของอาร์กอนที่พลังงาน 1.6 keV เป็นเวลา 5 min ทำให้ผิวหน้ามีความขรุขระจากการวัดโดยเทคนิคสัต์พบว่าฟิล์มจะก่อตัวเป็นแบบเกาะสามมิติ และที่ความหนาของฟิล์มระหว่าง 0.7 ถึง 7.0 ML สามารถวัดสัญญาณของเคอร์ได้ทั้งแบบเชิงขั้วและแบบตามยาว เมื่อเปรียบเทียบกับแบบแรกพบว่าแอนไอโซทรอปีแม่เหล็กแบบแกนเดียวที่ตั้งฉากจะหายไป ซึ่งแสดงว่าแอนไอโซทรอปีแบบผลึกแม่เหล็ก (magnetocrystalline) มีผลน้อยลงจากการที่ฟิล์มโคบอลต์ไม่สามารถสร้างเป็นโครงผลึกบนผิวที่ขรุขระได้ และจากการสัต์เตอร์ทำให้ผิวมีเหลี่ยมมุมซึ่งทำให้มีระนาบของความเป็นแม่เหล็กของฟิล์มโคบอลต์ได้หลายทิศทางทำให้พบสัญญาณของเคอร์ทั้งสองรูปแบบ เมื่อพิจารณาความเข้มของเคอร์เทียบกับความหนาพบว่าที่ความหนามากกว่า 8 ML มีเพียงความเข้มของเคอร์แบบตามยาวเกิดขึ้นเท่านั้น แสดงว่าแกนง่ายของความเป็นแม่เหล็กจะมีอยู่บนระนาบเท่านั้น

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อกำหนดความต้องการของระบบ (system specification requirement)

ระบบการวัด MOKE ที่พัฒนาขึ้นจะต้องมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดของความต้องการของระบบดังนี้

3.1.1 ระบบที่พัฒนาขึ้นจะต้องสามารถวัดมุมการหมุนของเคอร์ของสารตัวอย่างที่มีสภาพเป็นแม่เหล็ก โดยต้องสามารถวัดสารตัวอย่างได้ทั้งที่เป็นปริมาตร (bulk) และเป็นฟิล์ม (films) ซึ่งการวัดมุมการหมุนของเคอร์นั้นจะต้องวัดไปจนถึงจุดที่ความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว (saturated magnetization) ของสารตัวอย่าง สำหรับสารที่เป็นปริมาตรต้องให้สนามแม่เหล็กภายนอกที่มีค่าสูงจึงจะทำให้ความเป็นแม่เหล็กของสารอิ่มตัว ในขณะที่สารที่เป็นฟิล์มจะใช้สนามแม่เหล็กภายนอกลดลงตามความหนาของฟิล์ม เพื่อทำให้ความเป็นแม่เหล็กของสารอิ่มตัว เนื่องจากสารตัวอย่างที่ต้องการวัดทดสอบเป็นกลุ่มโลหะทรานซิชันสามดี (3d transition metal) คือ นิกเกิล (Ni), โคบอลต์ (Co) และเหล็ก (Fe) ซึ่งมีสนามแม่เหล็กอิ่มตัวเป็น 400 Oe, 700 Oe และ 840 Oe ตามลำดับ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่วัดสารตัวอย่างได้มากกว่า 840 Oe เพื่อสามารถตรวจสอบสถานะความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวของวัสดุได้

3.1.2 ระบบที่พัฒนานี้จะต้องสามารถวัดมุมการหมุนของเคอร์ที่ขึ้นกับทิศทางของความเป็นแม่เหล็กได้ สำหรับการวัด L-MOKE และ P-MOKE สามารถกำหนดทิศของความเป็นแม่เหล็กได้จากการให้สนามแม่เหล็กภายนอก ที่มีองค์ประกอบของสนามในทิศเดียวแก่สารตัวอย่าง เพื่อเหนี่ยวนำให้ความเป็นแม่เหล็กของสารจัดเรียงตัวในทิศเดียวกับทิศของสนามแม่เหล็ก ดังนั้นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะต้องสามารถสร้างสนามแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบของสนามในทิศทางเดียว ณ ตำแหน่งที่วัดสารได้

3.1.3 ระบบที่พัฒนานี้จะต้องสามารถวัดมุมการหมุนของเคอร์ และแยกแยะค่ามุมการหมุนของเคอร์ที่เปลี่ยนไปเมื่อสภาพความเป็นแม่เหล็กของสารเปลี่ยนแปลงไปได้ โดยค่ามุมการหมุนของเคอร์สำหรับ P-MOKE ของปริมาตรนิกเกิล, โคบอลต์ และเหล็ก จะเป็น 0.13° , 0.30° และ 0.41° ตามลำดับ และสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มจะมีค่ามุมการหมุนของเคอร์น้อยกว่านี้ ดังนั้นโพลาไรเซชันวีเคาระห์ที่ใช้ในระบบจะต้องสามารถวัดมุมได้ละเอียดกว่า 0.13° และตัววัดแสงต้องสามารถวัดความแตกต่างของกำลังแสงเมื่อระนาบการโพลาไรซ์หมุนไปเป็นมุมน้อยกว่า 0.13° ได้

3.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบระบบ (system design consideration)

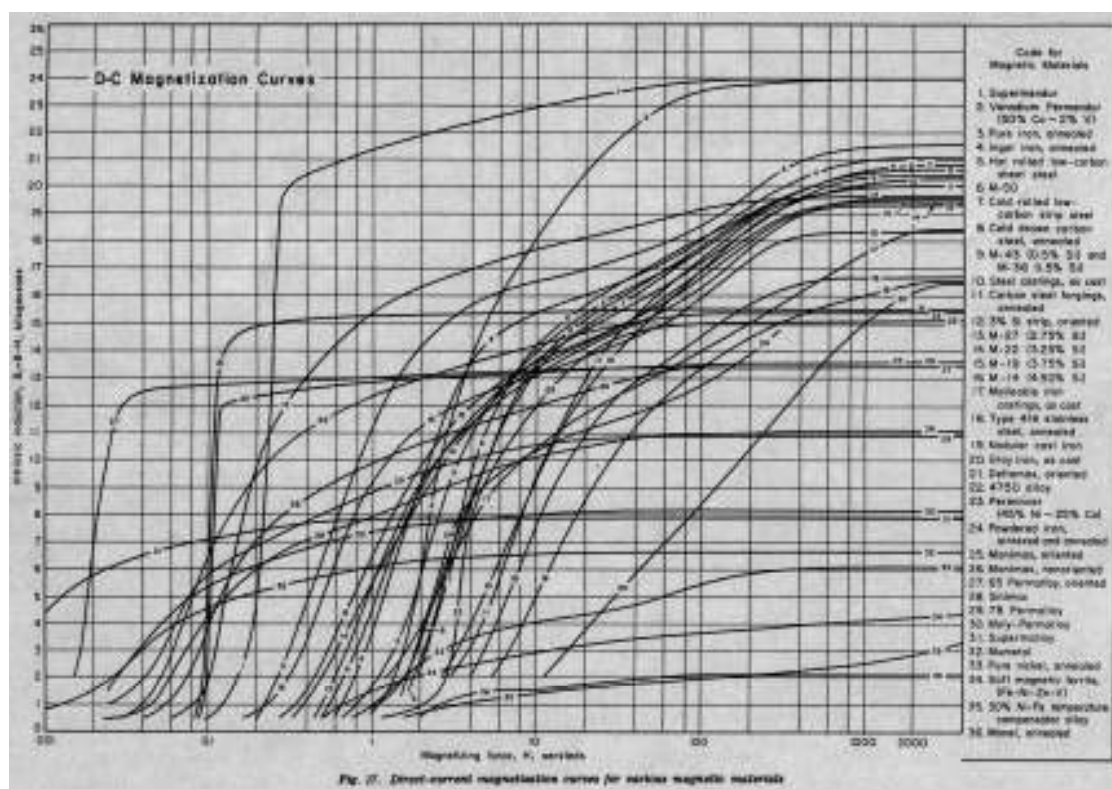
การออกแบบระบบจะพิจารณาเป็น 3 ส่วน คือ

3.2.1 การออกแบบแม่เหล็กไฟฟ้า

การให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับสารตัวอย่างจะต้องมีค่าสนามแม่เหล็กคงที่ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อวัดมุมการหมุนของเคอร์ จากนั้นจะเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็กเพื่อวัดมุมการหมุนใหม่ ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนสามารถสร้างเป็นวงฮิสเทอรีซิสได้ ดังนั้นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำจากขดลวดโซเลนอยด์จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน โดยสามารถให้ค่าสนามคงที่เมื่อจ่ายกระแสคงที่ และเปลี่ยนแปลงค่าสนามได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่ากระแส ทั้งนี้แม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกพิจารณาเป็น 3 ส่วน คือ

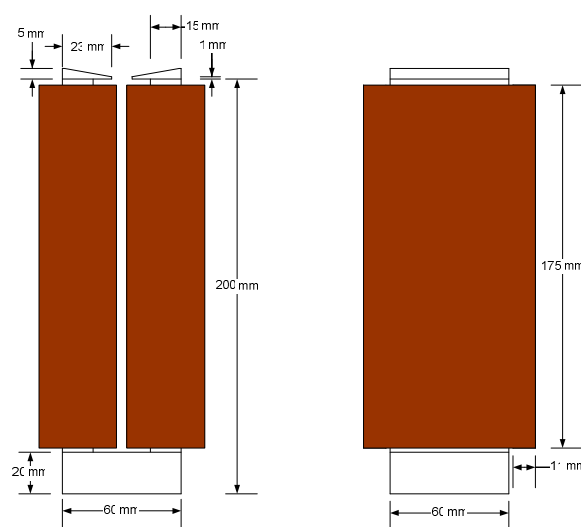
3.2.1.1 แกนแม่เหล็ก (magnet yoke) การทำแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์แกนอากาศจะให้ค่าสนามแม่เหล็กต่ำ จึงต้องสวมขดลวดโซเลนอยด์ลงบนแกนโลหะที่มีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กต่ำและมีค่าความเป็นแม่เหล็กสูง เช่น โลหะซูเปอร์เมนเดอร์ โลหะวานาเดียมเพอร์เมนเดอร์ (vanadium permender) และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (low carbon steel) ซึ่งมีลักษณะเส้นโค้งของความเป็นแม่เหล็กเป็นดังภาพประกอบ 20 โดยในระบบที่พัฒนาขึ้นนี้เลือกใช้วัสดุที่ทำแกนแม่เหล็กเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ซึ่งมีค่า B_r เท่ากับ 9500 G และ H_c เท่ากับ 50 Oe ขึ้นรูปเป็นรูปตัวยู (U) เพื่อให้แกนทั้งสองด้านของตัวยูทำหน้าที่เป็นแกนของขดลวดโซเลนอยด์สองชุดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กชั่วคราวและได้สลับกันไป ดังภาพประกอบ 21 โดยการคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ในปริภูมิ (space) จะใช้ชุดคำสั่งเรเดีย (Radia) ซึ่งพัฒนาโดยศูนย์เครื่องมือวิจัยแสงซินโครตรอนแห่งยุโรป (European Synchrotron Research Facilities, ESRF) เป็นโปรแกรมประยุกต์เพิ่มเติมสำหรับโปรแกรม Mathematica โดยใช้หลักการคำนวณแบบวิธีสมาชิกจำกัด (finite element method)

การกำหนดขนาดของแม่เหล็กต้องมีขนาดที่สามารถติดตั้งในช่องเปิดของส่วนทดลองสุญญากาศ เพื่อใช้ในระบบสุญญากาศในอนาคต ซึ่งขนาดของช่องเปิดที่เหมาะสมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ขนาดของแม่เหล็กในส่วนฐานต้องกว้างไม่เกิน 15 cm ในขณะที่ตำแหน่งที่วัดสารตัวอย่างอยู่ลึกเข้าไปในส่วนทดลอง ซึ่งขั้วแม่เหล็กต้องอยู่ใกล้สารตัวอย่างมากเพื่อให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูง ดังนั้นแม่เหล็กจึงต้องมีความสูงจากฐานเหมาะสมกับระยะการใช้งาน โดยขนาดของแกนแม่เหล็กที่ออกแบบจะมีฐานกว้าง 6 cm ยาว 6 cm และสูง 20 cm มีพื้นที่ภาคตัดขวางของแกนเหล็กที่สนามแม่เหล็กตัดผ่านเท่ากับ 9 cm^2 โดยมีความยาวแนวทแยงมุมประมาณ 8.5 cm ซึ่งเป็นครึ่งหนึ่งของระยะที่ใช้งานได้เนื่องจากต้องเหลือระยะส่วนหนึ่งสำหรับใส่ขดลวดโซเลนอยด์



ภาพประกอบ 20 เส้นโค้งของความเป็นแม่เหล็กแบบกระแสดตรงสำหรับวัสดุแม่เหล็กชนิดต่างๆ

ที่มา: Joseph King. (2007). *Direct Current Magnetization Curves for Various Magnetic Materials*. (Online).

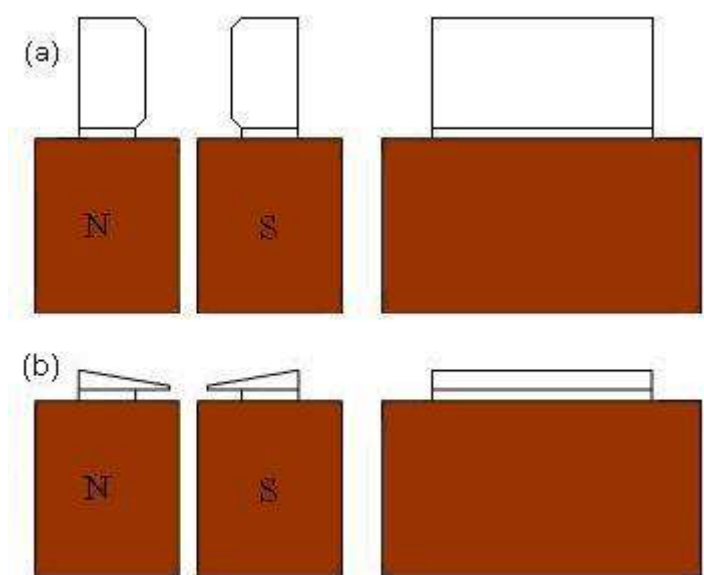


ภาพประกอบ 21 รูปร่างและขนาดของแม่เหล็กที่ออกแบบในมุมมองด้านหน้าและด้านข้าง

3.2.1.2 ขั้วแม่เหล็ก (magnet pole) จะทำขึ้นจากวัสดุชนิดเดียวกันกับแกนแม่เหล็ก โดยจะติดตั้งอยู่บริเวณปลายแกนของตัวยู่ทั้งสองด้านหันหน้าเข้าหากัน ดังนั้นตำแหน่งที่วัดสารตัวอย่างจะอยู่บริเวณตรงกลางระหว่างแกนทั้งสองข้างของตัวยู่ซึ่งจะมีคุณลักษณะของสนามแม่เหล็กสมมาตรทั้งสองด้าน โดยจะออกแบบขั้วแม่เหล็กเป็น 2 รูปแบบ คือ

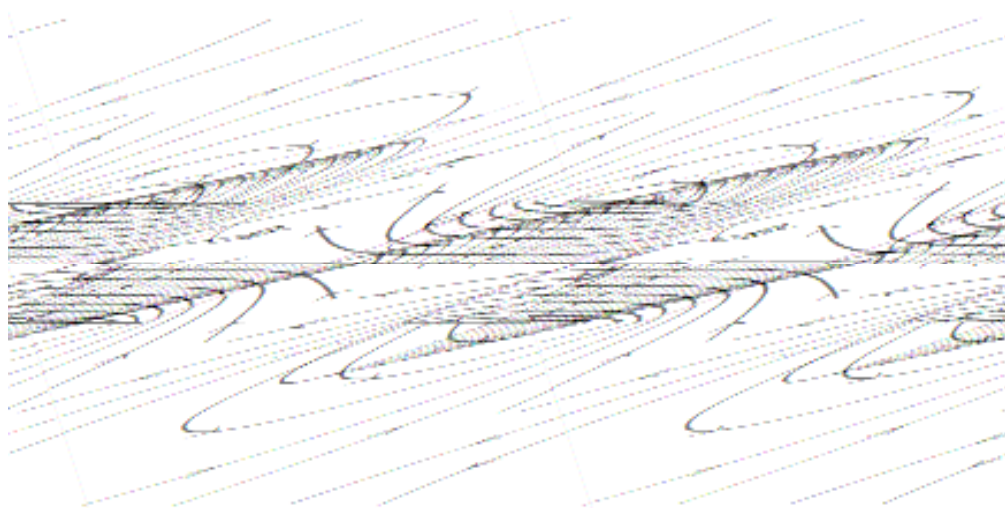
รูปแบบที่ 1 มีรูปทรงพื้นที่หน้าตัดด้านตรงเป็นรูปหกเหลี่ยมและพื้นที่หน้าตัดด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดของขั้วแม่เหล็กกว้าง 20 mm ยาว 60 mm และสูง 30 mm ลบมุมด้านในด้านล่าง 5 mm ดังภาพประกอบ 22 (a) ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันโดยจะวัดสารตัวอย่างที่บริเวณตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กที่ปัก (0,0,215) ขั้วแม่เหล็กแบบนี้มีข้อดีคือสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงและมีความสม่ำเสมอของสนามบนระนาบ xz และ yz แต่มีข้อเสียคือจัดวางมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ได้ยาก

รูปแบบที่ 2 มีรูปทรงพื้นที่หน้าตัดด้านตรงเป็นรูปสามเหลี่ยมและพื้นที่หน้าตัดด้านข้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดของขั้วแม่เหล็กกว้าง 23 mm ยาว 60 mm และสูง 5 mm ดังภาพประกอบ 22 (b) ซึ่งเป็นแบบที่ตำแหน่งที่ใช้วัดสารอยู่เหนือขั้วแม่เหล็กที่ปัก (0,0,215) ทำให้ไม่มีผลต่อการกำหนดมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ ซึ่งเป็นข้อดีทำให้สามารถจัดมุมการวัดซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อสัญญาณของเคอร์ได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือสร้างสนามแม่เหล็กได้ต่ำกว่าและมีความสม่ำเสมอของสนามทั้งสองเพียงบนระนาบ xz เท่านั้น



ภาพประกอบ 22 ขั้วแม่เหล็กด้านหน้าและด้านข้าง (a) รูปแบบที่ 1 และ (b) รูปแบบที่ 2

3.2.1.3 ขดลวดโซเลนอยด์ มีรูปแบบสนามแม่เหล็กดังภาพประกอบ 23 ในการออกแบบ จะกำหนดรูปทรง ขนาด และขนาดกระแส-รอบ (Ampere-turns) ของขดลวดโซเลนอยด์ในชุดคำสั่ง เรเดีย เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้ได้ขนาด 840 G ที่พิกัด (0,0,215) จากนั้นจะคำนวณกลับเพื่อหาเกจ (guage) ความยาว และความต้านทานของเส้นลวดที่ใช้



ภาพประกอบ 23 ขดลวดโซเลนอยด์และสนามแม่เหล็กของขดลวดโซเลนอยด์

ที่มา: Paul Lorrain; Dale R. Corson; & François Lorrain. (1988). *Electromagnetic Fields and Waves*. p. 332.

โดยค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณปลายขดลวดโซเลนอยด์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$B = \frac{\mu N' I \sin \theta_e}{2} \quad (3.1)$$

เมื่อ B คือ สนามแม่เหล็กตรงกลางขดลวดโซเลนอยด์ มีหน่วยเป็น T

μ คือ ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแม่เหล็ก (magnetic permeability) ของวัสดุที่ทำแกนของ

ขดลวดโซเลนอยด์ สำหรับวัสดุเฟอร์ไรต์อ่อน (soft ferrite) มีค่าเท่ากับ $5000 \mu\text{N} \cdot \text{A}^{-2}$

N' คือ จำนวนรอบของขดลวดโซเลนอยด์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว มีหน่วยเป็น $\text{turns} \cdot \text{m}^{-1}$

I คือ กระแสที่ไหลในขดลวดโซเลนอยด์ มีหน่วยเป็น A

θ_e คือ มุมที่วัดบนแกน z จากปลายข้างหนึ่งไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของขดลวดโซเลนอยด์ มีหน่วยเป็นองศา

(Lorrain; Corson; & Lorrain. 1988: 333)

3.2.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดมุมการหมุนของเคอร์

การวัดมุมการหมุนของเคอร์ทำได้ใน 2 รูปแบบ คือ การวัดโดยตรงและการวัดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง การวัดมุมการหมุนของเคอร์โดยตรงจะวัดกำลังแสงเลเซอร์ในขณะที่ยังไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับสารตัวอย่างทำการปรับมุมของโพลาริเซอร์วิเคราะห์เพื่อหาจุดที่กำลังแสงต่ำที่สุดบันทึกเป็นค่ามุมที่แกนโพลาริเซอร์ตั้งฉากกัน จากนั้นให้ค่าสนามแม่เหล็กคงที่กับสารตัวอย่างและทำการปรับมุมของโพลาริเซอร์วิเคราะห์เพื่อหาจุดที่กำลังแสงต่ำที่สุดบันทึกค่ามุมซึ่งความแตกต่างของค่ามุมที่วัดได้จะเป็นมุมการหมุนของเคอร์ที่ค่าสนามแม่เหล็กนั้นๆ

การวัดมุมการหมุนของเคอร์จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของแสงเลเซอร์ที่ตกบนโฟโตไดโอดและมุมการหมุนของเคอร์ตามสมการ (2.107) แต่เนื่องจากตัววัดแสงที่ใช้จะวัดเป็นค่ากำลังแสง ดังนั้นการเปลี่ยนค่ากำลังแสงเป็นค่าการหมุนของเคอร์จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงกับกำลังของแสง $I = P/A$ เมื่อ A คือ พื้นที่ของแสงที่ตกบนโฟโตไดโอด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนของเคอร์กับกำลังของแสงเป็น

$$\phi' = \frac{\delta}{2} \frac{P - P_0}{P_0} \quad (3.2)$$

เมื่อ ϕ' คือ มุมการหมุนของเคอร์ มีหน่วยเป็นองศา

P คือ กำลังของแสง มีหน่วยเป็น W

P_0 คือ กำลังของแสงเฉลี่ยหรือกำลังของแสงที่มุมการหมุนของเคอร์เป็นศูนย์ มีหน่วยเป็น W

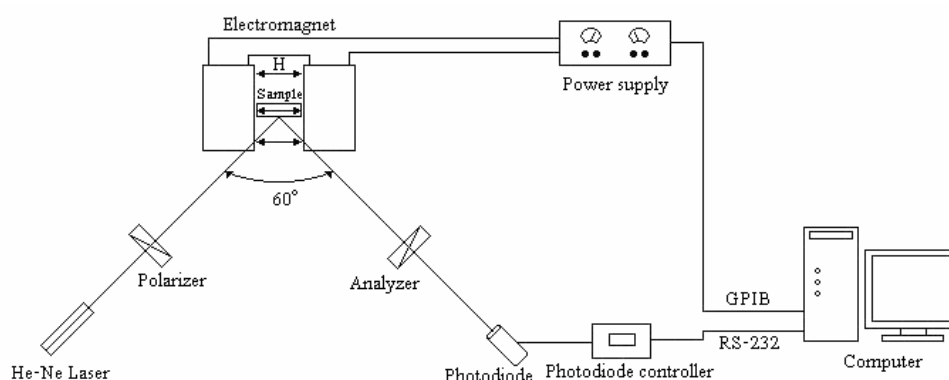
δ คือ มุมการหมุนของตัววิเคราะห์จากตำแหน่งที่แกนการโพลาไรซ์ของโพลาริเซอร์และตัววิเคราะห์ตั้งฉากกัน มีหน่วยเป็นองศา

3.2.3 การออกแบบการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด L-MOKE และ P-MOKE

ความแตกต่างของ L-MOKE และ P-MOKE คือการจัดวางระนาบของสารตัวอย่างในสนามแม่เหล็กภายนอก โดยจะต้องวางอยู่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กซึ่งเป็นบริเวณที่องค์ประกอบของสนามมีความสม่ำเสมอและมีค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด ทำให้เกิดข้อจำกัดในการจัดมุมตกกระทบของลำแสงเลเซอร์ จากภาพประกอบ 6 พบว่าการหมุนของเคอร์จะมีค่าสูงสุดที่มุมประมาณ

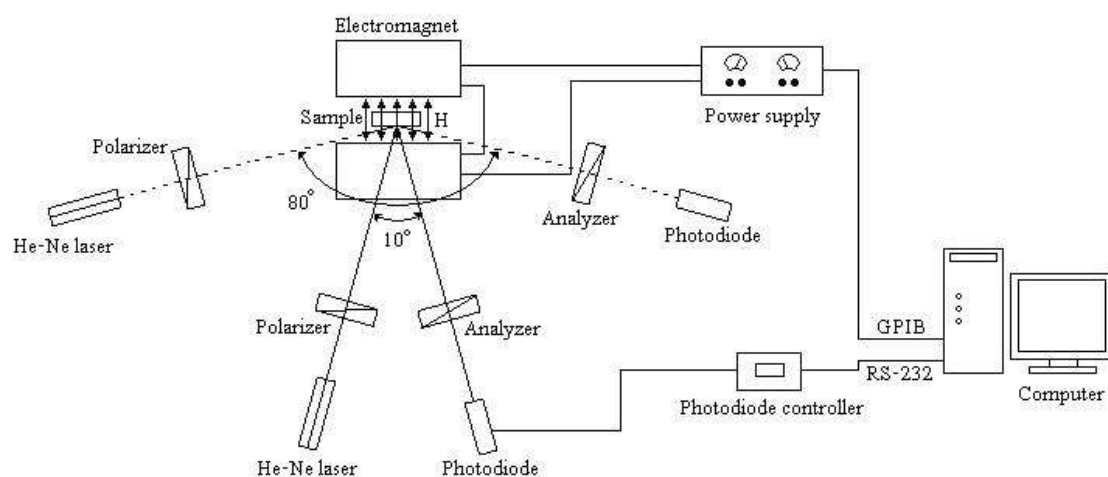
80° สำหรับ L-MOKE ของ พี-โพลาริซ์ และ 70° สำหรับ L-MOKE ของ เอส-โพลาริซ์ สำหรับ P-MOKE จะมีค่าการหมุนของเคอร์จะมีค่าสูงสุดที่มุมประมาณ 0° หรือ 80° ของ พี-โพลาริซ์ และมีค่าตั้งแต่ 0° ถึง 70° ของ เอส-โพลาริซ์

3.2.3.1 ระบบการวัด L-MOKE จะให้สนามแม่เหล็กในแนวขนานกับผิวหน้าของสารตัวอย่างและอยู่บนระนาบการตกกระทบ โดยจัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และตัววัดแสงให้มีมุมตกกระทบบนผิวสารตัวอย่างประมาณ 60° สำหรับแสงที่เป็นเอส-โพลาริซ์ ดังภาพประกอบ 24 ซึ่งการติดตั้งลักษณะนี้สามารถใช้ได้กับขั้วแม่เหล็กทั้งสองแบบ



ภาพประกอบ 24 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด L-MOKE

3.2.3.2 ระบบการวัด P-MOKE จะให้สนามแม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าของสารตัวอย่างโดยจัดตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์และตัววัดแสงให้มีมุมตกกระทบบนผิวสารตัวอย่างประมาณ 80° สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และใช้มุมตกกระทบประมาณ 10° สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 โดยใช้กับแสงเอส-โพลาริซ์ ดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการวัด P-MOKE ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และแบบที่ 2

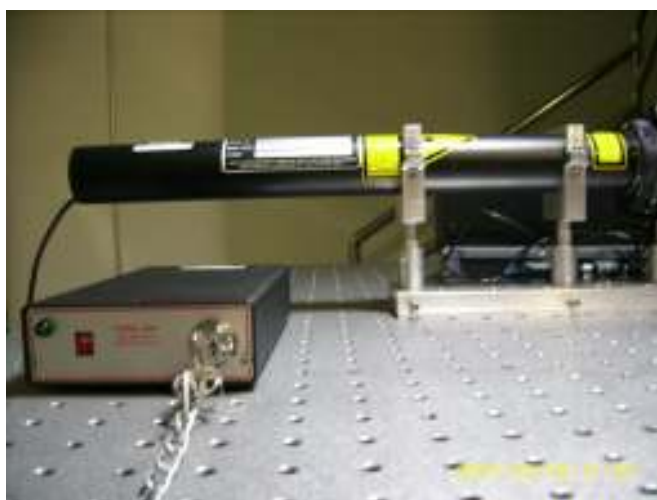
3.3 การดำเนินงานพัฒนาระบบ MOKE (MOKE system development)

ในการพัฒนาระบบนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินงานโดยมีขั้นตอนดังนี้

3.3.1 การเตรียมอุปกรณ์สำหรับระบบการวัด MOKE

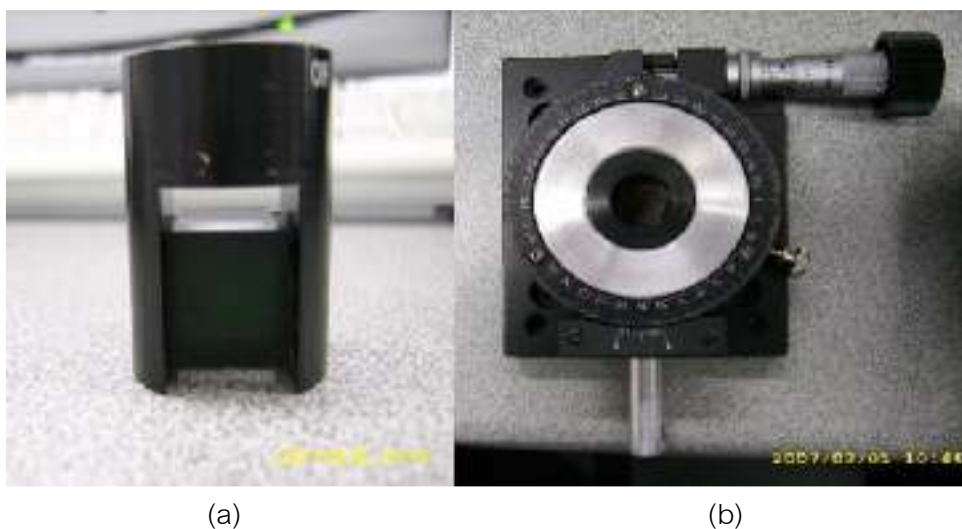
จัดหาอุปกรณ์ที่ไม่สามารถจัดสร้างขึ้นเองได้ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ในส่วนที่สำคัญต่างๆ ดังนี้

3.3.1.1 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ (laser light source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว และมีความเข้มแสงคงที่ โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ He-Ne รุ่น LHRR-0500 30990 ของบริษัท Research Electro Optics, Inc. ซึ่งมีความยาวคลื่น 633 nm ทำงานในโหมด TEM_{00} มากกว่า 99% โดยมีโพลาไรซ์ของแสงแบบสุม เส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสง 0.8 mm มุมการบานของลำแสง 1.01 mrad มีสัญญาณรบกวนที่ความถี่ 30 Hz ถึง 10 MHz น้อยกว่า 1%rms ให้กำลังแสงต่ำสุด 5.0 mW และสูงสุดไม่เกิน 10.0 mW



ภาพประกอบ 26 เครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน และแหล่งจ่ายกำลัง

3.3.1.2 โพลาริเซอร์ควบคุมและโพลาริเซอร์วิเคราะห์ (analyzer) ทำหน้าที่สร้างแสงโพลาไรซ์และวัดมุมการหมุนของเคอร์ ตามลำดับ โดยใช้โพลาริเซอร์แบบกลาน-เลเซอร์ (Glan-laser) และแบบกลาน-เทลเลอร์ (Glan-Taylor) ของบริษัท Newport ซึ่งมีลักษณะรูปทรงแบบปริซึมประกบกัน ทำขึ้นจากวัสดุแคลไซต์ (CaCO_3) โดยมีอัตราส่วนการหักล้าง (extinction ratio) ของแสงในองค์ประกอบแนวขนาน (p-polarized) และแนวตั้งฉาก (s-polarized) น้อยกว่า 10^{-5} สามารถใช้กับแสงในย่านตั้งแต่ 220 nm ถึง 2500 nm ติดตั้งอยู่บนตัวหมุนแบบละเอียด (precision rotator) รุ่น 13111 ของบริษัท Newport ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดมุมที่สามารถวัดมุมละเอียดได้สูงสุด 1.5 arcsec หรือ 0.000417° หรือ $7.278 \mu\text{rad}$



ภาพประกอบ 27 (a) โพลาริเซอร์แบบกลาน-เทลเลอร์ และ (b) ตัวหมุนแบบละเอียด

3.3.1.3 แหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง (DC power supply) ทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับชุดหลอดโซเลนอยด์เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กให้กับสารตัวอย่าง โดยใช้ของบริษัท Kepco รุ่น BOP 20-20M ขนาด 400 W ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้งในรูปแบบการควบคุมความต่างศักย์ (voltage controlled mode) และรูปแบบการควบคุมกระแส (current controlled mode) สร้างความต่างศักย์ได้ในช่วงตั้งแต่ -20 V ถึง +20 V และจ่ายกระแสได้ในช่วงตั้งแต่ -20 A ถึง +20 A และมีเสถียรภาพในการรักษาระดับความต่างศักย์และกระแสสูง จะใช้งานร่วมกับแผ่นวงจรต่อประสาน (interface card) รุ่น BIT 4886 เพื่อควบคุมการทำงานและรับ-ส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ผ่านทางจีพีไอบี (GPIB port)



ภาพประกอบ 28 แหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง BOP 20-20M ที่ติดตั้งแผ่นวงจรต่อประสาน BIT 4886 ไว้ภายใน

3.3.1.4 ตัววัดแสง (photo detector) ทำหน้าที่วัดกำลังของแสงเลเซอร์ที่ผ่านออกจากตัววิเคราะห์ โดยใช้ของบริษัท OPHIR OPTRONICS รุ่น Laserstar ซึ่งมีหัววัดเป็นโฟโตไดโอดแบบซิลิกอนรุ่น PD300 สามารถวัดกำลังแสงได้สูงสุด 3 mW เมื่อไม่ติดตั้งตัวกรองแสง (filter) ที่หัววัด และ 3 W เมื่อติดตั้งตัวกรองแสงที่หัววัด โดยหัววัดจะต่อเข้ากับชุดควบคุมซึ่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณความต่างศักย์ที่เกิดจากโฟโตไดโอดไปเป็นกำลังแสงโดยสามารถควบคุมการทำงานและรับ-ส่งข้อมูลผ่านทางอนุกรม (serial port, RS-232)



ภาพประกอบ 29 ตัววัดแสงชนิดโฟโตไดโอดแบบซีลิกอนและชุดควบคุม

3.3.1.5 แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnet) ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กภายนอกให้กับวัสดุตัวอย่างเพื่อให้วัสดุตัวอย่างมีสภาพเป็นแม่เหล็ก โดยจะสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุดประมาณ 2000 G เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ 5.5 A และมีขนาดของสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอในบริเวณที่จะวัดสารตัวอย่าง

3.3.1.6 เครื่องคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและรับ-ส่งข้อมูลของกระแสจากแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรงผ่านพอร์ตจีพีไอ และรับ-ส่งข้อมูลของกำลังแสงจากชุดควบคุมโฟโตไดโอดผ่านพอร์ตอนุกรม โดยจะสร้างโปรแกรมแลปวิว เพื่อควบคุมอุปกรณ์และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลสร้างเป็นวงฮิสเทอรีซิส

3.3.1.7 สายต่อเชื่อมอุปกรณ์กับคอมพิวเตอร์ โดยใช้สายสัญญาณจีพีไอสำหรับต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์กับแหล่งจ่ายกำลังกระแสตรง และใช้สายสัญญาณอนุกรมต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์กับชุดควบคุมโฟโตไดโอด

3.3.1.8 โต๊ะทดลองทอรรสศาตร์ (optical table) ทำหน้าที่รองรับระบบ MOKE โดยจะจัดวางและติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดที่ตำแหน่งต่างๆ บนโต๊ะทดลอง

3.3.2 การสร้างแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อแม่เหล็กถูกปรับแต่งขนาดและค่าสนามแม่เหล็ก รวมถึงคำนวณหาขนาดของเส้นลวดทองแดงและจำนวนรอบในการพันขดลวดโซเลนอยด์จากชุดคำสั่งเรเดีย จะทำการขึ้นรูปเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำตามแบบ และพันขดลวดโซเลนอยด์ให้ได้ขนาดและจำนวนรอบตามที่ออกแบบ จากนั้นจะนำไปวัดทดสอบค่าสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดฮอลล์

3.3.3 การติดตั้งและต่อประสานระบบการวัด MOKE

การจัดวางอุปกรณ์สำหรับระบบการวัด MOKE ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ โฟลาโรเซออร์ แม่เหล็กไฟฟ้า สารตัวอย่าง ตัววิเคราะห์ และโฟโตไดโอด สำหรับ L-MOKE และ P-MOKE เป็นดังภาพประกอบ 24 และ 25 โดยแสงจะเดินทางจากเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนผ่านโฟลาโรเซออร์เพื่อให้แสงมีระนาบการโพลาไรซ์ในทิศทางเดียวไปตกกระทบสารตัวอย่างที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก แสงจะสะท้อนจากสารตัวอย่างผ่านโฟลาโรเซออร์วิเคราะห์และไปตกบนตัววัดแสง

เมื่อประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดแล้วจึงสร้างระบบต่อประสาน เพื่อควบคุมการทำงานและประมวลผลของแหล่งจ่ายกำลังและชุดควบคุมโฟโตไดโอด โดยการกำหนดค่ากระแสและอัตราการจ่ายกระแสที่ง่ายให้กับชุดลดโซเลนอยด์จากโปรแกรม ส่งคำสั่งไปยังแหล่งจ่ายกำลังและรับค่ากระแสที่วัดได้จริงที่ชั่วขณะของแหล่งจ่ายกำลังผ่านช่องทางจีพีไอบี นำค่าที่ได้มาใส่ในฟังก์ชันของค่าสนามแม่เหล็กต่อค่ากระแสของขั้วแม่เหล็กแต่ละแบบ เพื่อเปลี่ยนค่ากระแสให้เป็นค่าสนามแม่เหล็ก อ่านค่ากำลังแสงจากตัววัดแสงเปลี่ยนเป็นมุมการหมุนแล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กให้กับวัสดุตัวอย่างและค่ามุมการหมุนของเคอร์เป็นวงฮิสเทอรีซิส

3.3.4 การวัดทดสอบระบบ

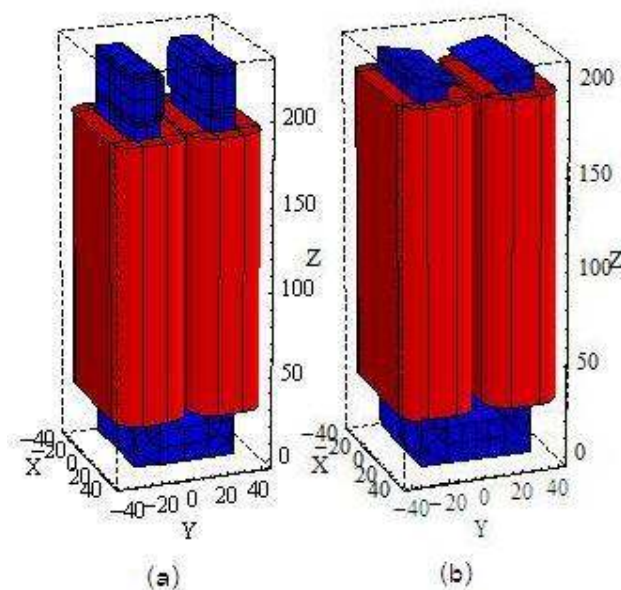
การวัดทดสอบระบบที่ติดตั้งขึ้นจะทำการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับวัดทดสอบ ได้แก่ ผลึกเดี่ยวของนิกเกิลระนาบ (111), เหล็ก, โคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%) และฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å ปลูกลงบนแก้ว สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นปริมาตรจะต้องทำการขัดผิวหน้าให้สามารถสะท้อนแสงได้ดี จากนั้นจะติดตั้งเข้ากับแท่นจับสารตัวอย่าง (sample holder) และจัดตำแหน่งแม่เหล็กให้สารตัวอย่างอยู่ที่ตำแหน่งกลางขั้วแม่เหล็ก โดยจัดให้ระนาบของผิวสารตัวอย่างขนานกับขั้วแม่เหล็กสำหรับการวัด P-MOKE และตั้งฉากกับขั้วแม่เหล็กสำหรับการวัด L-MOKE ฉายแสงเลเซอร์ผ่านโฟลาโรเซออร์ควบคุมเพื่อกำหนดระนาบการโพลาไรซ์ของแสงเป็นเอส-โพลาไรซ์ ไปที่ผิวหน้าของสารตัวอย่างด้วยมุมตกกระทบ 60° สำหรับการวัด L-MOKE และ 80° สำหรับการวัด P-MOKE ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 10° สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 จัดตำแหน่งของโฟลาโรเซออร์วิเคราะห์ให้แสงที่สะท้อนจากผิวสารตัวอย่างทะลุผ่านตรงกลางและตั้งฉากกับผิวของโฟลาโรเซออร์ จัดตำแหน่งของตัววัดแสงให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบริเวณกลางหัววัด ปรับมุมของโฟลาโรเซออร์วิเคราะห์ให้กำลังแสงที่วัดได้จากตัววัดแสงมีค่าต่ำที่สุด จ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายกำลังให้กับชุดลดโซเลนอยด์ ตั้งค่ากระแสสูงสุด กระแสต่ำสุด อัตราการเปลี่ยนกระแส และช่วงเวลาการเปลี่ยนกระแสในโปรแกรมแลบวิว ที่ทุกๆ จุดในการพล็อตจะเปลี่ยนแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กจากฟังก์ชันการแปลง และอ่านค่ากำลังจากตัววัดแสงแปลงค่าเป็นมุมการหมุนของเคอร์เพื่อนำมาสร้างเป็นวงฮิสเทอรีซิส

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณสนามแม่เหล็กระหว่างจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าโดยชุดคำสั่งเรเดียและผลการวัดโดยหัววัดฮอลล์

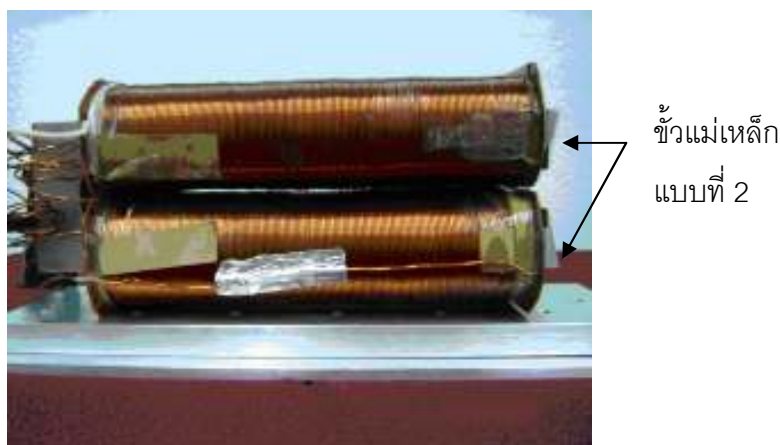
แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนำรูปแบบและขนาดมาจากแบบจำลองโดยชุดคำสั่งเรเดียที่ให้ค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่วัดสารได้ประมาณ 1000 G โดยแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะดังนี้ ขนาดของแกนแม่เหล็กกว้าง 60 mm ยาว 60 mm และสูง 200 mm ขนาดของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 กว้าง 20 mm ยาว 60 mm สูง 30 mm ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 กว้าง 23 mm ยาว 60 mm สูง 5 mm โดยขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และแบบที่ 2 จะมีพื้นที่หน้าตัดด้านหน้าเป็นรูปทรงหกเหลี่ยมและด้านข้างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ในขณะที่ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 จะมีพื้นที่หน้าตัดด้านหน้าเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมมุมฉากและด้านข้างเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็กเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ($C < 0.19\%$) โดยแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบจะมีลักษณะเป็นดังภาพประกอบ 30(a) สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 ตำแหน่งที่ใช้วัดสารตัวอย่างจะอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กซึ่งมีพิกัดเป็น (0,0,215) เมื่อกำหนดให้จุดกึ่งกลางของฐานแม่เหล็กเป็นจุดกำเนิด และภาพประกอบ 30(b) สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ตำแหน่งที่ใช้วัดสารตัวอย่างจะอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กและอยู่เหนือขั้วแม่เหล็ก 1 mm มีพิกัดเป็น (0,0,206)



ภาพประกอบ 30 ภาพจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบโดยใช้ชุดคำสั่งเรเดียสำหรับใช้ในระบบ MOKE โดย (a) ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ (b) ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

เส้นลวดทองที่ใช้ทำขดลวดโซเลนอยด์เป็นลวดทองแดงเคลือบฉนวนโพลีเอทิลีนขนาดเกจเส้นลวดมาตรฐาน 19 (standard wire gauge 19, SWG19) หรือ เกจเส้นลวดอเมริกัน 18 (American wire gauge 18, AWG 18) ซึ่งสามารถทนกระแสสูงสุดได้ประมาณ 7.75 A มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.02362 mm เมื่อพันเป็นขดลวดจำนวน 1394 รอบ จะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของขดลวดโซเลนอยด์เป็น 1822.8356 mm^2 โดยกว้าง 11 mm ยาว 163 mm ขดลวดทั้งสองชุดมีความต้านทานไฟฟ้าเป็น 3.6Ω และ 4.1Ω ขนาดของกระแสที่ไหลในขดลวดเป็น 697 A·turns สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 2091 A·turns สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 2 และจำนวนสมาชิก (element) ที่จะแบ่งแกนของแม่เหล็กและขดลวดโซเลนอยด์ออกเป็นส่วนๆ เท่ากับ 13152 ส่วน สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 8256 ส่วน สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 2 โดยรหัสต้นฉบับ (source code) ของชุดคำสั่งเรเดียสำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

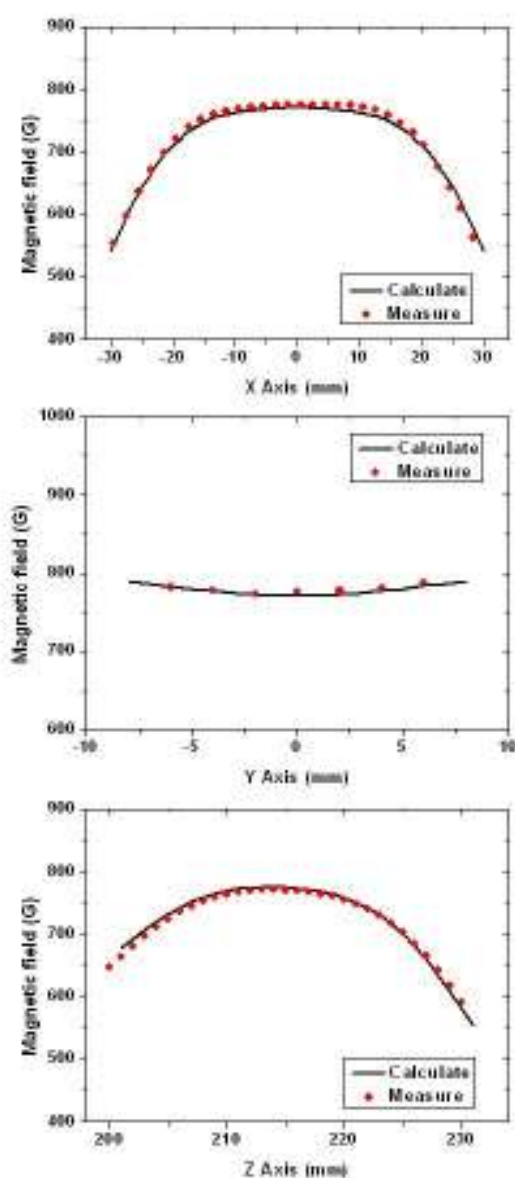
แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองแสดงดังภาพประกอบ 31 ทั้งนี้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 2123.573 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 983.935 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ณ ตำแหน่งพิกัด (0,0,215) โดยใช้กระแสประมาณ 5.5 A ซึ่งเป็นกระแสสูงสุดที่โหลดสามารถดึงกระแสจากแหล่งจ่ายกำลังได้



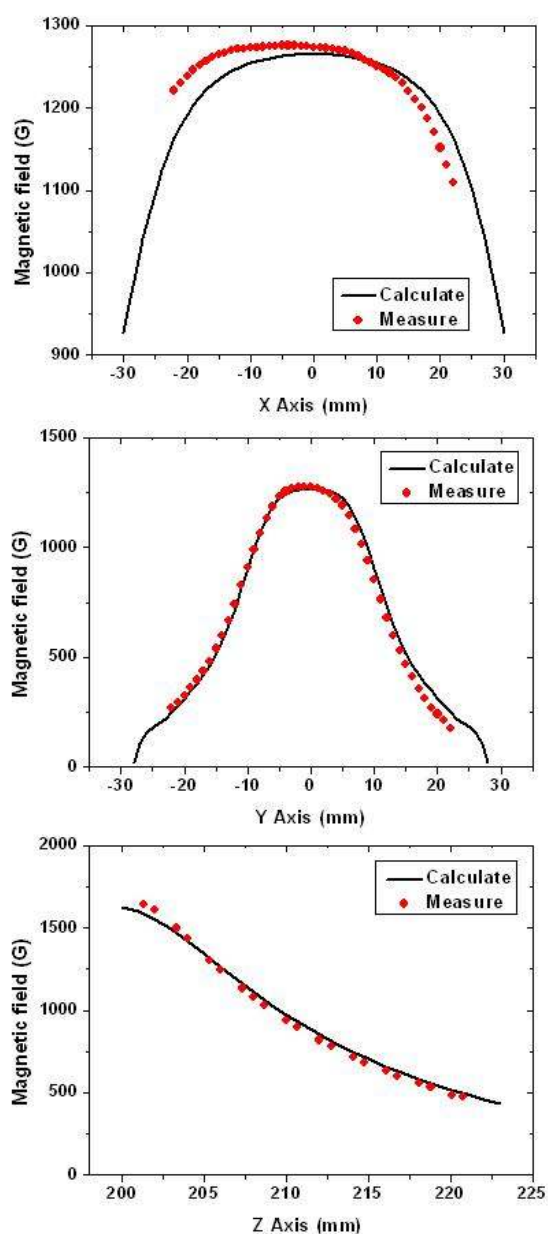
ภาพประกอบ 31 แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นซึ่งมีขั้วแม่เหล็กเป็นแบบที่ 2

จากนั้นจะใช้ชุดคำสั่งเรเดียคำนวณหาองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y ณ ตำแหน่งที่ใช้วัดสารตัวอย่างได้เท่ากับ 770.716 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 เมื่อใช้กระแส 0.5 A และ 1273.04 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 เมื่อใช้กระแส 1.5 A และคำนวณหาองค์ประกอบของ

สนามแม่เหล็กตามแนวแกน y เทียบกับระยะทางตามแนวแกน x, y และ z เปรียบเทียบกับค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากหัววัดฮอลล์ที่ตำแหน่งเดียวกันสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 ได้ดังภาพประกอบ 32 และสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ได้ดังภาพประกอบ 33 ซึ่งพบว่าแนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณจากชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วยหัววัดฮอลล์จะสอดคล้องกัน แต่จะมีความแตกต่างของค่าสนามแม่เหล็กทั้งสามแนวแกนสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 ประมาณ 0.89 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างของค่าสนามแม่เหล็กทั้งสามแนวแกนสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ประมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์



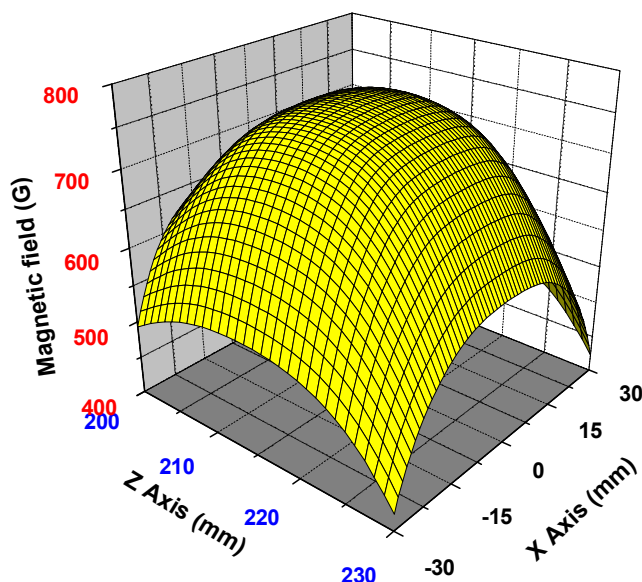
ภาพประกอบ 32 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วยหัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



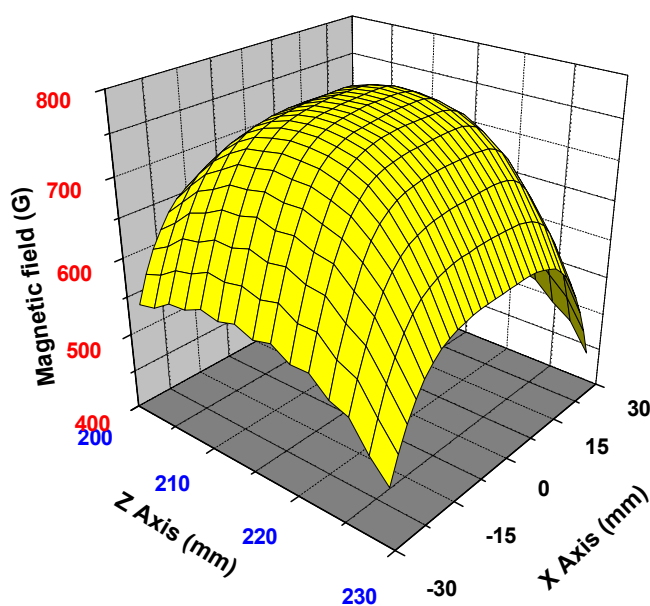
ภาพประกอบ 33 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วย
หัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

จากนั้นจะใช้โปรแกรมสร้างพื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y เทียบกับระยะทางตามแนวแกน x และ z สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 ที่ตำแหน่ง $y = 0$ เมื่อใช้กระแสคงที่ 1 A ได้ดังภาพประกอบ 34 โดยผิวของสนามแม่เหล็กที่วัดโดยหัววัดฮอลล์เป็นดังภาพประกอบ 35 สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 จะสร้างพื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y

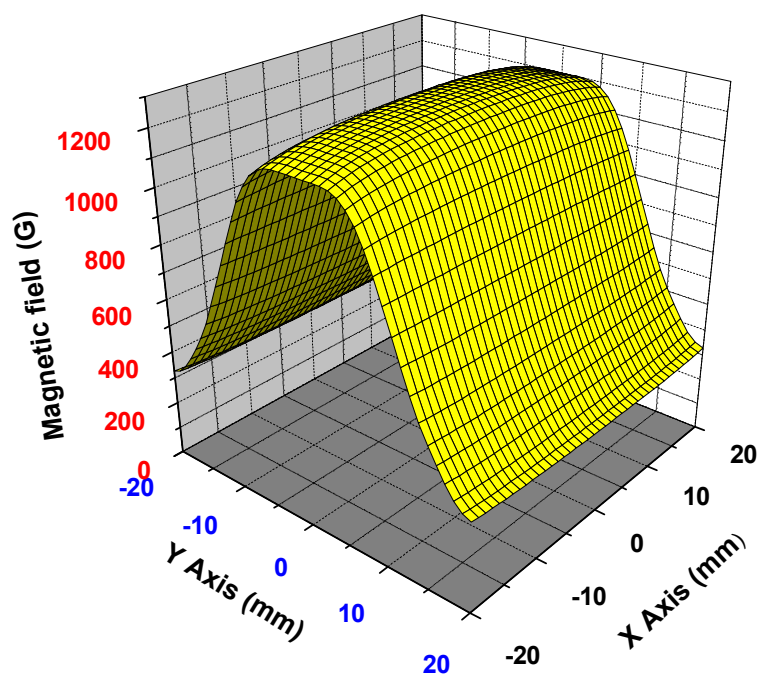
เทียบกับระยะทางตามแนวแกน x และ y ที่ตำแหน่ง $z = 206 \text{ mm}$ ได้ดังภาพประกอบ 36 และผลการวัดดังภาพประกอบ 37 ซึ่งจะให้เห็นแนวโน้มของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก



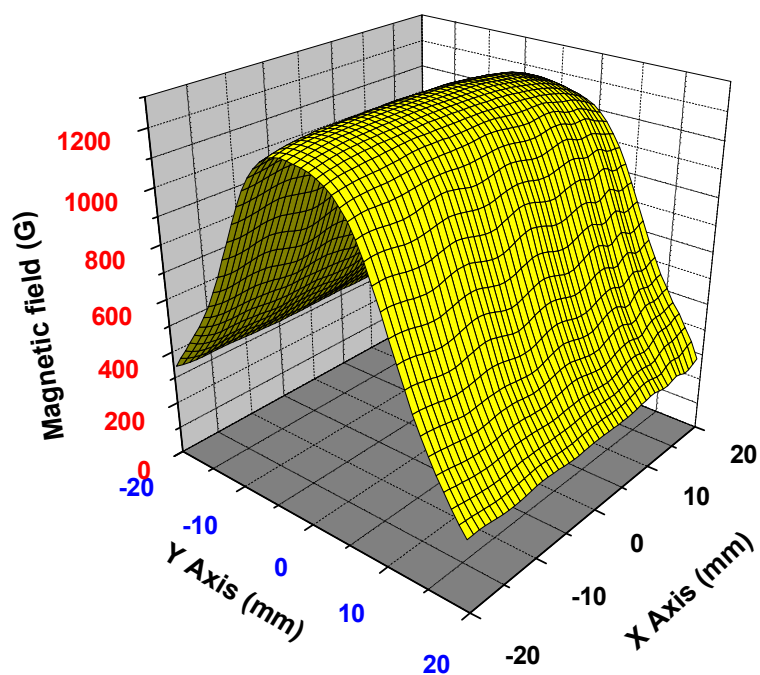
ภาพประกอบ 34 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการคำนวณจากชุดค่าสั่งเรเดียเทียบกับระยะบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



ภาพประกอบ 35 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการวัดด้วยหัววัดฮอลล์เทียบกับระยะบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



ภาพประกอบ 36 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการคำนวณจากชุดคำสั่งเรเดียเทียบกับระบับนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง $z = 206$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

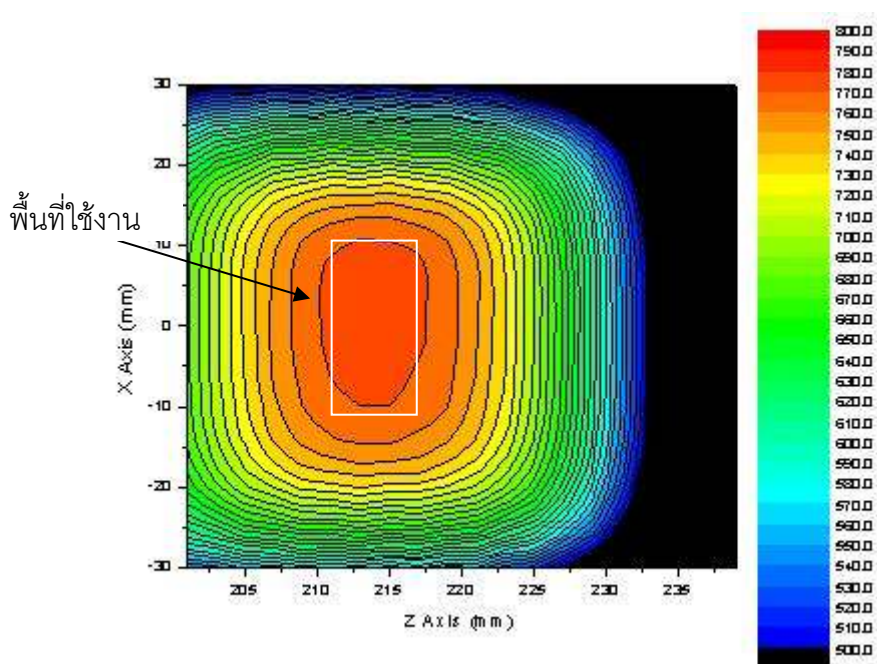


ภาพประกอบ 37 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการวัดด้วยหัววัดฮอลล์เทียบกับระบับนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง $z = 206$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

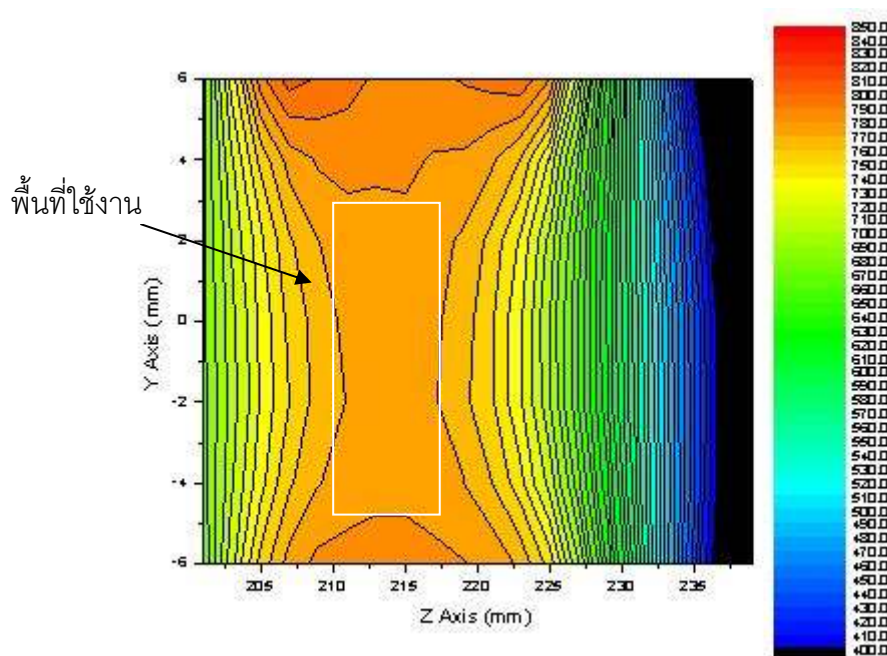
การพิจารณาพื้นที่ใช้งานในการวัดสารตัวอย่างซึ่งจะต้องเป็นบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กคงที่ จากแผนภาพสองมิติขององค์ประกอบสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y บนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับการวัด P-MOKE และองค์ประกอบสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y บนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$ สำหรับการวัด L-MOKE สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 1 ดังภาพประกอบ 38 และภาพประกอบ 39 และแผนภาพสองมิติขององค์ประกอบสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y บนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับการวัด P-MOKE และองค์ประกอบสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y บนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง $z = 206 \text{ mm}$ สำหรับการวัด L-MOKE สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 2 ดังภาพประกอบ 40 และภาพประกอบ 41

พิจารณาการมีทิศเดียวของสนามแม่เหล็กจากลักษณะของผิวสามมิติและแผนภาพสองมิติที่สร้างขึ้นจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz สำหรับการวัด P-MOKE พบว่าที่ตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กสูงสุดจะมีเพียงองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวคือตามแนวแกน y สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 1 จะมีความเรียบตามแนวแกน x มีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างประมาณ 20 mm ในขณะที่ตามแนวแกน z มีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างประมาณ 5 mm โดยมีพื้นที่สำหรับการวัดสารตัวอย่างประมาณ 100 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 2 จะมีความเรียบตามแนวแกน x มีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างประมาณ 15 mm ตามแนวแกน z มีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างประมาณ 2 mm โดยมีพื้นที่สำหรับการวัดสารตัวอย่างประมาณ 30 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.96 เปอร์เซ็นต์

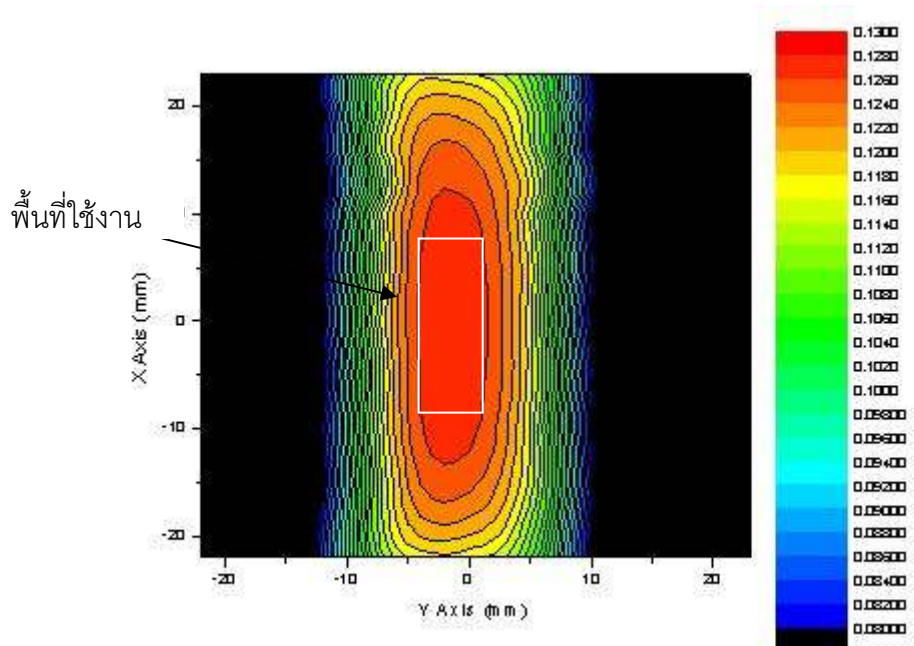
ในการวัด L-MOKE จะพิจารณาระนาบ yz สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 1 โดยจะมีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างตามแนวแกน y ประมาณ 7 mm และระยะตามแนวแกน z ประมาณ 5 mm มีพื้นที่ใช้งานได้ประมาณ 35 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.29 เปอร์เซ็นต์ สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 2 จะพิจารณาระนาบ xy โดยจะมีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างตามแนวแกน x ประมาณ 15 mm และระยะตามแนวแกน y ประมาณ 5 mm มีพื้นที่ใช้งานได้ประมาณ 75 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.54 เปอร์เซ็นต์



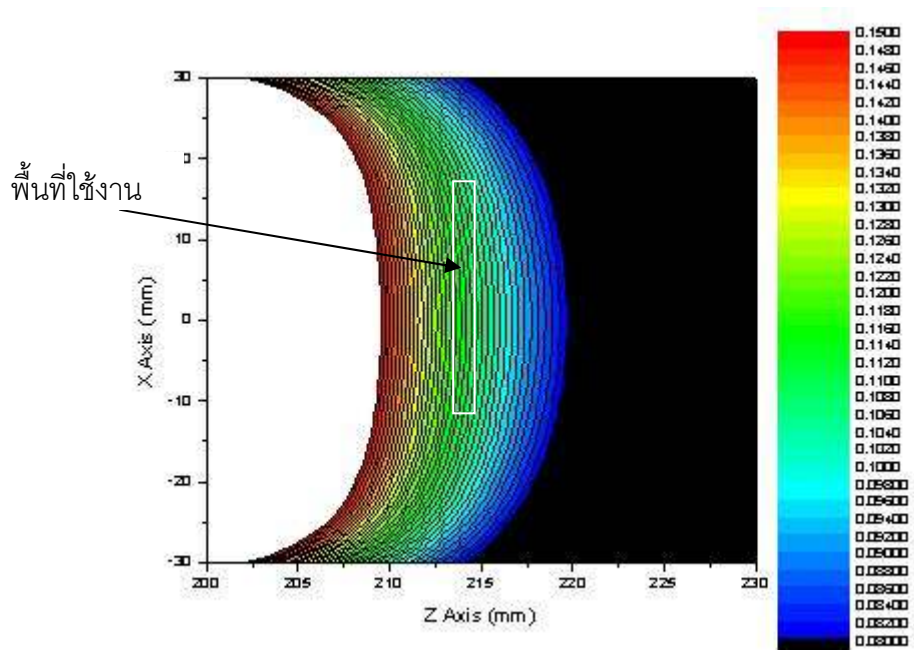
ภาพประกอบ 38 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



ภาพประกอบ 39 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$ ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



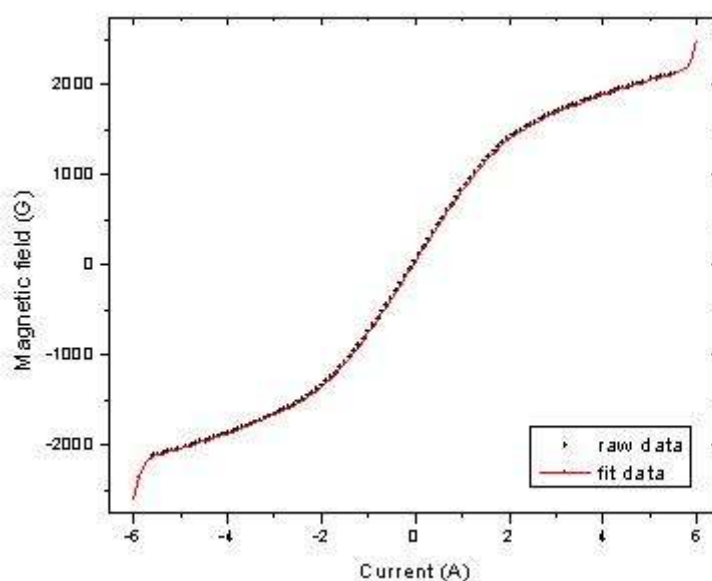
ภาพประกอบ 40 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง $z = 206$ mm ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2



ภาพประกอบ 41 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการคำนวณองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับค่ากระแส

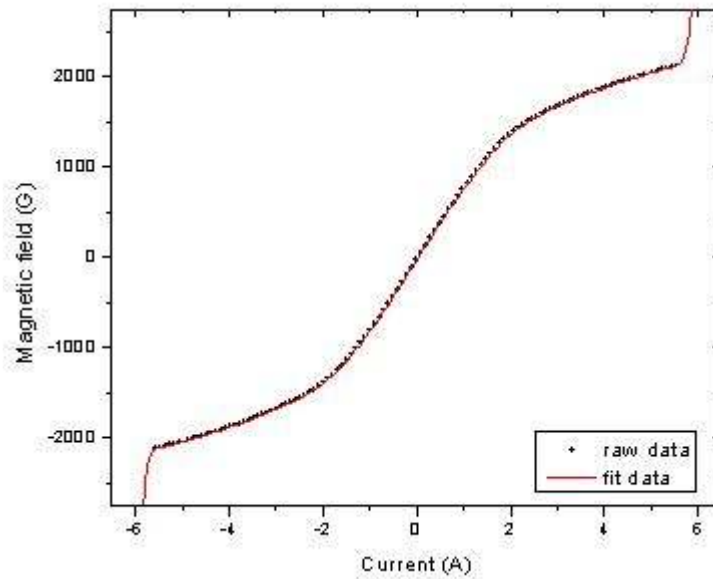
การวัดค่าสนามแม่เหล็กจะใช้หัววัดฮอลล์ วัดที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กที่พิกัด (0,0,215) โดยเปลี่ยนแปลงค่ากระแสจาก 0 ถึง 5.5 A จากนั้นลดกระแสจาก 5.5 A จนถึง -5.5 A แล้วเพิ่มกระแสจาก -5.5 A ไปจนถึง 5.5 A โดยใช้อัตราการเพิ่ม-ลดกระแสครั้งละ 0.1 A ซึ่งจะได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและสนามแม่เหล็ก จากนั้นใช้การประมาณแบบโพลิโนเมียล กับข้อมูลที่ได้เพื่อสร้างฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับสนามแม่เหล็ก โดยจะได้ผลการวัดและการใช้การประมาณแบบโพลิโนเมียลสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 เมื่อลดกระแสดังภาพประกอบ 42 และเมื่อเพิ่มกระแสดังภาพประกอบ 43 สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 เมื่อลดกระแสดังภาพประกอบ 44 และเมื่อเพิ่มกระแสดังภาพประกอบ 45 โดยพบว่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จะเป็นวงฮิสเทอรีซิสซึ่งมีค่าสนามแม่เหล็กตกค้างประมาณ 31.869 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 10.167 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2



ภาพประกอบ 42 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อลดกระแสจาก 5 A ไปถึง -5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลิโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1

โดยจะได้ฟังก์ชันเพื่อแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 เมื่อลดกระแส คือ

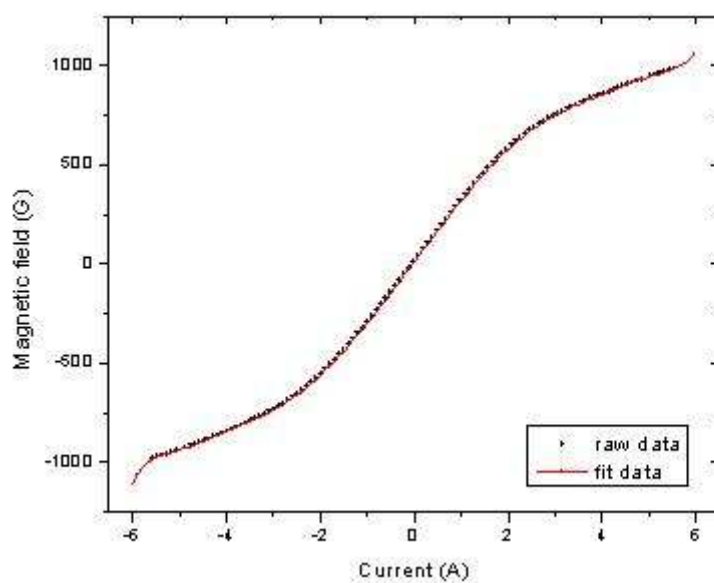
$$\begin{aligned}
 B(I) = & 34.0606 + 819.123I + 2.92895I^2 - 26.7439I^3 - 3.00009I^4 - 3.84336I^5 + \\
 & 0.587236I^6 + 0.766676I^7 - 0.0566409I^8 - 0.0574324I^9 + 0.00309659I^{10} + \\
 & 0.00221991I^{11} - 0.00009777I^{12} - 0.0000438088I^{13} + 1.6648 \times 10^{-6}I^{14} + \\
 & 3.49338 \times 10^{-7}I^{15} - 1.18519 \times 10^{-8}I^{16}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$



ภาพประกอบ 43 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อเพิ่มกระแสจาก -5 A ไปถึง 5 A และการประมาณข้อมูลแบบพหุนามของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1

ฟังก์ชันเพื่อแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 เมื่อเพิ่มกระแส คือ

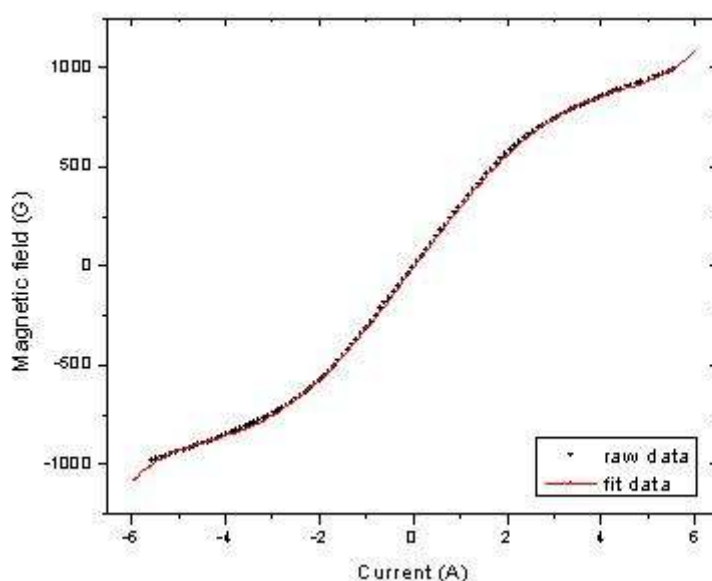
$$\begin{aligned}
 B(I) = & -30.2537 + 823.344I - 3.61434I^2 - 37.3093I^3 + 4.40339I^4 + 4.62097I^5 - \\
 & 1.08176I^6 - 2.14113I^7 + 0.135129I^8 + 0.472978I^9 - 0.00990026I^{10} - \\
 & 0.0549126I^{11} + 0.000439888I^{12} + 0.00377497I^{13} - 0.0000115116I^{14} - \\
 & 0.000159842I^{15} + 1.56524 \times 10^{-7}I^{16} + 4.10368 \times 10^{-6}I^{17} - 6.4275 \times 10^{-10}I^{18} - \\
 & 5.86773 \times 10^{-8}I^{19} - 4.16112 \times 10^{-12}I^{20} + 3.58896 \times 10^{-10}I^{21}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$



ภาพประกอบ 44 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อลดกระแสจาก 5 A ไปถึง -5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลิโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

ฟังก์ชันเพื่อแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 เมื่อลดกระแส คือ

$$\begin{aligned}
 B(I) = & 11.6247 + 314.754I + 1.36485I^2 - 6.30868I^3 - 0.570046I^4 - 0.437035I^5 + \\
 & 0.0631426I^6 + 0.0476801I^7 - 0.00329137I^8 - 0.00157647I^9 + \\
 & 0.0000830953I^{10} + 0.0000179293I^{11} - 8.17355 \times 10^{-7} I^{12}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$



ภาพประกอบ 45 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อเพิ่มกระแสจาก -5 A ไปถึง 5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลิโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

ฟังก์ชันเพื่อแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 เมื่อเพิ่มกระแส คือ

$$B(I) = -8.70302 + 314.9247I + 0.494962I^2 - 8.412695659I^3 - 0.00006134942I^4 + 0.13065582I^5 - 0.000181053I^6 \quad (4.6)$$

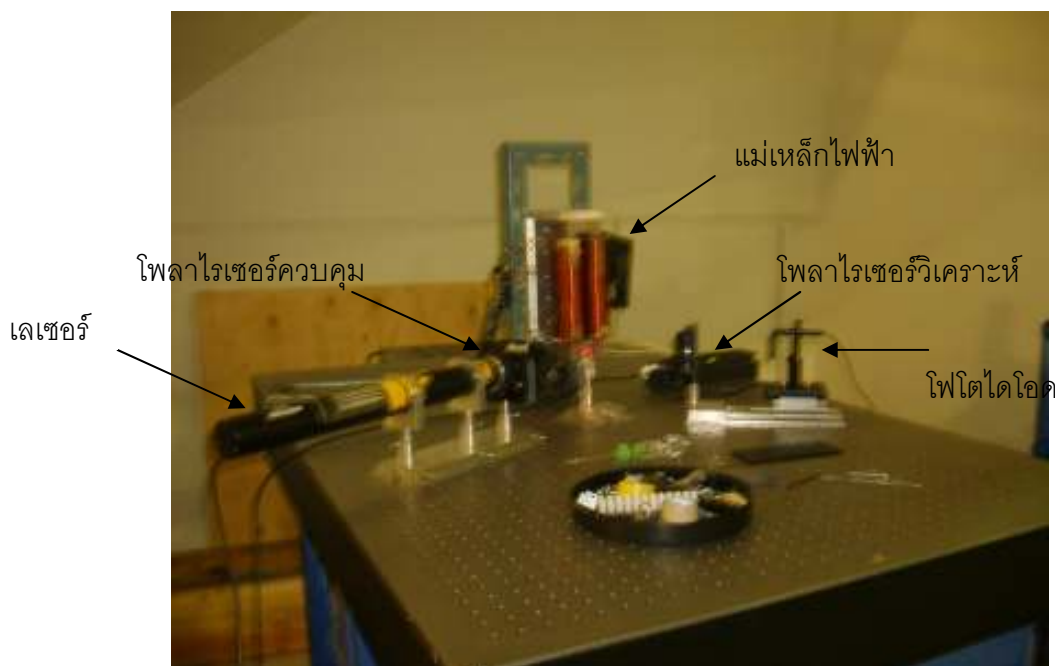
เมื่อ $B(I)$ คือ ค่าสนามแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของค่ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซเลนอยด์วัด ณ ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น G

I คือ กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดโซเลนอยด์ มีหน่วยเป็น A

ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ประมาณค่าผลการทดลองนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์ของความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.1259, 0.8435, 0.1052, 0.0757, 0.1138 และ 0.127 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1129, 0.6304, 0.1371, 0.0897, 0.1348 และ 0.1414 ตามลำดับ

4.3 การสร้างวงฮิสเทอรีซิสและการวัดมุมการหมุนของเคอร์

การติดตั้งระบบการวัด L-MOKE เป็นดังภาพประกอบ 46 และระบบการวัด P-MOKE ดังภาพประกอบ 47 ซึ่งการติดตั้งระบบจะเริ่มจากการติดตั้งเลเซอร์ฮีเลียม-นีออนเข้ากับแท่นรองรับปรับให้อยู่ในแนวระดับและต่อแหล่งจ่ายกำลังความต่างศักย์สูงให้กับเลเซอร์ ติดตั้งโพลาริเซอร์ควบคุมเข้ากับตัวหมุนแบบละเอียดและติดบนแท่นรองรับ ปรับระดับความสูงให้แสงเลเซอร์ผ่านบริเวณตรงกลางบิตมุมให้ลำเลเซอร์ตกตั้งฉากกับผิวหน้าของโพลาริเซอร์ โดยโพลาริเซอร์ควบคุมจะเลือกใช้โพลาริเซอร์ชนิดกลาน-เลเซอร์เนื่องจากเป็นโพลาริเซอร์ที่มีเส้นแรงแนวนระนาบของการโพลาริซ์อยู่ด้วย จึงทำให้สะดวกต่อการตรวจสอบระนาบของการโพลาริซ์ของแสงตกกระทบ ในขณะที่โพลาริเซอร์วิเคราะห์จะใช้โพลาริเซอร์ชนิดกลาน-เทเลอร์ ติดตั้งแม่เหล็กเข้ากับชุดเลื่อนตำแหน่ง 3 แนวแกนเพื่อสามารถปรับตำแหน่งของแม่เหล็กได้ ต่อสายไฟเข้าแหล่งจ่ายกำลังและต่อสายจีพีไอพีจากแหล่งจ่ายกำลังเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ ติดตั้งตัวจับสารตัวอย่างปรับระดับให้แสงเลเซอร์ตกกระทบกลางผิวหน้าของสารบิตมุมปรับมุมตกกระทบประมาณ 60° สำหรับระบบการวัด L-MOKE และ 80° สำหรับระบบการวัด P-MOKE ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 10° สำหรับระบบการวัด P-MOKE ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ติดตั้งโพลาริเซอร์วิเคราะห์เข้ากับตัวหมุนแบบละเอียดและวางในตำแหน่งที่แสงสะท้อนจากผิวสารผ่านเข้าตรงกลางของโพลาริเซอร์ ติดตั้งตัววัดแสงโดยให้แสงตกกระทบตั้งฉากบริเวณกลางหัววัด



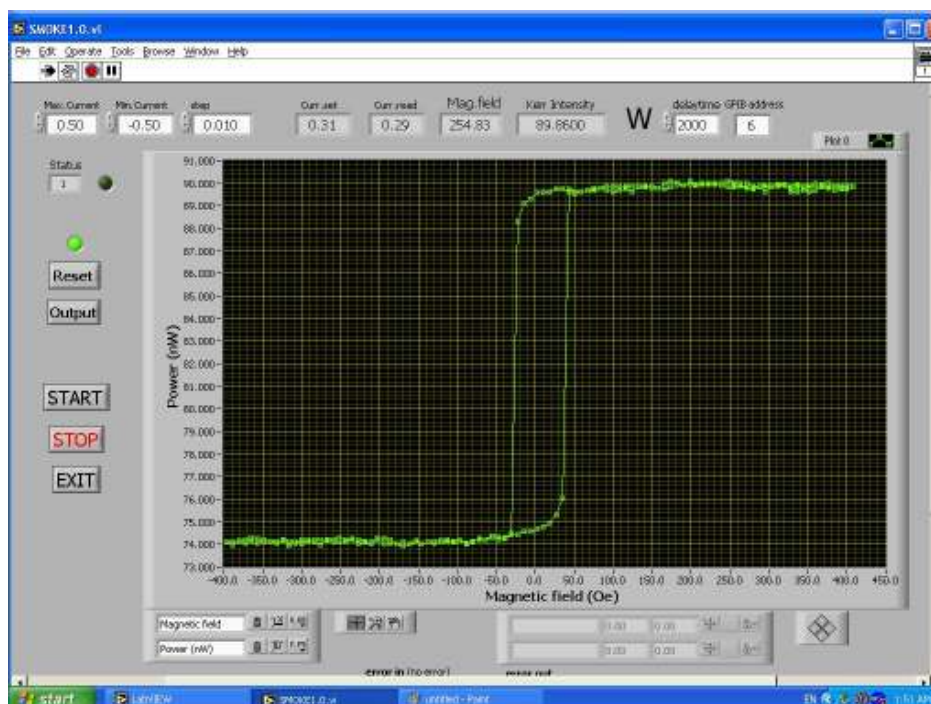
ภาพประกอบ 46 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด L-MOKE

จากนั้นจะทำการต่อสาย RS 232 จากชุดควบคุมไฟโตไดโอดเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ หลังจากติดตั้งระบบการวัด MOKE เรียบร้อยแล้วจะทำการต่อประสานระบบเพื่อควบคุมและประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมแลปวิวซึ่งมีหน้าต่างการทำงานดังภาพประกอบ 48



ภาพประกอบ 47 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด P-MOKE ของข้าวแม่เหล็กแบบที่ 2

การพิจารณาความสามารถในการแยกแยะของระบบ (system resolution) เนื่องจากระบบ MOKE เป็นระบบที่ใช้วัดมุม ดังนั้นจึงจะพิจารณาความสามารถในการวัดมุมละเอียดของเครื่องมือ ซึ่งอุปกรณ์ในการแยกแยะมุมคือตัวหมุนแบบละเอียดที่สามารถวัดมุมได้ละเอียดที่สุด 1.5 arcsec หรือ 0.000417° หรือ $7.278 \text{ } \mu\text{rad}$ และพิจารณาความสามารถในการแยกแยะมุมของตัวโฟลาโรเซอรัได้ จากอัตราส่วนหักล้างของแสงคือ $\tan \theta = E_s / E_p \approx 10^{-5}$ ดังนั้นมุมการหมุนที่โฟลาโรเซอรัสามารถแยกแยะได้จะเป็น $10 \text{ } \mu\text{rad}$ หรือ 0.000573° หรือ 2.06 arcsec



ภาพประกอบ 48 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรมแลบวิว

จากระบบการวัด P-MOKE และ L-MOKE เมื่อนำไปวัดทดสอบเพื่อสร้างวงฮิสเทอรีซิสและวัดมุมการหมุนของเคอร์ได้ผลดังนี้

4.3.1 การสร้างวงฮิสเทอรีซิส

วงฮิสเทอรีซิสของผลึกเดี่ยวของนิกเกิลระนาบ (111) เหล็ก โคบอลต์บริสุทธิ์ และฟิล์มของเหล็กซึ่งวัดทดสอบโดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นได้ผลดังนี้

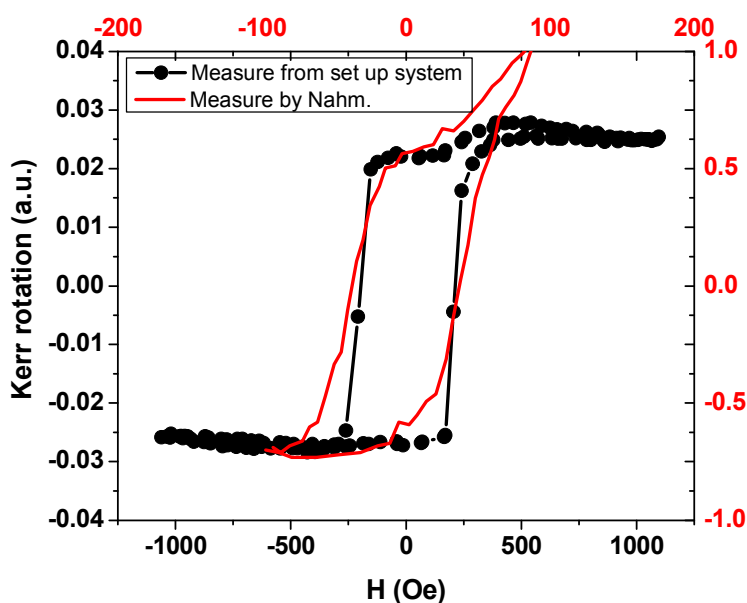
วงฮิสเทอรีซิสของผลึกเดี่ยวของ Ni(111)

วงฮิสเทอรีซิสของการวัด L-MOKE ของ Ni(111) ที่กระแสสูงสุด 1.5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.05 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของโพลาริเซชันวิเคราะห์ 90° เปรียบเทียบกับผลการวัดฟิล์มของนิกเกิลหนา 7.4 ไมโนเลเยอร์ปลูกบนแพลทินัม (7.4ML Ni/Pt(111)) (Nahm. 2005: S199) ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้องจะเป็นดังภาพประกอบ 49

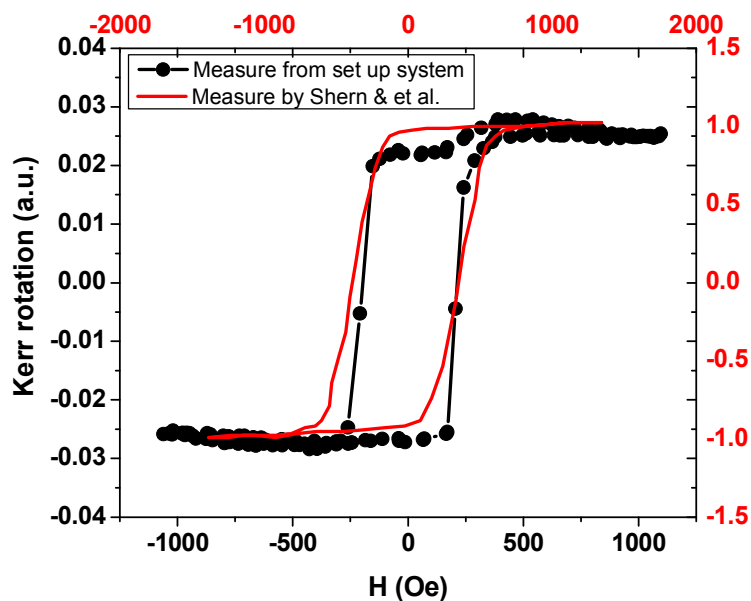
จากการเปรียบเทียบวงฮิสเทอรีซิสพบว่าลักษณะของวงมีความคล้ายคลึงกัน แต่ค่าสนามลบล่างแม่เหล็กมีความแตกต่างกันมาก โดยจากผลการวัดทดสอบเครื่องมือซึ่งวัดทดสอบนิกเกิลแบบ

ปริมาตรจะได้ H_c ประมาณ 200 G ในขณะที่ฟิล์มที่เกิดที่ปลูกบนแพลทินัมนะนาบ (111) หน้า 7.4 โมโนเลเยอร์ มี H_c ประมาณ 43 G

จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลการวัดทดสอบเครื่องมือกับผลการวัดความรีของเคอร์ของฟิล์มที่เกิดปลูกบนแพลทินัมนะนาบ (111) (Shern; et al. 1998: 110) ดังภาพประกอบ 50 พบว่ามีค่าสนามลบด้านแม่เหล็กใกล้เคียงกันประมาณ 360 G โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 44.4 เปอร์เซ็นต์

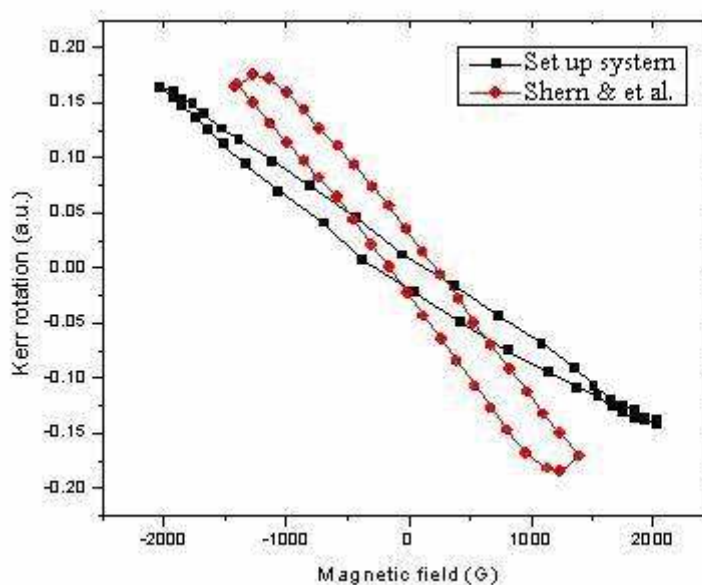


ภาพประกอบ 49 วงฮิสเทอริซิสจากการวัด L-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับฟิล์ม 7.4ML Ni/Pt(111) ซึ่งวัดที่อุณหภูมิต่ำ



ภาพประกอบ 50 วงฮิสเทอรีซิสจากการวัด L-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับค่า
ความรีของเคอร์ของฟิล์ม Ni/Pt(111)

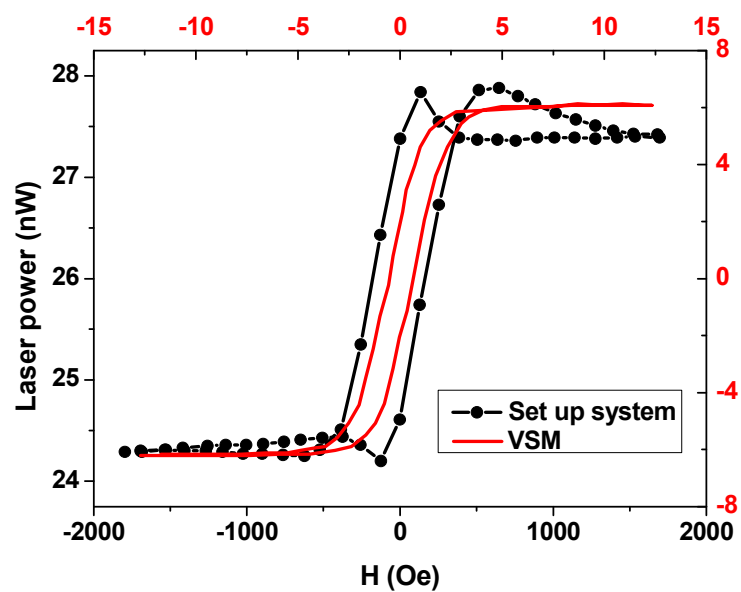
วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของ Ni(111) ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.5 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° เปรียบเทียบกับผลการวัดความรีของเคอร์ของฟิล์มนิกเกิลปลูกบนแพลทินัมระนาบ (111) (Shern; et al. 1998: 110) เป็นดังภาพประกอบ 51 พบว่าจะไม่แสดงสถานะการอิ่มของความแม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กประมาณ 1500 G เหมือนกัน และมีค่าสนามลบล่างแม่เหล็กเป็น 380 G สำหรับ Ni bulk และ 260 G สำหรับ Ni/Pt(111) films



ภาพประกอบ 51 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับความถี่ของเคอร์ของฟิล์ม Ni/Pt(111)

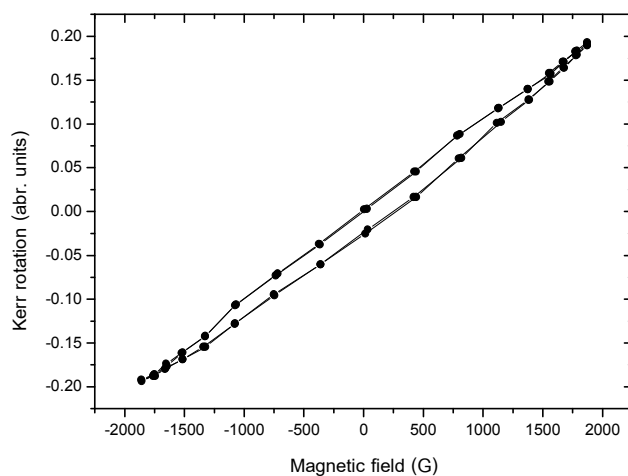
วงฮิสเทอรีซิสของเหล็ก

วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของเหล็ก ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.5 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° เปรียบเทียบกับผลการวัดเหล็กแบบปริมาตร (bulk Fe) ที่ได้จากเครื่อง VSM (Held. 2008: Online) จะเป็นดังภาพประกอบ 52 พบว่าลักษณะรูปร่างและค่าสนามลบล้างแม่เหล็กมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งผลการวัดเหล็กมี H_c ประมาณ 100 G ในขณะที่ผลการวัดจากเครื่อง VSM มีค่า H_c ประมาณ 0.9 G



ภาพประกอบ 52 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของเหล็กแบบปริมาตรเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้จากเครื่อง VSM

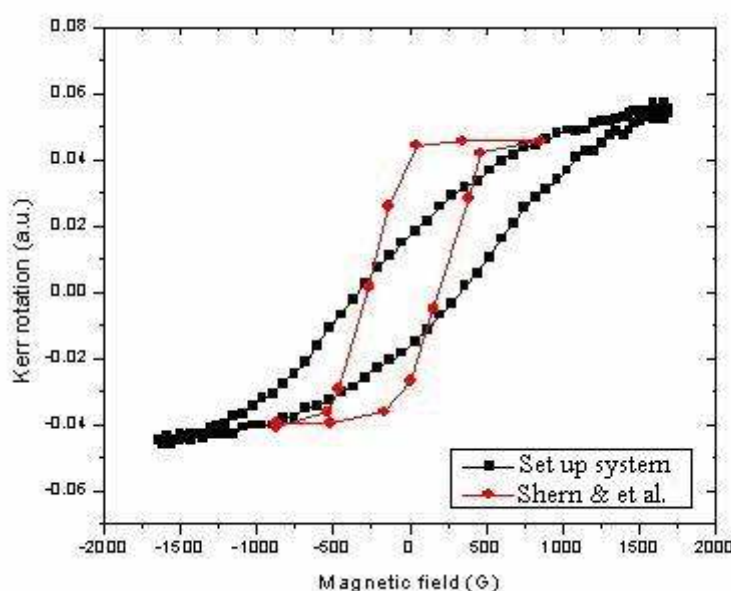
วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ P-MOKE ของเหล็ก ที่กระแสสูงสุด 4 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.5 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° จะเป็นดังภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 53 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของเหล็ก

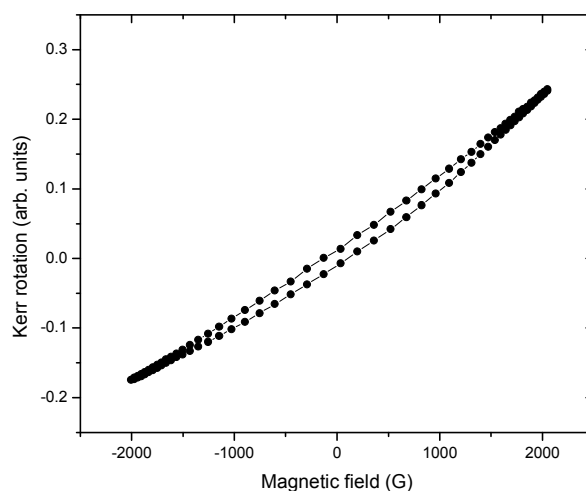
วงฮิสเทอรีซิสของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%)

วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ L-MOKE ของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%) ที่กระแสสูงสุด 3 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.1 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° เปรียบเทียบกับผลการวัด L-MOKE ของฟิล์มโคบอลต์หนา 6.5 ไมโนเลเยอร์ปลูกบนแพลทินัมระนาบ (111) (Shern; et al. 1999: L498) จะเป็นดังภาพประกอบ 54 พบว่าลักษณะรูปร่างของวงใกล้เคียงกันโดยมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กของโคบอลต์ประมาณ 360 G ในขณะที่ของฟิล์มโคบอลต์มีค่าประมาณ 260 G มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 38.5 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 54 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%) เปรียบเทียบกับฟิล์ม 6.5 ML Co/Pt(111)

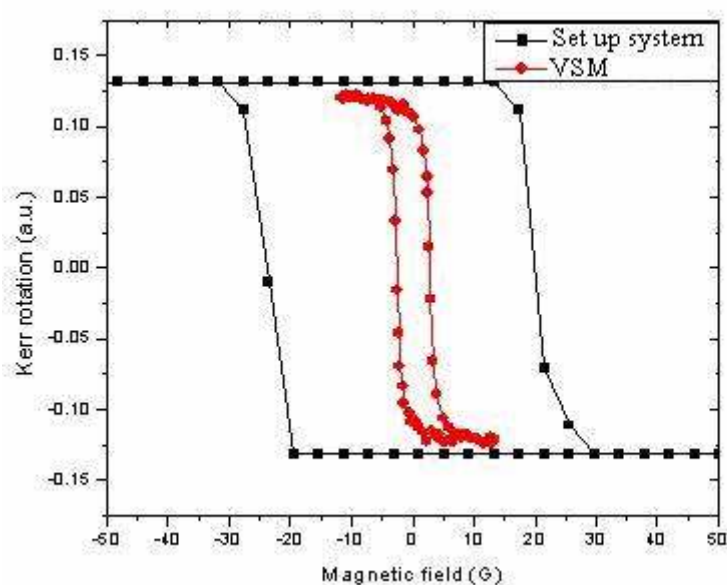
วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ P-MOKE ของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%) ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.2 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° จะเป็นดังภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 55 วงฮิสเทอรีซิสของปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงซ้ำของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%)

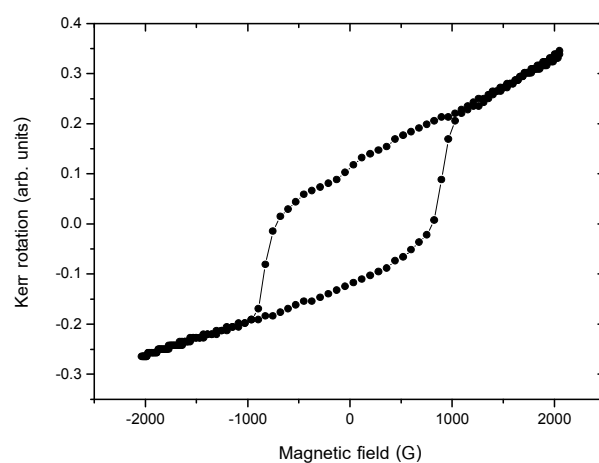
วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å

วงฮิสเทอรีซิสการวัด L-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å ปลุกบนแก้ว ที่กระแสสูงสุด 0.1 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.05 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° เปรียบเทียบกับผลการวัดฟิล์มเหล็กหนา 7000 Å ปลุกบนแก้วจากเครื่อง VSM (Held. 2008: Online) จะเป็นดังภาพประกอบ 56 พบว่ารูปร่างลักษณะของวงคล้ายกัน แต่มีความแตกต่างของสนามลบล้างแม่เหล็กสูง โดยผลจากการวัดฟิล์มหนา 1100 Å มีค่า H_c ประมาณ 19 G ในขณะที่ผลการวัดฟิล์มหนา 7000 Å จะได้ค่า H_c ประมาณ 2.8 G



ภาพประกอบ 56 วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å เปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่อง VSM ของฟิล์มเหล็กหนา 7000 Å

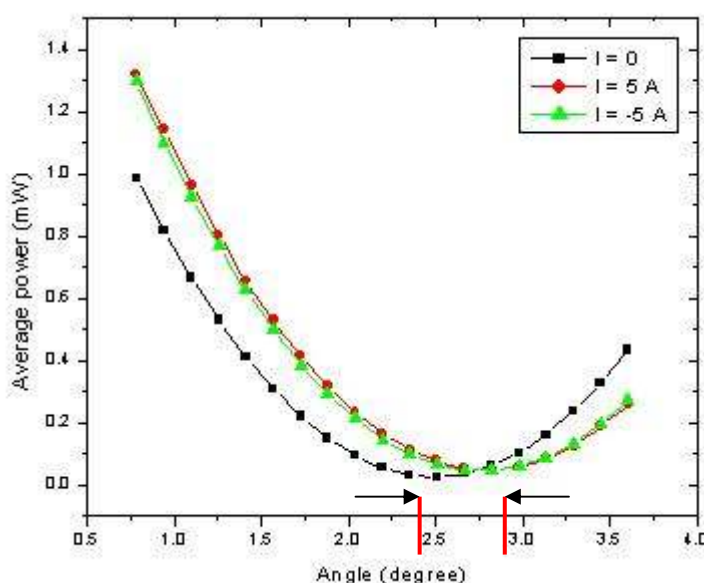
วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณของเคอร์ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.1 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° จะเป็นดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 57 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å

4.3.2 การวัดมุมการหมุนของเคอร์โดยการปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังแสงเลเซอร์และมุมองโพลาไรเซชันวิเคราะห์ เมื่อไม่ให้นามแม่เหล็กภายนอกกับสารตัวอย่าง เมื่อให้นามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ 5 A และเมื่อให้นามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ -5 A เป็นดังภาพประกอบ 60 พบว่าการวัดกำลังแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากผิวสารตัวอย่างที่ลบด้านความเป็นแม่เหล็ก (demagnetize) โดยยังไม่ให้นามแม่เหล็กภายนอก เมื่อปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์จาก 1° ไปถึง 3.5° จะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุม 2.5078° และเมื่อให้นามแม่เหล็กภายนอกโดยจ่ายกระแสดังที่ 5 A วัดกำลังแสงโดยปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์จะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาเช่นกันแต่จะเลื่อนไปทางขวามือซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุม 2.8213° โดยมีความต่างของมุมเป็น 0.3135° เมื่อให้นามแม่เหล็กภายนอกโดยจ่ายกระแสดังที่ -5 A วัดกำลังแสงโดยปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์จะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาที่อยู่ตำแหน่งเดียวกับเส้นโค้งของกระแส 5 A มีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุมเดียวกัน และมีความต่างของมุมเท่ากัน



ภาพประกอบ 58 การเปลี่ยนแปลงของกำลังแสงเลเซอร์ที่ตกบนโฟโตไดโอดแปรค่าตามการเปลี่ยนแปลงมุมของโพลาไรเซชันวิเคราะห์ เมื่อไม่ให้นามแม่เหล็กภายนอก ให้นามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ 5 A และให้นามแม่เหล็กที่กระแสดังที่ -5 A ของเหล็ก

บทที่ 5

สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

ในการพัฒนาระบบนี้ได้ทำการออกแบบแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อใช้ในระบบการวัด L-MOKE และ P-MOKE โดยออกแบบขั้วแม่เหล็กเป็น 2 แบบ คือแบบที่ 1 เป็นแบบที่ใช้กันทั่วไปมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าสองขั้วขนานกัน แบบที่ 2 เป็นแบบที่ออกแบบขึ้นใหม่ให้มีพื้นที่หน้าตัดด้านข้างเป็นรูปสามเหลี่ยมสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างเหนือขั้วแม่เหล็ก เพื่อลดข้อจำกัดของมุมตกกระทบสำหรับการวัด MOKE ทั้งสองรูปแบบ

แม่เหล็กไฟฟ้าจะมีแกนแม่เหล็กขึ้นรูปเป็นรูปตัวยูมีความกว้างและความยาวของฐานเป็น 60×60 mm และสูง 200 mm ขนาดของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 กว้าง 20 mm ยาว 60 mm สูง 30 mm ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 กว้าง 23 mm ยาว 60 mm สูง 5 mm โดยแกนแม่เหล็กและขั้วแม่เหล็กทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ($C < 0.19\%$) ขดลวดโซเลนอยด์ทำจากลวดทองแดงชนิดเอสดับเบิลยูจี 19 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.02362 mm ทนกระแสสูงสุดประมาณ 7 A พันเป็นขดลวดจำนวน 1394 รอบ มีความต้านทานไฟฟ้าของขดลวดทั้งสองชุดเป็น 3.6Ω และ 4.1Ω

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ระบบ MOKE ที่สร้างขึ้นสามารถวัดปรากฏการณ์ของเคอร์ด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงขั้วและแบบตามยาวของสารตัวอย่างที่เป็นปริมาตรและเป็นฟิล์มบางได้ ดังต่อไปนี้

5.1.1.1 วงฮิสเทอรีซิสของผลึกเดี่ยวนิเกิลระนาบ (111) พบว่าวงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE จะมีค่าสนามลบด้านแม่เหล็กประมาณ 200 G และจะอิมิตัวที่สนามแม่เหล็กประมาณ 250 G และ -250 G เปรียบเทียบกับวงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มนิเกิลบนแพลทินัมระนาบ (111) หน้า 7.4 ไมโนเลเยอร์ ในงานวิจัยของนาม (Nahm, 2005: s199) พบว่ามีลักษณะวงแบบเดียวกันแต่มีขนาดของสนามลบด้านแม่เหล็กประมาณ 43 G เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของเชิร์นและคณะ (Shern; et al. 1998: 110) ที่วัดความรีของเคอร์แบบตามยาวของฟิล์มนิเกิลบนแพลทินัมระนาบ (111) พบว่ามีค่าสนามลบด้านแม่เหล็กใกล้เคียงกันโดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนประมาณ 44.4 เปอร์เซ็นต์ พิจารณาวงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE พบว่าจะไม่เห็นสถานะการอิมิตัวเมื่อให้สนามสูงสุดประมาณ 2000 G ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเชิร์นและคณะ (Shern; et al. 1998: 109) ที่วัดความรีของเคอร์ของฟิล์มนิเกิลบนแพลทินัมระนาบ (111) แบบเชิงขั้วและไม่พบการอิมิตัวที่สนามมากกว่า 1410 G เช่นเดียวกัน

5.1.1.2 วงฮิสเทอรีซิสของเหล็ก พบว่าวงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE จะมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กประมาณ 100 G และจะอิ่มตัวที่สนามแม่เหล็กประมาณ 250 G และ -250 G เปรียบเทียบวงฮิสเทอรีซิสกับผลการวัดเหล็กแบบปริมาตรที่ได้จากเครื่อง VSM (Held. 2008: Online) พบว่าลักษณะรูปร่างใกล้เคียงกัน แต่ค่าสนามลบล้างแม่เหล็กมีความแตกต่างกันมาก โดยผลการวัดจากเครื่อง VSM มีค่า H_c ประมาณ 0.9 G พิจารณาวงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE จะไม่เห็นสถานะการอิ่มตัวเมื่อให้สนามสูงสุดประมาณ 2000 G

5.1.1.3 วงฮิสเทอรีซิสของโคบอลต์ พบว่าวงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE จะมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กประมาณ 350 G และจะอิ่มตัวที่สนามแม่เหล็กประมาณ 1500 G และ -1500 G เปรียบเทียบวงฮิสเทอรีซิสกับงานวิจัยของลีและคณะ (Lee; et al. 2000: 3803) ซึ่งวัดการหมุนของเคอร์ของฟิล์มโคบอลต์บนพอลาไคเอมมะนาบ (111) พบว่ารูปร่างของวงฮิสเทอรีซิสแตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของเชิร์นและคณะ (Shern; et al. 1999: L498) พบว่าลักษณะรูปร่างของวงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กของฟิล์มโคบอลต์มีค่าประมาณ 260 G มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 38.5 เปอร์เซ็นต์ พิจารณาวงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE จะไม่เห็นสถานะการอิ่มตัวเมื่อให้สนามสูงสุดประมาณ 2000 G

5.1.1.4 วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å พบว่าวงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE เปรียบเทียบกับผลการวัดฟิล์มเหล็กหนา 7000 Å ปลุกบนแก้วจากเครื่อง VSM (Held. 2008: Online) รูปร่างลักษณะของวงคล้ายกัน แต่มีความแตกต่างของสนามลบล้างแม่เหล็กสูง โดยผลจากการวัดฟิล์มหนา 1100 Å มีค่า H_c ประมาณ 19 G ในขณะที่ผลการวัดฟิล์มหนา 7000 Å จะได้ค่า H_c ประมาณ 2.8 G พิจารณาวงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE พบว่าเป็นวงที่มีลักษณะเอียง มีสนามลบล้างแม่เหล็กประมาณ 1600 G แสดงสถานะอิ่มตัวที่สนามแม่เหล็กประมาณ 1000 G และ -1000 G

5.1.1.5 การวัดมุมการหมุนของเคอร์โดยการปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์ จากการวัดกำลังแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากผิวสารตัวอย่างที่ลบล้างความเป็นแม่เหล็ก โดยยังไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์จาก 1° ไปถึง 3.5° จะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุม 2.5078° และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกโดยจ่ายกระแสคงที่ 5 A วัดกำลังแสงโดยปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์จะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาเช่นกัน แต่จะเลื่อนไปทางขวามือซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุม 2.8213° โดยมีความต่างของมุมเป็น 0.3135° เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกโดยจ่ายกระแสคงที่ -5 A วัดกำลังแสงโดยปรับมุมโพลาไรเซชันวิเคราะห์จะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาที่อยู่ตำแหน่งเดียวกับเส้นโค้งของกระแส 5 A มีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุม 2.8213° โดยมีความต่างของมุมเป็น 0.3135°

5.1.2 แม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกแบบสามารถสร้างสนามแม่เหล็กในบริเวณที่วัดสารตัวอย่างได้สูงสุด 2123.573 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 983.935 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ณ ตำแหน่งพิกัด (0,0,215) เมื่อใช้กระแสประมาณ 5.5 A โดยสนามแม่เหล็กจะมีองค์ประกอบในทิศทางเดียวในบริเวณที่แสงตกกระทบผิวสาร

5.1.2.1 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กจากผลการคำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและผลการวัดด้วยหัววัดฮอลล์ พบว่าแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นสามารถวัดสนามแม่เหล็กด้วยหัววัดฮอลล์ได้ 775.904 G เมื่อใช้กระแส 0.5 A สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 1274.26 G เมื่อใช้กระแส 1.5 A สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ส่วนการคำนวณสนามแม่เหล็กโดยชุดคำสั่งเรเดียได้เท่ากับ 770.716 G เมื่อใช้กระแส 0.5 A สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 1273.04 G เมื่อใช้กระแส 1.5 A สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ซึ่งพบว่าแนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กที่วัดด้วยหัววัดฮอลล์และการคำนวณจากชุดคำสั่งเรเดียจะสอดคล้องกัน และมีความแตกต่างของค่าสนามแม่เหล็กทั้งสามแนวแกนประมาณ 0.89 เปอร์เซ็นต์ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 2.7 เปอร์เซ็นต์ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

5.1.2.2 การพิจารณาองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศเดียว จากลักษณะของผิวสามมิติและแผนภาพสองมิติที่สร้างขึ้นจากองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz สำหรับการวัด P-MOKE พบว่าที่ตำแหน่งที่สนามแม่เหล็กสูงสุดจะมีเพียงองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวคือตามแนวแกน y สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 จะมีความเรียบตามแนวแกน x ประมาณ 20 mm และมีความเรียบตามแนวแกน z ประมาณ 5 mm โดยมีความพื้นที่สำหรับการวัดสารตัวอย่างประมาณ 100 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 จะมีความเรียบตามแนวแกน x ประมาณ 15 mm และมีความเรียบตามแนวแกน z ประมาณ 2 mm โดยมีความพื้นที่สำหรับการวัดสารตัวอย่างประมาณ 30 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.96 เปอร์เซ็นต์

ในการวัด L-MOKE จะพิจารณาระนาบ yz สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 โดยจะมีระยะตามแนวแกน y ประมาณ 7 mm และระยะตามแนวแกน z ประมาณ 5 mm มีพื้นที่สำหรับวัดสารประมาณ 35 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.29 เปอร์เซ็นต์ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 จะพิจารณาระนาบ xy โดยจะมีระยะตามแนวแกน x ประมาณ 15 mm และระยะตามแนวแกน y ประมาณ 5 mm มีพื้นที่สำหรับวัดสารประมาณ 75 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.54 เปอร์เซ็นต์

5.1.2.3 การสร้างฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับสนามแม่เหล็ก สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นดังสมการที่ (4.1)-(4.6)

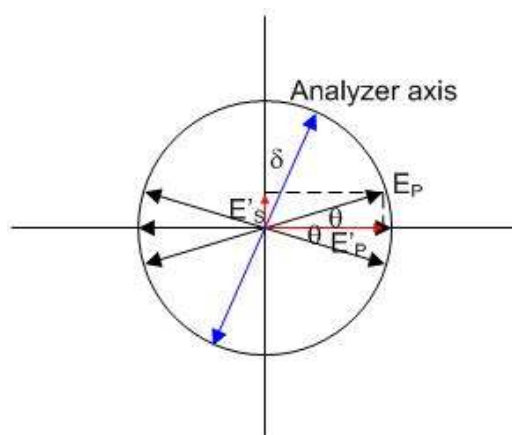
5.1.3 ระบบที่ออกแบบมีการต่อประสานผ่านช่องทางจีพีไอบีและช่องทางอนุกรม โดยการเขียนโปรแกรมแลปวิว เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และนำผลการวัดมาประมวลผล และแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

5.1.4 การวัดทดสอบเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ จะพิจารณาใน 2 ลักษณะคือ ความแม่นยำ (accuracy) และความเที่ยง (precision) ของเครื่องมือ โดยพบว่าเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นยังมีความแม่นยำพิจารณาจากวัดค่าสนามลบล้างได้แตกต่างจากค่ามาตรฐานมาก เมื่อพิจารณาความเที่ยงของเครื่องมือพบว่าค่อนข้างดีเนื่องจากสามารถวัดซ้ำได้ค่าการวัดเดิมภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันได้

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

วงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวัด Ni(111) จะมีลักษณะของวงสอดคล้องกันดีกับงานวิจัยอื่น แต่ค่าสนามลบล้างแม่เหล็กไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้เนื่องจากในการวัดฟิล์มจะมีค่าความเป็นแม่เหล็กน้อยกว่าการวัดปริมาตรซึ่งค่าสนามลบล้างแม่เหล็กควรน้อยลงด้วย เปรียบเทียบการวัดสารตัวอย่างที่เป็นปริมาตรทั้งสามชนิดพบว่า สารตัวอย่างที่เป็นผลึกจะให้ผลการวัดที่ดีกว่าสารที่ไม่เป็นผลึก เนื่องจากสารที่เป็นผลึกจะมีโดเมนแม่เหล็กใหญ่และมีทิศของความเป็นแม่เหล็กที่แน่นอนกว่า เปรียบเทียบการวัดเหล็กที่เป็นปริมาตรและเป็นฟิล์มพบว่าแบบฟิล์มจะมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กต่ำกว่าแบบปริมาตร และสามารถสังเกตเห็นวงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE และสถานะความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวได้ชัดเจนกว่า

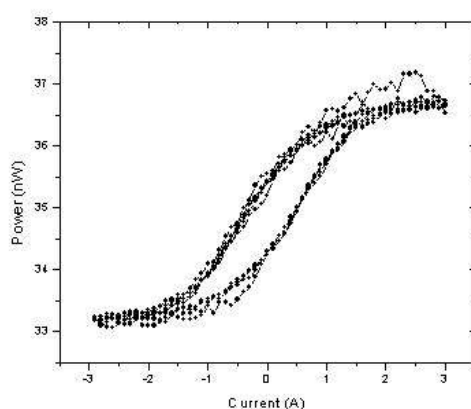
การวัดมุมของเคอร์โดยตรงพิจารณาจากองค์ประกอบการโพลาไรซ์ดังภาพประกอบ 64 และความสัมพันธ์ของความเข้มแสง $I = |E'_s \cos \delta + E'_p \sin \delta|^2$ และ $E'_s = E_p \cos \theta$, $E'_p = E_p \sin \theta$ จะได้ $I = E_p^2 \cos^2 (\delta - \theta)$ โดยความเข้มแสงจะมีค่าต่ำสุดเมื่อ $\delta - \theta = \pi/2$ ดังนั้นมุมของโพลาไรเซอร์วิเคราะห์เพื่อที่จะวัดความเข้มแสงได้ต่ำที่สุดจะเป็น $\delta = \pi/2 + \theta$ เมื่อไม่มีการหมุนของเคอร์จะวัดความเข้มแสงต่ำสุดที่ 90° และเมื่อเกิดการหมุนของเคอร์จะวัดความเข้มแสงต่ำสุดที่มุม $90^\circ \pm \theta$ ในการวัดเมื่อไม่มีการหมุนของเคอร์วัดมุมได้ 2.5078° และเมื่อมีการหมุนของเคอร์วัดมุมได้ 2.8213° จะได้มุมการหมุนของเคอร์เป็น 0.3135° เปรียบเทียบกับค่ามุมการหมุนของเคอร์ในหัวข้อ 2.4.1.1 ซึ่งมีค่าเป็น 0.41° สำหรับเหล็ก โดยจะมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเป็น 23.54 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 59 แสดงองค์ประกอบการโพลาไรซ์ในแนวเอสและพี เมื่อเกิดการหมุนของเคอร์

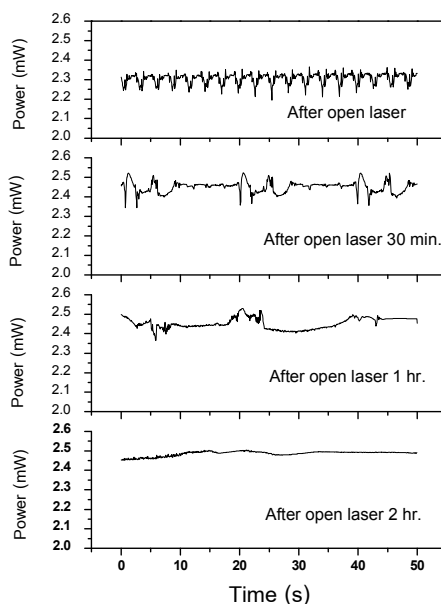
5.3 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของแม่เหล็กไฟฟ้ามีความต้านทานของขดลวดโซเลนอยด์ไม่เหมาะสมกับแหล่งจ่ายกำลังซึ่งค่าที่เหมาะสมควรจะเป็น 1Ω ทั้งสองชุดเพื่อที่จะสามารถใช้กระแสจากแหล่งจ่ายกำลังได้ถึง 20 A ทำให้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงขึ้น แกนแม่เหล็กควรจะใช้วัสดุที่มีค่าแม่เหล็กคงเหลือน้อยที่สุดและควรให้สนามแม่เหล็กสูงสุด เช่น ซูเปอร์เมนเดอร์ (supermendur) หรือวานาเดียมเพอร์เมนเดอร์ (vanadium permendur) เป็นต้น การลดอุณหภูมิของขดลวดมีความจำเป็นเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานของขดลวดจะต่ำลงทำให้ดึงกระแสไปใช้สูงขึ้นบางครั้งแหล่งจ่ายกำลังไม่สามารถรองรับได้อาจเกิดความเสียหายได้จึงควรมีระบบระบายอากาศสำหรับขดลวดโซเลนอยด์โดยเฉพาะเมื่อต้องใช้งานที่กระแสสูง



ภาพประกอบ 60 วงฮิสเทอรีซิสจาก L-MOKE ของโคบอลต์เมื่อวัดซ้ำ 4 รอบ

ในการวัดวงฮิสเทอรีซิสเมื่อทำการวัดวงซ้ำหลายรอบพบว่าเกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณมากดังเช่นภาพประกอบ 65 ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่น่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องคือเสถียรภาพของเลเซอร์ โดยเมื่อเปิดเลเซอร์จะมีการกวัดแกว่งของกำลังแสงมากจนไม่สามารถวัดสัญญาณของเคอร์ได้เมื่อเวลาผ่านไป การกวัดแกว่งจะลดลงจนสามารถวัดสัญญาณของเคอร์ได้ โดยการกวัดแกว่งของเลเซอร์เมื่อเปิดเลเซอร์และเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง จะแสดงดังภาพประกอบ 66 โดยมีความแตกต่างของค่ากำลังแสงเป็น 7.33, 7.30, 6.64 และ 2.09 เปอร์เซ็นต์ การแก้ปัญหาของการกวัดแกว่งของสัญญาณมากจึงควรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์เป็นชนิดที่มีเสถียรภาพของความเข้มแสงสูง



ภาพประกอบ 61 กำลังแสงเลเซอร์ที่แปรค่าตามเวลา เมื่อเปิดเครื่องเลเซอร์ทันที เวลาผ่านไป 30 นาที 1 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- Azzam, R. M. A.; & Bashara, N. M. (1987). *Ellipsometry and Polarized Light*. Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V.
- Bader, S. D.; & Moog, E. R. (1987, April 15). Magnetic Properties of Novel Epitaxial Films (Invited). *Journal of Applied Physics*. 61(8): 3729-3734.
- Bertotti, Giorgio. (1998). *Hysteresis in Magnetism*. San Diego: Academic Press.
- Du Trémolet de Lacheisserie, Étienne; Gignoux, Damien; & Schlenker, Michel, editors. (2002). *Magnetism I – Fundamentals*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
- Du Trémolet de Lacheisserie, Étienne; Gignoux, Damien; & Schlenker, Michel, editors. (2002). *Magnetism II – Materials and Applications*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers.
- Erskine, J. L.; & Stern, E. A. (1973, June 25). Magneto-Optic Kerr Effect in Ni, Co, and Fe. *Physical Review Letters*. 30(26): 1329-1332.
- Hampton, Jenifer R.; Albertos, José Luis Martínez; & Abruna, Héctor D. (2002, August). Development of a Versatile SMOKE System with Electrochemical Applications. *Review of Scientific Instruments*. 73(8): 3018-3021.
- Held, Ruediger. (2008, January 26). *Improving a Vibrating Sample Magnetometer*. Retrieve January 26, 2008. from <http://members.aol.com/RudyHeld/publications/unpublished/VSM/vsm.htm>.
- Hunt, Robert P. (1967, March 15). Magneto-Optic Scattering from Thin Solid Films. *Journal of Applied Physics*. 38(4): 1652-1671.
- Jackson, John David. (1999). *Classical Electrodynamics*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.
- King, Joseph. (2008, January 18). *Direct Current Magnetization Curves for Various Magnetic Materials*. Retrieve January 18, 2008. from http://emat.eng.hmc.edu/database/direct_current_magnetization_cur.htm.

- Lee, J. W.; et al. (2000, October). Three-Configurational Surface Magneto-Optical Kerr Effect Measurement System for an Ultrahigh Vacuum in situ Study of Ultrathin Magnetic Films. *Review of Scientific Instruments*. 71(10): 3801-3805.
- Lorrain, Paul; Corson, Dale R.; & Lorrain, François. (1988). *Electromagnetic Fields and Waves*. 3rd ed. New York: W. H. Freeman and company.
- Nahm, T. U. (2005, June). Magnetic Properties of Ultrathin Ni/Pt(111) Films; a Surface Magneto-Optic Kerr Effect Study. *Journal of the Korean Physical Society*. 46: s197-s200.
- Prutton, M. (1964). *Thin Ferromagnetic Films*. London: Butterworth and Co. (Publishers) Ltd.
- Qiu, Z. Q.; & Bader, S. D. (2000, March). Surface Magneto-Optic Kerr Effect. *Review of Scientific Instruments*. 71(3): 1243-1255.
- Reichl, Irene. (2005). *Theoretical Investigations of Magneto-Optical Properties of Multilayer Systems*. Thesis, Ph.D. (technical science). Vienna: Vienna University of Technology. Photocopied.
- Robinson, Charles C. (1964, October). The Faraday Rotation of Diamagnetic Glasses from $0.334\ \mu$ to $1.9\ \mu$. *Applied Optics*. 3(10): 1163-1166.
- Stern, C. S.; et al. (1998, April). Magnetic Properties of Ni/Pt(111) Thin Films Studied by MOKE. *Chinese Journal of Physics*. 36(2-I): 106-113.
- Stern, C. S.; et al. (1999, March 23). Response and Enhancement of Surface Magneto-Optic Kerr Effect for Co-Pt(111) Ultrathin Films and Surface Alloy. *Surface Science*. 429: L497-L502.
- Yang, Z. J.; & Scheinfein, M. R. (1993, December 1). Combined Three-Axis Surface Magneto-Optical Kerr Effects in the Study of Surface and Ultrathin-Film Magnetism. *Journal of Applied Physics*. 74(11): 6810-6823.
- You, Chun Yeol; & Shin, Sung Chul. (1998, July 1). Generalize Analytic Formulae for Magneto-Optical Kerr Effects. *Journal of Applied Physics*. 84(1): 541-546.
- Yuen, Homan. (2000). *Construction of a Surface Magneto-Optic Kerr Effect Apparatus for the Measurement of Magnetic Properties of Thin Films*. Thesis, B.A. (Physics). Berkeley: University of California at Berkeley. Photocopied.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
โปรแกรมเรเดีย

โปรแกรมเรเดียสำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 1

```
<<Radia`;
<<Graphics`PlotField3D`;

(*Defining the model*)

Off[General::"spell1"];
geom[circ_] := (
  ironcolor={0,0,1};
  coilcolor={1,0,0};

  (*The horizontal segment between the corners*)

  lx1=width/2;ly1=(long-
armlong*2)/2;lz1=bhigh;l1={lx1,ly1,lz1};
  p1={width/4,ly1/2,bhigh/2};
  r1=radObjRecMag[p1,l1];
  radObjDivMag[r1,n1];

  (*The right bottom corner*)

  lx2=width/2;ly2=armlong;lz2=bhigh;l2={lx2,ly2,lz2};
  p2={width/4,p1[[2]]+long/2-armlong,p1[[3]]};
  r2=radObjRecMag[p2,l2];
  typ={"cyl",{p2+{0,-
ly2/2,lz2/2},{1,0,0}},p2+{0,ly2/2,lz2/2},lz2/ly2};

If[circ==1,radObjDivMag[r2,{nbr,nbp,n1[[1]]},typ],radObjDivM
ag[r2,n2]];

  (*The vertical segment inside the right-coil*)

  lx3=width/2;ly3=armlong;lz3=high-bhigh;l3={lx3,ly3,lz3};
  p3={width/4,p2[[2]],high/2+bhigh/2};
  r3=radObjRecMag[p3,l3];
  radObjDivMag[r3,n3];

  (*The right top corner*)

  lx4=width/2;ly4=armlong;lz4=phigh;l4={lx4,ly4,lz4};
  p4={width/4,p1[[2]]+long/2-armlong,high+phigh/2};
  r4=radObjRecMag[p4,l4];
  typ={"cyl",{p4+{0,-ly4/2,-lz4/2},{1,0,0}},p4+{0,ly4/2,-
lz4/2},lz4/ly4};
```

```

If[circ==1,radObjDivMag[r4,{nbr,nbp,n1[[1]]},typ],radObjDivMag[r4,n4]];

(*The right pole face*)

r5=radObjMltExtPgn[{{{30,15},{30,12},{0,12},{0,15}},200},{{{30,15},{30,12},{16,10},{0,10},{0,15}},205},{{{30,15},{30,12},{16,10},{0,10},{0,15}},225},{{{30,15},{30,12},{0,12},{0,15}},230}}];
radObjDivMag[r5,n5];

(*Generation of the righth-coil*)

pc={0,p2[[2]],p3[[3]]+1.5};

rcoil=radObjRaceTrk[pc,{Rmin,Rmax},{width,armlong},coilhigh,Nseg,-CurDens];
radObjDrwAtr[rcoil,coilcolor];

(*Generation of the left-coil*)

pc={0,-p2[[2]],p3[[3]]+1.5};

lcoil=radObjRaceTrk[pc,{Rmin,Rmax},{width,armlong},coilhigh,Nseg,CurDens];
radObjDrwAtr[lcoil,coilcolor];

(*make container and set the colors*)

g=radObjCnt[{r1,r2,r3,r4,r5}];
radObjDrwAtr[g,ironcolor];
radMatApl[g,iron];
t=radObjCnt[{g,rcoil,lcoil}];

(*Define the symmetries*)

RadTrfZerPerp[g,{0,0,0},{1,0,0}];
RadTrfZerPara[g,{0,0,0},{0,1,0}];
);

(*Creating the model and solving*)

(*Geometry parameters for yoke*)

armlong=15;
bhigh=20;
long=60;

```

```

width=60;
high=200;
pwidth=1;
phigh=30;
coilhigh=163;
current=1394*0.5; (*in
Ampere-turns @1394 turns 0.5 A*)

(*Geometry parameters for coil*)

Rmin=1;
Rmax=14;
Nseg=4;
CurDens=current/coilhigh/(Rmax-Rmin);

(*Segmentation Parameters*)

nx=8;
nbp=8;nbr=8; (*for the corners*)
n1={nx,3,8}; (*Horizontal segment*)
n2={nx,2,2}; (*Bottom corner*)
n3={nx,8,20}; (*Vertical segment*)
n4={nx,2,2}; (*Top corner*)
n5={nx,3,8}; (*Pole face*)

(*Build the geometry*)

t0=AbsoluteTime[];
radUtiDelAll[];
iron=RadMatSteel37[]; (*define material of yoke-low carbon
steel C<0.19%*)
geom[1];
size=radObjDegFre[t];

(*Solve the geometry*)

t1=AbsoluteTime[];
res=RadSolve[t,0.0001,1500];
t2=AbsoluteTime[];

(*Print The results*)
b0=radFld[t,"By",{0,0,215}];
Print["Mag_Max H_Max N_Iter = ",N[res][[2]],3]," T
",N[res][[3]],3]," T ",res[[4]]];
Print["Built&Solve in ",Round[t1-t0]," & ",Round[t2-t1],"
seconds"]
Print["Interaction Matrix : ",size," X ",size," or
",N[size*size*4/1000000,6]," Mbytes"]
Print["Number of element : ",size*4/3]

```

```

Print["By = ",N[b0,4]," T"]

ob=t;x=0;z=215;ymax=10;Nn=40;
RadPlotOptions[];
by=radFldLst[ob,"By",{x,-ymax,z},{x,ymax,z},Nn,"arg",-ymax];
ListPlot[by,PlotJoined→True,
  FrameLabel→{"Y [mm]","By [T]","X = 0 mm,Z = 215 mm",""}];

ob=t;x=0;y=0;z=200;Nn=40;
bz=radFldLst[ob,"By",{x,y,z},{x,y,z+30},Nn,"arg",z];
ListPlot[bz,PlotJoined→True,
  FrameLabel→{"Z [mm]","By [T]","X = 0 mm,Y = 0 mm",""}];
bx=radFldLst[ob,"By",{x,-30,215},{x,30,215},Nn,"arg",-30];
ListPlot[bx,PlotJoined→True,
  FrameLabel→{"X [mm]","By [T]","Y = 0 mm,Z = 215 mm",""}];

radObjDrwQD3D[t];
radObjDrwQD3D[g];

ob=t;
pl=Plot3D[radFld[ob,"By",{x,0,z}],{x,-
30,30},{z,200,230},AxesLabel→{"X[mm]","Z[mm]","By[T]"}];
data3D=Table[radFld[ob,"By",{i,0,j}],{i,-
30,30},{j,200,230}];
dataX=Table[radFld[ob,"By",{i,0,215}],{i,-30,30}];
dataY=Table[radFld[ob,"By",{0,i,215}],{i,-30,30}];
dataZ=Table[radFld[ob,"By",{0,0,j}],{j,200,230}];

draw=radObjDrw[t];
RadPlot3DOptions[];
Show[Graphics3D[draw],ViewPoint→{8,-
3,3},PlotRange→All,AmbientLight→GrayLevel[0.1]];

```

โปรแกรมเรเดียสำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 2

```

<<Radia`;
<<Graphics`PlotField3D`;

(*Defining the model*)

Off[General::"spell1"];
geom[circ_] := (
  ironcolor={0,0,1};
  coilcolor={1,0,0};

  (*The horizontal segment between the corners*)

  lx1=width/2;ly1=(long-
armlong*2)/2;lz1=bhigh;l1={lx1,ly1,lz1};
  p1={width/4,ly1/2,bhigh/2};
  r1=radObjRecMag[p1,l1];
  radObjDivMag[r1,n1];

  (*The right bottom corner*)

  lx2=width/2;ly2=armlong;lz2=bhigh;l2={lx2,ly2,lz2};
  p2={width/4,p1[[2]]+long/2-armlong,p1[[3]]};
  r2=radObjRecMag[p2,l2];
  typ={"cyl",{p2+{0,-
ly2/2,lz2/2},{1,0,0}},p2+{0,ly2/2,lz2/2},lz2/ly2};

If[circ==1,radObjDivMag[r2,{nbr,nbp,n1[[1]]},typ],radObjDivM
ag[r2,n2]];

  (*The vertical segment inside the right-coil*)

  lx3=width/2;ly3=armlong;lz3=high-bhigh;l3={lx3,ly3,lz3};
  p3={width/4,p2[[2]],high/2+bhigh/2};
  r3=radObjRecMag[p3,l3];
  radObjDivMag[r3,n3];

  (*The right pole face*)

  lx4=width;ly4=armlong;lz4=phigh;l4={lx4,ly4,lz4};
  k1={{width/4,p3[[2]]+armlong/2-
pwidth/2,lz4+high},{width/2,pwidth}};
  k2={{width/4,p3[[2]]-4,high},{width/2,ly4+8}};
  r4=radObjMltExtRtg[{k1,k2}];

```

```

radObjDivMag[r4,n4];

(*Generation of the righth-coil*)

pc={0,p2[[2]],p3[[3]]+1.5};

rcoil=radObjRaceTrk[pc,{Rmin,Rmax},{width,armlong},coilhigh,
Nseg,-CurDens];
radObjDrwAtr[rcoil,coilcolor];

(*Generation of the left-coil*)

pc={0,-p2[[2]],p3[[3]]+1.5};

lcoil=radObjRaceTrk[pc,{Rmin,Rmax},{width,armlong},coilhigh,
Nseg,CurDens];
radObjDrwAtr[lcoil,coilcolor];

(*make container and set the colors*)

g=radObjCnt[{r1,r2,r3,r4}];
radObjDrwAtr[g,ironcolor];
radMatApl[g,iron];
t=radObjCnt[{g,rcoil,lcoil}];

(*Define the symmetries*)

RadTrfZerPerp[g,{0,0,0},{1,0,0}];
RadTrfZerPara[g,{0,0,0},{0,1,0}];
);

(*Creating the model and solving*)

(*Geometry parameters for yoke*)

armlong=15;
bhigh=20;
long=60;
width=60;
high=200;
pwidth=1;
phigh=5;
coilhigh=163;
current=1394*1.5;
Ampere-turns @1394 turns 0.5 A*)

(*Geometry parameters for coil*)

Rmin=1;
Rmax=14;

```

```

Nseg=4;
CurDens=current/coilhigh/(Rmax-Rmin);

(*Segmentation Parameters*)

nx=8;
nbp=6;nbr=6; (*for the corners*)
n1={nx,4,6}; (*Horizontal segment*)
n2={nx,2,2}; (*Bottom corner*)
n3={nx,6,30}; (*Vertical segment*)
n4={nx,5,2}; (*Pole face*)

(*Build the geometry*)

t0=AbsoluteTime[];
radUtiDelAll[];
iron=RadMatSteel42[]; (*define material of yoke-low carbon
steel C<0.13%*)
geom[1];
size=radObjDegFre[t];

(*Solve the geometry*)

t1=AbsoluteTime[];
res=RadSolve[t,0.0001,1500];
t2=AbsoluteTime[];

(*Print The results*)
b0=radFld[t,"By",{0,0,206}];
Print["Mag_Max H_Max N_Iter = ",N[res[[2]],3]," T
",N[res[[3]],3]," T ",res[[4]]];
Print["Built&Solve in ",Round[t1-t0]," & ",Round[t2-t1],"
seconds"]
Print["Interaction Matrix : ",size," X ",size," or
",N[size*size*4/1000000,6]," Mbytes"]
Print["Number of element : ",size*4/3]
Print["By = ",N[b0,4]," T"]

ob=t;x=0;z=206;ymax=30;Nn=40;
RadPlotOptions[];
by=radFldLst[ob,"By",{x,-ymax,z},{x,ymax,z},Nn,"arg",-ymax];
ListPlot[by,PlotJoined->True,
FrameLabel->{"Y [mm]","By [T]","X = 0 mm,Z = 206 mm",""}];

ob=t;x=0;y=0;z=200;Nn=40;
bz=radFldLst[ob,"By",{x,y,z},{x,y,z+30},Nn,"arg",z];
ListPlot[bz,PlotJoined->True,
FrameLabel->{"Z [mm]","By [T]","X = 0 mm,Y = 0 mm",""}];

```

```

bx=radFldLst[ob,"By",{ -30,0,206},{ 30,0,206},Nn,"arg",-30];
ListPlot[bx,PlotJoined→True,
  FrameLabel→{"X [mm]","By [T]","Y = 0 mm,Z = 206 mm",""}];

radObjDrwQD3D[t];
radObjDrwQD3D[g];

ob=t;
pl=Plot3D[radFld[ob,"By",{x,y,206}],{x,-30,30},{y,-
30,30},AxesLabel→{"X[mm]","Z[mm]","By[T]"}];
data3D=Table[radFld[ob,"By",{i,j,206}],{i,-30,30},{j,-
30,30}];
dataX=Table[radFld[ob,"By",{i,0,206}],{i,-30,30}];
dataY=Table[radFld[ob,"By",{0,i,206}],{i,-30,30}];
dataZ=Table[radFld[ob,"By",{0,0,j}],{j,200,230}];

draw=radObjDrw[t];
RadPlot3DOptions[];
Show[Graphics3D[draw],ViewPoint→{8,-
3,3},PlotRange→All,AmbientLight→GrayLevel[0.1]];

```

ภาคผนวก ข
โปรแกรมแลปวิว

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล นายสุรเชษฐ์ รัตนสุพร
 วันเดือนปีเกิด 22 มิถุนายน 2515
 สถานที่เกิด อ.ท่าวังผา จ.น่าน
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 64/125 ถ.ทวีวัฒนา แขวงทวีวัฒนา เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10170

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2533 มัธยมศึกษาตอนปลาย
 จากโรงเรียนสามัคคีวิทยาคม จ.เชียงราย
 พ.ศ. 2545 วท.บ. (สาขาวิชาฟิสิกส์)
 จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง
 พ.ศ. 2551 วท.ม. (สาขาวิชาฟิสิกส์)
 จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ