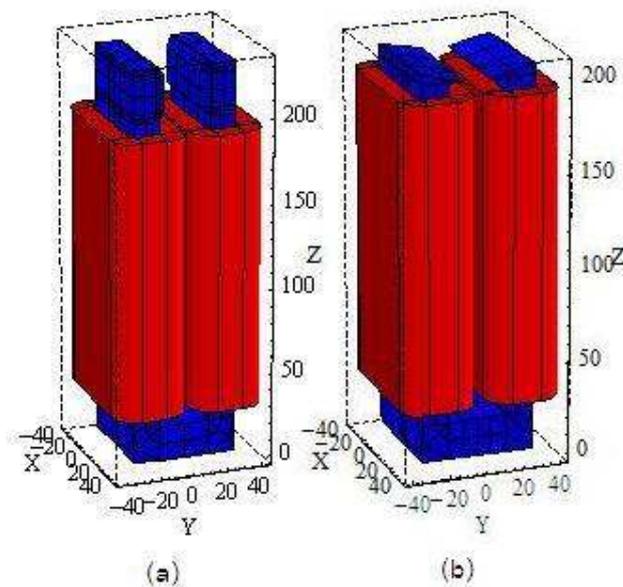


บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 การเปรียบเทียบผลการคำนวณสนามแม่เหล็กระหว่างจำลองแม่เหล็กไฟฟ้าโดยชุดคำสั่งเรเดียและผลการวัดโดยหัววัดฮอลล์

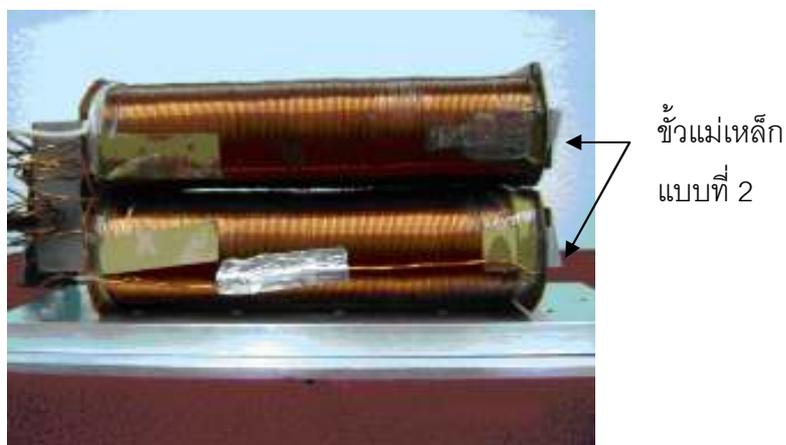
แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนำรูปแบบและขนาดมาจากแบบจำลองโดยชุดคำสั่งเรเดียที่ให้ค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่วัดสารได้ประมาณ 1000 G โดยแม่เหล็กไฟฟ้ามีลักษณะดังนี้ ขนาดของแกนแม่เหล็กกว้าง 60 mm ยาว 60 mm และสูง 200 mm ขนาดของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 กว้าง 20 mm ยาว 60 mm สูง 30 mm ขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 กว้าง 23 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

เส้นลวดทองที่ใช้ทำขดลวดโซเลนอยด์เป็นลวดทองแดงเคลือบฉนวนโพลียูรีเทนขนาดเกจเส้นลวดมาตรฐาน 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 $697 \text{ A}\cdot\text{turns}$ สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 1 และ $2091 \text{ A}\cdot\text{turns}$ สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 2 และจำนวนสมาชิก (element) ที่จะแบ่งแกนของแม่เหล็กและขดลวดโซเลนอยด์ออกเป็นส่วนๆ เท่ากับ 13152 ส่วน สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 8256 ส่วน สำหรับแม่เหล็กแบบที่ 2 โดยรหัสต้นฉบับ (source code) ของชุดคำสั่งเรเดียสำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และแบบที่ 2 แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

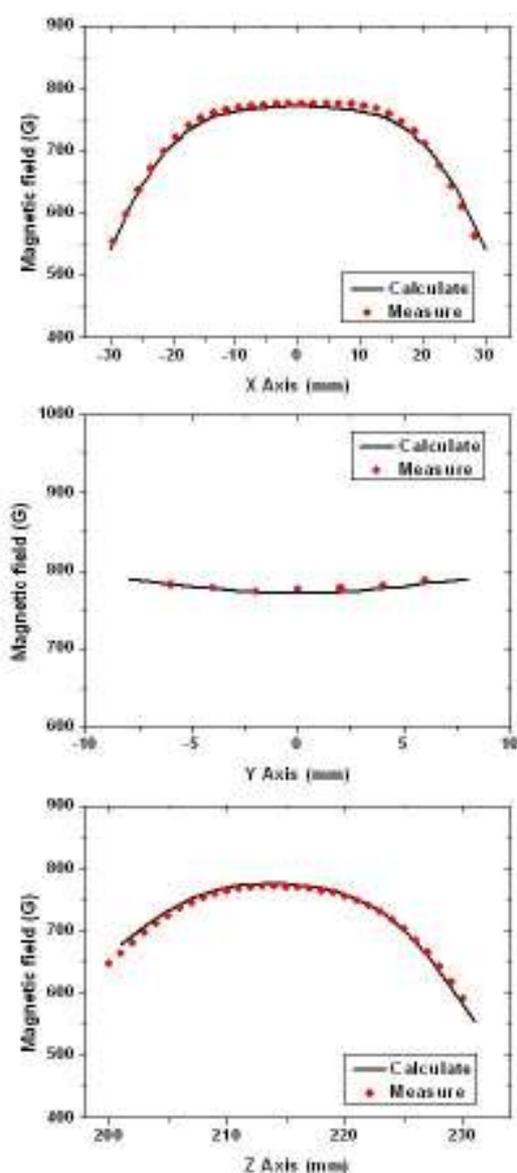
แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองแสดงดังภาพประกอบ 31 ทั้งนี้สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้สูงสุด 2123.573 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 และ 983.935 G สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ณ ตำแหน่งพิกัด (0,0,215) โดยใช้กระแสประมาณ 5.5 A ซึ่งเป็นกระแสสูงสุดที่ไหลสามารถดึงกระแสจากแหล่งจ่ายกำลังได้



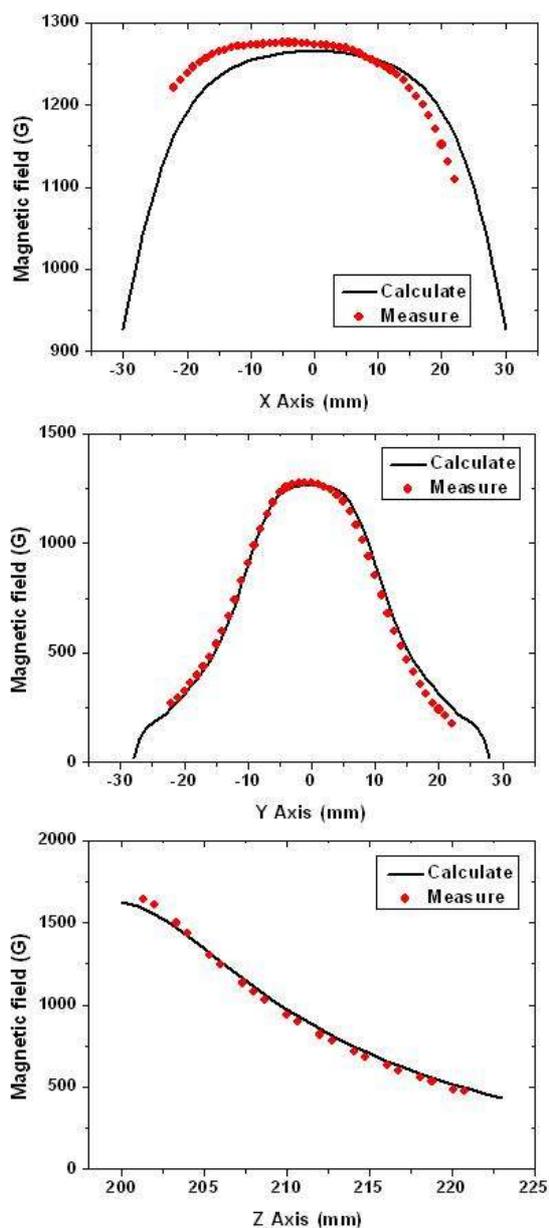
ภาพประกอบ 31 แม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นซึ่งมีขั้วแม่เหล็กเป็นแบบที่ 2

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 ได้ตั้งภาพประกอบ 32 และสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ได้ตั้งภาพประกอบ 33 ซึ่งพบว่าแนวโน้มของค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณจากชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วยหัววัดฮอลล์จะสอดคล้องกัน แต่จะมีความแตกต่างของค่าสนามแม่เหล็กทั้งสามแนวแกนสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 ประมาณ 0.89 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างของค่าสนามแม่เหล็กทั้งสามแนวแกนสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 ประมาณ 2.7 เปอร์เซ็นต์



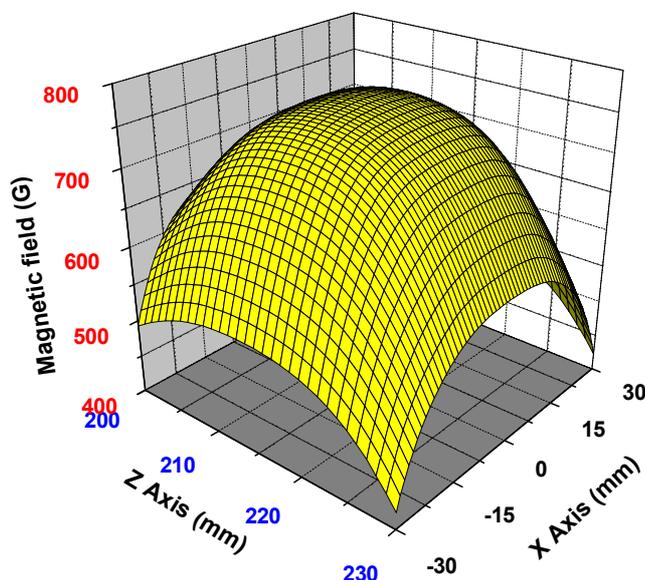
ภาพประกอบ 32 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วยหัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



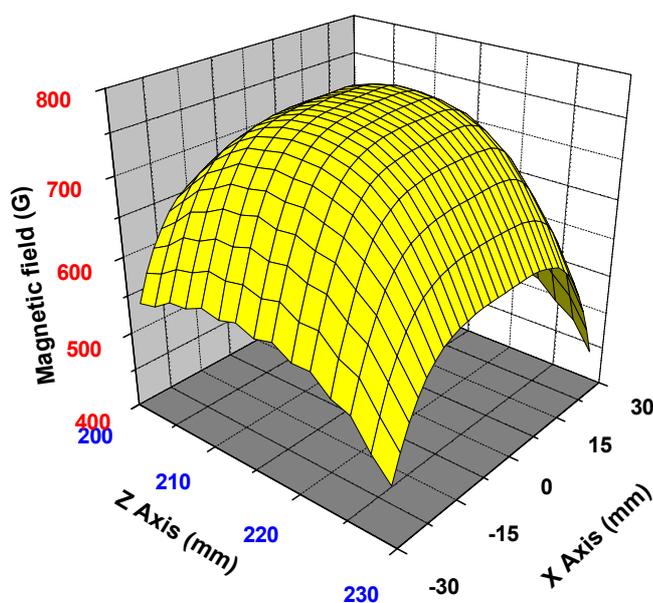
ภาพประกอบ 33 การเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณโดยชุดคำสั่งเรเดียและการวัดด้วยหัววัดฮอลล์ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

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

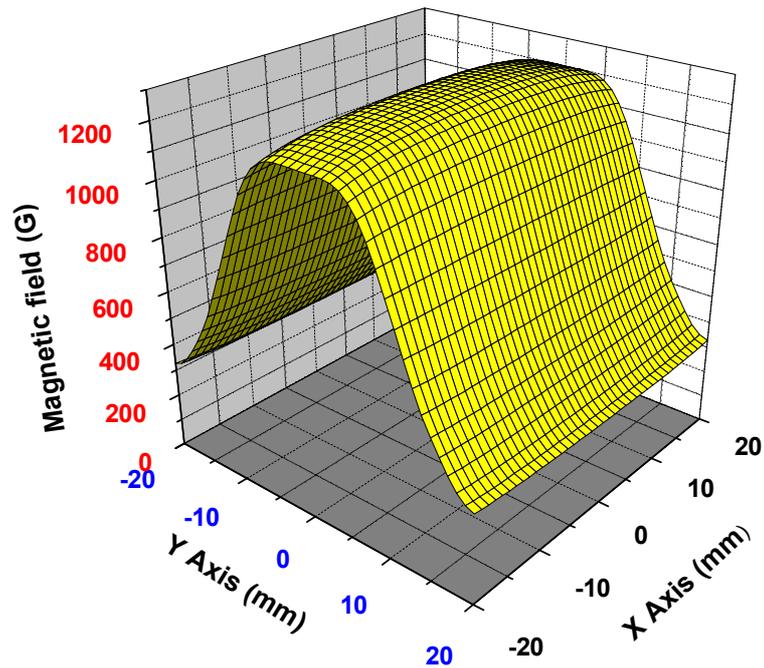
เทียบกับระยะทางตามแนวแกน x และ y ที่ตำแหน่ง $z = 206 \text{ mm}$ ได้ดังภาพประกอบ 36 และผลการวัดดังภาพประกอบ 37 ซึ่งจะให้เห็นผิวนี้แทนแนวเส้นแรงสนามแม่เหล็ก



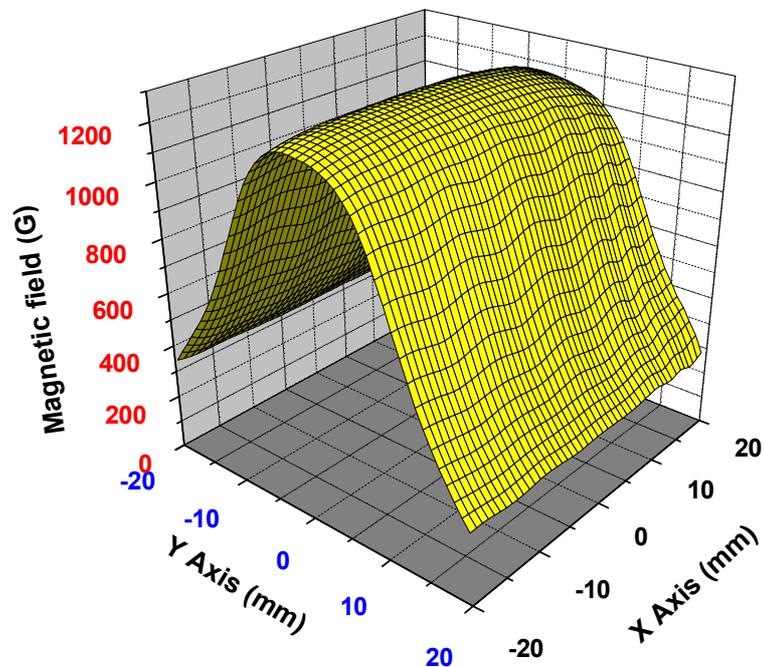
ภาพประกอบ 34 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการคำนวณจากชุดค่าสั่งเรเดียเทียบกับระยะบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



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



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

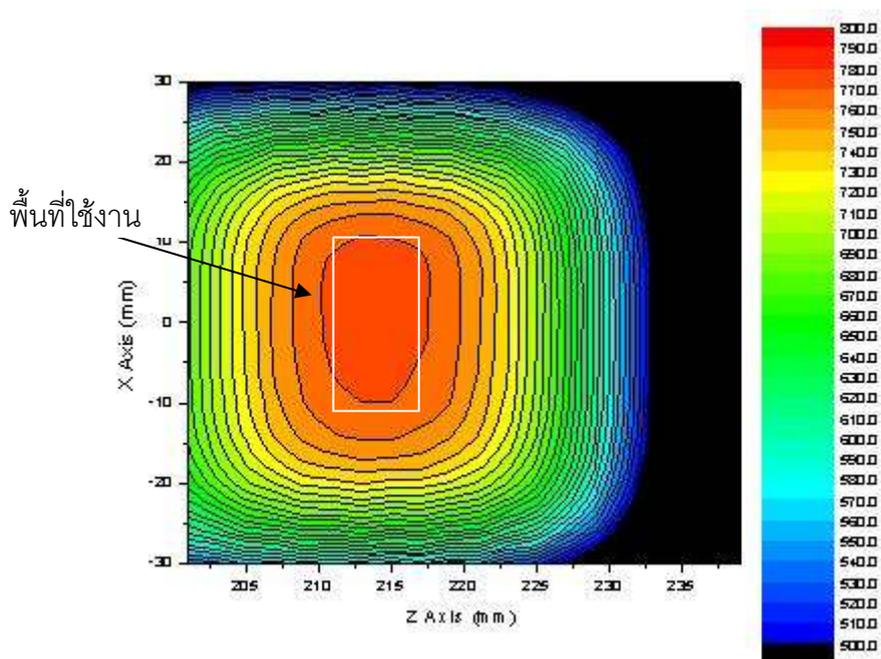


ภาพประกอบ 37 พื้นผิวสามมิติขององค์ประกอบของสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y โดยการวัดด้วยหัววัดฮอลล์เทียบกับระบะบนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง $z = 206$ สำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

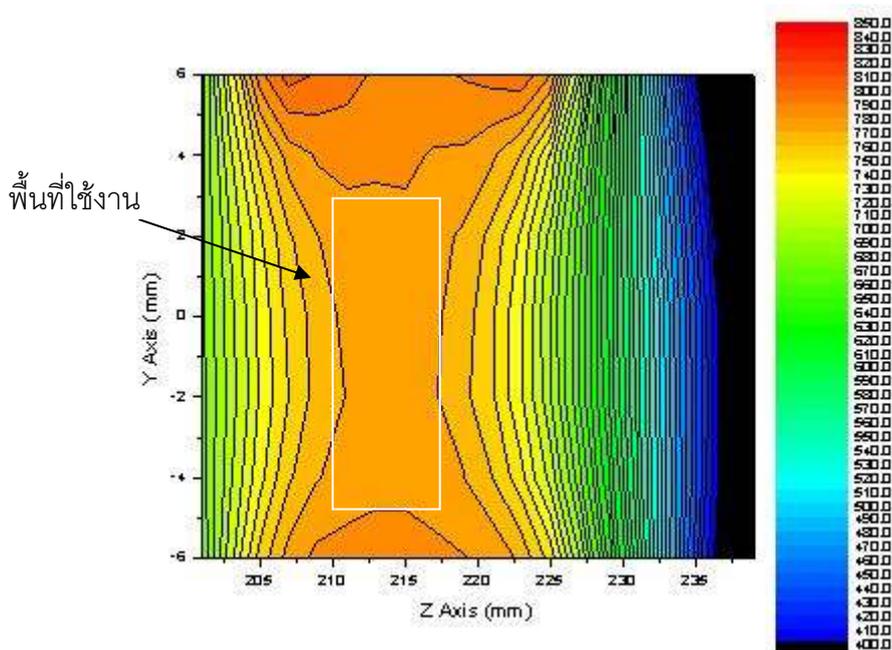
การพิจารณาพื้นที่ใช้งานในการวัดสารตัวอย่างซึ่งจะต้องเป็นบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กคงที่ จากแผนภาพสองมิติขององค์ประกอบสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y บนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ สำหรับการวัด P-MOKE และองค์ประกอบสนามแม่เหล็กตามแนวแกน y บนระนาบ yz ที่ตำแหน่ง $x = 0$ สำหรับการวัด L-MOKE สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 1 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 เฟอร์เซ็นต์ สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 2 จะมีความเรียบตามแนวแกน x มีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างประมาณ 15 mm ตามแนวแกน z มีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างประมาณ 2 mm โดยมีพื้นที่สำหรับการวัดสารตัวอย่างประมาณ 30 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.96 เฟอร์เซ็นต์

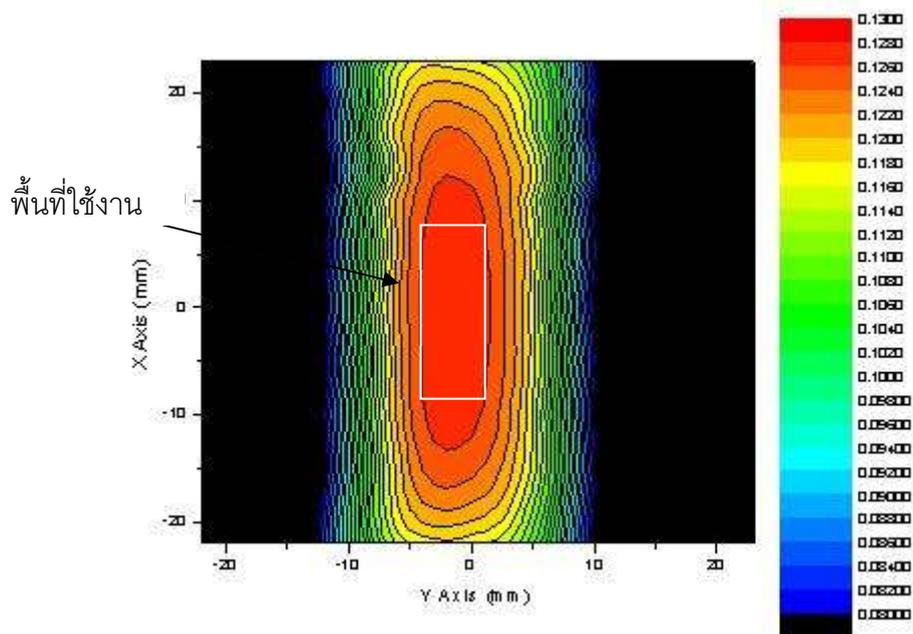
ในการวัด L-MOKE จะพิจารณาระนาบ yz สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 1 โดยจะมีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างตามแนวแกน y ประมาณ 7 mm และระยะตามแนวแกน z ประมาณ 5 mm มีพื้นที่ใช้งานได้ประมาณ 35 mm^2 ซึ่งในบริเวณนี้จะมีความแตกต่างของสนามแม่เหล็กประมาณ 1.29 เฟอร์เซ็นต์ สำหรับหัวแม่เหล็กแบบที่ 2 จะพิจารณาระนาบ xy โดยจะมีระยะสำหรับใช้วัดสารตัวอย่างตามแนวแกน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



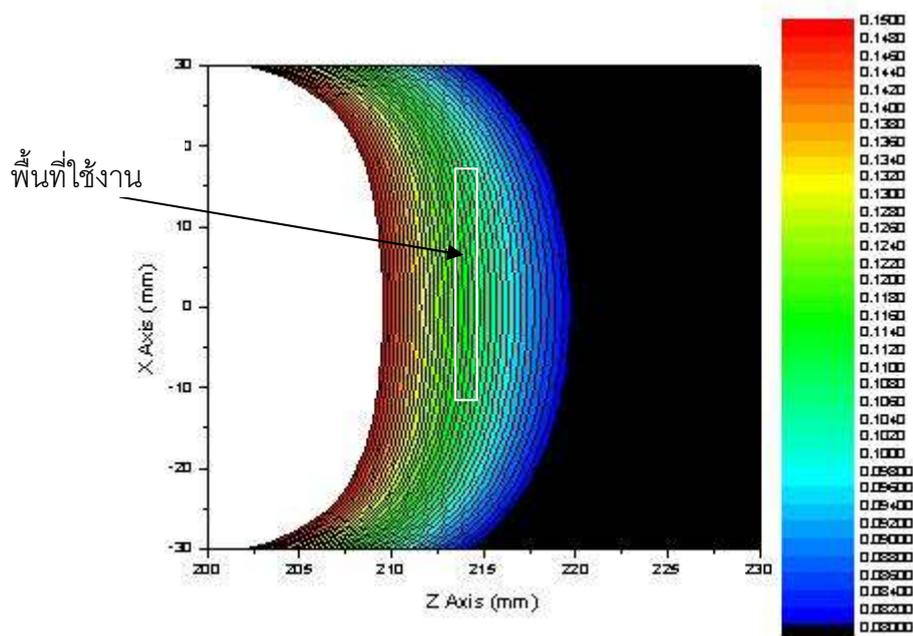
ภาพประกอบ 38 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xz ที่ตำแหน่ง $y = 0$ ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1



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



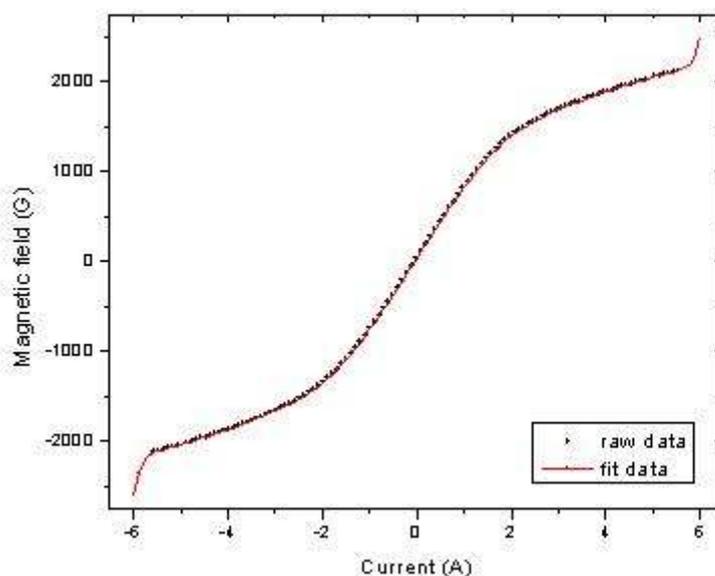
ภาพประกอบ 40 แผนภาพสองมิติของสนามแม่เหล็กสร้างขึ้นจากการวัดองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศตามแนวแกน y เทียบกับตำแหน่งบนระนาบ xy ที่ตำแหน่ง $z = 206$ mm ของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2



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

4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสนามแม่เหล็กกับค่ากระแส

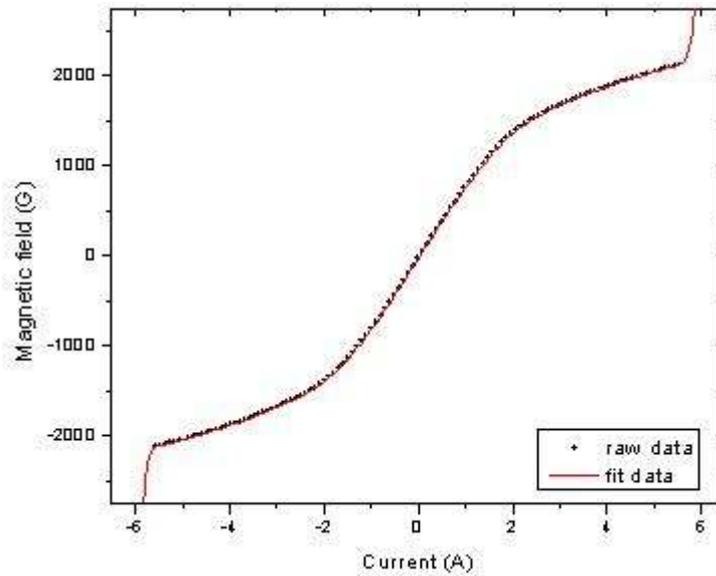
การวัดค่าสนามแม่เหล็กจะใช้หัววัดฮอลล์ วัดที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็กที่พิกัด (0,0,215) โดยเปลี่ยนแปลงค่ากระแสจาก 0 ถึง 5.5 A จากนั้นลดกระแสจาก 5.5 A จนถึง -5.5 A แล้วเพิ่มกระแสจาก -5.5 A ไปจนถึง 5.5 A โดยใช้อัตราการเพิ่ม-ลดกระแสครั้งละ 0.1 A ซึ่งจะได้ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและสนามแม่เหล็ก จากนั้นใช้การประมาณแบบโพลีโนเมียล กับข้อมูลที่ได้เพื่อสร้างฟังก์ชันของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับสนามแม่เหล็ก โดยจะได้ผลการวัดและการใช้การประมาณแบบโพลีโนเมียลสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 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 และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1

โดยจะได้ฟังก์ชันเพื่อแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 เมื่อลดกระแส คือ

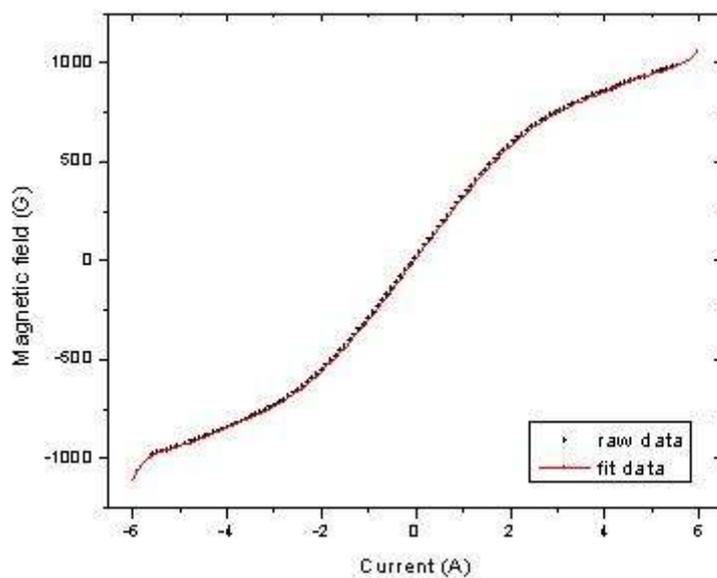
$$\begin{aligned}
 B(I) = & 34.0606 + 819.123I + 2.92895I^2 - 26.7439I^3 - 3.00009I^4 - 3.84336I^5 + \\
 & 0.587236I^6 + 0.766676I^7 - 0.0566409I^8 - 0.0574324I^9 + 0.00309659I^{10} + \\
 & 0.00221991I^{11} - 0.00009777I^{12} - 0.0000438088I^{13} + 1.6648 \times 10^{-6} I^{14} + \\
 & 3.49338 \times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



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

ฟังก์ชันเพื่อแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 1 เมื่อเพิ่มกระแส คือ

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

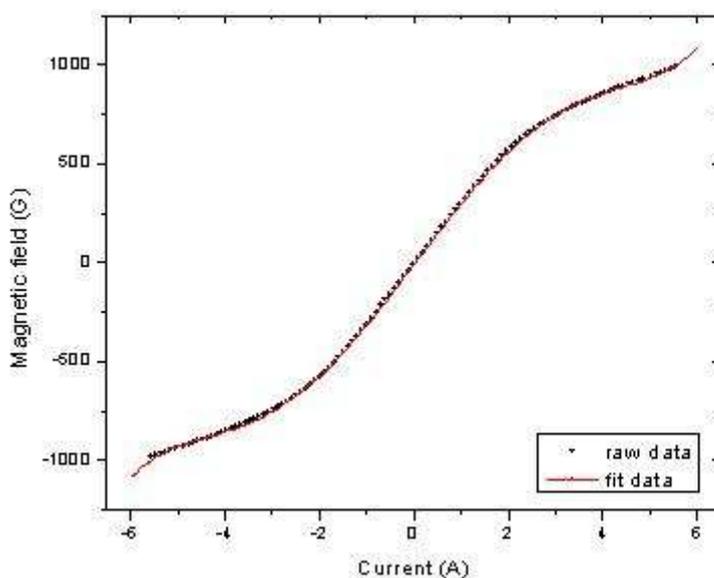


ภาพประกอบ 44 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อลดกระแสจาก 5 A ไปถึง -5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2

ฟังก์ชันเพื่อแปลงค่ากระแสเป็นสนามแม่เหล็กสำหรับขั้วแม่เหล็กแบบที่ 2 เมื่อลดกระแส คือ

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

(4.5)



ภาพประกอบ 45 ผลการวัดสนามแม่เหล็กที่แปรค่าตามกระแส เมื่อเพิ่มกระแสจาก -5 A ไปถึง 5 A และการประมาณข้อมูลแบบโพลีโนเมียลของขั้วแม่เหล็กแบบที่ 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

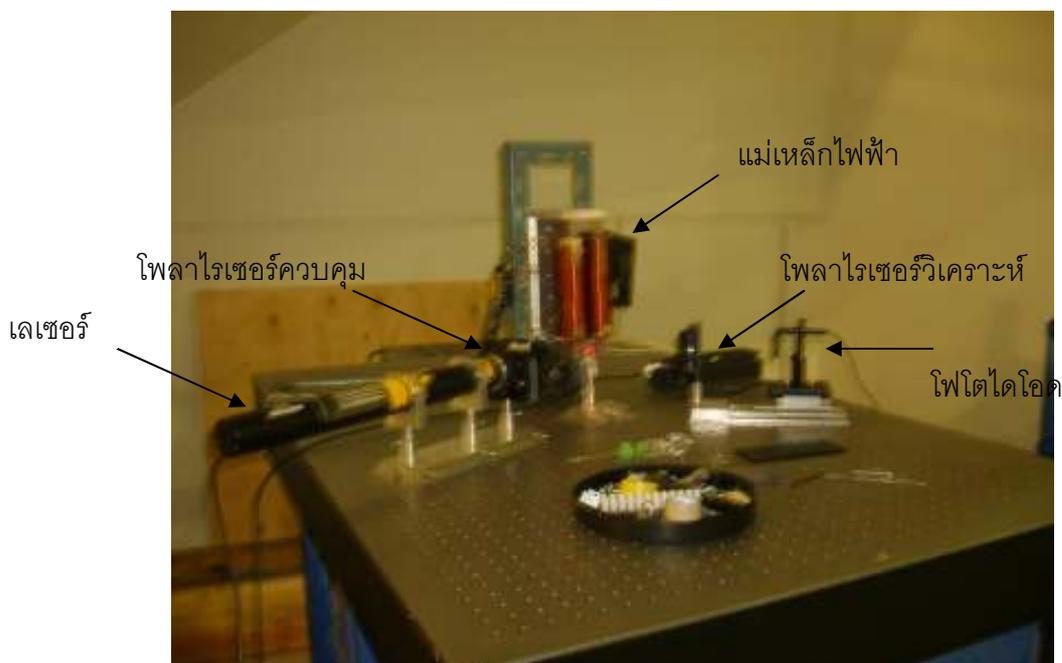
ตำแหน่งตรงกลางระหว่างขั้วแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น G

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-เลเซอร์เนื่องจากเป็นโพลาริเซอร์ที่มีเส้นแรงแนวนระนาบของการโพลาริเซอร์อยู่ด้วย จึงทำให้สะดวกต่อการตรวจสอบระนาบของการโพลาริเซอร์ของแสงตกกระทบ 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



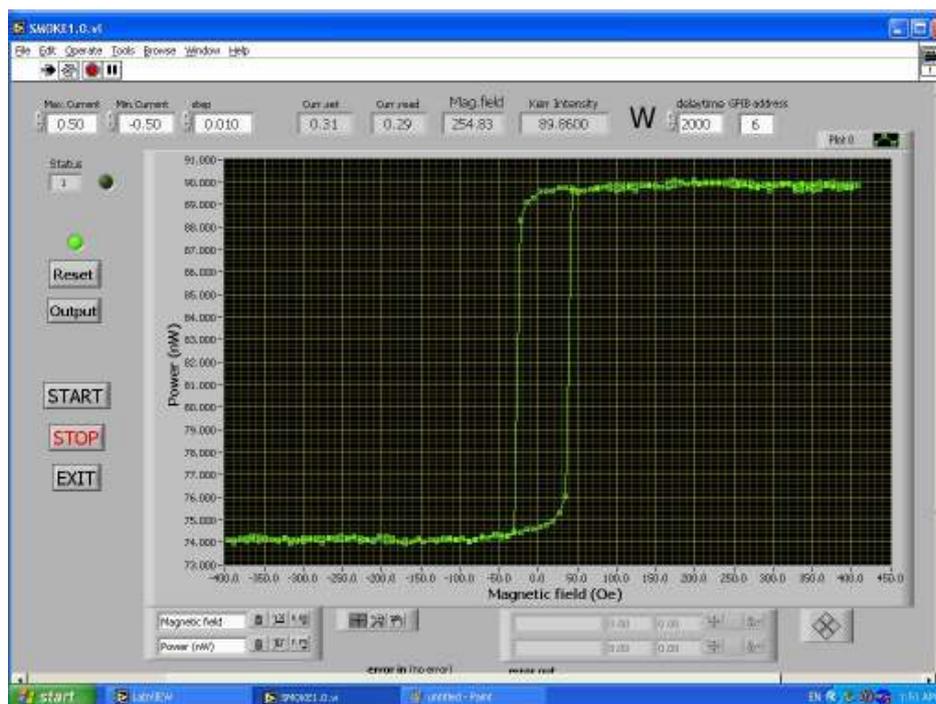
ภาพประกอบ 46 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด L-MOKE

จากนั้นจะทำการต่อสาย RS 232 จากชุดควบคุมไฟโตไดโอดเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ หลังจากติดตั้งระบบการวัด MOKE เรียบร้อยแล้วจะทำการต่อประสานระบบเพื่อควบคุมและประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมแลบวิวซึ่งมีหน้าต่างการทำงานดังภาพประกอบ 48



ภาพประกอบ 47 องค์ประกอบและการจัดวางอุปกรณ์ของระบบการวัด P-MOKE ของหัวแม่เหล็กแบบที่ 2

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

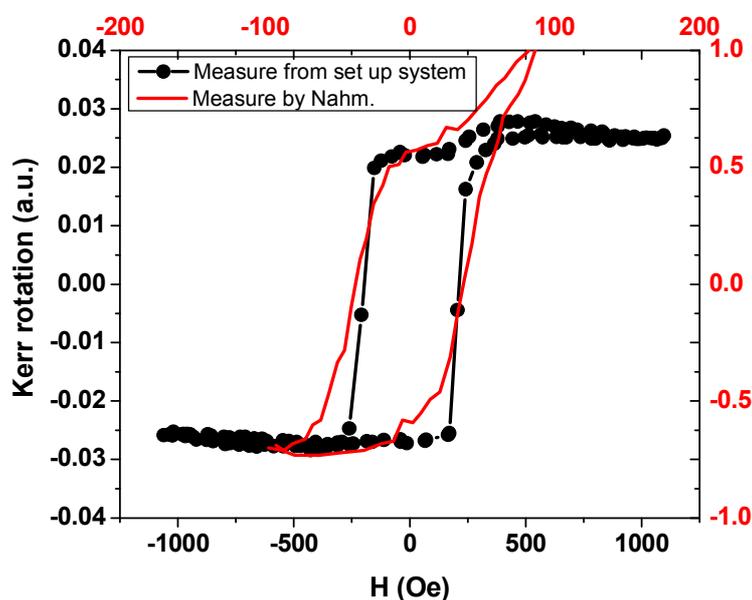
วงฮิสเทอรีซิสของผลึกเดี่ยวของ Ni(111)

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

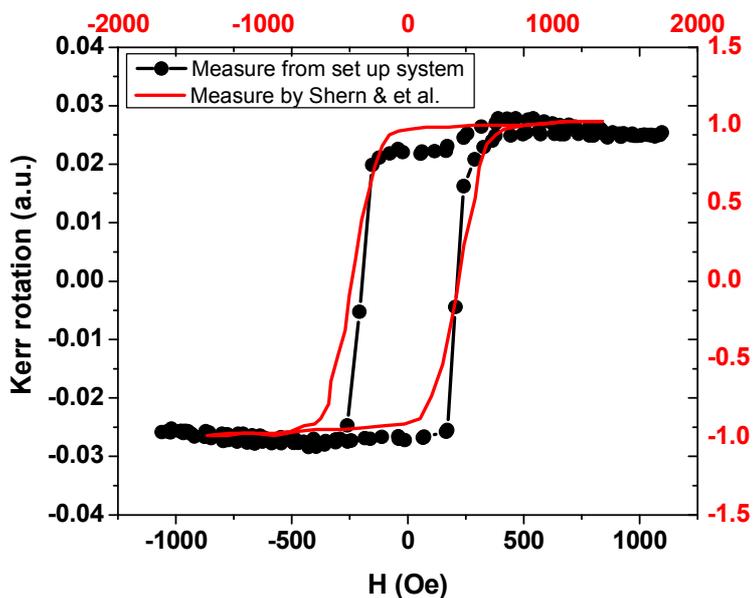
จากการเปรียบเทียบวงฮิสเทอรีซิสพบว่าลักษณะของวงมีความคล้ายคลึงกัน แต่ค่าสนามลบข้างแม่เหล็กมีความแตกต่างกันมาก โดยจากผลการวัดทดสอบเครื่องมือซึ่งวัดทดสอบนิกเกิลแบบ

ปริมาตรจะได้ H_c ประมาณ 200 G ในขณะที่ฟิล์มที่เกิดที่ปลูกบนแพลทินัมนะนาบ (111) หนา 7.4 ไมโนเลเยอร์ มี H_c ประมาณ 43 G

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

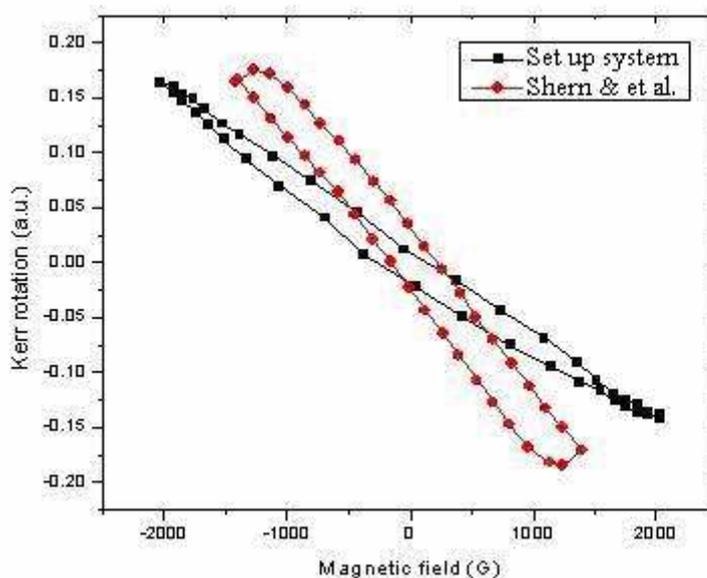


ภาพประกอบ 49 วงฮิสเทอริซิสจากการวัด L-MOKE ของผลึกเดี่ยว Ni (111) เปรียบเทียบกับฟิล์ม 7.4ML Ni/Pt(111) ซึ่งวัดที่อุณหภูมิต่ำ



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

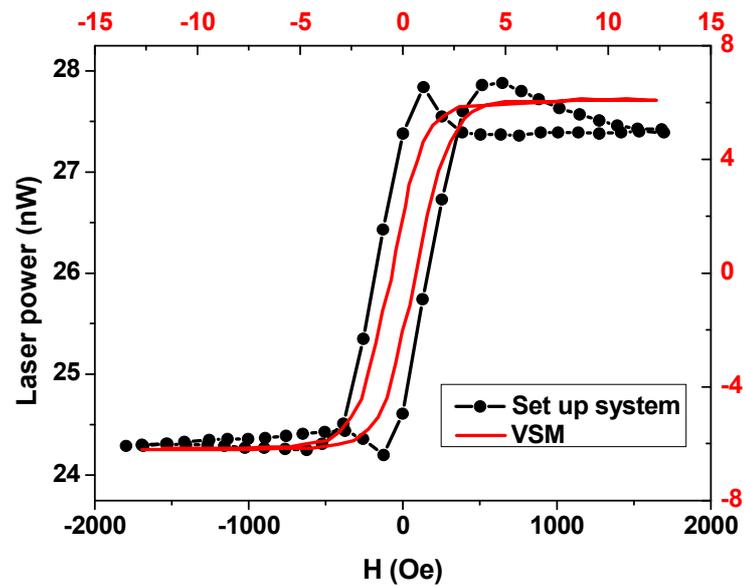
วงฮิสเทอริซิสของ P-MOKE ของ Ni(111) ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.5 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° เปรียบเทียบกับผลการวัดความรีของเคอร์ของฟิล์มที่เกิดปลุกบนแพลทินัมระนาบ (111) (Shern; et al. 1998: 110) เป็นดังภาพประกอบ 51 พบว่าจะไม่แสดงสถานะการอิมของความเป็นแม่เหล็กที่สนามแม่เหล็กประมาณ 1500 G เหมือนกัน และมีค่าสนามลบล้างแม่เหล็กเป็น 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)

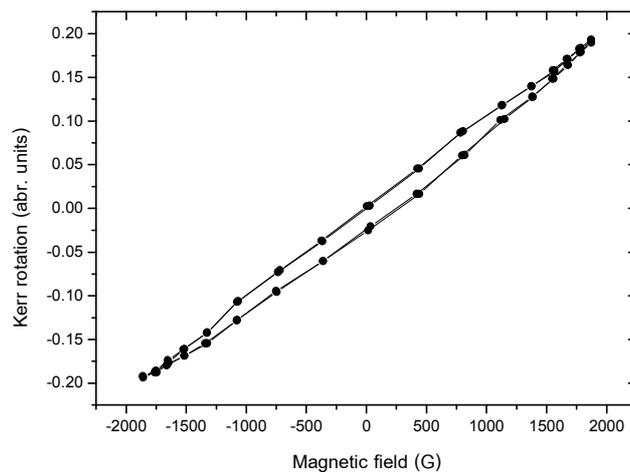
วงฮิสเทอรีซิสของเหล็ก

วงฮิสเทอรีซิสของ L-MOKE ของเหล็ก ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนแปลงกระแส 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

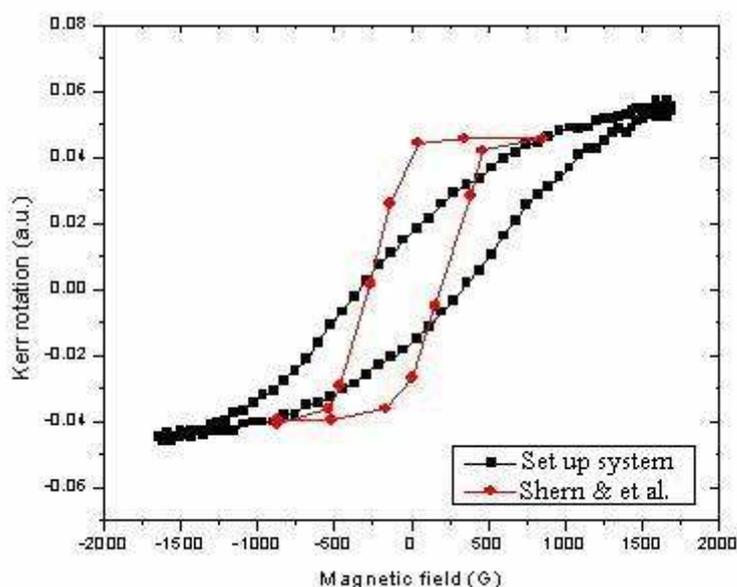
วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ P-MOKE ของเหล็ก ที่กระแสสูงสุด 4 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.5 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° จะเป็นดังภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 53 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของเหล็ก

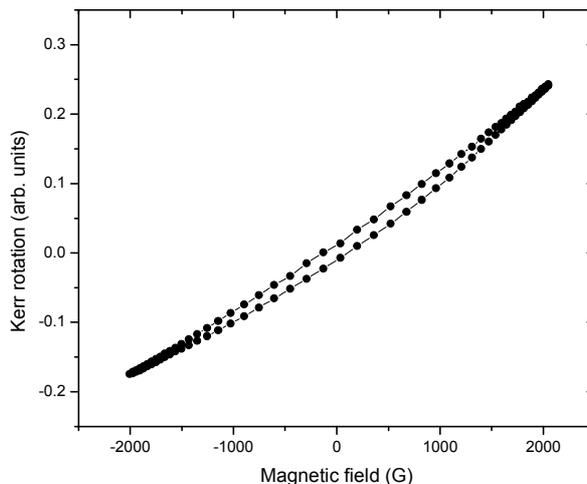
วงฮิสเทอรีซิสของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%)

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 พบว่าลักษณะรูปร่างของวงใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสนามลบ ล้างแม่เหล็กของโคบอลต์ประมาณ 360 G ในขณะที่ของฟิล์มโคบอลต์มีค่าประมาณ 260 G มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 38.5 เปอร์เซ็นต์



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

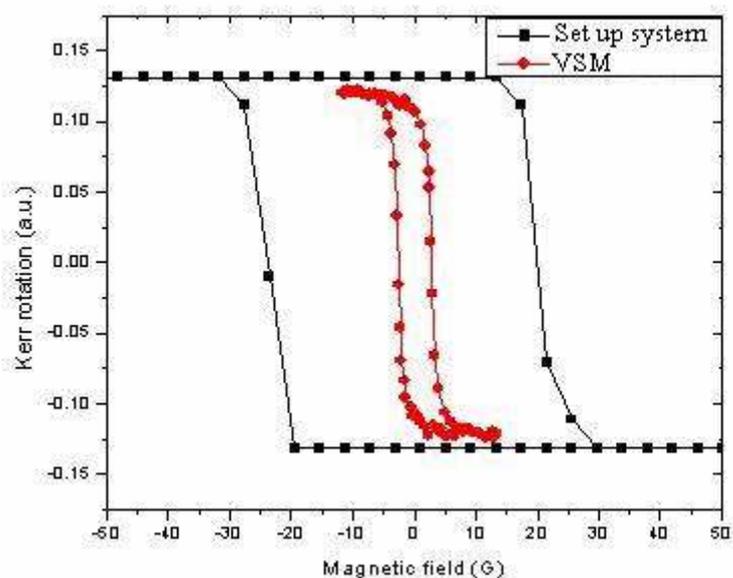
วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณ P-MOKE ของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%) ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.2 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° จะเป็นดังภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 55 วงฮิสเทอรีซิสของปรากฏการณ์ของเคอร์รด้านทัศนศาสตร์แม่เหล็กแบบเชิงขั้วของโคบอลต์บริสุทธิ์ (99.995%)

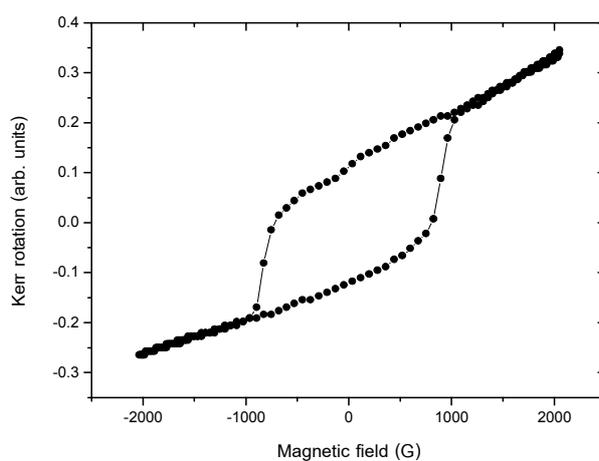
วงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å

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 7000Å

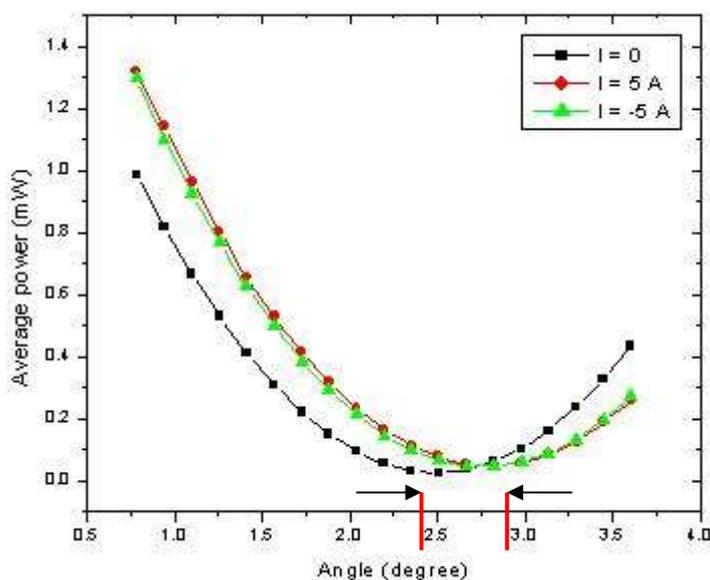
วงฮิสเทอรีซิสของสัญญาณของเคอร์ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å ที่กระแสสูงสุด 5 A อัตราการเปลี่ยนกระแส 0.1 A ไม่มีการเลื่อนเวลา มุมของตัววิเคราะห์ 90° จะเป็นดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 57 วงฮิสเทอรีซิสของ P-MOKE ของฟิล์มเหล็กหนา 1100 Å

4.3.2 การวัดมุมการหมุนของเคอร์โดยการปรับมุมโพลาริเซชัน

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังแสงเลเซอร์และมุมองโพลาริเซชันเมื่อไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอกกับสารตัวอย่าง เมื่อให้สนามแม่เหล็กที่กระแสคงที่ 5 A และเมื่อให้สนามแม่เหล็กที่กระแสคงที่ -5 A เป็นดังภาพประกอบ 60 พบว่าการวัดกำลังแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากผิวสารตัวอย่างที่ลบด้านความเป็นแม่เหล็ก (demagnetize) โดยยังไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก เมื่อปรับมุมโพลาริเซชันจาก 1° ไปถึง 3.5° จะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุม 2.5078° และเมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกโดยจ่ายกระแสคงที่ 5 A วัดกำลังแสงโดยปรับมุมโพลาริเซชันจะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาเช่นกันแต่จะเลื่อนไปทางขวามือซึ่งมีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุม 2.8213° โดยมีความต่างของมุมเป็น 0.3135° เมื่อให้สนามแม่เหล็กภายนอกโดยจ่ายกระแสคงที่ -5 A วัดกำลังแสงโดยปรับมุมโพลาริเซชันจะได้เส้นโค้งของกำลังแสงเป็นแบบพาราโบลาที่อยู่ตำแหน่งเดียวกับเส้นโค้งของกระแส 5 A มีจุดต่ำสุดอยู่ที่มุมเดียวกัน และมีความต่างของมุมเท่ากัน



ภาพประกอบ 58 การเปลี่ยนแปลงของกำลังแสงเลเซอร์ที่ตกบนโฟโตไดโอดแปรค่าตามการเปลี่ยนแปลงมุมของโพลาริเซชัน เมื่อไม่ให้สนามแม่เหล็กภายนอก ให้สนามแม่เหล็กที่กระแสคงที่ 5 A และให้สนามแม่เหล็กที่กระแสคงที่ -5 A ของเหล็ก