

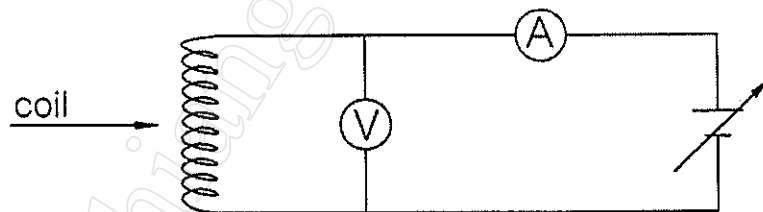
บทที่ 5

การทดสอบแม่เหล็กแบบอัลฟา

การทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กแบบอัลฟาทำได้โดยการวัดค่าของสนามแม่เหล็กเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด นอกจากนั้นยังต้องมีการทดสอบเกี่ยวกับการอิ่มตัวของสนามแม่เหล็กและระบบระบายความร้อนด้วยน้ำภายในขดลวดทองแดง ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวต่อไป

5.1 ความต้านทานของขดลวดทองแดง

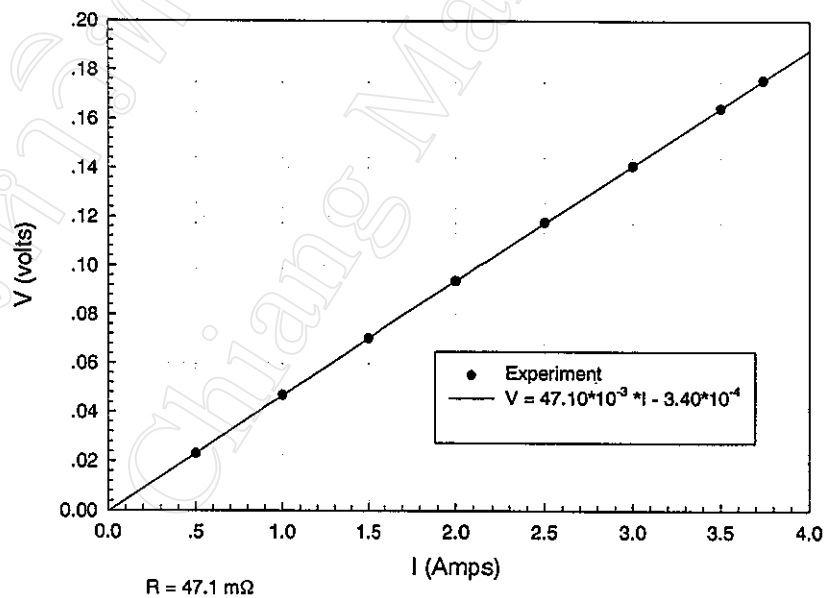
การหาความต้านทานของขดลวดทองแดงที่สร้างขึ้น ทำได้โดยการต่อวงจรไฟฟ้าเข้ากับขดลวดดังแสดงในรูปที่ 5.1 หลังจากนั้นทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดแล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมขดลวด ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 โดยค่าความต้านทานที่วัดได้มีค่าเท่ากับ $47.1\text{ m}\Omega$ เมื่อเทียบกับผลจากการคำนวณคือ $52.6\text{ m}\Omega$ จะมีผลต่างกันเท่ากับ $5.5\text{ m}\Omega$



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรไฟฟ้าสำหรับหาความต้านทานของขดลวดทองแดง

ตารางที่ 5.1 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมของขดลวดทองแดง

I (แอมแปร์)	V (มิลลิโวลต์)
0.5	23.1
1.0	46.9
1.5	70.2
2.0	93.8
2.5	117.7
3.0	140.9
3.5	164.4
3.74	175.8



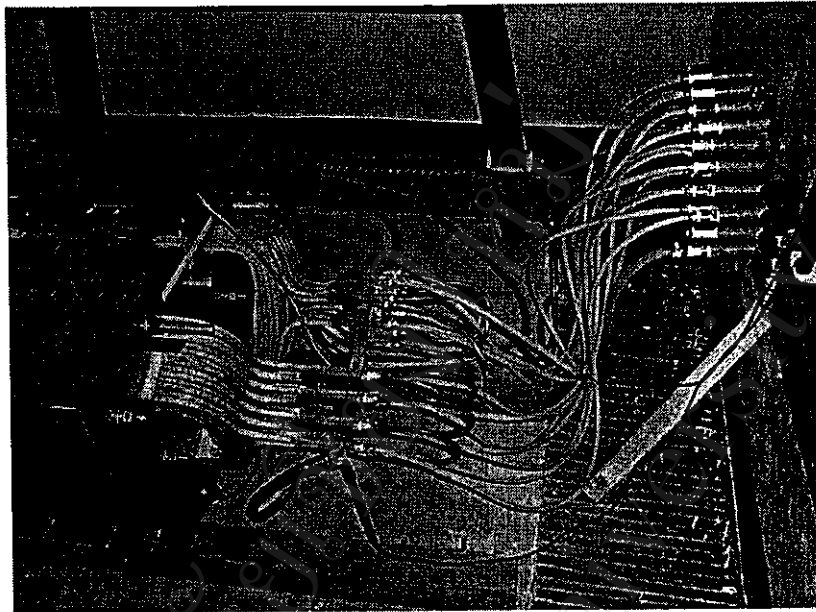
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่วัดได้จากขดลวดทองแดง

5.2 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

ดังได้กล่าวในหัวข้อ 3.4.1 ว่าหลอดทองแดงที่ใช้มีรูตรงกลางสำหรับใช้ระบายความร้อนด้วยน้ำ และจากผลการคำนวณในหัวข้อ 3.4.5 เมื่อให้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกเท่ากับ 2 องศาเซลเซียส จะต้องใช้อัตราไหลของการของน้ำประมาณ 27 ลิตรต่อวินาที แต่หลอดทองแดงที่ใช้มีความยาวทั้งสิ้น 230 เมตร และรูระบายน้ำตรงกลางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง 4 มิลลิเมตร ดังนั้นเพื่อลด pressure head ของระบบการไหลของน้ำจึงมีความจำเป็นต้องแบ่งระบบการไหลของน้ำออกเป็น 7 วงจร โดยแต่ละวงจรจะประกอบด้วยขดลวด double pancake จำนวน 2 ขด ส่วนปั๊มน้ำมี 2 ตัว โดยที่ปั๊มน้ำตัวที่หนึ่งต่อเข้ากับ 4 วงจรแรกแบบขนาน ส่วนปั๊มน้ำตัวที่สองต่อเข้ากับ 3 วงจรหลัง ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่ติดตั้งแสดงดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ส่วนการหาอัตราของน้ำทำโดยจับเวลาที่ใช้ในการตวงน้ำ 500 ลูกบาศก์เมตร ที่ขาออก ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.2 เหลือแล้วมีอัตราการไหลของแต่ละวงจรประมาณ 1.25 ลิตรต่อวินาที และเมื่อรวมแล้วทั้ง 7 วงจรมีอัตราการไหลของน้ำประมาณ 8.75 ลิตรต่อวินาที



รูปที่ 5.3 แสดงปั๊มน้ำและระบบทำความเย็นของระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ



รูปที่ 5.4 แสดงการต่อสายของระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเข้ากับคอยล์ของแม่เหล็ก

ตารางที่ 5.2 แสดงอัตราการไหลของน้ำที่ขาออกของขดลวดทองแดง

	ปั้มน้ำตัวที่หนึ่ง				ปั้มน้ำตัวที่สอง		
	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	วงจรที่ 3	วงจรที่ 4	วงจรที่ 5	วงจรที่ 6	วงจรที่ 7
เวลาที่ใช้ (วินาที)	23.85	23.81	24.19	24.24	23.63	23.60	23.63
อัตราการไหล (ลิตร/นาท)	1.26	1.26	1.24	1.24	1.27	1.27	1.27

สำหรับการหาผลต่างของอุณหภูมิของน้ำขาเข้าของขดลวดทองแดงได้วัดเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 168 แอมแปร์ โดยผลต่างที่วัดได้ของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกของขดลวดทองแดงของทุกวงจรมีค่าประมาณ 2.5 องศาเซลเซียส ส่วนผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสูตรในบทที่ 3 คือ

$$P = c\Delta T\rho \frac{dV}{dt}$$

ที่กระแส 168 แอมแปร์

$$P = I^2 R = (168)^2 * 47.1 * 10^{-3} = 1330 \text{ watts}$$

อัตราการไหลของน้ำทั้งหมดมีค่าประมาณ $1.25 * 7$ ลิตร/นาท = 8.75 ลิตร/นาท

หรือเท่ากับ $146 * 10^{-6}$ ลูกบาศก์เมตร/วินาที

$$\therefore 1330 = 4190 \cdot 10^3 \cdot 146 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = 2.2 \text{ องศาเซลเซียส}$$

ซึ่งจากผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ดังนั้นถ้าที่กระแสสูงสุดมีค่า 265 แอมแปร์ ก็สามารถที่จะประมาณผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกได้คือ

$$P = (265)^2 \cdot 47.1 \cdot 10^{-3} = 4190 \cdot 10^3 \cdot 146 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

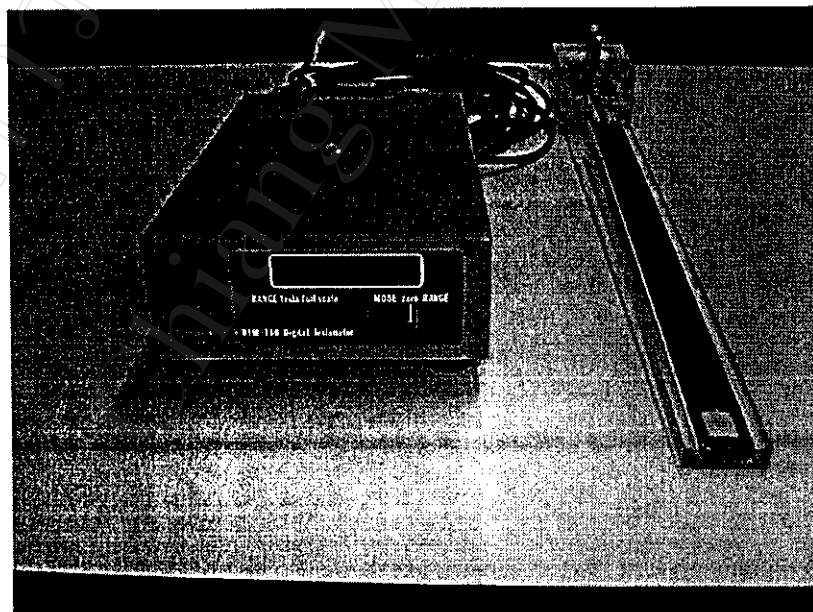
$$3308 = 4190 \cdot 10^3 \cdot 146 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = 5.4 \text{ องศาเซลเซียส}$$

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบระบายความร้อนด้วยน้ำที่สร้างขึ้นสามารถใช้ได้กับขดลวดทองแดงที่สร้างขึ้น

5.3 เครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็ก

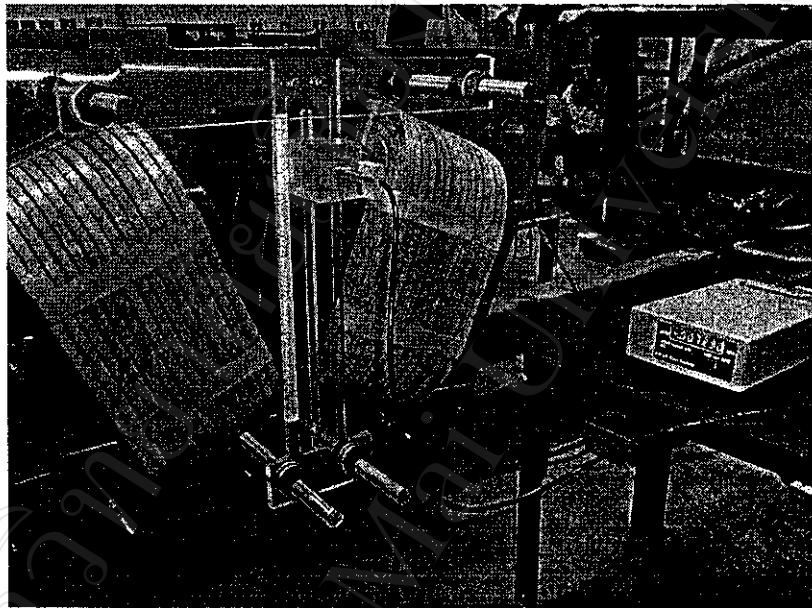
ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กนั้นได้ใช้เครื่องมือวัดค่าสนามแม่เหล็ก GMW Group3 Digital Hall Effect Teslameter รุ่น DMT-130-PS ซึ่งอาศัยกระบวนการ Hall Effect ที่เกิดขึ้นเมื่อ probe ของเครื่องมืออยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก โดยตัว probe มีขนาด $1.0 \times 1.3 \times 1.2 \text{ cm}^3$ และยึดติดบนด้ามจับที่มีขนาด $1.9 \times 3.0 \times 0.2 \text{ cm}^3$ รูปของเครื่องมือวัด แสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก

5.4 การติดตั้งอุปกรณ์ช่วยวัดค่าสนามแม่เหล็ก

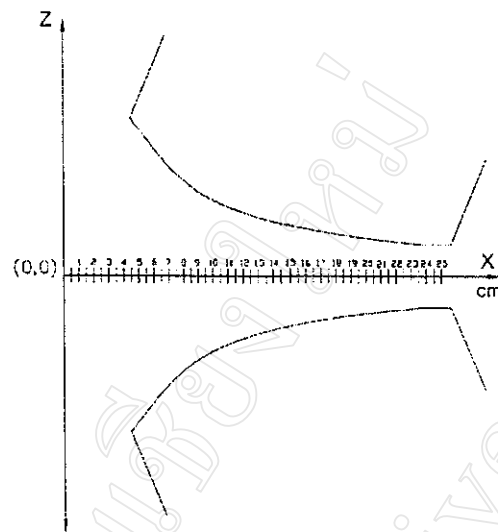
ในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ถ้าเราต้องการอ่านค่าสนามแม่เหล็กได้แน่นอนนั้น จำเป็นต้องทำให้ตัว probe นั้นนิ่งอยู่กับที่ และจะต้องรู้ตำแหน่งที่แน่นอนของ probe ว่าขณะนั้นอยู่ในตำแหน่งใดภายในแม่เหล็ก ซึ่งแน่นอนว่าเราแทบจะไม่สามารถใช้มือของเราจับ probe ให้อยู่นิ่งกับที่ได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์บางอย่างมาช่วยในการบอกตำแหน่งของ probe และทำให้ probe นิ่งอยู่กับที่ขณะทำการวัดค่าสนามแม่เหล็ก การติดตั้งอุปกรณ์ช่วยดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5.6



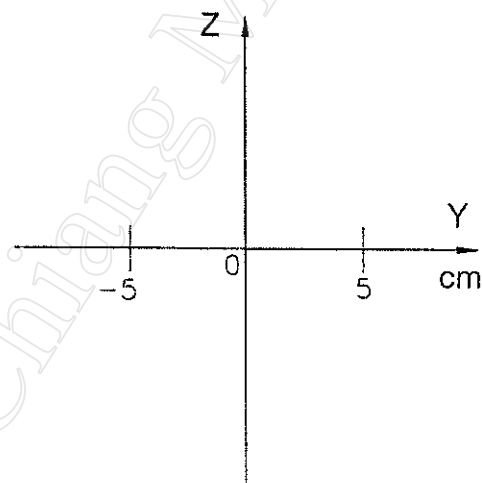
รูปที่ 5.6 แสดงอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าสนามแม่เหล็ก

5.5 ตำแหน่งของการวัดค่าสนามแม่เหล็กภายในแม่เหล็กแบบอัลฟา

ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กจะต้องมีการกำหนดตำแหน่งและทิศทางของการวัดค่าสนามแม่เหล็กให้ชัดเจน ในที่นี้จะทำการวัดในระนาบ xy ($z=0$) โดยตำแหน่งในแนวแกน y ที่จะทำให้การวัดนั้นได้กำหนดไว้ 3 จุด คือ -5.0 ซม. , 0.0 ซม. , 5.0 ซม. ตามลำดับ โดยในแต่ละค่าของ y จะทำการปรับค่า x คือ 0 , 0.5 , 1.0 , 1.5 ,....., 22 ซม. เพื่อทำการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามพิกัดที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ตามลำดับ



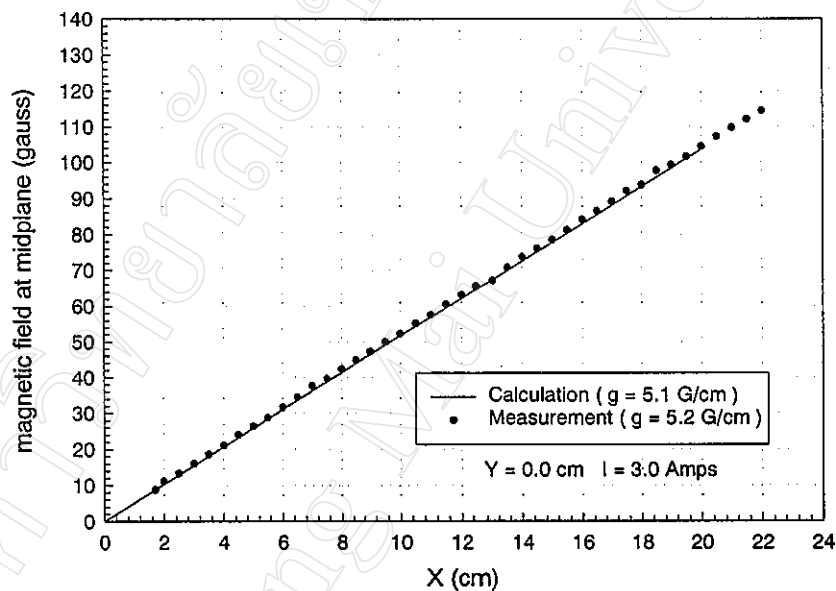
รูปที่ 5.7 แสดงตำแหน่งของการวัดในแนวแกน x



รูปที่ 5.8 แสดงตำแหน่งการวัดค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน y

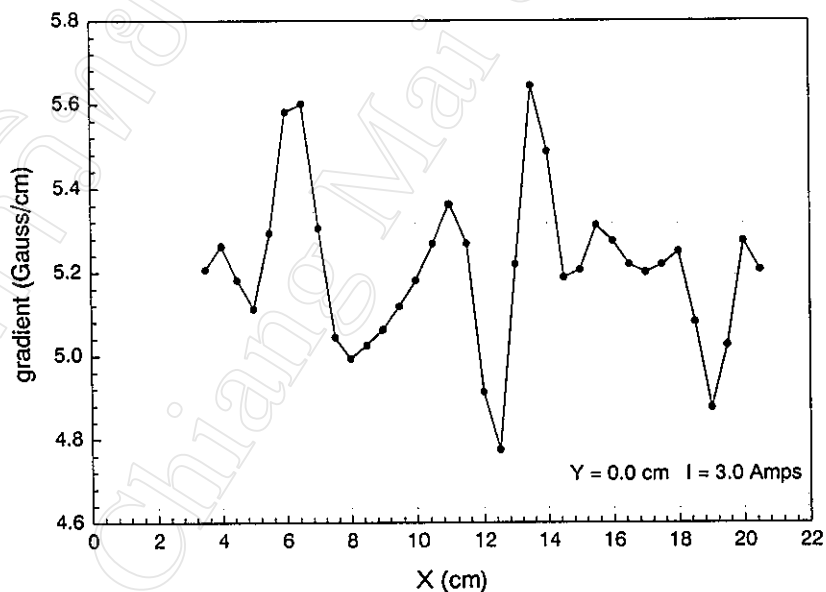
5.6 การวัดค่าสนามแม่เหล็กที่กระแสไฟฟ้าต่ำ

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ช่วยในการวัดค่าสนามแม่เหล็กเข้าไปแล้ว จำเป็นต้องมีการตรวจสอบว่าเครื่องมือวัดนั้นได้ถูกทำการ alignment ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ซึ่งในที่นี้จะเลือกทำการวัดค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆ ใน midplane โดยปล่อยกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดทองแดง 3 แอมแปร์ แล้วนำผลจากการวัดมาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณ ถ้ามีความผิดพลาดมากเกินไปก็จะทำการ alignment ใหม่ ผลที่ได้จากการวัดแสดงในรูปที่ 5.9

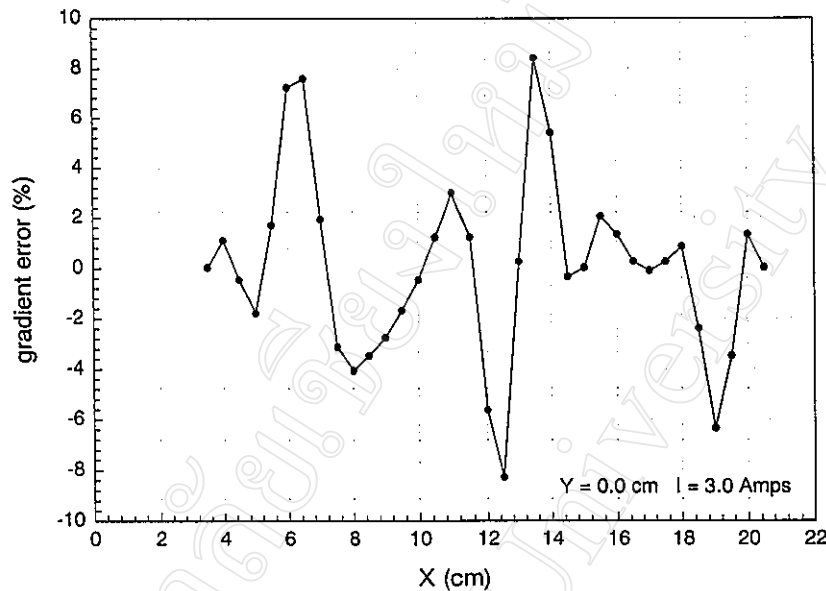


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ตำแหน่ง $y=0$ ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 3 แอมแปร์

จากรูปที่ 5.9 ค่าเกรเดียนต์ที่ได้จากการวัดเกิดจากการนำข้อมูลจากการวัดค่าสนามแม่เหล็กมาฟิตด้วยสมการเส้นตรง แต่เมื่อนำข้อมูลการวัดมาหาค่าเกรเดียนต์ที่แต่ละตำแหน่งในแนวแกน x จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 5.10 และค่า gradient error ที่แต่ละตำแหน่งเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการฟิต แสดงดังรูปที่ 5.11 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ากราฟของค่าเกรเดียนต์และ gradient error มีค่าไม่สม่ำเสมอและมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมากในแต่ละจุด ทั้งนี้เนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนในการวางตำแหน่งของ probe ซึ่งยังไม่แม่นยำเพียงพอและความละเอียดของ tesla meter ที่อ่านค่าได้ละเอียดเพียง 0.1 Gauss ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะสามารถบอกค่า gradient error ได้ละเอียดถึง 0.1 เปอร์เซนต์ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถสรุปเกี่ยวกับเรื่องของ good field region ได้ในขณะนี้บอกได้เพียงว่า ค่าของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางในแนวแกน x แบบเชิงเส้น ได้ถึงประมาณ 20-22 ซม.



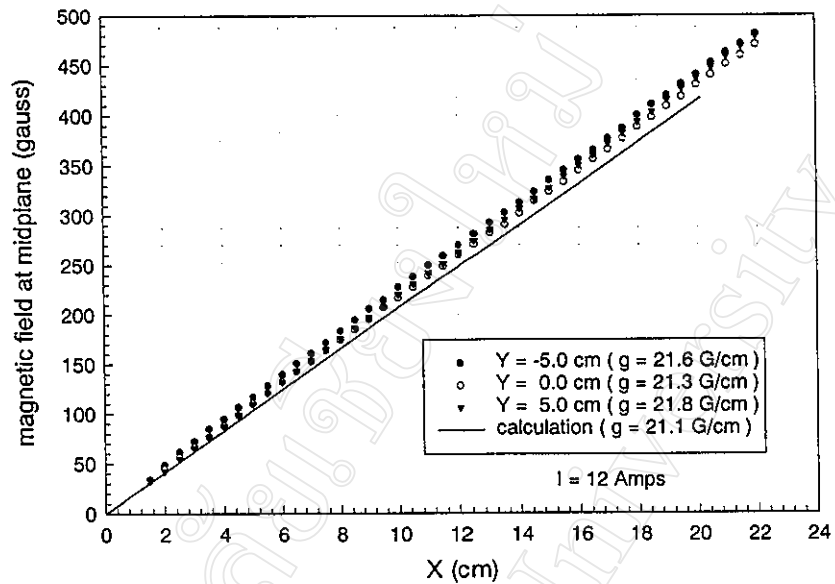
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าเกรเดียนต์ในแนวแกน x ที่ตำแหน่ง $y=0$ โดยใช้กระแส 3 แอมแปร์



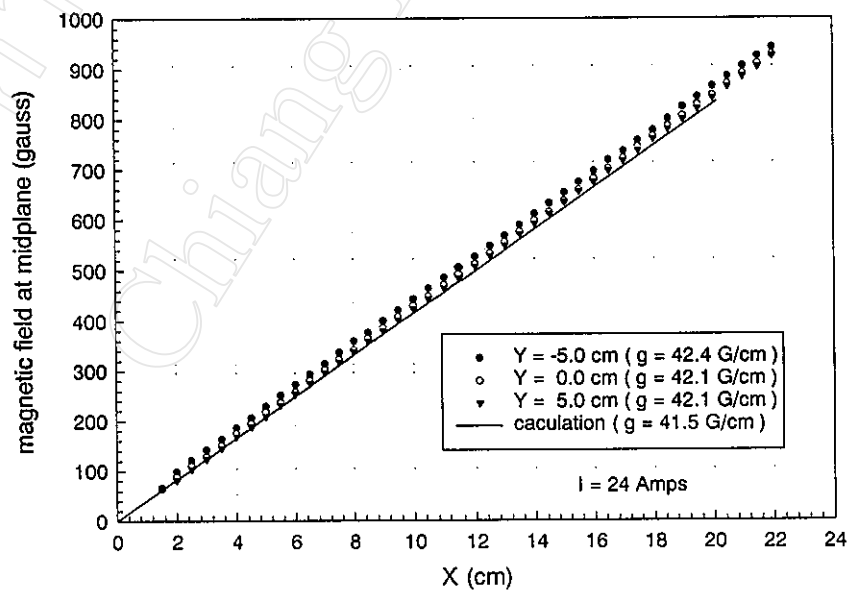
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่า gradient error ในแนวแกน x ที่ตำแหน่ง $y=0$ โดยใช้กระแส 3 แอมแปร์

5.7 การวัดค่าสนามแม่เหล็ก

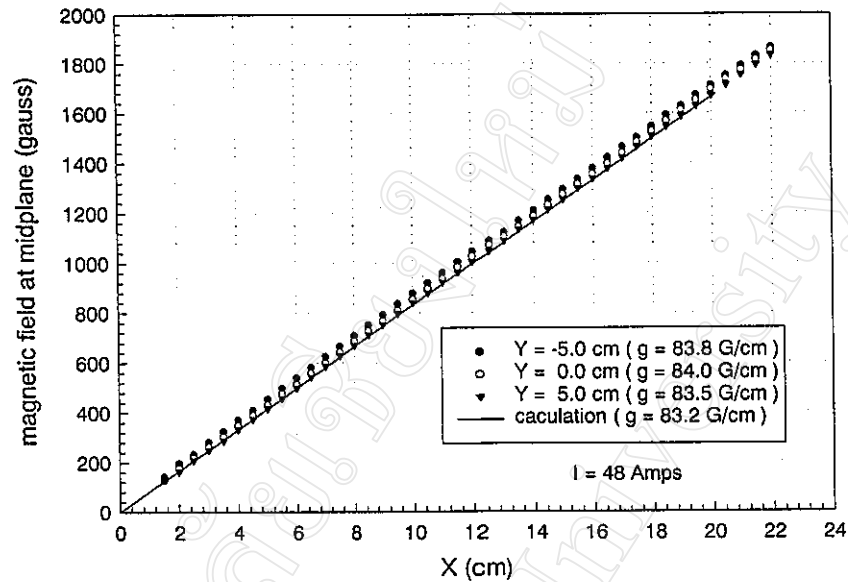
ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กนั้นใช้แหล่งจ่ายไฟที่สามารถปรับกระแสไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 240 แอมแปร์ ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 5.12 ถึง 5.19 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าแม่เหล็กแบบอัลฟาที่สร้างขึ้นมีสนามแม่เหล็กเหมือนกับแม่เหล็กที่ขั้วลั่วคือมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทาง ที่กระแสไฟฟ้าค่าค่ากระเดียนที่ได้จากการวัดจะมีค่ามากกว่าการคำนวณ แต่เมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นค่ากระเดียนมีค่าใกล้เคียงกันและที่กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงๆค่ากระเดียนที่ได้จากการวัดจะต่ำกว่าการคำนวณ ทั้งนี้สาเหตุเนื่องมาจากค่า permeability ของเหล็กที่ใช้สร้างขั้วแม่เหล็กไม่เหมือนกับ permeability ของเหล็กที่ใช้คำนวณ คือ 1010 Steel ซึ่งจะมีคุณสมบัติดีกว่าที่กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงๆ



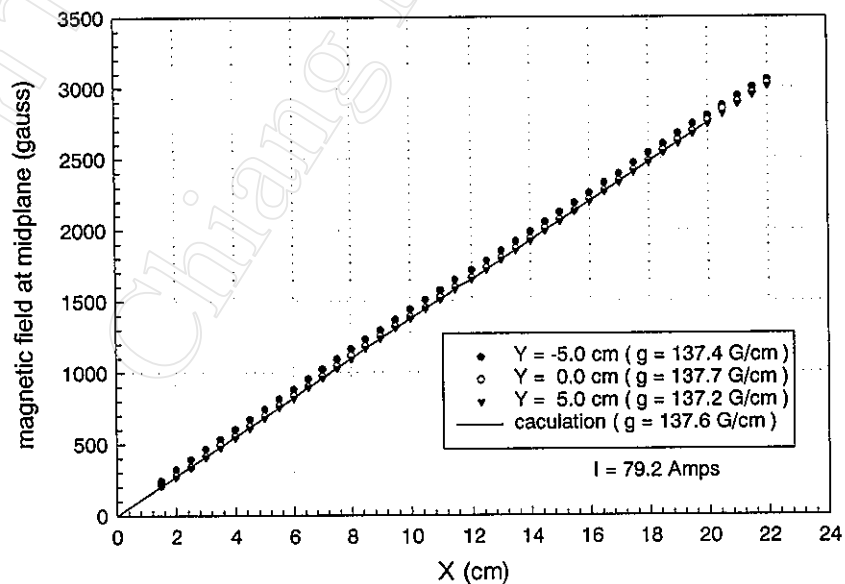
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 12 แอมแปร์



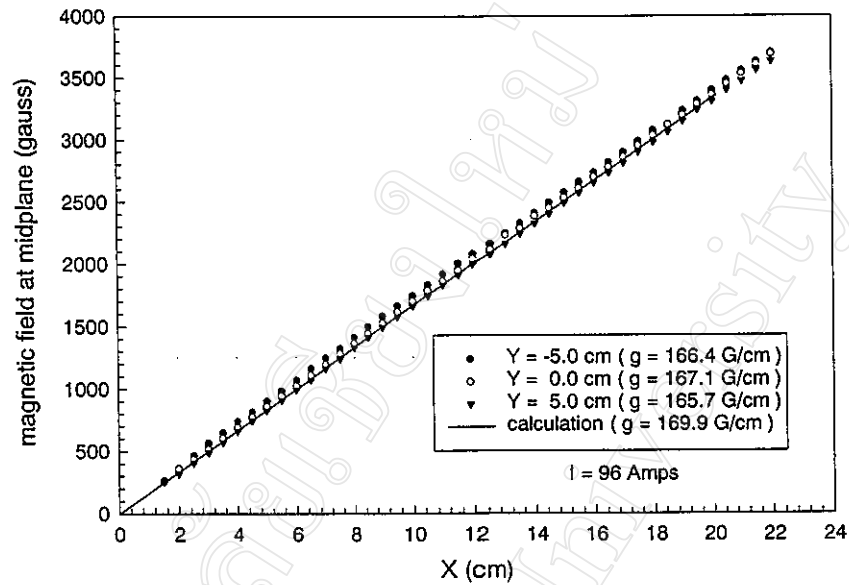
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 24 แอมแปร์



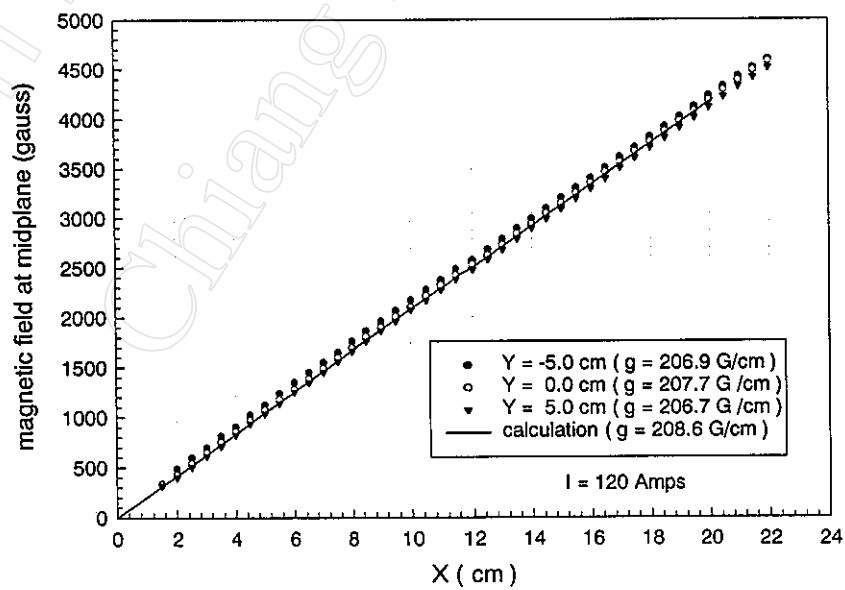
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 48 แอมแปร์



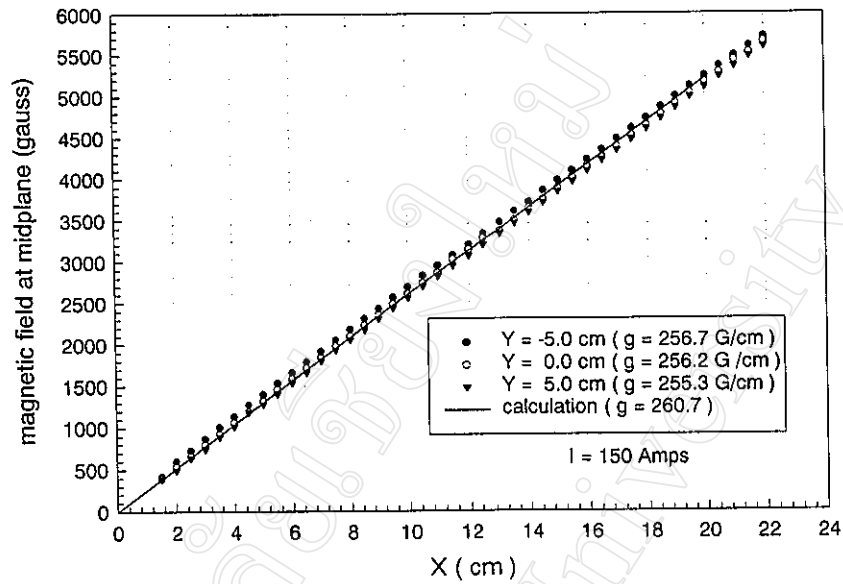
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 79.2 แอมแปร์



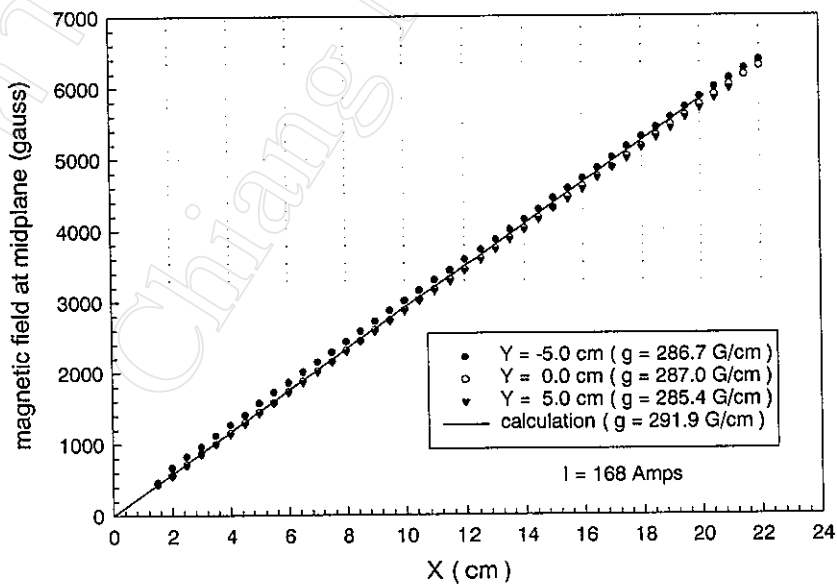
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 96 แอมแปร์



รูปที่ 5.17 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 120 แอมแปร์



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 150 แอมแปร์



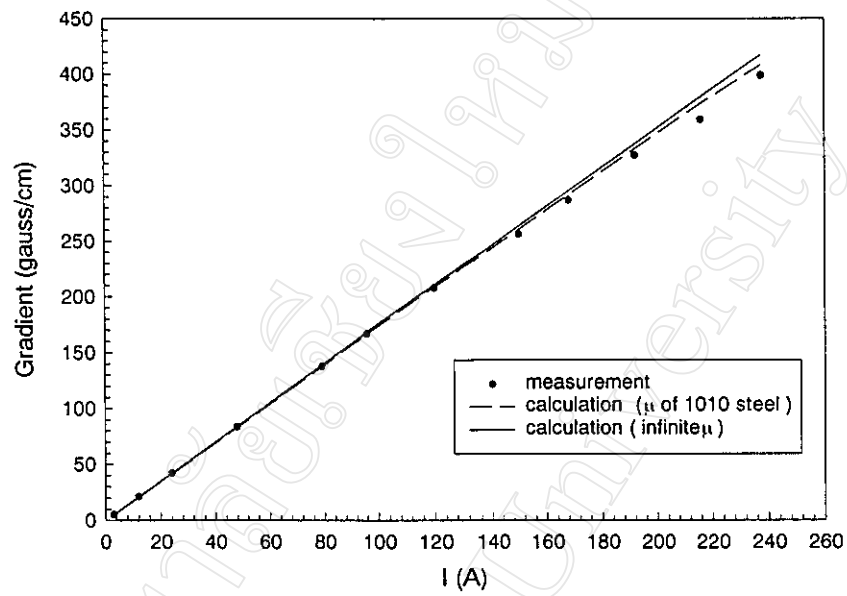
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงการกระจายค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในแนวแกน x ที่ได้จากการวัด โดยใช้กระแส 168 แอมแปร์

5.8 การอิมตัวของสนามแม่เหล็ก

ในการตรวจสอบการอิมตัวของสนามแม่เหล็กนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดทองแดง จนกว่าจะได้ค่าเกรเดียนต์สูงสุดที่ต้องการ แล้วสังเกตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าเกรเดียนต์ว่าแนวโน้มของกราฟยังเป็นแบบเชิงเส้นอยู่หรือไม่ แต่สำหรับแหล่งจ่ายไฟที่มีอยู่นั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้ได้ค่าเกรเดียนต์เท่ากับ 450 G/cm ซึ่งผลที่ได้จากการวัดที่ตำแหน่ง $y = 0$ cm เปรียบเทียบกับการคำนวณแสดงดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.20 จากกราฟจะเห็นได้ว่ามีปัญหาเกี่ยวกับการอิมตัวของแม่เหล็กเกิดขึ้นเล็กน้อยแต่ยังไม่ชัดเจนมากเพราะว่ายังไม่สามารถไปได้ถึงค่าเกรเดียนต์สูงสุด

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเกรเดียนต์ที่ได้จากการวัดและการคำนวณ

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	เกรเดียนต์(G/cm) จากการวัด	เกรเดียนต์(G/cm) จากการคำนวณ (μ ของ 1010 steel)	เกรเดียนต์(G/cm) จากการคำนวณ ($\mu = \alpha$)
3.0	5.2	5.1	5.2
12.0	21.3	20.7	21.1
24.0	42.1	41.5	42.2
48.0	84.0	83.2	84.4
79.2	137.7	137.6	139.2
96.0	167.1	166.9	168.8
120.0	207.7	208.6	211.0
150.0	256.2	260.7	263.7
168.0	287.0	291.9	295.4
192.0	327.3	333.1	337.8
216.0	359.3	373.7	379.8
237.6	399.0	408.7	417.6



รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเกรเดียนต์ที่ได้จากการวัดและการคำนวณ