บทความวิจัย

การคำนวณเชิงตัวเลขและสร้างขดลวดสนามแม่เหล็กแบบเฮล์มโฮลต์

ธัญนพ นิลกำจร* พงษ์แก้ว อุดมสมุทรหิรัญ เสริมสุข รัดเร่ง วิวัฒน์ เครือวงศ์ ฐิติพงศ์ เครือหงส์ ณัฐนรี ดรุณเนตร มณฑา เอี่ยมสมบูรณ์ และ สรัญรส พจน์ธรรม

บทคัดย่อ

ขดลวดเฮล์มโฮลต์แบบจินตภาพคืออุปกรณ์ที่ประกอบด้วยขดลวด 2 ขดที่มีจำนวนขดลวดเท่ากัน ความหนาของขดลวดน้อยมาก วางตัวขนานกันห่างกันเท่ากับรัศมีของขดลวด กระแสที่ไหลในแต่ละขดลวดเท่ากันและมีทิศเดียวกัน สมการของสนามแม่เหล็กบนแกนของขดลวดสามารถเขียนได้ในเทอมของรัศมีขดลวดและระยะห่างจากขดลวดโดยใช้กฎของ Biot-Savart ได้อย่างไม่ยาก ซึ่งทำให้สามารถออกแบบและสร้างขดลวดที่มีค่าสนามแม่เหล็กตรงกับที่คำนวณได้ อย่างไรก็ตามสำหรับขดลวดเฮล์มโฮลต์ที่เป็นจริง ขดลวดจะมีความหนา สมการของสนามแม่เหล็กบนแกนของขดลวดจึงมีความซับซ้อนและสนามแม่เหล็กที่ดีจะไม่อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับขดลวดเฮล์มโฮลต์แบบจินตภาพ ในงานวิจัยนี้ใช้กฎของ Biot-Savart คำนวณหาสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าแบบวงปิด ขดลวดโซลินอยล์แบบบาง ขดลวดโซลินอยล์แบบหนา และขดลวดเฮล์มโฮลต์แบบจริง ผู้วิจัยได้ออกแบบขดลวดเฮล์มโฮลต์แบบจริงโดยใช้ผลการคำนวณเชิงวิเคราะห์และเชิงตัวเลข ได้ขดลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 5 เซนติเมตร วงนอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.5 เซนติเมตร มี 1,200 รอบต่อขดลวด ใช้ลวดทองแดงเบอร์ SWG 16 AIW เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 เซนติเมตร และเพื่อความสะดวกในการใช้งาน ระยะห่างระหว่างขดลวดสามารถปรับได้และมีน้ำหนักทั้งหมด 22 กิโลกรัม ได้ทำการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่แกนกลางและนอกแกนกลางในระนาบด้านในของขดลวด พบว่าสนามแม่เหล็กมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 2.8 แอมแปร์ ได้ค่าสนามแม่เหล็ก 37.8 มิลลิเทสลา และมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้แกนเหล็กโดยได้ค่าเท่ากับ 149 มิลลิเทสลา

คำสำคัญ: ขดลวดเฮล์มโฮลต์ กฎของ Biot-Savart

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, email: swu009@yahoo.com

Numerical Calculation and Construction Helmholtz Magnetic Field Coils

Tunyanop Nilgamjon*, Pongkaew Udomsamuthirun, Sermsuk Ratreng, Wiwat Khruawong, Thitipong Kruaehong, Natnaree Darunnet, Montar Eamsomboon and Sarunrot Pojtham

ABSTRACT

The ideal Helmholtz coil is consisted of two circular wires of infinitesimal thickness, oriented parallel to one another at a distance of one radius apart and equal amounts of current flow parallel through each coil. The expression of the magnetic field on axis, in terms of a coil radius and distance, can be derived easily from the Biot-Savart's law. It can be designed, construction and have a magnetic field agree with the calculation. However a real Helmholtz coil cannot utilize wires of infinitesimal thickness, the expression of the magnetic field on axis is so complicated and the uniform magnetic field's is not on the same point as the ideal Helmholtz coil. In our research, the Biot-Savart's law is used to calculate analytically the magnetic field due to current loop, finite solenoid, thin shell solenoid and the real Helmholtz. We design the real Helmholtz coil by using the analytic results and numerical calculation. Our coils have an inner diameter of 5 centimeters, the outer diameter of 21.5 centimeters and number of turns of 1200 per coil; copper wire No. SWG 16 AIW with diameter of 0.16 centimeters and for the convenient of using, the distance between coils can be adjust and total weight of 22 kg. The magnetic field on axis direction and out-of -axis direction on the plan inside the Helmholtz are measured. The homogeneous magnetic field is achieved. With the distance between coils is 2 centimeters and current 2.8 amperes the magnetic field of 37.8 mT is found and also the value of 149 mT is obtained when using the Fe-core coil.

Keywords: Helmholtz coil, Biot-Savart's law

Department of Physics, Faculty of Science, Srinakharinwirot University

*Corresponding auther, email: swu009@yahoo.com

บทนำ

ขดลวดแบบเฮล์มโฮลต์ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรก [1] โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันเมื่อหลายศตวรรษมาแล้ว โดยถูกสร้างขึ้นอย่างง่ายๆ ด้วยขดลวดที่เหมือนกันสองอัน และค่าสนามแม่เหล็กที่แกนกลางระหว่างขดลวดทั้งสองที่ได้จะมีความสม่ำเสมอมาก ทำให้กลายเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีความสำคัญมากในอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์เกือบทุกประเภทที่มีความจำเป็นต้องใช้สนามแม่เหล็ก ซึ่งได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตามข้อจำกัดอย่างหนึ่งก็คือสนามแม่เหล็กที่สร้างได้จะมีขนาดความเข้มไม่มากนัก ดังนั้น ถ้าการทดลองใดที่ต้องการสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงในระดับใกล้กับเทสลา การหาชุดสนามแม่เหล็กมาทำการทดลองจึงเป็นไปได้ยาก ชุดสนามแม่เหล็กที่ขายจึงมีราคาแพงและเป็นชุดเฉพาะสำหรับการทดลองนั้น ไม่สามารถถอดหรือเคลื่อนย้ายไปทดลองอย่างอื่นได้

คณะผู้วิจัยได้พบว่าการทำชุดสนามแม่เหล็กขึ้นมาใช้เองจะทำให้การทดลองต่างๆ ทางฟิสิกส์หรือสาขาอื่นที่เกี่ยวข้องเป็นไปได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาแบบยั่งยืน งานวิจัยนี้จะทำในสามส่วนคือการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อให้ได้ต้นแบบของชุดทดลองสนามแม่เหล็กแบบเฮล์มโฮลต์ที่สามารถถอดหรือเคลื่อนย้ายไปทดลองอย่างอื่นได้สะดวก มีความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับเทสลา จากนั้นจะนำไปสร้างชุดทดลองสนามแม่เหล็กและวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของขดลวดที่ได้

เนื่องจากได้มีการศึกษาค้นคว้าในเรื่องขดลวดเฮล์มโฮลต์เป็นเวลานาน การคำนวณในรูปแบบง่ายๆ จะเป็นการคำนวณอย่างประมาณทางฟิสิกส์ของขดลวดเฮล์มโฮสต์ โดยจะได้คำตอบที่อยู่ในรูปที่ไม่ซับซ้อนมากนัก สามารถทำความเข้าใจได้ไม่ยากและจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการสร้าง ทำความเข้าใจและการวัดสมบัติพื้นฐานของขดลวดเฮล์มโฮสต์

พิจารณาขดลวด 2 วงที่เหมือนกัน มีจำนวนรอบของขดลวดเท่ากับ n รัศมี R กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่าน ที่ถูกจัดวางให้ห่างกันเท่ากับขนาดของรัศมี R ถ้าพิจารณาสนามแม่เหล็กที่บริเวณแกนกลางที่อยู่ห่างกันตามแนวกึ่งกลางของขดลวดเท่ากับ x โดยใช้สมการ Biot-Savart $B = \oint \frac{\mu_0 \, d\vec{l} \, x\vec{r}}{4\pi \, r^3}$ จะได้

$$B = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \tag{1}$$

เมื่อ μ_0 คือ ค่าคงตัวสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (permeability constant) สำหรับอากาศมีค่าประมาณ $4\pi \times 10^{-7}$ T - m / A หรือ 1.26×10^{-6} T - m / A

สนามแม่เหล็กที่กึ่งกลางของขดลวด $x = \frac{R}{2}$ นำไปแทนค่าในสมการ (1) จะเป็น

$$B = (\frac{4}{5})^{3/2} \frac{\mu_0 n I}{R} \tag{2}$$

สมการ (2) คือสมการของค่าสนามแม่เหล็กที่แกนกลางของขดลวด ซึ่งมีค่าขึ้นกับขนาดของกระแสไฟฟ้าจำนวนขดลวดและรัศมีของขดลวด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอมากที่สุด

แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณตามที่กล่าวมาข้างต้นไม่ได้คำนึงถึงความหนาของขดลวดที่จะเกิดขึ้นเมื่อใช้ขดลวดจำนวนมากในการทำ ที่ทำให้ขดลวดที่ด้านในจะมีรัศมีสั้นกว่าด้านนอก ดังนั้นสมการ (2) จึงสามารถใช้ได้ดีกับกรณีที่มีจำนวนขดลวดไม่มากและมีรัศมีที่ค่อนข้างกว้าง จนสามารถประมาณได้ว่าขดลวดทุกขดมีรัศมีเท่ากัน

วิวัธน์ ยังดี [2] ได้ศึกษาการคำนวณสนามแม่เหล็กสำหรับเครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็กโดยวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้ขดลวดเฮล์มโฮลต์ที่มีรัศมี 18 เซนติเมตรและมีจำนวนรอบของขดลวดเป็น 450 รอบ คิดเป็น 30 แถวตามแนวระดับ และ 15 แถวตามแนวลึก ลวดทองแดงเบอร์ 10 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ขดลวดสามารถทนกระแสได้สูงที่สุด 22 แอมแปร์ พบว่าเมื่อขดลวดห่างกัน 22 เซนติเมตร กระแสขนาด 5.4 แอมแปร์ จะให้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มขนาด 0.01 เทสลาได้

Neill [3] แสดงวิธีการคำนวณและสร้างขดลวดเฮล์มโฮลต์ที่มีสนามที่สม่ำเสมอ โดยเริ่มต้นการคำนวณโดยพิกัดทรงกระบอกที่มีแกนสมมาตรตามแกน z และ r เป็นระยะห่างตามรัศมีตามแกนกลาง ใช้สมการ Biot-Savart ในการคำนวณ ซึ่งได้สนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับ r และ z

จาก Magnet Formula web site [4] ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณขดลวดเฮล์มโฮลต์แบบที่เป็นจริง

วิธีการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้แบ่งวิธีการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ การคำนวณขดลวดเฮล์มโฮลต์ การสร้างขดลวดเฮล์มโฮลต์ และการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของขดลวดเฮล์มโฮลต์

1. การคำนวณขดลวดเฮล์มโฮลต์

การคำนวณแบบแม่นตรง

การคำนวณขดลวดเฮล์มโฮลต์แบบแม่นตรง มีหลายขั้นตอนในการคำนวณ ในการวิจัยครังนี้จึงขอนำเสนอดังนี้

1. การคำนวณสนามแม่เหล็กในแกนกลางของขดลวดที่ไม่มีความหนาซึ่งจะได้สนามแม่เหล็กตามแกน x ตามสมการ (1.1) โดยแทน n = 1 ได้

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \tag{3}$$

2. การคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอย์บาง

เนื่องจากขดลวดโซลินอยล์บางก็คือขดลวดวงกลมมาวางเรียงกัน กำหนดให้ขดลวดยาว l มีรัศมี r มี N รอบ กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน I สนามแม่เหล็กที่ภายนอกขดลวดโซลินอยล์ บนแกนของขดลวดจะได้

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2l}\left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + r^2}} - \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + r^2}}\right) \tag{4}$$

เมื่อ x_1, x_2 เป็นระยะห่างจากจุดที่วัดสนามแม่เหล็กที่ภายนอกเทียบกับขอบด้านในและด้านนอกของขดลวดตามลำดับ

3. การคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดโซลินอยล์หนา

กำหนดให้ขดลวดยาว l มีรัศมีภายใน r_1 รัศมีภายนอก r_2 มี N รอบตามความยาว และมีจำนวน n รอบตามแนวรัศมี กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน I หลักการคิดจะนำขดลวดโซลินอยล์แบบบางมาวางซ้อนกันตามแนวรัศมี จะได้ว่า

$$B = (\frac{\mu_0 N}{2l})I(\frac{n}{r_2 - r_1})\int_{r_1}^{r_2} dr(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + r^2}} - \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + r^2}})$$
$$= (\frac{\mu_0 N}{2l})I(\frac{n}{r_2 - r_1})(x_2 \ln(\frac{r_2 + \sqrt{x_2^2 + r_2^2}}{r_1 + \sqrt{x_2^2 + r_2^2}}) - x_1 \ln(\frac{r_2 + \sqrt{x_1^2 + r_2^2}}{r_1 + \sqrt{x_1^2 + r_1^2}})) \quad (5)$$

4. การคำนวณสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฮล์มโฮลต์

หลักการคิดคือ การนำขดลวดโซลินอยล์แบบหนาที่เหมือนกันมาวางให้มีแกนกลางร่วมกัน กำหนดให้ขดลวดแต่ละขดมีรัศมีภายใน r_1 รัศมีภายนอก r_2 มี N รอบตามความยาว และมีจำนวน n รอบตามแนวรัศมี กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน I ห่างกัน ด้านใน l_1 ด้านนอก l_2 จะได้สนามแม่เหล็กที่แกนบริเวณตรงกลางของขดลวดทั้งสองเป็น

$$B = \mu_0 NI(\frac{n}{r_2 - r_1})[\ln(\frac{r_2}{r_1}) + \frac{l_2}{l_2 - l_1}\ln(\frac{1 + \sqrt{1 + (\frac{l_2}{2r_2})^2}}{1 + \sqrt{1 + (\frac{l_2}{2r_1})^2}}) - \frac{l_1}{l_2 - l_1}\ln(\frac{1 + \sqrt{1 + (\frac{l_1}{2r_2})^2}}{1 + \sqrt{1 + (\frac{l_1}{2r_1})^2}})] \quad (6)$$

โดย $r_2 = r_1 + w$ และ $l_2 = l_1 + 2L$ เมื่อ w คือความหนาของขดลวดตามแนวรัศมี และ L คือความหนาของขดลวดตามความยาว

การคำนวณขดลวดเฮล์มโฮลต์เชิงตัวเลข

การคำนวณขดลวดเฮล์มโฮลต์เชิงตัวเลขได้ใช้สมการ (6) ในการคำนวณเพื่อหาขนาดขดลวด จำนวนขดลวด ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เพื่อให้ได้ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ต้องการ การคำนวณใช้วิธีลองผิดลองถูกขนาดขดลวดที่เหมาะ ซึ่งสอดคล้องกับจุดประสงค์ของการสร้างขดลวดที่ต้องการ ขดลวดที่มีน้ำหนักรวมไม่มากนัก และสามารถปรับระยะห่างของขดลวดได้ และมีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ค่อนข้างมาก ซึ่งจากการคำนวณพบว่า

เมื่อกำหนดให้

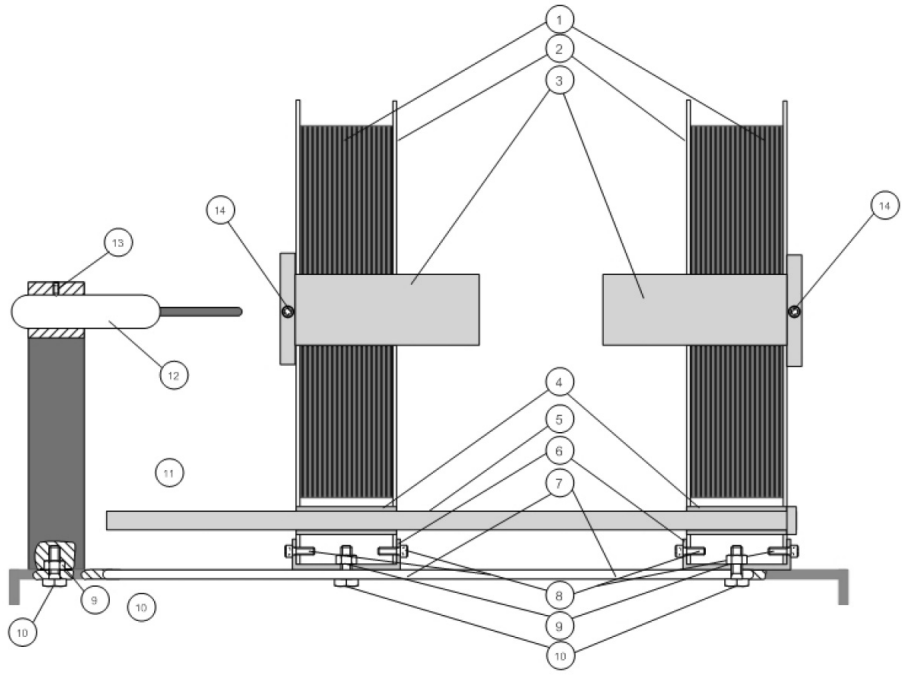
เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	5	เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	21.5	เซนติเมตร
ด้านในขดลวดวางห่างกัน	5	เซนติเมตร
ด้านนอกขดลวดวางห่างกัน	15	เซนติเมตร
จำนวนขดลวดตามแนวรัศมี	41	รอบ
จำนวนขดลวดตามยาว	29	รอบ
ใช้กระแสไฟฟ้าขนาด	2.5	แอมแปร์

จะได้ค่าสนามแม่เหล็กขนาด 27 มิลลิเทสลา จะมีน้ำหนักรวมประมาณ 20 กิโลกรัม

อย่างไรก็ตามความเข้มของสนามแม่เหล็กสามารถมีค่ามากกว่านี้ได้เมื่อขดลวดทั้งสองวงอยู่ใกล้กันมากกว่านี้และเพิ่มกระแสไฟฟ้ามากกว่านี้

2. การสร้างขดลวดเฮล์มโฮลต์

คณะผู้วิจัยได้เขียนแบบและหาอุปกรณ์เพื่อสร้างขดลวดให้ได้ใกล้เคียงตามที่คำนวณมากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงรูปภาพของแบบดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการออกแบบชุดทดลองสนามแม่เหล็กแบบเฮล์มโฮลต์

อุปกรณ์ประกอบด้วย

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ชุดทดลองสนามแม่เหล็กแบบเฮล์มโฮลต์ในรูปที่ 1 [5]

ITEM	QTY	PART NAME	DESCRIPTION
1	2	ขดลวดทองแดง	Cu 200 mm x 200 mm
2	4	แม่แบบประกบขดลวด	แผ่นโลหะ
3	2	แกนโลหะ	OD 50 mm x ID 150 mm
4	4	ปลอกรองเพลาเรือน	ทองเหลือง
5	2	เพลาเรือน	Fe Skd 11
6	2	ฐานประกบ	เหล็กเหนียว 260 mm x 50 mm x 30 mm
7	1	ฐานรองงาน	260 mm x 400 mm x 5 mm
8	4	Hex sock.	M5 x 10 mm
9	4	Hex nut.	M6
10	4	Hex head	M6 x 18 mm
11	2	อุปกรณ์จับยึดหัววัด	พลาสติก
12	2	Hall probe	axial length (without handle) 300 mm tube diameter 6 mm
13	2	Hex-Bevel head set.	M3 x 10 mm
14	6	Hex sock.	M3 x 10 mm

จากนั้นนำมาสร้างขดลวดตามแบบ โดยใช้กาว Epoxy ประสานในแต่ละแถว แผ่นไมล่ารองในแต่ละชั้นเพื่อกันการช็อตและระบายความร้อนระหว่างชั้นขดลวด และทาเรซินที่ขดลวดเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของขดลวด ขดลวดที่เตรียมได้จะมีคุณลักษณะ ดังนี้

1. สามารถปรับระยะห่างระหว่างขดลวดได้ 2 เซนติเมตร ถึง 15 เซนติเมตร
2. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร
3. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 21.5 เซนติเมตร
4. จำนวนรอบของขดลวด 1,200 รอบ
5. ขดลวดมีน้ำหนักข้างละ 10 กิโลกรัม
6. น้ำหนักรวมของอุปกรณ์ทั้งหมด 22 กิโลกรัม
7. อุณหภูมิสูงสุดของขดลวดที่แกนกลางขณะทำงานที่กระแสไฟฟ้า 2.9 แอมแปร์ เท่ากับ 47˚C
8. ความต้านทานต่อ 1 ขดลวด 4.98 โอห์ม
9. ความต้านทานเมื่อต่อขดลวดที่ 1 กับขดลวดที่ 2 เท่ากับ 9.22 โอห์ม

ผลการทดลอง

จากผลการคำนวณขดลวดเฮล์มโฮลต์ได้นำมาสร้างชุดทดลองและนำชุดทดลองขดลวดเฮล์มโฮลต์นำมาทดสอบการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของขดลวดเฮล์มโฮลต์

การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของขดลวดเฮล์มโฮลต์

การวัดสนามแม่เหล็กของชุดขดลวดเฮล์มโฮลต์ สามารถทำได้โดยต่อขดลวดเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสคงตัว โดยมีอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กคือ

1. Digital Teslameter รุ่น Phywe No. 13610.93 with Axial and tangential Probes 220 volt 3½ LED digits display rang 0.00001 to 2 T

2. Hall probe แบบ axial รุ่น Phywe No. 13610.93 Axial length (without handle) 300 mm tube diameter 6 mm

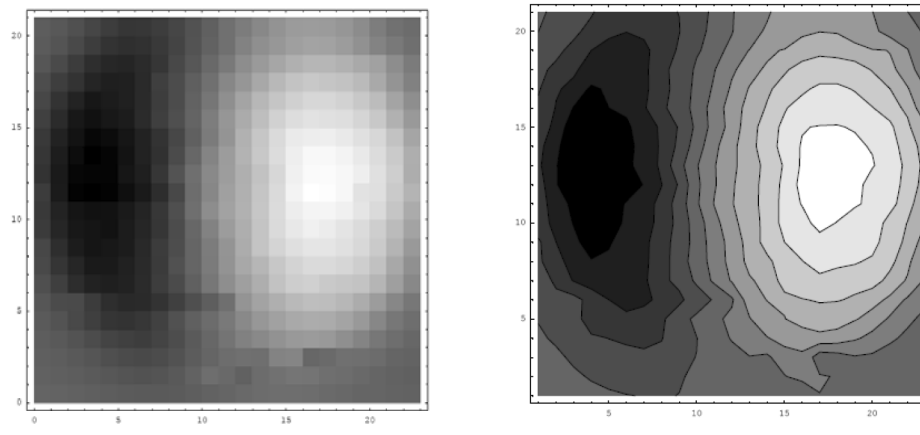
3. Hall probe แบบ tangential รุ่น Phywe No. 13610.02 Dimensions of the probe carrier 75 mm x 5 mm x 12 mm

การวัดสนามแม่เหล็ก

การวัดสนามแม่เหล็กมีการทำในหลายรูปแบบดังนี้

1. การวัดการกระจายตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก

โดยการสร้าง grid ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร ในพื้นที่ 21 x 23 เซนติเมตร จากมุมบนด้านซ้ายมือ และวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้หัววัด axial ที่ระยะห่างจากผิวด้านในของขดลวดเป็นระยะ 1.0 เซนติเมตร ขดลวดวางห่างกัน 5 เซนติเมตร ใช้กระแสไฟฟ้า 2.9 แอมแปร์ ได้ผลการวัดตามรูปที่ 2

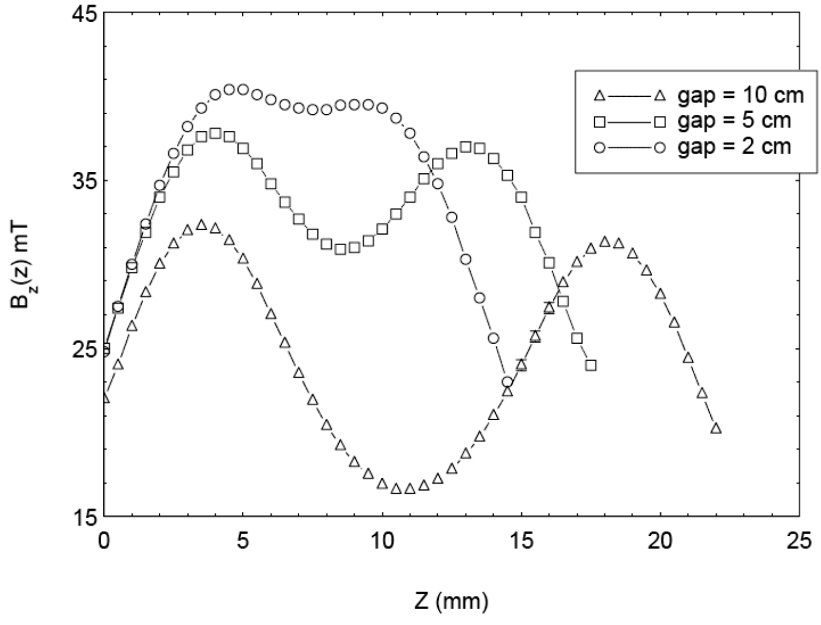


(ก) (ข)

รูปที่ 2 แสดงภาพการวัดการกระจายตัวสนามแม่เหล็กโดย
ก) ภาพความหนาแน่น
ข) ภาพ contour ของสนามแม่เหล็ก

2. การวัดสนามแม่เหล็กในแนว z ตามแกน z

ใช้หัววัดแบบ axial วัดที่ตำแหน่งแกน z ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 2, 5 และ 10 เซนติเมตร ได้ค่าสนามแม่เหล็ก $Bz(z)$ เทียบกับแกนตามแนวกลางของขดลวด (z) โดยใช้แกนอากาศ ดังรูปที่ 3

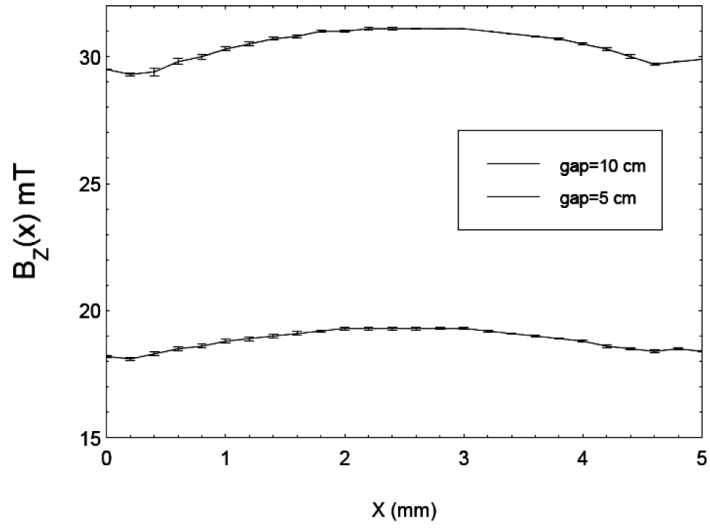


สนามแม่เหล็กในแนว z ตามแกน z ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดต่างๆ

พบว่าที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร เป็นระยะที่มีค่าสนามแม่เหล็กตามแกนขดลวดสม่ำเสมอและเป็นค่าที่มากที่สุด ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานเมื่อใช้แกนอากาศ

3. การวัดสนามแม่เหล็กในแนว z ตามแกน x

ใช้หัววัดแบบ axial วัดที่ตำแหน่งแกน x ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 5 และ 10 เซนติเมตร ได้ค่าสนามแม่เหล็ก $_z(x)$ เทียบกับแกนตามขวางกับแนวกลางของขดลวด (x) ดังรูปที่ 4

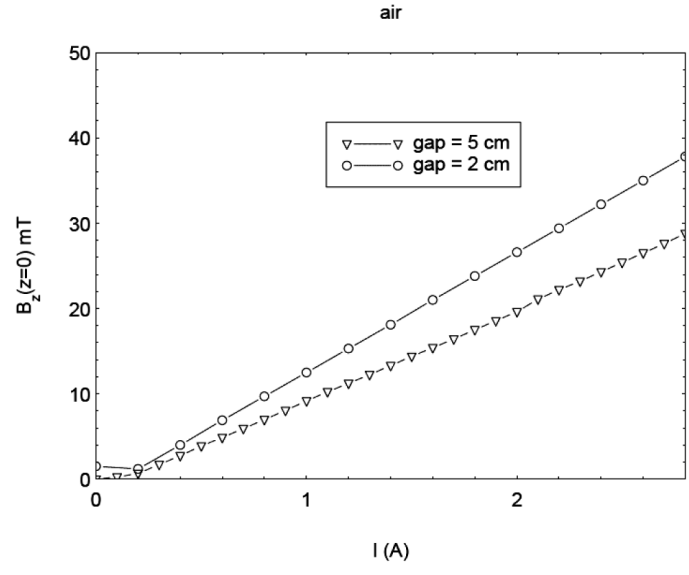


รูปที่ 4 สนามแม่เหล็กในแนวแกน z ตามแกน x ที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5 และ 10 เซนติเมตร

พบว่าสนามแม่เหล็กในแนว z ตามแกน x มีการกระจายที่สม่ำเสมอตลอดช่วง ซึ่งแสดงว่าในแนวแกน x มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ทุกระยะห่างระหว่างขดลวด เมื่อใช้แกนอากาศ

4. ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่กึ่งกลางแกนอากาศกับกระแสไฟฟ้า

ใช้หัววัด tangential วัดที่ตำแหน่งแกนกลางของขดลวด โดยวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตรงกลางระหว่างขดลวดทั้งสอง *B*z (z=0) เทียบกับกระแสไฟฟ้า ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 2 และ 5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5

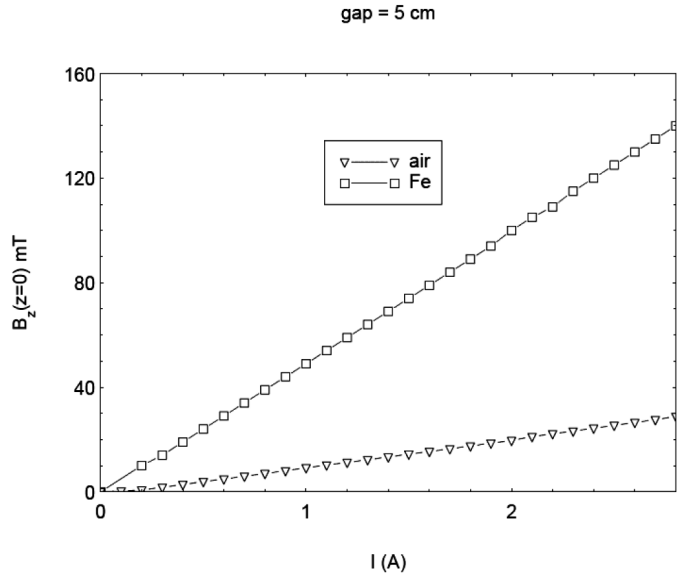


รูปที่ 5 สนามแม่เหล็กในแนวแกน z ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างขดลวด เมื่อระยะระหว่างขดลวดเป็น 5 และ 2 เซนติเมตร เทียบกับกระแสไฟฟ้า เมื่อใช้แกนกลางเป็นอากาศ

พบว่าที่ระยะห่างระหว่างแกนอากาศน้อยและกระแสมีค่ามากจะได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงที่สุด โดยจากการทดลองนี้ ใช้ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 2.8 แอมแปร์ ได้ค่าสนามแม่เหล็ก 37.8 มิลลิเทสลา

แกนโลหะกับแกนอากาศ

ใช้หัววัด tangential วัดที่ตำแหน่งแกนกลางของขดลวด โดยวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ตรงกลางระหว่างขดลวดทั้งสอง Bz (z=0) เทียบกับกระแสไฟฟ้า ที่ระยะห่างระหว่างขดลวดเป็น 5 เซนติเมตร โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ใช้แกนอากาศและแกนโลหะ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 สนามแม่เหล็กที่ตรงกลางระหว่างขดลวดทั้งสอง Bz (z=0) เทียบกับกระแสไฟฟ้า เมื่อใช้แกนอากาศและแกนโลหะ

พบว่าเมื่อใช้โลหะเป็นแกนจะได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงขึ้น โดยจากการทดลองนี้ใช้ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ 5 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 3.0 แอมแปร์ ได้ค่าสนามแม่เหล็กจากกรณีที่เป็นแกนโลหะเท่ากับ 149 มิลลิเทสลา

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยในครั้งนี้ ได้ศึกษาวิธีการสร้างสนามแม่เหล็กแบบขดลวดที่มีขนาดความเข้มของสนามในระดับเทสลา โดยใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อออกแบบขดลวดที่ต้องการ โดยเริ่มจากการหาสมการของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดเฮล์มโฮลต์แบบที่คิดความหนาของขดลวด เพื่อให้ได้ค่าสนามแม่เหล็กขนาดประมาณ 30 มิลลิเทสลา เมื่อใช้แกนอากาศ อย่างไรก็ตามความเข้มของสนามแม่เหล็กสามารถจะมีค่ามากกว่านี้ได้เมื่อขดลวดทั้งสองวางอยู่ ใกล้กันมากกว่านี้และเปลี่ยนแกนกลางจากแกนอากาศเป็นแกนชนิดอื่น ซึ่งขดลวดที่ได้จะมีน้ำหนักไม่มากนักและสามารถขนย้ายได้อย่างสะดวก

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ออกแบบการพันขดลวดให้มีการระบายความร้อนที่ดี และมีการพันรอบที่สม่ำเสมอ จึงได้ขดลวดเฮล์มโฮลต์ ขดลวดเฮล์มโฮลต์ที่ได้มีน้ำหนักรวม 22 กิโลกรัม โดยสามารถปรับระยะห่างระหว่างขดลวดได้

เมื่อทำการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่ได้ พบว่าสนามแม่เหล็กมีการกระจายตัวที่ดี โดยมีค่าที่สูงในบริเวณแกนกลางและนอกบริเวณแกนกลางจะมีค่าที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจนที่ระยะห่างระหว่างขดลวด เท่ากับ 2 เซนติเมตรเป็นระยะที่มีค่าสนามแม่เหล็กตามแกนขดลวดสม่ำเสมอและเป็นค่าที่มากที่สุด ซึ่งเหมาะสมสำหรับการใช้งานเมื่อใช้แกนอากาศ และค่าสนามแม่เหล็กในแนว z ตามแกน x มีการกระจายที่สม่ำเสมอตลอดช่วง ซึ่งแสดงว่าในแนวแกน x มีความเหมาะสมดีสำหรับการใช้งานที่ทุกระยะห่างระหว่างขดลวดที่ระยะห่างระหว่างแกนน้อยและกระแสมีค่ามากจะได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงที่สุด โดยจากการทดลองนี้ ใช้ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 2.8 แอมแปร์ ได้ค่าสนามแม่เหล็ก 37.8 มิลลิเทสลา และเมื่อใช้เหล็กเป็นแกนจะได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงขึ้น โดยจากการทดลองนี้ใช้ ระยะห่างระหว่างขดลวดเท่ากับ 2 เซนติเมตร กระแสไฟฟ้า 3.0 แอมแปร์ ได้ค่าสนามแม่เหล็กจากกรณีที่เป็นแกนเหล็กเท่ากับ 149 มิลลิเทสลา แสดงว่าแม่เหล็กที่ได้สามารถให้ค่าสนามแม่เหล็กในระดับเทสลาได้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2551 จึงขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และให้โอกาสให้บุคลากรสายสนับสนุนได้ริเริ่มทำงานวิจัย ซึ่งส่งผลที่ดีในการทำงานเชิงสร้างสรรค์

เอกสารอ้างอิง

1. Wikipedia. 2009. Helmholtz Coil. Available from URL:http://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_coil #References. 10 February 2009.
2. วิวัธน์ ยังดี. การคำนวณสนามแม่เหล็กสำหรับเครื่องถ่ายภาพการสั่นพ้องแม่เหล็กโดยวิธีเชิงตัวเลข. Proceedings of the 31st Congress on Science and Technology of Thailand. 8-20 October 2005. Suranaree University of Technology. Nakhornratchasima.
3. Neill, D. 2001. Mathematical Modeling of the Magnetic Field of a Helmholtz Coil. Available from URL:http://dustbunny.physics.indianna.edu/~dzierba/iustatus/HC_don.pdf. 15 July 2009.
4. Dennison, E. 2005. Magnet Formula. Available from URL: http://www.netdenizen.com/emagnet/helmholtz/realhelmholtz.htm. 10 August 2009.
5. บรรเลง ศรนิล และ สมนึก วัฒนศรียกุล. 2551. ตารางคู่มืองานโลหะ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. หน้า 111-242.

ได้รับบทความวันที่ 14 กันยายน 2552
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 25 ธันวาคม 2552