กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติปี พ.ศ. 2554

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่ได้สนับสนุนเวลาและสถานที่ในการทำวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงด้วยดีหากไม่ได้รับคำปรึกษาชี้แนะจาก อ. อัจฉรา เจริญสุข ผู้เชี่ยวชาญ 11 และ อ. สมชาย น่วมเศรษฐี หัวหน้าฝ่ายมาตรวิทยาไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ดร. ศักดา สมกุล ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้จัดสรรเวลาสำหรับทำงานวิจัยนี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่ช่วยติดต่อประสานงานตลอดระยะเวลาของโครงการวิจัยนี้ โดยเฉพาะคุณพริมา เกิดอุดม และคุณฐานิยา คัมภิรานนท์ และตลอดจนเพื่อนพนักงานสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติทุกท่าน

นอกจากผู้วิจัยรู้ซาบซึ้ง คุณมณวิภา เจริญวรรณยิ่ง ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการติดต่อประสานตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัยที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

ดร. ศักดา สมกุล

นายเทพบดินทร์ บริรักษ์อราวินท์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้อธิบายการออกแบบและสร้าง Helmholtz coil เพื่อใช้สำหรับสอบเทียบเครื่องมือวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กในย่านต่ำกว่า 50 mT ณ ห้องปฏิบัติการแม่เหล็กไฟฟ้า สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ โดยได้เลือก Helmholtz coil ที่มีขดลวดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีความเข้มสนามแม่เหล็กมีความสม่ำเสมอมากกว่า Helmholtz coil ที่มีขดลวดวงกลม งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวคิดในการออกแบบด้วยวิธีกึ่งวิเคราะห์โดยพิจารณาว่าความเข้มสนามแม่เหล็กของ Helmholtz coil เกิดจากการรวมกันของความเข้มสนามแม่เหล็กที่สร้างจากขดลวดสี่เหลี่ยมจัตุรัสแต่ละคู่ ที่คำนวณจากกฎของ Biot-Savart ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ การออกแบบวิธีที่นำเสนอนี้ใช้ข้อมูลจำเพาะของลวดตัวนำในการคำนวณโดยตรงทำให้สามารถประมาณค่าความต้านทานของขดลวดอุณหภูมิขดลวดที่เพิ่มสูงขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของขดลวดได้ก่อนการสร้างต้นแบบ

Helmholtz coil ต้นแบบที่สร้างขึ้นพบว่ามีค่าคงที่ k_s เท่ากับ 3.005 mT/A และค่าความไม่แน่นอนในการวัดเท่ากับ ± 0.04 % ($k = 2$) และมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของค่าคงที่เท่ากับ $-1.2\times10^{-5}\,^{\circ}C^{-1}$ ซึ่งพัฒนาขึ้นมาอย่างมากเมื่อเทียบกับ Helmholtz coil ตัวปัจจุบันที่มีค่าคงที่เท่ากับ 1.725 mT/A ± 0.08 %

Abstract

This research describes design and construction of a Helmholtz coil for calibration of magnetic flux density measuring instruments at Magnetic Laboratory, National Institute of Metrology, Thailand. Square configuration of Helmholtz coils having wider field uniformity than the common circular configuration was chosen. This research proposes a quasi-analytical design, which considered the magnetic field inside the square Helmholtz coil was assembled from the magnetic fields produced by every pair of square loops, which had been analytically derived from the Biot-Savart law. Simulation results calculated by the proposed method showed good agreements with the finite element modelling. Furthermore, the coil resistance, temperature rise and temperature coefficient were estimated because the quasi-analytical design used the specifications of conductor wires directly as the input parameters.

The designed prototype has the coil constant k_s of 3.005 mT/A with the measurement uncertainty of ± 0.04 % ($k = 2$), and the temperature coefficient of the coil constant of -1.2×10^{-5} °C^{-1}. This shows a significant improvement compared to the existing Helmholtz coil, having coil constant of 1.725 mT/A ± 0.08 %.

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
	1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
	1.4 ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ	5
	1.5 สมมติฐานการวิจัย	5
	1.6 ขอบเขตการวิจัย	5
	1.7 การออกแบบการวิจัย	6
2	**งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**	8
	2.1 การทบทวนวรรณกรรม	8
	2.2 หลักการพื้นฐาน	12
	2.2.1 การสอบเทียบเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้ Helmholtz coil	12
	2.2.2 Filamentary circular Helmholtz coil	14
	2.2.3 Filamentary square Helmholtz coil	17
3	**ระเบียบวิธีการวิจัย**	23
	3.1 การออกแบบ Helmholtz coil	23
	3.1.1 การออกแบบ Helmholtz coil ด้วยวิธีกึ่งวิเคราะห์ (quasi-analytical design)	23
	3.1.2 การประมาณความต้านทานในขดลวดตัวนำ	26
	3.1.3 การประมาณอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงใน Helmholtz coil	27
	3.1.4 การประมาณการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ของ Helmholtz coil เนื่องจากอุณหภูมิ	28

3.1.5 ขั้นตอนการออกแบบ Helmholtz coil ด้วยวิธีกึ่งวิเคราะห์ 28
3.2 การสร้างต้นแบบ Helmholtz coil 37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ **หน้า**

3.3 การทดสอบ Helmholtz coil 39
3.4 การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนในการวัด 41

4 ผลการวิจัย 45
4.1 ผลการทดสอบเบื้องต้นของ Helmholtz coil 45
4.2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของ Helmholtz coil 49
4.3 ผลการทดสอบการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กใน Helmholtz coil 51
4.4 การอภิปรายผลการวัด 53

5 บทสรุป 58
5.1 สรุปผลการวิจัย 58
5.2 ข้อเสนอแนะ 59

เอกสารอ้างอิง 60

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์ 62

ภาคผนวก ข Engineering drawing ของต้นแบบ Helmholtz coil 69

ภาคผนวก ค คู่มือสอบเทียบ Helmholtz coil 73

ภาคผนวก ง โปรแกรมสำหรับคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กใน Helmholtz coils 90

ประวัติผู้วิจัย 98

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	ขั้นตอนการวิจัย	7
2.1	ภาพตัดขวางของขดลวดทรงกลมสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กที่มีความสม่ำเสมอในแนวแกน x	9
2.2	(ก) Helmholtz coil ที่มีตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยม, (ข) Double Helmholtz coil ที่มีตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยม	9
2.3	Plasma chamber ที่ใช้ขดลวดจำนวนหลายขดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กสถิตย์	11
2.4	ขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็กให้มีความสม่ำเสมอครอบคลุมปริมาตร V ของ Azpúrua	11
2.5	ระบบสอบเทียบเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้ Helmholtz coil	12
2.6	การหาค่าคงที่ของ Helmholtz coil โดยใช้ NMR magnetometer	13
2.7	(ก) Filamentary circular Helmholtz coil, (ข) เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็ก ($\mathbf{B}$) ของขดลวดวงกลมที่มีรัศมี a โดยที่จุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่ง $x = y = 0$ และ $z = c$	14
2.8	(ก) Filamentary square Helmholtz coil, (ข) เวกเตอร์ความเข้มสนามแม่เหล็ก ($\mathbf{B}$) ของขดลวดสี่เหลี่ยมจตุรัสมีความกว้าง $2a$ โดยที่จุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่ง $x = y = 0$ และ $z = c$	18
2.9	การเปรียบเทียบ $B_z(0,0,z)$ ของ filamentary circular Helmholtz coil กับ filamentary square Helmholtz coil ที่มี $a = 0.5\,\text{m}$ และ $NI = 100$ A	22
3.1	แนวคิดการออกแบบ Helmholtz coil แบบกึ่งวิเคราะห์ (quasi-analytical design)	25
3.2	ขั้นตอนการออกแบบ Helmholtz coil	29
3.3	การเปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของ square Helmholtz coil ตามแนวแกน z ที่คำนวณตามทฤษฎี คำนวณด้วยวิธี quasi-analytical โดยใช้ลวดทองแดงเบอร์	

SWG11 และคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 33

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.4 การเปรียบเทียบความเข้มสนามแม่เหล็กของ circular Helmholtz coil ตามแนวแกน z ที่คำนวณตามทฤษฎี คำนวณด้วยวิธี quasi-analytical โดยใช้ลวดทองแดงเบอร์ SWG11 และคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ 34

3.5 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กของ square Helmholtz coil ที่ใช้ลวดทองแดงเบอร์ SWG11 (ขดลวดหมายเลข 2 ในตารางที่ 3.3) ในระนาบ xz ที่ $y = 0$ จากการคำนวณด้วยวิธี Quasi-analytical design 34

3.6 การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กในระนาบ xz ที่ $y = 0$ จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์: (ก) Square Helmholtz coil, (ข) Circular Helmholtz coil 35

3.7 การเปรียบเทียบภาพตัดขวางของ square และ circular Helmholtz coil (ระนาบ xz ที่ $y = 0$) แสดงของเขตของพื้นที่ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 99.999% และ 99.99% ของความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุดศูนย์กลางของแต่ละขดลวด 36

3.8 การเปรียบเทียบภาพตัดขวางของ square และ circular Helmholtz coil (ระนาบ xy ที่ $z = 0$) แสดงของเขตของพื้นที่ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 99.999% และ 99.99% ของความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ จุดศูนย์กลางของแต่ละขดลวด 37

3.9 แสดงต้นแบบของ Helmholtz coil ก่อนลงมือสร้างจริง 39

3.10 วงจรการทดสอบ Helmholtz coil 41

4.1 ภาพถ่ายของต้นแบบ Helmholtz coil ที่สร้างขึ้น 45

4.2 รูปคลื่นสัญญาณ NMR เมื่อวัดค่า $B_z \approx 30\,\text{mT}$ ณ จุดศูนย์กลางของขดลวด 46

4.3 รูปคลื่นสัญญาณ NMR เมื่อวัดค่า $B_z \approx 40\,\text{mT}$ ณ จุดศูนย์กลางของขดลวด 47

4.4 รูปคลื่นสัญญาณ NMR เมื่อวัดค่า $B_z \approx 50\,\text{mT}$ ณ จุดศูนย์กลางของขดลวด 47

4.5 รูปคลื่นสัญญาณ NMR เมื่อวัดค่า $B_z \approx 40\,\text{mT}$ ณ ตำแหน่ง $(0,0,-0.03)$ 48

4.6 รูปคลื่นสัญญาณ NMR เมื่อวัดค่า $B_z \approx 40\,\mathrm{mT}$ ณ ตำแหน่ง (0,0,0.03) 48
4.7 อุณหภูมิของ Helmholtz coil เมื่อจ่ายด้วยกระแสคงที่ 16.64 A 50

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 แรงดันตกคร่อม Helmholtz coil เมื่อจ่ายด้วยกระแสคงที่ 16.64 A 50
4.9 การลดของค่าคงที่ Helmholtz coil ต่ออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นหลังจากป้อนกระแสคงที่ 16.64 A 51
4.10 ค่าคงที่ของขดลวด $k_s(0,0,z)$ ตามแนวยาวของ Helmholtz coil เมื่อเทียบกับค่าคงที่ของขดลวด ณ จุดศูนย์กลาง 52
4.11 ค่าคงที่ $k_s(x,0,0)$ ตามแนวขวางของ Helmholtz coil เมื่อเทียบกับค่าคงที่ ณ จุดศูนย์กลาง 53
4.12 ภาพแสดงการบิดเบี้ยวของโครงสร้างของ Helmholtz coil 57

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ผลการคำนวณ filamentary Helmholtz coil	30
3.2	ข้อมูลจำเพาะของลวดทองแดงอาบฉนวน	30
3.3	ผลลัพธ์การออกแบบ Helmholtz coil ด้วยวิธี quasi-analytical design	32
3.4	ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัดของ k_s ทำการทดสอบที่ 30 mT	44