

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดสอบทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแท่งแม่เหล็กและขดลวดโซลินอยด์ โดยนำเข็มทิศไปวางรอบแท่งแม่เหล็กจะทำให้เข็มทิศเบนซึ่งแสดงทิศของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.1 และนำเข็มทิศไปวางบริเวณขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จะทำให้เข็มทิศเบนเมื่อเทียบกับขณะที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ แสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแท่งแม่เหล็ก



(ก)

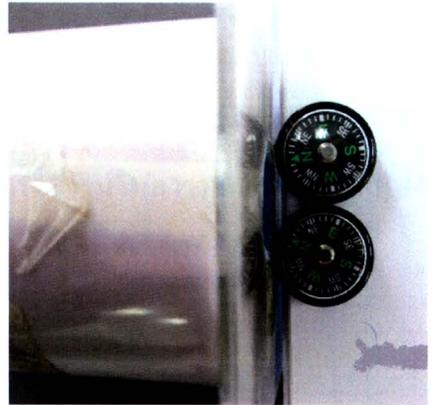


(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) การทดลองหาทิศทางของเข็มทิศเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ และ (ข) ทิศทางของเข็มทิศเมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์



(ก)



(ข)

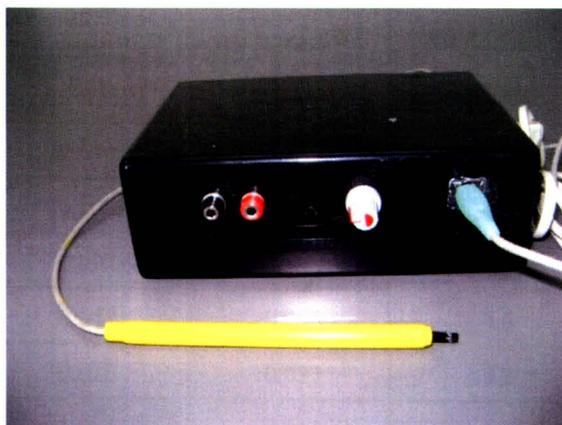
รูปที่ 4.3 (ก) การทดลองหาทิศทางของเข็มทิศเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ และ (ข) ทิศทางของเข็มทิศเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์

จากกรณีของแท่งแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน และทิศของสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ส่วนกรณีของขดลวดโซลินอยด์ สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นได้ต้องมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ เมื่อไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์เข็มทิศจะเบนไปในทิศของสนามแม่เหล็กโลก จากการทดสอบนี้เป็นแนวทางในการออกแบบการทดลองการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กและค่า μ_0 ด้วยอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นอย่างง่าย การทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) และหาค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) เทียบกับค่าคงที่มาตรฐาน โดยที่ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดโซลินอยด์ที่มีอากาศเป็นแกนจะมีค่า μ_0 ส่วนค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของวัสดุจะมีค่า μ ของวัสดุ ขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิดจึงได้ทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ที่มีวัสดุต่างๆ เป็นแกน ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลการออกแบบและประกอบชุดวงจรฮอลล์

จากการออกแบบและประกอบชุดวงจรฮอลล์ ทำให้ได้อุปกรณ์หัววัดฮอลล์ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คือ อุปกรณ์หัววัดฮอลล์ที่สร้างขึ้นสามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กได้ โดยการวัดค่าแรงดันฮอลล์จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นและสามารถนำมาเปลี่ยนแรงดันเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กได้ การออกแบบได้ทำการทดสอบการทำงานของหัววัดฮอลล์จากการวัดแรงดันกับแท่งแม่เหล็ก ผลการทดสอบพบว่า เมื่อนำแท่งแม่เหล็กเข้าไปใกล้หัววัดโดยหันขั้วเหนือเข้าหาหัววัด พบว่าแรงดันเอาต์พุตจะ

เพิ่มขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็ก จากนั้นทำการลดระยะห่างระหว่างหัววัดกับแท่งแม่เหล็ก แล้วอ่านค่าแรงดันเอาต์พุต พบว่าค่าความต่างศักย์ฮอลล์จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มสนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้น และทำการประกอบวงจรลงในกล่อง เพื่อสะดวกต่อการใช้งานในการทดลองเป็นชุดอุปกรณ์ หัววัดฮอลล์ แสดงดังรูปที่ 4.4



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.4 (ก) ชุดอุปกรณ์หัววัดฮอลล์ (ข) หัววัดแบบตามยาว และ (ค) หัววัดแบบตามขวาง

4.2 ผลการศึกษาแรงดันของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นเทียบกับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง

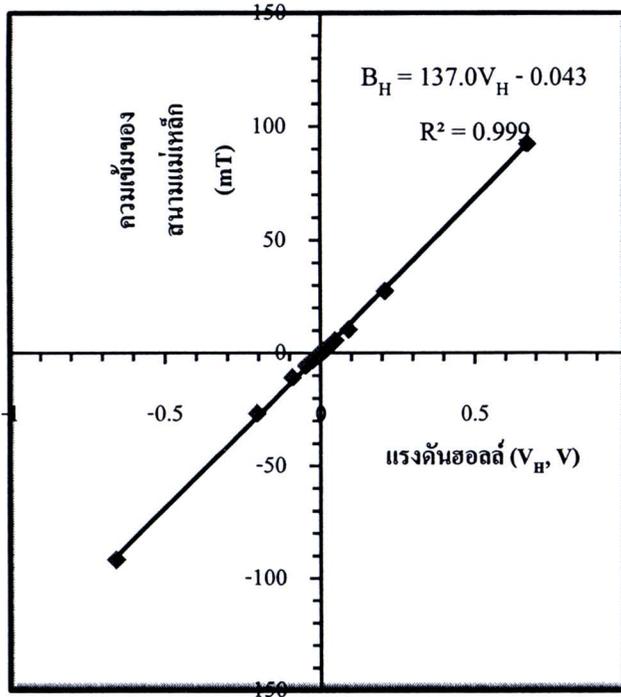
จากการทดลองเพื่อศึกษาแรงดันของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กในทิศพุ่งเข้าและพุ่งออกจากหัววัด ทำการทดสอบกับแท่งแม่เหล็ก เมื่อหันขั้วเหนือเข้าหาหัววัด ทิศของสนามแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งเข้าหัววัด และกลับทิศของแท่งแม่เหล็กโดยหันขั้วใต้เข้าหาหัววัด สนามแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งออกจากหัววัด ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref}) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลการทดลองแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันฮอลล์จากหัววัดที่สร้างขึ้น (V_H , V) กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} mT) ที่ระยะห่างระหว่างแท่งแม่เหล็กกับหัววัดต่าง ๆ

ระยะห่าง (cm)	แรงดันฮอลล์ (V_H , V)		ความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} mT)	
	สนามแม่เหล็ก พุ่งเข้า	สนามแม่เหล็ก พุ่งออก	สนามแม่เหล็ก พุ่งเข้า	สนามแม่เหล็ก พุ่งออก
1	0.674	-0.657	92.5	-91.6
2	0.209	-0.206	27.5	-26.5
3	0.092	-0.09	10.5	-10.6
4	0.047	-0.046	5.6	-5.4
5	0.028	-0.027	3.3	-3.1
6	0.018	-0.017	2.0	-1.9
7	0.012	-0.011	1.3	-1.3
8	0.008	-0.008	0.9	-0.9
9	0.006	-0.005	0.7	-0.6
10	0.005	-0.005	0.5	-0.5
11	0.004	-0.004	0.4	-0.4
12	0.003	-0.003	0.3	-0.3
13	0.002	-0.002	0.2	-0.2
14	0.002	-0.002	0.1	-0.1
15	0.001	-0.001	0.1	-0.1
16	0.001	-0.001	0.1	-0.1

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งเข้าหาหัววัด ค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นและความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง มีค่าเป็นบวก เมื่อสนามแม่เหล็กมีทิศพุ่งออกจากหัววัด ค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นและความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงมีค่าเป็นลบ สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์ (V_H , V) กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} mT) ได้ดังรูปที่ 4.5



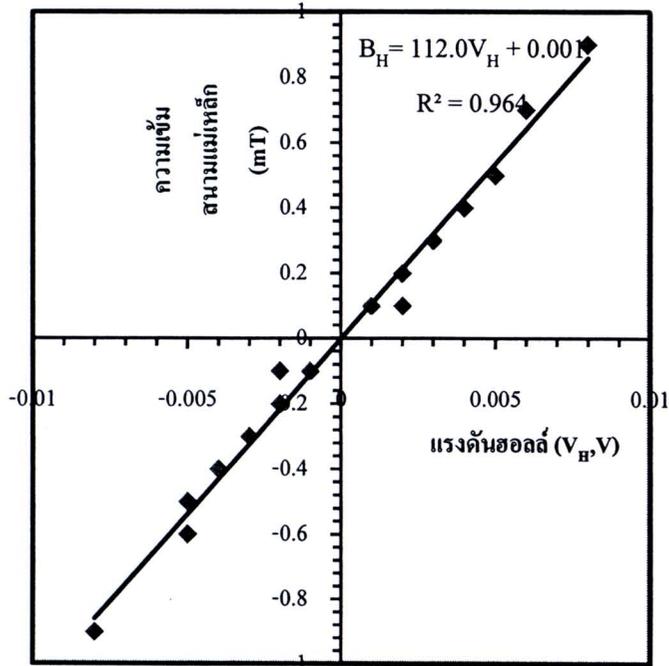


รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์ (V_H , V) กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (mT) ในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กประมาณ ± 100 mT

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงในทิศสนามแม่เหล็กพุ่งเข้านั้น จะเห็นว่าเมื่อความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงเพิ่มขึ้น แรงดันฮอลล์ก็จะเพิ่มขึ้นตาม และเมื่อทำการกลับทิศสนามแม่เหล็กค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงลดลงแรงดันฮอลล์ก็จะลดลงด้วยเป็นไปตามสมการที่ (4.1)

$$B_H(\text{mT}) = 137V_H(\text{V}) - 0.043 \quad (4.1)$$

จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.5 และตามสมการที่ (4.1) ได้ค่า R^2 มีค่า 0.999



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์ (V_H , V) กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (mT) ในช่วง ความเข้มสนามแม่เหล็กประมาณ ± 1 mT

ในการทดลองความเข้มสนามแม่เหล็กที่วัดจากเส้นลวดตัวนำตรงและขดลวดโซลินอยด์มีค่าไม่สูงมากนัก ดังนั้น จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาที่ความเข้มสนามแม่เหล็ก ± 0.9 mT พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงยังเป็นสมการเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าหัววัดที่สร้างขึ้นยังมีสัญญาณในแบบเชิงเส้น เป็นไปตามสมการที่ (4.2)

$$B_H \text{ (mT)} = 112V_H \text{ (V)} + 0.001 \quad (4.2)$$

จะเห็นว่า จากสมการที่ (4.2) เป็นการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กประมาณ ± 1 mT ซึ่งเป็นช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำ ดังนั้นในการทดลองวัดค่าความเข้ม

สนามแม่เหล็กของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นนี้เป็นการวัดความเข้มสนามแม่เหล็กในช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำ จึงใช้สมการที่ (4.2) เป็นสมการเปรียบเทียบในการประมวลผลเพื่อเปลี่ยนค่าแรงดันฮอลล์ (V_H) เป็นความเข้มสนามแม่เหล็ก (B_H)

4.3 ผลการทดลองหาค่า μ_0 จากอุปกรณ์หัววัดฮอลล์ที่สร้างขึ้น

จากการทดลองเพื่อหาค่า μ_0 ของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น วัดค่าแรงดันไฟฟ้า (V_H) ของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref}) จากลวดตัวนำตรงและขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ผลการทดลองดังนี้

4.3.1 ผลการทดลองหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากลวดตัวนำตรงที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

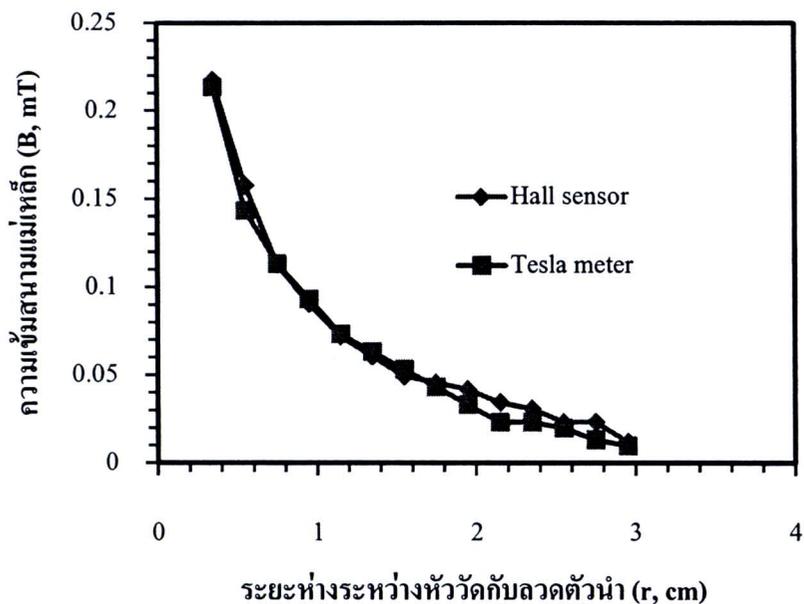
จากการทดลองเพื่อหาค่าแรงดันฮอลล์ (V_H , V) ของหัววัดที่สร้างขึ้น กับความเข้มสนามแม่เหล็กของหัววัดอ้างอิง (B_{ref} , mT) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าขนาด 4 แอมแปร์ไหลผ่านลวดตัวนำตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 cm ยาว 112.4 cm ทำการวัดโดยให้หัววัดตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก ทิศของสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา จากนั้นทำการทดลองโดยวัดระยะห่างระหว่างหัววัดกับลวดตัวนำตรงตามระยะที่กำหนด ทำการวัด 3 ครั้ง ทั้งในกรณีของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) กับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) ผลการวัดค่าแรงดันฮอลล์ (V_H) และความเข้มสนามแม่เหล็ก (B_{ref}) ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลการทดลองแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์ (V_H , V) กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} , mT) เมื่อวัดกับลวดตัวนำตรงในระยะเวลาที่กำหนด

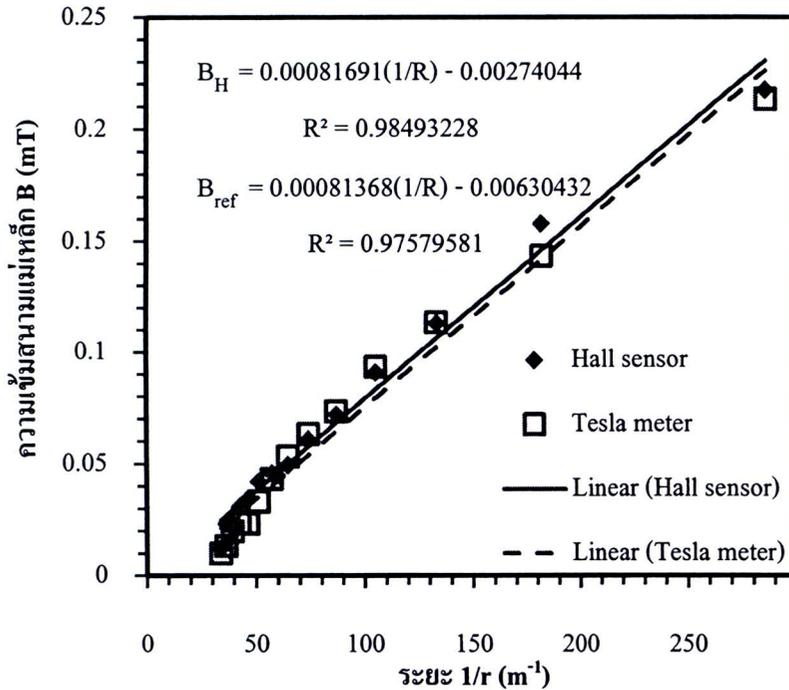
ระยะห่าง (r, cm)	แรงดันฮอลล์ (V_H , V)				ความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} , mT)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.35	0.0020	0.0019	0.0019	0.0019	0.21	0.21	0.22	0.21
0.55	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.14	0.14	0.15	0.14
0.75	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.11	0.11	0.12	0.11
0.95	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.09	0.09	0.10	0.09
1.15	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.07	0.07	0.08	0.07
1.35	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.06	0.06	0.07	0.06
1.55	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.05	0.05	0.06	0.05
1.75	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.04	0.04	0.05	0.04
1.95	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.03	0.03	0.04	0.03
2.15	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.02	0.02	0.03	0.02
2.35	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.02	0.02	0.03	0.02
2.55	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.01	0.02	0.03	0.02
2.75	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.01	0.01	0.02	0.01
2.95	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.01	0.01	0.01	0.01

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างหัววัดกับลวดตัวนำเพิ่มขึ้นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) มีค่าลดลง มีผลให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นมีค่าลดลงด้วย นำแรงดันฮอลล์จากการทดลองมาเปลี่ยนเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้สมการปรับเทียบตามสมการที่ (4.2) ผลจากการเปลี่ยนแรงดันเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น และความเข้มสนามแม่เหล็กที่ได้จากเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) แสดงดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 เป็นการเปลี่ยนค่าแรงดันเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กตามสมการที่ (4.2) เปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องมือวัดอ้างอิง (Tesla meter) ในระยะที่กำหนด พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างหัววัดกับลวดตัวนำเพิ่มขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็กจากหัววัดทั้งสองมีค่าลดลง และมีค่าใกล้เคียงกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (mT) จากหัววัดทั้งสอง กับระยะ r (cm) จะได้กราฟความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.7 และถ้านำความเข้มสนามแม่เหล็กมาหาความสัมพันธ์กับค่า $1/r$ จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กของหัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) และหัววัดอ้างอิง (Tesla meter) ที่ระยะต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง หนึ่งส่วนระยะห่างกับความเข้มสนามแม่เหล็ก

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (B) และระยะ r ดังรูปที่ 4.7 พบว่าความเข้มสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (B_H) และความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงอ้างอิง (B_{ref}) มีแนวโน้มเดียวกัน ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ระยะต่าง ๆ มีขนาดลดลง เมื่อหัววัดอยู่ห่างจากลวดตัวนำมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มสนามแม่เหล็กแปรผกผันกับระยะห่าง และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก และค่า $1/r$ มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กแปรผกผันตรงกับหนึ่งส่วนระยะห่าง เป็นไปตามสมการของบิโอท์-ซาวาร์ต และความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นตรงที่ได้ ดังสมการที่ (4.3) และสมการที่ (4.4)

$$B_H = 0.00081691(1/r) + 0.00274044 \quad (4.3)$$

$$B_{ref} = 0.00081368(1/r) + 0.00630432 \quad (4.4)$$

จากสมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4 จะได้ค่าความชันของกราฟ นำค่าความชันที่ได้มาหาค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) ตามสมการที่ (2.21) และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการที่ (4.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าคงที่มาตรฐาน}|}{\text{ค่าคงที่มาตรฐาน}} \times 100\% \quad (4.5)$$

ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศจากการใช้หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor)

$$\text{ความชัน} = 8.169 \times 10^{-7} \text{ T m}$$

จากสมการที่ (2.21)
$$B = \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\right)$$

ดังนั้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) กับหนึ่งส่วนระยะห่าง (1/r) ดังรูปที่ 4.8

$$\text{ความชัน} = \frac{\mu_0 I}{2\pi}$$

$$\mu_0 = \text{ความชัน} \times \frac{2\pi}{I}$$

$$\mu_0 = 8.169 \times 10^{-7} \times \frac{2\pi}{4} \quad \text{H/m}$$

$$\mu_0 = 4.08 \pi \times 10^{-7} \quad \text{H/m}$$

$$\mu_0 = 1.282 \times 10^{-6} \quad \text{H/m}$$

จากค่า μ_0 ที่คำนวณได้ นำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าคงที่มาตรฐาน

($\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6} \text{ H/m}$) ตามสมการที่ (4.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าคงที่มาตรฐาน}|}{\text{ค่าคงที่มาตรฐาน}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|(1.282 - 1.257) \times 10^{-6}|}{1.257 \times 10^{-6}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = 2.0 \%$$

ค่าความเข้มได้ทางแม่เหล็กของอากาศจากการใช้หัววัดอ้างอิง (Tesla meter)

$$\text{ความเข้ม} = 8.137 \times 10^{-7} \text{ T m}$$

จากสมการที่ (2.21)
$$B = \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi r}\right)$$

ดังนั้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (B) กับหนึ่งส่วนระยะห่าง (1/r) ดังรูปที่ 4.8

$$\text{ความเข้ม} = \frac{\mu_0 I}{2\pi}$$

$$\mu_0 = \text{ความเข้ม} \times \frac{2\pi}{I}$$

$$\mu_0 = 8.137 \times 10^{-7} \times \frac{2\pi}{4} \quad \text{H/m}$$

$$\mu_0 = 4.07\pi \times 10^{-7} \quad \text{H/m}$$

$$\mu_0 = 1.279 \times 10^{-6} \quad \text{H/m}$$

จากค่า μ_0 ที่คำนวณได้ นำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าคงที่มาตรฐานตามสมการที่ (4.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าคงที่มาตรฐาน}|}{\text{ค่าคงที่มาตรฐาน}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|(1.282 - 1.257) \times 10^{-6}|}{1.257 \times 10^{-6}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = 1.8 \%$$

จากผลการคำนวณค่าความเข้มได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำตรง

ที่มาของค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0)	ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0 , H/m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
ค่าคงที่มาตรฐาน	1.257×10^{-6}	-
เครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter)	1.279×10^{-6}	1.8
อุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor)	1.282×10^{-6}	2.0

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศจากเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) และค่าคงที่มาตรฐาน เมื่อนำไปเทียบกับค่าคงที่มาตรฐาน ($\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m) พบว่าค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 2.0 % และค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 1.8 % อุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นสามารถหาค่า μ_0 ได้ใกล้เคียงกับค่าคงที่มาตรฐาน และความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะห่างจากลวดตัวนำตรงจะแปรผกผัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของ บีโธท์-ซาวาร์ท ที่กล่าวไว้

4.3.2 ผลการทดลองหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กและค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากขดลวดโซลินอยด์

การทดลองเพื่อหาค่าแรงดันฮอลล์ (V_H , V) ของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น กับความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} , mT) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ที่มีจำนวนรอบ 2,800 รอบ ในช่วง 0.1 - 1.0 แอมแปร์ ทำการวัดโดยให้หัววัดตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก ทิศของสนามแม่เหล็กหาได้จากกฎมือขวา จากนั้นทำการทดลองโดยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ตามที่กำหนด ทำการทดลอง 3 ครั้ง ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลการทดลองแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์ (V_H , V) กับความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} , mT) ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์

กระแสไฟฟ้า (I, A)	แรงดันฮอลล์ (V_H , V)				ความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} , mT)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	0.032	0.032	0.032	0.03	3.40	3.40	3.40	3.40
0.2	0.065	0.065	0.065	0.07	6.90	6.90	6.90	6.90
0.3	0.098	0.098	0.098	0.09	10.30	10.30	10.30	10.30
0.4	0.130	0.130	0.130	0.13	13.80	13.70	13.80	13.77
0.5	0.162	0.163	0.163	0.16	17.20	17.20	17.20	17.20
0.6	0.195	0.195	0.195	0.19	20.60	20.60	20.60	20.60
0.7	0.228	0.227	0.227	0.22	24.10	24.10	24.10	24.10
0.8	0.260	0.260	0.260	0.26	27.60	27.50	27.50	27.53
0.9	0.292	0.293	0.293	0.29	31.00	30.90	30.90	30.93
1.0	0.325	0.325	0.325	0.33	34.40	34.40	34.40	34.40

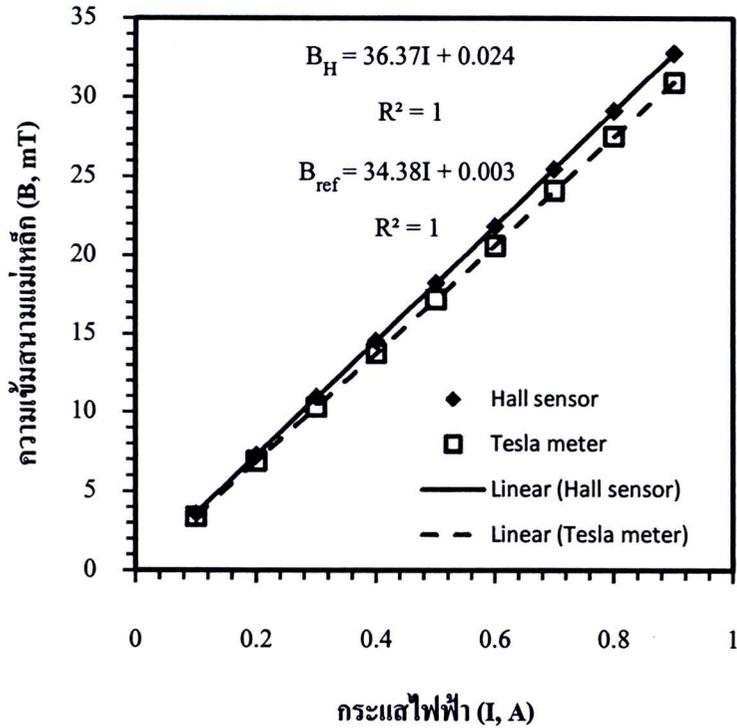
จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์เพิ่มขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องมือวัดอ้างอิง (Tesla meter) มีค่าเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าแรงดันฮอลล์ที่ได้จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฮอลล์กับความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นแบบเชิงเส้นตรง สามารถเปลี่ยนแรงดันเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กได้จากสมการเปรียบเทียบ ตามสมการที่ (4.2) ผลจากการเปลี่ยนแรงดันเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กและค่าความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงแสดงดังตารางที่ 4.6



ตารางที่ 4.6 บันทึกผลการทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด โซลินอยด์จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก อังอิง (Tesla meter)

กระแสไฟฟ้า (I, A)	ความเข้มสนามแม่เหล็กจากหัววัดที่ สร้างขึ้น (B_H , mT)				ความเข้มสนามแม่เหล็กอังอิง (B_{ref} , mT)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0.1	3.58	3.58	3.58	3.59	3.40	3.40	3.40	3.40
0.2	7.28	7.28	7.28	7.28	6.90	6.90	6.90	6.90
0.3	10.97	10.97	10.97	10.98	10.30	10.30	10.30	10.30
0.4	14.56	14.56	14.56	14.56	13.80	13.70	13.80	13.77
0.5	18.14	18.25	18.25	18.22	17.20	17.20	17.20	17.20
0.6	21.84	21.84	21.84	21.84	20.60	20.60	20.60	20.60
0.7	25.53	25.42	25.42	25.46	24.10	24.10	24.10	24.10
0.8	29.12	29.12	29.12	29.12	27.60	27.50	27.50	27.53
0.9	32.70	32.81	32.81	32.78	31.00	30.90	30.90	30.93
1	36.40	36.40	36.40	36.40	34.40	34.40	34.40	34.40

จากตารางที่ 4.6 เมื่อเปลี่ยนค่าแรงดันเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กตามสมการที่ (4.2) เปรียบเทียบค่าความเข้มสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) กับความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องมือวัดอังอิง (Tesla meter) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ความเข้มสนามแม่เหล็กจากหัววัดทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก (B , mT) จากหัววัดทั้งสอง กับกระแสไฟฟ้า (I , A) จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (B) และกระแสไฟฟ้า (I) ดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์มากขึ้นความเข้มสนามแม่เหล็กของอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นและเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิงจะมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความเข้มสนามแม่เหล็กแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าตามสมการของแอมแปร์ และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก และกระแสไฟฟ้า มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง ดังสมการที่ (4.6) และสมการที่ (4.7)

$$B_H \text{ (mT)} = 36.37I \text{ (A)} + 0.024 \quad (4.6)$$

$$B_{ref} \text{ (mT)} = 34.38I \text{ (A)} + 0.003 \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.6) และสมการที่ (4.7) จะได้ค่าความชันของกราฟ นำค่าความชันที่ได้มาหาค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) ตามสมการที่ (2.31)

จากสมการที่ (2.31)
$$B = \left(\frac{\mu_0 N}{L}\right)I$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวด = 2,800 รอบ

L คือ ความยาวของขดลวด = 10.1 cm

ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) ที่ได้จากการทดลอง คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการที่ (4.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าคงที่มาตรฐาน}|}{\text{ค่าคงที่มาตรฐาน}} \times 100\%$$

ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศจากการใช้หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor)

$$\text{ความชัน} = 36.37 \times 10^{-3} \text{ T m}$$

จากสมการที่ (2.31)
$$B = \left(\frac{\mu_0 N}{L}\right)I$$

ดังนั้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 4.9

$$\text{ความชัน} = \frac{\mu_0 N}{L}$$

$$\mu_0 = \text{ความชัน} \times \frac{L}{N}$$

$$\mu_0 = 36.37 \times 10^{-3} \times \frac{0.101}{2800} \quad \text{H/m}$$

$$\mu_0 = 1.312 \times 10^{-6} \quad \text{H/m}$$

จากค่า μ_0 ที่คำนวณได้นำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าคงที่มาตรฐานตามสมการที่ (4.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าคงที่มาตรฐาน}|}{\text{ค่าคงที่มาตรฐาน}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|(1.312 - 1.257) \times 10^{-6}|}{1.257 \times 10^{-6}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = 4.4 \%$$

ค่าความเข้มได้ทางแม่เหล็กของอากาศจากการใช้หัววัดอ้างอิง (Tesla meter)

$$\text{ความชัน} = 34.38 \times 10^{-3} \text{ T m}$$

จากสมการที่ (2.31)
$$B = \left(\frac{\mu_0 N}{L}\right)I$$

ดังนั้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าจากรูปที่ 4.9

$$\text{ความชัน} = \frac{\mu_0 N}{L}$$

$$\mu_0 = \text{ความชัน} \times \frac{L}{N}$$

$$\mu_0 = 34.38 \times 10^{-3} \times \frac{0.101}{2800} \quad \text{H/m}$$

$$\mu_0 = 1.240 \times 10^{-6} \quad \text{H/m}$$

จากค่า μ_0 ที่คำนวณได้ นำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับค่าคงที่มาตรฐานตามสมการที่ (4.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าคงที่มาตรฐาน}|}{\text{ค่าคงที่มาตรฐาน}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|(1.240 - 1.257) \times 10^{-6}|}{1.257 \times 10^{-6}} \times 100\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = 1.4 \%$$

จากผลการคำนวณค่าความเข้มได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) และเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์

ที่มาของค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0)	ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0 , H/m)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
ค่าคงที่มาตรฐาน	1.257×10^{-6}	-
เครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter)	1.240×10^{-6}	1.4
อุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor)	1.312×10^{-6}	4.4

จากตารางที่ 4.7 พบว่า ค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศจากเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) และค่าคงที่มาตรฐาน เมื่อนำไปเทียบกับค่าคงที่มาตรฐาน ($\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m) พบว่าค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 4.4 % และค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (Tesla meter) มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 1.4 % อุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นสามารถหาค่า μ_0 ได้ใกล้เคียงกับค่าคงที่มาตรฐาน และหัววัดมาตรฐานเทสลามีเตอร์ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% และความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรง ซึ่งเป็นไปตามกฎของแอมแปร์ ที่กล่าวไว้

จากผลการทดลองที่ 4.3.1 และผลการทดลองที่ 4.3.2 พบว่าค่าความซึมได้ทางแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากการทดลองมีหัววัดที่ใช้ในการทดลอง 2 แบบคือ หัววัดที่ใช้วัดตามขวางใช้ในการวัดกับลวดตัวนำตรง และหัววัดที่ใช้วัดตามยาวใช้ในการวัดกับขดลวดโซลินอยด์ จึงมีผลทำให้ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าแตกต่างกันบ้าง ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับระยะห่างและการทดลองนำแท่งแม่เหล็กที่มีความเข้มมากๆ มาทดสอบกับอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น พบว่าสามารถวัดความเข้มสนามแม่เหล็กได้ในช่วง ± 200 mT

4.4 ผลการวัดแรงดันฮอลล์และความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ที่มีวัสดุต่างๆ เป็นแกน

จากการทดลองวัดแรงดันฮอลล์โดยใช้อุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้นและวัดความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องวัดความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ที่มีวัสดุต่างๆ เป็นแกน แกนของขดลวดโซลินอยด์ที่ใช้ คือ แกนอากาศ แกนเหล็ก แกนอะลูมิเนียม และแกนทองแดง ซึ่งเหล็กจัดเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก อะลูมิเนียมจัดเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติก และทองแดงจัดเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติก สมบัติความเป็นแม่เหล็กของวัสดุทั้ง 3 ชนิดแตกต่างกัน ผลการทดลองวัดแรงดันฮอลล์จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 บันทึกผลการทดลองวัดแรงดันฮอลล์จากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ที่มีวัสดุต่างๆ เป็นแกน

กระแสไฟฟ้า (I, A)	แรงดันฮอลล์ (V_H , V)			
	ขดลวดโซลินอยด์ แกนอากาศ	ขดลวดโซลินอยด์ แกนเหล็ก	ขดลวดโซลินอยด์ แกนอะลูมิเนียม	ขดลวดโซลินอยด์ แกนทองแดง
0.2	0.070	0.331	0.071	0.069
0.3	0.100	0.473	0.101	0.099
0.4	0.134	0.632	0.134	0.132
0.5	0.167	0.793	0.169	0.166
0.6	0.199	0.892	0.200	0.198
0.7	0.231	1.021	0.233	0.230
0.8	0.263	1.209	0.264	0.262
0.9	0.296	1.356	0.297	0.295
1.0	0.330	1.352	0.331	0.328

จากตารางที่ 4.8 ทำการเปลี่ยนค่าแรงดันขอลต์เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้สมการปรับเทียบตามสมการที่ (4.2) ผลจากการเปลี่ยนแรงดันเป็นความเข้มสนามแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 4.9 และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องมือวัดอ้างอิง (Tesla meter) แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 บันทึกผลการทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็กจากอุปกรณ์หัววัดที่สร้างขึ้น (Hall sensor) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ที่มีวัสดุต่างๆ เป็นแกน

กระแสไฟฟ้า (I, A)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B_H , mT)			
	ขดลวดโซลินอยด์ แกนอากาศ	ขดลวดโซลินอยด์ แกนเหล็ก	ขดลวดโซลินอยด์ แกนอะลูมิเนียม	ขดลวดโซลินอยด์ แกนทองแดง
0.2	7.84	37.07	7.97	7.73
0.3	11.20	52.98	11.31	11.09
0.4	11.01	70.79	15.01	14.79
0.5	18.71	88.82	18.93	18.59
0.6	22.29	99.91	22.40	22.18
0.7	25.87	114.35	26.09	25.76
0.8	29.46	135.41	29.57	29.35
0.9	33.15	151.87	33.27	33.04
1.0	36.96	151.43	37.07	36.74

ตารางที่ 4.10 บันทึกผลการทดลองวัดความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องมือวัดอ้างอิง (Tesla meter) เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด โซลินอยด์ที่มีวัสดุต่างๆ เป็นแกน

กระแสไฟฟ้า (I, A)	ความเข้มสนามแม่เหล็กอ้างอิง (B_{ref} mT)			
	ขดลวด โซลินอยด์ แกนอากาศ	ขดลวด โซลินอยด์ แกนเหล็ก	ขดลวด โซลินอยด์ แกนอะลูมิเนียม	ขดลวด โซลินอยด์ แกนทองแดง
0.2	7.17	32.90	7.18	7.16
0.3	10.56	48.20	10.57	10.55
0.4	13.88	62.90	13.90	13.86
0.5	17.62	79.50	17.63	17.61
0.6	20.90	93.20	21.00	20.80
0.7	24.40	119.00	24.50	24.30
0.8	27.80	123.80	27.90	27.80
0.9	31.4	140.2	31.5	31.2
1.0	34.7	153.7	34.8	34.6

จากตารางที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก พบว่าสมบัติของแม่เหล็กแต่ละชนิดที่ใช้เป็นแกนของขดลวด โซลินอยด์มีสมบัติความเป็นแม่เหล็กของสารแตกต่างกัน [17] คือเหล็กจัดเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบเฟอร์โรแมกเนติก เป็นสารแม่เหล็กที่ดูดกับแม่เหล็กอย่างรุนแรงจึงทำให้เกิดความเข้มสนามแม่เหล็กมาก มีผลให้แรงดันฮอลล์มีค่ามาก อะลูมิเนียมจัดเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติก เป็นสารแม่เหล็กที่ดูดกับแม่เหล็กอย่างอ่อน จึงทำให้มีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยกว่าเหล็กแต่มีค่ามากกว่าทองแดง และทองแดงจัดเป็นวัสดุแม่เหล็กแบบไดอะแมกเนติก เป็นสารที่ผลักกับแม่เหล็กจึงมีความเข้มสนามแม่เหล็กน้อยที่สุดและใกล้เคียงกับอะลูมิเนียม ส่วนแกนอากาศมีค่าความเข้มสนามแม่เหล็กมากกว่าทองแดงแต่น้อยกว่าอะลูมิเนียม ซึ่งจะพบว่า แกนเหล็กมีความเข้มสนามแม่เหล็กมากที่สุด รองลงมาคือ แกนอะลูมิเนียม แกนอากาศ และแกนทองแดง ตามลำดับ ซึ่งแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็กแต่ละชนิด เป็นไปตามสมการที่ (4.8) และสมการที่ (4.9)

$$B = \mu_0 H \quad (4.8)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (4.9)$$

จากสมการที่ (4.8) เป็นค่าของสนามแม่เหล็กที่เป็นแกนอากาศ จะพบว่าเมื่อสนามแม่เหล็ก B มีค่ามากขึ้น จะทำให้สนามแม่เหล็ก H มีค่ามากขึ้นด้วย และจากสมการที่ (4.9) เป็นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เป็นแกนวัสดุ จะพบว่าถ้าวัสดุที่มีความซึมได้ทางแม่เหล็กมากจะทำให้ความเข้มสนามแม่เหล็กมีค่ามาก ซึ่งวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก มีค่า $\mu_r \gg 1$ ทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมาก จึงเป็นเหตุผลที่นำวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกมาเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก และเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กได้เป็นอย่างดี