

การสร้างชุดขดลวดเหนี่ยวนำ สำหรับการทดลองทางฟิสิกส์ เรื่อง กฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์

The Construction of Induction Coils Set for Physics Experimental on Faraday' Law of Electromagnetic Induction

ทิพย์วรรณ หงกะเชิณ^{1*}, ธนพงษ์ เชื้อฉุน², เกศริน มีมล¹, วาทีนี จันมี³

Tippavan Hongkachern^{1*}, Thanapong Chuechun², Kedsarin Meemon³,
Watinee Chanmee⁴

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร

³สาขาวิชาเคมี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร

¹Physics Department, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

²Medical Science Department, Faculty of Science, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

³Chemistry Department, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

*Corresponding author email: tippavan.ho@bsru.ac.th

Received 10 Jun 2025 Revised 10 Sep 2025 Accepted 08 Oct 2025

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของวิจัยนี้เป็นการสร้างและพัฒนาชุดขดลวดเหนี่ยวนำให้มีคุณภาพเพื่อใช้ประกอบเป็นชุดทดลองสำหรับการศึกษาหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ ผู้วิจัยได้สร้างชุดขดลวดเหนี่ยวนำซึ่งสร้างขึ้นจากลวดทองแดงพันรอบท่อพีวีซีเป็นขดลวดโซลินอยด์ ประกอบไปด้วยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ผู้วิจัย

ทำการทดสอบการใช้งานและประเมินคุณภาพโดยผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ผลการวิจัยพบว่า ขดลวดปฐมภูมิเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 6.0 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร จำนวนรอบการพันขดลวด 150 200 และ 300 รอบ เมื่อผ่านไฟฟ้ากระแสสลับสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กจากกระแสไหลผ่านขดลวดโซลินอยด์ ขดลวดทุติยภูมิเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.2 เซนติเมตร ความยาว 4 เซนติเมตร จำนวนรอบการพันขดลวด 100 200 และ 300 รอบ ชุดขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นเมื่อประกอบเป็นชุดทดลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้า โดยเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ในช่วง 0.8 ถึง 1.2 แอมแปร์ ให้กับขดลวดปฐมภูมิจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิในช่วง 1.75 ถึง 115 มิลลิโวลต์ เป็นไปตามกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.71 ถึง 14.22 เปอร์เซ็นต์ และมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X}$ = 4.72, $S.D.$ = 0.30)

คำสำคัญ : ขดลวดเหนี่ยวนำ, การทดลองทางฟิสิกส์, กฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์

Abstract

The objective of this research was to design and develop an induction coil set for use in experimental setups to study the principles of electromagnetic induction based on Faraday's law. The induction coil set consists of primary and secondary coils constructed specifically for educational and experimental purposes. The functionality of the apparatus was tested, and its quality was evaluated by experts.

The experimental results demonstrated that the primary coils (diameter: 6 cm, length: 10 cm) with 100, 200, or 300 turns produced magnetic fields consistent with the principle of the solenoid's magnetic field. The secondary coils, each with a diameter of 2.2 cm, a length of 4 cm, and 100, 200, and 300 turns respectively, were used to measure the induced electromotive force (EMF). When an alternating current at 50 Hz, ranging from 0.8 A to 1.2 A, was applied to the primary coil, the secondary coil generated an induced EMF in the range of 1.75 mV to 115 mV. The apparatus effectively demonstrates the relationship between electric current and induced EMF, in accordance with Faraday's law of electromagnetic induction. The measured percentage error ranged from 0.71% to 14.22%. The quality is at a very good level ($\bar{X} = 4.72$, $S.D. = 0.30$)

Keywords : Induction coils, Physics Experimental, Faraday's law of electromagnetic induction

1. บทนำ

การจัดการเรียนรู้ในรายวิชาฟิสิกส์เป็นวิชาที่ต้องศึกษาหาเหตุผลมาอธิบายปรากฏการณ์ในธรรมชาติ โดยเฉพาะในเนื้อหาที่มีความซับซ้อนจำเป็นต้องอาศัยสื่อการสอนที่ช่วยให้ นักศึกษาเข้าใจหลักการทางกายภาพได้อย่างลึกซึ้ง หนึ่งในสื่อที่มีประสิทธิภาพสูงในการส่งเสริมการเรียนรู้คือ ชุดทดลอง ซึ่งทำหน้าที่เป็นสื่อที่ทำให้เกิดการเรียนรู้แบบประสบการณ์ตรงโดยสร้างประสบการณ์ให้ผู้เรียนสามารถรับรู้และเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง การลงมือปฏิบัติกิจด้วยตนเองทำให้ประสาทสัมผัสทั้งห้าได้รับรู้และเกิดการจดจำได้มากที่สุดตามแนวคิด “กรวยประสบการณ์ (Cone of Experience)” ของ เอ็ดการ์ เดล (Edgar Dale) (ดวงฤดี, 2549)

ชุดทดลองจึงมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเรียนการสอนฟิสิกส์ โดยเฉพาะการทดลองเกี่ยวกับเรื่องแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) ซึ่งช่วยให้นักศึกษาสามารถเข้าใจแนวคิดของกฎฟาราเดย์ (Faraday's Law) ได้จากการสังเกตผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามปัจจุบันชุดทดลองที่ใช้งานในมหาวิทยาลัยราชภัฏเป็นการนำเข้ามาจากต่างประเทศ มีราคาสูง มีขนาดใหญ่ และต้องประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชิ้น ทำให้ยุ่งยากในการใช้งานและซ่อมบำรุง อีกทั้งยังมีจำนวนไม่เพียงพอต่อจำนวนนักศึกษาในห้องเรียน แม้จะมีงานวิจัยที่พัฒนาอุปกรณ์หรือชุดทดลองทดแทน เช่น ชุดการทดลองแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำกระแส (ศุภกร กตาทิการกุล และคณะ, 2556) อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กจากหลักการเหนี่ยวนำ (ทวีชัย เชื้อจีน, 2553), และการใช้หัววัดฮอลล์ (ชยานิศ ทองมาก และคณะ, 2553) การพัฒนาชุดทดลอง เรื่อง กระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับใช้ในการสอนวิชาฟิสิกส์ เพื่อส่งเสริมผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษาระดับปริญญาตรี (นันทนัช วัฒนสุภิญญา, 2563) รวมถึงงานวิจัยที่ควบคุมระบบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ศึกษากฎของฟาราเดย์ เช่น งานวิจัยการพัฒนาชุดสาธิตการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ในรายวิชาฟิสิกส์ (รัตติกานต์ ยะกะชัย และคณะ, 2565) และการศึกษาและพัฒนาชุดปฏิบัติการการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (สมภพ สุขเฉลิม และอมร เทศสกุลวงศ์, 2560) พบว่างานเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดในด้านความเรียบง่ายในการสร้างสำหรับใช้งานในห้องเรียนและความเหมาะสมกับบริบทของสถานศึกษาที่มีทรัพยากรจำกัด

ดังนั้นจากข้อจำกัดของงานวิจัยก่อนหน้านี้คือ การพัฒนาชุดทดลองที่สามารถสร้างได้ง่าย มีต้นทุนไม่สูงมาก และสามารถใช้ศึกษากฎของฟาราเดย์ได้ในระดับมหาวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนา “ชุดทดลองเหนี่ยวนำ” ซึ่งสามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า และมีเตอร์วัดปริมาณทางไฟฟ้าที่มีอยู่ในชั้นเรียนใช้ประกอบเป็นชุดทดลองเรื่องกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ให้สามารถใช้งานจริงในการจัดการเรียนการสอน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างและพัฒนาชุดทดลองเหนี่ยวนำให้มีคุณภาพ

3. วิธีดำเนินการวิจัย

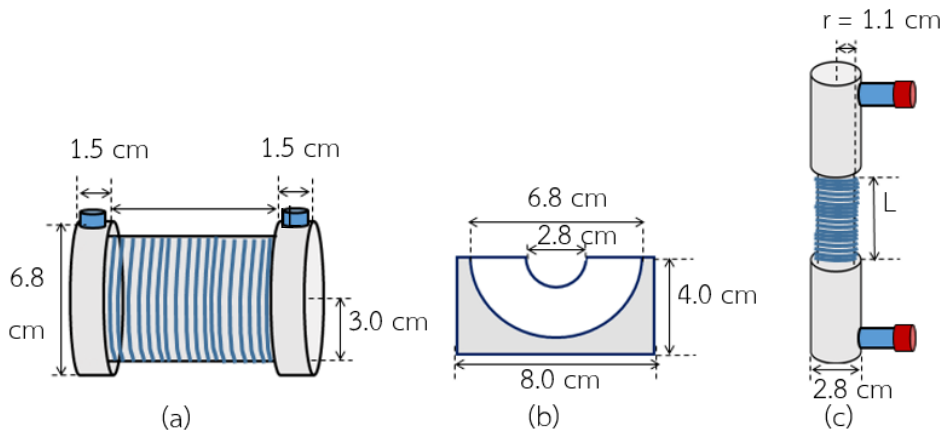
งานวิจัยนี้เป็นการสร้างและพัฒนาชุดทดลองเหนี่ยวนำซึ่งประกอบไปด้วยชุดลดปฏุมภูมิและชุดลดทฤษฎีภูมิ โดยสร้างชุดลดปฏุมภูมิให้สามารถเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กสอดคล้องกับสมการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในชุดลดโซเลนอยด์ยาว และมีปริมาณของสนามแม่เหล็กเหมาะสมต่อการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าในชุดลดทฤษฎีภูมิ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากหม้อแปลงโวลต์ต่ำ และสร้างชุดลดทฤษฎีภูมิให้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ในปริมาณที่วัดได้ด้วยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าในห้องเรียน มีการดำเนินการวิจัยดังนี้

1. สร้างชุดทดลองเหนี่ยวนำ

ชุดลดปฏุมภูมิ สร้างโดยใช้ลวดทองแดงพันรอบท่อพีวีซีซึ่งมีรัศมี 3 เซนติเมตร เป็นชุดลดโซเลนอยด์ บริเวณปลายท่อทั้งสองด้านต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าดังภาพที่ 1 (a)

ฐานรองตั้ง ประกอบขึ้นจากแผ่นอะคริลิกใสตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 4 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร มีขอบสูงว้เป็นรูปครึ่งวงกลมใหญ่และเล็ก โดยครึ่งวงกลมใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 6.8 เซนติเมตร และครึ่งวงกลมเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ดังภาพที่ 1 (b)

ชุดลดทฤษฎีภูมิ สร้างโดยใช้ลวดทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตร พันรอบท่อพีวีซี รัศมี 1.1 เซนติเมตร เป็นชุดลดโซเลนอยด์บริเวณปลายท่อทั้งสองด้านต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าดังภาพที่ 1 (c)



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของชุดขดลวดเหนี่ยวนำ (a) ขดลวดปฐมภูมิ (b) ฐานรองตั้ง และ (c) ขดลวดทุติยภูมิ



ภาพที่ 2 ชุดขดลวดเหนี่ยวนำ

ชุดขดลวดเหนี่ยวนำประกอบด้วยขดลวดปฐมภูมิยึดติดกับฐานรองตั้ง และนำขดลวดทุติยภูมิวางไว้ภายในกึ่งกลางของขดลวดปฐมภูมิโดยวางบนฐานรองตั้ง ดังภาพที่ 2 เมื่อนำมาประกอบกับอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟและเครื่องวัดได้เป็นชุดทดลองการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ แสดงการต่อวงจรดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ชุดทดลอง เรื่องการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์

2. ศึกษาสนามแม่เหล็กภายในขดลวดปฐมภูมิ

สร้างสนามแม่เหล็กโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับโวลต์ต่ำ (AC/DC Low Voltage Power Supply รุ่น Grammago No. 2019250) วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในเส้นลวดด้วยมัลติมิเตอร์ (FLUKE รุ่น 115 TRUE RMS MULTIMETER) ปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าด้วยกล่องตัวต้านทานปรับค่าได้

วัดค่าสนามแม่เหล็กภายในขดลวดโดยใช้หัววัดฮอลล์ (Hall probe แบบ axial รุ่น Phywe No.13610.93 Axial length (without handle) 300 mm tube diameter 6 mm) ร่วมกับเครื่องแสดงค่าสนามแม่เหล็ก (Digital Teslameter รุ่น Phywe No.13610.93 with Axial and tangential Probes 220 volt 3½ LED digits display rang 0.00001 to 2T)

การทดลองระยะแรกผู้วิจัยได้ออกแบบให้ขดลวดปฐมภูมิมีความยาวของขดลวดที่แตกต่างกัน 3 ขดลวด โดยขดลวดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร มีความยาวแตกต่างกันเป็น 5 10 และ 15 เซนติเมตร และมีจำนวนรอบการพันขดลวดเป็น 100 200 และ 300 รอบตามลำดับ เพื่อหาความยาวของขดลวดที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นขดลวดโซลินอยด์ยาว

3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ และ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิ

นำขดลวดมาประกอบเป็นชุดทดลองดังภาพที่ 3 เมื่อจ่ายไฟจากเครื่องจ่ายไฟโวลต์ต่ำ เป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ 50 เฮิร์ต วัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (ε) ของขดลวด ทุติยภูมิโดยใช้มัลติมิเตอร์ (AMPROBE รุ่น 5 XP-A) ในโหมดโวลต์มิเตอร์ และวัดค่า กระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิโดยใช้ด้วยมัลติมิเตอร์ (FLUKE รุ่น 115 TRUE RMS MULTIMETER) ในโหมดแอมมิเตอร์ ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและ กระแสไฟฟ้า เมื่อขดลวดปฐมภูมิจำนวนรอบต่อความยาวเป็น 1000 2000 และ 3000 รอบ ต่อเมตร และขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนรอบเป็น 150 200 และ 300 คำนวณค่าความ เหนี่ยวนำรวมของขดลวดจากการทดลอง และหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความ เหนี่ยวนำรวมจากการทดลองเทียบกับทฤษฎี

4. ประเมินคุณภาพชุดทดลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดรูปแบบแบบประเมินคุณภาพ โดยแบบประเมินคุณภาพชุดทดลองเหนี่ยวนำ เป็นแบบประเมิน 5 ระดับ คือ ดีมาก ดี ปาน กลาง พอใช้ และต้องปรับปรุง มีคะแนนเป็น 5, 4, 3, 2, 1 ตามลำดับ ตามวิธีของลิเคิร์ท (พวงรัตน์ ทวีรัตน์, 2540) จำนวน 22 ข้อ แบ่งเป็น 4 ด้าน ได้แก่ 1) ลักษณะทั่วไป 2) การ ใช้งาน 3) การบำรุงรักษา 4) การนำไปใช้จัดการเรียนรู้ โดยผลการประเมินกำหนดเกณฑ์ ดังนี้ คือ 1.00-1.50 (ปรับปรุง) 2.51-3.50 (พอใช้) 3.51-4.50 (ดี) 4.51-5.00 (ดีมาก) แล้ว นำแบบประเมินให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่านประเมินความสอดคล้อง (IOC) ได้ค่าดัชนี ความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.67-1.00 และนำแบบประเมินไปให้ผู้เชี่ยวชาญด้านฟิสิกส์ จำนวน 3 ท่าน ประเมินคุณภาพชุดทดลองเหนี่ยวนำ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

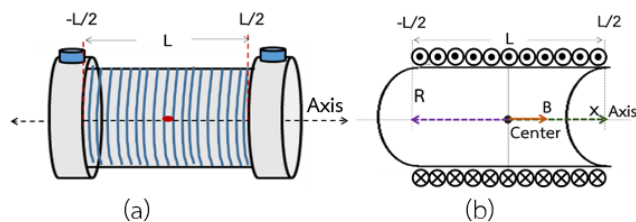
สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์

เมื่อมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านขดลวดวงกลมรัศมี R จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวด วงกลม โดยสนามแม่เหล็กที่ระยะห่าง จากจุดศูนย์กลาง (Center) วงกลมไปบนแนวแกน เป็น

ระยะ x ได้สมการสนามแม่เหล็ก (Young & Freedman, 2011, P. 933) ตามกฎของบิโอต์ - ซาวาร์ต (Biot-Savart) ดังนี้

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (1)$$

เมื่อ μ_0 คือค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic permeability) ในสุญญากาศ และมีค่าโดยประมาณเท่ากับในอากาศ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A หรือ 12.56×10^{-7} T.m/A)



ภาพที่ 4 ขดลวดโซเลนอยด์ (a) แกนตามยาวขดลวด (b) ภาคตัดขวางสนามแม่เหล็กบนแกนตามยาวของขดลวด

เมื่อนำขดลวดวงกลมต่อกันจำนวน N รอบ มีความยาวเป็น L เรียกขดลวดนั้นว่าขดลวด โซเลนอยด์ สมการสนามแม่เหล็ก ณ จุดศูนย์กลาง (Center) ภายในของขดลวดโซเลนอยด์ทั่วไป (The general) ที่มีความยาว L ใดๆ ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ (1) ตามแนวแกน x โดยแทนขอบเขตจาก $-L/2$ ไป $L/2$ ได้สมการต่อไปนี้

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + R^2}} \right) \quad (2)$$

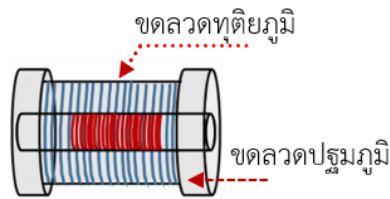
ในกรณีที่ขดลวดโซเลนอยด์มีความยาว L มาก ๆ เมื่อเทียบกับรัศมี (R) ของขดลวด จากกฎของแอมแปร์จะได้สมการสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางขดลวดโซเลนอยด์ยาว (The Infinite-length) (Young & Freedman, 2011, P. 940) และเมื่อ $n = N/L$ ดังนี้

$$B = \mu_0 nI \quad (3)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดเหนี่ยวนำ

ชุดขดลวดเหนี่ยวนำประกอบไปด้วยขดลวดปฐมภูมิทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า และขดลวดทุติยภูมิซึ่งวางไว้ตรงกลางของขดลวดปฐมภูมิทำหน้าที่สร้าง

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) ที่ได้รับจากขดลวดปฐมภูมิมีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 5 ขดขดลวดเหนี่ยวนำ

ไฟฟ้ากระแสสลับ I_1 ความถี่ f ไหลในขดลวดปฐมภูมิซึ่งมี n_1 รอบต่อเมตร จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับ รอบ ๆ ขดลวด และเมื่อสนามแม่เหล็กสลับผ่านพื้นที่หน้าตัดของขดลวดทุติยภูมิ A_2 ซึ่งมีจำนวน N_2 รอบ นั่นคือเกิดการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดทุติยภูมิ ($\mathcal{E}$) (Young & Freedman, 2011, P. 962) ตามกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of induction) ดังสมการ

$$\mathcal{E} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 A_2 \frac{dB_1}{dt} \quad (4)$$

เมื่อฟลักซ์แม่เหล็ก $\Phi = B_1 A_2$ สนามแม่เหล็กสลับ $B_1 = B_0 \sin \omega t$ ให้ B_0 เป็นสนามแม่เหล็กสูงสุด และความถี่เชิงมุม $\omega = 2\pi f$ แทนในสมการที่ (4) จะได้สมการดังนี้

$$\mathcal{E} = -N_2 A_2 \omega B_0 \cos \omega t \quad (5)$$

เครื่องหมายลบบ่งบอกทิศทางการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้า เมื่อแทนค่าสนามแม่เหล็กของขดลวดโซลินอยด์ยาวตามสมการที่ (3) สามารถเขียนเฉพาะขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุด ($\mathcal{E}_0$) ได้เป็น

$$\mathcal{E}_0 = n_1 N_2 A_2 \omega \mu_0 I_0 \quad (6)$$

ในการทดลองวัดค่าทางไฟฟ้าด้วยมัลติมิเตอร์เป็นค่าเฉลี่ยแบบยังผล (Root Mean square, rms) ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิและกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขดลวดปฐมภูมิ (Young & Freedman, 2011, P. 994) ได้ดังนี้

$$\mathcal{E}_{rms} = M \omega I_{rms} \quad (7)$$

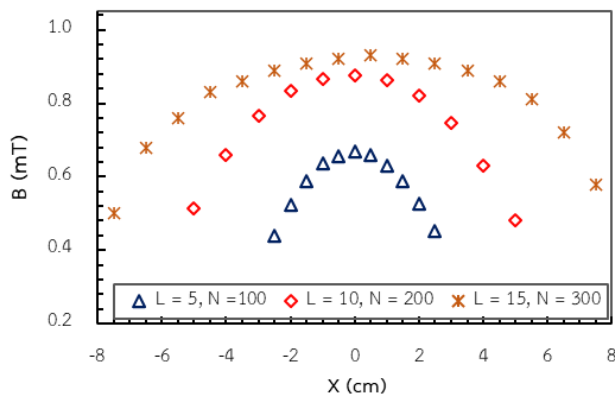
เมื่อ M คือความเหนี่ยวนำรวม $M = n_1 N_2 A_2 \mu_0$

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการศึกษาสนามแม่เหล็กภายในขดลวดปฐมภูมิ

(1) สนามแม่เหล็กบนแนวแกนภายในขดลวดปฐมภูมิ

เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ให้กับขดลวดปฐมภูมิ เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร มีความยาวแตกต่างกันเป็น 5 10 และ 15 เซนติเมตร และมีจำนวนรอบการพันขดลวดเป็น 100 200 และ 300 รอบตามลำดับ วัดค่าสนามแม่เหล็กได้ดังภาพที่ 6



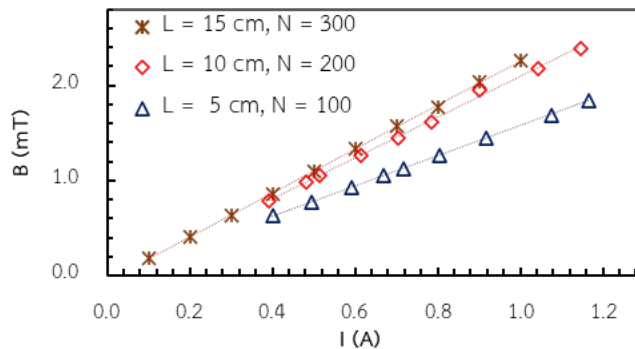
ภาพที่ 6 สนามแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิตามยาวของขดลวด 3 ขด เมื่อขดลวดมีความยาว 5 10 และ 15 เซนติเมตร และมีจำนวนรอบของขดลวด 100 200 และ 300 ตามลำดับ

สนามแม่เหล็กภายในขดลวดโซลินอยด์มีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนแกนตามยาวของขดลวดโดยมีค่ามากที่สุด ณ บริเวณจุดศูนย์กลางแกน และมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแกน ขดลวดที่มีความยาวมากจะให้สนามแม่เหล็กในช่วงกลางแกนมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ ในขณะที่ขดลวดที่สั้นกว่าจะมีสนามแม่เหล็กลดลงมากบริเวณที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง และขดลวดโซลินอยด์มี 3 เซนติเมตรที่มีความยาวในช่วง 5 – 15 เซนติเมตร เมื่อมีจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 300 จะให้ค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางเพิ่มมากขึ้น

(2) ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิ

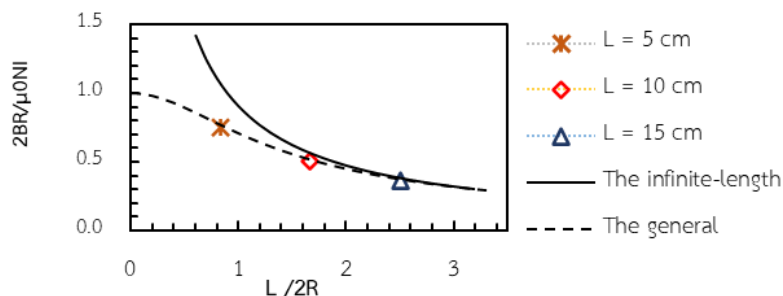
เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.1 – 1.2 มิลลิแอมแปร์ ให้กับขดลวดปฐมภูมิ ทั้ง 3 ขนาด พบว่าสนามแม่เหล็กภายในขดลวด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อ

กระแสไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นเป็นไปตามหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในขดลวดที่ผ่านกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก
ของและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดปฐุมภูมิ

เมื่อนำค่าความชันของกราฟมาคำนวณค่าให้ได้ตัวแปร $2BR/\mu_0NI$ เพื่อเปรียบเทียบกับสมการค่าสนามแม่เหล็กในขดลวดโซเลนอยด์ทั่วไป (The general) และสมการสนามแม่เหล็กในขดลวดโซเลนอยด์ยาว (The infinite-length) ตามวิธีการศึกษาค่าสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ยาวของ Binder, Hui and Goldman, (2014) พบว่าขดลวดความยาว 5 10 และ 15 เซนติเมตร มีค่าตัวแปรสอดคล้องกับกราฟของขดลวดโซเลนอยด์ที่มีความยาวใด ๆ เป็นอย่างดี และเมื่อความยาวเพิ่มขึ้นเป็น 10 และ 15 เซนติเมตรจะให้ผลสอดคล้องกับขดลวดโซเลนอยด์ยาวมากขึ้น ดังภาพที่ 8



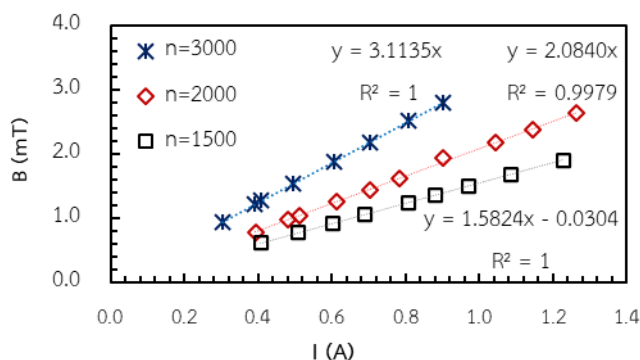
ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ค่าตัวแปร $2BR/\mu_0NI$ กับ ค่าตัวแปร $L/2R$ จากการ
ทดลองเทียบกับกราฟสมการขดลวดโซเลนอยด์ยาว (The infinite-length)
และสมการขดลวดโซเลนอยด์ทั่วไป (The general)

จากผลข้างต้น เมื่อคำนึงถึงการสร้างได้ง่ายและลดการใช้วัสดุ ในขั้นต่อไปผู้วิจัยได้ทดลองสร้างขดลวดปฐมภูมิที่มีความยาว 10 เซนติเมตร เนื่องจากให้สนามแม่เหล็กที่ค่อนข้างมากและคงที่บริเวณกลางขดลวด และให้ค่าสนามแม่เหล็กที่ใกล้เคียงกับขดลวดโซเลนอยด์ยาว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสร้างขดลวดปฐมภูมิที่มีความยาว 10 เซนติเมตร เป็นตัวแทนของขดลวดโซเลนอยด์ยาว สร้างโดยการพันลวดให้มีชั้นตามแนวรัศมีเพียงหนึ่งชั้น เพื่อรักษาเงื่อนไขความยาวของขดลวดให้เท่ากัน จึงใช้เส้นลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีขนาดต่างกันไป งานวิจัยได้สร้างขดลวดปฐมภูมิจำนวน 3 ขนาด คือ 1500 2000 และ 3000 รอบต่อเมตร ตามเงื่อนไขการสร้างดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รูปแบบการสร้างขดลวดปฐมภูมิ

เส้นผ่านศูนย์กลาง ของเส้นลวด D (mm)	ความยาวขดลวด L (m)	จำนวนรอบ N	จำนวนรอบต่อความยาว n (m ⁻¹)
0.60	0.10	150	1500
0.45	0.10	200	2000
0.31	0.10	300	3000

เมื่อขดลวดปฐมภูมิทั้ง 3 ขนาด ได้รับไฟฟ้ากระแสสลับในช่วง 0.28-1.26 แอมแปร์ (ความถี่ 50 เฮิร์ต) จะสร้างสนามแม่เหล็ก สามารถวัดค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางภายในขดลวด ได้ผลดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวด

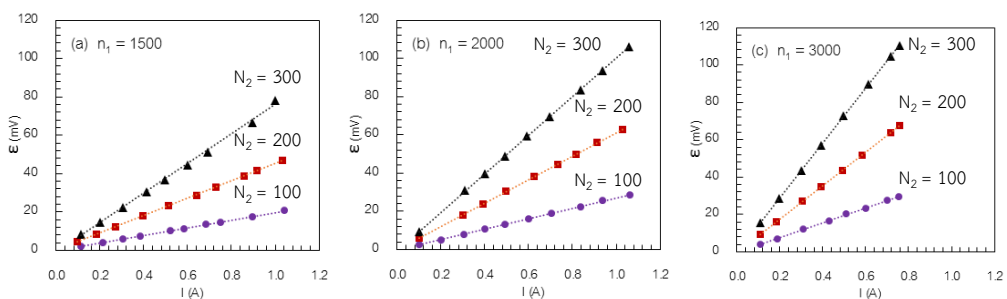
จากภาพที่ 9 สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแปรผันตามปริมาณกระแสไฟฟ้า โดยขดลวดที่มีจำนวนรอบต่อความยาวเพิ่มขึ้นจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กมากขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำในขดลวดโซลินอยด์ยาวในสมการที่ (4) และจากความชันกราฟสามารถหาค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กในอากาศจากการทดลองได้ ($\mu_{0,\text{exp}}$) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าทฤษฎี (μ_0) พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กของขดลวดปฐมภูมิ อยู่ในช่วง 16.01-17.37 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสภาพให้ซึมได้ของสนามแม่เหล็กและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของสภาพให้ซึมได้ของสนามแม่เหล็กในอากาศ

จำนวนรอบต่อความยาวของขดลวด $n \text{ (m}^{-1}\text{)}$	ความชันกราฟ slope (mT/A)	ค่าสภาพซึมซาบ สนามแม่เหล็กจากการทดลอง $\mu_{0,\text{exp}} \text{ (T.m/A)}$	เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน (%err)
1500	1.5824	10.55×10^{-7}	16.01
2000	2.0840	10.42×10^{-7}	17.04
3000	3.1135	10.38×10^{-7}	17.37

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดทุติยภูมิ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดปฐมภูมิ

เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดปฐมภูมิที่มีจำนวนรอบต่อความยาว (n_1) 1500 2000 และ 3000 รอบต่อเมตร จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิความยาว 4.0 เซนติเมตร ที่จำนวนรอบ (N_2) 100 200 และ 300 รอบ ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิเมื่อขดลวดปฐมภูมิมีจำนวนรอบต่อ

ความยาว (n_1) เป็น (a) 1500 (b) 2000 และ (c) 3000 รอบต่อเมตร

จากภาพที่ 10 เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดปฐมภูมิเพิ่มขึ้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิจะมีค่ามากขึ้น โดยขดลวดทุติยภูมิที่มีจำนวนรอบการพันสูงขึ้นไปจะสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้มากขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (5) เมื่อขดลวดปฐมภูมิมีจำนวนรอบต่อความยาว (n_1) สูงขึ้นในภาพที่ 10 (b) และ 10 (c) ทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำรวมของขดลวดที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (7)

เมื่อนำค่าความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีในสมการที่ (7) สามารถคำนวณค่าความเหนี่ยวนำรวมจากการทดลองได้ เมื่อเทียบกับค่าจากทฤษฎี $M = n_1 N_2 A_2 \mu_0$ และสามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความเหนี่ยวนำรวมของชุดขดลวดได้ในช่วง 0.71 – 14.22 เปอร์เซ็นต์ ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของชุดทดลองเมื่อขดลวดปฐมภูมิมีจำนวนรอบต่อความยาว (n_1) 1500 2000 และ 3000 รอบต่อเมตร และขดลวดทุติยภูมิมีจำนวนรอบ (N_2) 100 200 และ 300 รอบ

n_1	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าความเหนี่ยวนำรวม		
	$N_2 = 100$	$N_2 = 200$	$N_2 = 300$
1500	10.56	1.03	14.22
2000	10.24	1.82	11.11
3000	12.09	0.71	8.53

4.3 ผลการประเมินคุณภาพชุดขดลวดเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4 คุณภาพชุดขดลวดเหนี่ยวนำ

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	ระดับคุณภาพ
1. ด้านลักษณะทางกายภาพ	4.78	0.26	ดีมาก
2. ด้านลักษณะการใช้งาน	4.61	0.36	ดีมาก
3. ด้านการนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอน	4.67	0.23	ดีมาก
4. ด้านการบำรุงรักษาและซ่อมแซม	4.80	0.35	ดีมาก
ค่าเฉลี่ย	4.72	0.30	ดีมาก

โดยภาพรวมชุดขดลวดเหนี่ยวนำมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.72, S.D. = 0.30$) และมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมากทั้ง 4 ด้าน โดย ด้านการบำรุงรักษาและซ่อมแซม มีคะแนนเฉลี่ยมากที่สุด ($\bar{X} = 4.80, S.D. = 0.35$) รองลงมาเป็นด้านลักษณะทางกายภาพ ($\bar{X} = 4.78, S.D. = 0.26$) ด้านการนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอน ($\bar{X} = 4.67, S.D. = 0.23$) และ ด้านลักษณะการใช้งาน ($\bar{X} = 4.61, S.D. = 0.36$) ตามลำดับ

5. สรุปผลการวิจัย

ชุดขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย (1) ขดลวดปฐมภูมิที่พันขดลวดแบบชั้นเดียว เส้นผ่านศูนย์กลางแกน 6.0 เซนติเมตร ความยาวขดลวด 10 เซนติเมตร จำนวน 3 ขด มีจำนวนรอบต่อความยาว 1500 2000 และ 3000 รอบต่อเมตร เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ สามารถเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กได้สอดคล้องกับสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ยาว โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 16.01 - 17.37 เปอร์เซ็นต์ และ (2) ขดลวดทุติยภูมิ มีเส้นผ่านศูนย์กลางแกน 2.2 เซนติเมตร ความยาวขดลวด 4 เซนติเมตร จำนวน 3 ขด มีจำนวนรอบของขดลวด 100 200 และ 300 รอบ โดยขดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประกอบเป็นชุดทดลองการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $\mathcal{E}_{rms} = n_1 N_2 A_2 \mu_0 \omega I_{rms}$ มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.71 - 14.22 เปอร์เซ็นต์ และมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก

6. อภิปรายผล

ขดลวดปฐมภูมิที่สร้างขึ้นสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กจากขดลวดโซเลนอยด์ยาว โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 17.04 - 17.91 เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อนส่วนมากเกิดเนื่องมาจากความยาวของขดลวดที่ไม่มากพอเห็นได้ว่าที่ความยาว 15 เซนติเมตรนั้นสอดคล้องกับขดลวดโซเลนอยด์ยาวมากกว่า และความคลาดเคลื่อนส่วนน้อยอาจเกิดจากการสูญเสียจากกระแสกระแสไหลวน และจากความต้านทานในขดลวดซึ่งเห็นได้จากเมื่อจำนวนรอบต่อความยาวของขดลวดมากขึ้นมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ชุดลวดเหนี่ยวนำที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประกอบเป็นชุดทดลองการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของชุดลวดปฐมภูมิ ชุดลวดทุติยภูมิ และของระบบการจ่ายไฟฟ้า การวัดปริมาณต่างๆ รวมกัน เมื่อใช้ชุดลวดทุติยภูมิ $N_2 = 200$ รอบ กับชุดลวดปฐมภูมิทั้งสามขนาดจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่า $N_2 = 100$ และ 300 รอบ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเกิดการชดเชยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของชุดลวดทั้งสองอย่างพอเหมาะจึงทำให้ผลทดลองมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรวมอยู่ในช่วง 0.71 ถึง 1.82 เปอร์เซ็นต์ และชุดลวดปฐมภูมิที่มี $n_1 = 3000$ รอบต่อเมตร จะทำให้ชุดลวดเหนี่ยวนำมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดคือ 0.71 เปอร์เซ็นต์ โดยรวมชุดลวดที่พัฒนาขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.71 ถึง 14.22 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ ทวีชัย เชื้อจีน (2553) ที่ได้สร้างอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของชุดลวด ซึ่งใช้หลักการในการหาค่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเช่นเดียวกันพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน

ชุดชุดลวดเหนี่ยวนำที่พัฒนาขึ้นเมื่อนำไปประกอบเป็นชุดทดลองมีคุณภาพอยู่ในระดับดีมาก เนื่องจากสามารถสร้าง ใช้งาน และบำรุงรักษาได้ง่าย อีกทั้งให้ผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎี มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ชุดชุดลวดที่พัฒนาขึ้นนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับครูอาจารย์ในการสร้างชุดทดลองเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในชั้นเรียนทดแทนการจัดซื้อชุดทดลองที่มีในท้องตลาดได้ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- ชญานิศ ทองมาก. (2553). *อุปกรณ์หัววัดฮอลล์ที่ผลิตขึ้นสำหรับการเรียนการสอนฟิสิกส์ เรื่อง สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านลวดตัวนำตรงและขดลวดโซลินอยด์*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ดวงฤดี ราชีบุษย์. (2549). *กรวยประสบการณ์ของ เอ็ดการ์ เดล*. เข้าถึงได้จาก <https://www.gotoknow.org/posts/42824>.
- ศุภกร กตาทิการกุล สุเจนต์ พรหมเหมือน และ ปิติ พานิชายุนนท์. (2556). ขุดทดลองแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อลวดตัวนำ กระแส. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ*, 16 (1), 9 – 15.
- ทวีชัย เชื้อจิ้น. (2553). *การสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำ*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ :มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- นันทนัช วัฒนสุภิญโญ. (2563). การพัฒนาชุดทดลอง เรื่อง กระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับใช้ในการสอนวิชาฟิสิกส์ เพื่อส่งเสริมผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักศึกษา ระดับปริญญาตรี. *วารสารศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร*, 22(1), 109-122.
- พวงรัตน์ ทวีรัตน์. (2540). *วิธีการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์* (7th ed.). สำนักทดสอบทางการศึกษาและจิตวิทยา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร.
- สมภพ สุขเฉลิม และอมร เทศสกุลวงศ์. (2560). การศึกษาและพัฒนาชุดปฏิบัติการการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 19(3), 101-107.
- รัตติกานต์ ยะกะชัย นวพร น้อยนารถ และพันธุ์ศักดิ์ เกิดทองมี. (2565). การพัฒนาชุดสาธิตการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ในรายวิชาฟิสิกส์. *วารสารครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 1 (1), 93-100.
- Hugh D. Young & Roger A. Freedman. (2011). *University physics with modern physics*. (13th ed.). United States of America: Addison-Wesley.

Philippe, B., Kaleonui, H., and Jesse, G. (2014). Magnetic Fields at the Center of Coils. *The physics teacher*, 52, 560.